

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 14 卷



AICHI UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

2016

愛知工科大学紀要 第14巻

目次

研究論文

単一マイクロフォン入力音声から音響モデルを用いた話者との距離推定

..... 李 津, 實廣貴敏, 武田一哉 1

創作したオブジェへのプロジェクションマッピング - 私の左眼は何を見ている を事例として -

..... 杉森順子 9

三角管上に置かれた氷の接触融解解析

..... 椎名保顕 19

公道走行用ソーラーカーの開発

..... 鈴木宏和, 中島 守, 永田英雄, 岩瀬正幸, 甲村一貴, 小野秀文 25

Two-Dimensional Heat Conduction Problems for Functionally Graded Orthotropic Materials

..... Manabu Ohmichi 31

研究ノート

データ圧縮における Python プログラムの性能について

..... 吉田 茂 41

解説・総説

場面遷移ネットを用いた離散・連続混合システムのモデリングとシミュレーション

..... 舘山武史 47

ドライバモニタリングシステムの技術動向と展望

..... 荒川俊也 55

報 告

デジタルコンテンツを活用した地域活性化・社会貢献

..... 加藤高明 63

愛知工科大学・愛知工科大学自動車短期大学教職員業績リスト（2016.1-2016.12）

愛知工科大学紀要規程

愛知工科大学紀要投稿細則

単一マイクロホン入力音声から音響モデルを用いた話者との距離推定

李 津^{*}, 實廣貴敏^{*}, 武田一哉^{**}

(2016年9月30日受理)

Estimation of Distance for a Speaker using Acoustic Models on Input Speech Recorded by a Single Microphone

Jin Li^{*}, Takatoshi Jitsuhiro^{*}, Kazuya Takeda^{**}

(Received September 30, 2016)

Abstract

In a single microphone, we propose an estimation method of the distance from the microphone to the speaker using a vector quantization (VQ) codebook. This method can estimate the distance roughly. The acoustic transfer function is estimated from the subtraction between the input speech and clean speech that is estimated from the nearest centroid in the VQ codebook to the input speech. Experimental results show that our proposed method can obtain the recognition rates from 60% to 66%. The iteration algorithm is also proposed to estimate acoustic transfer functions more accurately, and obtained around 70% maximum recognition rate.

キーワード：発話者距離推定，単一マイクロホン，音響モデル，ベクトル量子化

Keywords：distance estimation for a speaker, single microphone, acoustic model, vector quantization

1. はじめに

近年，パソコンやカーナビ，携帯電話などに音声対話システムの応用が盛んである．新しいマンマシンインタフェースとして世間的にも注目を集めている．しかし，実際に音声対話システムを使用するとき，無関係の音声に影響され，認識精度が低下する．基本的に入力される音声は認識対象であると想定しており，認識対象でない音声が入力されると，適切な応答ができない．

ここで，観測される音声を分析することにより，マイクロホンから発話者までの距離を推定できれば，認識すべき対象とするかどうか判断でき，より適切な応答ができると考えられる．発話者の位置がマイクから近ければ，その音声は認識対象である可能性が高く，逆に遠ければ，その音声は認識対象である可能性が低い．発話者が遠くにいるのであれば，その音声は音声対話システムに向けたものでない可能性が高い．このように距離の推定が発

話の検出に役に立つ．

距離の情報を含む音源位置推定は音源定位とも呼ばれ，これまで様々な手法が提案されている．その多くはマイクロホンアレイを用いた方法である．音源の距離も含める3次元的な位置を推定するために，マイクロホンアレイを複数設置し，それぞれ推定された音源の到来方向 (Direction of Arrival, DOA) を結合して三角測量を行う^{[1][2]}．マイクロホンアレイが決められた位置かつ音源を囲むように配置された場合には，良好な推定性能が期待される．また，音源から到来する波が球面波であることを仮定し，各マイクロホンの位相パターンから，球面波源を特定する方法もある^[3]．ただし，これらの方法ではマイクロホンアレイの大きさが問題である．これに対し，小型の正十二面体マイクロホンアレイを用いた音源位置推定法が提案されている^[4]．直径約8 cmの正十二面体形状のパッフルを用意し，上面と下面を除く計10面に

