

愛知工科大学紀要

工学部・愛知工科大学自動車短期大学

第18巻

Bulletin of Aichi University of Technology

AUT

愛知工科大学紀要 第18巻

目 次

研究論文

基礎教育科目の満足度向上と基本3要件に資する因果関係	荒川俊也	1
非線形荷重伝達挙動を考慮したリベット継手の有限要素モデル化	近藤篤史	9
Convolutional Neural Network を用いた楽曲からのアーティスト識別および類似アーティストの推定	堀 弘志, 實廣貴敏	15
ノッチフィルタが広帯域雑音の音像定位に及ぼす影響	山高正烈, 坂本修一, 鈴木陽一	21
ISO スチール・ホイール用ホイール・ボルトの締め付けトルクと軸力の関係に及ぼす潤滑状態の影響	服部幸廣, 甲村一貴, 巨藤 誠	27
研究ノート		
未知入力オブザーバ適用による電動車椅子の駆動力推定	梶谷満信, 阿部己和	35
追従制御検討ための電動車いすのSIMULINK モデル	阿部己和, 梶谷満信	41
確率・統計の範疇		
—数理統計学, 熱力学・統計力学, 量子力学に共通した基礎概念—	高橋義則	47
オンデマンド型動画資料を用いたオンライン授業における形成的評価の検討	尾関智恵, 尾林史章	61
Unary Prefix と CBT 符号のSuffix をもち, Prefix の各Step を調整できる可変長符号の検討	吉田 茂, 箕浦征矢	69

解説・総説

オンライン教育の捉え方と自律的な学習を支える要因
..... 尾関智恵 77

報告

コロナ禍に於ける学習成果に関する考察
..... 鵜飼達也 81

業績リスト (2020.1 ~ 2020.12)

研究論文

基礎教育科目の満足度向上と基本3要件に資する因果関係

荒川 俊也*

(2020年9月30日受理)

Causal Relation of Remedial Education for Improving Students Satisfaction and Basic Three Requirements for Engineers

Toshiya ARAKAWA*

(Received September 30, 2020)

Abstract

To effectively and efficiently acquire the three basic skills required of an engineer, i.e., motivation, humanity, and ability, it is vital to consider the importance of acquiring these three basic skills immediately after entering an university. For this reason, remedial education, which is aimed at new university students, plays a crucial role. In this study, we analyzed the causal relationships among the class evaluation questionnaires based on their results from 2013 to 2018 using a Bayesian network, which is a probabilistic graph structure model. Findings suggest that group work does not work well for students with relatively low academic abilities. Moreover, as students achieve higher grades, achievement goals and syllabus-based teaching may lead to the development of the three basic skills.

キーワード: 基礎教育, 3つの基礎力, ベイジアンネットワーク

Keywords : Remedial education, Three basic skills, Bayesian network

1. はじめに

本論は、基礎教育科目の授業評価アンケート項目の因果関係を基にして、学生の満足度向上のための要件について検討したものである。

リメディアル教育とは、大学で行われる、大学レベル以下のコースのことを指し、主に、大学レベルの教育を受けるための準備が不十分だった学生を、単位取得可能なまでに引き上げることを目的としている^[1]。そのため、リメディアル教育の目的は、大学教育を受けるための必要かつ主要なスキルを学生に提供することである^[2]。

筆者が所属する愛知工科大学では、モノづくりに特化した人材育成とモノづくりに関する研究を主として行っている大学である。そのため、リメディアル教育(本学では基礎教育と称している)では、数学・物理の基礎力、作文力、プレゼンテーション力など、モノづくりに必要な基礎力を向上させることを目的としている。また、愛知工科大学では、工学に必要とされる3つの基礎力、「意欲」「人間性」「能力」の向上にも力を入れている。学生は、この3つの基礎力をベースに、モノづくりに

に必要な「設計力」と「製作力」を身につけることが求められている^[3]。この3つの基礎力の向上については、以下のように説明されている^[3]。

(1) 「意欲」の向上

愛知工科大学での「学び」と「社会へのつながり」を意識し、「学び」への意欲喚起をはかると共に職業観を醸成する。授業では、さまざまな課題に対して自分の考えを持って臨み、グループでの調査や議論を通してまとめ、発表することを基本としている。自己の意識を高め、実行することで「意欲」を向上させる。

(2) 「人間性」の向上

さまざまな科目で協同学習を取り入れている。課題やテーマに対してグループで議論し、方向性を決めて取り組むもの、演習問題などをお互いが教えあうものなど、科目の特性によりスタイルは異なる。自らの主体性を持ち、お互いを尊重し、協調しながら取り組むことで「人間性」を向上させる。

(3) 「能力」の向上

毎日の授業では、単なる知識修得にとどまらず、考え、まとめ、問題解決に向けた力を醸成すること

* 愛知工科大学工学部機械システム工学科, 〒443-0047 愛知県蒲郡市西迫町馬乗 50-2

Department of Mechanical Systems Engineering, Aichi University of Technology, 50-2 Manori, Nishihasama-cho, Gamagori-shi, Aichi 443-0047, Japan

に重点を置き、ワークシートなどに取り組む。授業と授業に対する事前学習、復習をセットとし、学びへの関心を高めて取り組むことを通して「能力」を向上させる。

これら 3 つの基礎力を効果的かつ効率的に身につけるためには、大学に入学した直後からこの 3 つの基礎力を身につけることの重要性を念頭に置いておく必要がある、このことから、大学の新生を対象とした教育であるリメディアル教育は重要な役割を担っている。

愛知工科大学では、半年毎に授業評価アンケートを実施している。このアンケートは、講義に対する学生の満足度、講義の進め方、3 つの基礎力が向上したか否か、などを調査することを目的としている。これらのアンケートを調査・分析することで、学生の満足度向上や 3 つの基礎力を効果的かつ効率的に身につけるための方法を見出すことができ、教員の指導力向上にも繋がると考えられる。

本論では、2013 年度から 2018 年度までの授業評価アンケートの結果を基に、確率的グラフ構造モデルの一つであるベイジアンネットワーク(Bayesian Network)を用いて、授業評価アンケートの質問項目間の因果関係を分析した。その結果を踏まえて、新生が 3 つの基礎力を効果的かつ効率的に身につける方法について考察した。

本論は以下の様に構成されている。第 2 節では実験条件について述べ、データとして用いた基礎教育科目の授業評価アンケートの内容や、解析で用いるベイジアンネットワークについて説明する。第 3 節では、授業評価アンケートに対してベイジアンネットワークを適用した結果について述べると共に考察する。第 4 節はまとめである。

2. 実験条件

ここでは、本研究における実験条件について説明する。

2.1 解析データ

2013 年度から 2018 年度の 6 年間で実施された、基礎教育科目の授業評価アンケートを、本論における解析対象とする。学生は授業の最終回到授業評価アンケートに回答するよう指示されている。下記の項目が授業評価アンケートの内容である。

Q1(満足度) 全体として満足のいく授業・演習でしたか

Q2(意欲) 意欲的に授業に取り組みましたか

Q3(学修時間) この科目の授業時間以外での学修

時間(予習・復習など)は 1 週間あたり平均してどのくらいですか

Q4(授業計画) 授業計画(シラバス)・授業の狙いや到達目標について説明がありましたか

Q5(評価) 成績評価の基準について説明がありましたか

Q6(内容) 授業・演習はシラバスに沿った順序・内容でありましたか

Q7(説明) 教員の話し方や声の大きさ、説明の仕方は明確でありましたか

Q8(提示) 授業・演習内容の提示方法(板書やプロジェクターなどの提示)はわかりやすかったですか

Q9(熱意) 教員の熱意は感じられましたか

Q10(協同学修) グループワーク(協同学習)等を取り入れ学生同士で教え合う授業が行われていましたか

Q11(授業展開) ワークシート等を取り入れ、予習、授業、復習という連携性を持たせた授業展開でありましたか

Q12(対応) 質問に対する教員の対応はどうでしたか

Q13(理解度) あなたはこの授業・演習の内容をどの程度理解できましたか

Q14(教材) 教材は授業・演習の理解に役立ちましたか

Q15(目標達成) 科目の到達目標を達成できましたか

Q16(意欲向上) あなたはこの授業によってどの程度意欲が向上したと思いますか

Q17(人間性向上) あなたはこの授業によってどの程度人間性が向上したと思いますか

Q18(能力向上) あなたはこの授業によってどの程度能力が向上したと思いますか

それぞれの項目は、「全くそう思わない(理解できなかった、向上しなかった)」を 1 点、「どちらでもない」を 3 点、「非常にそう思う(理解できた、向上した)」を 5 点とするリッカートの 5 点法で評価した。但し、Q3 については、「2 時間以上」を 5 点、「1 時間以上 2 時間未満」を 4 点、「30 分以上 1 時間未満」を 3 点、「30 分未満」を 2 点、「していない」を 1 点としている。

本論では、学生が所属するクラス毎の特徴を評価する。入学時に実施するプレイスメントテストの結果に応じて、「語学」「数学」「物理」の科目について、学生は 6 つのクラス(LA, A, B, C, D, E)の何れかに分類されている。A クラスは語学や数学などを苦手としている学生向けの最下位クラスであり、E クラスは語学や数学を得意としている学生向けの最上位クラスである。LA クラスは「数学」にのみ設置されている、義務教育未達レベルの学生向けのクラスである。本論では、A,

B クラスを纏めて AB クラス, C, D クラスを纏めて CD クラスとし, 6 つのクラスではなく 4 つのクラス(LA, AB, CD, E)として検討する. なお, 基礎教育の科目には 2 年生以上を対象とした科目もあるが, 2 年生以上を対象とした科目では能力別にクラス分けがされていない. 本論では, クラス別の解析を行うために, 2 年生以上を対象とした科目は解析対象から除外した.

以上を踏まえて, 表 1 に, それぞれのクラスについて, 対象となる授業の回数を示す.

Table 1 # of each classes.

クラス	授業数
LA	62
AB	209
CD	90
E	21

2.2 ベイジアンネットワーク^[4]

ベイジアンネットワークは確率的グラフィカルモデルの一つであり, グラフを構成する確率変数の同時確率分布を, 確率変数の条件付き確率の積で表現することができる. グラフを構成する確率変数 $X = X_1, \dots, X_N$ をノード(node)と呼び, ノード同士の確率的な依存関係は, アーク(arc)と呼ばれる矢印で結ばれることによって表現される.

例えば図 1 の場合, それぞれの確率変数の依存関係は条件付き確率を用いて, X_2 については $P(X_2|X_1)$, X_3 については $P(X_3|X_1, X_2)$ と定義される. したがって, 図 1 のベイジアンネットワークにおける確率変数の同時分布は,

$$P(X_1, X_2, X_3) = P(X_3|X_1, X_2)P(X_2|X_1)P(X_1)$$

と定義される.

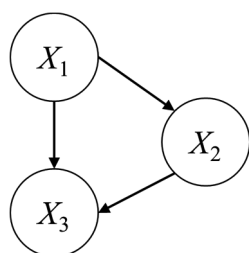


Figure 1 An example of Bayesian network.

ベイジアンネットワークのモデル構築は, 知識駆動型とデータ駆動型の 2 種類が存在するが, 本論ではデータ駆動型によるモデル構築を行った. さらに, データ駆動型によるモデル構築には, 制約ベース, スコアベース, ハイブリッドの 3 種類のアルゴリズムがあり, 本論

ではスコアベースアルゴリズムを用いた.

スコアベースアルゴリズムは, スコア関数が最大となるような有向グラフ(directed acyclic graph: DAG)を探索するアルゴリズムであり, 候補となる複数の構造の DAG に対して, スコア関数に応じたスコアが割り当てられる. 本論ではスコア関数に BIC (ベイズ情報量規準, Bayesian information criterion)を用いた. データセット D から得られるグラフ構造 g のスコアを $Score(g|D)$ とすると, 以下の式を満たすようなグラフ構造 G^* を探索するアルゴリズムである.

$$G^* = \operatorname{argmax} Score(g|D)$$

代表的なスコアベースアルゴリズムの例として, Greedy Hill Climbing アルゴリズムが挙げられ, 本論でも, Greedy Hill Climbing アルゴリズムを用いた.

ベイジアンネットワークでは, その構造学習において, 専門家の知見や事前に明らかになっている因果関係を事前情報としてモデルに組み込むことができる. 例えば, ある疾病の発症に関するベイジアンネットワークに関するモデルを, 性別, 年齢, 喫煙習慣, 飲酒習慣, 疾病発症を確率変数として構築することを考える. このとき, 喫煙習慣が年齢に影響することは考えにくいので, 構造学習の際に喫煙習慣→年齢のアーキが出現しないように制約条件を加えることが可能である. これにより, 得られるグラフ構造をより実際の事象に即した, 解釈しやすいモデルに近づけることができる.

2.3 解析

解析には R version 3.6.0 を使用し, ガウシアンベイジアンネットワークの構築には bnlearn パッケージを使用した. ガウシアンベイジアンネットワーク構築にあたっては, 以下のようにアーキの制約条件を検討・設定した.

- (1) Q1(満足度), Q6(内容), Q17(人間性向上)および Q18(能力向上)は原因ではなく結果とする. 学生の満足度や 3 つの基礎力は教育の成果に基づく指標だからである.
- (2) Q4(授業計画), Q5(評価), Q6(内容)は結果ではなく原因とする. 授業運営はシラバスに基いて為されるためである.
- (3) Q10(協同学修), Q11(授業展開)は原因ではなく結果とする. 学生の満足度や意欲はグループワークやワークシートによる学習による結果だからである.
- (4) Q14(教材)と他の質問項目間の因果関係は不明瞭であるが, Q14(教材)は Q1(満足度), Q2(意欲), Q3(学修時間), Q6(内容), Q7(説明), Q8(提示), Q9(熱意), Q15(目標達成)の原因であ

るとする。学生は使用する教科書によって学習意欲を向上し、授業を理解するようになって考えられるためである。また、使用する教科書によって理解度が増すきっかけとなれば、教員の話を理解できるようになると考えられるためである。加えて、授業で使う教科書は授業目標達成に寄与すると考えられる。

- (5) Q14(教材)は Q2(意欲), Q3(学修時間), Q4, Q5(評価), Q6(内容), Q7(説明), Q8(提示)の結果であるとする。学生の理解度や意欲が増し、教員の話を理解できるようになった結果、使用教科書が有用であると感じるようになって考えられるためである。
- (6) Q14(教材)場合と同様に、Q15(目標達成)と他の質問項目間の因果関係は不明瞭であるが、

Q15(目標達成)は Q1(満足度)のみの原因であるとする。もし学生が、授業の目的が真に達成されたと感じたのであれば、学生もその授業に対して満足感を得ると考えられるためである。

- (7) Q15(目標達成)は Q2(意欲), Q3(学修時間), Q6(内容)の結果であるとする。授業の目的は、学生の意欲向上であり、また、学生に勉強をさせることと考えられるためである。

3. 解析結果・考察

解析結果を図2に示す。なお、図2では、(a)から(d)は、それぞれ、LA クラス, AB クラス, CD クラス, E クラスのネットワーク構造を示す。

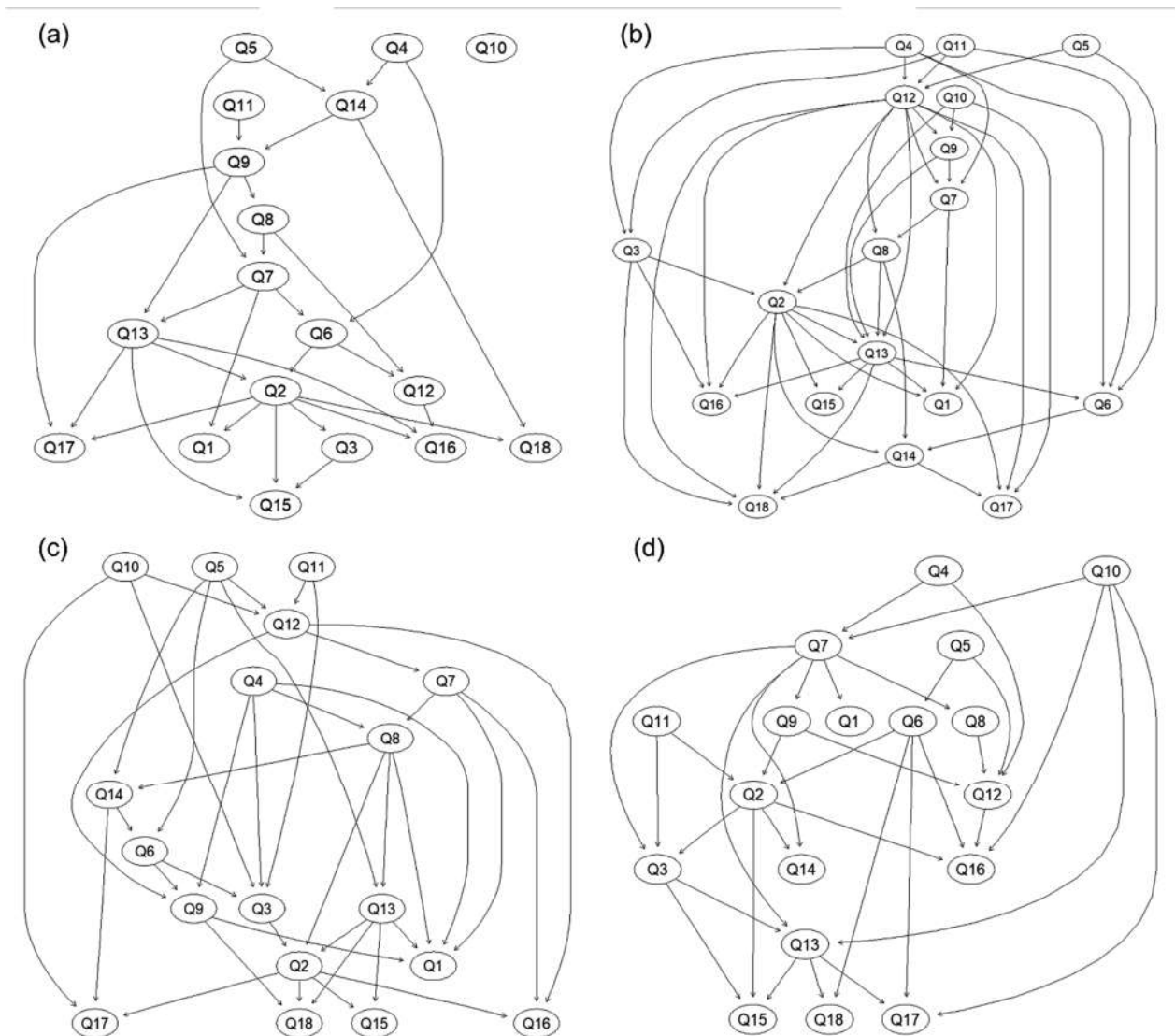


Figure 2 Results of analysis based on Bayesian network. (a) LA class, (B) AB class, (C) CD class and (D) E class.

3.1 LA クラスの解析結果と考察

次のような特徴が見られる。

- (1) Q10(協同学修)は他の項目との因果関係がない。
- (2) Q2(意欲), Q7(説明)が Q1(満足度)の原因になっている。
- (3) Q2(意欲), Q12(対応), Q13(理解度)が Q16(意欲向上)の原因になっている。
- (4) Q2(意欲), Q9(熱意), Q13(理解度)が Q17(人間性向上)の原因になっている。
- (5) Q2(意欲), Q14(教材)が Q18(能力向上)の原因になっている。

このことから、LA クラスの学生については、グループワークは満足度の向上など学習に関する影響がないことがわかる。つまり、LA クラスの学生に対しては、グループワークの実施は意味がない可能性が示唆される。

また、(2)~(5)より、Q2(意欲)が、満足度および3つの基礎力向上のための共通する項目となっている。LA クラスの学生については、まずは意欲的に授業に取り組ませることが重要であることが示唆される。また、Q13(理解度)が Q16(意欲向上)と Q17(人間性向上)に関する項目であることがわかる。Q13(理解度)に対しては Q7(説明)と Q9(熱意)が原因となっている。従って、LA クラスの学生の意欲を引き出し、人間性向上のためには、教員の声の大きさや資料の見やすさに配慮し、また、熱意を見せることが重要である。比較的学力の低い学生については、学問の本質的な内容を指導するのではなく、まずは、教員が、学生に対して、熱意をもって指導しているという体を見せることにより、学生がそれに感化されることに起因するものと考えられる。

3.2 AB クラスの解析結果と考察

次のような特徴が見られる。

- (1) Q2(意欲), Q7(説明), Q12(対応), Q13(理解度)が Q1(満足度)の原因になっている。
- (2) Q2(意欲), Q13(理解度)が Q16(意欲向上)の原因になっている。
- (3) Q2(意欲), Q10(協同学修), Q12(対応), Q14(教材)が Q17(人間性向上)の原因になっている。
- (4) Q2(意欲), Q3(学修時間), Q12(対応), Q13(理解度), Q14(教材)が Q18(能力向上)の原因になっている。

意欲的に取り組むことが満足度向上に繋がることは LA クラスと同様である。一方で、LA クラスとは異なり、Q12(対応), Q13(理解度), Q14(教材)が、満足度および3つの基礎力向上のための共通する項目となっている。また、Q10(協同学修)が Q17(人間性向上)

の原因となっており、グループワークが3つの基礎力のうち「人間性」の向上に寄与していることが示唆される。また、Q12(対応)が、Q17(人間性向上)および Q18(能力向上)の原因となっていることも興味深い。LA クラスとの差異として、「自分が、どこがわからないか理解し、それを教員に聞く」ということができる、という点にあると考えられる。そして、「質問をする」ことによって、コミュニケーション力が向上され、「人間性」が養われ、自らの疑問を解決できるため「能力」の向上に繋がるものと考えられる。また、Q14(教材)が Q17(人間性向上)および Q18(能力向上)の原因となっていることも特徴である。AB クラスの学生は、LA クラスの学生ほどではないが、勉強の勘所を把握できていない学生も一定層いると考えられるため、教科書を忠実にこなすということが、Q18(能力向上)、つまり、基本3要件の「能力」の向上に繋がったと考えられる。しかし、Q17(人間性向上)、つまり、基本3要件の「人間性」の向上に繋がった原因については現状把握できない。今後引き続き検討する。

3.3 CD クラスの解析結果と考察

次のような特徴が見られる。

- (1) Q4(授業計画), Q7(説明), Q8(提示), Q9(熱意), Q13(理解度)が Q1の原因になっている。
- (2) Q2(意欲), Q7(説明), Q12(対応)が Q16(意欲向上)の原因になっている。
- (3) Q2(意欲), Q10(協同学修), Q14(教材)が Q17(人間性向上)の原因になっている。
- (4) Q2(意欲), Q9(熱意), Q13(理解度)が Q18(能力向上)の原因になっている。

Q1 について、LA クラス、AB クラスとは異なり、Q4(授業計画)が原因となっていることが興味深い。CD クラス以上はいわゆる「優秀な学生」と位置づけられるが、優秀な学生になると、授業で何を・どこまで・どのように学ぶか、説明を受け、学習過程を意識することを重視しているものと考えられる。そのため、Q4(授業計画)のように、学習の狙いや到達目標の達成・未達成が満足度に繋がるものと考えられる。また、Q12(対応)が Q16(意欲向上)の原因となっているが、AB クラスとは異なり、Q17(人間性向上)の原因にはなっていない。優秀な学生になると、ある程度のコミュニケーション力は身につけているため、教員に質問をする行為自体は普通のことであり、質問に対して適切な回答を得ることで、自身の学習意欲向上に繋げている可能性が考えられる。

3.4 E クラスの解析結果と考察

次のような特徴が見られる。

- (1) Q7(説明)が Q1(満足度)の原因になっている。
- (2) Q2(意欲), Q6(内容), Q10(協同学修), Q12(対応)が Q16(意欲向上)の原因になっている。
- (3) Q6(内容), Q10(協同学修), Q13(理解度)が Q17(人間性向上)の原因になっている。
- (4) Q6(内容), Q13(理解度)が Q18(能力向上)の原因になっている。

E クラスは極めて優秀な学生からなるクラスであり、すでに勉強のやり方などは理解している学生がほとんどである。そのため、自主的に学ぶ姿勢が身についていることがあり、授業に期待することは、自身の理解や記憶の定着のために、教員がわかりやすく説明することのみであると考えられる。全体的には、Q6(内容), Q10(協同学修), Q13(理解度)が3つの基礎力に影響することが示唆される。まず Q10(協同学修)の影響については、グループワークによって、自らの能力を確認することもでき、また、他者との協調により学習を進めることができる。そして、学力が高い学生ほどグループワークによる恩恵があると考えられる。Q13(理解度)については、Q7(説明)と Q10(協同学修)が Q13(理解度)の原因になっていることも併せて考えると、グループワークの実施や教員の説明の仕方次第で理解力が向上するということから、他者の意見を尊重する上で、よく聞き理解するということが人間性が向上し、能力も向上するということが推測される。残る Q6(内容)の影響については、シラバスに沿った順序であることから目標を持って勉強できる、という意味で、意欲向上に寄与していることは考えられるが、現段階では人間性向上に寄与している理由が把握できない。今後引き続き検討する。

3.5 考察のまとめ

3.1 節から 3.4 節の考察をまとめると、次のようになる。

- (1) グループワークについては、比較的学力の低い学生については、満足度や基本 3 要件の向上に何の影響も及ぼしていない。一方で、学力が高くなるにつれて、グループワークが、満足度や基本 3 要件の向上に寄与する傾向が示唆される。
- (2) 教員の話し方や声の大きさは満足度に与える影響は大きい。
- (3) 成績があまり芳しくない AB クラスの学生は、教員に質問をし、その対応によって、基本 3 要件の向上が見込めると考えられる。成績があまり芳しくないと言え、「自分がどこがわからないのか」という意識を持っており、疑問を解決するために教員に質問する、ということができ、それによって基本 3 要件の向上が見込めると思われる。
- (4) CD クラスや E クラスなど、比較的学力の高い学生

になるに従って、科目の到達目標の説明がなされていたり、シラバスに沿った授業であることが、満足度や基本 3 要件に与える影響が大きくなると示唆される。これは、成績の優秀な学生は、自ら学ぶ姿勢が身につけているものの、授業で何を・どこまで・どのように学ぶかを把握したいことに起因していると考えられる。

4. まとめ

本論では、愛知工科大学における、2013 年度から 2019 年度までの 6 年間の基礎教育科目の授業評価アンケート結果を基にして、ベイジアンネットワークでモデルを作成し、このモデルを解析した。本論では初年次の学生のクラス毎の特徴を解析した。3.5 節で述べたことを基にすると、特に、LA クラスと AB クラスの学生が、更に上のクラスに上がる、つまり、学力を伸ばすために必要なことがらを提案すると、次のようになる。

- (1) LA クラスの学生には、AB クラスの学生が備えている、「何がわからない」かを把握した上で、積極的に教員に質問できるような教育をする。
- (2) AB クラスの学生には、CD クラスの学生が備えている、まずは自ら進んで学習をする姿勢を身に付けさせる。加えて、15 回の授業がそのような流れで進み、どのような知識を習得することが望まれているのか、授業の流れや全体像を把握できるような教育をする。

今後は、基礎教育の科目毎で解析を行い、科目毎の特徴や学生の満足度、基本 3 要件を向上させるための要件などを検討する。

謝辞

データ入力を手伝って下さった荒川研究室 OB の川合隆太君と荒川研究室事務補佐員の杉浦和美さんに感謝の意を表します。

参考文献

- [1] Alliance for Excellent Education, “Saving Now and Saving Later: How High School Reform can reduce the Nation’s Wasted Remediation Dollars,” 2011, (Retrieved 11 August, 2020, <http://www.ncacinc.com/sites/default/files/media/research/SavingNowSavingLaterRemediation.pdf>)
- [2] T.O. Luoch, “Readiness: The Key Factor in Remedial Teaching and Learning,” The European Journal of Social and Behavioural

Sciences, vol.18, no.4, pp.2281-2297, 2017.

- [3] 愛知工科大学, “AUT 教育,” 愛知工科大学ホームページ, (2020 年 8 月 11 日参照, <https://www.aut.ac.jp/univ/outline/idea/>)
- [4] 佐々木健佑, 岡田幸彦, “ベイジアンネットワークへの役割期待,” オペレーションズ・リサーチ, vol.65, no.6, pp.299-303, 2020.

研究論文

非線形荷重伝達挙動を考慮したリベット継手の有限要素モデル化

近藤 篤史*

(2020年10月1日受理)

A simplified finite element model of riveted joints with consideration of nonlinear load transfer characteristics

Atsushi KONDO*

(Received October 1, 2020)

Abstract

Load-transfer characteristics of riveted joint have been experimentally and numerically studied. This study focuses on relations between applied load and relative displacement of fastened plates. Process of tensile test of a single-row joint which consists of squeezing of the rivet and application of tensile load to the joint was numerically analyzed. Detailed finite element analyses with consideration of contact condition and large strain plasticity of the material were conducted. The load-relative displacement behavior observed in experiments and the finite element analysis agreed well. A simplified analysis of multiple-row joints was conducted with consideration of characteristics of the joint obtained from the experiments. Distributed loads to the multiple rivets in the simplified analysis were almost coincide to those of the detailed analysis when the applied load was maximum. Computational cost of the simplified analysis was significantly reduced to about 1/6 of the detailed analyses.

キーワード：有限要素法，構造設計，継手，航空機構造

Keywords : Finite element method, Structural design, Joints, Aircraft structure

1. 緒言

航空機の設計では，構造健全性を確保するために運航中の損傷許容性を考慮することが求められる．構造健全性を評価する数値解析において，損傷が及ぼす影響を全機体レベルで直接的に検討することは，計算コストの上で困難であるため，一般に図1に示すような境界条件を一致させた複数のスケールの解析が行われる．損傷などの非線形挙動は，計算コストの抑えられた最下位のスケールの解析で考慮されることが多い[1]．

機体構造には様々な箇所にも損傷が発生しうるが，構造部材間の荷重はリベットなどの継手を介して局所的に伝達されるため，継手は特に損傷の起点になりやすい箇所といえる．したがって，航空機の損傷許容性を評価するための解析では，継手の荷重伝達挙動を正確に考慮することが必要である．また，複数の構成要素における損傷が機体に与える複合的な影響を考慮するためには，より高次のスケールの解析で損傷を考慮することが求められる．しかしながら，機体構造全体における継手の挙動を計算コストおよび精度の点で

合理的にモデル化できる手法は，著者らの調査の時点では提案されていない．

本研究では，機体全体のように大規模な構造物に対しても，モデル化の工数や計算コストを大きく増加させることなく，継手の挙動を正確に反映した構造解析を行うことのできる手法について検討する．

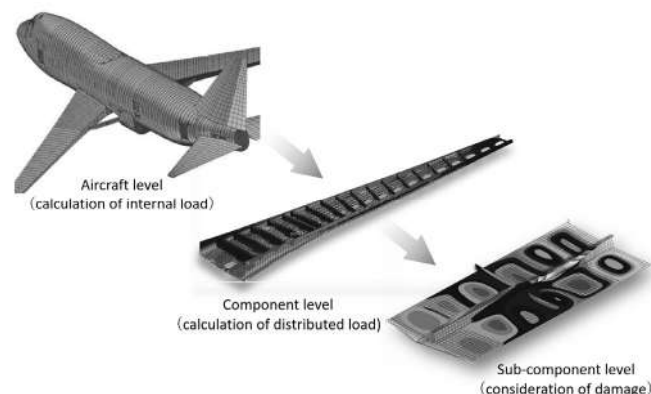


Fig. 1 Practical FE Analyses for the design of an aircraft structure[2]

* 愛知工科大学工学部機械システム工学科，〒443-0047 愛知県蒲郡市西迫町馬乗 50-2
Department of Mechanical Systems Engineering, Aichi University of Technology, 50-2 Manori, Gamagori 443-0047, Japan

2. 継手による伝達荷重の定義

Fig. 2 のような一般の継手において、 F_{th} は次式のように伝達荷重を 3 つの因子に分解して考えることを提案した[3].

$$F_0 = F_{jnt} + F_{byp} = F_{br} + F_{fr} + F_{byp} \quad (1)$$

ここで、 F_0 は継手に作用する総荷重、 F_{br} はリベットの軸と孔側面の間のベアリング荷重、 F_{fr} は被締結材間の摩擦力により伝達される荷重、 F_{byp} は被締結材にバイパスされる荷重である. 本研究においても、リベットの伝達荷重を上式で評価する. また、Fig. 3 のような単列継手の場合は、バイパス荷重が存在しないことから、次のように表される.

$$F_0 = F_{br} + F_{fr} \quad (2)$$

F_{fr} は締結後の構造に関して実験的に評価することは困難であるが、有限要素解析においては、クーロンの摩擦法則を用いることにより次式で評価できる.

$$F_{fr} = \sum_{i=1}^{n_{node}} \mu F_n^i \quad (3)$$

ここで、 μ は摩擦係数、 F_n^i は接触面上の i 番目の節点の法線方向の接触反力である.

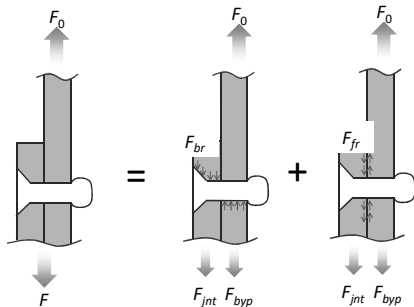


Fig. 2 Definition of loads carried through multiple-row rivet joints

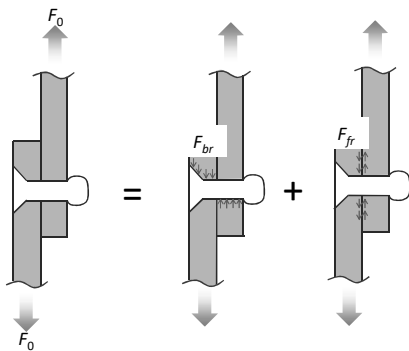


Fig. 3 Definition of loads carried through a single-row rivet joint

3. 実験

3.1 実験装置

継手の荷重－相対変位関係の曲線を得るため、引張り試験を行った[4]. 用いた試験片および試験装置を Fig. 4, 5 にそれぞれ示す. 2 枚の 1.8mm 厚の 2024-T3 アルミ合金板を 20mm × 60mm の大きさに加工し、 $\phi 3.2$ mm の MS20426 AD カウンターサンクヘッドリベットによりシングルラップ結合して試験片を作成した. 摩擦が継手の挙動に及ぼす影響を検討するには、摩擦の有無の条件についてそれぞれ実験を行うことが望ましい. 今回は摩擦の影響が少ない場合の検討を行うため、かしめ力 F_{sq} を十分に小さな 13kN とした. 小型卓上試験機 LSC-2kN(株式会社東京試験機)を用い、1.0 mm/min の一定速度で、約 2kN まで引張り荷重を与えた. 非接触伸びひずみ計 Strainscope (JT トーシ株式会社)を用い、継手の相対変位を計測した. 本システムでは、カメラで撮影された画像を元に上下の評点間の相対変位が逐次計算される. 画像の認識精度を向上させるため、試験片を白色に塗装し、評点として黒丸のマーカを 50mm 間隔で貼付した.

3.2 結果と考察

Fig. 6 に実験により得られた荷重－相対変位関係を示す. 2 本の実線が実験結果を表しており、ほぼ同じ結果を示した. 破線の結果については後述する. 初期領域で相対変位に対して荷重が非線形に増加しているが、2 枚の被締結材が同一平面上にないことによる荷重軸の僅かなずれが原因と考えられる. その後は荷重が約 1.3kN に達するまで荷重にほぼ比例して変位が増加し、さらに荷重を増加させると徐々に剛性が低下した. 摩擦が少なくなる条件としていることから、リベット近傍における局所的な塑性変形が剛性低下に大きく影響していると考えられる.

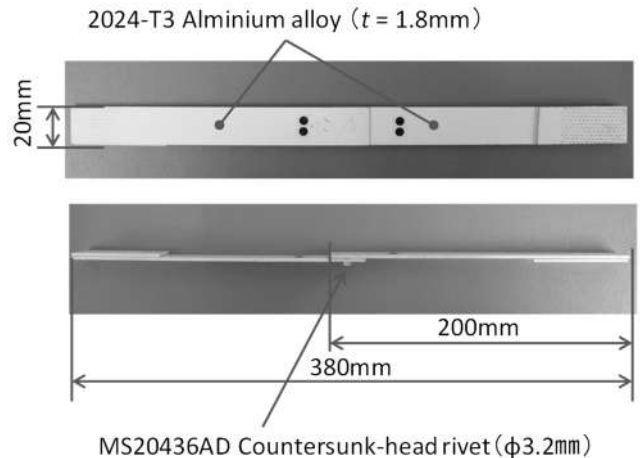


Fig. 4 Configuration of test specimens



CCD camera of the measurement system

Fig. 5 Experimental setup for tensile tests

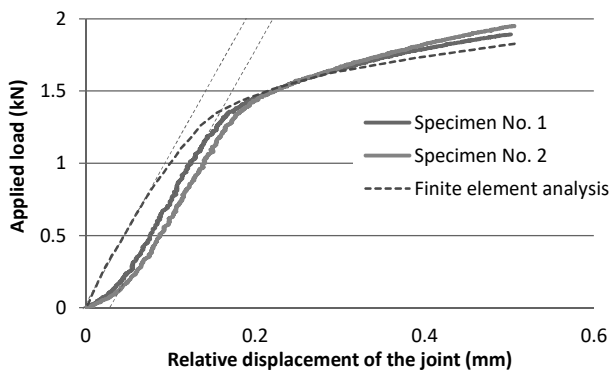


Fig. 6 Relation between applied load and relative displacement where squeezing force $F_{sq}=13\text{kN}$

4. 単列継手の有限要素解析

4.1 解析モデル

Liらは、ソリッド要素を使用した詳細な非線形弾塑性有限要素解析により、継手の引張り試験時の荷重-相対変位関係や孔周辺のひずみ分布を精度よく再現できることを示した[5]。本研究においても同様の解析手法を用いて継手の荷重伝達挙動を検討した。有限要素解析ソフトウェアとしてMSC. Marc 2017を使用した。8節点6面体低減積分要素(タイプ117)を使用し、板の幅方向の対称性を利用した1/2モデルを作成した。接触および塑性による大ひずみを考慮して、リベットのかしめから引張り荷重の負荷までの工程を順次解析した[4]。用いた解析モデルをFig. 7に、材料物性値をTable 1にそれぞれ示す。クーロンの摩擦法則を適用し、摩擦係数 $\mu=0.2$ とした。解析に用いたハードウェアの仕様をTable 2に示す。

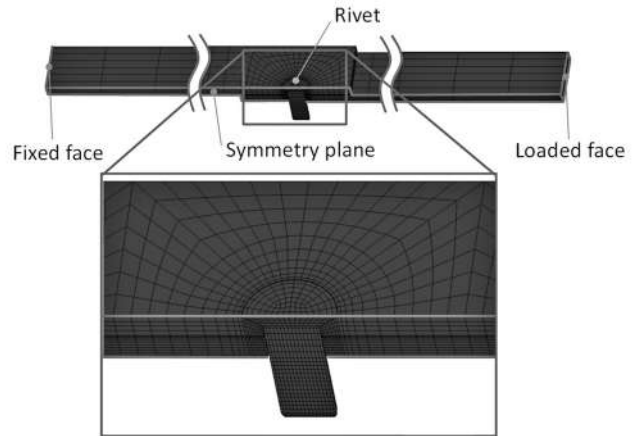


Fig. 7 Detailed model of single-row joint for FEA

Table 1 Material properties used for the FEA

Parameters	MS20426AD rivet	2024-T3 Alloy bare sheet
Young's modulus	71.7 GPa	72.4 GPa
Poisson's ratio	0.33	0.33
Flow stress	$\sigma_{\text{true}} = C (\epsilon_{\text{true}})^m$	$\sigma_{\text{true}} = C (\epsilon_{\text{true}})^m$
Initial yield stress	172 MPa	310 MPa
Hardening Parameters	$C=544 \text{ MPa}, m=0.23$ ($\epsilon_{\text{init}} \leq \epsilon_{\text{true}} \leq 0.02$)	$C=676 \text{ MPa}, m=0.14$ ($\epsilon_{\text{init}} \leq \epsilon_{\text{true}} \leq 0.02$)
	$C=551 \text{ MPa}, m=0.15$ ($0.02 < \epsilon_{\text{true}} \leq 1.0$)	$C=745 \text{ MPa}, m=0.164$ ($0.02 < \epsilon_{\text{true}} \leq 0.1$)
Slope of linear hardening curve		1034MPa ($0.1 < \epsilon_{\text{true}} \leq 1.0$)

Table 2 Specification of a hardware used for the FEA

Hardware specifications	
Manufacturer	Hewlett Packard
Product name	ProDesk 600 G2 SFF
Operating system	Windows 10 Professional
CPU	Core i5-6500 Quad-core 3.20GHz
Memory	PC4-17000 64GB
Storage	500GB Hard disk

4.2 結果と考察

かしめ力 $F_{sq} = 13\text{kN}$ の場合の解析により得られた荷重-相対変位曲線をFig. 6に破線で示す。荷重と相対変位の関係が線形である初期の剛性が実験と解析でほぼ一致しており、同程度の荷重で剛性の低下が開始していることが確認できる。実験と解析において荷重-相対変位曲線が良い一致を示していることから、4.1節の解析モデルの妥当性が示唆される。

次にかしめ力を $F_{sq}=13\text{kN}$ から 52kN の範囲で変化させ、荷重-相対変位曲線に対する影響を検討した。Fig. 8にその結果を示す。破線で示すように、荷重-相対変位曲線の初期にすべてのケースに共通の線形の領域があり、この領域では弾性変形が支配的になっていると考えられる。その後、荷重の増加に伴って剛性が低下し始めるが、リベット近傍の摩擦力以上の荷

重によって 2 枚のアルミ板に滑りが生じ、リベットに塑性変形が生じたと考えられる。また、かしめ力が高いほど剛性低下が開始する荷重が大きくなっている。

この荷重－相対変位関係に対する摩擦の影響を検討するため、式(3)を用いて継手の引張り荷重条件下における摩擦力 F_{fr} を評価した[6]。Fig. 9 に結果を示す。摩擦力 F_{fr} を継手に負荷した総荷重 F で無次元化した値を縦軸の値とし、継手の総荷重 F を横軸の値とした。継手の荷重 F が小さい初期の段階では、荷重 F に対する摩擦力 F_{fr} の割合が高いが、荷重が増加するにしたがって摩擦力の影響が小さくなり、最終的にはほぼ 0 になる。これは、荷重線とアルミ板の中立軸にずれがあるため、荷重の増加に伴って変形が大きくなり、継手の引張り荷重が非締結材を引き離す方向にも作用するようになるためである。また、かしめ力 F_{sq} を増加させることによる摩擦力の寄与が単調には増加していないが、かしめ力 $F_{sq} = 39\text{kN}$ 以上では、かしめの近傍に板の反りが発生し、接触面積が減少したことが原因と考えられる。

次に、 F_0 , F_{fr} を式(2)に代入してベアリング荷重 F_{br} を評価した。Fig. 10 に結果を示す。かしめ力 F_{sq} が増加するに従って剛性低下が開始する荷重が増加しているが、各グラフは同様な傾向を示している。そこで、Fig. 11 のように、かしめによってリベットシャックの断面積が増加する挙動に着目した。かしめ力 F_{sq} を負荷した直後のリベットの断面積を Fig. 12 に示す。変化前と変化後の断面積 A_0 , A から求めた断面積の変化率 A/A_0 を用い、 F_{br} のグラフを正規化したものを Fig. 13 に示す。かしめ力 F_{sq} の各値に対してグラフがほぼ同一になっていることから、かしめ力の増加によるベアリング荷重 F_{br} の増加には、リベットシャックの断面積の増加が支配的な影響をもつと考えられる。

本有限要素解析に要したメモリー容量は最大で約 850MB で、CPU 時間は約 8300s であった。

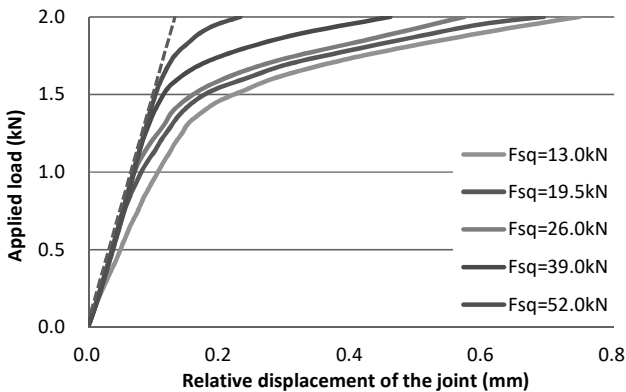


Fig. 8 Load-relative displacement curve of the single-row joint with various squeezing force

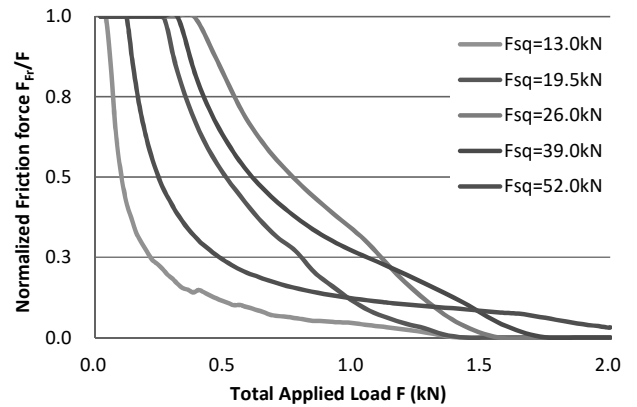


Fig. 9 Ratio of friction force to total transferred load of the joint

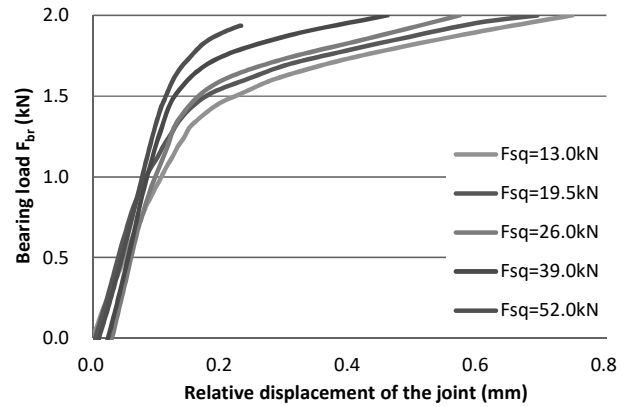


Fig. 10 Bearing load-relative displacement curve

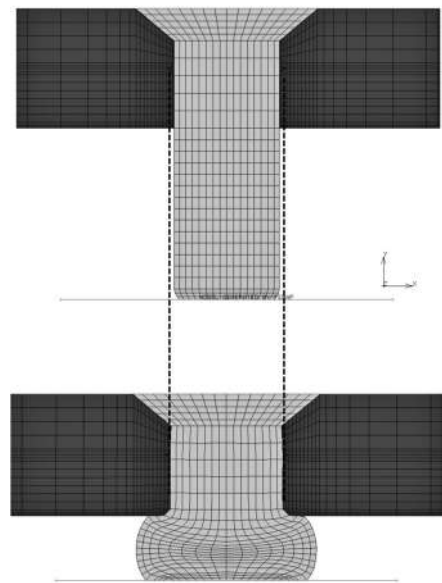


Fig. 11 Comparison of shapes of the rivets before and after squeezing where $F_{sq} = 19.5\text{kN}$

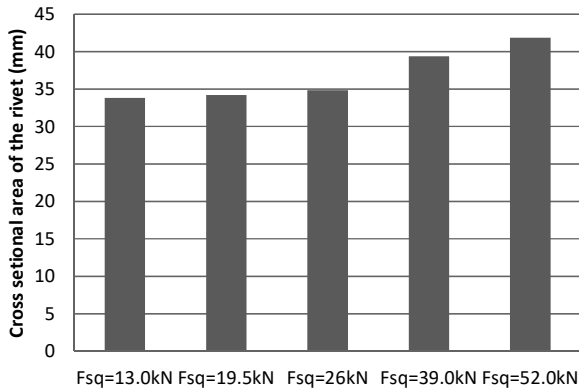


Fig. 12 Difference of cross-sectional area of the rivet shank with respect to squeezing force

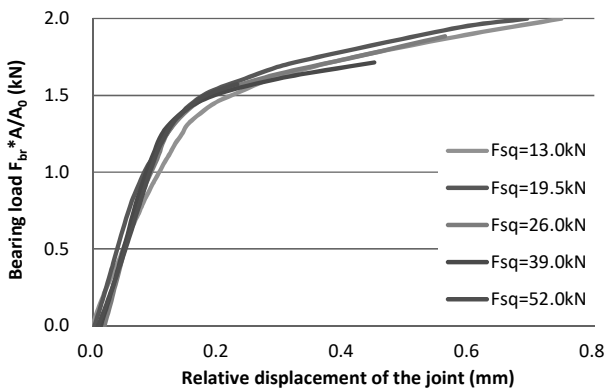


Fig. 13 Normalized bearing load vs. relative displacement curve

5. 3列継手の有限要素解析

5.1 解析モデル

前節の詳細解析と同じ方法で3列継手をモデル化して解析を行い、各リベットに分配される荷重を評価した。Fig. 14 に有限要素モデルを示す。

次に、同じ条件を用いた簡略化解析を行い、詳細解析と結果を比較した。簡略化解析に用いたモデルをFig. 15 に示す。板のモデル化には4節点厚板シェル要素(タイプ75)を用いた。非線形バネ要素を用いてリベットの中心位置の節点間を結合し、せん断方向の荷重-変位挙動をモデル化した。非線形バネの荷重-変位関係は実験結果に基づいて定義した。

5.2 結果と考察

Fig. 16 に詳細解析と簡略化解析の荷重-変位関係を示す。初期の線形領域における剛性が簡略化解析において低くなっているが、詳細解析ではベアリング荷重によるリベット断面の変形が考慮されている一方、簡略化解析ではそれが考慮されていないためと考えられる。リベットの変形が進行した後の低下した剛性

は両解析でほぼ一致しており、最終的に負担した荷重の差異は、最大負荷時において約7.5%であった。

各リベットに分配された荷重の割合をFig. 17 に示す。横軸に継手全体の荷重をとり、各リベットに分配された荷重の変化を示した。破線と実線がそれぞれ、詳細解析における結果と簡略化解析における結果を示している。

詳細解析の結果において、初期状態では、上下のリベットが多くの荷重を負担しており、中央のリベットはほとんど荷重を負担していないが、荷重の増加とともに荷重分配の割合が変化し、最終的には3本のリベットでほぼ同じ割合の荷重を負担した。初期状態で上下のリベットの荷重負担の割合が異なるのは、リベットのかしめ工程での残留応力や、カウンターサンクリベットを用いたことによる板厚方向の非対称性の影響が現れたためと考えられる。簡略化解析では、これらの因子を考慮していないため、上下のリベットの結果が一致した。

簡略化解析においても、詳細解析の場合と同様に、各リベットに分配される荷重の初期の割合は上下のリベットにおいて高いが、継手への総荷重の増加とともに各リベット間の分配される荷重の差が縮小し、最終的に全リベットで均等になった。この結果は、実際のリベットで生じることが知られているが[5]、リベットを線形な弾性体と仮定した従来の解析手法では再現されない。継手の総荷重が約2kN以上の領域では、リベットが負担する荷重の割合が詳細解析と簡略化解析でほぼ一致した。この荷重域において1本当たりのリベットが負担するせん断応力は約80MPaであり、このリベットの強度が約180MPaであることを考慮すると、実構造においてもこの荷重域は多用されると考えられる。

詳細モデルと簡略化モデルの有限要素解析に要したメモリー容量はそれぞれ約1700MB, 370MBで、CPU時間は約13000s, 2100sであった。簡略化解析によってメモリー容量は約1/4, 計算時間は詳細解析の約1/6に削減された。

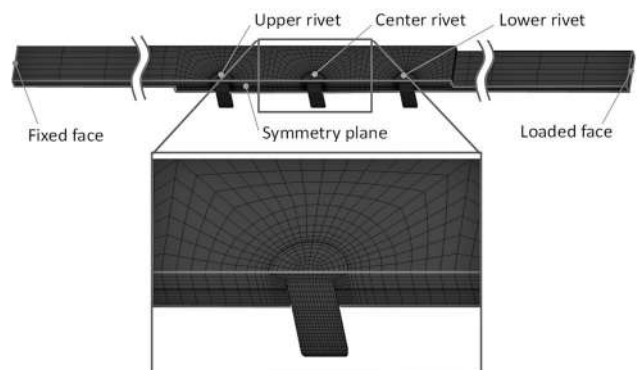


Fig. 14 Detailed model of 3-row joint for FEA

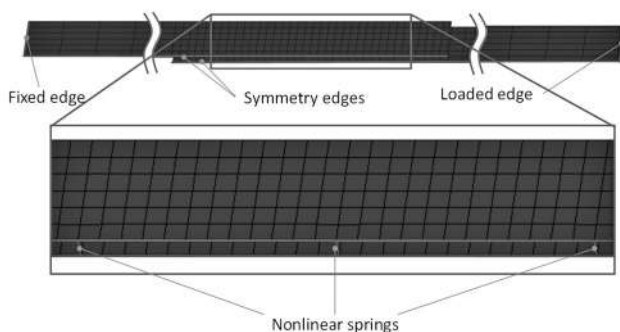


Fig. 15 Simplified model of 3-row joint for FEA

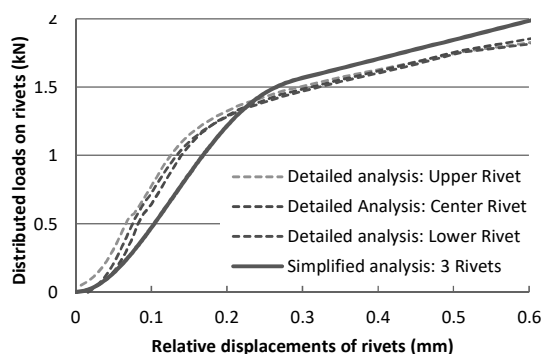


Fig. 16 Load vs. displacement curve obtained from detailed and simplified 3-row models

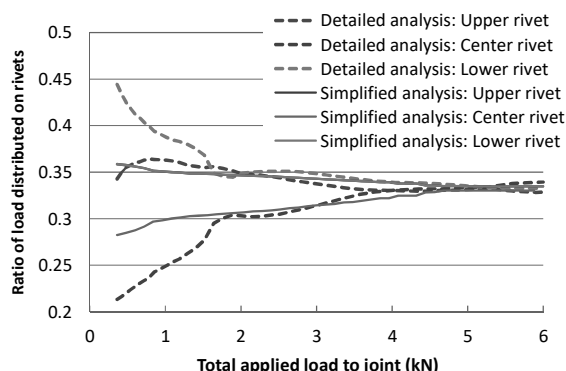


Fig. 17 Relation between distributed load on each rivet and total applied load to the 3-row joint

6. 結言

継手の構成要素の形状を詳細にモデル化した有限要素解析により、単列継手のリベットのかしめおよび引張り試験時の挙動を解析した。摩擦を含む接触および弾塑性を考慮した非線形解析により、引張り試験時の荷重-相対変位関係が再現された。

この手法を3列継手の解析に適用し、継手の引張り試験時の非線形荷重伝達挙動を表現できる簡略化有限要素モデルを検討した。被締結材間の摩擦力の影響が少なく、リベットの面圧によるベアリング荷重による伝達が支配的な条件において、次の結果を得た。

- ・ 実験により得た荷重-相対変位関係を組み込んだシェル要素簡略化モデルによって、ソリッド要素の詳細モデルとほぼ同等の荷重-相対変位関係を得た
- ・ 3列継手の各リベットに分配される荷重の比率は、継手への総荷重の増加とともに差が縮小し、最終的には荷重がほぼ均等に分配された
- ・ 解析モデルの簡略化により使用メモリーが詳細解析の約1/4に、計算時間が約1/6に削減された

これらの結果より、多列継手の荷重伝達挙動の評価に本研究の簡略化モデルが有効であることが示唆された。

また、単列継手の詳細解析により、以下の点が明らかになった。

- ・ 継手の総荷重-相対変位関係に対し、締結部の摩擦は無視できない影響を与える
- ・ 継手のベアリング荷重-相対変位関係は、かしめ後のリベットシャンク断面積での正規化によって、異なるかしめ力に対してほぼ同じ傾向を示す。

本研究の手法を実構造へ適用可能な手法に発展させるために、これらの内容に関する今後の更なる検討が望まれる。

参考文献

- [1] U.S. FAA, "Composite aircraft structure," AC20-107B, 2010.
- [2] M. Farley, "Establishing New Methodologies With MSC SOFTWARE Products to Develop a 747SP Finite Element Model for FAA Certification of Airframe Design Modification," Ratheon systems company.
- [3] H. Huth, "Influence of Fastener Flexibility on the Prediction of Load Transfer and Fatigue Life for Multiple-Row Joints," ASTM STP 927, 1986, pp. 221-250.
- [4] 近藤篤史, 笠原利行, 神田淳, "リベット継手の荷重伝達挙動の有限要素モデル化," 日本航空宇宙学会第43期年会講演論文集, 2012.
- [5] G. Li, G. Shi, N. C. Bellinger, "Study of the Residual Strain in Lap Joints," Journal of Aircraft, Vol.43, No.4, pp.1145-1151, 2006.
- [6] 近藤篤史, 笠原利行, 神田淳, "非線形荷重伝達挙動を考慮したリベット継手の有限要素解析," 日本航空宇宙学会第54回構造強度に関する講演会論文集, 2012.

研究論文

Convolutional Neural Network を用いた楽曲からの アーティスト識別および類似アーティストの推定

堀 弘志* 實廣 貴敏*

(2020年10月1日受理)

Identification of Artists and Estimation of Similar Artists from Music Using Convolutional Neural Network

Hiroshi HORI* Takatoshi JITSUHIRO*

(Received October 1, 2020)

Abstract

This paper proposes the algorithm for the identification of music artists by the convolutional neural network (CNN) using the long-term average of Mel-frequency cepstral coefficients as acoustic feature parameters. Experimental results show that 83% accuracy rate was obtained for the identification of the five idol groups. Furthermore, we propose the estimation method of similar artists by the CNN using the same feature parameters. When we compared the degree of similarity for the estimated similar artists between one subject and the trained CNN, we found that they tended to be roughly similar.

キーワード: 楽曲, 畳み込みニューラルネットワーク, アーティスト識別, 類似アーティスト推定, 長時間平均

Keywords: music, convolutional neural network, artist identification, estimation of similar artists, long-term average

1. はじめに

近年, 音楽情報処理分野の発展により, 歌声やリズムに関する研究活動が世界的に活発に取り組み, 学術的な観点からだけでなく, 産業応用的な観点からも注目を集めている. このような研究は, 歌声合成, 歌詞認識, 歌声検索など多岐にわたっている.

また, 音楽を聴く媒体と環境が増えたことにより音楽検索の需要は高まってきている. 例えば, 鼻歌検索や歌詞検索などを使い気になった曲を検索したり, 音楽再生アプリや動画サイトなどでオススメとして出たりなど, 普段生活している中で利用する頻度が多い. しかし, これまでの鼻歌検索や歌詞検索などでは, 推薦曲がユーザーの好みと異なったものが出たりする. 明確にどのような基準で推薦される曲が決まっているのかは, ブラックボックスとなっていて分かってはいない. しかし, インターネットの質問サイトなどでは, 「あなたへのおすすめはどういった基準で選ばれているのか」や「おすすめはどういった仕組みになっている」など, 多くの人がオススメで自分の思っていたものが推薦されていない.

例えば, 動画サイトや音楽再生アプリなどのオススメは, 他の人が聴いたときに一緒に聴かれている曲がオススメになっていたり, 音楽のデータの情報から同じ会社や同じジャンルのものがオススメとして推薦されていたりする. 必ずしも曲調など音響的な特徴から類似のものを探しているわけではない. 音楽サイトのオススメなどでは, ジャンルが違ったとしても曲調などが似ているアーティストを調べたい人は多く, 実際にそういった基準で検索するニーズは高い. また, パターン認識技術において, 深層学習(Deep Learning)が効果的であることが明らかになり, 音楽情報処理分野においても, Deep Learning Network (DNN)を用いた研究が盛んである. 例えば, 音楽データから Convolutional Neural Network (CNN) [1]を用いて音楽ゲーム譜面自動生成する検討[2]や, DNN による音楽ジャンル分類[3]が行われている. また, 楽曲間で歌手の歌声(声色)がどれだけ似ているかを, 歌声の類似度として定量的に求める手法は範囲が広く, 歌声の類似度に基づいた楽曲の自動分類[4]や, ある曲の歌手の歌声とよく似た歌声を持つ楽曲を検索するシステム[5]など, 様々な

* 愛知工科大学工学部情報メディア学科, 〒443-0047 愛知県蒲郡市西迫町馬乗 50-2

Department of Media Informatics, Aichi University of Technology, 50-2 Manori, Nishihama-cho, Gamagori-shi, Aichi 443-0047, Japan

研究事例がある。ただし、これらはいずれも歌手固定で行われている。

本研究では、曲の音響特徴量から CNN を用いてアーティストの類似度を出し、オススメのアーティストを推薦する。まず、CNN を推奨に使うアーティストの楽曲で学習し、それらアーティストの曲からアーティストを識別出来るようにする。類似度はその CNN によって得られるアーティストの確率を用い、未知のアーティストの曲が入力されたとき、最も確率が高いアーティストが最も類似度の高いアーティストとみなす。本研究では、特徴量として楽曲を短時間フレーム分析によりメル周波数ケプストラム特徴量を得た後、その長時間平均を計算したものをを用いる。これを CNN への入力とする。

本論文の構成を述べる。2 節では、CNN によるアーティスト識別方法について、3 節では、アーティスト識別の評価実験について述べる。4 節では、2, 3 節で学習した CNN を用いた類似アーティストの推定方法を説明し、その結果を被験者との比較について述べ、5 節にて本論文をまとめる。

2. Convolutional Neural Network (CNN)を用いた楽曲からのアーティスト識別

CNN と特徴量分析についての説明を行う。近年、パターン認識をはじめ、多くの分野で機械学習技術は成功している。今回は、色々な機械学習の技術がある中で、CNN を用いる。また、特徴量分析の特徴量は、メル周波数ケプストラム特徴量を用いる。以降では、2.1 節において CNN について説明し、2.2 節において特徴量分析、2.3 節において識別手法について説明する。

2.1. Convolutional Neural Network (CNN)について

Figure 1 は、一般的な CNN の構造を示す。通常のニューラルネットワークと違い、畳み込み層とプーリング層を持っているのが特徴である。全結合層以降では DNN が使用されている。これによって線形分離可能ではないデータを識別が可能となる。

CNN は画像認識分野において最も顕著な成功をおさめている。脳の視覚野の構造における知見を元に、ニューロン間の結合を局所に限定し、層間の結合を疎にしていることを特徴としている。画像の局所的な特徴量を担う畳み込み層と、局所ごとに特徴をまとめあげるプーリング層を繰り返した構造の後、全結合層によって画像判別を行っている。畳み込み層では、畳み込み操作を行うフィルタを掛けて特徴マップを出力する。プーリング層は、最大値または平均値を特徴として抽出することで、データの次元削減を行い、演算量を

下げる。全結合層は画像判別の層であり、1次元出力ができる形態に変換する。物体の認識において必要不可欠である入力の平行移動に対する不変性を段階的に加え、入力の解像度を少しずつ落としながら異なるスケールで隣接する特徴の共起をとり、識別に有効な情報を選択的に上層へ渡していくネットワークとなっている。

これらの特徴から画像以外の分野でも多く利用されるようになった。本研究では、入力は楽音であるが、限定された数のアーティストを識別、さらには未知の入力に対して類似のアーティストを出力したい。そこで、CNN の機構によれば、ニューラルネットワークにより、入力された多次元の特徴量から、識別に必要な特徴を抽出、小さい次元の出力を行うことが可能と考えられる。

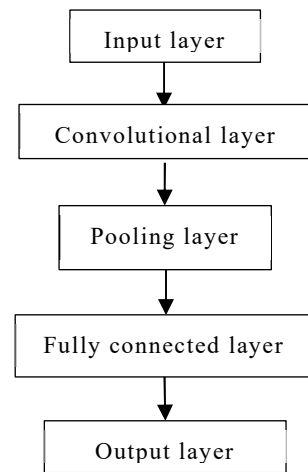


Figure 1 The general structure of a CNN.

2.2. 音声特徴量

音声や楽音の特徴量分析には、一般に 20~40 ms 程度の音声区間で信号を取り出し、時間窓をかけて周波数分析を行う。この処理を 5~20 ms 程度でずらしながら、音声全体を分析していく。これが分析フレームになる。その音声の長さに応じて、分析フレームが増えることになる。本研究では、各フレームの分析に、人の聴覚特性を考慮した周波数分析である、メル周波数ケプストラム (Mel-Frequency Cepstral Coefficient, MFCC) を用いる。

このままでは、楽音により得られる分析フレームの数が変動し、ニューラルネットワークへの入力は難しい。本研究では、あらかじめ学習されたアーティストを入力楽曲で識別、さらに、未知の楽曲入力から最も近いアーティストを選択するのみである。そこで、まず、各フレームの特徴量を正規化するため、標準化変換を行う。

次に、分析フレーム全体の長時間平均を求める。これにより 1 フレーム分の特徴量ベクトルになる。この長時間平均を用いる方法は、音声による話者認識でかつてよく利用された方法であり、今回は楽曲全体のおおまかな特徴が長時間平均に現れることになる。

2.3. 識別手法

CNN を用いてアーティスト識別を行う。Figure 2 に CNN の学習手順を示す。楽曲の音響データをアーティスト名と対にして、CNN 学習への入力とする。CNN の入力層へは、まず特徴量分析器において、メル周波数ケプストラム MFCC を求め、さらに、標準化変換し、長時間平均 MFCC を求め、入力する。

Figure 3 に CNN によるアーティスト名の推定手順を示す。アーティスト名を推定したい楽曲の音響データをまず特徴量分析器に入力する。MFCC を求め、標準化変換し、それらの長時間平均 MFCC を求める。それを CNN に入力し、推定されたアーティスト名を得る。

このように CNN を学習し、アーティストの推定、すなわち、アーティスト名の識別を行う。実験では、まず上記の手順を用いて、CNN の楽曲音響データからのアーティスト名識別能力を評価する。

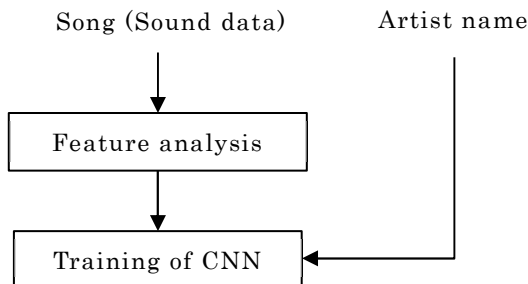


Figure 2 Training of the CNN that identifies artist names from acoustic data of songs.

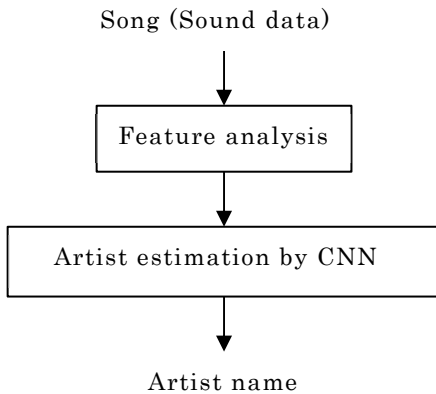


Figure 3 The estimation of artist names by the CNN.

3. CNNによるアーティスト識別の実験

3.1. 実験内容

本実験では、アーティスト名識別の精度を検証する。対象として、5 組のアーティスト(でんぱ組.inc, CY8ER, ももいろクローバーZ, AKB48, 乃木坂 46)を用いた。アイドルと呼ばれるアーティストたちであるが、近年のアイドルブームによりたくさんのアイドル・グループが存在し、曲数が豊富であるため、実験するには適している。また、その成り立ちからも似ているアイドルも多く、アイドル検索のニーズがある。グループのアイドルを選択している理由は、昔と比べ、ソロのアイドルよりグループのアイドルの方が人気があり、ニーズがあると考えられる。Table 1 に第 1 著者が考える選択したアーティスト 5 組の特徴をまとめる。

Table 1 The features of the five selected artists.

でんぱ組.inc	6 人グループのアーティスト。それぞれが入り乱れながら歌う。激しい曲が多い。
CY8ER	5 人グループのアーティスト。それぞれがパートごとに分かれて歌う。ゆっくりとした曲が多い。
ももいろクローバーZ	4 人グループのアーティスト。パートごとに歌うのと全員で歌う数がほぼ同じ。激しい曲が多い。
AKB48	約 20 名で歌うアーティスト。パートごとに分かれて歌うことが少なく、ほとんどが複数人で歌われている。様々なジャンルの歌を歌う。
乃木坂 46	AKB48 と同じ会社のグループで歌い方や曲調がよく似ている。AKB48 との比較として採用。

3.2. 実験条件

実験条件を示す。学習データはでんぱ組.inc, CY8ER, ももいろクローバーZ, AKB48, 乃木坂 46 の 5 組から計 16 曲ずつ計 80 曲を用いた、評価データは、上記と同じアーティスト 4 曲ずつ計 20 曲を用いた。これらはすべて違うデータであり、販売されている楽曲のまま、音声と演奏を分離するようなことは行わず、曲の長さも特別には統一していないものを用いた。

楽曲の品質は 44.1 kHz サンプリング周波数、16 ビットであった。音声分析にはフレーム長を 20 ms、フレーム周期を 15 ms とした。音声特徴量は 20 次元 MFCC とし、長時間平均 20 次元 MFCC を CNN の入力とした。CNN に関しては、入力層を 20 ユニット、出力層をアーティスト 5 組に合わせて 5 ユニットとした。中

間層はユニット数を 256 に固定したものの、畳み込み層、および、プーリング層を一層ずつ増やして精度を評価した。

3.3. 実験結果

Figure 4 に隠れ層を 3～10 層に変えた時の正解率を示す。精度が最も良いのは隠れ層が 6 層の時で学習回数が 100 回の時、正解率は 83%であった。また、隠れ層が 5 層の時、正解率は 60%で最も精度が低かった。さらに、8 層以上では 65%で変化がなかった。

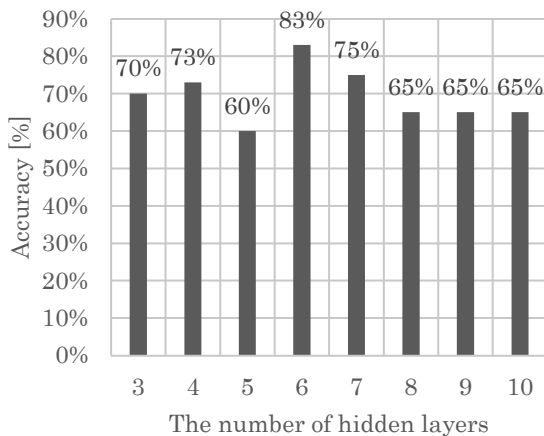


Figure 4 Accuracy rates for the number of hidden layers.

4. CNN による類似アーティストの推定

4.1. 類似アーティスト推定の手法

3 節での実験により、限られたアーティスト数ではあるが、楽曲の音響データから CNN により、比較的高い確率で識別が可能であることが分かった。本研究の本来の目的である、類似アーティストの推定を検討する。Figure 5 に提案する類似アーティストの推定方法を示す。3 節で行ったような、推奨したいアーティストの楽曲を CNN で学習しておく。その CNN へ未知アーティストの楽曲を入力し、その時に得られる学習済みアーティストに対する確率のうち、最も確率が高いものを推奨する類似アーティストであると判定するとする。

ここで用いる音声特徴量は MFCC の長時間平均である。楽曲全体の平均であるので、時間的変動を表現することはできないが、楽曲全体で現れる周波数特性の代表的なものを表現できる。おおまかな特徴として見ることができるので、類似アーティストを検索するには適していると考えられる。

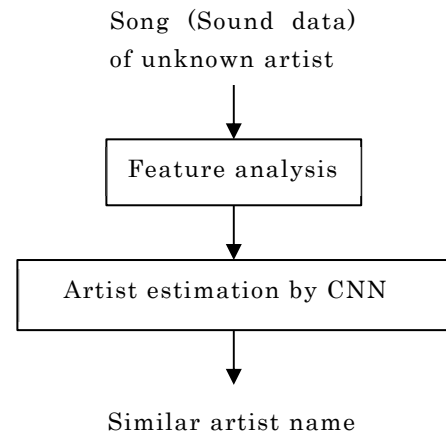


Figure 5 The estimation method of a similar artist from a song of an unknown artist.

4.2. 実験

4.2.1. 実験内容

3 節での実験で学習された CNN を用い、そこで学習されたアーティストとは別である未知のアーティストの楽曲を入力とし、そのときに得られる学習済みアーティストそれぞれの確率の大きさ順に推奨される類似アーティストとする。この推奨された類似アーティストが、人間により似ていると推定されるアーティストと同様な傾向があるのか、全くないのかを検証する必要がある。そこで、ここで用いたアーティストの楽曲に詳しい被験者に楽曲を聞いてもらいながら、その差異を検討する。

全くアイドルを知らない被験者に対する評価も検討したいところだが、あまり簡単ではないと考えている。1 曲ごとの類似度を評価するのであれば、1 曲ずつ比較して聞いてもらい、評価することが可能である。しかし、本研究で考えている推奨したい類似アーティストは、ユーザが好むアーティストに対して、楽曲の集合として見た場合に、よく似ていると思えるアーティストである。そのように類似アーティストを見つけるには、推奨するアーティストと入力される未知のアーティストの双方の楽曲に通じている必要がある。したがって、それらのアーティストをよく知らない被験者では、あらかじめ多くの複数の楽曲を聞く必要がある。今回は、十分な時間がなかったため、実験のしやすい、実験対象の楽曲に日ごろから慣れ親しんでいる被験者で行った。

4.2.2. 実験条件

実験条件を示す。学習データはでんぱ組.inc, CY8ER, ももいろクローバーZ, AKB48, 乃木坂 46 の 5 組から 16 曲ずつ計 80 曲を用いた。評価データは、上

記と同じアーティスト 4 曲ずつ計 20 曲を用いた。これらはすべて違うデータであり、音声と演奏を別にするこ
 となく、そのまま用い、曲の長さもそのまま統一してい
 ないものを用いた。予測データとしては、上記のアーテ
 ィストの曲で学習と評価に使用していない曲を、各アー
 ティスト 3 曲ずつ計 15 曲、未知のアーティスト 4 組か
 ら 1 曲ずつ計 4 曲を用いて、それぞれの曲に対しての
 類似アーティスト推定を行う。未知のアーティストは日
 向坂 46, BiSH, SKE48, E-girls を用いる。これらアー
 ティストに詳しくない方にも多少理解してもらえよう、
 被験者の主観であるが、音響的な類似アーティストを
 あげておく。日向坂 46 と SKE48 は、同様に同じ会社
 のグループである AKB48 と乃木坂 46 と特徴が似てい
 る点が多い。BiSH はももいろクローバーZ と似てい
 る点が多い。E-girls はでんぱ組.inc と似ている点が多
 い。CNN は隠れ層 6 で固定し、学習は 3 節と同様に、
 各アーティスト 16 曲で合計 80 曲を用いた。

CNN の推定結果がどの程度、人の感覚に近いか、
 被験者と比較を行った。ここでは、評価対象のアイドル
 に詳しい 20 代男子学生 1 名に、既知のアーティストの
 曲を聴いてもらったのちに、未知のアーティストを聞い
 てもらい、どのアーティストに近いかを選択してもらった。
 そのパーセンテージを類似度スコアとして CNN の推定
 結果と比較した。

4.2.3. 実験結果

Figure 6, 7, 8, 9 にそれぞれ、未知のアーティストであ
 る、BiSH, E-girls, 日向坂 46, SKE48 に対する、学習
 済みアーティストのでんぱ組.inc, CY8ER, ももいろク
 ローバーZ, AKB48, 乃木坂 46, それぞれの類似度スコ
 アをレーダーチャートにより示す。類似度スコアは CNN
 により出力される確率をパーセンテージで表したもので
 ある。

CNN による類似度は学習済みアーティストに対して、
 あまり大きな差が出ていない場合が多い。20%前後が
 多く、5 組の学習済みアーティストであることを考えると、
 未知アーティストの楽曲に対して、明確には識別でき
 ていないと考えられる。類似度を推定するには、音声
 特徴量からより工夫が必要と考えられる。

類似度のトップスコアのものだけ見ると、CNN によ
 ると、BiSH は CY8ER に、E-girls はでんぱ組.inc に、日
 向坂 46 は CY8ER に、SKE48 は AKB48 に類似して
 いるという結果になった。これだけでは人間との比較は
 難しいが、レーダーチャートとして、学習済みアーテ
 ィスト全体との比較をすると、BiSH 以外は類似度の傾向
 が比較的近いといえる。ただし、被験者はこれらの楽
 曲に慣れ親しんだ人とはいえ、1 名のみの主観である
 ので、より多くの被験者による比較が必要である。



Figure 6 Similar scores for BiSH.



Figure 7 Similar scores for E-girls.



Figure 8 Similar scores for Hinatazaka46.

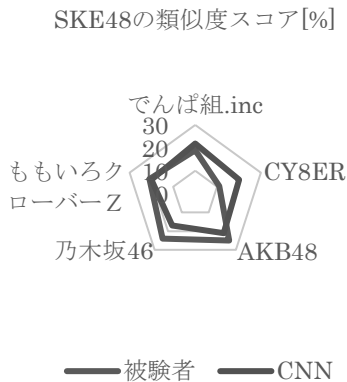


Figure 9 Similar scores for SKE48

5. おわりに

本研究では、楽曲の音響特徴量から CNN を用いてアーティストの識別を行い、その学習された CNN を用い、未知アーティスト楽曲に対する確率から、類似するアーティストを推奨する方法の検証を行った。さらに、被験者 1 名の主観で未知のアーティストがどの学習済みアーティストに類似しているかをスコア化したものと比較して、人間と CNN との類似度スコアの比較を行った。

アーティストの識別では、楽曲を短時間フレーム分析により、メル周波数ケプストラム特徴量を得た後、その長時間平均を求めて用いた。隠れ層の Convolutional 層と Pooling 層を一層ずつ増やし CNN の構造を変えたもので評価を行った。隠れ層が全 6 層の時、正解率は 83% で最も高い精度が得られた。さらに、隠れ層が 8 層以降では正解率が 65% で変化がなかった。音響特徴量に長時間平均を用いたということで、時間的変動は考慮できていないが、楽曲に含まれる主な周波数成分を抽出でき、それを元に識別することで比較的高い精度を得られることが分かった。

類似アーティストの推定方法では、4 組の未知アーティストの楽曲に対して、5 組の学習済みアーティストから類似のアーティストを選択する実験を実施した。それらの類似度スコアと、これらのアーティストの楽曲に詳しい被験者 1 名が評価する結果を比較した。CNN による類似度スコアは全般的には 5 組とも比較的近い値を出力しており、必ずしも明確に識別できているわけではないのがわかった。ただし、類似度スコアの 5 組の学習済みアーティストに対する偏りは、これらアーティストに詳しい被験者 1 名の主観によるスコアによる偏りに近いところも多く、メリハリは少ないものの、大きな傾向はつかめていると考えられる。

今後の課題を述べる。今回は「アイドル」と呼ばれるアーティストにのみ注目し、評価を行ったが、枠組みと

しては、楽曲のジャンルによらないので、より広いジャンルでの評価を行う必要がある。今回は、一般的な CNN を用いて実験を行ったが、他のニューラルネットワーク、例えば、Long short-term memory (LSTM) や、Deep Neural Network (DNN) に関する各種技術 (Dropout など) を使用することで識別精度の向上を検討することがあげられる。また、類似アーティストの推定では、評価自体がまだ不十分であり、被験者を増やして実施する必要がある。あるいは、専門的に詳しくない被験者でも評価しやすい手法を検討することも考えられる。類似度スコアに関しては、単純に CNN の出力する確率を用いたが、より適したスコア、より適した音響特徴量を検討していく必要がある。

参考文献

- [1] Y. LeCun, L. Bottou, Y. Bengio, and P. Haffner, "Gradient-based learning applied to document recognition," Proc. of the IEEE, pp. 2278-2324 (1998).
- [2] 柴崎大地, 酒井充, 丸山博, "ニューラルネットワークを用いた音楽ゲーム譜面自動生成の検討", 情報処理学会第 80 回全国大会講演論文集 2018(1), pp. 165-166, 2018 年
- [3] 赤羽慎, 藤田侑介, 王龍標, 甲斐充彦, "セグメントレベル特徴量を用いた楽曲のジャンル分類", 情報処理学会研究報, vol. 2014-MUS-103, no. 22, 2014 年
- [4] W.-H. Tsai, and H.-M. Wang, D. Rodgers, S.-S. Cheng and H.-M. Yu, "Blind clustering of popular music recording based on singer voice characteristics," Proc. ISMIR 2003, pp. 167-173 (2003).
- [5] H. Fujiyama and M. Got, "A music information retrieval system based on voice timbre," Proc. ISMIR 2007, pp. 467-470 (2007).

研究論文

ノッチフィルタが広帯域雑音の音像定位に及ぼす影響

山高 正烈*, 坂本 修一**, 鈴木 陽一**

(2020年10月9日受理)

Effects of Notch Filters on Sound Localization of Broadband Noise

Zhenglie CUI*, Shuichi SAKAMOTO**, Yôiti SUZUKI**

(Received October 9, 2020)

Abstract

The spectral shape of the head-related transfer function plays an important role in sound localization, particularly in the median plane. On the other hand, the timbre of sounds is closely related to their frequency spectrum. Interestingly, humans can separately perceive both the timbre and position of sound sources even though the frequency spectrum of a sound reaching the listener's each ear is a mixture of both frequency spectra. Our previous studies reported that listeners can detect one of the spectral notches in the HRTF, known as N1 and commonly centered around 7 kHz, by the changes it causes on the perceived timbre. In this study, we focus on the spectral notches in the HRTF (N1, N2), of which central frequency may systematically depend on the elevation angle, and analyzed the influence of the notches included in broadband noise on the sound localization perception. Results shows that elevation localization and mutual changes between N1 and N2 could be explained in terms of the excitation pattern.

キーワード: 音空間知覚, 頭部伝達関数, 音像定位, 音色, 知覚手がかり

Keywords : Spatial hearing, HRTF (head-related transfer function), Sound localization, Timbre, Perceptual cue

1. はじめに

人間は音を聞く際に、音の方向のみならず音色も同時に知覚できる。音色とは、音源が何であるかを認知するための手がかりとなる特性であり、音を聞いた主体が音から受ける印象の諸側面の総称と定義される[1]。音色の知覚は、主に音の周波数特性が影響しており、音源の周波数スペクトルによって変化する[2]。一方、耳に到達する音信号には、音源からの直接音だけでなく、反射音や回折音等が含まれており、耳介周りの外耳道や耳甲介腔による共振も生じている[3]。そのため、両耳で観測される音の周波数スペクトルは音源の相対方向に応じて変化する。この周波数スペクトルの変化を音源の位置を変数とする伝達関数として表現したものが頭部伝達関数(HRTF: head-related transfer function [4])であり、人間が音像定位[5]をする際の重要な手がかりとなっている。特に、両耳に入力される音の時間差や強度差がほとんどない正中面や、その変化があまりない矢状面上(両耳からの距

離差が一点の円上, cone of confusion[6])に位置する音源の音像定位については、この頭部伝達関数のスペクトル形状が非常に重要な知覚手がかりとされている(スペクトラルキュー)。このように、人間の耳に入力される音信号は、音色の手がかりと音像定位の手がかりが混在した状態であり、両方とも耳入力信号の周波数特性が手がかりであると考えられている。

ところで、耳入力信号の周波数特性が、音色の知覚と音像定位両方の手がかりとなっている中で、例えば、ある人の声が方向によって音色が変わって聞こえる、若しくは、聞き慣れない音は到来方向が分かりにくいといった現象が起こってもおかしくない。しかし、人間は音色と音像の双方を明確に知覚することが可能であり、音の方向が変わっただけで別の音色に聞こえることを日常生活で経験することはあまりないであろう。即ち、人間は日常的に耳入力信号から音色の情報と音像位置の情報を何らかの仕組みで切り分けて知覚し、それぞれの情報を別々に利用していると考えられる。この機序を解明することは、頭部伝達関数に含ま

* 愛知工科大学工学部情報メディア学科, 〒443-0047 愛知県蒲郡市西迫町馬乗 50-2

Department of Media Informatics, Aichi University of Technology, 50-2 Manori, Nishihisama-cho, Gamagori-shi, Aichi 443-0047, Japan

** 東北大学電気通信研究所, 〒980-8577 仙台市青葉区片平 2-1-1

れる音像定位の手がかり, スペクトラルキューを調べる上で有用な知見になると言える.

しかし, 頭部伝達関数のどのような特徴が正中面音像定位の手がかりとなっているかについては, 未だ断定的な結果が得られていない. 過去の研究では, 2 kHz以上の周波数帯域における頭部伝達関数の概形を再現すれば高精度の音像定位が可能であり, そのスペクトラルキューとして, 仰角によって系統的に変化する複数帯域のレベル差が示唆されている[7]. また, 仰角によって系統的に変化する7 kHz付近に現れる第1ノッチの形状(以下N1)が, 音像定位の工学的制御に有効であるという報告もなされている[6]. しかし, 聴覚系における周波数分析機構をつかさどる聴覚フィルタの特性を考慮すると, N1のように鋭いスペクトル上のノッチは, 元の形状よりもはるかに緩やかで浅い興奮パターンを示すと考えられる[8]. したがって, 音像定位の手がかりはN1そのものの形状やその変化ではなく, 興奮パターンの形状にあると考えるべきである. 実際, 頭部伝達関数の2 kHz以上の帯域を平滑化しても音像定位が可能であるという報告や[7], 8 kHzを中心とする3/4オクターブ帯域においてそれ以外の帯域とは仰角の変化に伴う帯域のレベルの変化傾向が異なる様相を呈することを示し, それらの帯域にスペクトラルキューがあるといった報告もなされている[9].

以上のように, 音像定位の工学的制御にN1が重要であることは明らかであるが, それに起因する聴覚興奮パターン上のスペクトラルキューが何なのかについては統一的な理解が得られていない. これらの背景を踏まえ, 筆者らは音像定位と音色知覚における周波数スペクトルの影響を解明する礎として, N1を模擬するノッチフィルタが広帯域雑音の音色と音像定位に及ぼす影響について検討を進めてきた[9-11]. 我々の先行研究では, 広帯域雑音中に付加したN1ノッチフィルタの帯域幅や中心周波数を系統的に変化させ, それに対応する音色変化の検知限と聴取者自身の頭部伝達関数を比較することで, 音色と音像定位のスペクトラルキューを検討した. その結果, N1の中心周波数の変化は, 音色の変化としては知覚されうるが, 仰角方向の定位方向に充分寄与するとは言えないことが示唆された. 即ち, 広帯域雑音中におけるN1の中心周波数の制御だけでは, 仰角方向の音像定位の手がかりとして不十分であることが明らかとなった.

仰角方向の音像定位の手がかりを探るための先行研究として, 飯田ら[6]は, 聴取者自身の頭部伝達関数と同等の定位精度を再現するためには, 少なくともP1(HRTFに現れる第1ピーク), N1, N2(第2ノッチ)が必要であると報告している. また, 曲谷地ら[9]は, 各

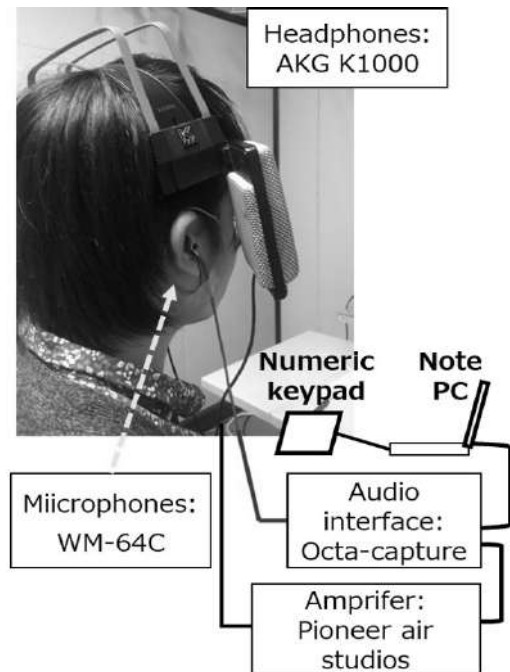


Fig.1 Experimental setup

聴取者の頭部伝達関数の聴覚興奮パターンについて1/4オクターブ帯域間の相互相関を検討し, 8 kHzを中心とする3/4オクターブ帯域間のレベル差を再現すれば音像定位が可能であると報告した. これらの先行研究と, 我々が行ったN1ノッチフィルタと聴覚興奮パターンとの関連についての探索的研究知見[9-11]を踏まえて, 本研究では, N1ノッチフィルタに加えて, 広帯域雑音中にN2を付加することで, N1とN2の互いの変化パターンが音像定位にどのような影響を及ぼすかを検討した.

2. 実験内容

2.1 聴取者と実験環境

正常な聴力を有する, 20代の成人男性4名が聴取実験に参加した.

実験環境の概略を図1に示す. 実験は東北大学電気通信研究所内の防音室で行った. 音の提示には耳介開放型ヘッドフォン(AKG K1000)を用いた. 実験では, 耳入力スペクトル形状を一定に保つために, 先行研究[10][11]に習ってヘッドフォンの逆フィルタの更新(詳細は2.2項参照)を行った. そのため, ワイヤを耳介にかける形で測定用小型マイクロフォン(Panasonic WM-64C)を耳珠の真横に設置し, 一連の実験はこのマイクを装着したまま行った.