* 愛知工科大学 工学部 情報メディア学科

** 名古屋大学大学院情報科学研究科

1面あたり6本、計60本の小型無指向性のマイクロホン設置し、入力デバイスとして用いる。正十二面体形状のバッフルでは、密集配置でも各マイクロホン間の振幅に差が生じる。振幅差情報と位相差情報を同時に利用することができる。

マイクロホンアレイによる音源位置推定では良好な性能が期待される。しかし、簡易な音声対話システムでは、一本のマイクロホンを用いる場合が多く、従来法の利用が困難である。単一マイクロホンで音源推定することができれば、発話検出に利用し、音声対話システムの全体としての認識精度を高めることが期待される。対象が音声に限定されるが、単一マイクロホンで音素 HMM (hidden Markov model) を用いて音源方向を推定する手法が提案されている^[5]。ある位置から発話された音声からその音響伝達特性を、特定話者の音素 HMM を用いて推定し、推定された音響伝達特性を位置毎に学習する。その後、ある位置から発話された評価音声についても同様に音響伝達特性を推定し、それを識別することで音源方向を推定する。

単一マイクロホンで距離を推定することができれば、対話システムの認識精度向上、コスト削減やシステムの縮小化など様々な利点がある。本研究では、その条件下で、比較的容易な方法としてベクトル量子化 (vector quantization, VQ) コードブックを利用して、話者までのおよその距離を推定する手法を提案する。関連文献^{[6][7]}での報告の拡張と詳細を述べる。マイクロホンから離れて発話した音声は、部屋の壁などに反射され、歪みが生じる。この歪みは音源からマイクロホンまですべての音響的情報を含み、音響伝達特性として利用できる。音響伝達特性は発話の距離に応じて変わる。あらかじめマイクロホンから距離別で音響伝達特性を調べ、テンプレートを作成し、入力音声の歪みとマッチングをすることで、音源の距離を推定する。入力音声の歪みを推定するため、クリーン音声データを用いて VQ コードブックを音響モデルとして用いる。入力音声スペクトルと VQ コードブックに含まれるセントロイドとを比較し、最も近いセントロイドをクリーン音声とすることで、歪みを求める。さらに、歪みの繰り返し推定手法を検討し、精度向上を図る。

以下に本論文の構成を述べる。2節にて、提案法の基本アルゴリズムを説明し、3節において、その実験および結果について述べる。さらに、4節において、より精度を向上させるため、繰り返し歪み推定方法を提案し、5節で、その効果を評価する。最後に、6節でまとめる。

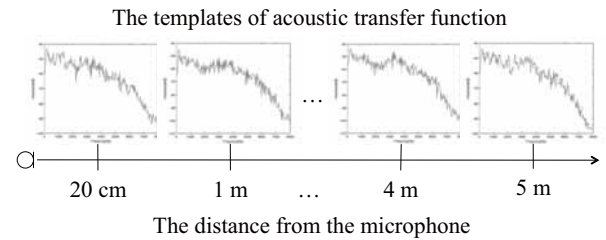


Fig.1 Templates of acoustic transfer function depending on the distances from the microphone.