2.2 逆フィルタ処理

逆フィルタの更新を行うために、まず耳珠横のマイクロフォン位置におけるヘッドフォンの伝達関数(インパルス応答)を、512点の時間引き延ばしパルス(TSP, time-stretched pulse[12])を用いて求めた。次に、ヘッドフォンのインパルス応答の畳込み行列の疑似逆行列を求めた。その際、目的関数には0.2~18 kHzのバンドパスフィルタを用いた[13]。したがって、この逆フィルタに所望の周波数特性を持つ広帯域音を通しそれをヘッドフォンに入力すると、出力音は耳珠横のマイクロフォン位置において入力と同じ周波数スペクトルを示すことが期待できる。

逆フィルタの処理に要する時間は3秒程度であり、セッション開始直前と10試行終了ごとに行った。聴取者の体勢が安定している状態で録音を行うために、10試行ごとの逆フィルタ算出時はヘッドフォンからアナウンスを流し聴取者に通知した。その後、聴取者が任意のタイミングでキーボードを押すとTSPの録音出力と逆フィルタの更新処理が行われた。以上の一連の流れを実験前の練習セッションでも行い、聴取者に手順の確認を求めた。

2.3 実験刺激

実験刺激は、ピンクノイズ(帯域0.2~18 kHz)を基に、それにP1とN1, N2を付加して生成した。P1の中心周波数は4.0 kHzで固定し、N1は、中心周波数が6.0 kHzから+0.5 Cam^{注)}ずつ8.0 kHzまで上昇する正方向へのシフトパターン(正シフト)を設けた。一方N2は、中心周波数が11 kHzから-0.25 Camずつ10kHzまで下降する負の方向へのシフトパターン(負シフト)を設けた。このように、N1の中心周波数の上昇に伴いN2の中心周波数が下降する、計5種類の刺激を作成した。

以下、N1ノッチフィルタを例に、フィルタの設計について説明する。設計に当たっては、 g , r , ω_0 をパラメータとした式(1)で表される2次のIIRフィルタを用いて反共振ノッチフィルタを作成した。ここで、 f_n , G_c , G_n , B は、それぞれ中心周波数[Hz]、帯域幅を定めるカットオフのレベル[dB]、ノッチの深さ[dB]、 G_c における帯域幅[Hz]を表す。なお、 f_s はサンプリング周波数である。P1, N1, N2とも深さ(G_n)は-20 dB、帯域幅はノッチ両側の平坦な帯域のレベルから-3 dB低下する周波数間の値であり、+1.5 ERB^{注)}に固定した。

$$H(z) = \frac{1-2rcos\omega_0z^{-1}+r^2z^{-2}}{1-2\frac{g}{r}cos\omega_0z^{-1}+\frac{2g-1}{r^2}z^{-2}} \quad (1)$$

$$g = \frac{1}{1+tan\left(\frac{B_0}{2}\right)\frac{\sqrt{1-A_c^2}}{A_c}}$$

$$r = 1 - A_n \frac{B_0}{\pi}, \quad \omega_0 = 2\pi \frac{f_n}{f_s}$$

$$A_c = 10^{\frac{-G_c}{20}}, \quad A_n = \frac{1}{A_c} 10^{\frac{-G_n}{20}}, \quad B_0 = 2\pi \frac{B}{f_s}$$

2.4 実験手続き

N1とN2ともに中心周波数のシフト量が0 Camの場合(基準中心周波数N1=6.0 kHz, N2=11 kHz)を参照音Rとし、その他4種類の刺激音を比較音Xとした。参照音Rと比較音Xをランダムな順序でヘッドフォンから提示し、1回目の刺激音に対して2回目の刺激音が仰角方向の上方が下方のどちらに偏移したかを回答するよう求めた(2肢強制選択)。参照音と比較音の提示時間はともに0.5秒であった。

実験においては、参照音Rと比較音Xの刺激対4種類をランダムな順番で15回ずつ提示した。これを1セッションとし、各セッションの間に休憩をはさみ、4セッション(刺激対4種類×15回×4セッション=240試行)実施した。

3. 実験結果

図2に、各聴取者のN1とN2の中心周波数偏移に対する仰角定位の弁別能を示す。弁別能は $d' = 1$ となる周波数偏移とした。ここで、 d' [14]の算出に当たっては、4セッションの実験結果(音像の仰角定位方向の偏移)に対し、N1の中心周波数が高くなるにつれて(N2の中心周波数が低くなるにつれて)音像が上方に定位するという仮定の下で正答率を求め、その値を元に導出した。グラフの横軸はN1の中心周波数の偏移量を $ERB_{N_{number}}$ スケールで示した値であり、単位はCamである。グラフの縦軸は d' である。グラフ中の●点は各中心周波数のシフトパターンにおける実験結果であり、実線は最小二乗回帰直線である。

図2で弁別限($d' = 1$ となる時の中心周波数の偏移)は、実線が破線と交わる場合のX軸の値となる。図2から、聴取者4名のうち1名のみ(Listener4) d' が1を超えており、その弁別限は1.43 Camであった。ただしListener1の d' の値も、N1の中心周波数の正の方向へのシフトに従い上昇する傾向が見て取れる。即ち、

注) 聴覚フィルタは中心周波数に応じて帯域幅が変化し、その値はERB (equivalent rectangular bandwidth)として表現される。中心周波数によって幅を変えるフィルタが等間隔に並ぶように変形した周波数軸を $ERB_{N_{number}}$ スケールと呼び、単位はCamと表される。

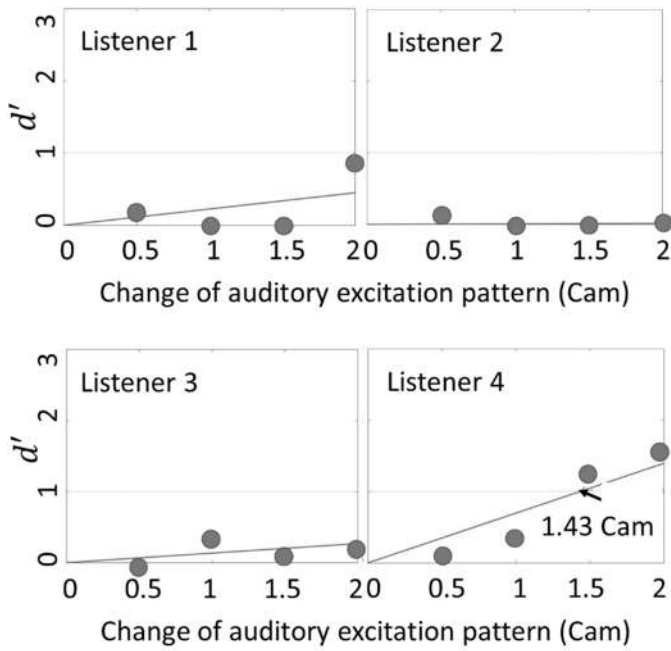


Fig.2 Timbre discrimination performance (d') as a function of the change of estimated auditory excitation pattern caused by the center frequency deviation of N1

N1とN2の中心周波数の偏移が、仰角方向の音像位置の弁別に有効に働くグループと、それほど有効に働かないグループに分かれることが示された。

4. 考察

聴取者 4 名のうち 2 名のみではあれ、このグループについてはN1 中心周波数が正の方向へシフトし、合わせてN2の中心周波数が負の方向へシフトするという周波数偏移パターンを用いた場合、 d' の値の上昇傾向が示された。これから、N1 とN2 の中心周波数の遷移が仰角方向の音像定位に何らかの影響を及ぼす可能性が考えられる。その原因を検討するために、聴取者自身の頭部伝達関数を用いて、実際のN1、N2の中心周波数が、頭部伝達関数上では仰角に応じてどのように変化するかを調べた。

図 3 に、各聴取者の正中面頭部伝達関数における、音源の仰角方向の角度とN1、N2 の中心周波数の関係を示す。●はN1、▲はN2、実線と破線はそれぞれの最小二乗回帰直線を示す。図 3 から、N1 とN2 の関係性は、図 2 の実験結果と同様に 2 つのパターンに分けられることが分かる。即ち、Listener2 やListener3 に見られるように、仰角の上昇に伴ってN1 とN2 の中心周波数がともに同程度高くなる場合と、Listener1 とListener4 のように、仰角の上昇に伴ってN1 の中心周波

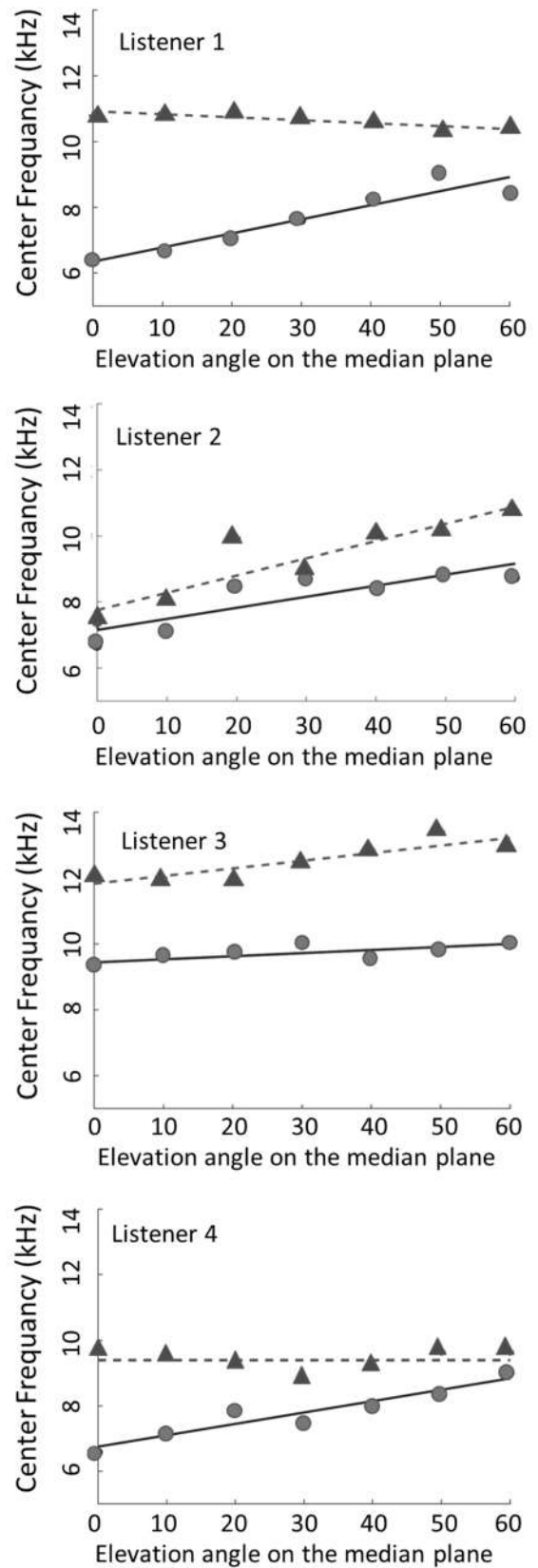


Fig.3 N1 and N2 center frequencies in HRTF as a function of the elevation angle of the sound source (●:N1, ▲:N2)

数は高く、N2 の中心周波数は低くなる若しくは変わらない場合である。便宜的に、前者のN2 の中心周波数が仰角に応じて高くなるパターンを「正シフト」、低くなることを「負シフト」と呼ぶことにする。

図2の結果と、図3における各聴取者ごとの頭部伝達関数の中心周波数の変化パターンを照らし合わせて見ると、N1、N2の中心周波数のシフト量に比例して音像定位の弁別能の向上が見られたListener1とListener4は、「負シフト」パターンに属していた。即ち、聴取者自身の頭部伝達関数においては、N1とN2の中心周波数が互いに逆方向に偏移しているパターンであることが分かる。他方、仰角方向の音像定位の変化が見られなかった聴取者らは、「正シフト」パターンに属していた。即ち、聴取者の頭部伝達関数において、N1とN2がいずれも仰角の上昇に対して中心周波数が高い側に偏移しているパターンであった。

本実験で用いた刺激は、「負シフト」のノッチ中心周波数の偏移を模擬したものであり、N1とN2の偏移の仕方と、自身の頭部伝達関数のN1、N2の偏移の仕方が類似した聴取者のみにおいて、仰角の弁別が可能であったことが考えられる。このことから、仰角の弁別においては、N1とN2の互いの偏移の様相がキューとなる可能性が考えられる。

また、本実験で用いたN1は、中心周波数6 kHzを始点として0.50～2.0 Camの偏移、N2は、中心周波数11 kHzを始点として、0.25～-1.0 Camの偏移であった。ところで、ノッチフィルタの「負シフト」パターンに属する聴取者自身の頭部伝達関数において、N1やN2は必ずしもこの範囲に収まっているとは限らない。しかし、そのような聴取者であっても、ノッチの偏移の様相が似通っていれば仰角方向音像位置の弁別の可能性が示されたことから、仰角定位方向の変化は、ノッチのある程度の広さを持った帯域における興奮パターンの変化で説明可能であることが考えられる。

一方、N1ノッチフィルタの中心周波数のシフト量が音色弁別限に及ぼす影響を調べた先行研究[11]によると、N1の中心周波数偏移に関する弁別限が聴覚興奮パターン上でおよそ13.7 dB・Camのレベル差であることが示されている。そこで、本実験におけるノッチフィルタの「負シフト」に属する聴取者Listener1とListener4の聴覚興奮パターン上のレベル差を求め、音像定位の弁別限と音色弁別限の聴覚興奮パターンを比較した(図4参照)。

図4の「負シフト」パターンに属する聴取者らの弁別限における聴覚興奮パターン上のレベル差に着目すると、Listener1は25.8 dB・Cam、Listener4は16.2 dB・Camであった。即ち、仰角方向の音像位置を弁別し

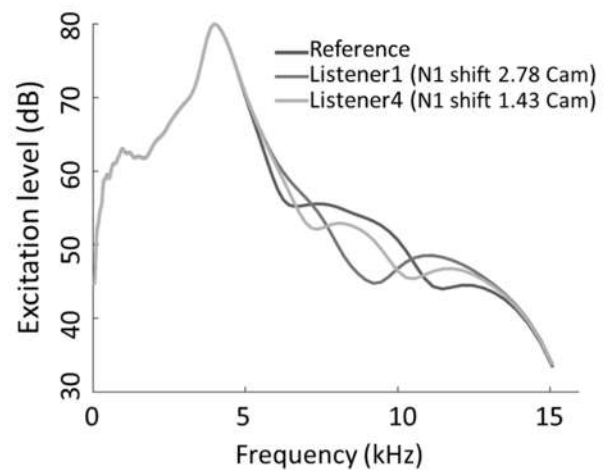


Fig.4 Estimated auditory excitation patterns (Cam)

得るレベル差が、先行研究で示した音色の変化を知覚し得るレベル差よりも大きい値を示していることが分かる。即ち、今回の実験における「負シフト」パターンの聴取者らは、音像定位方向の変化と同時に音色の変化も同様に知覚し得る可能性があったと考えられる。ただし、本研究では音像定位と音色弁別の相互関係に関しては検討するに至っておらず、今後更なる検討が必要である。

以上から、頭部伝達関数に現れるノッチやピークは聴覚興奮パターン上において知覚可能な程度の変化を生じさせ、同時にそれらの相互的な変化の様相が音像定位手がかりとなっている可能性が示された。今後は、仰角の上昇に伴って、N1とN2の中心周波数がともに同程度高くなる「正シフト」パターンを用いて同様の実験を行い、N1とN2の互いの偏移の様相が仰角方向の音像定位に及ぼす影響について、更なる検討を進める予定である。

5. おわりに

本研究では、頭部伝達関数の周波数スペクトルに典型的に現れるノッチやピークに着目し、それらが正中面音像定位に及ぼす影響を聴覚興奮パターンに基づいて検討した。具体的には、頭部伝達関数上に典型的に現れるノッチの音特性知覚への寄与を、N1、N2の中心周波数に着目しながら仰角の弁別実験を行った。その結果、仰角方向の音像定位は、N1とN2の相互変化のパターンによって形成される聴覚興奮パターンの変化の様相によって説明できる可能性が示された。

しかしながら、N1とN2の相互変化によって仰角定位方向に偏移が生じる際に、音色知覚がどのように変化

するのかという、音色と音像定位の相互関係については不明なままである。今後、本研究の知見を基に、音像定位と音色弁別の知覚機序の更なる解明とそれらの相互作用という観点からパラメータを増やして更なる検討を進める計画である。

謝辞

本研究の一部は、JSPS科研費19H02396の助成を受けた。本研究の聴取実験にご協力いただいた東北大学大学院情報科学研究科の日吉啓、及川隼平両氏に感謝する。

参考文献

- [1] 日本音響学会, “音響用語辞典,” コロナ社, 東京, 2003.
- [2] 小澤賢司, “聴覚系にける音色知覚過程に関する研究,” 東北大学審査博士論文, 1993.
- [3] E. A. G. Shaw, “Transformation of sound pressure level from the free field to the eardrum in the horizontal plane,” *J. Acoust. Soc. Am.*, vol.56, no.6, pp.1848-1861.
- [4] M. Morimoto and Y. Ando, “On the simulation of sound localization,” *J. Acoust. Soc. Jpn. (E)*, vol.1, pp.167-174, 1980.
- [5] J. Blauert, “Spatial Hearing- The Psychophysics of Human Sound Localization,” Revised edition (MIT Press, Cambridge, Mass.), 1996.
- [6] K. Iida, M. Itoh, A. Itagaki and M. Morimoto, “Median plane localization using a parametric model of the head-related transfer function based on spectral cues,” *Applied Acoustics*, no.68, pp.835-850, 2007.
- [7] F. Asano, Y. Suzuki and T. Sone, “Role of spectral cues in median plane localization,” *J. Acoust. Soc. Am.*, no.88, pp.159-168, 1990.
- [8] 北島周, 鈴木陽一, 坂本修一, “周波数振幅スペクトル上のノッチによる音色変化の検出限と弁別限,” 日本音響学会講演論文集, 2-P-9, pp.819-820, 2015.
- [9] 曲谷地哲, 岩谷幸雄, 鈴木陽一, “仰角依存性の強い帯域のレベルを模擬した頭部伝達関数による正中面定位,” 聴覚研究会資料, vol.42, no.1, pp.47-52, 2012.
- [10] 齋藤優一, 鈴木陽一, 坂本修一, “ノッチフィルタが広帯域雑音の音色弁別に及ぼす影響,” 日本音響学会聴覚研究会資料, pp.77-82, 2016.
- [11] 日吉啓, 鈴木陽一, 坂本修一, “広帯域ノイズ中のノッチ中心周波数の偏位が音色と音像定位に与える影響,” 電子情報通信学会技術研究報告, EA2018-44, pp.103-108, 2018.
- [12] Y. Suzuki, F. Asano, H. Y. Kim, T. Sone, “An optimum computer-generated pulse signal suitable for the measurement of very long impulse response,” *J. Acoust. Soc. Am.* vol.97, no.2. pp.1119-1123, 1995.
- [13] 川浦純一, 鈴木陽一, 曾根敏夫, 相馬次郎, “悪条件の伝達関数の逆特性推定のための新しい方法,” 電子通信学会論文誌, J69-A, pp.914-917, 1986.
- [14] G.A. Gescheider, “Psychophysics: the fundamentals,” Psychology Press, 2013.

研究論文

ISO スチール・ホイール用ホイール・ボルトの締め付けトルクと軸力の関係に及ぼす潤滑状態の影響

服部 幸廣*, 甲村 一貴*, 巨藤 誠*

(2020年10月13日)

Influence of Lubricating Condition on the Relationship between Tightening Torque and Axial Force of the Wheel Bolt for ISO Steel Wheel

Yukihiro HATTORI*, Kazuki KOUMURA*, and Makoto KOTO*

(Received October 13, 2020)

Abstract

Axial force of the wheel bolt for large vehicles was quantitatively measured under the suitable and unsuitable lubricating condition in this study. As a result, in case that engine oil was only applied to the threads of both wheel bolt and wheel nut as suitable lubricant on maintenance, the axial force was about 280kN. On the other hand, in case that grease containing molybdenum disulfide was applied as unsuitable lubricant to the same specified threads, the axial force was reduced to 220kN due to the high shear stress produced by viscosity of the grease. Also, in case that these lubricants were also applied to the back of the metal washer where applying is prohibited on maintenance, the axial force was further reduced. And the axial force was about 250kN under no lubrication.

キーワード: 事故, 整備, トラック, ホイール脱落

Keywords : Accident, Maintenance, Truck, Wheel separation

1. はじめに

国土交通省が公開している車両総重量 8 トン以上の自動車または乗車定員 30 人以上の自動車(以下, 大型車)であって, 車輪を取り付けるホイール・ボルトの折損またはホイール・ナットの脱落により車輪が自動車から脱落した事故件数[1]を図 1 に示す。事故件数は平成 14 年度が 11 件, 平成 15 年度は 28 件, 平成 16 年度には 87 件と増大しており, 死亡事故に至った場合も含まれている。国土交通省が平成 16 年度に大型車の緊急点検を実施した結果, 約 2%の車両にホイール・ボルトのねじ山変形, 折損, ホイール・ナットの緩み, 欠落などの異常が見つかった。その後, 平成 17 年度の 61 件から平成 23 年度の 11 件に至るまでほぼ毎年減少したが, 平成 24 年度の 15 件以降は再びほぼ毎年増大し, 平成 30 年度には 81 件もの脱落事故が発生している。平成 29 年度には, 平成 16 年度に続き大型車の車輪脱落事故防止対策の周知徹底が国土交通省より通達されているが歯止めがかかっていない。

ホイール脱落事故の原因はハブ・ホイールなどの車

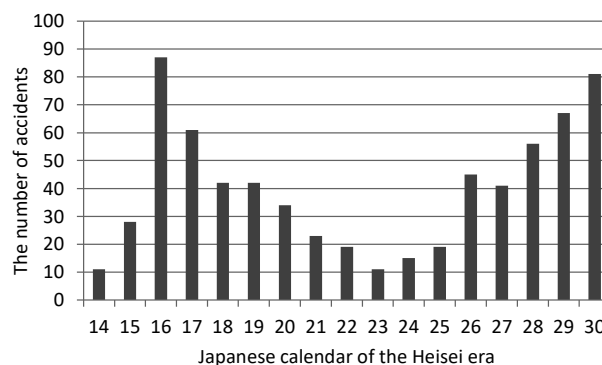


Fig. 1 The number of tire separation accidents of large vehicles

両部品の欠陥にある場合もあるが, そのほとんどはホイール脱着時の整備不良である。具体的にはホイール取り付け時のホイール・ボルトの締め付けトルクが過少あるいは過大な場合や, 取り付け用のホイール・ボルトと締め付け用のホイール・ナットの潤滑が不適切な場合, ホイールに適さないホイール・ボルトとホイール・ナットを使用した場合(いわゆる誤組)である。これらの整備不良によりホイール・ボルトの軸力が過少あるい

* 愛知工科大学自動車短期大学自動車工業学科, 〒443-0047 愛知県蒲郡市西迫町馬乗 50-2
 Department of Automotive Engineering, Aichi University of Technology Automotive Junior College, 50-2 Manori, Nishihassama-cho, Gamagori-shi, Aichi 443-0047, Japan

は過大となり走行中に疲労破壊を起こしタイヤがホイールごと外れる危険性が高くなる。

これまでの研究で旧独立行政法人交通安全環境研究所(平成 28 年から独立行政法人自動車技術総合機構交通安全環境研究所)や福岡らがボルトの潤滑剤にマシン油を用いた場合の締め付けトルクと軸力の関係を報告している[2,3]が, JIS 規格のスチール・ホイールに関する研究であり, ISO 規格のホイールに関する研究ではない。また著者らの調査では ISO スチール・ホイールに関する同様の研究は見当たらない。

著者らはこれまでの研究で, JIS 規格の大型車(後軸二輪)用スチール・ホイール組み付け時の潤滑条件を変えて, 締め付けトルクと軸力の関係を報告している[4]が, 本報では, 図 2 のような後軸二輪車に使用している ISO 規格のスチール・ホイール(インナおよびアウト), ホイール・ボルト, ホイール・ナットを用いて, 異なる潤滑条件下でホイールの組み付けを行い, それぞれの潤滑状態におけるホイール・ボルトの締め付けトルクと軸力の関係を調査した結果について述べる。



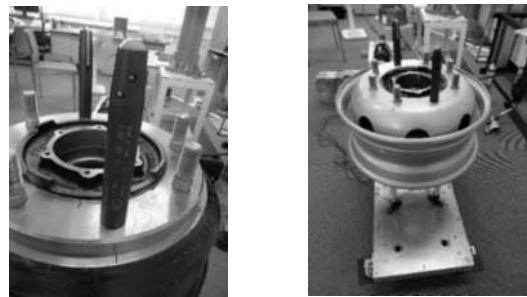
Fig. 2 Assembled double tires (ISO)

2. 実験装置

2.1 ISO 規格のダブルホイール

図 3(a)~(e)に実際の車両におけるホイールの取り付け手順と同様の手順で組み付けて行く様子を示す。まず, ドラムのボルト穴 8 箇所, ドラムの内側から外側に向かってホイール・ボルト 8 本を挿入する。そして, ホイール・ボルトの先端をハブ・ホイールのボルト穴 8 箇所に通しておき, プレス機でホイール・ボルトの端面を加圧して, ホイール・ボルトのセレーション部とハブ・ホイールのボルト穴を加締めてドラムとハブ・ホイールを結合する。そして, ハブ・ホイールとインナ・ホイールの中心を合わせるための ISO 規格ホイール用ホイール・セッター(榎空研)を対角線上の 2 本のホイール・ボルトに取り付けておく。ドラムとハブ・ホイールがホイール・ボルトで結合され, ホイール・セッターが取り付けいた外観を図 3(a)に示す。次に, ホイール・セッターに

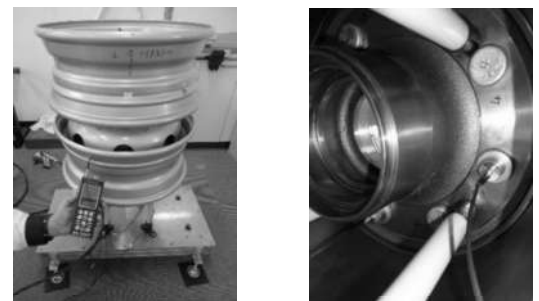
沿ってインナ・ホイールをハブ・ホイールの中心に載せる(図 3(b))。同様にして, ホイール・セッターに沿ってアウト・ホイールをハブ・ホイールの中心に載せる(図 3(c))。そして, ホイール・セッターを取り外し, 油圧レンチ(日本プララド社)を用いてホイール・ナットを規定トルクまで段階的に締め付けて, インナ・ホイールおよびアウト・ホイールをハブ・ホイールに固定する(図 3(d))。組み付けられたホイールの外観を図 3(e)に示す。図 3(f)にドラムを内側から観た様子を示す。ホイール・ボルトの端面は予め旋盤で平面加工を施しておき, その上に締め付け時のホイール・ボルトの伸びを測定するための超音波センサ(日本プララド社)を取り付けた。なお, ホイール・ボルト, スチール・ホイール, ホイール・ナットは使用過程の影響を受けない新品を使用した。



(a) A drum and a hub wheel connected by wheel bolts (left hand side figure) (b) An inner wheel guided by two proper jigs



(c) An outer wheel guided by two proper jigs (left hand side figure) (d) Wheel nuts tightened by oil pressure wrench



(e) Experimental set up (left hand side figure) (f) A sensor on a wheel bolt for measuring axial force

Fig. 3 Assembling procedure of double wheels

2.2 ホイール・ボルトの静的引張試験と伸びの計測

ホイール・ナットを規定トルクまで締め付けたときのホイール・ボルトに生じる軸力をセンサで計測した伸びから求めるため、引張試験機(榊島津製作所)を用いて静的引張試験を行い、引張荷重と伸びの関係を校正した。ホイール組み付け時に引張荷重を受けるホイール・ボルトの長さはドラム裏面とアウト・ホイール表面間の距離であるため、この距離と引張荷重がかかるボルトの長さが等しくなるように調節した。図 4 に結果を示す。見かけのばね定数は約 1.24×10^6 N/mm である。

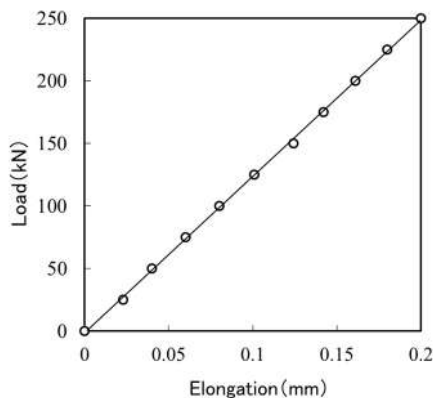


Fig. 4 Relationship between load and elongation of a wheel bolt

3. 実験方法

潤滑条件は、整備書で塗布が指定されている箇所(ボルトおよびナットのねじ部、以下説明略)のみを指定された潤滑剤(エンジン・オイル)で潤滑した場合(エンジン・オイル潤滑 1 と称する)のほか、整備不良を想定した無潤滑および二硫化モリブデン入りグリースで潤滑した場合(モリブデングリース潤滑 1 と称する)、また、本来塗布してはいけない箇所(ホイール・ナット平面座裏面、以下説明略)も潤滑した場合(エンジン・オイル潤滑 2、モリブデングリース潤滑 2 と称する)とした。潤滑剤であるエンジン・オイルはトヨタ自動車(株)(SN10W-30、鉱物油)、二硫化モリブデン入りグリースは横浜油脂工業(株)自動車用グリース(リテック 703)である。ホイールおよびそれを組み付ける 8 本のホイール・ボルト、ホイール・ナットはすべて自動車メーカーの純正品(新品)を用い、ホイール・ナット締め付け時のホイール・ボルトの伸びの計測は、同心円上に配列している 8 本のホイール・ボルトの中の 4 本(1本おき)で行うこととし、各潤滑条件でそれぞれ 3 回行った(便宜上、伸びを測定する 4 本のボルトを No.1, No.3, No.5, No.7 と称する)。また、ホイール・ナットの締め付けは油圧レンチで行い、ホイール・ボルトの伸びの計測には

超音波センサ(株日本プララド ECM-1)を用いた。測定は既定トルクである 550Nm まで段階的に締め付けながら行い、ホイール・ボルトの静的引張試験で得ている引張荷重と伸びの関係から軸力を求め、締め付けトルクと軸力の関係を調査した。

4. 実験結果と考察

計測した 4 本のボルト(No.1,3,5,7)の結果として、図 5(a)~(d)にエンジン・オイル潤滑 1、図 6(a)~(d)にエンジン・オイル潤滑 2、図 7(a)~(d)に無潤滑、図 8(a)~(d)にモリブデングリース潤滑 1、図 9(a)~(d)にモリブデングリース潤滑 2 での締め付けトルクと軸力の関係を示す。いずれの図中の実線も規定トルクまで順次締め付けて測定した伸びから求めた軸力の平均値と締め付けトルクとの関係を 1 次式で回帰した直線であり、 $\pm 1SD$ (標準偏差)を付記した。これらの結果から、潤滑条件によらずホイール・ボルトの軸力は締め付けトルクと共に増大するが、得られる軸力は潤滑条件により異なることがわかる。潤滑条件別では、塗布が指定されている箇所のみをエンジン・オイルで潤滑した場合の軸力は約 280kN であったが、塗布してはいけない箇所にもエンジン・オイルを塗布して潤滑した場合の軸力は約 240kN に減少した。これは、ホイール・ナット平面座裏面にエンジン・オイルを塗布したことで、平面座裏面とホイール表面との間にエンジン・オイルの粘性によるせん断応力が生じ、締め付け仕事がボルトの引張り仕事に寄与する割合が減少したためであると考えられる。また、無潤滑状態で締め付けた場合の軸力は約 250kN であり、エンジン・オイル潤滑での結果より小さい。これは、潤滑しなかったことで、ボルトとナットの接触箇所で摩擦抵抗が増大し、締め付け仕事がボルトの引張り仕事に寄与する割合が減少したためである。また、軸力のばらつきが他の潤滑条件での結果より大きい。これは、ボルトおよびナットの摩擦面間の微視的な付着、滑りが不安定であるためであると考えられる。そして、塗布が指定されている箇所を二硫化モリブデン入りグリースで潤滑して締め付けた場合の軸力は約 220kN であり、エンジン・オイル潤滑での結果と比べて小さい。これは、グリースの粘性がオイルと比較して大きいため、締め付け時のせん断応力がエンジン・オイルを用いたときよりも増大したためであると考えられる。また、塗布してはいけない箇所にも二硫化モリブデン入りグリースを塗布した場合の軸力は約 200kN に減少した。この原因も、ホイール・ナット平面座裏面に二硫化モリブデン入りグリースを塗布したことで、平面座裏面とホイール表面との間に、グリースによるせん断応力が生じたためであると考えられる。

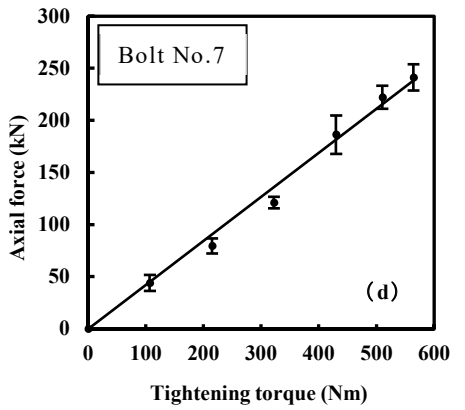
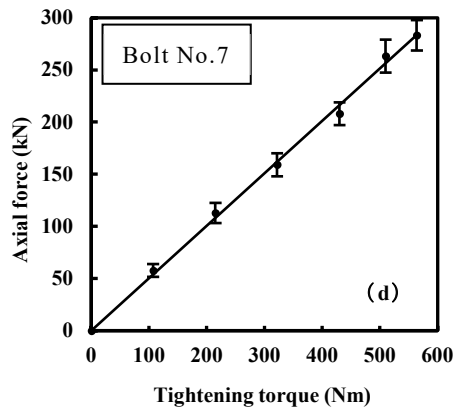
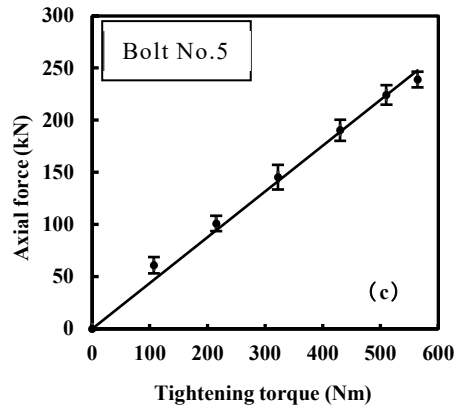
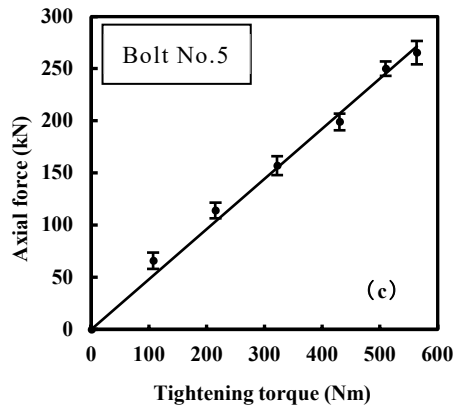
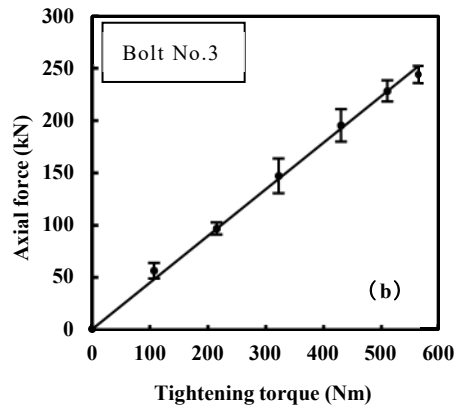
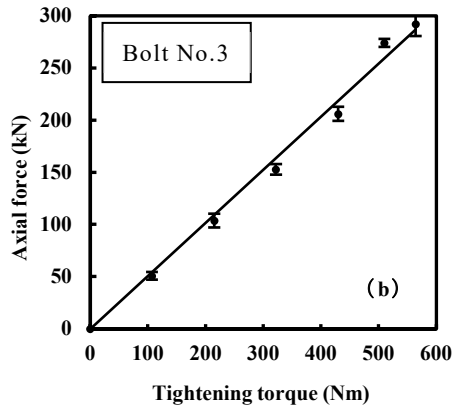
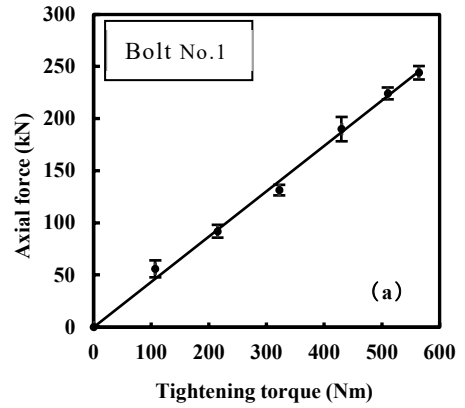
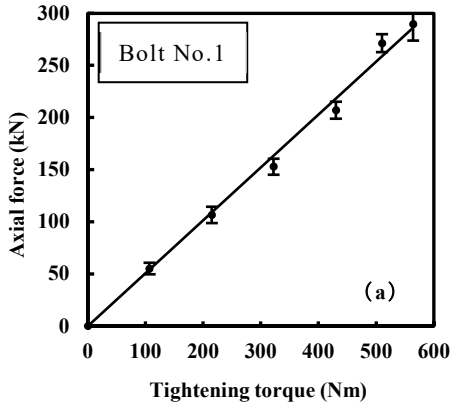


Fig.5 Relationship between axial force and tightening torque of bolt No.1,3,5,7 (Engine oil lubrication 1)

Fig.6 Relationship between axial force and tightening torque of bolt No.1,3,5,7 (Engine oil lubrication 2)

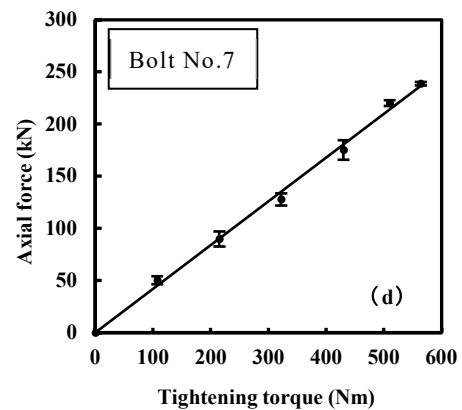
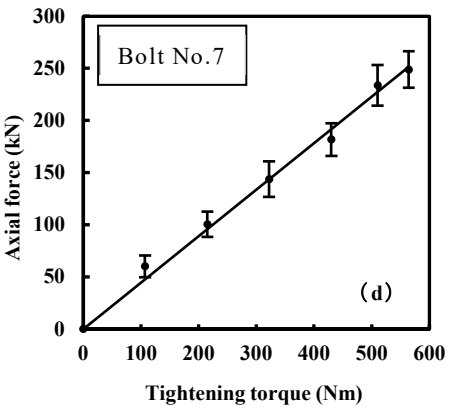
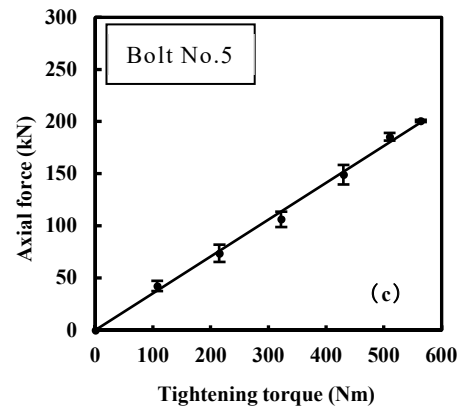
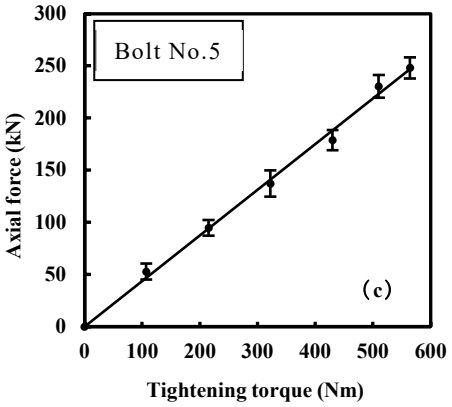
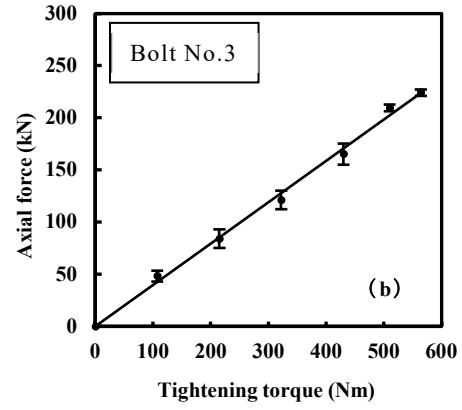
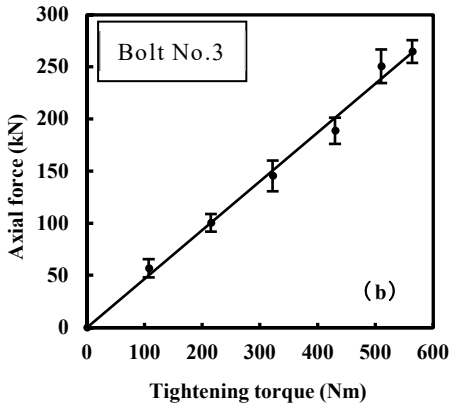
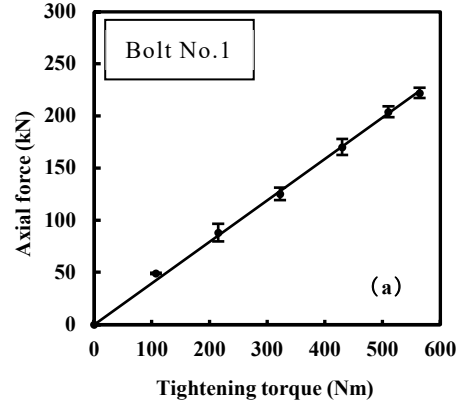
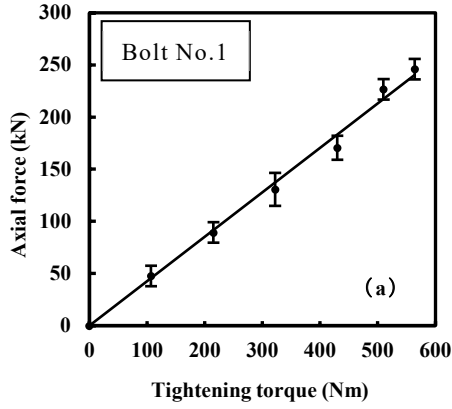


Fig.7 Relationship between axial force and tightening torque of bolt No.1,3,5,7 (No lubrication)

Fig.8 Relationship between axial force and tightening torque of bolt No.1,3,5,7 (Molybdenum disulfide grease lubrication 1)

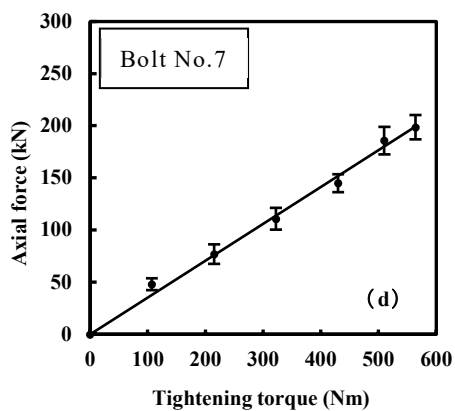
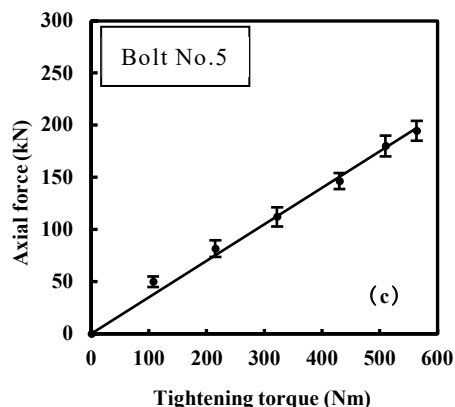
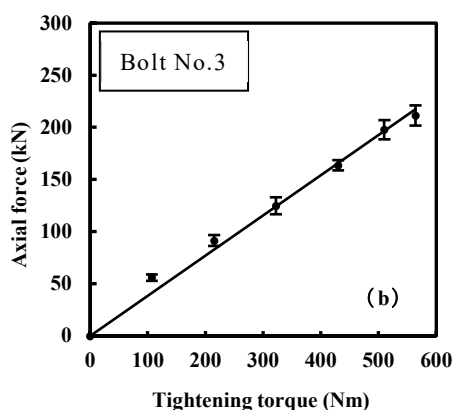
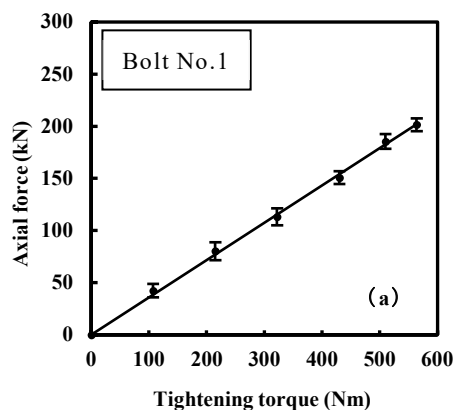


Fig.9 Relationship between axial force and tightening torque of bolt No.1,3,5,7 (Molybdenum disulfide grease lubrication 2)

5. 結言

整備上正規な潤滑条件および整備不良を想定した潤滑条件下で、ISO 規格のスチール・ホイールをホイール・ナットで規定トルクまで締め付けた場合のトルクと軸力の関係を調査し、次の結果を得た。

- (1) 指定されている箇所のみ適切な潤滑剤であるエンジン・オイルを塗布した場合の軸力と比較して、禁止されている二硫化モリブデン入りグリースを塗布すると軸力が低下することを定量的に示した。
- (2) 塗布が禁止されている箇所にもエンジン・オイル、二硫化モリブデン入りグリースを塗布すると、軸力が更に低下することを示した。
- (3) 潤滑剤を塗布しないと軸力が低下するとともに、軸力のばらつきが大きくなることを示した。

6. おわりに

大型車の車輪脱落を防止するためには、ホイール・ボルトの軸力を適正範囲に維持することが重要であり、冒頭で述べた整備不良の撲滅の他、ホイール脱着後に一定距離走行した後の増し締め、運行前点検でのホイール・ナットの締め付け状態の確認を徹底することが必須である。また、原因は解明されていないが、車輪脱落箇所は左後輪(複輪)に集中しているため、現在、その発生メカニズムについて検討している。

謝辞

本研究遂行にあたり、引張試験機の取り扱いについて懇切丁寧な御指導を頂きました愛知工科大学山本照美 名誉教授、ホイール・ボルトの端面加工や治具作製などに御協力頂いた本学ものづくり工作センターの方々に深く感謝致します。

参考文献

- [1] 国土交通省，“ボルトの錆や左後輪に注意！車輪脱落事故 3 年連続増加「厳しい状況」～平成 30 年度大型車の車輪脱落事故発生状況を受けて，” 国土交通省ホームページ，(参照日：2020 年 10 月 9 日，https://www.mlit.go.jp/report/press/jidosha09_hh_000231.html)
- [2] (独法)交通安全環境研究所，“大型車のホイール・ボルト折損による車輪脱落事故に係る調査検討会報告書，”pp.50-55, Dec. 2004.
- [3] 福岡俊道，野村昌孝，木澤正彦，福万祥教，“有限要素解析における大型車用ホイール・ボ

ルトの締め付け特性の評価,”日本機械学会論文集, C編, vol.75, no.750, pp.446-453, Feb. 2009.

- [4] 服部幸廣, 甲村一貴, 巨藤誠, “大型車用ホイール・ボルトの締め付けトルクと軸力の関係に及ぼす潤滑状態の影響(二硫化モリブデン入り潤滑剤を用いた場合の特性),”自動車整備技術に関する研究報告誌, vol.48, pp.42-46, Oct. 2019.

研究ノート

未知入力オブザーバ適用による電動車椅子の駆動力推定

梶谷 満信*, 阿部 己和*

(2020年9月30日受理)

Driving Force Estimation of Electric Wheelchair applying Unknown Input Observer

Mitsunobu KAJITANI*, Tomokazu ABE*

(Received September 30, 2020)

Abstract

Recently the electric wheelchair accidents are increasing more and more, the one of the causes of which is a slip on the road. So, it is important to develop the low-cost system preventing a slip. This system requires the technology to estimate the changing road surface status. Therefore, this paper reports the comparison result between the general disturbance observer and the unknown input observer having faster estimation structure.

キーワード: スリップ率, 制御, 外乱オブザーバ, Simulink モデル

Keywords : Slip Rate, Control System, Road Surface Estimation, Disturbance Observer, Simulink Model

1. はじめに

社会の高齢化に伴い電動車椅子の事故が急増している。この事故の要因は多々あるが、その一つにスリップにより制御不能となり事故に至った事例がある。(1)

この背景をもとに、高齢者の入手しやすい廉価な車椅子のスリップ率制御システム構築の検討に着手したが、次の三つ課題があることが判明した。

- ① 最適スリップ率を求めるための路面状態推定
- ② スリップ率を算出するための実車速推定
- ③ スリップ率抑制のための高応答コントローラ

本稿では、課題①に関する基礎検討として、路面状態推定に必要な駆動力推定について、下記二つのオブザーバの性能をシミュレーションにて比較を行ったので報告する。

- スリップ率制御の多くの文献で駆動力推定に適用されている外乱オブザーバ(2,3,4)
- 上記より早い推定構造をもつ未知入力オブザーバ(5)

2. スリップ率制御の概要と課題

2.1 スリップ率制御の概要

様々な路面状態におけるスリップ率 λ とタイヤと路面間の摩擦係数 μ の関係の一例を図1に示す。

なお、この図は次の Magic Formula の式より求めた結果である。(6)

$$\mu(\lambda) = -C_r \cdot 1.1(e^{-35\lambda} - e^{-0.35\lambda}) \tag{1}$$

$$\lambda = \frac{V_w - V_b}{V_b}$$

ただし、 μ :タイヤと路面間の摩擦係数

C_r :路面状態を表す係数

λ :スリップ率 V_w :車輪速度, V_b :車椅子速度

路面状態に関わらず、摩擦係数はスリップ率に比例して大きくなるが、最大摩擦係数となるスリップ率 λ_{max} を超えると低下する。ただし、 λ_{max} の値は路面状態によって異なっている。

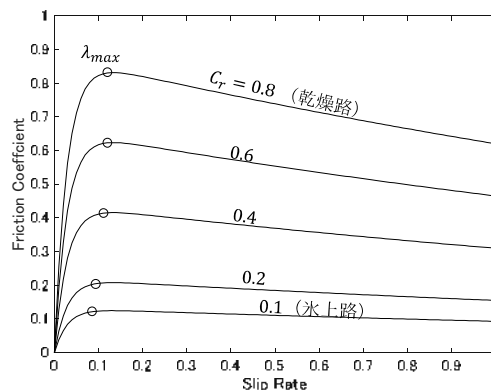


Fig.1 Relation between Slip Rate and Driving Force

* 愛知工科大学工学部機械システム工学科, 〒443-0047 愛知県蒲郡市西迫町馬乗 50-2
 Department of Mechanical Systems Engineering, Aichi University of Technology, 50-2 Manori, Nishihama-cho, Gamagori-shi, Aichi 443-0047, Japan

スリップ率制御の目的は、スリップ率を λ_{max} を超えないように適正スリップ率 λ_{opt} 以下に抑制することである。そのための制御の基本構成を図2に示す。路面状態推定器で λ_{opt} を算出し、スリップ率制御器で λ_{opt} をもとに適正駆動力 F_{opt} を算出し、ドライバー要求の駆動力 F_{dem} と比較し、低い方の値で車椅子を駆動している。

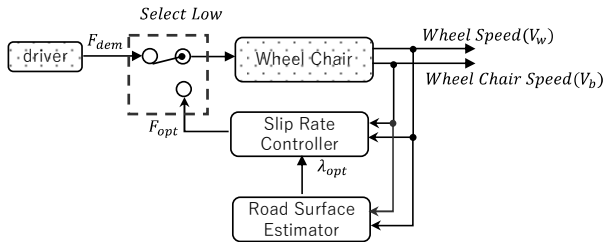


Fig.2 Basic Configuration of Slip Rate Control

2.2 スリップ率制御の課題

コントローラへの入力には車輪速度、車椅子速度および適正スリップ率である。しかし、車輪速度は実測できるが、スリップを伴う車椅子速度は実測できない。また、適正スリップ率算出の指標となる λ_{max} も実測できない。

従って、スリップ率制御を構築するには、コントローラの高応答化だけでなく、下記も課題となる。

- ① 路面状態によって変化する λ_{max} の推定
- ② スリップを伴う車椅子速度の推定

以下の章では、①の課題に対応するためのオブザーバを用いた駆動力推定法について述べる。

3. シミュレーションに用いた車椅子モデル

駆動力推定のシミュレーション検討に用いた車椅子のモデルについて述べる。

3.1 車椅子の並進運動の方程式

車椅子が並進運動している際に働いている力を図3に示す。モータの力 F_m （モータトルクをタイヤの接地点で力に換算した値）でタイヤが回転運動すると、車輪と路面間にスリップが発生する。

このスリップによって生じる摩擦力が駆動力 F_d となり、車椅子本体が並進運動を行っている。なお、駆動力 F_d は式(1)の摩擦係数を用いて計算した。

$$F_d = \mu(\lambda)N \quad (2)$$

ただし、 N : 垂直抗力 [N]

車輪および車椅子の運動方程式は次式となる。

- (1) 車輪の運動方程式

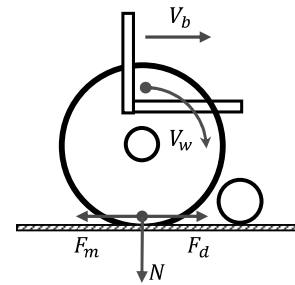


Fig.3 Working Force on Wheel Chair

モータの力 F_m から並進運動のための駆動力 F_d を引いた力で運動しているので次式となる。

$$F_m - F_d = M_w \dot{v}_w + c_w v_w \quad (3)$$

ただし、

F_m : モータトルクを力に換算した値 [N]

F_d : 駆動力 [N]

M_w : 車輪の慣性質量を質量に換算した値 [Kg]

v_w : 車輪の角速度を速度に換算した値 [m/s]

c_w : 車輪の抵抗係数

- (2) 車椅子本体の運動方程式

駆動力 F_d で並進運動をしているので次式となる。

$$F_d = M_b \dot{v}_b + c_b v_b \quad (4)$$

ただし、

M_b : 車椅子本体の質量 [Kg]

v_b : 車椅子本体の速度 [m/s]

c_b : 車椅子本体の抵抗係数

3.2 車椅子の SIMULINK モデル

3.1 項の式に基づいて構成したの並進運動の SIMULINK モデルを図4に示す。車輪モデル、車椅子本体モデルおよび駆動力モデルのサブシステムより構成している。

車輪モデルを図5aに、駆動力モデルを図5bに示すが、それぞれ式(3)と式(1)に基づいて構成している。なお、車椅子本体モデルはほぼ同様なの省略する。

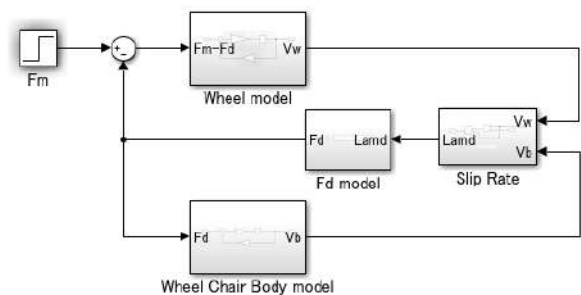


Fig.4 SIMULINK Model of Electric Wheel Chair

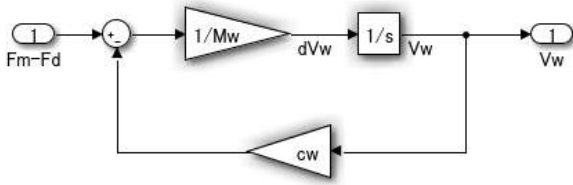


Fig.5a Wheel Model

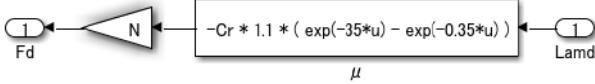


Fig.5b Driving Force Model

4. オブザーバによる駆動力推定

4.1 駆動力推定のねらい

駆動力 F_d を測定できれば、式(2)より摩擦係数 μ を求めることができるので λ_{max} の推定ができる。そこで、駆動論の軸にトルクセンサを取り付けて駆動力を測定することも可能だが、コストおよび搭載性の視点より、次の二つのオブザーバを用いて推定し、性能を比較検証する。

- スリップ率制御多くの文献で適用されている
外乱オブザーバ
- 上記より早い推定構造の
未知入力オブザーバ

4.2 オブザーバ設計に用いる基本の状態方程式

両方のオブザーバ設計に用いる制御対象の基本となる状態方程式を記述する。

外乱オブザーバには制御対象の入出力が、未知入力オブザーバには少なくとも出力が必要となる。よって、車椅子本体モデルの入出力は未知なので、車輪モデルを制御対象と考えてオブザーバを設計する。

車輪モデルの基本となる状態方程式は、式(1)を \dot{v}_w について整理した次式となる。

$$\dot{v}_w(t) = -\frac{a_w}{M_w} v_w(t) + \frac{1}{M_w} F_m(t) - \frac{1}{M_w} F_d(t) \quad (5a)$$

$$y_w(t) = v_w(t) \quad (5b)$$

5. 外乱オブザーバによる駆動力推定

5.1 外乱オブザーバ設計に用いる状態方程式

式(5a)の状態方程式をもとに、外乱オブザーバの設計に用いる状態方程式を導出する。

駆動力 $F_d(t)$ は未知なので、その動特性をステップ的に変化するものと仮定すると、駆動力 $F_d(t)$ の微分方程式は次式となる。

$$\dot{F}_d(t) = 0 \quad (6)$$

ここで、駆動力 $F_d(t)$ を新たな状態量と考えて、式(5a)を変形すると、次式の外乱オブザーバに用いる状態方程式を得る。

$$\dot{X}_{do}(t) = A_{do} X_{do}(t) + B_{do} F_m(t) \quad (7)$$

$$y_{do}(t) = C_{do} X_{do}(t)$$

$$\text{ただし, } A_{do} = \begin{bmatrix} -\frac{a_w}{M_w} & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad B_{do} = \begin{bmatrix} \frac{1}{M_w} \\ 0 \end{bmatrix}, \quad C_{do} = [1 \ 0]$$

$$X_{do} = \begin{bmatrix} v_w(t) \\ F_d(t) \end{bmatrix}$$

5.2 外乱オブザーバの構造 (7)

式(7)をもとに次式の予測モデルを導入する。

$$\dot{\hat{X}}_{do}(t) = A_{do} \hat{X}_{do}(t) + B_{do} F_m(t)$$

$$\hat{y}_{do}(t) = C_{do} \hat{X}_{do}(t)$$

この予測モデルには次式の誤差 e_{do} が存在する。

$$e_{do} = X_{do} - \hat{X}_{do}$$

そこで、実測値の出力とモデル出力との偏差をゲイン L_{do} でフィードバックした次式のモデルに修正する。

$$\dot{\hat{X}}_{do}(t) = A_{do} \hat{X}_{do}(t) + B_{do} F_m(t)$$

$$-L_{do} (y_{do}(t) - \hat{y}_{do}) \quad (8)$$

このモデルが外乱オブザーバの式であり、その構造は図6となる。

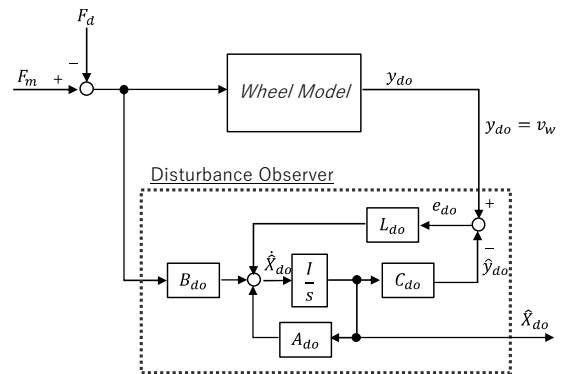


Fig.6 Configuration of Disturbance Observer

5.3 外乱オブザーバのゲイン設計

式(7)と(8)の差をとることにより、次式の誤差 e_{do} に関する状態方程式を得る。

$$\dot{e}_{do} = (A_{do} - L_{do} C_{do}) e_{do} \quad (9)$$

ただし、 L_{do} : オブザーバゲイン

よって、誤差 e の特性方程式は

$$|A_{do} - L_{do} C_{do}| = 0$$

となるので、本稿ではフィードバックゲイン L_{do} を極配置法を用いて設計した。

5.4 外乱オブザーバの駆動力推定性能

図4の車椅子のSIMULINKモデルを用いて駆動力推定性能を下記条件でシミュレーションした結果を図7aおよび図7bに示す。

- ・ F_m : 時刻 1sec に 500N の Step 入力
- ・ C_r : 時刻 3sec で 0.8(乾燥路)から 0.1(氷上路) にステップ的に変更

前者は加速初期、後者は路面状態を変更したときの性能を示す。極 P_o を大きくすると、実際の駆動力 F_d にほぼ近い応答で推定できている。ただし、実機では出力ノイズを考慮した極の選定となるので、その応答性を見極める必要がある。

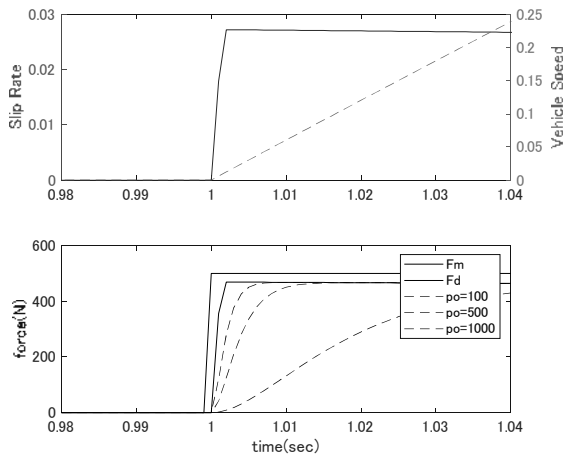


Fig.7a Performance of Disturbance Observer (Initial Acceleration)

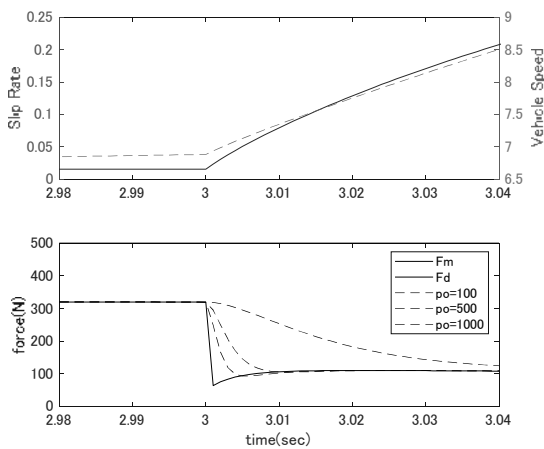


Fig.7b Performance of Disturbance Observer (Transition from dry to ice road)

6. 未知入力オブザーバによる駆動力推定

6.1 未知入力オブザーバ設計に用いる状態方程式

未知入力オブザーバの設計においては、駆動力 $F_d(t)$ も入力として扱うので2入力となる。しかし、未知入力オブザーバを成立させるには、出力の数が入力の数以上でなければならない⁽⁸⁾。

そこで、式(5a)をもとに、角速度 $v_w(t)$ だけでなく角度 $\theta_w(t)$ も出力とする制御対象の状態方程式を導入する。

$$\dot{\theta}_w(t) = v_w(t)$$

なので

$$\dot{X}_{uio}(t) = A_{uio}X_{uio}(t) + B_{uio}F_m(t) + E_{uio}F_d(t) \quad (10a)$$

$$Y_{uio}(t) = C_{uio}X_{uio}(t) \quad (10b)$$

ただし、

$$X_{uio}(t) = \begin{bmatrix} \theta_w(t) \\ v_w(t) \end{bmatrix}, \quad Y_{uio}(t) = \begin{bmatrix} \theta_w(t) \\ v_w(t) \end{bmatrix}$$

$$A_{uio} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 0 & -\frac{c_w}{M_w} \end{bmatrix}, \quad B_{uio} = \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{1}{M_w} \end{bmatrix},$$

$$C_{uio} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad E_{uio} = \begin{bmatrix} 0 \\ -\frac{1}{M_w} \end{bmatrix}$$

6.2 未知入力オブザーバの構造と外乱の推定⁽⁹⁾

(1) 未知入力オブザーバの構造

次式の補助変数 z を導入し、

$$\dot{z}(t) = F \cdot z(t) + T \cdot B_{uio} \cdot F_m(t) + (L_{uio} + K_y)Y_{uio}(t) \quad (11)$$

この変数と出力より状態量を推定している。

$$\hat{X}_{uio}(t) = z(t) + H \cdot Y_{uio}(t) \quad (12)$$

ただし、

L_{uio} : 推定誤差 e_{uio} を無くすオブザーバゲイン

$$e_{uio} = X_{uio} - \hat{X}_{uio} \quad (13)$$

F, T, K_y, H : L_{uio} より求まる定数

式(11), (12)の未知入力オブザーバの構造は図8となる。

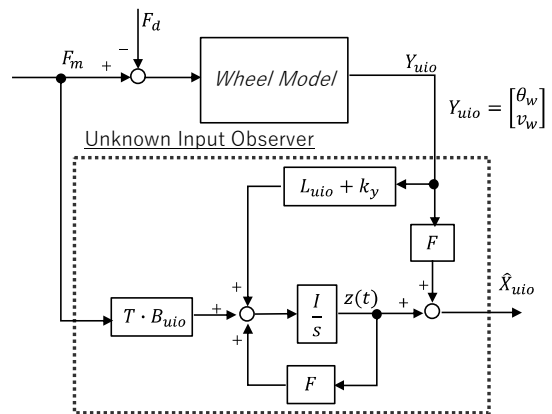


Fig.8 Configuration of Un-known Input Observer

(2) 外乱の推定

外乱の推定値 $\hat{F}_d(t)$ は、式(10a)の $X_{uio}(t)$ および $F_d(t)$ を推定値の $\hat{X}_{uio}(t)$ と $\hat{F}_d(t)$ に置換することにより得ることができる。

$$\begin{aligned}\dot{\hat{X}}_{uio}(t) &= A_{uio}\hat{X}_{uio}(t) + B_{uio}F_m(t) + E_{uio}\hat{F}_d(t) \\ \hat{F}_d(t) &= E_{uio}^{-1}\{\dot{\hat{X}}_{uio}(t) - A_{uio}\hat{X}_{uio}(t) - B_{uio}F_m(t)\} \quad (14)\end{aligned}$$

6.3 未知入力オブザーバのゲイン設計

推定誤差 e_{uio} を微分した

$$\dot{e}_{uio} = \dot{X}_{uio} - \dot{\hat{X}}_{uio} \quad (15)$$

に式(10a)と式(12)の微分を代入すると次式となる。導入の詳細は補足 1 に示す。

$$\begin{aligned}\dot{e}_{uio}(t) &= \{(I - H \cdot C_{uio})A_{uio} - L_{uio}C_{uio}\}e_{uio}(t) \\ &\quad + \{(I - H \cdot C_{uio})A_{uio} - L_{uio}C_{uio}\} - F\}z(t) \\ &\quad + \{(I - H \cdot C_{uio})A_{uio}H - L_{uio}C_{uio}\} - K_y\}Y_{uio}(t) \\ &\quad + \{(I - H \cdot C_{uio}) - T\}B_{uio}F_m(t) \\ &\quad + (I - H \cdot C_{uio})E_{uio}F_d(t) \quad (16)\end{aligned}$$

$\dot{e}_{uio} = 0$ とするには、次の二つの条件を満たす必要がある。

- A) 第 1 項が安定収束
- B) 第 2 項以降がゼロ
- 条件 A) を満たすように、第 1 項の特性方程式は $|S \cdot I \{(I - H \cdot C_{uio})A_{uio} - L_{uio}C_{uio}\}| = 0$ となるので、5.3 項と同様にゲイン L_{uio} を極配置法を適用して設計した。ただし、入出力の数 が等しいため L_{uio} と関係なく固定極となった⁽⁸⁾。
- 条件 B) を満たすには、第 2 項以降の係数がゼロであればよいので各係数は次式となる。導入の詳細は補足 2 に示す。

$$\begin{aligned}H &= E_{uio}(C_{uio}E_{uio})^{-1} \\ F &= (I - H \cdot C_{uio})A_{uio} - L_{uio}C_{uio} \\ K_y &= F \cdot H - L_{uio}C_{uio} \\ T &= (I - H \cdot C_{uio})\end{aligned}$$

6.4 未知入力オブザーバの駆動力推定性能

5.4 項と同じ条件でシミュレーションした結果を図 9a および図 9b に示す。前者は加速初期、後者は路面状態が切替えたときの性能で、外乱オブザーバと比較して示す。

未知入力オブザーバは外乱オブザーバに比べて応答が早く、遅れなく実際の駆動力を推定できている。

この早さは、式(14)の $\hat{F}_d(t)$ 推定に微分項 $\dot{\hat{X}}_{uio}(t)$ を含んでいるためと考えるが、出力ノイズの影響を受けやすい。よって、実機ではローパスフィルターを要する可能性があるため、その応答性を見極める必要がある。

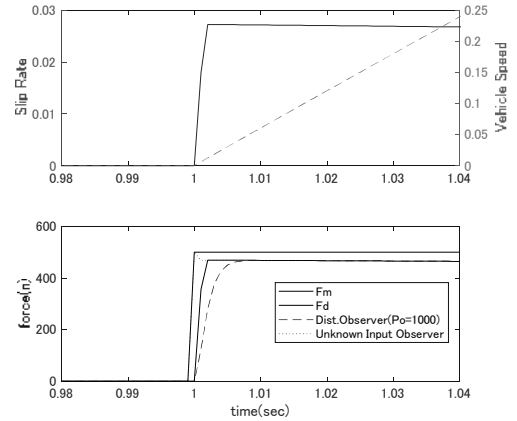


Fig.9a Performance of Un-known Input Observer (Initial Acceleration)

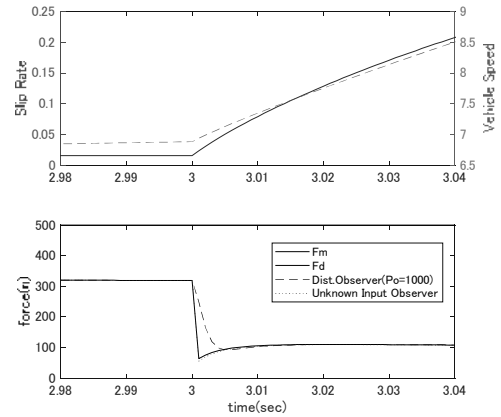


Fig.9b Performance of Un-known Input Observer (Transition from dry to ice road)

6. おわりに

急増する電動車椅子の事故の要因の一つであるスリップを無くすために、廉価なスリップ率制御システムの検討に着手した。本稿では、このシステム構築に必要な路面状況によって変化する駆動力推定について検討を行った。具体的には、スリップ制御の多くの文献で適用されてきた外乱オブザーバと早い推定構造をもつ未知入力オブザーバの推定性能をシミュレーションにて比較検討を行い次の知見を得た。

(1) 外乱オブザーバの推定性能

極を大きくすることにより高応答の性能となる。ただし、出力にのるノイズなどの影響を考えると実機ではこの大きな極を適用できるか検証が必要である。

(2) 未知入力オブザーバの推定性能

入出力の数が等しいため固定極となるが、推定式に微分項を含むため大きな極の外乱オブザーバに比べても僅かだが応答が早い。ただし、出力にのるノイズなどの影響を考えるとローパスフィルターを要する可能性があるため、実機での検証が必要である。

補足 1 式(16)の導出

式(15)に式(10a)と式(12)の微分を代入

$$\dot{e}_{uio} = A_{uio}X_{uio}(t) + B_{uio}F_m(t) + E_{uio}F_d(t) - \{z(t) + H \cdot \dot{Y}_{uio}(t)\} \quad (A1)$$

式(10b)を微分し、式(10a)を代入

$$\dot{Y}_{uio}(t) = C_{uio}\dot{X}_{uio}(t) = C_{uio}\{A_{uio}X_{uio}(t) + B_{uio}F_m(t) + E_{uio}F_d(t)\} \quad (A2)$$

式(A1)に式(11)と(A2)を代入

$$\begin{aligned} \dot{e}_{uio} &= A_{uio}X_{uio}(t) + B_{uio}F_m(t) + E_{uio}F_d(t) \\ &\quad - \{F \cdot z(t) + T \cdot B_{uio} \cdot F_m(t) + (L_{uio} + K_y)Y_{uio}(t)\} \\ &\quad - H \cdot C_{uio}\{A_{uio}X_{uio}(t) + B_{uio}F_m(t) + E_{uio}F_d(t)\} \end{aligned}$$

$$Y_{uio}(t) = C_{uio}X_{uio}(t) \text{ を考慮して整理すると}$$

$$\begin{aligned} \dot{e}_{uio} &= \{(I - H \cdot C_{uio})A_{uio} - L_{uio}C_{uio}\}X_{uio}(t) \\ &\quad + [(I - H \cdot C_{uio}) - T]B_{uio}F_m(t) \\ &\quad + (I - H \cdot C_{uio})E_{uio}F_d(t) \\ &\quad - F \cdot z(t) - K_y Y_{uio}(t) \end{aligned} \quad (A3)$$

式(12), (13)を用いて、 $X_{uio}(t)$ を $e_{uio}(t)$ で表現

$$\begin{aligned} X_{uio}(t) &= e_{uio}(t) + \hat{X}_{uio}(t) \\ &= e_{uio}(t) + z(t) + H \cdot Y_{uio}(t) \end{aligned} \quad (A4)$$

式(A3)に式(A4)を代入

$$\begin{aligned} \dot{e}_{uio}(t) &= \{(I - H \cdot C_{uio})A_{uio} - L_{uio}C_{uio}\} \\ &\quad \times [e_{uio}(t) + z(t) + H \cdot Y_{uio}(t)] \\ &\quad + [(I - H \cdot C_{uio}) - T]B_{uio}F_m(t) \\ &\quad + (I - H \cdot C_{uio})E_{uio}F_d(t) \\ &\quad - F \cdot z(t) - K_y \cdot Y_{uio}(t) \end{aligned}$$

整理すると、式(6.6)となる。

$$\begin{aligned} \dot{e}_{uio}(t) &= \{(I - H \cdot C_{uio})A_{uio} - L_{uio}C_{uio}\}e_{uio}(t) \\ &\quad + \{[(I - H \cdot C_{uio})A_{uio} - L_{uio}C_{uio}] - F\}z(t) \\ &\quad + \{[(I - H \cdot C_{uio})A_{uio}H - L_{uio}C_{uio}] - K_y\}Y_{uio}(t) \\ &\quad + [(I - H \cdot C_{uio}) - T]B_{uio}F_m(t) \\ &\quad + (I - H \cdot C_{uio})E_{uio}F_d(t) \end{aligned} \quad (16)$$

補足 2 各係数の導出

第 2 項より

$$\begin{aligned} \{(I - H \cdot C_{uio})A_{uio} - L_{uio}C_{uio}\} - F &= 0 \\ F &= (I - H \cdot C_{uio})A_{uio} - L_{uio}C_{uio} \end{aligned}$$

第 3 項より

$$\begin{aligned} \{(I - H \cdot C_{uio})A_{uio}H - L_{uio}C_{uio}\} - K_y &= 0 \\ K_y &= (I - H \cdot C_{uio})A_{uio}H - L_{uio}C_{uio} \\ &= F \cdot H - L_{uio}C_{uio} \end{aligned}$$

第 4 項より

$$\begin{aligned} (I - H \cdot C_{uio}) - T &= 0 \\ T &= (I - H \cdot C_{uio}) \end{aligned}$$

第 4 項より

$$\begin{aligned} (I - H \cdot C_{uio})E_{uio} &= 0 \\ H \cdot C_{uio}E_{uio} &= E_{uio} \\ H &= E_{uio}(C_{uio}E_{uio})^{-1} \end{aligned}$$

参考文献

- [1] 消費者庁 News Release, “電動車椅子を使用中に死亡事故が発生しています！,” 平成 24 年 11 月 27 日.
- [2] 堀洋一, “電気自動車の新しいモーションコントロール,” システム/制御/情報, Vol.45, No.5, p.231-239, 2001.
- [3] 横山誠, “スライディングモード制御によるアンチロックブレーキシステム,” 日本機械学会論文集(C編), 63 巻, 611 号, p.2302-2307,1997.
- [4] 前田健太, “タイヤ横すべりを考慮した限界スリップ率推定に基づく電気自動車の駆動力制御,” 計測自動制御学会論文集, Vol.50, No.3, p.259-265, 2014.
- [5] 武部雄一郎, “未知入力オブザーバを用いたペダリングトルク推定,” NAIST-IS-MT1151125, 修士論文, 2013.
- [6] 河部徹, “モデル予測型 PID 制御による電気自動車のトラクションコントロール,” 日本機械学会論文集(C編), Vol.77, No.781, pp.172-182, 2011.
- [7] 野波健蔵, “制御理論の基礎,” p182, 東京電機大学出版局, 東京, 1998.
- [8] 岩井善太, “オブザーバ,” p207-208, コロナ社, 東京, 1988.
- [9] Sam Nazari, “A Review of Unknown Input Observer with Example,” Computer Science, Mathematics, Corpus ID:8483693, Published 2015.

研究ノート

追従制御検討ための電動車いすの SIMULINK モデル

阿部 己和*, 梶谷 満信*

(2020年9月30日受理)

Simulink Model of Electric Wheelchair for Following Control Development

Tomokazu ABE*, Mitsunobu KAJITANI*

(Received September 30, 2020)

Abstract

Considering an aging population, it is necessary to make the electric wheelchair more safe and easy drive. The one of the important technologies to realize it is the following control. The following performance is affected by both environmental circumstances and wheelchair dimensions. This paper describes the SIMULINK Model of wheelchair which makes it possible to develop efficiently the following control considering the effect of the wheelchair dimensions.

キーワード: ホワイトボックスモデリング, 物理モデル, 制御工学

Keywords : White-box Modeling, Physical Model, Control Engineering

1. はじめに

社会の高齢化を考慮すると,電動車椅子をより安全かつ運転しやすく必要があると考える.

そのためには様々な技術が必要となる.その一つに GPS などを用いて周辺環境を認識し,電動車椅子を目標軌道に追従させる技術がある[1,2,3].

この技術には,環境認識技術も大切だが,追従制御そのものの高性能化も重要となる.そのわけは,追従性能は,路面勾配などの環境だけでなく,重心位置や前輪などの車椅子の諸元にも影響を受けるためである.

本稿では,後者の車椅子の諸元の影響を効率的に検討するために,大垣[4]および住谷[5]の論文を参考にして SIMULINK モデルを構築したので報告する.

2. 電動車いす本体の運動方程式

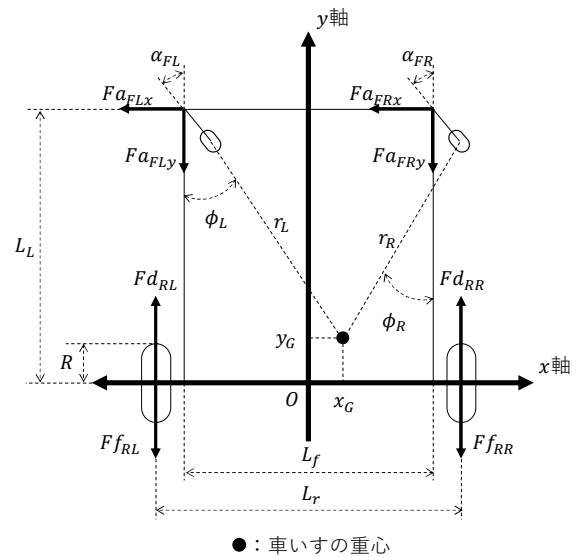
電動車いす本体の諸元および本体に作用している下記の力を Fig. 1 に示す.なお,図中の x-y 座標系の原点は後輪軸の中心であり,Y 軸は車椅子の並進方向である.添え字の第 1 文字は前輪(F)または後輪(R)を,第 2 文字は左(L)右(R)意味する.

Fd_{RR}, Fd_{RL} : 後輪の駆動力

Fa_{FR*}, Fa_{FL*} : 前輪の取付点から本体に作用する力

Ff_{RR}, Ff_{RL} : 後輪の摩擦力

なお,モデル化に当たり走行面は平坦でスリップや緩衝装置の影響は考えないものとする.



●: 車いすの重心
Fig. 1 車いす本体のモデル

2.1. 重心における並進運動の運動方程式導出

(1) 並進方向の力 F_R

* 愛知工科大学工学部機械システム工学科, 〒443-0047 愛知県蒲郡市西迫町馬乗 50-2

Department of Mechanical Systems Engineering, Aichi University of Technology, 50-2 Manori, Nishihama-cho, Gamagori-shi, Aichi 443-0047, Japan

並進方向の力は後輪の駆動力 Fd_{R*} ,前輪の接続部から本体に作用する力 Fa_{F*} および後輪の摩擦力 Ff_{R*} の合力で次式となる.

$$F_R = Fd_{RR} + Fd_{RL} - Ff_{RR} - Ff_{RL} - Fa_{FRy} - Fa_{FLy} \quad (2.1)$$

$$Ff_{RR} = F_{RD} + c_{Rv}R\dot{\theta}_R \quad (2.2)$$

$$Ff_{RL} = F_{RD} + c_{Rv}R\dot{\theta}_L \quad (2.3)$$

ただし, F_{RD} : 後輪にかかる前後方向の外乱

c_{Rv} : 後輪の回転速度に関する摩擦係数

$\dot{\theta}_*$: 左右後輪の角速度

Fa_{FRy} および Fa_{FLy} : 後述する (3.5) 式および (3.14) 式

(2) 並進方向の加速度 α_R

左旋回時の後輪軸を抽出して Fig. 2 に示す. 三角形 ACD と三角形 ABE の相似関係を利用すると, 並進方向の加速度 α_y は次式となる

$$\begin{aligned} \alpha_R &= R\ddot{\theta}_L + \frac{R\dot{\theta}_R - R\dot{\theta}_L}{L_r} \left(\frac{L_r}{2} + x_G \right) \\ &= \frac{R(L_r + 2x_G)\ddot{\theta}_R + R(L_r - 2x_G)\ddot{\theta}_L}{2L_r} \end{aligned} \quad (2.4)$$

(1),(2)項より, 並進運動の運動方程式は次式となる.

$$F_R = m_s \alpha_R \quad (2.5)$$

ただし, m_s : 前輪を除く車いすの質量

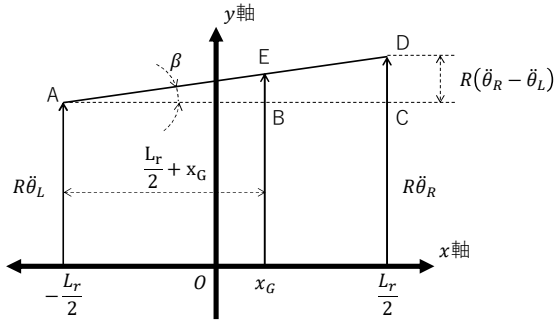


Fig. 2 重心の加速度

2.2. 重心における回転運動の運動方程式導出

(1) 回転運動のモーメント M_R

左右の前後輪に働くモーメントの合力で, 左回りを正とすると次式となる.

$$\begin{aligned} M_R &= \frac{L_r - 2x_G}{2} (Fd_{RR} - Ff_{RR}) \\ &\quad - \frac{L_r + 2x_G}{2} (Fd_{RL} \\ &\quad - Ff_{RL}) \\ &\quad + \frac{L_f + 2x_G}{2} Fa_{FRy} - \frac{L_f - 2x_G}{2} Fa_{FLy} \\ &\quad + (L_L - y_G)(Fa_{FRx} + Fa_{FLx}) \end{aligned} \quad (2.6)$$

第 1 項は右後輪の左回りのモーメントであり, 重心から後輪までの距離 $(L_r - 2x_G)/2$ と後輪に働いている力の総和 $(Fd_{RR} - Ff_{RR})$ の乗算である. 同様の考え方で, 第 2 項は左後輪の右回りのモーメント, 第 3 項は右前輪の左回りのモーメント, 第 4 項は左前輪の右回りのモーメントおよび第 5 項は両前輪の左回りのモーメントである

(2) 回転運動の角加速度 $\dot{\omega}$

Fig. 2 に示した x-y 座標系において, フレームの進行方向に対する角度 β は

$$\beta = \frac{R}{L_r} (\theta_R - \theta_L) \quad (2.7)$$

なので, 重心に対する回転の角速度 ω および角加速度 $\dot{\omega}$ は次式となる.

$$\omega = \frac{R}{L_r} (\dot{\theta}_R - \dot{\theta}_L) \quad (2.8)$$

$$\dot{\omega} = \frac{R}{L_r} (\ddot{\theta}_R - \ddot{\theta}_L) \quad (2.9)$$

(1),(2)項より, 慣性モーメントを I とすれば重心まわりの回転運動の運動方程式は次式となる.

$$I\dot{\omega} = M_R - M\omega \quad (2.10)$$

ただし, M : 左右前後輪の摩擦モーメントの合力

3. 電動車いすの前輪の運動方程式

次に前輪のモデル化について考える. 電動車いすの右前輪の取付点および前輪の重心に作用している力を Fig. 3 に示す, 次の 5 個の力および車いす本体の速度に比例した抵抗力の合計 6 個の力が作用している.

$Fa_{FR\beta}$: 前輪の取付点に作用する本体の並進方向の力

$Fa_{FR\theta}$: 前輪の取付点に作用する前輪の回転方向の力

Fa_{FRr} : 前輪の取付点に作用する前輪の向心方向の力

Ff_{FR} : 前輪の重心に作用する前輪に働く摩擦力

F_{FRD} : 前輪の重心に作用する前輪に働く外乱

これより, 並進および回転運動の方程式を導出するが, 左右輪に働く力の求め方は同じであるため, 本論文では右前輪についてのみ詳細に記載し, 左前輪については導出結果のみを記載する.

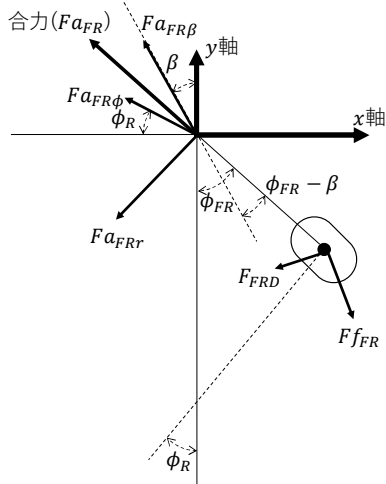


Fig. 3 右前輪のモデル

3.1. 並進運動の運動方程式導出

(1) 並進方向の力 Fa_{FR}

並進方向の力 Fa_{FR} は、前述の前輪に作用している6個の力の前輪の並進方向のベクトル成分の総和となるので次式となる。

$$\begin{aligned}
 Fa_{FR} = & C_v V_R \cos(\phi_{FR} - \beta) \\
 & + Fa_{FR\beta} \cos(\phi_{FR} - \beta) \\
 & + Fa_{FR\phi} \sin(\phi_{FR} + \phi_R) \\
 & - Fa_{FRr} \cos(\phi_{FR} \\
 & + \phi_R) \\
 & + F_{FRD} \sin(\phi_{FR} - \beta) \\
 & - F_{f_{FR}} \cos(\phi_{FR} - \beta)
 \end{aligned} \quad (3.1)$$

$$F_{FRD} = c_{FD} \quad (3.2)$$

$$\begin{aligned}
 F_{f_{FR}} = & c_{FD} + c_{Fv} \frac{R}{2L_r} \{ (L_r + L_f) \dot{\theta}_R \\
 & + (L_r - L_f) \dot{\theta}_L \}
 \end{aligned} \quad (3.3)$$

$$V_R = \frac{R}{2L_r} \{ (L_r + L_f) \dot{\theta}_R + (L_r - L_f) \dot{\theta}_L \} \quad (3.4)$$

ただし、 ϕ_{FR} : y軸に対する右前輪の並進方向の角度

C_v : 定数

V_R : 右前輪と本体接続点での速度

F_{FD} : 前輪にかかる前後方向の外乱

c_{Fv} : 前輪の回転速度に関する摩擦係数

なお、 Fa_{FR} が前輪の接続部を通して本体に与える並進方向の力 Fa_{FRy} は以下となる。

$$Fa_{FRy} = -Fa_{FR} \cos \phi_{FR} \quad (3.5)$$

(2) 並進方向の加速度 α_{FR}

右前輪の加速度を求めるための図を Fig. 4 に示す。重心ではなく前輪の接続部に力が働くことに注意し、これまでと同様の考え方を適用すると、次式となる。

$$\begin{aligned}
 \alpha_{FR\beta} &= R\ddot{\theta}_L + \frac{R\ddot{\theta}_R - R\ddot{\theta}_L}{L_r} \left(\frac{L_r + L_f}{2} \right) \\
 &= \frac{R(L_r + L_f)\ddot{\theta}_R + R(L_r - L_f)\ddot{\theta}_L}{2L_r}
 \end{aligned} \quad (3.6)$$

更に前輪の回転および向心方向の加速度 $\alpha_{FR\phi}$ および α_{FRr} は次式となる。

$$\alpha_{FR\phi} = r_R \dot{\omega} \quad (3.7)$$

$$\alpha_{FRr} = r_R \omega^2 \quad (3.8)$$

$$\begin{aligned}
 r_R &= \sqrt{\left(\frac{L_f}{2} - x_G + p \sin \alpha_1 \right)^2 + (L_r - y_G + p \cos \\
 &= \sqrt{\left(\frac{L_f}{2} - x_G + p \sin \alpha_1 \right)^2 + (L_r - y_G + p \cos}
 \end{aligned} \quad (3.9)$$

ただし、 p : 前輪接続部と前輪軸との距離

これら3つの加速度の並進方向のベクトル成分に分解した力の総和が α_{FR} となる。

(1),(2)項より、右前輪の並進運動の運動方程式は次式となる。

$$Fa_{FR} = M_c M_{FR} \quad (3.10)$$

ただし、 M_c : 前輪の質量

左前輪についても同様に解析を行うと、

$$\begin{aligned}
 Fa_{FL} = & C_v V_L \cos(\phi_{FL} - \beta) \\
 & + Fa_{FL\beta} \cos(\alpha_2 - \beta) \\
 & + Fa_{FL\phi} \sin(\phi_{FL} + \phi_L) \\
 & - Fa_{FLr} \cos(\phi_{FL} \\
 & + \phi_L) \\
 & + F_{FLD} \sin(\phi_{FL} - \beta) \\
 & - F_{f_{FL}} \cos(\phi_{FL} - \beta)
 \end{aligned} \quad (3.11)$$

$$F_{FLD} = c_{FD} \quad (3.12)$$

$$\begin{aligned}
 F_{f_{FL}} = & c_{FD} + c_{Fv} \frac{R}{2L_r} \{ (L_r + L_f) \dot{\theta}_L \\
 & + (L_r - L_f) \dot{\theta}_R \}
 \end{aligned} \quad (3.13)$$

$$Fa_{FLy} = -Fa_{FL} \cos \phi_{FL} \quad (3.14)$$

$$V_L = \frac{R}{2L_r} \{ (L_r + L_f) \dot{\theta}_L + (L_r - L_f) \dot{\theta}_R \} \quad (3.15)$$

$$\begin{aligned}
 \alpha_{FL\beta} &= R\ddot{\theta}_L + \frac{R\ddot{\theta}_L - R\ddot{\theta}_R}{L_r} \left(\frac{L_r + L_f}{2} \right) \\
 &= \frac{R(L_r - L_f)\ddot{\theta}_R + R(L_r + L_f)\ddot{\theta}_L}{2L_r}
 \end{aligned} \quad (3.16)$$

$$\alpha_{FL\phi} = r_2 \dot{\omega} \quad (3.17)$$

$$\alpha_{FLr} = r_2 \omega^2 \quad (3.18)$$

$$\begin{aligned}
 r_2 &= \sqrt{\left(\frac{R_f}{2} + x_G - p \sin \alpha_2 \right)^2 + (L_r - y_G - p \cos} \\
 &= \sqrt{\left(\frac{R_f}{2} + x_G - p \sin \alpha_2 \right)^2 + (L_r - y_G - p \cos}
 \end{aligned} \quad (3.19)$$

$$F_{FL} = M_c \alpha_{FL} \quad (3.20)$$

ただし, ϕ_{FL} : y軸に対する左前輪の並進方向の角度

V_L : 左前輪と本体接続部での速度

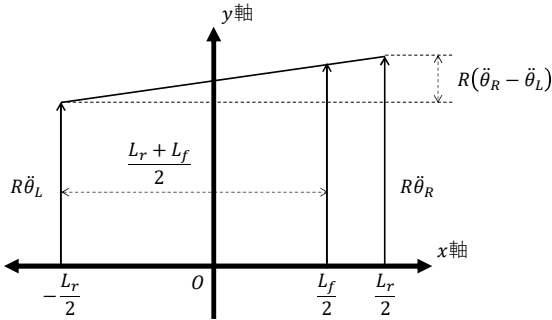


Fig. 4 Acceleration of right front wheel

3.2. 回転運動の運動方程式導出

(1) 回転運動のモーメント M_{FR}

前述の前輪に作用している6個の力を前輪の回転方向のベクトル成分に分解した力の総和となるので, 力の重心から作用点までの距離を考慮すると次式となる.

$$M_{FR} = L_{fG} \left\{ \begin{aligned} & -C_v V_R \cos(\phi_{FR} - \beta) - F_{aFRy} \sin(\phi_{FR} \\ & + F_{aFR\phi} \cos(\phi_{FR} + \phi_R) + F_{aFRr} \sin(\phi_{FR} \\ & + (L_{fG} - L_{fr}) \{ F_{FRD} \cos(\phi_{FR} - \beta) \\ & + F_{fFD} \sin(\phi_{FR} - \beta) \} \\ & - (M_{fR} + M_{fA}) \dot{\phi}_{FR} \end{aligned} \right. \quad (3.21)$$

ただし, M_{fR} : 床との摩擦モーメント, M_{fA} : ベアリングの摩擦モーメント, L_{fG} : 前輪接続部と重心との距離

(2) 回転方向の角加速度 $\dot{\omega}_{FR}$

0節の(2)で求めた $\alpha_{FR\beta}$, $\alpha_{FR\phi}$ および α_{FRr} の回転方向のベクトル成分に分解した力の総和が $\dot{\omega}_{FR}$ となる.

(1),(2)項より, 慣性モーメントを I_{CP} とすれば, 次式となる. なお, F_{FR} が接合部を通して本体に与える回転方向の力は, (3.23)式となる.

$$F_{FR\omega} = I_{CP} \dot{\omega}_{FR} \quad (3.22)$$

$$F_{FRx} = F_{FR} \sin \alpha_1 \quad (3.23)$$

左前輪についても同様に解析を行うと,

$$F_{FL\omega} = I_{CP} \dot{\omega}_{FL} \quad (3.24)$$

$$F_{FLx} = F_{FL} \sin \alpha_2 \quad (3.25)$$

と求めることができる.

4. シミュレーションによる Simulink モデルの性能検証

電動車いす本体のダイナミクスは2章で求めた

(2.5)式,(2.10)式で表現される. 前輪のダイナミクスは3章で求めた(3.10)式,(3.20)式,(3.22)式および(3.24)式で表現される. これらを用いて Simulink モデルを構築し, シミュレーションを行い, これらの式の性能検証を行う.

4.1. Simulink モデルの構築

構成した SIMULINK モデルについて記述する. まず, 第1階層を Fig. 5 に示す. 図中の A は車いす本体のサブシステムであり, B は前輪のサブシステムである.

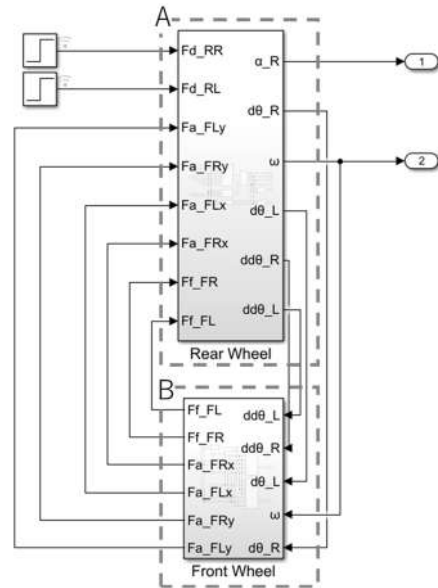


Fig. 5 Simulink モデルの第1階層

次に車いす本体のサブシステムの詳細を Fig. 6 に示す. サブシステムの名前はそれぞれ本文中の式番号を表しており, 内部は Fig. 7 に示すように, ブロック線図を用いて各式を表現している. このサブシステムの出力は前輪のダイナミクスの導出に用いる各値および 4.2 節でグラフ化するための計算結果である.

次に前輪のサブシステムの詳細を Fig. 8 に示す. 車いす本体のサブシステムと同様にサブシステムの名前はそれぞれ本文中の式番号を表しており, 内部はブロック線図を用いて各式を表現している. このサブシステムの出力は車いす本体のダイナミクスの導出に用いる各値である.

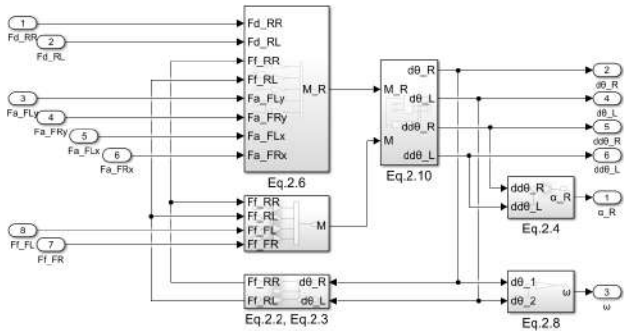


Fig. 6 電動車いす本体の Simulink モデル

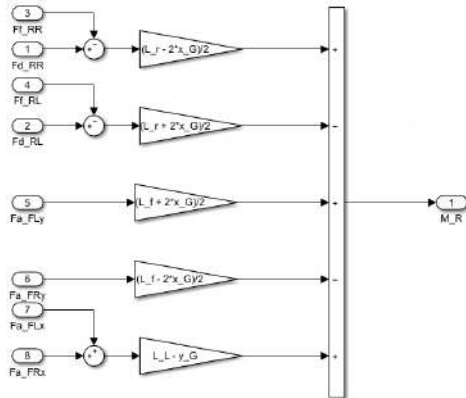


Fig. 7 (2.6)式のブロック線図

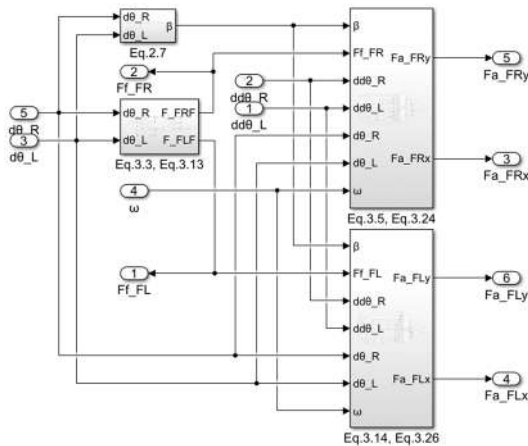


Fig. 8 前輪の Simulink モデル

4.2. Simulink モデルの性能検証結果

Simulink モデルの性能検証するために、左右輪のトルクに対する電動車いすの軌道を調査した結果を Fig. 9 に示す。図中の実線は両輪トルクが等しい場合を、破線および点線は左右輪のトルク比を 2:3 および 2:5 とした場合の結果を示す。なお、今回は外乱を考えずシミュレーションを行った。

両輪トルクが等しいときは直進し、右輪トルクを大きくすると次第に回転半径が小さくなっていくことより、電動車いすの直進および回転運動を表現できていると考える。

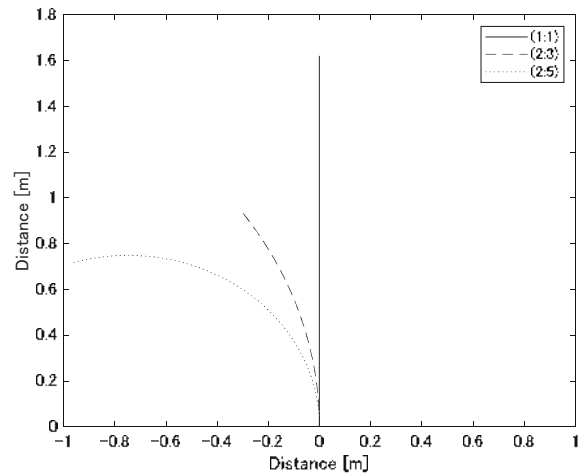


Fig. 9 電動車いすの軌跡

5. おわりに

(1)大垣[4]および住谷[5]の論文を参考に本体の並進・回転運動と前輪の並進・回転運動および両部位の相互作用を考慮してモデルを構築した。

(2)左右輪のトルク比を 1:1, 2:3 および 2:5 とし、シミュレーションを行った結果、両輪トルクが等しいときは直進し、右輪トルクを大きくすると次第に回転半径が小さくなっていることより、電動車いすの直進・回転運動を表現するための基本的なモデルが得られた。

今後は諸元(重心位置や前輪等)の影響を確認すると共に、状態空間モデルを構築し、追従制御の構築を行う予定である。

参考文献

- [1] 大北正昭, “電動車椅子型ロボット DREAM 郷の走行制御に関する研究,” 鳥取大学工学研究報告, 第 38 巻, 2007.
- [2] 長江元, 渡部慶二, 村松鋭一, 有我祐一, 遠藤茂, “画像処理とセンサによる電動車椅子の自律走行制御,” 計測自動制御学会東北支部第 245 回研究集会, 2008.
- [3] 森秀雄, “知能車いすの実用化に向けて,” 日本ロボット学会誌, Vol.22, No.7, 2004.
- [4] 大垣齊, 池田義弘, 竹田晴見, “電動車イスのモデルについて,” システム制御情報学会論文誌, Vol.7, No.6, 1994.
- [5] 住谷秀保, 白石昌武, “人間対応型電動車椅子の走行制御,” 放送大学研究年報, 第 29 号, 2011.