2. 発話者までの距離推定

2.1 ベクトル量子化コードブックを用いた手法

まず、本提案法の概念を説明する。Fig.1に提案法で用いるテンプレートを示す。例では、マイクロホンから20 cm、あるいは、1 ~ 5 m離れた位置を検出することを考えている。あらかじめ、それぞれの位置からマイクロホンまでの音響伝達特性をテンプレート化しておく。入力音声から推定した音響伝達特性とテンプレートを比較し、最も近いテンプレートの位置が、推定された発話者の位置となる。

時刻 t における入力音声のスペクトル X_t は下記のように表される。

$$X_t = H_t \cdot S_t + N_t \quad (1)$$

ここで、 S_t, H_t, N_t はそれぞれ、雑音のない音声（以下、クリーン音声）のスペクトル、音響伝達周波数特性、加算性雑音のスペクトルとする。もし、何かの雑音抑圧手法が入力 X_t に適用され、加算性雑音 N_t はほぼ除去できたとすると、 X_t は下記のように近似できる。

$$X_t \approx H_t \cdot S_t \quad (2)$$

両辺の対数から、推定される対数音響伝達特性 $\log \hat{H}_t$ は

$$\log \hat{H}_t \approx \log X_t - \log S_t \quad (3)$$

と書ける。もし、クリーン音声 S_t が得られたならば、音響伝達特性 \hat{H}_t が得られる。しかし、直接的にクリーン音声を推定することは困難である。

そこで、クリーン音声の VQ コードブックを作成し、そのセントロイドを用い、クリーン音声を近似する。こ

ここで、セントロイド・ベクトル $C_i (1 \leq i \leq M)$ がクリーン音声のスペクトルを表現できると考える。もし、歪み H_i がそれほど大きくなければ、入力 X_i はクリーン音声に近い。従って、 X_i に最も近いセントロイド C_i が見つければ、 C_i はクリーン音声 S_i の近似と考えられる。クリーン音声 \hat{S}_i は次式により推定される。

$$\log \hat{S}_i = \arg \min_{\log C_i} (\log X_i - \log C_i)' (\log X_i - \log C_i) \quad (4)$$

ここで、 $'$ は転置を表す。さらに、 H_i は1発話入力音声全体では一定とする。求める音響伝達特性 \tilde{H} は各フレームから推定された \hat{H}_i の全フレームの平均として推定できる。

$$\log \tilde{H} = \frac{1}{T} \sum_{i=1}^T \log \hat{H}_i \quad (5)$$

$\log \tilde{H}$ が推定された後、マイクロホンから発話者までの距離は $\log \tilde{H}$ とテンプレートとの照合で推定される。最も近いテンプレートが選択され、そのテンプレートが示す位置が推定された距離となる。

2.2 音声区間検出の利用

この提案法ではクリーン音声モデルとしてVQコードブックを用いる。クリーン音声の歪み成分を音響伝達特性として推定するために、入力特徴量ベクトルは、人間の声、音声が存在する区間（音声区間）から抽出されたものである必要がある。音声区間検出が必要であるので、ここでは、入力音声のパワーによる簡単な音声区間検出を用いる。

3. 実験 1

3.1 実験内容

マイクロホンからの位置 0.20, 1, 2, 3, 4, 5 m に対するインパルス応答を求め、下記 3 種類の評価を行った。

(1) 音声区間検出あり / なしでの距離認識率

音声区間検出を用いた場合と用いなかった場合を比較した。距離別のテンプレートを 20 cm と 5 m のみを用い、それぞれの距離でのデータに対する評価を行った。この実験で用いたコードブックサイズ（VQコードブックに含まれるセントロイドの数）は 256 とした。

(2) 各距離、各コードブックサイズに対する距離認識率

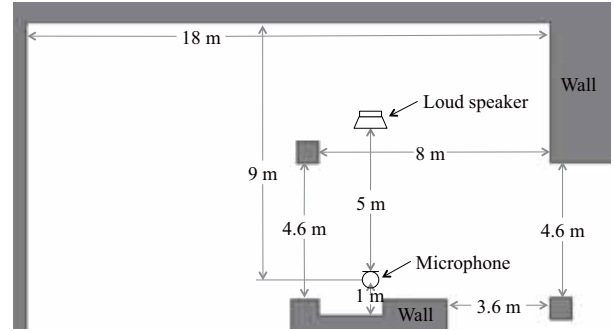


Fig. 2 The recording conditions.