研究ノート

確率・統計の範疇

—数理統計学, 熱力学・統計力学, 量子力学に共通した基礎概念—

高橋 義則*

(2020年9月30日受理)

Category of Probability and Statistics
—Common Idea of Mathematical Statistics,

Thermodynamics and Statistical Mechanics, and Quantum Mechanics—

Yoshinori Takahashi*

(Received September 30, 2020)

Abstract

From the scientific history of developments of mathematical statistics, thermodynamics and statistical mechanics, and quantum mechanics, it was found that those fields belong to the category of probability and statistics, and each field achieves important developments in individual ways. It was also found that the approaches based on the probability and statistics make a fundamental change in natural sciences against the philosophy of determinism. Probability density functions corresponding to many kinds of important statistic were obtained by applying Dirac's δ function, which is discovered in quantum mechanics, and the results were tabled with relevant supplements. It is a new attempt to formulate probability density functions from the point of view of physics in mathematical statistics.

キーワード: 決定論, 不確実性, 確率密度関数, デイラック δ 関数, 検定, 推定

Keywords : Determinism, Uncertainty, Probability density function, Dirac's δ function, Test, Estimate

1. はじめに

数理統計学, 熱力学・統計力学, および, 量子力学の三分野においては, 個々の発展を科学的に概観してみると, 確率・統計の概念が共通基礎を担っていることが分かる。その意味において, これらの分野は確率・統計の範疇に入るものと考えられる。自然科学において確率・統計の概念を導入したことは, ニュートン力学の決定論に対して, 現象を根底から解明することになり画期的なことであった。そして, 解明の過程では幾多の学問的葛藤を克服してきた。先ず, これらの分野の発展を主要事項に焦点を合わせて科学的に概観する。(文字網掛けの項目は, 本研究における各分野の確率・統計に関する特記項目である)

(1) 数理統計学の発展

1875 ヘルメルト(Friedrich Robert Helmert, 独, 1843-1917) χ^2 -分布の発見

1900 ピアソン(Karl Pearson, 英, 1857-1936) χ^2 -分布

の命名, χ^2 検定法の導入

スネデカー(George Waddel Snedecor, 米, 1881-1974) F -分布の発見(スネデカーの F -分布, または, フィッシャー・スネデカー分布)

1908 ゴセット(William Sealy Gosset = Student 筆名, 英, 1876-1937) t -分布の発見

1926 フィッシャー (Ronald Aylmer Fisher, 英, 1890-1962) t -分布の厳密な証明

1935 フィッシャー 1919~1930 の間に研究し発展させた「The Design of Experiments(実験計画法)」を出版。

(2) 熱力学・統計力学の発展

1712 ニューコメン(Thomas Newcomen, 英, 1663-1729) 大気圧機関

1724 ファーレンハイト(Daniel Gabriel Fahrenheit または Gabriel Daniel Fahrenheit, ポーランド・リトアニア共和国, 1686-1736) F の提唱

* 愛知工科大学名誉教授, 〒443-0047 愛知県蒲郡市西迫町馬乗 50-2

Professor emeritus, Aichi University of Technology, 50-2 Manori, Nishihassama-cho, Gamagori-shi, Aichi 443-0047, Japan

- 1742 セルシウス(Anders Celsius, スウェーデン, 1701-1744) °Cの提唱
- 1772 ワット(James Watt, 英, 1736-1819) 蒸気機関(復水器, 往復運動→回転運動)
- 1782 ワットの蒸気復動機関
- 1787 シャルル(Jacques Alexandre C ezar Charles, 仏, 1746-1823)の法(シャルルによって発見, 1802 ゲイ・リュサックにより発表)
絶対零度(-273 °C)の存在
- 1789 ラボアジエ(Antoine Laurent Lavoisier, 仏, 1743-1794) カロリック(熱素)説
- 1798 ランフォード(Graf von Rumford=Benjamin Thompson (本名), 米, 1753-1814)
カロリック説への反証, 運動説
- 1816 スターリングエンジン(外燃機関)
- 1824 カルノーサイクル (Nicolas Léonard Sadi Carnot, 仏, 1796-1832)
- 1827 花粉のブラウン運動 (Robert Brown, 英, 1773-1858)
- 1847 ヘルムホルツ(Herman von Helmholtz, 独, 1821-1894):エネルギー保存則. **第1種永久機関**は実現不可能である. $dU = d'Q + d'W$
- 1848 ケルビン(Lord Kelvin=William Thomson(本名), 英, 1824-1907)
熱力学的温度 K を定義
- 1850 **クラウジウスの原理**:低温の熱源から高温の熱源に正の熱を移す以外に, 何の痕跡 も残さないようにすることは出来ない. (Rudolf Julius Emmanuel Clausius, 独, 1822-1888)
- 1851 **トムソンの原理**:一つの熱源から正の熱を受け取り, これを全て仕事に変える以外に, 他に何の痕跡も残さないようにすることは出来ない. これは, 「**オストワルドの原理**:**第2種永久機関**は実現不可能である.」とも呼ばれる. (Friedrich Wilhelm Ostwald, 独, 1853-1932)
- 1854 ケルビンの論じた不可逆現象を, クラウジウスは系に出入りする熱量とその時の絶対温度を用いて定式化した. $\oint \frac{d'Q}{T} \leq 0$
クラウジウスはエネルギー保存則を**熱力学第1法則**, 不可逆性に関わる事実を**熱力学第2法則**とよんだ.
- 1865 クラウジウス 不可逆現象を表す状態量をエントロピーとよんだ. $dS = \frac{d'Q}{T}$
- 1877 ボルツマン(Ludwig Boltzmann, オーストリア, 1844-1906)
熱力学第2法則を確率論で表現

$$S = k \log W$$

- 1879,1884 シュテファン・ボルツマンの法則(Joseph Stefan, オーストリア, 1835-1893)
- 1896 ウィーンの放射公式(Wilhelm Wien, 独, 1864-1928)
- 1900 プランクの放射公式 **エネルギー量子仮説** (Max Karl Ernst Ludwig Planck, 独, 1858-1947)
- 1900, 1905 レイリー・ジーンズの放射公式 Lord Rayleigh=John William Strutt (本名), 英, 1842-1919)
(James Hopwood Jeans, 英, 1877- 1946)
- 1902 ギブス(Josiah Willard Gibbs, 米, 1839-1903) 位相空間(Γ空間)を考え, 各種統計集団(ミクロカノニカル, カノニカル, グランドカノニカルアンサンブル)を導入.
- 1905 アインシュタイン(Albert Einstein, ユダヤ系独, 1879-1955) **光量子仮説**(3月), ブラウン運動の分子運動理論(5月), 特殊相対性理論(6月)
- 1906 ペラン(Jean Baptiste Perrin, 仏, 1870-1942) 分子運動理論を実験で検証, 分子の実在性を実証
- 1906 **熱力学第3法則 (ネルンストープランクの定理)**
 $\lim_{T \rightarrow 0} S = 0$
(Walther Hermann Nernst, 独, 1864-1941)
- 1909 コンスタンティン・カラテオドリ
(Constantin Carathéodory, ギリシャ, 1873 - 1950)
「任意の熱平衡状態の近傍には, 断熱変化では到達不可能な状態が存在する」という**カラテオドリの原理**(定理とも言う)を提唱した. これは熱力学第二法則と等価な原理である.
C. Caratheodory, INVESTIGATION INTO THE FOUNDATIONS OF THERMODYNAMICS, Math. Ann., Berlin, V67, pp. 355-386, 1909.
- (3) 量子力学の発展**
- 1900 プランク(Max Karl Ernst Ludwig Planck, 独, 1858-1947)
【エネルギー量子仮説】
- 1905 アインシュタイン(Albert Einstein, ユダヤ系独, 1879-1955) 【光量子仮説】 光(波動)は粒子(光子)である. 光電効果, コンプトン効果
- 1913 ボーア(Niels Bohr, デンマーク, 1885-1962) 【前期量子論】
量子条件:角運動量の量子化
振動数条件:Balmer, Lyman, Paschen 各系列の発光スペクトル
- 1923 ド・ブローイ(Louis Victor de Broglie, 仏, 1892-1987)
【物質波の原理】
電子(粒子)は波動(物質波)である.

- 電子顕微鏡, 電子線回折
- 1925 パウリ(Wolfgang Pauli, スイス, 1900-1958)
【排他原理】
- 1925 ハイゼンベルグ(Werner Karl Heisenberg, 独, 1901-1976) 【行列力学】
- 1926 シュレーディンガー(Erwin Schrödinger, オーストリア, 1887-1961)
【電子の波動方程式】
波動関数の解釈; 電子の存在確率密度
- 1926-1927 ディラック(Paul Adrien Maurice Dirac, 英, 1902-1984) 【 δ 関数導入】
P. A. M. Dirac, The physical interpretation of the quantum dynamics, Proc. of the Royal Society, London, section A, 113 (1926-27), pp. 621-641.
- 1927 ハイゼンベルグ 【不確定性原理】
- 1928 ディラック【相対論的量子力学】
量子力学に相対論的不変性を確立, 陽電子と電子スピンの理論的導出
多様な反粒子や反物質, 核スピンや素粒子スピンの検証に繋がる.

三分野の自然科学についてその発展を科学的に概観したが, 確率・統計の概念を導入した観点から特筆すべきは, 数理統計学においては 1875 年にヘルムルトによる χ^2 分布の発見であり, 熱力学・統計力学においては 1877 年のボルツマンによる熱力学第 2 法則を確率論で表現したことであり, 量子力学においては 1926 年のシュレーディンガーによる電子の波動関数に電子の存在確率密度の解釈を与えたことであろう。確率・統計の自然科学への導入は, 年代的には, 数理統計学と熱力学・統計力学はほぼ同時期, 量子力学においてはおよそ 50 年遅れてのことである。熱力学の発展の終局面において, ボルツマンによる確率・統計を基にした統計力学が出現し, これは, 熱力学の現象論を徹底的に導き出すことに成功し, 現象論としての熱力学の物理的基礎付けと考察を更に深めることになった。熱輻射への統計力学の適用は, プランクによるエネルギー量子仮説を創造した。そして, このエネルギー量子仮説は量子力学へと繋がり, 統計力学と量子力学は, 両輪となり物理学の根幹を成すに至った。

本研究においては, 熱力学・統計力学, および, 量子力学についての確率・統計の議論に立ち入ることはしないが, 数理統計学や統計力学の始まりからほぼ 50 年遅れて量子力学において発見された重要な数学的手段, 即ち, ディラックの δ 関数を応用して数理統計学の標本抽出の理論を再考する。数理統計の主要目的は, 母集団 (population) とその部分空間である標本 (sample) という考えに立って, 標本から得たデータを使って, その背後にある母集団を特

徴づける母数 (parameter) の検定 (test) と推定 (estimate) を行うことである。このとき, 検定と推定の基礎となるのが当該統計量 (statistic) に関する確率密度関数 (probability density function, 以後 pdf と略称) である。ここで, 統計量とは, 或る分布を持つ母集団からの確率変数としてのランダムサンプルを X_1, X_2, \dots, X_n とすると, 関数 $Y = f(X_1, X_2, \dots, X_n)$ は一つの確率変数であり, この関数のことを言う。

幾つかの重要な母数と対応する統計量の対照を表 1 に与えると共に, 統計量の期待値を計算して母数との関係を示した。しかし, これら統計量に対する pdf の導出は, 従前の数理論では複雑な計算となることが知られている。論文 I^[1], および, 論文 II^[2]で, δ 関数を用いることによって, 各種の pdf を, 物理的考察の下で統一的に比較的容易に導出できることを示した。ここでは, 更に幾つかの重要な統計量と, δ 関数によるその pdf の定義と計算結果, および, 補遺の一覧を表 2 に与えた。表中, 検定と推定に関して全体を俯瞰し易い様に, 関連性のある統計量はまとめて示した。pdf の導出の詳細は第 3 節に示したが, 重要な pdf の導出法が専門書では省略されることが多くあるので, ここでは必要に応じて導出過程が会得できるように努めた。

表1 Correspondence between parameter and its statistic

	母集団	標本
平均	母平均 μ	標本平均 $\bar{X} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n X_i$
分散	母分散 σ^2	標本分散 $s^2 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2$ 標本不偏分散 $\hat{\sigma}^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2$
共分散	母共分散 $\rho\sigma_X\sigma_Y$	標本共分散 $s_{XY} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})(Y_i - \bar{Y})$ 標本不偏共分散 $\hat{s}_{XY} = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})(Y_i - \bar{Y})$
標準偏差	母標準偏差 σ	標本標準偏差 $s = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2}$ 標本不偏分散の平方根 $\hat{\sigma} = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2}$
相関係数	母相関係数 ρ	標本相関係数 $r = \frac{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})(Y_i - \bar{Y})}{\sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2} \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (Y_i - \bar{Y})^2}}$ $= \frac{s_{XY}}{s_X s_Y}$

表中にある標本平均 \bar{X} , 標本分散 s^2 , 標本不偏分散

$\hat{\sigma}^2$, および, 標本共分散 s_{XY} の期待値の計算例を以下に示す. ここで, $E[\dots]$ は統計量 \dots の期待値を求める演算子である.

(1) 標本平均の期待値

$$E[\bar{X}] = E\left[\frac{1}{n}\sum_{i=1}^n X_i\right] = \frac{1}{n}n\mu = \mu.$$

(2) 標本分散の期待値

先ず, 関係式

$$\begin{aligned} \sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2 &= \sum_{i=1}^n (X_i - \mu - (\bar{X} - \mu))^2 \\ &= \sum_{i=1}^n (X_i - \mu)^2 - n(\bar{X} - \mu)^2, \end{aligned}$$

および,

$$\bar{X} - \mu = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^n (X_i - \mu)$$

を利用して

$$\begin{aligned} E[s^2] &= E\left[\frac{1}{n}\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2\right] \\ &= E\left[\frac{1}{n}\sum_{i=1}^n (X_i - \mu)^2 - (\bar{X} - \mu)^2\right] \\ &= \sigma^2 - E[(\bar{X} - \mu)^2] \\ &= \sigma^2 - \frac{1}{n^2}E\left[\sum_{i=1}^n (X_i - \mu)^2 + \sum_{i \neq j} (X_i - \mu)(X_j - \mu)\right] \\ &= \sigma^2 - \frac{1}{n^2}(n\sigma^2 + 0) = \frac{n-1}{n}\sigma^2. \end{aligned}$$

(3) 標本不偏分散の期待値

標本分散の期待値の計算結果より

$$E[\hat{\sigma}^2] = E\left[\frac{1}{n-1}\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2\right] = \sigma^2.$$

即ち, $\hat{\sigma}^2$ の期待値が母分散 σ^2 に等しくなることが「不偏」の意味である.

(4) 標本共分散の期待値

$$\begin{aligned} E[s_{XY}] &= E\left[\frac{1}{n}\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})(Y_i - \bar{Y})\right] \\ &= E\left[\frac{1}{n}\sum_{i=1}^n (X_i - \mu_X - (\bar{X} - \mu_X))(Y_i - \mu_Y - (\bar{Y} - \mu_Y))\right] \\ &= E\left[\frac{1}{n}\sum_{i=1}^n (X_i - \mu_X)(Y_i - \mu_Y) - (\bar{X} - \mu_X)(\bar{Y} - \mu_Y)\right] \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} &= E\left[\frac{1}{n}\sum_{i=1}^n (X_i - \mu_X)(Y_i - \mu_Y) - \frac{1}{n^2}\sum_{i=1}^n (X_i - \mu_X)\sum_{i=1}^n (Y_i - \mu_Y)\right] \\ &= \sigma_{XY} - \frac{1}{n^2}E\left[\sum_{i=1}^n (X_i - \mu_X)(Y_i - \mu_Y) + \sum_{i \neq j} (X_i - \mu_X)(Y_j - \mu_Y)\right] \\ &= \sigma_{XY} - \frac{1}{n^2}(n\sigma_{XY} + 0) = \frac{n-1}{n}\sigma_{XY}. \end{aligned}$$

ここで, $\sigma_{XY} = \rho\sigma_X\sigma_Y$ は母共分散である. 標本共分散の期待値も σ_{XY} と等しくならず,

$ns_{XY}/(n-1) = \sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})(Y_i - \bar{Y})/(n-1)$ が標本不偏共分散となる.

2. δ 関数を利用した各種統計量に対する pdf の一覧

先に, 各種統計量に対する pdf の δ 関数を利用した定義と, 結果および分布の名称を論文末尾の表2に示す. ただし, 表中, 変数 s の関数 $\Gamma(s)$ は,

$$\Gamma(s) \equiv \int_0^\infty e^{-t}t^{s-1}dt$$

で与えられ, ガンマ関数と呼ばれる. 検定と推定に関して全体を俯瞰し易い様に, 関連性のある統計量はまとめて示した. 特記事項は表中の補遺に示した. pdf の導出の詳細は必要に応じて次節に示す.

3. δ 関数を利用した各種の pdf の導出の詳細

数理統計学における従前の pdf の導出法とは異なり, δ 関数の特性だけを用いた新規な導出法によって各種重要な pdf を導いた. この方法は, 計算過程の意味が物理的に把握し易い利点があるものと考えられる. ここで, 論文 I^[1], II^[2]で利用した δ 関数の性質を再度簡単に記述しておく. δ 関数は, 元々は量子力学の中でディラックによって導入され, 以下に示す式

$$\int_{-\infty}^\infty \delta(x) dx = 1, \quad x \neq 0 \text{ では } \delta(x) = 0. \quad (1)$$

によって定義される超関数であって, 特殊な関数である,

数学的には $\delta(x)$ を関数とすると, この二つの性質は相矛盾し, 両者を同時に満足する関数や積分法は存在しないが, 積分記号の中で他の関数とともに使う限りにおいて関数のように使っても正しい結果を与えることが分かっている. つまり, $\delta(x)$ は関数に非ざる関数と言う位置づけで, このことが超関数 (generalized function) と呼ばれる所以である. δ 関数を解析学的に表現する方法は幾つか提唱されているが, $\delta(x)$ を直感的に思い浮かべるために比較的簡単な表現を

$$\delta(x) = \lim_{\varepsilon \rightarrow 0^+} \left\{ \frac{1}{2\varepsilon}; |x| \leq \varepsilon \right\} \cup \{0; |x| > \varepsilon\} \quad (2)$$

によって与える。\$\delta(x)\$ は幾つかの重要な性質をもつが、本研究においては

$$\int_a^b \delta(x-c) dx = 1 \quad (a < c < b), \quad (3)$$

$$\int_a^b \delta(x-c) f(x) dx = f(c) \quad (a < c < b) \quad (4)$$

の性質^[3]と置換積分の手法、および、

\$\delta\$ 関数の積分表示^[3]

$$\delta(x) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} e^{ikx} dk, \quad (5)$$

のみを使う。また、幾つかの計算では、\$1/(z+a)^\nu\$、\$(R(\nu) > 0)\$ のラプラス逆変換

$$\frac{1}{2\pi i} \int_C dz e^{zt} \frac{1}{(z+a)^\nu} = \frac{t^{\nu-1}}{\Gamma(\nu)} e^{-at} \quad (6)$$

を使う。ただし、上式において \$z\$ の積分路 \$C\$ は虚数軸 (\$-\infty \rightarrow i\infty\$) である^[4]。

(1) 標本平均の pdf

\$X_i\$ (\$i = 1, 2, \dots, n\$) が正規分布 \$N(\mu, \sigma^2)\$ に従うとき、

\$\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n X_i\$ が従う pdf \$g(t)\$ は

$$\begin{aligned} g(t) &= \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \dots \int_{-\infty}^{\infty} \delta\left(t - \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n X_i\right) \\ &\quad \times \prod_{i=1}^n \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{X_i-\mu}{\sigma}\right)^2} dX_i \\ &= \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \dots \int_{-\infty}^{\infty} \delta\left(t - \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (X_i - \mu) + \mu\right)\right) \\ &\quad \times \prod_{i=1}^n \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{X_i-\mu}{\sigma}\right)^2} dX_i \end{aligned} \quad (7)$$

である。\$\delta\$ 関数の積分表示 式(5)を利用すると

$$\begin{aligned} g(t) &= \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} dk e^{ik(t-\mu)} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \dots \int_{-\infty}^{\infty} \\ &\quad \times e^{-ik\frac{1}{n}\sum_{i=1}^n (X_i-\mu)} \prod_{i=1}^n \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{X_i-\mu}{\sigma}\right)^2} dX_i \\ &= \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} dk e^{ik(t-\mu)} \\ &\quad \times \prod_{i=1}^n \int_{-\infty}^{\infty} \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} e^{-ik\frac{1}{n}(X_i-\mu)} e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{X_i-\mu}{\sigma}\right)^2} dX_i. \end{aligned} \quad (8)$$

ここで、\$u_i = \frac{X_i-\mu}{\sigma}\$ と置くと、\$\sigma du_i = dX_i\$。したがって、

$$\begin{aligned} g(t) &= \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} dk e^{ik(t-\mu)} \\ &\quad \times \prod_{i=1}^n \int_{-\infty}^{\infty} \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-ik\frac{\sigma}{n}u_i - \frac{1}{2}u_i^2} du_i. \end{aligned} \quad (9)$$

一方、積分公式^[5]により、

$$\int_{-\infty}^{\infty} \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-ik\frac{\sigma}{n}u_i - \frac{1}{2}u_i^2} du_i = e^{-\frac{\sigma^2}{2n^2}k^2}, \quad (10)$$

と求められるので

$$\begin{aligned} g(t) &= \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} dk e^{ik(t-\mu)} e^{-\frac{\sigma^2}{2n^2}k^2} \\ &= \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \frac{1}{\sigma} e^{-\frac{1}{2}\frac{(t-\mu)^2}{\frac{\sigma^2}{n}}} = N\left(\mu, \left(\frac{\sigma}{\sqrt{n}}\right)^2\right), \end{aligned} \quad (11)$$

\$-\infty < t < \infty\$

である。

(2) 二つの標本平均の差の pdf

二つの母集団 \$N(\mu_X, \sigma_X^2)\$, \$N(\mu_Y, \sigma_Y^2)\$ からそれぞれ \$n_X, n_Y\$ の標本を無作為に抜き取ったときの標本平均をそれぞれ \$\bar{X}, \bar{Y}\$ とする。\$\bar{X} - \bar{Y}\$ が従う pdf \$g(t)\$ は

$$\begin{aligned} g(t) &= \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} d\bar{X} d\bar{Y} \delta(t - (\bar{X} - \bar{Y})) \\ &\quad \times \frac{1}{\sqrt{2\pi} \frac{\sigma_X}{\sqrt{n_X}}} e^{-\frac{1}{2}\frac{(\bar{X}-\mu_X)^2}{\frac{\sigma_X^2}{n_X}}} \frac{1}{\sqrt{2\pi} \frac{\sigma_Y}{\sqrt{n_Y}}} e^{-\frac{1}{2}\frac{(\bar{Y}-\mu_Y)^2}{\frac{\sigma_Y^2}{n_Y}}} \end{aligned} \quad (12)$$

である。ここで、

\$\bar{X} - \bar{Y} = \bar{X} - \mu_X - (\bar{Y} - \mu_Y) + (\mu_X - \mu_Y)\$ の関係と \$\delta\$ 関数の積分表示 式(5)を利用すると

$$\begin{aligned} g(t) &= \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} dk e^{ik(t-(\mu_X-\mu_Y))} \\ &\quad \times \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} d\bar{X} d\bar{Y} e^{-ik(\bar{X}-\mu_X)} e^{ik(\bar{Y}-\mu_Y)} \\ &\quad \times \frac{1}{\sqrt{2\pi} \frac{\sigma_X}{\sqrt{n_X}}} e^{-\frac{1}{2}\frac{(\bar{X}-\mu_X)^2}{\frac{\sigma_X^2}{n_X}}} \frac{1}{\sqrt{2\pi} \frac{\sigma_Y}{\sqrt{n_Y}}} e^{-\frac{1}{2}\frac{(\bar{Y}-\mu_Y)^2}{\frac{\sigma_Y^2}{n_Y}}} \\ &= \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} dk e^{ik(t-(\mu_X-\mu_Y))} e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{\sigma_X^2}{n_X} + \frac{\sigma_Y^2}{n_Y}\right)k^2} \end{aligned} \quad (13)$$

と求められるので

$$\begin{aligned} g(t) &= \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} dk e^{ik(t-(\mu_X-\mu_Y))} e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{\sigma_X^2}{n_X} + \frac{\sigma_Y^2}{n_Y}\right)k^2} \\ &= \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \frac{1}{\sqrt{\frac{\sigma_X^2}{n_X} + \frac{\sigma_Y^2}{n_Y}}} e^{-\frac{1}{2}\frac{(t-(\mu_X-\mu_Y))^2}{\frac{\sigma_X^2}{n_X} + \frac{\sigma_Y^2}{n_Y}}} \\ &= N\left(\mu_X - \mu_Y, \left(\sqrt{\frac{\sigma_X^2}{n_X} + \frac{\sigma_Y^2}{n_Y}}\right)^2\right), \end{aligned} \quad (14)$$

\$-\infty < t < \infty\$

である。

(3) 自由度 \$n\$ の \$\chi^2\$-分布と応用

i. 自由度 \$n\$ の \$\chi^2\$-分布

\$X_i\$ (\$i = 1, 2, \dots, n\$) が正規分布 \$N(\mu_i, \sigma_i^2)\$ に従うとき、

\$\sum_{i=1}^n \left(\frac{X_i-\mu_i}{\sigma_i}\right)^2\$ が従う pdf \$g(t)\$ は

$$g(t) \quad (15)$$

$$= \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \cdots \int_{-\infty}^{\infty} \delta \left(t - \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left(\frac{X_i - \mu_i}{\sigma_i} \right)^2 \right) \times \prod_{i=1}^n \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_i} e^{-\frac{1}{2} \left(\frac{X_i - \mu_i}{\sigma_i} \right)^2} dX_i,$$

である。δ関数の積分表示 式(5)を利用すると

$$g(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} dke^{ikt} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \cdots \int_{-\infty}^{\infty} e^{-ik \sum_{i=1}^n \left(\frac{X_i - \mu_i}{\sigma_i} \right)^2} \prod_{i=1}^n \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_i} e^{-\frac{1}{2} \left(\frac{X_i - \mu_i}{\sigma_i} \right)^2} dX_i$$

$$= \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} dke^{ikt}$$

$$\times \prod_{i=1}^n \int_{-\infty}^{\infty} \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_i} e^{-ik \left(\frac{X_i - \mu_i}{\sigma_i} \right)^2} e^{-\frac{1}{2} \left(\frac{X_i - \mu_i}{\sigma_i} \right)^2} dX_i. \quad (16)$$

式(16)で、 $u_i = \frac{X_i - \mu_i}{\sigma_i}$ と置くと、 $\sigma_i du_i = dX_i$ 。したがって、

$$g(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} dke^{ikt} \prod_{i=1}^n \int_{-\infty}^{\infty} \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-(ik + \frac{1}{2})u_i^2} du_i. \quad (17)$$

一方、積分公式^[6]と解析接続により、

$$\int_{-\infty}^{\infty} \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-(ik + \frac{1}{2})u_i^2} du_i$$

$$= 2 \times \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \frac{\sqrt{\pi}}{2} \frac{1}{\left(ik + \frac{1}{2} \right)^{1/2}}, \quad (18)$$

と求められるので

$$g(t) = \frac{1}{2\pi} \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} dke^{ikt} \frac{1}{\left(ik + \frac{1}{2} \right)^{n/2}}. \quad (19)$$

ここで、 $z = ik$ と置くと、

$$g(t) = \frac{1}{2\pi} \frac{1}{2\pi i} \int_C dze^{zt} \frac{1}{\left(z + \frac{1}{2} \right)^{n/2}}. \quad (20)$$

上式は、 z の積分路 C が虚数軸 ($-i\infty \rightarrow i\infty$) であり、 $1/(z+a)^v$ (解析接続により $R(v) > 0$) のラプラス逆変換そのものである。したがって、式(6)の複素積分によって

$$g(t) = \frac{1}{2\pi} \frac{1}{2\pi} t^{\frac{n}{2}-1} e^{-\frac{t}{2}}, \quad 0 < t < \infty \quad (21)$$

と計算でき、表2に与える自由度 n の χ^2 -分布を得る。論文 I では、式(15)に対して δ関数の積分表示を利用する代わりに、 n 次元空間の球体の表面積を求める方法を用いた。

ii. χ^2 -分布の加法性

X および Y が互いに独立で、それぞれ $\chi^2[m]$ -分布、および、 $\chi^2[n]$ -分布に従うとき、 $X+Y$ が従う pdf $g(t)$ は

$$g(t) = \int_0^{\infty} dY \int_0^{\infty} dX \delta(t - (X+Y))$$

$$\times \frac{1}{2^{\frac{m}{2}} \Gamma\left(\frac{m}{2}\right)} X^{\frac{m}{2}-1} e^{-\frac{X}{2}} \frac{1}{2^{\frac{n}{2}} \Gamma\left(\frac{n}{2}\right)} Y^{\frac{n}{2}-1} e^{-\frac{Y}{2}}$$

$$= \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} dke^{ikt} \int_0^{\infty} dY \int_0^{\infty} dX e^{-ikX} e^{-ikY}$$

$$\times \frac{1}{2^{\frac{m}{2}} \Gamma\left(\frac{m}{2}\right)} X^{\frac{m}{2}-1} e^{-\frac{X}{2}} \frac{1}{2^{\frac{n}{2}} \Gamma\left(\frac{n}{2}\right)} Y^{\frac{n}{2}-1} e^{-\frac{Y}{2}}$$

$$= \frac{1}{2\pi} \frac{1}{2^{\frac{m+n}{2}} \Gamma\left(\frac{m}{2}\right) \Gamma\left(\frac{n}{2}\right)}$$

$$\times \int_{-\infty}^{\infty} dke^{ikt} \frac{\Gamma\left(\frac{m}{2}\right)}{\left(ik + \frac{1}{2} \right)^{\frac{m}{2}}} \frac{\Gamma\left(\frac{n}{2}\right)}{\left(ik + \frac{1}{2} \right)^{\frac{n}{2}}}. \quad (22)$$

ここで、 $z = ik$ と置くと、

$$g(t) = \frac{1}{2^{\frac{m+n}{2}} 2\pi i} \int_C dze^{zt} \frac{1}{\left(z + \frac{1}{2} \right)^{\frac{m+n}{2}}}$$

$$= \frac{1}{2^{\frac{m+n}{2}} \Gamma\left(\frac{m+n}{2}\right)} t^{\frac{m+n}{2}-1} e^{-\frac{t}{2}} \quad (23)$$

と計算でき、 $\chi^2[m+n]$ -分布を得る。即ち、 $X+Y$ は χ^2 -分布の加法性を満たす。しかし、 $X-Y$ の従う pdf は $\chi^2[m-n]$ -分布とは成らないことを注意しておく。

iii. 自由度 n の χ -分布

確率変数 X が自由度 n の χ^2 -分布に従うとき、 \sqrt{X} が従う pdf $g(t)$ は

$$g(t) = \int_0^{\infty} \delta(t - \sqrt{X}) \frac{1}{2^{\frac{n}{2}} \Gamma\left(\frac{n}{2}\right)} X^{\frac{n}{2}-1} e^{-\frac{X}{2}} dX. \quad (24)$$

ここで、 $u = \sqrt{X}$ と置くと $du = \frac{1}{2u} dX$ 。したがって、

$$g(t) = \int_0^{\infty} \delta(t - u) \frac{1}{2^{\frac{n}{2}-1} \Gamma\left(\frac{n}{2}\right)} u^{n-1} e^{-\frac{u^2}{2}} du$$

$$= \frac{1}{2^{\frac{n}{2}-1} \Gamma\left(\frac{n}{2}\right)} t^{n-1} e^{-\frac{t^2}{2}}, \quad 0 < t < \infty \quad (25)$$

これを自由度 n の χ -分布という。

(4) 自由度 $n-1$ の χ^2 -分布と応用

i. 自由度 $n-1$ の χ^2 -分布

X_i ($i = 1, 2, \dots, n$) が正規分布 $N(\mu, \sigma^2)$ に従うとき、 $\frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2}{\sigma^2}$ が従う pdf $g(t)$ は

$$g(t) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \cdots \int_{-\infty}^{\infty} \delta \left(t - \frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2}{\sigma^2} \right) \times \prod_{i=1}^n \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} e^{-\frac{1}{2} \left(\frac{X_i - \mu}{\sigma} \right)^2} dX_i, \quad (26)$$

である。δ関数の積分表示 式(5)を利用すると

$$g(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} dke^{ikt} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \cdots \int_{-\infty}^{\infty} e^{-ik \frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2}{\sigma^2}}$$

$$= \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} dke^{ikt} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \cdots \int_{-\infty}^{\infty} e^{-ik \frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2}{\sigma^2}} \quad (27)$$

$$\times \frac{1}{(\sqrt{2\pi}\sigma)^n} e^{-\frac{1}{2} \frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \mu)^2}{\sigma^2}} dX_1 dX_2 \cdots dX_n.$$

式(27)には, X_1, X_2, \dots, X_n に関する積分の中に, 標本平均からの差の平方和 $\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2$ と母平均からの差の平方和 $\sum_{i=1}^n (X_i - \mu)^2$ が混在しているので,

$$\begin{aligned} \sum_{i=1}^n (X_i - \mu)^2 &= \sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X} + \bar{X} - \mu)^2 \\ &= \sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2 + n(\bar{X} - \mu)^2 \end{aligned}$$

の関係を用いてから積分を行う。このとき, 変数変換

$$(X_1, X_2, X_3, \dots, X_n) \rightarrow (\bar{X}, Y_1, Y_2, \dots, Y_{n-1})$$

即ち,

$$\begin{pmatrix} X_1 \\ X_2 \\ X_3 \\ \vdots \\ X_n \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & a_{11} & a_{12} & \cdots & a_{1n-1} \\ 1 & a_{21} & a_{22} & \cdots & a_{2n-2} \\ 1 & a_{31} & a_{32} & \cdots & a_{3n-3} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 1 & a_{n1} & a_{n2} & \cdots & a_{nn-1} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \bar{X} \\ Y_1 \\ Y_2 \\ \vdots \\ Y_{n-1} \end{pmatrix} \quad (28)$$

を行うと,

$$\begin{aligned} &\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2 \\ &= (X_1 - \bar{X}, X_2 - \bar{X}, \dots, X_n - \bar{X}) \begin{pmatrix} X_1 - \bar{X} \\ X_2 - \bar{X} \\ \vdots \\ X_n - \bar{X} \end{pmatrix} \\ &= (Y_1, Y_2, \dots, Y_{n-1}) {}^t A A \begin{pmatrix} Y_1 \\ Y_2 \\ \vdots \\ Y_{n-1} \end{pmatrix}. \end{aligned} \quad (29)$$

ただし, A は n 行 $(n-1)$ 列の行列である。

$$A = \begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} & \cdots & a_{1n-1} \\ a_{21} & a_{22} & \cdots & a_{2n-2} \\ a_{31} & a_{32} & \cdots & a_{3n-3} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{n1} & a_{n2} & \cdots & a_{nn-1} \end{pmatrix}. \quad (30)$$

ここで, A の行列要素を

$${}^t A A = E \quad (31)$$

を満たす様を選ぶと

$$\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2 = \sum_{i=1}^{n-1} Y_i^2 \quad (32)$$

を得る。ただし, E は $(n-1)$ 行 $(n-1)$ 列の単位行列である。

変数変換に伴うヤコビアン J は

$$J = \frac{\partial (X_1, X_2, X_3, \dots, X_n)}{\partial (\bar{X}, Y_1, Y_2, \dots, Y_{n-1})} = \begin{vmatrix} 1 & a_{11} & a_{12} & \cdots & a_{1n-1} \\ 1 & a_{21} & a_{22} & \cdots & a_{2n-2} \\ 1 & a_{31} & a_{32} & \cdots & a_{3n-3} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 1 & a_{n1} & a_{n2} & \cdots & a_{nn-1} \end{vmatrix} \quad (33)$$

によって求められるが, 実際には, 確率の規格化

$$\begin{aligned} 1 &= \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \cdots \int_{-\infty}^{\infty} \prod_{i=1}^n \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} e^{-\frac{1}{2} \frac{(X_i - \mu)^2}{\sigma^2}} dX_i \\ &= \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \cdots \int_{-\infty}^{\infty} \frac{1}{(\sqrt{2\pi}\sigma)^n} e^{-\frac{1}{2} \frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \mu)^2}{\sigma^2}} \\ &\quad dX_1 dX_2 \cdots dX_n \\ &= \frac{1}{(\sqrt{2\pi}\sigma)^n} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \cdots \int_{-\infty}^{\infty} \\ &\quad \times e^{-\frac{1}{2} \left(\frac{\sum_{i=1}^{n-1} Y_i^2}{\sigma^2} + \frac{n(\bar{X} - \mu)^2}{\sigma^2} \right)} J d\bar{X} dY_1 dY_2 \cdots dY_{n-1} \\ &= J \frac{1}{(\sqrt{2\pi}\sigma)^n} \left(\int_{-\infty}^{\infty} e^{-\frac{1}{2} \frac{Y_i^2}{\sigma^2}} dY_i \right)^{n-1} \\ &\quad \times \int_{-\infty}^{\infty} e^{-\frac{1}{2} \frac{n(\bar{X} - \mu)^2}{\sigma^2}} d\bar{X} = J \frac{1}{\sqrt{n}} \end{aligned} \quad (34)$$

によって, $J = \sqrt{n}$ を得る。したがって, 式(27)は

$$\begin{aligned} g(t) &= \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} dk e^{ikt} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \cdots \int_{-\infty}^{\infty} \\ &\quad \times e^{-ik \frac{\sum_{i=1}^{n-1} Y_i^2}{\sigma^2}} \frac{1}{(\sqrt{2\pi}\sigma)^n} e^{-\frac{1}{2} \left(\frac{\sum_{i=1}^{n-1} Y_i^2}{\sigma^2} + \frac{n(\bar{X} - \mu)^2}{\sigma^2} \right)} \\ &\quad \times \sqrt{n} d\bar{X} dY_1 dY_2 \cdots dY_{n-1} \\ &= \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} dk e^{ikt} \prod_{i=1}^{n-1} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} e^{-(ik + \frac{1}{2}) \frac{1}{\sigma^2} Y_i^2} dY_i \\ &= \frac{1}{2^{\frac{n-1}{2}}} \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} dk e^{ikt} \frac{1}{(ik + \frac{1}{2})^{\frac{n-1}{2}}}. \end{aligned} \quad (35)$$

ここで, $z = ik$ と置くと,

$$g(t) = \frac{1}{2^{\frac{n-1}{2}}} \frac{1}{2\pi i} \int_C dz e^{zt} \frac{1}{(z + \frac{1}{2})^{\frac{n-1}{2}}}. \quad (36)$$

したがって, 式(6)の複素積分によって

$$g(t) = \frac{1}{2^{\frac{n-1}{2}}} \frac{1}{\Gamma\left(\frac{n-1}{2}\right)} t^{\frac{n-1}{2}-1} e^{-\frac{t}{2}}, \quad 0 < t < \infty \quad (37)$$

と計算でき, 表2に与える自由度 $n-1$ の χ^2 -分布を得る。

ii. 標本分散の確率密度関数

統計量は

$$s^2 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2 = \frac{\sigma^2 \sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2}{\sigma^2}. \quad (38)$$

式(38)で, $X = \frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2}{\sigma^2}$ と置くと, X は自由度 $n-1$ の

χ^2 -分布に従うので s^2 のpdf $g(t)$ は

$$g(t) = \int_0^{\infty} dX \delta\left(t - \frac{\sigma^2}{n} X\right) \times \frac{1}{2^{\frac{n-1}{2}}} \frac{1}{\Gamma\left(\frac{n-1}{2}\right)} X^{\frac{n-1}{2}-1} e^{-\frac{X}{2}}. \quad (39)$$

ここで, $u = \frac{\sigma^2}{n} X$ と置くと, $du = \frac{\sigma^2}{n} dX$. したがって,

$$\begin{aligned} g(t) &= \int_0^\infty \frac{n}{\sigma^2} du \delta(t-u) \\ &\times \frac{1}{2^{\frac{n-1}{2}} \Gamma\left(\frac{n-1}{2}\right)} \left(\frac{n}{\sigma^2} u\right)^{\frac{n-3}{2}} e^{-\frac{n}{2\sigma^2} u} \\ &= \frac{1}{2^{\frac{n-1}{2}} \Gamma\left(\frac{n-1}{2}\right)} \left(\frac{\sqrt{n}}{\sigma}\right)^{n-1} t^{\frac{n-3}{2}} e^{-\frac{n}{2\sigma^2} t}. \end{aligned} \quad (40)$$

iii. 標本標準偏差の pdf

統計量は

$$s = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2} = \sqrt{\frac{\sigma^2 \sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2}{n \sigma^2}}. \quad (41)$$

$X = \frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2}{\sigma^2}$ と置くと, X は自由度 $n-1$ の χ^2 -分布に従うので s の pdf $g(t)$ は

$$\begin{aligned} g(t) &= \int_0^\infty dX \delta\left(t - \sqrt{\frac{\sigma^2}{n}} X\right) \\ &\times \frac{1}{2^{\frac{n-1}{2}} \Gamma\left(\frac{n-1}{2}\right)} X^{\frac{n-1}{2}-1} e^{-\frac{X}{2}}. \end{aligned} \quad (42)$$

ここで, $u = \sqrt{\frac{\sigma^2}{n}} X$ と置くと, $2u du = \frac{\sigma^2}{n} dX$. したがって,

$$\begin{aligned} g(t) &= \int_0^\infty \frac{n}{\sigma^2} 2u du \delta(t-u) \\ &\times \frac{1}{2^{\frac{n-1}{2}} \Gamma\left(\frac{n-1}{2}\right)} \left(\frac{n}{\sigma^2} u^2\right)^{\frac{n-3}{2}} e^{-\frac{n}{2\sigma^2} u^2} \\ &= \frac{1}{2^{\frac{n-2}{2}} \Gamma\left(\frac{n-1}{2}\right)} \left(\frac{\sqrt{n}}{\sigma}\right)^{n-1} t^{n-2} e^{-\frac{n}{2\sigma^2} t^2}. \end{aligned} \quad (43)$$

これは, 従前の計算結果^[7]と一致する.

iv. 標本不偏分散の pdf

統計量は

$$\begin{aligned} \hat{\sigma}^2 &= \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2 \\ &= \frac{\sigma^2 \sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2}{n-1}. \end{aligned} \quad (44)$$

式(44)で, $X = \frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2}{\sigma^2}$ と置くと, X は自由度 $n-1$ の χ^2 -分布に従うので $\hat{\sigma}^2$ の pdf $g(t)$ は

$$\begin{aligned} g(t) &= \int_0^\infty dX \delta\left(t - \frac{\sigma^2}{n-1} X\right) \\ &\times \frac{1}{2^{\frac{n-1}{2}} \Gamma\left(\frac{n-1}{2}\right)} X^{\frac{n-1}{2}-1} e^{-\frac{X}{2}}. \end{aligned} \quad (45)$$

ここで, $u = \frac{\sigma^2}{n-1} X$ と置くと, $du = \frac{\sigma^2}{n-1} dX$. したがって,

$$g(t) = \int_0^\infty \frac{n-1}{\sigma^2} du \delta(t-u)$$

$$\begin{aligned} &\times \frac{1}{2^{\frac{n-1}{2}} \Gamma\left(\frac{n-1}{2}\right)} \left(\frac{n-1}{\sigma^2} u\right)^{\frac{n-3}{2}} e^{-\frac{n-1}{2\sigma^2} u} \\ &= \frac{1}{2^{\frac{n-1}{2}} \Gamma\left(\frac{n-1}{2}\right)} \left(\frac{\sqrt{n-1}}{\sigma}\right)^{n-1} t^{\frac{n-3}{2}} e^{-\frac{n-1}{2\sigma^2} t}. \end{aligned} \quad (46)$$

v. 標本不偏分散の平方根の pdf

統計量は

$$\begin{aligned} \hat{\sigma} &= \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2} \\ &= \sqrt{\frac{\sigma^2 \sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2}{n-1} \frac{1}{\sigma^2}}. \end{aligned} \quad (47)$$

式(47)で, $X = \frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2}{\sigma^2}$ と置くと, X は自由度 $n-1$ の χ^2 -分布に従うので $\hat{\sigma}$ の pdf $g(t)$ は

$$\begin{aligned} g(t) &= \int_0^\infty dX \delta\left(t - \sqrt{\frac{\sigma^2}{n-1}} X\right) \\ &\times \frac{1}{2^{\frac{n-1}{2}} \Gamma\left(\frac{n-1}{2}\right)} X^{\frac{n-1}{2}-1} e^{-\frac{X}{2}}. \end{aligned} \quad (48)$$

ここで, $u = \sqrt{\frac{\sigma^2}{n-1}} X$ と置くと, $2u du = \frac{\sigma^2}{n-1} dX$. したがって,

$$\begin{aligned} g(t) &= \int_0^\infty \frac{n-1}{\sigma^2} 2u du \delta(t-u) \\ &\times \frac{1}{2^{\frac{n-1}{2}} \Gamma\left(\frac{n-1}{2}\right)} \left(\frac{n-1}{\sigma^2} u^2\right)^{\frac{n-3}{2}} e^{-\frac{n-1}{2\sigma^2} u^2} \\ &= \frac{1}{2^{\frac{n-3}{2}} \Gamma\left(\frac{n-1}{2}\right)} \left(\frac{\sqrt{n-1}}{\sigma}\right)^{n-1} t^{n-2} e^{-\frac{n-1}{2\sigma^2} t^2}. \end{aligned} \quad (49)$$

これは, 従前の計算結果^[8]と一致する.