距離別の評価データで、異なるコードブックサイズでの評価を行った。コードブックサイズは、それぞれ 128, 256, 512, 1024, 2048, 4096 とした。

(3) 遠近距離別での距離認識率

使用目的から厳密に位置を推定する必要はない。およその距離、遠いか近いかに分かれればよい。ここでは、近距離を 20 cm, 1 m とし、遠距離を 2 m ~ 5 m として 2 クラス識別問題として評価を行った。

3.2 実験条件

Fig.2 に収録した環境の見取り図を示す。第 1, 2 著者の所属する大学で、実際に音声対話システムの設置を行うことを考えている場所（AUT ホール棟 1 階）である。音声データの再生録音で評価データを作るとよいが、収録に時間がかかり、環境が変動する可能性があるため、ここでは、インパルス応答を推定、クリーン音声にたたみ込むことで、評価データを作成した。インパルス応答の推定は TSP 信号を用いた。なお、実環境であるが、比較的静かな時間帯で収録した。マイクロホンからの位置 0.20, 1, 2, 3, 4, 5 m において、スピーカから TSP (Time Stretched Pulse) 信号を再生し、マイクロホンで録音した。各位置で 4 つ TSP 信号を収録した。1 つのインパルス応答を評価データ用とし、残りをテンプレートとして用いた。ここでは、スピーカに YAMAHA 製 MSP7 STUDIO, マイクロホンは SONY 製 C-357, 録音機器は Roland 製 R-44 を用いた。

音声データベースとして日本音響学会 新聞記事読み上げ音声コーパス (Japanese Newspaper Article Sentences, JNAS)^[8] を用いた。音声品質は 16 kHz サンプリング周波数, 量子化ビット数 16 ビットであり、フレーム長は 25 ms, フレーム周期は 5 ms とした。特徴量としては、256 次元対数スペクトルを用いた。学習データ、評価デ

ータは音声認識タスクと同じ発話を用いた．VQ コードブックの学習では 31,617 発話を用いた．評価は IPA-98-TestSet で，23 名分の 100 発話を用いた．このデータに各位置でのインパルス応答を畳込み，各位置での評価データとした．

3.3 実験結果

3.3.1 音声区間検出あり/なしでの距離認識率

Fig.3 に音声区間検出 (Voice Activity Detection, VAD) あり (with VAD) / なし (without VAD) での距離認識率を示す．ここでは，マイクロホンからの位置 20 cm と 5 m の 2 つのみでの評価を行った．横軸は各位置でのデータセットを表している．音声区間検出を用いると，位置 20 cm では 8%，5 m では 6% 認識率が上昇した．音声区間のみを利用した方が，効果が大きい．

3.3.2 各距離，各コードブックサイズに対する距離認識率

Fig. 4 に各距離，各コードブックサイズに対する距離認識率を示す．距離別の評価データそれぞれに対して，6 種類のコードブックサイズ (128, 256, 512, 1024, 2048, 4096) に対する性能を評価した．また，“Ideal” は理想的な場合の結果であり，評価データに音響伝達特性を与えたインパルス応答自体を用い，テンプレートとの照合を行った場合の結果である．

本提案手法での精度は 55 ~ 66% であった．理想的な場合に比べ，10% 程度，精度が低かった．どの位置においてもコードブックサイズが大きくなるほど精度は向上した．これは照合させる音声のパターンがより多く含

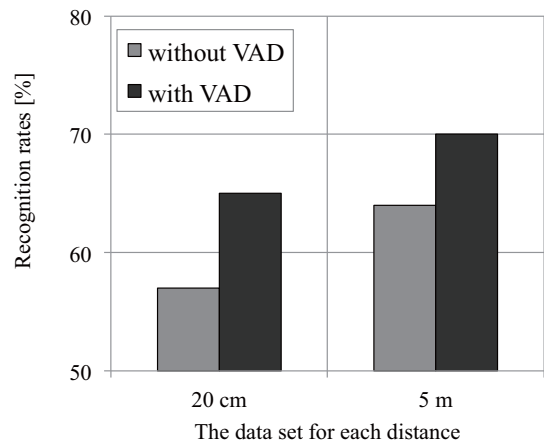


Fig. 3 Distance recognition rates with / without VAD.

まれるためと考えられる．また，4 m で精度が他に比べ高いのは，付近にある柱による反射音が特徴的な特性を与えているためと考えられる．

3.3.3 遠近距離別での距離認識率

近距離 (20 cm, 1 m)，遠距離 (2, 3, 4, 5 m) に分けて結果を再集計したものを Fig.5 に示す．近距離 “Short distance”，遠距離 “Long distance” の評価データにそれぞれに対し，コードブックサイズ 128 ~ 4096 における認識率を左から順に示している．コードブックサイズにより，近距離では 67 ~ 75%，遠距離では 69 ~ 80% の精度が得られた．個別の距離を精度よく推定することは難しいが，当初の目的である音声対話システムが応答すべき距離なのかどうかの判定には利用できる精度と考えられる．

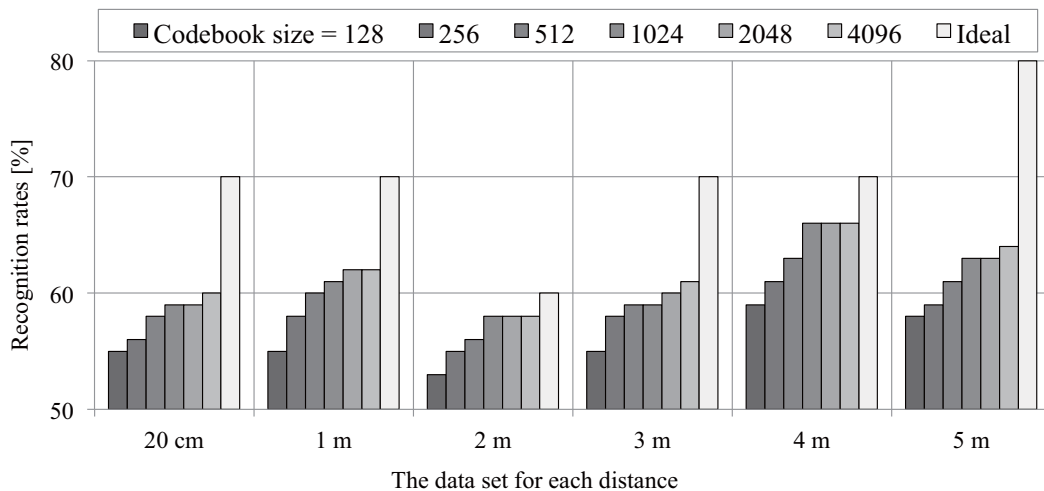


Fig.4 Distance recognition rate for each distance and each code book size.

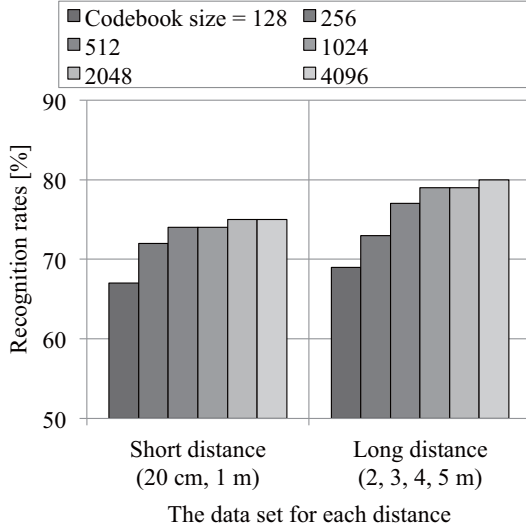


Fig.5 Distance recognition rates for the short distance or for the long distance.