(5) 自由度 n の t -分布と応用

i. 自由度 n の t -分布

確率変数 u および X が互いに独立で, それぞれ $N(0, 1^2)$ および自由度 n の χ^2 -分布に従うとき, $\frac{u}{\sqrt{X/n}}$

が従う pdf $g(t)$ は

$$\begin{aligned} g(t) &= \int_0^\infty dX \int_{-\infty}^\infty du \delta\left(t - \frac{u}{\sqrt{X/n}}\right) \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{u^2}{2}} \\ &\times \frac{1}{2^{\frac{n}{2}} \Gamma\left(\frac{n}{2}\right)} X^{\frac{n}{2}-1} e^{-\frac{X}{2}}. \end{aligned} \quad (50)$$

ここで $v = \frac{u}{\sqrt{X/n}}$ と置けば, $v\sqrt{X/n} = u$, $dv\sqrt{X/n} = du$. したがって,

$$\begin{aligned} g(t) &= \int_0^\infty dX \int_{-\infty}^\infty dv \sqrt{X/n} \delta(t-v) \\ &\times \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{v^2 X}{2n}} \frac{1}{2^{\frac{n}{2}} \Gamma\left(\frac{n}{2}\right)} X^{\frac{n}{2}-1} e^{-\frac{X}{2}} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
&= \int_0^\infty dX \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \sqrt{X/n} e^{-\frac{t^2 X}{2n}} \frac{1}{2^{\frac{n}{2}} \Gamma\left(\frac{n}{2}\right)} X^{\frac{n}{2}-1} e^{-\frac{X}{2}} \\
&= \int_0^\infty dX \frac{1}{\sqrt{2\pi n}} \frac{1}{2^{\frac{n}{2}} \Gamma\left(\frac{n}{2}\right)} X^{\frac{n-1}{2}} e^{-\left(\frac{t^2}{n}+1\right)\frac{X}{2}}.
\end{aligned} \quad (51)$$

変数変換 $\xi = \frac{1}{2}\left(\frac{t^2}{n}+1\right)X$ によって X の積分が実行でき
て

$$g(t) = \frac{\Gamma\left(\frac{n+1}{2}\right)}{\sqrt{\pi n} \Gamma\left(\frac{n}{2}\right) \left(1 + \frac{t^2}{n}\right)^{\frac{n+1}{2}}}, \quad -\infty < t < \infty \quad (52)$$

これを自由度 n の t -分布という。自由度 n の t -分布は、式(52)でガンマ関数にスターリングの漸近公式^[9]を用い
れば、

$$\lim_{n \rightarrow \infty} g(t) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{t^2}{2}} = N(0, 1^2), \quad (53)$$

が成り立つ。右辺は標準正規分布である。

ii. 自由度 $n-1$ の t -分布: σ^2 が未知の母平均 μ の検定と推定

統計量 $\frac{\bar{X}-\mu}{\frac{\hat{\sigma}}{\sqrt{n}}}$ は、 $\frac{\bar{X}-\mu}{\frac{\hat{\sigma}}{\sqrt{n}}} = \frac{\bar{X}-\mu}{\frac{\sigma}{\sqrt{n}}} / \frac{\hat{\sigma}}{\sigma}$
 $\frac{\bar{X}-\mu}{\frac{\hat{\sigma}}{\sqrt{n}}} / \sqrt{\frac{1}{n-1} \frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2}{\sigma^2}}$ と式変形され、 $\frac{\bar{X}-\mu}{\frac{\sigma}{\sqrt{n}}}$ と $\frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2}{\sigma^2}$
は、それぞれ、 $N(0, 1^2)$ および自由度 $n-1$ の χ^2 -分布に従うので、統計量の pdf $g(t)$ は $t[n-1]$ -分布、即
ち、

$$g(t) = \frac{\Gamma\left(\frac{n}{2}\right)}{\sqrt{\pi(n-1)} \Gamma\left(\frac{n-1}{2}\right) \left(1 + \frac{t^2}{n-1}\right)^{\frac{n}{2}}}, \quad -\infty < t < \infty \quad (54)$$

と成る。母分散 σ^2 を含まないので、 σ^2 が未知の母平均 μ の検定と推定に適用できる。

iii. 自由度 $n-1$ の t -分布: 二つの母分散 $\sigma_X^2 = \sigma_Y^2 = \sigma^2$ 未知の二つの母平均の差 $\mu_X - \mu_Y$ の検定と推定

母分散 σ_X^2, σ_Y^2 が未知、ただし、 $\sigma_X^2 = \sigma_Y^2 = \sigma^2$ を
仮定の下で、統計量 $\frac{\bar{X}-\bar{Y}-(\mu_X-\mu_Y)}{\frac{1}{\sqrt{\frac{1}{n_X}+\frac{1}{n_Y}}}\hat{\sigma}}$ は、

$$\begin{aligned}
\frac{\bar{X}-\bar{Y}-(\mu_X-\mu_Y)}{\frac{1}{\sqrt{\frac{1}{n_X}+\frac{1}{n_Y}}}\hat{\sigma}} &= \frac{\bar{X}-\bar{Y}-(\mu_X-\mu_Y)}{\frac{1}{\sqrt{\frac{1}{n_X}+\frac{1}{n_Y}}}\sigma} / \frac{\hat{\sigma}}{\sigma} \\
&= \frac{\bar{X}-\bar{Y}-(\mu_X-\mu_Y)}{\sqrt{\frac{1}{n_X}+\frac{1}{n_Y}}\sigma} \\
&\quad / \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n_X} (X_i - \bar{X})^2 / \sigma^2 + \sum_{i=1}^{n_Y} (Y_i - \bar{Y})^2 / \sigma^2}{n_X + n_Y - 2}}
\end{aligned} \quad (55)$$

と式変形される。 $\frac{\bar{X}-\bar{Y}-(\mu_X-\mu_Y)}{\frac{1}{\sqrt{\frac{1}{n_X}+\frac{1}{n_Y}}}\sigma}$ は、 $N(0, 1^2)$ に従う。一方、

$\sum_{i=1}^{n_X} (X_i - \bar{X})^2 / \sigma^2$ と $\sum_{i=1}^{n_Y} (Y_i - \bar{Y})^2 / \sigma^2$ は、それぞれ、 $\chi^2[n_X - 1]$ -分布と $\chi^2[n_Y - 1]$ -分布に従うので、それら
の和 $\sum_{i=1}^{n_X} (X_i - \bar{X})^2 / \sigma^2 + \sum_{i=1}^{n_Y} (Y_i - \bar{Y})^2 / \sigma^2$ は、 $\chi^2[n_X + n_Y - 2]$ -分布に従う。したがって、統計量 $\frac{\bar{X}-\bar{Y}-(\mu_X-\mu_Y)}{\frac{1}{\sqrt{\frac{1}{n_X}+\frac{1}{n_Y}}}\hat{\sigma}}$ は、

$t[n_X + n_Y - 2]$ -分布に従うことが分かる。したがって、pdf $g(t)$ は、 $n = n_X + n_Y - 2$ と置いて

$$g(t) = \frac{\Gamma\left(\frac{n+1}{2}\right)}{\sqrt{\pi n} \Gamma\left(\frac{n}{2}\right) \left(1 + \frac{t^2}{n}\right)^{\frac{n+1}{2}}}, \quad -\infty < t < \infty \quad (56)$$

である。二つの母分散 $\sigma_X^2 = \sigma_Y^2 = \sigma^2$ 未知のとき、二つ
の母平均の差 $\mu_X - \mu_Y$ の検定と推定に適用できる。

(6) F-分布: 二組の標本分散の比の分布に対応

確率変数 X, Y が独立で、それぞれ、自由度 m, n の
 χ^2 -分布に従うとき、 $\frac{X/m}{Y/n}$ が従う pdf $g(t)$ は

$$\begin{aligned}
g(t) &= \int_0^\infty dY \int_0^\infty dX \delta\left(t - \frac{X/m}{Y/n}\right) \\
&\quad \times \frac{1}{2^{\frac{m}{2}} \Gamma\left(\frac{m}{2}\right)} X^{\frac{m}{2}-1} e^{-\frac{X}{2}} \frac{1}{2^{\frac{n}{2}} \Gamma\left(\frac{n}{2}\right)} Y^{\frac{n}{2}-1} e^{-\frac{Y}{2}}.
\end{aligned} \quad (57)$$

ここで $u = \frac{X/m}{Y/n}$ と置けば、 $X = \frac{m}{n}Yu$, $dX = \frac{m}{n}Ydu$ 。した
がって、

$$\begin{aligned}
g(t) &= \int_0^\infty dY \int_0^\infty \frac{m}{n} Y du \delta(t - u) \times \\
&\quad \frac{1}{2^{\frac{m}{2}} \Gamma\left(\frac{m}{2}\right)} \left(\frac{m}{n}Yu\right)^{\frac{m}{2}-1} e^{-\frac{1}{2}\frac{m}{n}Yu} \frac{1}{2^{\frac{n}{2}} \Gamma\left(\frac{n}{2}\right)} Y^{\frac{n}{2}-1} e^{-\frac{Y}{2}} \\
&= \int_0^\infty dY \frac{1}{2^{\frac{m+n}{2}} \Gamma\left(\frac{m}{2}\right) \Gamma\left(\frac{n}{2}\right)} \left(\frac{m}{n}\right)^{\frac{m}{2}} t^{\frac{m}{2}-1} \\
&\quad \times e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{m}{n}t+1\right)Y} Y^{\frac{m+n}{2}} dY.
\end{aligned} \quad (58)$$

変数変換 $\eta = \frac{1}{2}\left(\frac{m}{n}t+1\right)Y$ によって Y の積分が実行でき
て

$$\begin{aligned}
g(t) &= \frac{1}{\Gamma\left(\frac{m}{2}\right) \Gamma\left(\frac{n}{2}\right)} \\
&\quad \times \left(\frac{m}{n}\right)^{\frac{m}{2}} t^{\frac{m}{2}-1} \frac{1}{\left(1 + \frac{m}{n}t\right)^{\frac{m+n}{2}}} \Gamma\left(\frac{m+n}{2}\right) \\
&= \frac{1}{B\left(\frac{m}{2}, \frac{n}{2}\right)} \left(\frac{m}{n}\right)^{\frac{m}{2}} t^{\frac{m}{2}-1} \left(1 + \frac{m}{n}t\right)^{-\frac{m+n}{2}}.
\end{aligned} \quad (59)$$

$0 < t < \infty$
これを自由度 (m, n) の F -分布という。統計量 $F =$

$$\frac{\frac{\sigma_X^2}{\sigma_X^2}}{\frac{\sigma_Y^2}{\sigma_Y^2}} = \frac{\frac{1}{n_X-1} \sum_{i=1}^{n_X} (X_i - \bar{X})^2 / \sigma_X^2}{\frac{1}{n_Y-1} \sum_{i=1}^{n_Y} (Y_i - \bar{Y})^2 / \sigma_Y^2} \quad \text{は、分子の}$$

$\sum_{i=1}^{n_x} (X_i - \bar{X})^2 / \sigma_x^2$ が $\chi^2[n_x - 1]$ 分布, 分母の $\sum_{i=1}^{n_y} (Y_i - \bar{Y})^2 / \sigma_y^2$ が $\chi^2[n_y - 1]$ 分布の形になっているので, 自由度 $(n_x - 1, n_y - 1)$ の F -分布, $F_{n_y-1}^{n_x-1}$ に従う. これは未知母数 μ_x, μ_y を含まず, 未知母数として σ_y^2 / σ_x^2 の検定と推定に用いることができる. また, F -分布は分散分析法によって複数グループの母平均に関する帰無仮説の検定に利用される.

(7) 標本相関係数

表1にある標本相関係数の統計量を参照して, 相関係数の pdf $g(r)$ は,

$$g(r) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \dots \int_{-\infty}^{\infty} \delta \left(r - \frac{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})(Y_i - \bar{Y})}{\sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2} \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (Y_i - \bar{Y})^2}} \right) \times \prod_{i=1}^n f(X_i, Y_i) dX_i dY_i \quad (60)$$

によって与えられる. ただし, $f(X_i, Y_i)$ は母集団の 2 次元正規分布の pdf で

$$f(x, y) = \frac{1}{2\pi\sigma_x\sigma_y\sqrt{1-\rho^2}} \times e^{-\frac{1}{2(1-\rho^2)} \left(\left(\frac{x-\mu_x}{\sigma_x} \right)^2 - 2\rho \frac{x-\mu_x}{\sigma_x} \frac{y-\mu_y}{\sigma_y} + \left(\frac{y-\mu_y}{\sigma_y} \right)^2 \right)} \quad (61)$$

$-1 < \rho < 1, \sigma_x > 0, \sigma_y > 0,$

によって与えられる, ここで, $\mu_x, \mu_y; \sigma_x^2, \sigma_y^2; \rho$ は, それぞれ, 確率変数 X_i, Y_i の母平均と母分散, および, 母相関係数を表す. しかし, 上式はこのままでは計算困難であるので,

$$S_x^2 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2, \quad S_y^2 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (Y_i - \bar{Y})^2, \\ S_{xy} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})(Y_i - \bar{Y}),$$

を定義すると, 標本相関係数の統計量は

$$R = \frac{S_{xy}}{\sqrt{S_x^2} \sqrt{S_y^2}} \quad (62)$$

と表される. ここで, S_x^2, S_y^2 はそれぞれ標本分散 S_{xy} は標本共分散である. ウィンシャートの分布を利用すると, 標本相関係数の pdf は

$$g(r) = \int_0^{\infty} d(S_x^2) \int_0^{\infty} d(S_y^2) \int_{-\infty}^{\infty} d(S_{xy}) \times \delta \left(r - \frac{S_{xy}}{\sqrt{S_x^2} \sqrt{S_y^2}} \right) F(S_x^2, S_y^2, S_{xy}). \quad (63)$$

と書き表される. ここで,

$$F(S_x^2, S_y^2, S_{xy}) = \frac{1}{2^{n-1} \sqrt{\pi}} \frac{(S_x^2 S_y^2 - S_{xy}^2)^{\frac{n-4}{2}}}{(\sigma_x^2 \sigma_y^2 (1-\rho^2))^{\frac{n-1}{2}}} \times \frac{e^{-\frac{1}{2(1-\rho^2)} \left(\frac{S_x^2}{\sigma_x^2} - 2\rho \frac{S_{xy}}{\sigma_x \sigma_y} + \frac{S_y^2}{\sigma_y^2} \right)}}{\Gamma\left(\frac{n-1}{2}\right) \Gamma\left(\frac{n-2}{2}\right)} \quad (64)$$

である. しかし, 計算はなお複雑であり厳密な pdf は幾つかの表式によって提示されており, それらは論文 II に示した. 十分大きな標本 n に対しては, フィッシャーの z 変換 $z = \tanh^{-1} r = \frac{1}{2} \log \frac{1+r}{1-r}$ による変数変換 $r \rightarrow z$ を導入する. z の pdf は, 正規分布 $N\left(\zeta, \left(\sqrt{1/(n-3)}\right)^2\right)$ によって良く近似される. ここで, $\zeta = \tanh^{-1} \rho = \frac{1}{2} \log \frac{1+\rho}{1-\rho}$. このとき, 統計量, $\frac{z-\zeta}{1/\sqrt{n-3}}$ の pdf は $N(0, 1^2)$ に従うので, z に関する検定と推定の結果を r に戻せば r の検定と推定を得ることができる.

4. 結論と議論

まず, 数理統計学, 熱力学・統計力学, および, 量子力学の発展の概観を科学的に調べた. 数理統計学においては 1875 年にヘルメルトによる χ^2 分布の発見であり, 熱力学・統計力学においては 1877 年のボルツマンによる熱力学第 2 法則を確率論で表現したこと, 量子力学においては 1926 年のシュレーディンガーによる電子の波動関数に電子の存在確率密度の解釈を与えたこと等が特記される. そして, それぞれの分野は個々特有な発展を遂げていったが, 確率・統計の概念がこれら三分野の共通基礎を担っていることが分かる. その意味において, これらの分野は確率・統計の範疇に入るものと考えられる. 自然科学において確率・統計の概念を導入したことは, ニュートン力学の決定論に対して, 現象を根底から解明することになり画期的なことであった.

本研究において最初に, 数理統計学における幾つかの重要な母数と対応する統計量の対照表を与えると共に, 統計量の期待値を求めて母数との関係を示した. 数理統計学や統計力学の始まりからほぼ 50 年遅れて発見されたディラックの δ 関数を用いて, 物理的考察の下で統一的に統計量に対する pdf を, 比較的容易に導出できることを示した. 数理統計学において物理的な観点から定式化を行ったことは, 新規な試みである. 重要な幾つかの統計量の定義とその pdf, および, 補遺の一覧を表に与えた. 表中, 検定と推定に関して全体を俯瞰し易い様に, 関連性のある統計量はまとめて示した. 専門書では重要な pdf の導出法が省略されることが多いので, 本研究においては精解が得られるように詳細な説明に努めた. 今日ではコンピュータソフトを利用して, 標本データの入力に対する出力という簡便な操作によって, 検定と推定は可能になっているが, 簡便さ

の背景に在る如何なる理論的根拠に基づくものかの理解は大切である。

参考文献

[1] 高橋義則, “数理統計学における確率変数の確率密度関数の新導出法,” 愛知工科大学紀要第16巻, pp.59-73, Mar. 2019.
 [2] 高橋義則, “数理統計学における確率変数の確率密度関数の新導出法Ⅱ 一標本数が十分に大きいとき一,” 愛知工科大学紀要第17巻, pp.23-38, Mar. 2020.
 [3] 後藤憲一, 山本邦夫, 神吉健, 西山敏之, 望月和

子, 興地斐男, “量子力学演習,” 共立出版, p.80, 東京, 1996.
 [4] 成田誠之助, 小林侅史, “電気回路理論,” 昭晃堂, p.265, 東京, 1998.
 [5] 森口繁一, 宇田川銈久, 一松信, “数学公式Ⅰ,” 岩波書店, p.233, 東京, 1995.
 [6] 森口繁一, 宇田川銈久, 一松信, “数学公式Ⅰ,” 岩波書店, p.232, 東京, 1995.
 [7] 高橋磐郎, 小林竜一, 小柳芳雄, “改定工科の数学統計解析,” 培風館, p.66, 東京, 1997.
 [8] 高橋磐郎, 小林竜一, 小柳芳雄, “改定工科の数学統計解析,” 培風館, p.199, 東京, 1997.
 [9] 森口繁一, 宇田川銈久, 一松信, “数学公式Ⅲ,” 岩波書店, p.5, 東京, 1995.

表2 Statistic and its pdf

統計量	δ 関数による pdf の定義と結果	補遺
標本平均 $\bar{X} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n X_i$	$\int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \dots \int_{-\infty}^{\infty} \delta \left(t - \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n X_i \right) \prod_{i=1}^n \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} e^{-\frac{1}{2} \left(\frac{X_i - \mu}{\sigma} \right)^2} dX_i$ $= \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \frac{1}{\sigma} e^{-\frac{1}{2} \frac{(t-\mu)^2}{\frac{\sigma^2}{n}}}, \quad -\infty < t < \infty$ <p style="text-align: center;">正規分布 $N\left(\mu, \left(\frac{\sigma}{\sqrt{n}}\right)^2\right)$</p>	
$\frac{\bar{X} - \mu}{\frac{\sigma}{\sqrt{n}}}$ 母分散 σ^2 既知	$\int_{-\infty}^{\infty} \delta \left(t - \frac{\bar{X} - \mu}{\frac{\sigma}{\sqrt{n}}} \right) \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \frac{1}{\sigma} e^{-\frac{1}{2} \frac{(\bar{X} - \mu)^2}{\frac{\sigma^2}{n}}} d\bar{X}$ $= \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{t^2}{2}}, \quad -\infty < t < \infty$ <p style="text-align: center;">基準正規分布 $N(0, 1^2)$ 母平均 μ の検定と推定</p>	
標本平均の差 $\bar{X} - \bar{Y}$ 母分散 σ_X^2, σ_Y^2 既知	$\int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \delta(t - (\bar{X} - \bar{Y}))$ $\times \frac{1}{\sqrt{2\pi} \frac{\sigma_X}{\sqrt{n_X}}} e^{-\frac{1}{2} \frac{(\bar{X} - \mu_X)^2}{\frac{\sigma_X^2}{n_X}}} \frac{1}{\sqrt{2\pi} \frac{\sigma_Y}{\sqrt{n_Y}}} e^{-\frac{1}{2} \frac{(\bar{Y} - \mu_Y)^2}{\frac{\sigma_Y^2}{n_Y}}} d\bar{X} d\bar{Y}$ $= \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \frac{1}{\sqrt{\frac{\sigma_X^2}{n_X} + \frac{\sigma_Y^2}{n_Y}}} e^{-\frac{1}{2} \frac{(t - (\mu_X - \mu_Y))^2}{\frac{\sigma_X^2}{n_X} + \frac{\sigma_Y^2}{n_Y}}}, \quad 0 < t < \infty$ <p style="text-align: center;">正規分布 $N\left(\mu_X - \mu_Y, \left(\sqrt{\frac{\sigma_X^2}{n_X} + \frac{\sigma_Y^2}{n_Y}}\right)^2\right)$</p>	
$\frac{\bar{X} - \bar{Y} - (\mu_X - \mu_Y)}{\sqrt{\frac{\sigma_X^2}{n_X} + \frac{\sigma_Y^2}{n_Y}}}$ 母分散 σ_X^2, σ_Y^2 既知	<p style="text-align: center;">基準正規分布 $N(0, 1^2)$ 二つの母平均の差 $\mu_X - \mu_Y$ の検定と推定</p>	
$\sum_{i=1}^n \left(\frac{X_i - \mu_i}{\sigma_i} \right)^2$	$\int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \dots \int_{-\infty}^{\infty} \delta \left(t - \sum_{i=1}^n \left(\frac{X_i - \mu_i}{\sigma_i} \right)^2 \right)$	

母平均からの 差の平方和/母分散	$\times \prod_{i=1}^n \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_i} e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{X_i-\mu_i}{\sigma_i}\right)^2} dX_i$ $= \frac{1}{2^{\frac{n}{2}} \Gamma\left(\frac{n}{2}\right)} t^{\frac{n}{2}-1} e^{-\frac{t}{2}}, \quad 0 < t < \infty$	
X および Y が互いに独立で、それぞれ $\chi^2[m]$ および $\chi^2[n]$ に従うとき、 $X + Y$	$\int_0^\infty dY \int_0^\infty dX \delta(t - (X + Y)) \frac{1}{2^{\frac{m}{2}} \Gamma\left(\frac{m}{2}\right)} X^{\frac{m}{2}-1} e^{-\frac{X}{2}}$ $\times \frac{1}{2^{\frac{n}{2}} \Gamma\left(\frac{n}{2}\right)} Y^{\frac{n}{2}-1} e^{-\frac{Y}{2}}$ $= \frac{1}{2^{\frac{m+n}{2}} \Gamma\left(\frac{m+n}{2}\right)} t^{\frac{m+n}{2}-1} e^{-\frac{t}{2}}, \quad 0 < t < \infty$	χ^2 - 分布 の加法性
$\sqrt{2\chi^2} - \sqrt{2n-1}$	$\int_0^\infty \delta\left(t - (\sqrt{2\chi^2} - \sqrt{2n-1})\right) \frac{1}{2^{\frac{n}{2}} \Gamma\left(\frac{n}{2}\right)} (\chi^2)^{\frac{n-2}{2}} e^{-\frac{\chi^2}{2}} d(\chi^2)$ $= \frac{1}{2^{n-1} \Gamma\left(\frac{n}{2}\right)} (t + \sqrt{2n-1})^{n-1} e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{t+\sqrt{2n-1}}{2}\right)^2}$	n : 大 $N(0, 1^2)$ 論文 II 参照
$(\chi^2 - n)/\sqrt{2n}$	$\int_0^\infty \delta\left(t - \frac{\chi^2 - n}{\sqrt{2n}}\right) \frac{1}{2^{\frac{n}{2}} \Gamma\left(\frac{n}{2}\right)} (\chi^2)^{\frac{n-2}{2}} e^{-\frac{\chi^2}{2}} d(\chi^2)$ $= \frac{1}{2^{\frac{n}{2}} \Gamma\left(\frac{n}{2}\right)} \left(\sqrt{2n}\left(t + \sqrt{\frac{n}{2}}\right)\right)^{\frac{n-2}{2}} e^{-\frac{1}{2}\sqrt{2n}\left(t + \sqrt{\frac{n}{2}}\right)} \sqrt{2n}$	n : 大 $N(0, 1^2)$ 論文 II 参照
$\frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2}{\sigma^2}$ 標本平均からの 差の平方和/母分散	$\int_{-\infty}^\infty \int_{-\infty}^\infty \dots \int_{-\infty}^\infty \delta\left(t - \frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2}{\sigma^2}\right)$ $\times \prod_{i=1}^n \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{X_i-\mu}{\sigma}\right)^2} dX_i$ $= \frac{1}{2^{\frac{n-1}{2}} \Gamma\left(\frac{n-1}{2}\right)} t^{\frac{n-1}{2}-1} e^{-\frac{t}{2}}, \quad 0 < t < \infty$	$\chi^2[n-1]$ -分布 母分散 σ^2 の検定と推定
u および X が互いに独立で、それぞれ $N(0, 1^2)$ および $\chi^2[n]$ に従うとき、 $\frac{u}{\sqrt{X/n}}$	$\int_0^\infty dX \int_{-\infty}^\infty du \delta\left(t - \frac{u}{\sqrt{X/n}}\right) \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{u^2}{2}} \frac{1}{2^{\frac{n}{2}} \Gamma\left(\frac{n}{2}\right)} X^{\frac{n}{2}-1} e^{-\frac{X}{2}}$ $= \frac{\Gamma\left(\frac{n+1}{2}\right)}{\sqrt{\pi n} \Gamma\left(\frac{n}{2}\right)} \left(1 + \frac{t^2}{n}\right)^{\frac{n+1}{2}} \cdot -\infty < t < \infty$	$t[n]$ -分布
$\frac{\bar{X} - \mu}{\frac{\hat{\sigma}}{\sqrt{n}}}$ 母分散 σ^2 未知	$\frac{\bar{X} - \mu}{\frac{\hat{\sigma}}{\sqrt{n}}} = \frac{\bar{X} - \mu}{\frac{\sigma}{\sqrt{n}}} \frac{\hat{\sigma}}{\sigma} = \frac{\bar{X} - \mu}{\frac{\sigma}{\sqrt{n}}} \frac{1}{\sqrt{\frac{1}{n-1} \frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2}{\sigma^2}}}$ $\frac{\Gamma\left(\frac{n}{2}\right)}{\sqrt{\pi(n-1)} \Gamma\left(\frac{n-1}{2}\right) \left(1 + \frac{t^2}{n-1}\right)^{\frac{n}{2}} \cdot -\infty < t < \infty$	$t[n-1]$ -分布 母平均 μ の検定と推定
$\frac{\bar{X} - \bar{Y} - (\mu_X - \mu_Y)}{\sqrt{\frac{1}{n_X} + \frac{1}{n_Y}} \hat{\sigma}}$ 母分散 σ_X^2, σ_Y^2 未知、ただし、 $\sigma_X^2 = \sigma_Y^2 = \sigma^2$ を仮定	$\frac{\bar{X} - \bar{Y} - (\mu_X - \mu_Y)}{\sqrt{\frac{1}{n_X} + \frac{1}{n_Y}} \hat{\sigma}} = \frac{\bar{X} - \bar{Y} - (\mu_X - \mu_Y)}{\sqrt{\frac{1}{n_X} + \frac{1}{n_Y}} \sigma} \frac{\hat{\sigma}}{\sigma}$ $= \frac{\bar{X} - \bar{Y} - (\mu_X - \mu_Y)}{\sqrt{\frac{1}{n_X} + \frac{1}{n_Y}} \sigma} \frac{1}{\sqrt{\frac{1}{\sum_{i=1}^{n_X} (X_i - \bar{X})^2 / \sigma^2 + \frac{1}{\sum_{i=1}^{n_Y} (Y_i - \bar{Y})^2 / \sigma^2}}}}$	n : 大 $N(0, 1^2)$

	$n = n_X + n_Y - 2$ と置いて $\frac{\Gamma\left(\frac{n+1}{2}\right)}{\sqrt{\pi n} \Gamma\left(\frac{n}{2}\right) \left(1 + \frac{t^2}{n}\right)^{\frac{n+1}{2}}}, \quad -\infty < t < \infty$ $t[n_X + n_Y - 2]$ -分布 二つの母平均の差 $\mu_X - \mu_Y$ の検定と推定	
X, Y が独立で、それぞれ $\chi^2[n_X], \chi^2[n_Y]$ に従うとき、 $\frac{X/n_X}{Y/n_Y}$	$\int_0^\infty dY \int_0^\infty dX \delta\left(t - \frac{X/n_X}{Y/n_Y}\right)$ $\times \frac{1}{2^{\frac{n_X}{2}} \Gamma\left(\frac{n_X}{2}\right)} X^{\frac{n_X}{2}-1} e^{-\frac{X}{2}} \frac{1}{2^{\frac{n_Y}{2}} \Gamma\left(\frac{n_Y}{2}\right)} Y^{\frac{n_Y}{2}-1} e^{-\frac{Y}{2}}$ $= \frac{\Gamma\left(\frac{n_X + n_Y}{2}\right)}{\Gamma\left(\frac{n_X}{2}\right) \Gamma\left(\frac{n_Y}{2}\right)} \left(\frac{n_X}{n_Y}\right)^{\frac{n_X}{2}} t^{\frac{n_X}{2}-1} \frac{1}{\left(1 + \frac{n_X}{n_Y} t\right)^{\frac{n_X + n_Y}{2}}}, \quad 0 < t < \infty$ 自由度 (n_X, n_Y) の F -分布, $F_{n_Y}^{n_X}$	実験計画法の主要な公式
$\hat{\sigma}_X^2, \hat{\sigma}_Y^2$ が互いに独立のとき、 $\frac{\hat{\sigma}_X^2/\sigma_X^2}{\hat{\sigma}_Y^2/\sigma_Y^2}$	$\frac{\hat{\sigma}_X^2/\sigma_X^2}{\hat{\sigma}_Y^2/\sigma_Y^2} = \frac{\frac{1}{n_X-1} \sum_{i=1}^{n_X} (X_i - \bar{X})^2 / \sigma_X^2}{\frac{1}{n_Y-1} \sum_{i=1}^{n_Y} (Y_i - \bar{Y})^2 / \sigma_Y^2}$ となるので pdf は、 自由度 $(n_X - 1, n_Y - 1)$ の F -分布, $F_{n_Y-1}^{n_X-1}$ と成る。 二つの母分散の比 σ_Y^2/σ_X^2 の検定と推定	
標本相関係数 $\frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})(Y_i - \bar{Y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (Y_i - \bar{Y})^2}}$ または、 $\frac{S_{xy}}{\sqrt{S_x^2} \sqrt{S_y^2}}$ S_x^2, S_y^2 は標本分散 S_{xy} は標本共分散	$\int_{-\infty}^\infty \int_{-\infty}^\infty \dots \int_{-\infty}^\infty \delta\left(r - \frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})(Y_i - \bar{Y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (Y_i - \bar{Y})^2}}\right)$ $\times \prod_{i=1}^n f(X_i, Y_i) dX_i dY_i$ または、 $\int_0^\infty d(S_x^2) \int_0^\infty d(S_y^2) \int_{-\infty}^\infty d(S_{xy}) \delta\left(r - \frac{S_{xy}}{\sqrt{S_x^2} \sqrt{S_y^2}}\right)$ $\times F(S_x^2, S_y^2, S_{xy})$ f, F の関数は、それぞれ式(61), (64)参照。 フィッシャーの z 変換, $z = \tanh^{-1} r$ による変数変換 $r \rightarrow z$ を施す。	n : 大 統計量 $\frac{z - \zeta}{1/\sqrt{n-3}}$ は、 $N(0, 1^2)$ に従う。 ここで、 $\zeta = \tanh^{-1} \rho$
中心極限定理 $\frac{\bar{X} - \mu}{\frac{\sigma}{\sqrt{n}}}$ 母平均 μ , 母分散 σ^2 が 定義可	$\int_{-\infty}^\infty \int_{-\infty}^\infty \dots \int_{-\infty}^\infty \delta\left(t - \frac{\bar{X} - \mu}{\frac{\sigma}{\sqrt{n}}}\right) \prod_{i=1}^n D(X_i) dX_i$ $= \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{t^2}{2}}, \quad n: \text{大}, \quad -\infty < t < \infty$ $D(X_i)$ は確率変数 X_i の平均 μ と分散 σ^2 を持つ任意の pdf で正規分布である必要は無い。	n : 大 $N(0, 1^2)$ 論文 II 参照

研究ノート

オンデマンド型動画資料を用いたオンライン授業における形成的評価の検討

尾関 智恵*, 尾林 史章**

(2020年10月1日受理)

Study on Formative Evaluation in Online Class Using On-Demand Video Lecture

Tomoe Ozeki*, Fumiaki Obayashi**

(Received October 1, 2020)

Abstract

Video lectures account for a large proportion of the content in online classes and are a major factor in determining quality. In the face-to-face lecture, the instructor can change the teaching method in response to the learners' responses and construct the class dynamically. However, in a video class, teachers have no choice but to predict learners' responses and construct them statically in advance. Therefore, it is necessary to collect learners' responses efficiently in order to provide in video lectures with high learning effectiveness. In this study, we collected students' responses to a video lecture with a slide show with commentary and investigated whether the learning effect can be formative evaluated. A survey was administered to students who watched the movies, and the results of the analysis of their understanding based on the tasks submitted are reported.

キーワード: 遠隔授業, 学習コンテンツ, 学習効果, 学習評価, 動画資料

Keywords : Distance Learning, Learning Content, Learning Effectiveness, Learning Assessment, Video Materials

1. はじめに

1.1 インターネットによる動画配信授業の現状

インターネットを通じたオンライン学習環境は、Webページベースの資料提示の他、掲示板などの意見交換機能、ブログのような記事作成機能、そしてリアルタイムにやりとりが行えるチャットなどの機能を有する学習支援システムとして改良を重ねてきた[1]。近年、通信環境の高速化およびユーザが利用できる端末の高性能化・モバイル化により場所を選ばず大容量のデータのやり取りも可能となった[2]。

1.2 オンライン授業の評価方法について

これに伴い、動画配信による情報提示が一般的となり、同期型・非同期型含めてオンライン授業の大半を動画資料が占めるようになった。MOOCは大学講座をオンライン化しいつでもどこでも高品質の講義受講を可能にした[3]。Udemyは商用的にも成功している参加型オンライン講座で、学習動画サービスとして世界中にユーザを有する[4]。いずれも成長してきた要因として、提供している動画講義を必要な時に視聴することができ、その内容も常にユーザに評価されることに

よって、より良いコンテンツが残るようなサイクルで管理されていることなどが考えられる[3,4]。動画資料の品質は当然学習者の学びの質に影響すると考えられるが、学習支援システムとしてのプラットフォームが充実していることも要因として考えられる。

昨今、対面授業における教育の評価手法として主流となってきたのが診断的評価・形成的評価・総括的評価の考え方である[5]。診断的評価は、学習開始前の学習者の状態を推し量るもので単元に関わるテストやアンケートなどで実施することが多い。次に形成的評価は学習過程でどのくらい理解が進んでいるかを推し量るもので、小テストやレポートなど成果物として提出されるもの以外にも発話内容や活動への参加度合いも評価材料として使うことがある。総括的評価は学習後に学習内容が定着し、活用できる状態になっているかを推し量る。どの評価も学習者の持つ知識状態や意識変容など学習前後の変化を見極めるために使われることが多いが、昨今重要性が増してきているのは学習過程を評価する形成的評価である[6,7,8,9,10]。学習の評価で重要なのは、学習者が変化したかどうかを確認することよりも、学習の途中で何

* 愛知工科大学工学部情報メディア学科, 〒443-0047 愛知県蒲郡市西迫町馬乗 50-2

Department of Media Informatics, Aichi University of Technology, 50-2 Manori, Nishihassama-cho, Gamagori-shi, Aichi 443-0047, Japan

** 愛知工科大学次世代自動車システム研究所, 〒443-0047 愛知県蒲郡市西迫町馬乗 50-2

Next Generation Vehicle System Research Center, Aichi University of Technology, 50-2 Manori, Nishihassama-cho, Gamagori-shi, Aichi 443-0047, Japan

につまづき学びを阻害しているのかといった問題点や、逆に学習者の知的好奇心を刺激し主体性のある学びを引き起こしているといった状況を知り、その要因を特定することである[7]。つまり、学習過程を阻害もしくは促進する要因を特定できれば、教員は学習者の状況に応じた対策を取ることができ、より質の高い学びを引き起こすことにつながる[7,8,9,10]。

1.3 オンライン授業と対面授業の比較・評価

オンライン学習環境は対面授業と違い、些細な学習者の状況や雰囲気や教員が収集することが難しい。しかし、インターネットを介して対話をやり取りすることは、いちいち思考や解釈を文字として表現し直すことが必須となるため、むしろ学習者が学習途中で伝達した知識や情報をどの程度理解しているかを証拠付きで分析しやすくしている[10,11]。また、学習者が自主的に資料を視聴したり読み込んだりする負担が発生することで教室内で行う1対多人数のやりとりが1対1のやり取りと同様の活動を引き起こしやすいことがわかっている。つまり、学習者と他者(教員や学生同士含め)とのやりとりがテキスト化されることで学習途中をデータとして収集できるため、より質の高い形成的評価を行うことが可能となる。同期型でリアルタイムにやり取りするオンライン学習支援システムの研究ではこのような学習過程の分析を使って講義を改良していく実践が行われてきている[10]。しかし、現状のオンライン学習環境における非同期型の動画講義の評価は、アンケートによる満足度評価が主で、形成的評価はあまり行われていない。収集しているアンケートも受講後のことが多く、参加者の嗜好や主観に左右される指標であることから真に学習の効果を見るためには不十分である。対面授業と同様に学習者にとって良い学びを引き起こすことができたかどうか証拠を抽出し、質の保証ができる評価方法を実践する必要がある[8,11]。

1.4 動画講義法と本研究ノートについて

動画講義に関して Hansch ら[12,13]によると、映像表現には 18 種類の方法があり、それを選ぶには知識と技術が必要であることを指摘している。代表的なものとしては、画面上に講師が登場して話す「トーキングヘッド」と、スライドディスプレイに音声で解説するだけの「ナレーション付きタブレットキャプチャー」の2つがある。しかし、この2つの表現が学習内容とどのように関連しているかを評価した研究は少ない。また、テレビ番組のような高品質で凝ったコンテンツの方が学習目標の達成に効果があるかどうかについては、十分な評価がなされていない。いくつかの研究では、高品質の音声教材の方が学習者に良い印象を与えると報告されている[14]。また、第三者の視点での映像表現や視聴

後のフィードバックが学習者に好印象を与える要因であることが示されている[13,15]。このように、動画講義の制作者が適切な選択をするためには、高画質・高音質の違いや表現方法の違いが学習目的の達成にどの程度寄与しているのかを検討する必要がある。

本研究ノートでは、オンデマンド型の動画講義を授業手法の一部として利用し、オンライン学習支援システム形成的評価のように学習者の状況に応じた授業構築を支援できる評価方法を試行した結果を報告する。具体的には動画講義に対する学習者の主観評価を尋ねるアンケートと、授業内の課題を用いた客観評価を比較し、形成的評価として適している評価方法を検討する。その際、動画講義の表現方法の違いがそれぞれの主観・客観評価に影響を与えたかどうかを検討する。

本研究ノートで報告するデータは、参加者に対する侵襲・介入は行われず、参加者の意思に回答が委ねられており、結果を専ら統計解析している。

2. 方法

2020 年度前期に愛知工科大学工学部情報メディア学科1年生向けに開講された「デザイン入門」において調査および実践をおこなった。

2.1 授業概要

本講義の目的は、工学・デザインの様々なジャンルについて知識を深め、研究・開発・プレゼンテーションに必要な図解することの基礎について理解できるようになることである。エンジニアとして工学的な視点だけではなく、物事を様々な方向から考察し創造して研究・開発・プレゼンテーションする力が身につくよう、演習を交えてビジュアルリテラシーを身につけることが到達目標である。

2.2 調査対象

調査対象の講義は 59 名であった(%男性=94.4)。

表 1. 参加者

動画講義の種類	受講人数
HLD	30
LSD	29

2.3 映像教材

動画講義の表現方法の違いがそれぞれの主観・客観評価に影響を与えたかどうかを検討するため、2種類の動画講義を用意した。高画質で講師の姿あり(With high-quality lecturer display:以下 HLD)と低

画質のスライドショー (With low-quality slides only:以下 LSD)の動画は、同じ内容の講義音声から制作されている。



図 1. 高画質講師あり HLD: With high-quality lecturer display.

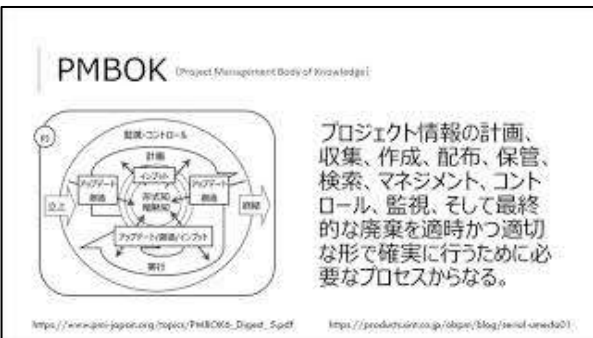


図 2. 低画質スライドのみ LSD: With low-quality slides only

約 30 分の講義で、防音設備が整った教室 (コンテンツ制作スタジオ) で撮影した。HLD は Hansch らの分類に基づく「トーキングヘッド」方式を採用し、固定式ビデオカメラとニア PCM 対応オーディオレコーダで収録した(図 1)[12]。LSD は「ナレーション付きタブレットキャプチャ」方式をベースに、HLD で録音した音声を用いてスライド画像を順番に表示するように編集した(図 2)。動画講義の OP と ED はアニメーションを用意し、2 つの動画に同様に挿入した。講義の動画は YouTube で公開(限定公開)された(表 2 参照)。

表 2. 動画講義の概要

種類	容量	画質	配信
HLD	2.68GB	HD 720p	HD か SD
LSD	409.4MB	SD 480p	SD のみ

2.4 評価法

2.4.1 アンケート調査

動画講義に対する学習者の主観的な感想を得るために、以下のようなアンケート調査を実施した。回答

は動画講義の印象を 1~4 の尺度で評価するリッカート尺度の 4 件法にて実施した。(4=大変当てはまる, 3=あてはまる, 2=あてはまらない, 1=全然あてはまらない)

- Q1. 本講義の題名に関する内容が理解できた。
- Q2. 本講義を学ぶ理由が理解できた。
- Q3. 本講義で学んだことを実践しようと思った。
- Q4. 講義時間は適切だった。
- Q5. 本講義を受けた場所はどこですか。
- Q6. 講義は教室で行うべきだった。

次に、選択式で以下の質問をした。

- Q7. この講義はどこで見ましたか？
- Q8. この講義は何で見ましたか？

アンケートの最後に他のグループに提示された自分が見ていない方の動画 (HLD もしくは LSD) を見てもらい、以下の質問を行った。

- Q9. どちらの動画講義が良かったと感じましたか？

2.4.2 自由記述の課題レポート

アンケートとは別に課題として「この動画講義から何を理解したか」という質問を課し、自由記述で 100 文字以上の日本語で回答させた。

2.4.3 動画講義の実践

授業後に行う演習を伴う課題では、動画講義で実践するよう推奨されている手描きのスケッチを盛り込むオプションを教示した。手書きのスケッチは課題達成要件において必須とはせず、参加者の任意に任せると出題時に説明した。

2.5 実施方法

2020 年 7 月 22 日 12:00 より 1 週間の期間を設けて Google Classroom 経由で動画講義を「デザイン入門」の受講者に公開した。受講者は機械的に 2 グループに分けられており、2 種類 (HLD・LSD) のいずれかを授業時間外に視聴し、理解した内容を 100 字以上でまとめて報告させる課題を行った。その後、Google フォームで作成した印象を収集するアンケートに受講者は 2 種類の動画講義があることを知らされず、必ず単独で視聴するよう指示した。なお、アンケートは匿名で行い、個人特定しない旨と本調査および学会発表等で利用する目的に同意した者のみ回答している。

3. 結果

2 回の動画講義を 2 つのグループに分け実施し、59 名が受講した(HLD:30 名, LSD:29 名)。

3.1 アンケート調査の結果

図 3～10 は、講義視聴後に実施したアンケート調査の結果であり、アンケート調査に同意しなかった学生 1 名のデータを除いて集計している(HLD:29 名, LSD:29 名)。クルスカル・ウォリス検定を行った結果、Q1～8 の回答には HLD 群と LSD 群で差がないことが示された。

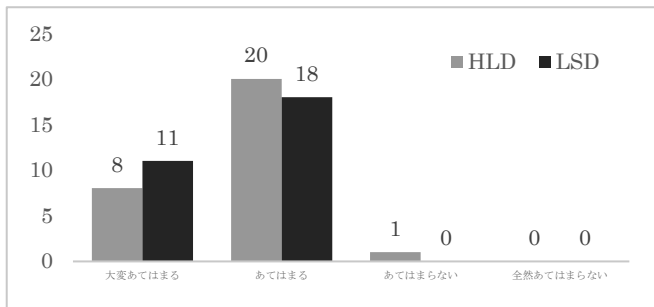


図 3. Q1. この講義の内容を理解できた。

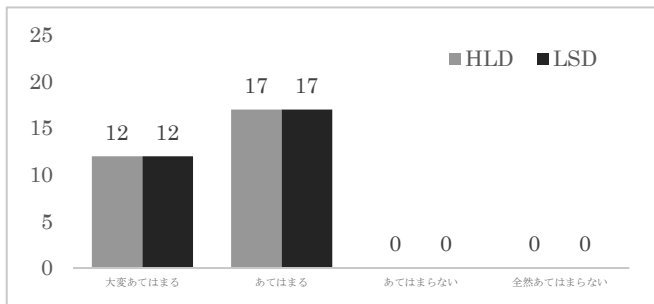


図 4. Q2. 学習理由が理解できた。

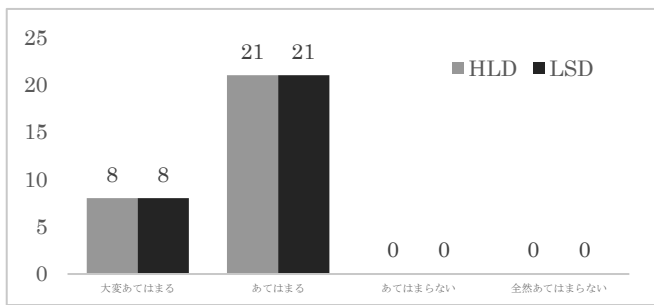


図 5. Q3. 本講義で学んだことを実践しようと思った。

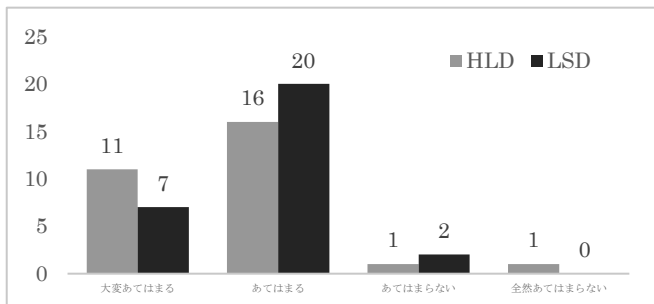


図 6. Q4. 講義時間は適切だった。

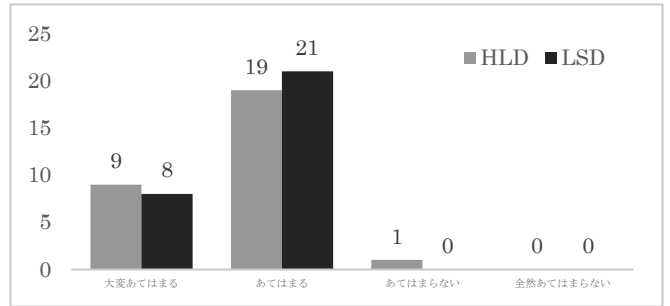


図 7. Q5. 本講義を受けた場所はどこですか。

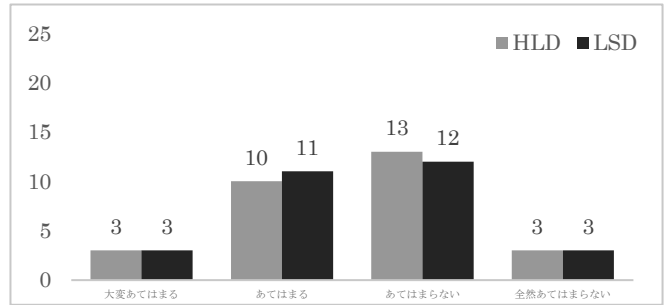


図 8. Q6. この講義は教室で行うべきだった。

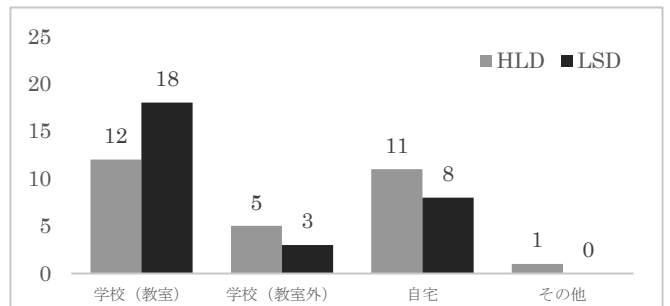


図 9. Q7. 本講義を受けた場所はどこですか。

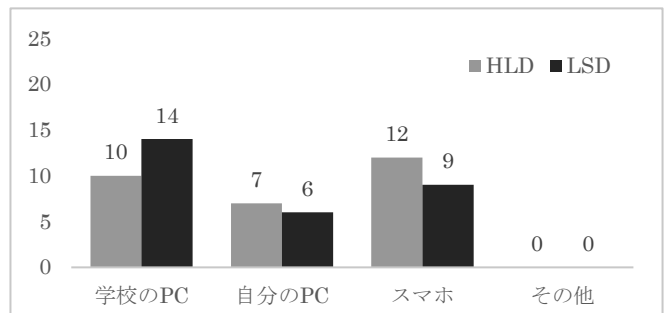


図 10. Q8. 本講義の再生環境は何を使いましたか。

最後の質問として、暗黙で振り分けられた方と異なるもう一つの動画講義を視聴した後、どちらの動画講義を好むかを尋ねた(図 11)。その結果、HLD 群では、LSD 版よりも HLD 版の方が好ましいことがわかった($M = 3.52$, $SD = 1.00$, $N = 29$)。対照的に、LSD 群の参加者の反応はばらつきがあった($M = 3$, $SD = 1.46$, $N = 29$)。クルスカル・ウォリス検定の結果、動画講義の好ましい種類の程度には群間で差がなかった(χ^2

=1.86, $df=1$, $N=58$, $p=0.17$). 質問が好ましい形式の程度を予測できるかどうかを調べるために、段階的重回帰分析を行った。最終的な予測モデルには Q1 と Q4 が含まれていた。しかし、このモデルは統計的に有意ではなかった ($F(2, 55) = 1.97$, $p = 0.15$)。

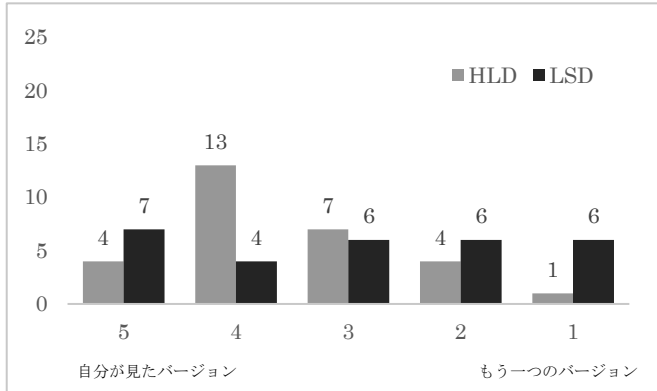


図 11. Q9. どちらの動画講義が受講する時には良いと感じたか

3.2 自由記述の課題レポートの結果

講義の理解度合いを評価するために、動画講義を視聴後に 100 字以上の日本語で講義内容を要約してもらった。表 3 に HLD 群と LSD 群の学生の投稿文字数の比較を示す。

表 3. 課題「この動画講義から何を理解したか」文字数の集計

種類	<i>M</i>	<i>SD</i>	<i>Min</i>	<i>Max</i>
HLD	168.72	66.27	0	30
LSD	161.42	87.4	0	41

共起ネットワークグラフ[16]により、HLD 群と LSD 群の記述報告に差がある可能性が確認された[16]。図 12 に HLD 群のまとめを示し、Jaccard 係数は抽出された文字間の関連度の平均値が 0.33 であり、グラフ上では中程度の関連度であることを示している。図 13 は LSD グループの要約であり、Jaccard 係数は 0.43 であり、表示されたグラフは HLD グループよりも多くの関連性を持っていた。図 12 には 7 つの色分けされたグループがあり、図 13 には 10 つの色分けされたグループがある。このことから、LSD は HLD 群よりも共起語のグループが多く、動画講義の種類に関する記述的な報告に差がある可能性があることが確認された。

3.3 動画講義の実践の結果

講義で説明した活動を実践した学生の数を実践の度合いとして比較した。この際、匿名で実施したアンケート調査に同意せず回答しなかった学生を特定することができなかったため、この数に含めた(表 4)。なお、説明した活動は課題達成の必須条件ではなかった。

表 4. 授業内容に関する演習課題での実践状況

種類	実践していた	実践していない
HLD	5	26
LSD	4	26

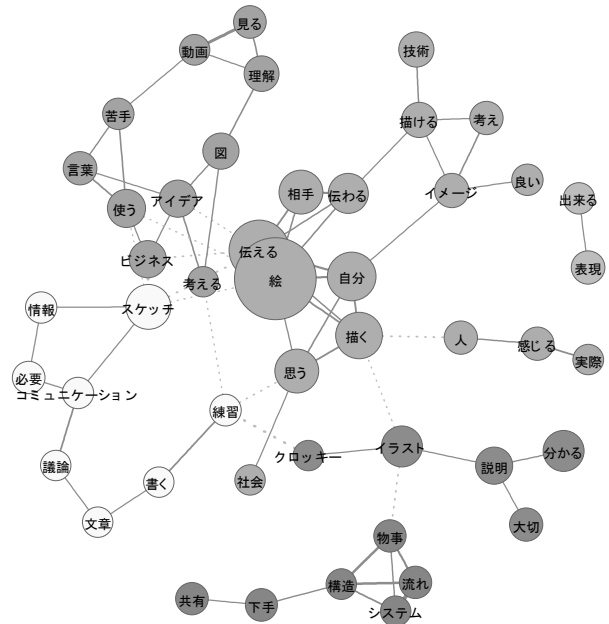


図 12. HLD 群の共起ネットワークグラフ

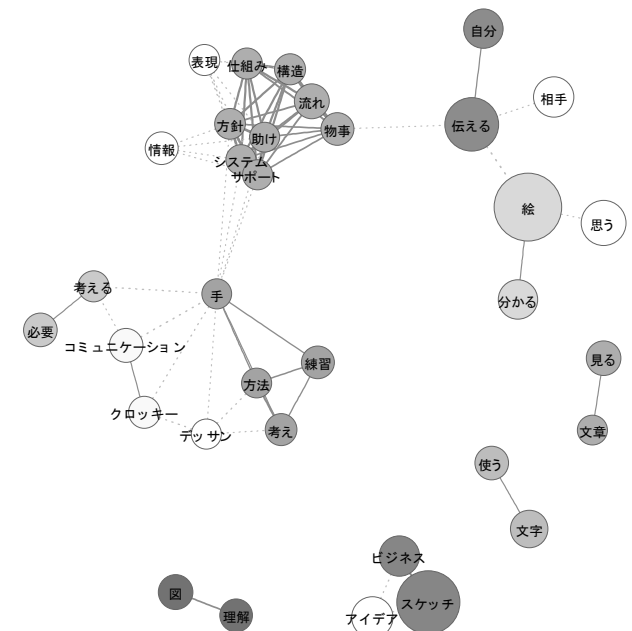


図 13. LSD 群の共起ネットワークグラフ

4. 考察

4.1 アンケート調査について

印象調査によると、動画講義に対する学生の主観

的な理解度や好みに有意な差はなかった。学習環境としては、「学校」が最も多く選ばれ、次いで「自宅」となった。その他の回答の中には、学習環境として「電車」があった。また、両グループとも3分の1以上がスマートフォンで受講しており、小画面での視聴に向けた画面構成の検討が必要であることが確認された。

講義の提示方法については、HLD 群では半数以上の参加者が最初に見た動画を好んだ。一方、LSD 群では好みが分散していた。この結果は、動画講義の提示方法や視聴順序の影響も考えられるが、視聴方法として PC やスマートフォンを利用したかどうかなど、他の要因も考慮する必要がある。

4.2 自由記述の課題レポートについて

参加者のレポートから作成した共起ネットワークグラフには、グループ間での差が見られた。また、レポートの平均文字数には差がなく、レポート作成のための概念構成に違いがある可能性が示唆された。つまり、動画講義の内容理解に差がある可能性があり、このような評価可能なデータを講義と演習課題の間に収集できたことから、学習途中の状況を知ることができた。形成的評価に利用するためには理解度合いという個人差および状況による差が影響するスキーマをいかに短時間で抽出し判断するかが課題であると考えられる。そのためにはこれらの違いを学習効果として見える化し、講義調整の判断に使えるようにするためには、さらなる分析と調査が必要である。

両群ともに、動画講義の内容で推奨した手書きによるスケッチを演習課題の中で実践している参加者は少数であったが、HLD 群と LSD 群の違いによる学習効果の違いは見られなかった。したがって動画講義の表現方法が実践度合いのような学習効果に影響していない可能性があると考えられるが、これは本実践での結果であるため、特に実験や実体験を伴う演習において効果が異なるかどうかは引き続き要因操作をして調査をする必要がある。

4.3 動画講義の実践について

最後に本研究の結果は、特定の参加者や学習文脈によるものかもしれない。たとえば HLD と LSD のような表現の種類によって学習者の理解度が変化するかどうかについては、さらなる調査が必要である[13]。普遍的な効果があれば、動画講義の制作にも役立つと考えられる。そして形成的評価を行うためのデータを効率的に収集し、活用できるように分析手法を自動化できるよう引き続き検討する必要がある。これが確立できればオンライン学習環境の品質向上と実践や演習を伴う場面で効果が認められた場合、更なる活用場面の幅が広がると考えられる。

5. まとめ

本研究ノートでは、15回行われるうちの1回での実践の報告である。半期の講義全体の成果の一部としての評価であり、形勢的評価につなげるためには継続的な検討が必要と考えている。この実践をほかの講義でも展開・継続し、より良い授業デザインの知見となるよう分析を進めていく予定である。

参考文献

- [1] 日本イーラーニングコンソシアム, “e ラーニング白書 2008/2009 年版,” 東京電機大学出版局, 2008.
- [2] 日本イーラーニングコンソシアム, “2018 年度調査委員会報告書”, (2020 年 9 月 9 日参照, https://www.elc.or.jp/files/user/doc/eLearningReport_2018.pdf)
- [3] Massive Open Online Course, “MOOC List,” (2020 年 9 月 9 日参照, <http://www.mooc-list.com>)
- [4] Udemy Inc, “Udemy,” (2020 年 9 月 9 日参照, <https://www.udemy.com/ja/>)
- [5] Bloom, B.S., “Learning for mastery,” Regional Education Laboratory for the Carolinas and Virginia, 1960.
- [6] 生田孝至, 吉崎静夫, “授業研究の動向,” 日本教育工学雑誌, vol.20, no.4, pp.191-198, 1997.
- [7] 三宅なほみ, “学習科学: 協調的な実践科学と理論構築との互惠関係をめざして (<特集>「学習支援の新たな潮流-学習科学と工学の相互作用-」)”, 人工知能学会誌, vol.21, no.1, pp.77-84, 2006.
- [8] 佐伯胖, 三宅なほみ, 上野直樹, 宮崎清孝, 駒林邦男, 田中統治, 長坂敏彦, “学校知を問い直す,” 教育学研究, no.59, vol.1, pp.40-54. 1992.
- [9] 鈴木克明, “CAI 教材の設計開発における形成的評価の技法について”, 視聴覚教育研究, vol.17, pp.1-15, 1987.
- [10] 中原淳, 村山功, 三宅なほみ, “学びの科学の現在,” 日本教育心理学会総会発表論文集第 43 回総会発表論文集, pp.S32-S33, 2001.
- [11] 大島律子, 大島純, 石山拓, 堀野良介, “CSCL システムを導入した協調学習環境の形成的評価: メンタリングを通じた学習環境の解釈と支援 (<特集> 実践段階の e ラーニング),” 日本教育工学学会論文誌, vol.29, no.3, pp.261-270, 2006.
- [12] Hansch, A., Hillers, L., McConachie, K., Newman, C., Schildhauer, T. and Schmidt, J. P., “Video and online learning: Critical reflections and findings from the field,” 2015.
- [13] Chen, C. M. and Wu, C. H., “Effects of different video lecture types on sustained attention, emotion, cognitive load, and learning performance,” Computers & Education, vol.80, pp.108-121, 2015.

- [14] Copley, J., "Audio and video podcasts of lectures for campus - based students: production and evaluation of student use," *Innovations in education and teaching international*, vol.44, no.4, pp.387-399, 2007.
- [15] Ou, C., Joyner, D.A. and Goel, A.K., "Designing and Developing Video Lessons for Online Learning: A Seven-Principle Model," *Online Learning*, vol.23, no.2, pp.82-104, 2019.
- [16] Higuchi, K., "A Two-Step Approach to Quantitative Content Analysis: KH Coder Tutorial Using Anne of Green Gables (Part II)," *Ritsumeikan Social Science Review*, vol.53, no.1, pp.137-147, 2007.

研究ノート

Unary Prefix と CBT 符号の Suffix をもち、 Prefix の各 Step を調整できる可変長符号の検討

吉田 茂* 箕浦 征矢*

(2020年9月30日受理)

Comprehensive Performance of Variable-Length Code with Unary Prefix, Complete Binary Tree Code Suffix, and Adjustable Prefix Steps

Shigeru YOSHIDA* Seiya MINOURA*

(Received September 30, 2020)

Abstract

The unary prefix code is used for coding and compression of various memoryless information sources owing to its simple structure and easy design. Although the optimality of this code is not similar to that of the Huffman code, near-optimal coding efficiency (entropy/average code length) can be obtained when encoding a source with a large alphabet, in which “alphabet” indicates the number of characters. The unary prefix codes have been studied since a long time, and codes adapted to typical statistical distributions have been created. Herein, the compression performance of a variable-length code was examined, intervals varied among the steps of the unary prefix code so that it can be adjusted to an arbitrary frequency distribution. The case of using the binary representation of the suffix was compared with that of the complete binary tree (CBT) code. Consequently, when the memoryless information source had approximately 1000 alphabets, the coding efficiency for the binary representation of the suffix and CBT code were 0.97 and 0.98 respectively. These findings confirm that the coding efficiency of the prefix code was slightly improved.

キーワード: データ圧縮, テキスト圧縮, ゴロム符号

Keywords : Data compression, Text compression, Golomb code,

1. はじめに

無記憶情報源の符号化に用いられる Unary Prefix 符号(以降, UP 符号と呼ぶ)[1]は, 構成が規則的で, 設計が容易なため, Huffman 符号のように最適ではないが, 大規模なアルファベットを持つデータの符号化には都合が良い. 大きいアルファベットでは, 頻度分布がある程度なだらかならば, 準最適であっても, 最適に近い値が得られることが知られている. Unary Prefix 符号は, 昔から研究されており, Prefix の各 Step を既定の値に取ることで, 代表的な統計的頻度分布に合わせられる符号が作られている[2]. 本稿では, 任意の頻度分布に合わせられるように, Unary Prefix 符号の Prefix の各 Step を異なる間隔に取る可変長符号について検討する. この UP 符号について, Suffix を2進数表現する場合と, CBT (Complete

Binary Tree)符号[3]で表現する場合を比較・評価を行う.

以下では, 第2章で CBT 符号や Unary Prefix 符号の従来技術について説明し, 第3章で本検討の技術と実装, 第4章で評価を述べて, 第5章で考察, 第6章でまとめとする.

2. 従来技術について

2.1 CBT (Complete Binary Tree)符号について

CBT (Complete Binary Tree) 符号は固定長の符号を改良したものである. 0 から $2^k - 1$ 以下の数値は k ビットの固定長で表すことができる. ところで, 数値 n ($0 \leq n < m$) の上限値 m が $2^k - 1$ よりも小さい場合, m 以上 $2^k - 1$ 以下の符号語は使われない. この部分

* 愛知工科大学工学部情報メディア学科, 〒443-0047 愛知県蒲郡市西迫町馬乗 50-2

Department of Media Informatics, Aichi University of Technology, 50-2 Manori, Nishihama-cho, Gamagori-shi, Aichi 443-0047, Japan

を有効に利用する. すなわち $0 \leq n < 2^k - m$ の数値 n を $k-1$ ビットで表し, $2^k - m \leq n < m$ の数値 n を k ビットで表すようにしたものである. 表1に例を示す.

表 1 CBT 符号の例 ($k=4$ のとき)

n	m = 10	m = 11	m = 12
	$2^4 - 10 = 6$	$2^4 - 11 = 5$	$2^4 - 12 = 4$
0	000	000	000
1	001	001	001
2	010	010	010
3	011	011	011
4	100	100	1000
5	101	1010	1001
6	1100	1011	1010
7	1101	1100	1011
8	1110	1101	1100
9	1111	1110	1101
10		1111	1110
11			1111

2.2 Unary 符号と Unary Prefix 符号について

Unary 符号は, 表2ように (Step 数 -1)個の1を続けた後, 0を続けたものである. 符号長は 1 ビットずつ伸びて行く. Unary 符号は, Prefix として用いる場合, Suffix の取り方で, 種々の符号が作られる. よく使われる代表的な幾何学分布に対しては, ガンマ符号, SSS (Start-Step-Stop)符号, ゴロム符号[4]などが作られている. これを表3に示す. 表3では, 見易いようにPrefix とSuffix の間にスペースを挟んだ. 表3のガンマ符号はPrefix の各 Step ごとに Suffix を1ビットずつ伸ばしている. SSS 符号は, (1,2,5)符号と呼ばれるもので, Suffix の Start が1ビット, Step が2ビットずつ伸ばし, Stop が5ビットで終わるようにしている. ゴロム符号は, Suffix に CBT 符号を取り, ここでは最大値 m を5に取っている. Prefix の Step 間隔を数式で求め, 不等間隔にする方法も発表されている[2]. これらの符号は, 符号化すべき最大値が非常に大きい場合も想定している. 少数のパラメータが分かれば, 符号表自体が不要になる.

表 2 Unary 符号の構成

Step 数	Unary 符号
1	0
2	10
3	110
4	1110
5	11110
...

表 3 ガンマ符号, SSS 符号, ゴロム符号

x	ガンマ符号	SSS 符号 (1,2,5)符号	ゴロム符号 m = 5
1	0	0 0	0 00
2	10 0	0 1	0 01
3	10 1	10 000	0 10
4	110 00	10 001	0 110
5	110 01	10 010	0 111
6	110 10	10 011	110 00
7	110 11	10 100	110 01
8	1110 000	10 101	110 10
9	1110 001	10 110	110 110
10	1110 010	10 111	110 111
11	1110 011	11 00000	1110 00
12	1110 100	11 00001	1110 01
13	1110 101	11 00010	1110 10
14	1110 110	11 00011	1110 110
15	1110 111	11 00100	1110 111
16	11110 0000	11 00101	11110 00
...

2.3 Prefix の各 Step 間隔を調整する Unary Prefix 符号

ここで本稿が対象とする Prefix の各 Step 間隔を可変する Unary Prefix 符号を取り上げる. 以降では, この Unary Prefix 符号を単に「UP 符号」と略す. この UP 符号は, 任意の頻度分布に対して, 符号を合わせることができる. 符号化すべき最大値が分かっている場合に適用される. 符号表として, Prefix の①Step 数と, ②各 Step のビット数があれば良い. 従来技術としては, 文献[5]に Prefix の Step 間隔を調整する UP 符号の実装法がC言語のリストとともに掲載されている. また, 文献[6]は白黒2値画像符号化の Run Length 符号化に UP 符号を用いるものだが, UP 符号の Suffix の2進数のビット数を図式で求める方法を記述している. 表4に UP 符号の例を示す.

表 4 Prefix の Step 間隔を調整できる UP 符号の例

Prefix Step 数	符号 (符号長)	Suffix 長	区間
1	0 xx (3)	2	0~3
2	10 xxx (5)	3	4~11
3	110 xxx (6)	3	12~19
4	1110 xxxxx (8)	4	20~35
5	11110 xxxxxx (10)	5	36~67
..

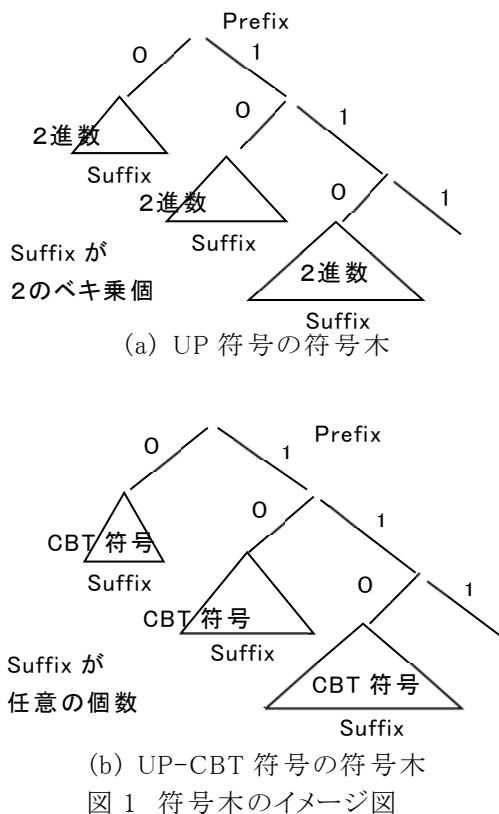
(注)符号の欄の x は 0 または 1 を表す

3. 本検討の技術について

従来の UP 符号に対して、Suffix を CBT 符号に取ったものを考える。これを以降、「UP-CBT 符号」と呼ぶことにする。これはゴロム符号において、Prefix の各 Step 間隔を同様に CBT 符号で取ることを意味する。UP 符号と UP-CBT 符号の違いは、Suffix のメンバの個数の取り方にある。符号木のイメージ図を図 1 に示す。

UP 符号が Suffix を 2 進数表現で撮るのに対して、UP-CBT 符号は Suffix を完全 2 進木の形で取る。すなわち、UP 符号は、Suffix の個数を 2 のべき乗個に選ぶため、最適値からのずれを許容している。これに対して、UP-CBT 符号は、任意の整数個に取れ、最適値に合わせるができる。

符号表として、UP 符号が、Prefix の各 Step が 2 進数のビット数に対して、UP-CBT 符号では、各 Step が Suffix の個数に代わるだけである。従って、符号化のコストとしては、UP 符号が 2 進数の 4 ビットで 16 ビットまで表すとすれば、UP-CBT 符号は個数なので、16 bit に代えることになる。あとは、UP 符号の Suffix の 2 進数表現を、CBT 符号による表現に代れば良い。



3.1 本技術の実装

UP 符号と UP-CBT 符号を C 言語で実装した。圧縮性能の評価には、符号表を求めて、各符号の符号長で評価するシミュレーションを行えば良い。しかし、ここでは圧縮・復元が支障なく動作しているかも確かめるため、実符号を生成して圧縮・復元後、元の文字列データの一致チェックも行うようにした。

(1) 圧縮・復元システムの構成

圧縮・復元の符号化・復号化には次の構成が必要になる。

[圧縮]

- ① 入力文字列データを高い頻度から頻度順に並べ、入力文字列データに頻度順の番号を割り付ける。これから頻度順のデータと頻度順表が作られる。ここでは情報理論を踏襲し、データ 1 個当たり (1 ワード) を「文字」と称する。入力は文字データに限るものではない。入力文字列データを 2 バイトで取るようにした。これにより、アルファベットは最大 65536 個まで扱うことができる。
- ② 頻度順の頻度から符号表を作成する。
- ③ 「頻度順データ」を符号表に従って、「可変長符号圧縮データ」を生成する。

[復元]

- ④ 符号表に従って、「可変長符号圧縮データ」を、「頻度順データ」に復号する。
- ⑤ 頻度順表に従って、頻度順データを、元の文字列データに復元する。

実際のプログラムでは、①②を前処理、③を符号化処理とし、④を復号化処理、⑤を後処理として、モジュールに分割した。シミュレーションは、それらモジュールを繋いで、バッチ処理として行った。

本検討の UP-CBT 符号を求めるプログラムの C 言語の実装は付録図 1 に示すようになった。C 言語のプログラムの変数名、配列名は、文献[5]の UP 符号のプログラムに合わせた。図中最末尾「Step ul」に出ている数値は、2 行目の「static int item_occ[] = {...}」の頻度に対する各 Suffix の個数を示している。プログラムの構成は、UP-CBT 符号の方が、UP 符号よりシンプルになった。

4. 性能の評価

評価用サンプルとして、①英日中の多言語データと②正規分布のデータの2種類を用いた。これは特定のデータと、そうでないデータとでの傾向を調べたかったからである。

4.1 特定の評価サンプルでの性能

(1) 評価用サンプル

大きいアルファベットをもつデータとして、UTF-16の2バイトの多言語データを用いることにした。比較のため、英語、日本語、中国語の3言語を用いた。多言語のものとして、Webのグリム童話[7]から、①ヘンゼルとグレーテル、②ブレーメンの音楽隊、③シンデレラ、④白雪姫、の4話を繋いだテキストファイルを作った。

<p>Hansel and Gretel</p> <p>Near a great forest there lived a poor woodcutter and his two children; the boy was called Hansel and the girl's name was Gretel. They had very little to bite of once, when there was great dearth in the land, the man could not get the daily bread. As he lay at night thinking and tossing, he said to his wife, "What shall we do of us? we can't get any more children; they will starve."</p>	<p>ヘンゼルとグレーテル</p> <p>大きな森のすぐ近くに、木こりが、おかみさんと子供たちと一緒に住んでいました。男の子はヘンゼルで女の子はグレーテルという名前でした。木こりにはほとんど食べるものがなく、その土地に大飢饉が見舞ったとき、もう毎日食べるパンさえ得られませんでした。</p> <p>汉赛尔与格莱特</p> <p>在大森林的边上，住着一个贫穷的樵夫，他妻子和两个孩子与他相依为命。他的儿子名叫汉赛尔，女儿名叫格莱特。他们家里原本就缺吃少喝，而这一年正好遇上国内物价飞涨，樵夫一家更是吃了上顿没下顿，连每天的面包也无法保证。这天夜里，愁得辗转难眠的樵夫躺在床上大伤脑筋，他又是叹气，又是呻吟。终于他对妻子说：“咱们怎么办哪！自己都没有一点吃的，又拿什么去养咱们那可怜的孩子啊？”</p>
---	---

図2 英日中のサンプルの最初の数行

図2に、英日中のデータのサンプルのイメージを示す。また、英日中の評価用データの緒元を表5に示す。表5より、英語の出現文字数61個に対して、日本語は838個、中国語は1,284個と出現文字数が大きく、大きいアルファベットに相当する。

(2) UP符号表とUP-CBT符号表

日本語の文書についてUP符号とUP-CBT符号符号表を、図3に示す。図中、Prefixは”0”, ”1”で示しており、Suffixは”x”で0または1を示す。プログラムを用いて求めた符号表は中段のようにUP符号15step、UP-CBT符号は17stepになった。実際に使用した符号表は右段のように、9stepにまとめた。このようにしても、まとめた個数が出現する確率は $(1/2)^9 = 1/256$ なので、大勢には影響しない。UP-CBT符号のSuffixは”x”で示すビット数、または1つ少ないビット数を取る。

(3) 符号化効率

英日中の評価用データを、UP符号とUP-CBT符号により圧縮した結果を表6に示す。ここで、エントロピーは、文字*i*の出現確率 P_i より、公式通り次式で求めた。

$$E = \sum_i P_i \log_2 P_i$$

エントロピーは理想的な平均符号長に相当する。エントロピーに対して、UP符号では符号化効率(エントロピー/平均符号長)0.96~0.98が得られ、UP-CBT符号では符号化効率0.98~0.99が得られていた。ここで求めた圧縮率は、頻度順データに対するものである。全体の圧縮率は、これに符号表と頻度順表(出現文字数)を入れたものになる。

表5 評価用データの緒元

言語	グリム童話		エントロピー	
	文字数	出現文字	符号長	理想圧縮
英語	51571	61	4.316	0.2697
日本語	22628	838	7.059	0.4412
中国語	18747	1284	8.228	0.5142

表6 グリム童話の評価結果

言語	UP符号				UP-CBT符号			
	圧縮サイズ	平均符号長	圧縮率	符号化効率	圧縮サイズ	平均符号長	圧縮率	符号化効率
英語	28727	4.456	0.2785	0.9686	28317	4.393	0.2745	0.9825
日本語	20210	7.145	0.4466	0.9880	20080	7.099	0.4437	0.9944
中国語	19784	8.443	0.5277	0.9745	19553	8.344	0.5215	0.9861

	UP 符号	実験した UP 符号
Step1	0xxxx	0xxxx
Step2	10xxxxx	10xxxxx
Step3	110xxxxxxx	110xxxxxxx
Step4	1110xxxxxxxx	1110xxxxxxxx
Step5	11110xxxxxxxxx	11110xxxxxxxxx
Step6	111110xxxxxxxxxx	111110xxxxxxxxxx
Step7	1111110xxxxxxxxxxx	1111110xxxxxxxxxxx
Step8	11111110xxxxxxxxxxx	11111110xxxxxxxxxxx
Step9	111111110xxxxxxxx	11111111xxxxxxxx
Step10	1111111110xxxxx	
Step11	11111111110xxxx	
Step12	111111111110xxx	
Step14	1111111111110xxx	
Step15	1111111111111xx	

(a) UP 符号表

	個数	UP-CBT 符号	実験した UP-CBT 符号
Step1	23	0xxxxx	0xxxxx
Step2	55	10xxxxxx	10xxxxxx
Step3	163	110xxxxxxxx	110xxxxxxxx
Step4	254	1110xxxxxxxxx	1110xxxxxxxxx
Step5	290	11110xxxxxxxxxx	11110xxxxxxxxxx
Step6	254	111110xxxxxxxxxx	111110xxxxxxxxxx
Step7	236	1111110xxxxxxxxxx	1111110xxxxxxxxxx
Step8	140	11111110xxxxxxxxxx	11111110xxxxxxxxxx
Step9	70	111111110xxxxxxxx	11111111xxxxxxxx
Step10	35	1111111110xxxxx	
Step11	18	11111111110xxxx	
Step12	9	111111111110xxx	
Step13	4	1111111111110xx	
Step14	2	11111111111110x	
Step15	1	111111111111110	
Step16	1	1111111111111110	
Step17	1	1111111111111111	

(b) UP-CBT 符号表

Suffix の bit 数は、x 個数か、(x 個数-1) 個を取る。

図3 符号表

(4) UP 符号と UP-CBT 符号の Step 間隔の関係

図4のグラフは、英日中の各言語の累計の Suffix が表す個数を示すグラフである。(a)英語は Step 間隔が均等の幾何分布になっている。英文はゴロム符号で、うまく符号化できることが分かる。また、(b)日本語は、最初の方だけ Step の個数が少なく、以降は均等になっている。(c)中国語だけ、累計個数の折れ線が、UP 符号と UP-CBT 符号とで乖離している。

UP-CBT 符号において文字の出現確率は2のべき乗分の一のときに UP 符号になり、UP-CBT 符号の特殊な場合が UP 符号となる。このため、UP-CBT 符号の方を最適に近いと考える。そうすると、中国語は、Step の個数が大きくなって、UP 符号を求めるプログラムがうまく働かなかったものとする。

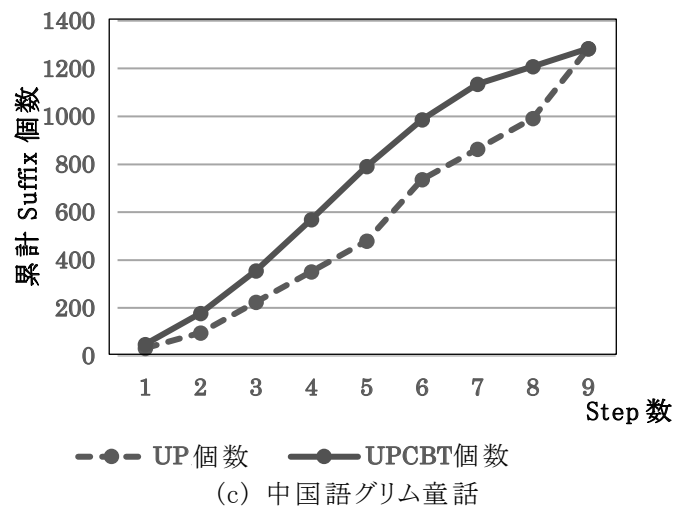
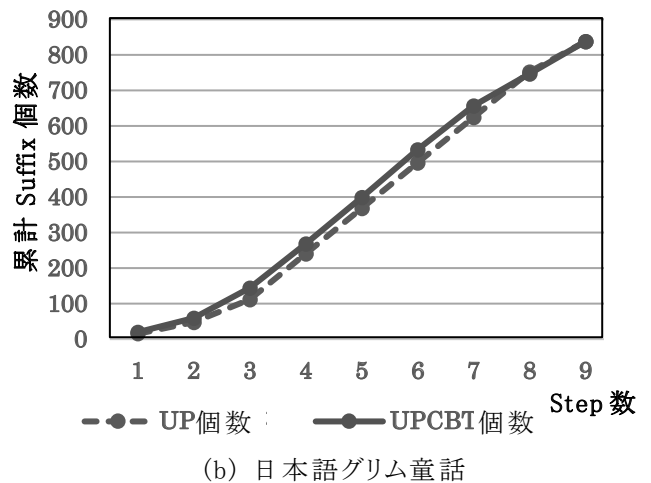
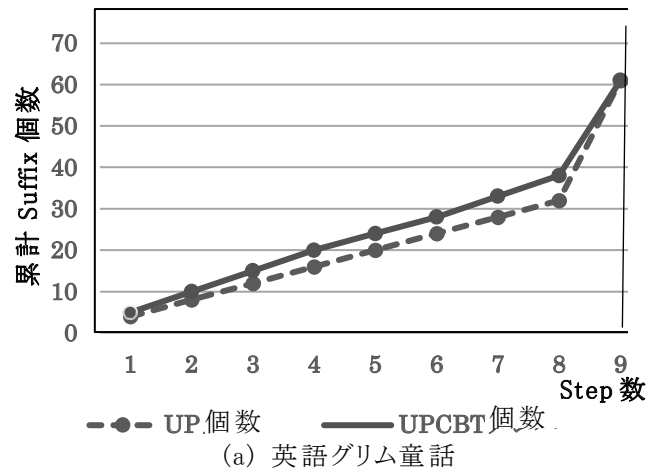


図4 各言語の累計の Suffix の表す範囲

4.2 正規分布の評価サンプルでの性能

一般の分布での傾向にみるために、正規分布のデータを用いて評価を行った。正規分布は、ボックスミュラー法により、乱数と分布を作成した[8]。この乱数は rand()関数を直接使わないため、 2^{32} 通りの分解能が取れる。0 から 1 までの分布で、平均値 0.5 とし、標準偏差をパラメータに取った。これにデータを2バイトとみて、16 ビットの最大値 65,535 を掛けて整数化し、サンプル 128K 個を作成した。このサンプルを、UP 符号の2進数表現と、CBT 符号表現に入力して、圧縮性能を確かめた。

図5より、エントロピーは標準偏差を、変えることにより単調に増加している。UP 符号、UP-CBT 符号の平均符号長も同じ傾向で単調に増加する。

図6より、正規分布では符号化効率は 0.98~0.99 が得られた。Suffix に2進数を用いた場合は局部的に符号化効率が悪化するのに対して、CBT 符号を用いた場合は符号化効率が順調に伸びているのが分かる。

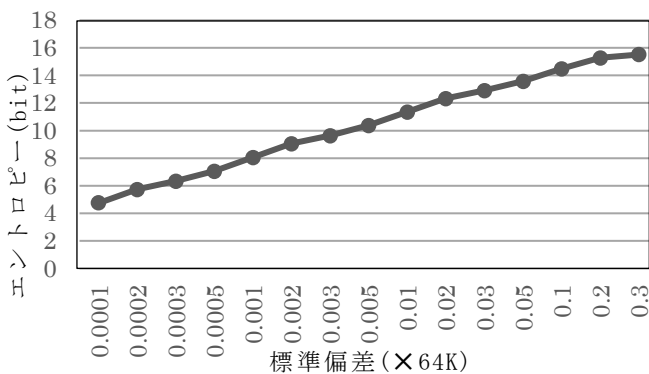


図5 正規分布のエントロピーの推移

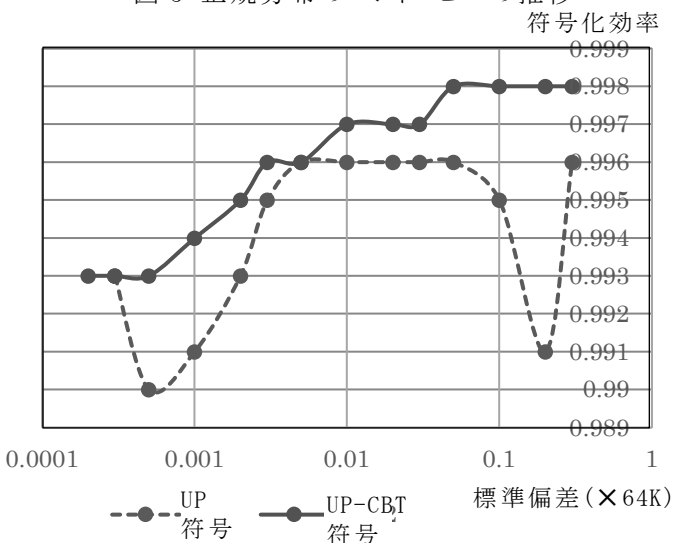


図6 UP 符号とUP-CBT 符号の符号化効率

5. 考察

・UP 符号、UP-CBT 符号のシミュレーションにおいて、前処理と可変長符号化、可変長復号化と後処理のモジュールに分けて、プログラムを作成した。これは一度、入力データを頻度順に直してから符号化しなければならないからである。このモジュール分割は、デバッグする上で非常にうまく機能した。データはファイル渡しとし、ファイル単位で、適正な入力データと出力データの組が得られているかを確かめることができた。

・UP 符号とUP-CBT 符号とで、Prefix の Step 数を可変にしており、符号化効率に、はっきり差が出るを予想していた。しかし、結果は、図4に示すように、符号化効率の差は、少数点3桁目に影響を与える程度であり、小さい差に留まった。

この理由は次のように考える。bit 数の最適値からのずれは、Stepが小さいとき程、影響が大きい、初期の出現個数が割合少ないことが挙げられる。例えば、日本語で見ると、Step1 はUP 符号4bit、UP-CBT 符号3~4bit で表せる個数である。Step1 が平均符号長では1/2のウェイトを占める。次にStep2では、同様に、UP 符号5bit、UP-CBT 符号4~5bit で表せる個数である。Step2 が平均符号長では1/4のウェイトを占める。全体の出現文字数838個に対してStep1、Step2を合わせても、UP 符号で48個、5%程しか出ていない。それで、通常のサンプルでは、最適値からのずれは元々、大きな値をもたないので、UP 符号とUP-CBT 符号の差が小さくなったと考える。これは、圧縮率は悪化する場合で、初期の Step で、数十%の個数が出現すれば、差は広がるものと予想する。

・UP-CBT 符号の方がUP 符号より、常に優っており、UP-CBT 符号の符号表のコストも小さいことから、高圧縮化するためには取るべき手だと考える。

6. まとめ

UP 符号について、Suffix の要素数を可変に調整できる符号について検討した。UP 符号において、Suffix を2進数表現する場合と、CBT 符号でバイナリ表現する場合を比較した。この結果、次のようなことが分かった。

・UP-CBT 符号は、比較的簡単なプログラムで求めることができる。符号表の容量は各 Prefix の Step の要素数なので、UP 符号の Step のビット数より多少多くなるが、大勢に影響は与えない。

・UP-CBT 符号の方が、UP 符号より、常に良い圧縮率が得られる。しかし、圧縮率の差はわずかで、小数

点以下の3桁目が変わるくらいであり、改善率は1%程度である。UP-CBT符号の方が、UP符号より符号化効率が常に良いので、圧縮率を重視する場合は選択肢になると考える。

- UP符号, UP-CBT符号とも、アルファベットが1000個程度では高い符号化効率0.96~0.98が得られる。CBT符号の符号化効率は、Suffixが2進数表現の場合に比べて、ばらつきがなく、安定に0.98前後が得られる。

今回は、評価用サンプルとして、英日中の多言語データと正規分布のデータだけしか試せなかった。今後、Suffixの要素数を固定にしたUP符号は、べき乗分布(Power law distribution)のデータに良く使われている[2]。べき乗分布のデータでも、Suffix要素数固定とSuffix要素数可変の違いを評価してみたい。

参考文献

[1] 情報理論とその応用シリーズ 1-1 情報源符号化・無歪みデータ圧縮, 山本格, 培風館, 東京, 1998.
 [2] Michael B. Baer, "Prefix Codes for Power Laws," 2008 IEEE International Symposium on Information Theory, 2008.
 [3] 植松友彦, 文書データ圧縮アルゴリズム入門, 神戸一夫, CQ出版社, 東京, 1994.
 [4] Wikipedia ゴロム符号化(参照日:2020年7月21日, <https://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%82%B4%E3%83%AD%E3%83%A0%E7%AC%A6%E5%8F%B7>).
 [5] Crosbie Fitch, "Life without Huffman," EXE.Magazine, Vol.6, Issue9, pp.39-42, March 1992.
 [6] L.R.Bahi and H.Kobayashi, "Image Data Compression by Predictive Coding II: Encoding Algorithm, IBM J," Develop. March 1974.
 [7] グリム童話 グリム兄弟のすべてのおとぎ話(参照日:2020年8月4日, https://www.grimmstories.com/ja/grimm_dowa/).
 [8] 小林健太, 疑似乱数の生成プログラム,(参照日:2020年6月22日, <http://kobayashi.hub.hit-u.ac.jp/topics/rand.html>).

```
#include <stdio.h>
static int item_occ[] = {11,6,5,5,4,4,3,3,3,3,2,2,2,2,1,1,1};
#define MAXCODEN 18
int getupcode2(int occ[], int n, int ul[]) {
/* occ[]: 大きい順にソートされた頻度 */
/* n : 要素の数 */
/* ul[] : suffix の各 Step の事象数 */
int u; /* 現在の unary prefix のインデックス */
int total; /* 全体の累積頻度 */
int i, j, stotal, oc; /* 作業用変数 */
/* 初期化 */
total = 0;
for(i = 0; i < n; i++)
    ul[i] = 0;
    total += occ[i];
}
u = 0;
stotal = total;
j = 0;
while(ul[u] < stotal) { /* ステップ u の走査 */
    oc = 0;
    i = j;
    while((oc * 2) <= stotal) {
        oc += occ[i];
        if(i == n) break;
        i++;
    }
    if(j == 0 && i == 1) {
        ul[0] = occ[0];
        j = 1;
    } else if(i == j + 1) {
        ul[u] = occ[j];
        j = i;
    } else {
        i--;
        oc -= occ[i];
        ul[u] = i - j;
        j = i;
    }
    stotal -= oc;
    u++;
    if(j >= n) break;
}
printf("Step ul: ");
for(i=0; i<u; i++) printf("%d ",ul[i]);
printf("¥n");
return(u);
}

//Step ul: 4 4 3 2 1 1 1 1 1
```

付録図1 UP-CBT 符号化の符号表を求めるプログラム

オンライン教育の捉え方と自律的な学習を支える要因

尾関 智恵*

(2020年10月1日受理)

Trends in content and activities being used in online learning environments

Tomoe Ozeki*

(Received October 1, 2020)

Abstract

This paper introduces the fundamentals of what you need to know as a designer of online learning. First, we will organize the terms that are being defined around educational research and introduce some learning contenting and online learning activities that have been effectively implemented. The latest trends as of September 2020 will be introduced at a symposium hosted by the National Institute of Informatics on September 11, 2020, and at the national conference of the Japan Society for Educational Technology on September 12-13, 2020. Finally, this paper summarizes the present situation and discusses future developments.