4. 繰り返し歪み推定方法

前節までに検討した手法での問題点は、入力音声のクリーン音声成分 S_t に最も近いクリーン音声セントロイド C_i を見つけるときに、入力音声 X_t 自体を用いているところにある。実際には、入力音声 X_t は歪み H_t を含む。より正確に最も近いクリーン音声セントロイドを見つけるために、 X_t から歪み H_t を取り除く必要がある。

そこで 繰り返し推定することにより精度向上を図る。前節の手法では、平均歪み $\tilde{H}^{(1)}$ が推定された後、推定されたクリーン音声 \hat{S}_t が得られる。この \hat{S}_t をクリーン音声として、最も近いクリーン音声のセントロイドを選択するのに利用する。さらに、もう一度、平均歪み $\tilde{H}^{(2)}$ を推定する。この後、平均歪みの変化が十分小さくなるまで、この処理を繰り返す。これにより、歪みが少なく、よりクリーン音声に近い特徴量で、クリーン音声セントロイドを探索することができ、より正確な \tilde{H} を推定できる。以下に、このアルゴリズムをまとめる。

[繰り返し歪み推定方法]

Step.1 初期化。 $n=1$ 。

Step.2 すべてのフレーム ($t, 1 \leq t \leq T$) に対して、

$\hat{H}_t^{(n)}$ ベクトルを以下のように推定する。

- i. もし $n=1$ なら、 $\tilde{S}_t^{(n-1)} = X_t$ 。
- ii. VQ コードブック内の最も近いセントロイドを新しいクリーン音声 $\hat{S}_t^{(n)}$ とする。

$$\log \hat{S}_t^{(n)} = \arg \min_{\log C_i} \left(\log \tilde{S}_t^{(n-1)} - \log C_i \right) \times \left(\log \tilde{S}_t^{(n-1)} - \log C_i \right) \quad (6)$$

iii. $\hat{H}_t^{(n)}$ を推定する。

$$\log \hat{H}_t^{(n)} = \log X_t - \log \hat{S}_t^{(n)} \quad (7)$$

Step.3 平均歪み $\tilde{H}^{(n)}$ を推定する。

$$\log \tilde{H}^{(n)} = \frac{1}{T} \sum_{t=1}^T \log \hat{H}_t^{(n)} \quad (8)$$

Step.4 $\tilde{H}^{(n)}$ を用いて、クリーン音声 $\tilde{S}_t^{(n)}$ を推定。

$$\log \tilde{S}_t^{(n)} = \log X_t - \log \tilde{H}^{(n)} \quad (9)$$

Step.5 前回の歪み $\tilde{H}^{(n-1)}$ と新たに推定された歪み $\tilde{H}^{(n)}$ との差を計算する。

$$D = \left(\tilde{H}^{(n)} - \tilde{H}^{(n-1)} \right) \cdot \left(\tilde{H}^{(n)} - \tilde{H}^{(n-1)} \right) \quad (10)$$

Step.6 もし、 $D < \epsilon$ (ϵ は小さな正の数) であれば、終了する。そうでなければ、 $n=n+1$ として Step.2 へ行く。

最後に、平均歪み $\tilde{H}^{(n)}$ が得られた後、これとテンプレートとを照合し、最も近いテンプレートが示す位置を推定距離とする。

5. 実験 2

5.1 実験内容

繰り返し歪み推定なし / ありの場合に対する下記の評価を行った。実験条件は 3 節と同様である。ただし、コードブックサイズが小さいと十分な性能が得られないのがわかったため、本実験で用いたコードブックサイズは、1024, 2048, 4096 の 3 種類とした。