キーワード: オンライン学習, 学習コンテンツ, 遠隔授業, ハイブリッド, ハイフレックス

Keywords : Online learning, Learning contents, distance learning, hybrid, high-flex

1. はじめに

インターネットを介した遠隔授業は、プログラミング学習を多くの人に広めようとした Skinner のティーチングマシン[1]の実践によって始まった。この流れを受け、1950年頃に授業を学習コンテンツとしてまとめて提供する手法が提案されたことから、後の CAI・CBT・WBT を経て、従来と一線を画す授業方法として発展していったといわれる[2,3]。

この頃は、教室で行われる対面教育は権威のある教師による一方的な情報伝達を「教える」という概念とし、これをもとに学習コンテンツが構築され「人間はこう学ぶはずだ」という確証のない授業デザインが主流であった。1970年代に入りイギリスにオープン・ユニバーシティ[4]が開設されると、広く様々な階級が働きながら生涯にわたって学べる通信制大学として多様な学習者を受け入れるために配置された学習支援員によって、「教える」だけでなく「近い立場で学ぶ支援をする人が必要」といった考え方が広まっていった[4]。郵送等で対応していた教材は、インターネットが普及するとメールでのやりとりから始まり、オンラインで共有できるよう学習コンテンツが生み出されていった。1990年代に入るとインターネットの商用利用増加と情報化改革の波に乗り、教授者と学習者が双方向に情報をやり

取りし、互いの特性を活かして学びを引き起こす協働学習(協調学習)の提案が活発化していった[5]。

このように「オンライン教育」と現在呼ばれるインターネットなどの通信網を介した遠隔学習は、単なる通信手段の変化(郵便・電話・メール・ホームページ・VR教室)による変革のことだけを指さない。むしろ、従来は知識・情報を伝達する教授者と無知で愚鈍な学習者という対立構造から、既有知識が異なる同等な学習者同士であり教員はファシリテーターとして振舞うといった同等な構造としての変革を引き起こしたことを重要視するべきである[6,7,8,9,10]。現在直面している with コロナ 状況下において、リスク管理のためにオンライン化するというモチベーションではなく、既に欧米諸国で実践されているにもかかわらず、現在なお旧態依然とした我が国の学習観を変革するチャンスとして迎え入れる必要がある。

本稿では、そのために必要となる基礎知識として、教育研究の周辺で定義されつつある用語の整理を行い、効果的に実践されてきた学習コンテンツ化やオンライン学習の活動を紹介する。そして、2020年9月現在の最新の動向として9月11日に国立情報学研究所主催のシンポジウム[11]で紹介された国内主要大学のオンライン学習への取り組み状況と、9月12-13日に行われた日本教育工学会全国大会で紹介され

* 愛知工科大学工学部情報メディア学科, 〒443-0047 愛知県蒲郡市西迫町馬乗 50-2

Department of Media Informatics, Aichi University of Technology, 50-2 Manori, Nishihisama-cho, Gamagori-shi, Aichi 443-0047, Japan

た見解[12]や個々の事例を紹介する。そして最後に現時点のまとめと今後の展開について考察を述べる。

2. 「オンライン教育」の捉え方

日本教育工学会はコンピュータに限らないテクノロジーの特性を活かした学習手法の提案をしてきた。2020年4月の春大会では他の学会に先駆けてオンライン講演会を実施し、その実施の実態や手法について公開を行い[13]、コミュニケーション重視の秋大会もオンライン開催となった。この中で、インターネットを介した授業を指す言葉として現在主流となっている「オンライン教育」がなぜ教育現場で採用されているかの考察が行われた。その中で、重田[14]は、過去にあった衛星回線を介した「遠隔授業」やコンテンツ閲覧を主とした「e-Learning」やマルチメディアやビデオを使った「メディア教育」とは異なる概念として用いられ定着しつつあると分析している。つまりこれらの名称で呼ばれた教室以外で行われる教育がそもそも特殊な状況と捉えられてきたことに起因している可能性を言及した。これは対面に拘った教育方法の弊害であり、対面授業の代替と捉えている限りは新たな変化を起こせないだろう。

つまり、今「オンライン教育」と呼ばれるものは、多くの学習者・教授者が信じ続けてきた対面ゆえに制限され続けてきた学びの構造を見直し、テクノロジーを利用する利点に着目して新たな構造を構築し直す必要に迫られていると捉え、十分に考え迅速に実践するべきであろう。

3. オンライン／ハイブリット／ハイフレックス

国立情報研究所が今年度定期的実施している「4月からの大学等遠隔授業に関する取組状況共有サイバーシンポジウム」では、各大学の全学的な対応と取り組みについて事例ベースで紹介がなされている[11]。9月11日に実施されたシンポジウムでは「オンライン」の他に「ハイブリット」「ハイフレックス」のキーワードが多く使われていた。これらについても整理する。

まず、前期で「オンライン」のみを採用していた大学は後期より遠隔授業と対面実習を組み合わせた「ハイブリット」による授業運営を展開していくことを表明していた。これは、従来の情報提供型の授業はオンラインの非同期型教材、つまりオンデマンド配信による遠隔授業で代替し、実際の経験を積む必要がある実験実習などを集中的に対面で実施する構成である。前期では学内でタスクフォースなど組織的に対応策を検討するチームを作り、学内スタッフにFD研修会を行ってきている。特に山梨大学では「オンライン」による遠

隔授業の課題、学生のメンタルケア、後期に予定されている「ハイブリット」型教育で予想される課題を早々に整理し、対策してきている現場ベースの様子が紹介された[15]。

また学習機会の選択として着目されていたのが「ハイフレックス」型の授業である。これは、教室でも遠隔でも同じ品質で同じ内容を受講できることを目指す新たに提案されている授業形式である。この実施は高難易度な授業方法として認識されており、教職員教育のみならず機材設定や通信環境から根本的な見直しも必要となる。しかし、長期化する現在の状況においてこの試みは、その場しのぎでなく、次世代の高等教育の基盤として整備していくことを目指して実施されている。京都大学では、「ハイフレックス」型教育を実現可能にするために、教室設備の見直しから細かな点検を行っており、教職員教育についてスタートしている様子が紹介された[16]。

4. 自律的な学習を支える要因

熊本市では[16]、2018年より本格的な教育ICT化が取り込まれ、2019年の時点でタブレット端末が3名に1台の割合で配置されていた。またインフラ整備も行われ、今年度の新型コロナウイルス感染症拡大による休校措置時にオンライン教育へ移行できる基盤が備わっていた。市・教育委員会・学校がそれぞれの役割を果たしながら教職員によるオンライン授業への対応も概ねスムーズに行われたとのことだった。その結果、利用者へのアンケート調査から明らかになったのは、小学生は同級生や友達とオンラインでやりとりができたことが好評を得ていたことである。つまり、同期型双方向の授業を行うことで交流できた仲間とのやりとりが授業理解や自律的な学習を支えたということであった。これは、教室の中で自然に行われていた横のつながりを再現した「ハイフレックス」型に通じる成果であったと考えられる。これを裏付けるアンケート結果として、中学生はこのような同級生との交流についての満足をオンライン教育では得られていなかった。そしてその要因は、中学校の授業は教員から学生へ情報を一方向で提供する従来の講義型が主流であることと、同級生と意見交換をする様な双方向活動がそもそも少なかったことが挙げられている。同じ立ち位置で違う視点を持つ仲間との相互作用は、学習者を自律的に主体的にする効果があることが授業実践研究の成果からも報告されている[6,7,8]。これは以前から中学校教育で懸念されていた課題であり、オンライン教育を行うことによって顕在化したと考えられることが報告されている[16]。

これと同様の傾向は、高等教育機関においても報

告されている。北海道大学の新入生を対象とした調査では、授業の受講に対する疲労蓄積や自律的な学習の困難さを抱えていることが報告されている。主な要因として教員も含めた他者とのコミュニケーション不足やフィードバックの少なさに起因していた。これに対し、名古屋大学での調査では新入生以外はオンライン授業のメリットを感じていたと報告されている。こういった新入生と在学生のオンライン教育に対する解釈の違いは、所属する学校に共に学ぶ仲間や、こまめな応答をくれるはずの教職員との信頼構築を行う前に物理的に断絶されてしまったことが原因である可能性が高い。

これらの報告から、自律的な学習には社会的にやりとりできる他者とのコミュニケーションが不可欠であり、オンライン授業で成果を上げるために配慮しなくてはならない構造であると考えられる。この構造は教室であれば、自然に機能していたはずであり、物理的に断絶されたことによって機能不全に陥ってしまったと思われる。こういった共同体は、学びのコミュニティと呼ばれている。学び合える仲間作りは、年齢に関係なく社会人になっても生涯にわたり長期的に学びつづける上で重要な要因であり [8,9,10], オンライン環境においても同様であると考えられる。

5. まとめと今後の展開

本稿では、今秋に行われた「オンライン教育」に関わる研究会で紹介された実践例を元に、現段階で整理されてきた概念とそれに基づいた構築・活用実績から成果につながった要因及び課題についてまとめた。

教育は、教室の中で作られた権威的な圧力によって一方的だった構造が、インターネットなどのテクノロジーによってその独裁から解放された。そして現在進行形のwithコロナ時代においては、対面授業の教室で尚も行われ続けた制限のある不自由な学びの構造を再度打ち壊し、今度こそ本当に新しい学びを再構築する必要性を突きつけた。

教育現場の前線で「オンライン教育」という言葉が採用されていることは、授業を構築する我々教職員こそが自律的に利用する基盤技術を限定しない学び方を改めて慎重にデザインしようと挑戦している姿勢の現れだと感じている。そして、自律的で高い学習成果を導くには社会的な関わりが重要な要因であることから、他者との信頼関係構築について学習者自身が努力する必要がある。新たな学習観の元にイノベーションを起すには、小回りの効く規模で、実践型教育が中心となる本学のような環境がまさに適していると考えられる。これに貢献できるよう、今後も実践と過程・その成果を引き続き追う予定である。

参考文献

- [1] Skinner, B.F., "Teaching machines," Science, vol.128, no.3330, pp.969-977, 1958.
- [2] Nazimuddin, S.K., "Computer assisted instruction (CAI): A new approach in the field of education," International Journal of Scientific Engineering and Research (IJSER), vol.3, no.7, pp.185-188, 2014.
- [3] 古川雅子, "ITを活用した新型コロナウイルス対策," 国立情報学研究所 NII Today,(2020年9月11日参照, <https://www.nii.ac.jp/today/88/6.html>).
- [4] Sclater, N., "Large-scale open source e-learning systems at the Open University UK," Research Bulletin, vol.2008, issue.12, pp.1-13, 2008.
- [5] KOSCHMANN, Timothy; HALL, Rogers P.; MIYAKE, Naomi. "CSCL 2". Routledge, 2002.
- [6] 三宅なほみ, et al., "学習者中心型授業へのアプローチ: 知識構成型ジグソー法を軸に," 東京大学大学院教育学研究科紀要, vol.51, pp.441-458, 2012.
- [7] 大島純, et al., "協調学習のプロセスと個人の貢献を測定する試み: 発言のネットワークを用いた学習者の対話分析 (協調学習とネットワーク・コミュニティ)," 日本教育工学会論文誌, vol.33, no.3, pp.333-342, 2010.
- [8] 望月俊男, 北澤武, "ソーシャルネットワークキングサービスを活用した教育実習実践コミュニティのデザイン (協調学習とネットワーク・コミュニティ)," 日本教育工学会論文誌, vol.33, no.3, pp.299-308, 2010.
- [9] 山内祐平, "教育学とインフォーマル学習 (情報化社会におけるインフォーマルラーニング)," 日本教育工学会論文誌, vol.37, no.3, pp.187-195, 2013.
- [10] 鈴木克明, "インストラクショナルデザインー学びの「効果・効率・魅力」の向上を目指した技法一," 電子情報通信学会 通信ソサイエティマガジン, vol.13, no.2, pp.110-116, 2019.
- [11] 国立情報研究所, "4月からの大学等遠隔授業に関する取組状況共有サイバーシンポジウム," (2020年9月11日参照, <https://www.nii.ac.jp/event/other/decs/#16>).
- [12] 日本教育工学会, 2020年秋季全国大会, (2020年9月13日参照, <http://www.jset.gr.jp/taikai37/>).
- [13] 日本教育工学会 2020年度春季大会実行委員会(信州大学), (2020年9月11日参照, <https://cril-shinshu-u.info/archives/1473>).
- [14] 重田勝介, "「オンライン授業」は高等教育を変えるか", 日本教育工学会 2020年秋大会(第37会大会)講演論文集, pp.5-6, 2020.
- [15] 大山拓次, "新型コロナ渦での実習事例: 遠隔授業と対面実習のハイブリッドの試み," 山梨大学生命環境学部生命工学科, (2020年9月11日参照, https://www.nii.ac.jp/event/upload/20200911-11_Oyama.pdf).
- [16] 中村素典, "ハイフレックス型授業実施のための技術的検討と支援に向けて," 京都大学情報

環境機構,

(2020年9月11日参照,

https://www.nii.ac.jp/event/upload/20200911-09_Nakamura.pdf)

- [17] 前田康裕, “熊本市の小中学校におけるオンライン授業の取組,” 日本教育工学会 2020 年秋大会 (第 37 会大会) 講演論文集, pp.3-4, 2020.

報告

コロナ禍に於ける学習成果に関する考察

鵜飼 達也*

(2020年10月14日受理)

A Study on the Results of Learning under the Covid-19

Tatsuya UKAI*

(Received October 14, 2020)

Abstract

In April 2020, students were asked to declare an emergency situation caused by the spread of The Covid-19 infection, mailed a print assignment to the student's home, and made home study a preparation period. In this report, the results of the research of the second-year students who took the "gasoline engine maintenance" in charge of the author are compared and verified using the results of regular tests for this year and the previous year.

キーワード: Covid-19, 講義, 自宅学習, パワーポイント, ワークシート, 教育効果

Keywords : Covid-19, Lectures, Home study, PowerPoint, Worksheets, Study effects

1. はじめに

2020年4月からの新型コロナウイルス感染症拡大による緊急事態宣言を請けて、本学は学生の自宅へプリント課題を郵送し、自宅学習を予習期間と位置づけて学習させることとした。本報では、著者が担当する講義「ガソリン・エンジン整備」を受講した2年生の学習成果を、前年度の定期試験の結果を用いて比較・検証したので報告する。

2. 実施の経緯

本学は、緊急事態宣言を請けて対面式授業を中止し、プリント課題による自宅での「予習期間」を設け、Web上での資料閲覧も可能な状況を作り対応することとなった。当初は2週間の休校が見込まれ、2週間分のプリント課題を準備したが、緊急事態宣言が長期化したため、更に6週間分を全学生に郵送した。その後、臨時出校日の5月7日に初めの4週間分を回収、そして、5月20日に残りの4週間分を回収して自宅での学習状況を点検した。また、6月1日からの2週に渡って自宅予習期間に実施した全ての課題を解説するための補講を行い、その後、理解度を測るための試験を実施した。この理解度を測る臨時試験については、前年度も9回目の講義終了後に実施しているが、本年度は自宅学習期間があり、一部を除き出題内容が異なったため、今回の比較対象から除外した。緊急事態宣言解除後の残り7回の授業全て対面式授業として実

施し、その後、昨年度と同じ内容の定期試験を行った。この試験の正答率と昨年度の対面式授業後の定期試験の結果を用いて、今年度実施した自宅予習期間を含む授業の学習成果を考察することとした。

3. 従来の講義方法

従来の講義では、シラバスに基づいて作成したパワーポイントを用いて必要な図や写真を中心にエンジンの構造・作動及び整備のポイントを口頭で説明後、教科書[1],[2]で確認している。すなわち、基本的には対面式授業の良い点である説明を聴きながら理解を深めていく形式を取っており、ノートは試験を行う直前に提出させて受講状態の一端を確認している。Fig.1に昨年度の講義で使用したパワーポイントの一部を示す。

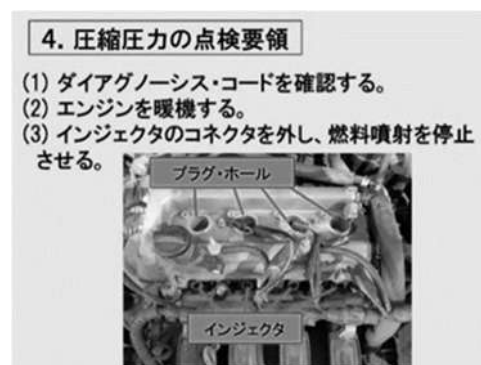


Fig.1 Usual PowerPoint

* 愛知工科大学自動車短期大学自動車工業学科, 〒443-0047 愛知県蒲郡市西迫町馬乗 50-2
Department of Automotive Engineering, Aichi University of Technology Automotive Junior College, 50-2 Manori, Gamagori 443-0047, Japan

4. 自宅学習のための工夫

今回のように自宅予習期間が設けられた場合、課題提出が求められるため、提出物としてのワークシートを作成した。自宅での予習期間中は対面式授業ができないため、教科書で調べて完成させる形式とした。そのため、従来の講義で使っていたパワーポイントを改良して教科書のページ数を記載し、重要語句を朱書きにすることで、要点を極力単語単位でワークシートに記入して行く方式とし、まとめやすくする工夫をした。Fig.2 に改良したパワーポイントの一部を、また、Fig.3 に使用したワークシートを示す。



Fig.2 Improved PowerPoint

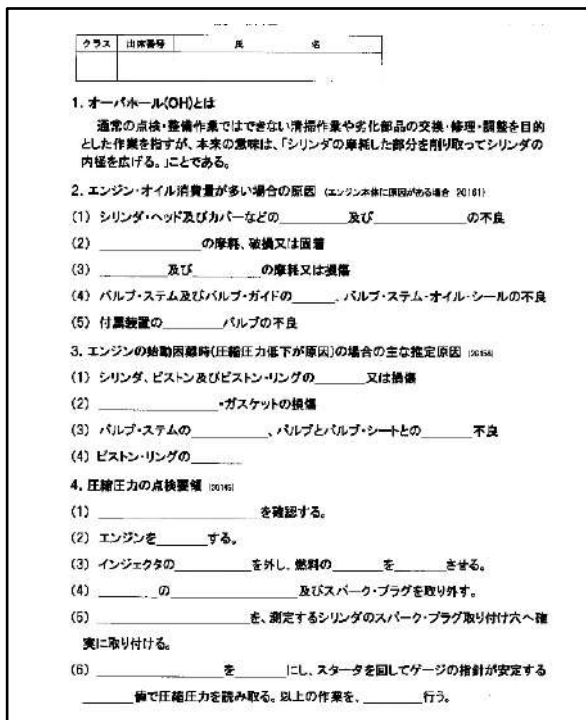


Fig.3 Worksheets

学生が自主的に調べ易いことを第一に考え、基本的には教科書に対応したワーク・シートを作成し、教

科書の図では実物がイメージし難いものに関しては、極力写真を張り付けたパワーポイントを用意した。ワークシートは、A4 サイズ 4 枚を 90 分の講義 1 回分と考え、全ての講義が自宅学習となった場合でも対応が可能のようにし、練習問題も掲載することで学習効果が上がるように工夫した。

5 月 7 日、20 日の 2 回に分けて全てのワークシートを課題として提出させ、これを以て講義への出席とみなした。この課題は、学生に返却出来ないため、学生がワーク・シートを提出した後に、著者自身が解答を書き込んだワークシートを印刷して受講した学生へ配布した。

5. 調査方法

緊急事態宣言が解除された 6 月から対面式授業となったが、自宅での学習を補完するため再開後 90 分 2 回の補講を行った。この補講で自宅学習期間に課したものと同一ワークシートを配布し、公開したパワーポイントを使用して要点の解説を行った後、通常の講義を実施した。通常の講義終了後に施した本年度の定期試験は、問題 1 をシビアコンディションそのものを問う記述式、問題 2 を故障の原因を問う穴埋め記述、問題 3 をエンジンの点検方法を問う穴埋め記述式とした。また、問題 3 については、昨年度は記述式問題としたが、本年度は穴埋め記述式としたことから、比較検証対象から除外した。また、問題 4 と問題 5 は、実際の作業要領と注意点を問う穴埋め問題（語群あり）、また、問題 6 は過去の国家試験（4 択問題）とした。そして、前年度の学習成果と比較するため、2019 年度及び、2020 年度の定期試験における正答率の調査を行った。正答率は各設問ごとの正解数を受験人数で割って求めた。科目担当者は著者のみであり、また、試験問題の作成、採点及び、正答率の調査も全て著者が行った。調査対象は、自動車工業学科 2 年生全員であり、2019 年度は 108 名、2020 年度は 112 名である。試験は両年度とも同時期に実施される前期定期試験の結果を用いた。問題 1 の記述式問題の採点については、設問に対して必要な用語が用いられ、単語でも意味が解れば正解とした。穴埋め式問題、及び選択式問題に於いては、答えは 1 つしかないため、正しい語句及び記号を選択した場合のみ正解とした。両年度とも出題内容は変わらないが出題方法が異なるため、問題 3 を除き、問題 1 から問題 5 までは理解度を比較するためのものとした。前年度との比較は四者択一式である問題 6 で行った。調査対象とした問題が定期試験問題であるため、問題を開示することはできないが、その内容は自動車整備技能登録試験（国家試験）と

同等である。

6. 学習成果の比較

2019 年度，2020 年度の定期試験の正答率を Table 1 および Table 2 に示す。また，各問ごとの正答率を Fig.4 および Fig.5 に棒グラフで示した。

Table 1 Rate of right answer in 2019

19年度		108人			
		全クラス			
問題1	問1	88.0%	問題5	問1	96.3%
	問2	87.0%		問2	92.6%
	問3	85.2%		問3	88.0%
	問4	87.0%		問4	97.2%
	問5	81.5%		問5	94.4%
問題2	問1	81.5%	問題6	問1	64.8%
	問2	77.8%		問2	46.3%
	問3	70.4%		問3	74.1%
	問4	60.2%		問4	58.3%
	問5	49.1%		問5	53.7%
問題4	問1	96.3%	問6	42.6%	
	問2	82.4%	問7	66.7%	
	問3	34.3%	問8	56.5%	
	問4	48.1%	問9	43.5%	
	問5	96.3%	問10	55.6%	
					71.9%

Table 2 Rate of right answer in 2020

20年度		112人			
		全クラス			
問題1	問1	96.4%	問題5	問1	99.1%
	問2	93.8%		問2	99.1%
	問3	83.9%		問3	93.8%
	問4	79.5%		問4	98.2%
	問5	93.8%		問5	94.6%
問題2	問1	93.8%	問題6	問1	70.5%
	問2	98.2%		問2	69.6%
	問3	82.1%		問3	63.4%
	問4	73.2%		問4	73.2%
	問5	65.2%		問5	68.8%
問題4	問1	99.1%	問6	51.8%	
	問2	85.7%	問7	45.5%	
	問3	62.5%	問8	94.6%	
	問4	60.7%	問9	75.9%	
	問5	100.0%	問10	47.3%	
					80.4%

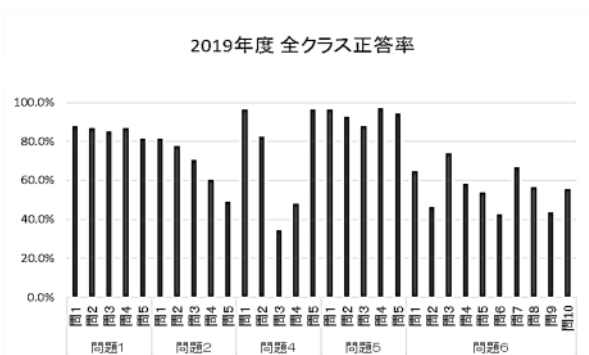


Fig.4 Rate of right answer in 2019

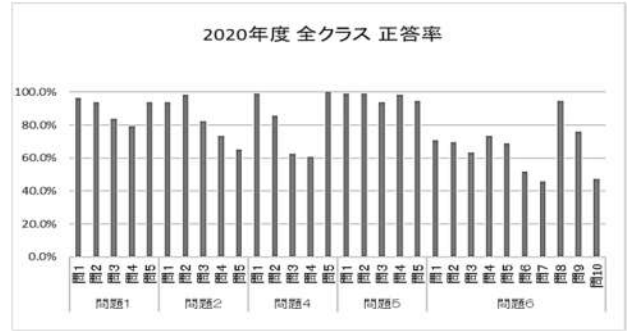


Fig.5 Rate of right answer in 2020

更に 2020 年度の学習効果と 2019 年度の学習効果を直接比較して検証するために，昨年度と同一内容である国家試験の過去問題を利用した問題 6 の設問を使用した。今回出題した問題 6 の 4 択問題は，問 1 から問 5，及び問 8 は対面式授業で行った内容であり，問 6，問 7，問 9，問 10 は自宅学習期間での内容である。比較し易いように問題番号を一部並べ替えた結果を Table 3 に，また，各問ごとの正答率を棒グラフで比較した結果を Fig.6 に示す。

Table 3 Rate of right answer of both in 2019 and 2020 in the same problems

	2020年度	2019年度
	全クラス正答率	全クラス正答率
問題6 対面式範囲	問1	64.8%
	問2	46.3%
	問3	74.1%
	問4	58.3%
	問5	53.7%
	73.4%	59.0%
問題6 自宅学習範囲	問6	66.7%
	問7	56.5%
	問9	43.5%
	問10	55.6%
		55.1%

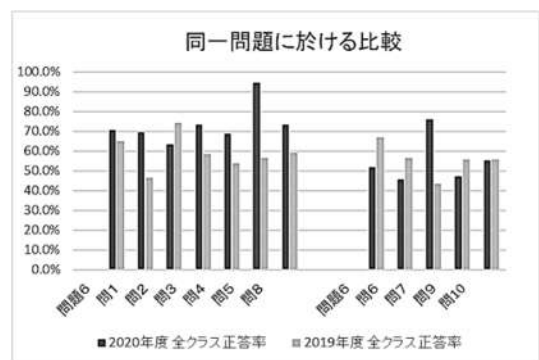


Fig.6 Rate of right answer of both in 2019 and 2020 in the same problems

7. 考察

2019年度の総正答率は71.9%、2020年度の総正答率は80.4%となり、全て対面式授業で行った2019年度よりも、コロナ禍で自宅学習期間を含む2020年度の方が8.5ポイント向上している。また、学生が苦手とするエンジン電装品に関する設問に於いては、前年度と同様に正答率が低い結果となった。全体的に2020年度の結果が向上した要因として、今回作成したワークシートは、パソコンとプリンターがあれば大学に来なくても印刷ができるようにGoogle classroomにアップロードしたことや、対面式授業開始後、ワークシートの解答を講義後に掲載したこと、また、講義用に作成したパワーポイントも同様にGoogle classroomにアップロードすることで、家庭での学習がしやすいように改善したことなどが考えられる。

2019年度の対面式授業では、教員の説明を聞き流してワークシートに記入することで、積極的に自分から調べて勉強をする必要が無かったこともあり、アクティブラーニング的な要素が足りなかった。その結果として、2020年度よりも正答率が低かったのではないかと考えられる。

2020年度の前半8回の講義に於いては自宅で学習する方法しか無く、課題のワークシートを完成するためには、Google classroomに公開されているパワーポイントを読み、自ら積極的に教科書で調べるといった作業をする必要があり、結果として、能動的な学習に導くことができた。

更に2020年度と2019年度に出題した内容が同一である問題6について、2020年度では対面式授業の範囲であった問1から問5と問8の問題と、自宅学習期間の範囲であった問8を除く問6から問10を比較した結果、2020年度の対面式授業の平均正答率は73.4%であり、2019年度の59.0%より23.4ポイント向上した。また、2020年度の自宅学習期間の正答率は55.1%であり、2019年度の55.6%とほぼ同様の結果となった。同一問題での検証では、自宅学習期間の範囲ではほとんど差が見られなかったが、対面式授業では大きく差が出ており、教材提供の工夫をした対面式授業の効果を表していると考えられる。

対面式授業のみであった2019年度と、自宅学習期間と対面式授業を組み合わせた2020年度の試験結果を比較した場合、教材を工夫することで学習効果が向上することが分かった。また、教材の工夫だけでは対面式授業と同等以上の効果を得られないことも検証された。

8. まとめ

Covid-19の感染拡大で対面式授業が不可能になったことから、従来の講義手法を見直し、パワーポイントやワークシートを工夫することで、学生自身が自ら教科書を用いて調べて学習が出来る環境を整えた。その結果、ワークシートによる自宅学習と大学での対面式授業を実施した2020年度の結果が、対面式授業のみであった2019年度の結果に比べ大きく向上した。昨年度の結果と本年度の結果だけを比較したのであれば、教材の工夫だけでも充分学習成果が上がるという結論に終わってしまうが、同一問題である問題6において、自宅学習期間と対面式授業期間が混在した2020年度の試験問題の正答率と、全てが対面式授業であった2019年度の試験問題の正答率を検証した結果、教材の工夫により、自宅学習期間を伴う2020年度の教育効果が、2019年度で実施した従来の対面式授業での教育効果と同等であったことが明らかになった。ただし、本学の学生全員にネットワーク環境が整っている訳ではないため、Google classroomなどのネットワーク環境が必要な教材の活用には限界がある。Covid-19の感染が未だ続いている現在、いつ学生たちに自宅学習を行って貰う状況になるのか予想は付かない。この状況は当面続くものと考えられ、そのためにも絶えず授業のための教材研究を行い、教え方を工夫し、ネット環境を整えるなどの改善をしていくことが重要である。

謝辞

おわりに、本報告を纏めるにあたり、ご指導をいただいた中島守副学長に感謝の意を表します。

参考文献

- [1] 一般社団法人 日本自動車整備振興会連合会教科書編集委員会，“国土交通省自動車局監修 自動車整備養成課程 教科書 二級ガソリン自動車エンジン編，”pp156-161, Jan.2019.
- [2] 一般社団法人 日本自動車整備振興会連合会教科書編集委員会，“国土交通省自動車局監修 自動車整備養成課程 教科書 三級自動車ガソリン・エンジン編，”pp144-145, Jan.2019.

●業績リスト(2020.1～2020.12)

[著書]

荒川俊也: Excel によるやさしい統計解析 分析手法の使い分けと統計モデリングの基礎, 株式会社オーム社 (2020.10).

荒川俊也: AI エンジニアのための統計学入門, 科学情報出版株式会社 (2020.1).

Toshiya Arakawa, Noriaki Sakakibara, Shinji Kondo: Development and Evaluation of a Continuous Blood Pressure Monitoring System, in "Handbook of Biochips" (Eds. Mohamad Sawan), Springer, pp.1-19.

大西正敏, 大西清: JIS にもとづく機械設計製図便覧, 第 12 版(韓国版), オーム社 (2020.5).

小林直美: リオオリンピックニュースにおけるジェンダー —内容分析によるジェンダー・バイアスの解明に向けて—, 石川有香編著, 『ジェンダーと英語教育』大学教育出版, pp166-187.

中島守, 吉田昌央, 小野秀文, 高田富男, 平野博敏, 川村貴裕: 安全のころえ (2020 年度版), 学校法人電波学園 愛知工科大学自動車短期大学 (2020.3).

中島守, 河合末利, 森勝行, 永田英雄, 服部幸廣, 高田浩充: 新編 工学基礎 (2020 年度版), 学校法人電波学園 愛知工科大学自動車短期大学 (2020.3).

中島守, 掛布知仁, 高田浩充, 森勝行, 吉田昌央: 基礎数学 (2020 年度版), 学校法人電波学園 愛知工科大学自動車短期大学 (2020.3).

中島守, 川合宏之, 鈴木貴晃: 自動車 車検・整備 ハンドブック (改訂第 5 版), 株式会社 精文館 (2020.4).

[論文/国際会議]

阿部己和, 梶谷満信: SIMULINK で動く DC モータ実験装置を用いた古典制御の実践的教育, 愛知工科大学紀要, 第 17 巻, pp.1-6.

Toshiya Arakawa and Junko Sugimori: Practice of Manufacturing Education Using an Art Work Based on Design Thinking, 設計工学, Vol.55, No.8, pp.511-526, DOI:10.14953/jjsde.2019.2880.

Toshiya Arakawa: Training System Trends for Cardiovascular Diseases, Atherosclerosis: Open Access (Mini review), Vol.5, No.1, pp.127-128.

Toshiya Arakawa: Possibility of autonomous estimation of Shiba goat's estrus and non-estrus behavior by machine learning, *Animals*, Vol.10, No.5, 771, DOI: 10.3390/ani10050771.

荒川俊也, 榑原規彰, 近藤針次: 赤外線方式連続血圧計の開発と ChangePoint 法によるヒヤリハット検出の試み, 「状態推定法の深化と異分野連携による知の総合(1)」統計数理研究所共同研究レポート, No.429, pp.7-13.

荒川俊也: 機械学習入門としての最適化問題, *愛知工科大学紀要*, 第 17 卷, pp.39-44.

貴答竣亮, 荒川俊也: 自動運転使用時におけるドライバ行動の観察と考察, *産業応用工学会論文誌*, Vol.8, No.2, pp.222-228, DOI:10.12792/jjiaae.8.2.222.

寺澤武, 荒川俊也: 機構学教育へのマルチボディシミュレーション環境の活用, *工学教育* (in press).

Yu Takitani and Toshiya Arakawa: Tone Instrument Estimation Using Single Layer Neural Network, *International Journal of Innovative Computing, Information and Control*, Vol. 16, No.6, pp.2143-2152.

Toshiya Arakawa: Behavior Analysis and Reliance Evaluation of Drivers during Autonomous Driving, *ACSMO2020: Asian Congress of Structural and Multidisciplinary Optimization 2020*, online.

Toshiya Arakawa, Noriaki Sakakibara, Shinji Kondo: Development and Evaluation of Infrared Blood Pressure Monitoring System and Detection of Increasing Blood Pressure with ChangePoint Method, *CME2020: International Conference on Complex Medical and Engineering*, online.

Toshiya Arakawa, Noriaki Sakakibara, Shinji Kondo: Development and Evaluation of Infrared Blood Pressure Monitoring System, *ICICIAE2020: The 8th IIAE International Conference on Industrial Application Engineering*, Matsue, Japan.

Toshiaki Kondo, Takashi Yamagishita, Hideki Masuda: Fabrication of High Aspect Metal Nanostructure Using Anodic Porous Alumina and Its Optical Property, *PRiME 2020 Hawaii*, (2020.10.4-9), C04, online

T. Yanagishita, K. Atsushi, T. Kondo, H. Masuda: Preparation of freestanding tubular alumina

through-hole membranes by two-layer anodization, Japanese Journal of Applied Physics, 59, 038002 (2020).

T. Yanagishita, H. Hirose, T. Kondo, P. Schmuki, H. Masuda: Fabrication of Ideally Ordered TiO₂ Through-Hole Membranes by Two-Layer Anodization, RSC Advances, 10, 37657 (2020).

磯貝正弘, 大仲海渡, 齋藤亜由子, 小林義和, 木澤悟, 宮協和人: モーションキャプチャーを利用したポールウォーキングの評価, 計測自動制御学会教育工学論文集, Vol.43, pp.10-12 (2020.12).

宮内俊幸, 渡邊亮, 福王寺琢也, 山本雅也: L-アスコルビン酸を吸着させたケナフ基剤のポリアミン系キレート樹脂における Cr(VI) に対する還元能評価, 分析化学, Vol.69, No.1, pp.69-75.

山本雅也, 矢澤浩成, 戸田香: VR を用いた道路横断タスクによる視覚的認知機能評価の試み, 産業応用工学会論文誌, Vol.8, No.1, pp.137-139.

Yoshitaka Nagano, Junko Sugimori: Implementation of Projection Mapping System Using FPGA, Proceedings of the International Display Workshops, IDW' 20, (Invited).

Tsuyoshi Yuno, Yoshiaki Yagi, Tsubasa Imamura, Yuto Owaki, Taketoshi Kawabe, Taichi Mizoshiri, Noriko Shimomura: Localization Method free from Scan Distortion using LiDAR Response Model: Verification with Noisy LiDAR Measurement, in Proceedings of the SICE Annual Conference 2020, Chiang Mai, Thailand, September 23-26 (presented on 26, via online), pp.1103-1106.

早川元貴, 實廣貴敏: Kinect センサーを用いた音声対話システム前における人物の動作識別, 愛知工科大学紀要, 第 17 巻, pp.15-22, 2020.

加藤央昌, 早瀬光浩: 観光支援のためのルート提供システムの検討, 日本知能情報ファジィ学会誌「知能と情報」, Vol.32, No.5, pp. 917-922, 2020.

西村竜一, 坂本修一, 菅木禎史, 山高正烈: 防災行政無線屋外拡声子局における出力レベルの最適化, 日本音響学会誌, Vol.76, No.9, pp.475-484, 2020.

尾林史章, 宮澤俊一, 松井竜太, 小塚一宏, 荒川俊也: 自動車運転中の“ながらスマホ”の影響に関する実験的検討, 電子情報通信学会論文誌(A), Vol.J103-A, No.6, pp.117-125.

尾林史章, 荒川俊也, 小塚一宏: 駅ホーム上歩行中におけるスマートフォン使用時の視線特性, 産業応用工学会論文誌, Vol.8, No.1, pp.134-136, DOI: 10.12792/jjiaae.8.1.134

Tomoe Ozeki., Tetsuya Mouri, Hiroko Sugiura, Yuu Yano, & Kunie Miyosawa: Use of communication robots to converse with people suffering from schizophrenia. ROBOMECH Journal, 7(1), 1-14. Doi: <https://doi.org/10.1186/s40648-020-00161-6>, 2020.

Tomoe Ozeki., Tetsuya Mouri: Investigating the influence of stiffness on decision making for haptic interface evaluation development. International Journal of Computer and Information Technology Vol.19, No.1, pp.1-7., 2020.

Jae-Gap Suh, Wan-Ho Cho, Triantaillos Koukoulas, Hack-Yoon Kim, Zhenglie Cui, Yôiti Suzuki, "Development of a Laser Pistonphone System to Calibrate the Sensitivity Modulus and Phase of Microphones for Infrasonic Frequencies," International Journal of Precision Engineering and Manufacturing, DOI: 10.1007/s12541-020-00338-4, 2020.

Kazuyoshi Tagawa, Noriko Tani, Hiromi Tanaka: Fast Collision Detection Approach for Elastic Embedded Objects Using Dual Graph, International Journal of Computer Assisted Radiology and Surgery, Vol.15, pp.S62, Jun. 2020, Munich(Germany) online.

Ryo Teraoka, Shuichi Sakamoto, Zhenglie Cui, Yôiti Suzuki, and Satoshi Shioiri, "Temporal characteristics of auditory spatial attention on word intelligibility," Acoustical Science and Technology, special issue, Vol.41, No.1, pp.394-395, 2020.

吉田茂, 天野克哉, 廣田耕平: 簡便に XML データ処理を行うライブラリ・ソフトウェアの検討(その 4) -XML 文書作成ソフトウェアの Python 移植と, 属性への対応-, 愛知工科大学紀要, 第 17 巻, pp.45-54.

Tomoe Ozeki., Tetsuya Mouri, Hiroko Sugiura, Yuu Yano, & Kunie Miyosawa: Use of Communication Robots to Interview Chronically Ill Patients Regarding their Health and Medication Use. AROB/ISBC 2020.

Tomoe Ozeki, Yuki Okazaki, & Tetsuya Mouri: Attempt to Extract Lacking Information on University Campus by Augment Reality Content Production Activities. IEEE TALE 2020: International Conference on Engineering, Technology and Education (in press).

Tomoe Ozeki., Tetsuya Mouri: An attempt to investigate the relationship between feeling of the hardness of an object and decision making by using myoelectric signals. AROB/ISBC 2020.

Masahiro Yamataka, Takeshi Shibutani Shuichi Sakamoto, Yôiti Suzuki, and Toshiaki Muramoto, “Changes in the impression of urgency-inducing speech due to added background sounds,” Center for Nation-Wide Cooperative Research on ICT FY 2019 RIEC Annual Meeting on Cooperative Research Projects “Compass for Next-Gen ICT”, 2020.

小林直美: オリンピックニュースとジェンダー 日本の報道傾向と新たなコミュニケーションの構築に向けて 関西大学人権問題研究室紀要, No.80, pp2-24.

森明智: 間接ストラテジーを用いた EFL/ESL 英文読解方略の指導 Instruction of EFL/ESL Reading Strategy using Indirect Strategy, 第3回 JAAL in JACET 学術交流集会.

中島公平, 森唯人, 吉田昌央, 大藏信之: 強制対流下における切欠きフィン付き空冷シリンダの冷却特性(第2報, 上下フィンの切欠き位置をオフセットさせた場合), 設計工学, Vol.55, No.6, pp.405-414 (2020.6).

Kohei Nakashima, Yuto Mori, Masao Yoshida: Improved Cooling of an Air-Cooled Cylinder by Fins with Slits Exhibiting a Phase Difference to the Slits Immediately Above under Forced Convection, SAE 2020 World Congress, 20PFL-540 (2020.4).

[解説・総説]

荒川俊也: 自動運転への過信・依存の評価を目的としたドライバ状態の計測と解析, 日本知能情報ファジィ学会誌「知能と情報」, Vol.32, No.3, pp.98-104.

近藤敏彰: チタンのアノード酸化, 表面技術, No.71 (2020年2月).

成田浩久, 館山武史, 永野佳孝, 藤本英雄: 画像検査へのAIの応用についての現状と将来に関する考察, 表面技術, Vol.71, No.7, pp.459-463.

館山武史, 成田浩久, 藤本英雄: 深層学習を用いた画像認識による自動製品検査システムの開発事例, 画像ラボ 2020年12月号, pp.1-6.

小林直美: ナショナリズムとジェンダーの交差, 体育の科学, Vol.70, pp.357-361.

[口頭発表]

杉山雄大, 荒川俊也: 香り空気砲の開発と覚醒維持効果の検証, 計測自動制御学会システム・情報部門学術講演会 2020 (2020.11.16).

壁谷直樹, 寺澤武, 荒川俊也: 自動運転の過信・依存を抑制する操舵 HMI の提案, 計測自動制御学会システム・情報部門学術講演会 2020 (2020.11.16).

藤城諒士, 橋口翔龍, 荒川俊也: 深層学習によるみかん選別アルゴリズムと低コストみかん収穫装置の開発, 計測自動制御学会システム・情報部門学術講演会 2020 (2020.11.15).

谷川諒, 寺澤武, 荒川俊也: 深層学習の医用画像診断への応用, 計測自動制御学会システム・情報部門学術講演会 2020 (2020.11.15).

近藤敏彰, 田村東子, 柳下崇, 益田秀樹: テクスチャリングプロセスにもとづく理想配列半導体ナノホールアレイの形成, 表面技術協会第 142 回講演大会, (2020.9.10-11), B07-27.

阿部己和, 梶谷満信, 瀧山武: リーン限界性能向上のための燃焼変動率の予測に関する基礎検討-燃焼圧センサーを用いた IMEP 変動率の予測-, 自動車技術会, 2020 年春季大会学術講演会講演予稿集, pp.222-228

五嶋信也, 村上新: 電磁誘導による振子型ダイナミックダンパの振動減衰機構に関する研究, 日本機械学会東海学生会 TOKAI ENGINEERING COMPLEX 2019 (TEC19) 第 51 回学生員卒業研究発表講演会 (2020.3).

渡部吉規, 小林信介, 板谷義紀, 柏谷有人: 有機廃棄物堆肥化プロセスにおける排ガス循環の影響, 化学工学会第 85 回年会 (2020.3.15).

長谷川健太, 大西正敏: IPMSM のベクトル制御と APF 位置推定補正法を用いた位置センサレスベクトル制御の設計と検証, 日本設計工学会 東海支部 令和元年度研究発表講演会 講演論文集, p.72.

今井一雅, 平社信人, 高田拓, 北村健太郎, 中谷淳, 村上幸一, 徳光政弘, 今井雅文, 西尾正則, 深井貫, KOSEN-1 チーム: 高専連携技術実証衛星 KOSEN-1 について(2), 第 64 回宇宙科学技術連合講演会講演集, 4C07, オンライン, (2020.10).

今村翼, 八木良彰, 湯野剛史, 川邊武俊, 溝尻太一, 下村倫子: LiDAR を用いた自己位置推定手法検証のための計算機シミュレータの構築, 自動車技術会 2020 年春季大会学術講演会, 横浜.

徐玉堂, 裴艶玲: ベランダ用雨よけ装置の開発, 日本機械学会年次大会, (2020.9).

北山阿廉, 笠井颯太, 山本雅也, 田川和義, 小森優, 来見良誠, 田中弘美: 手術トレーニング手法開発を目的とした腹腔鏡手術中の視線データ解析, 第 15 回 空間認知と運動制御研究会学術集会(旧 JAXA ワーキンググループ), (2020.3.14-15).

水野翔太, 大西正敏: 筋電位を読み取り駆動する義指の設計開発, 日本設計工学会 東海支部令和元年度研究発表講演会 講演論文集, p.107.

永野佳孝, 忠内洋樹, 大島共貴, 川口礼雄, 宮地茂: 振動を使った脳血管内治療用デバイスの挿入力低減手法の提案, 第 29 回日本コンピュータ外科学会大会.

永野佳孝, 谷内口大春, 忠内洋樹, 宮地茂, 川口礼雄, 大島共貴, 松尾直樹: 脳血管内治療用テレサージェリーロボットの開発—LAN を使った遠隔操作実験—, 第 29 回日本コンピュータ外科学会大会.

永野佳孝, 杉森順子: FPGA プロジェクションマッピングへの輝度補正機能の追加, 第 25 回日本バーチャルリアリティ学会大会論文集.

永野佳孝, 真野竜一, 忠内洋樹, 宮地茂, 川口礼雄, 大島共貴, 松尾直樹: 脳血管内治療用遠隔操作ロボットにおける挿入力センサの開発(第 2 報), 第 38 回日本ロボット学会学術講演会.

永野佳孝, 宮地茂, 泉孝嗣, 大島共貴: 脳血管内治療用カテーテルの形状デザインアプリケーションの開発, 日本デザイン学会第 67 回春季研究発表大会.

永野佳孝, 杉森順子: 分散プロジェクタからの同一映像投影を用いたマッピングシステム, 日本デザイン学会第 67 回春季研究発表大会.

西尾正則, 加藤雅也, 林衆治: 1U キューブサットによる衛星間光通信システムの開発, 第 64 回宇宙科学技術連合講演会講演集, 2L16, オンライン, (2020.10).

野秋匡平, 永野佳孝, 宮地茂, 泉孝嗣, 大島共貴: 脳血管内治療用カテーテルの形状デザインアプリケーション開発(第 2 報), 第 29 回日本コンピュータ外科学会大会.

恩田樹, 長谷和徳, 山根正睦, 裴艶玲, 加藤信彦, 浜田篤至: 3次元神経筋骨格モデルを用いた義足足部設計のための歩行シミュレーション, 日本機械学会関東支部第 26 期総会・講演会, (2020.3).

忠内洋樹, 間瀬剛志, 永野佳孝, 宮地茂, 川口礼雄, 大島共貴, 松尾直樹: 脳血管内治療用遠隔操作ロボットの開発(第 4 報), 第 38 回日本ロボット学会学術講演会.

竹中健人, 大西正敏: 新たな盲人用杖の研究開発, 日本設計工学会 東海支部 令和元年度研究発表講演会 講演論文集, p.109.

館山武史: 役割分担の概念を導入したマルチエージェント強化学習の有効性に関する一考察, 計測自動制御学会システム・情報部門学術講演会.

八木良彰, 大脇雄斗, 今村翼, 湯野剛史, 川邊武俊, 溝尻太一, 下村倫子: LiDAR 応答のモデル化によるスキャン歪み補正不要な自己位置推定手法, 第 7 回計測自動制御学会制御部門マルチシンポジウム.

山本雅也, 高野太希, 浅井博誉, 大塚崇史, 泉孝嗣, 小濱剛: 脳血管内治療手技トレーニング中の視線データ解析, 第 29 回日本コンピュータ外科学会大会, (2020.11.22-23).

中島悠貴, 實廣貴敏, “スマートフォン収録された自動車走行音からの Deep Neural Network による自動車距離推定,” 日本音響学会 2020 年春季研究発表会講演論文集, 3-U1-6, pp. 319-320, (2020 年 9 月)

羽田野誠, 加藤央昌, 早瀬光浩: 観光活性化に向けた情報提供機能の考察-おすすめルート提示に注目して-, 日本知能情報ファジィ学会東海支部 第 48 回東海ファジィ研究会.

尾関智恵, 寺田和憲: 寄付行動に対するエージェントの種類とリアリズムの影響の日米比較, 日本認知科学会第 37 回全国大会, 大会予稿集 p.279-282, p-37.

福元勇汰, 田川和義, 山本雅也, 小森優, 来見良誠, 田中弘美: 「低侵襲手術訓練のための視覚・力覚的に能動的な教示法の提案」, 電気学会 C 部門知覚情報研究会, 電気学会研究会資料 (知覚情報研究会, PI-20-033~046・048), (技術委員会奨励賞を受賞) (2020 年 3 月).

毛利哲也, 尾関智恵, 杉村駿太: 「操作者の指先位置に基づく物体把持のハンドロボットの遠隔操作」, 第 21 回計測自動制御学会システムインテグレーション部門講演会 (2020 年 12 月 18 日)

田川和義: 「腹腔鏡下胆嚢摘出術のための VR 教示システムの開発」, 第 30 回日本シミュレーション外科学会 (2020 年 10 月).

田川和義, 大野高椰, 山本雅也, 小森優, 来見良誠, 田中弘美: 「腹腔鏡下胆嚢摘出術の注視行動におけるコツの解析とそれに基づく教示」, 第 29 回日本コンピュータ外科学会大会 (2020 年 11 月).

R.Teraoka, S.Sakamoto, Z.Cui, Y.Suzuki, and S.Shioiri, “Conceptual model of auditory spatial attention in multi-source listening environment,” 脳型 LSI シンポジウム.

米田守重: 次元ナノワイヤ系に於けるコヒーレント量子位相スリップとジョセフソン接合間の双対性, 日本物理学会第 75 回年次大会.

甲村一貴, 巨藤誠, 服部幸廣: 大型車用ホイール誤組時の締め付けトルクとボルト軸力の関係 (スチール・ホイールをアルミホイール用のホイール・ボルトで締め付けた場合の特性), 全国自動車短期大学協会 自動車整備技術に関する研究報告誌, vol.49, pp.23-28 (2020.10).

鈴木拓也, 吉田昌央, 齋藤健, 川村貴裕: 自動車走行音に関する教材製作の試み, 全国自動車短期大学協会 自動車整備技術に関する研究報告誌, vol.49, pp.29-33 (2020.10).

[その他(セミナー講師・作品出展など)]

荒川俊也: 株式会社テックデザイン主催講習会「速習！t 検定の使い方講座」(2020.8.19)

荒川俊也: 株式会社技術情報協会主催講習会「機械学習の手法と導入のポイント」(2020.2.21)

荒川俊也: 株式会社技術情報協会主催講習会「ドライバーの生体情報計測と覚醒維持、感情推定技術」内「自動運転システムにおける過信・依存とシステム破綻時のドライバ状態」(2020.1.24)

梶谷満信: 日本テクノセンター主催セミナー「PID 制御および改良型 PID 制御のコントローラ設計の基礎と実践」(2020.3)

原ひなの, 三好朝輝, 永野佳孝, 杉森順子: 「むしむしキャッチ」ゲーム, 第 25 回日本バーチャルリ

アリティ学会年次大会 オープン・バーチャル・エキシビション, 2020.

赤木惣一, 和田佳久, 佐野史明, 中世古悠嗣, 山田海登, (顧問: 田川和義): 愛知県大学対抗ハッカソン”Hack Aichi 2020”, (2020年11月)

尾関智恵: 全国障害者技能競技大会アビリンピック 専門委員(コンピュータプログラミング) 専門委員(2020年11月12~15日)

尾関智恵: 各務原市男女が輝く都市づくり審議会 審議委員(2020年)

田川和義: 2020年度高大連携授業(安城南高等学校)「触覚のバーチャルリアリティとは」(触覚のバーチャルリアリティの概要と医療応用について体験授業), (2020.11.10).

Masahiro YAMATAKA, Takeshi SHIBUTANI, Shuichi SAKAMOTO, Yôiti SUZUKI², and Toshiaki MURAMOTOR, “Changes in the impression of urgency-inducing speech due to added background sounds,” 東北大学電気通信研究所共同プロジェクト研究発表会, 2020.

小林直美: 名古屋市男女共同参画推進センター主催「なぜあのCMIは炎上したのか」(2020.11.18)

小林直美: 令和2年度蒲郡市男女共同参画行政課題型共同委託事業「ドラマで学ぼうダイバーシティ! 昭和から令和まで」(2020.10.31)

小林直美: 愛知県蒲郡市主催「第3次蒲郡市男女共同参画プラン策定委員会勉強会」(2020.9.18, 10.19)

小林直美: 名古屋工業大学石川有香科研公開シンポジウム「ジェンダーと英語教育」内「リオオリンピックニュースにおけるジェンダー —内容分析によるジェンダー・バイアスの解明に向けて—」(京都キャンパスプラザ 2020.3.27) (招待講演).

小林直美: 「第35回岩手大学男女共同参画推進のための学習と交流の会」内「身近なメディアとジェンダー」(2020.2.7)

橋本孝明, 長谷川康和: 幸田町理科教室(作って遊ぼう! ブーメラン車), 幸田町立図書館(2020.8.10).

愛知工科大学紀要

第18巻 令和3年3月25日

編集委員会

委員長 荒川俊也
委員 服部幸廣 磯貝正弘
吉田 茂 小林直美
松本吉生 澤根加代子

発行者

学校法人 電波学園 愛知工科大学
愛知工科大学自動車短期大学
〒443-0047
愛知県蒲郡市西迫町馬乗50-2
TEL : 0533-68-1135
FAX : 0533-68-0352
URL : <http://www.aut.ac.jp/>