(1) 繰り返し推定なし / ありにおける各距離に対する距離認識率

繰り返し歪み推定を用いない場合、用いる場合を、各距離のデータセットに対して性能評価した。

(2) 繰り返し推定なし / ありにおける遠近距離別での距離認識率

3 節と同様、2 つのクラスに距離を分け、繰り返し歪み推定法を用いない場合と用いた場合の比較を行った。

5.2 実験結果

(1) 繰り返し推定なし/ありにおける各距離に対する距離認識率

Fig. 6, 7, 8 に、それぞれコードブックサイズ 1024, 2048, 4096 における、繰り返し歪み推定を用いない場合 (without iteration), 用いる場合 (with iteration) に対する距離認識率を示す。提案する繰り返し歪み推定手法により、どの距離、どのコードブックサイズでも 1 ~ 3% の精度向上が見られた。特に、コードブックサイズ 4096 では、60 ~ 69% の精度が得られた。

(2) 繰り返し推定なし/ありにおける遠近距離別での距離認識率

Fig. 9 に、繰り返し歪み推定法を用いない場合と用いた場合の遠近距離別での性能比較を示す。近距離 "Short distance", 遠距離 "Long distance" の評価データそれぞれに対して、コードブックサイズ 1024, 2048, 4096 において、左側の 3 本は繰り返し推定を行わない場合 (Fig. 5 で該当するコードブックサイズと同じ結果), 右側の 3 本は繰り返し推定を行った場合の認識率を示している。どの距離、どのコードブックサイズでも 2 ~ 3% の精度向上が見られた。認識精度は、コードブックサイズ 4096 を用いると、近距離で 77%, 遠距離で 82% が得られた。

6. まとめ

本研究では、単一マイクロホンにおいて、VQ コードブックを用いた発話者までの距離推定方法を提案した。加算性の雑音は抑圧できると仮定した上で、入力音声とクリーン音声の周波数特性差から音響伝達特性を推定し、あらかじめ、推定しておいた距離ごとの音響伝達特性テンプレートとの比較で、最も近いテンプレートの位置を推定された距離とした。クリーン音声の特徴量は、あらかじめ、クリーン音声の学習データから作成した VQ コードブックのセントロイドで、入力音声特徴量と最も近いものとした。距離ごとの評価では、60 ~ 66% の精度が得られた。また、音声対話システムのような用途を考えると、必ずしも細かい距離が必要ではないため、近距離と遠距離に分けて、性能比較した。近距離で 75%, 遠距離で 80% の精度が得られた。

さらに、精度を上げるために、繰り返し歪み推定手法を提案した。一旦、推定した平均歪みでクリーン音声を推定し、それにより VQ コードブックから最も近いセントロイドを求めることで、入力音声からより正確にクリーン音声の推定ができる。それを用いて、より正確な音響

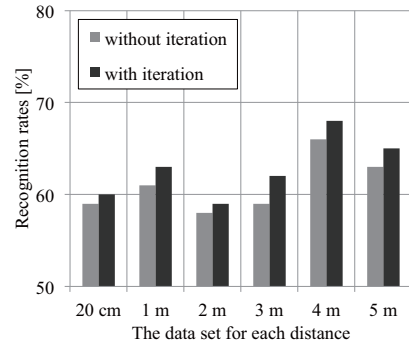


Fig.6 Distance recognition rate using the repeated estimation for the codebook size, 1024.

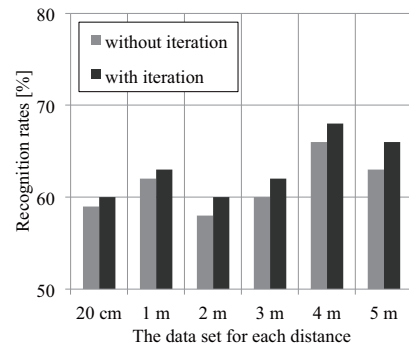


Fig.7 Distance recognition rate using the repeated estimation for the codebook size, 2048.

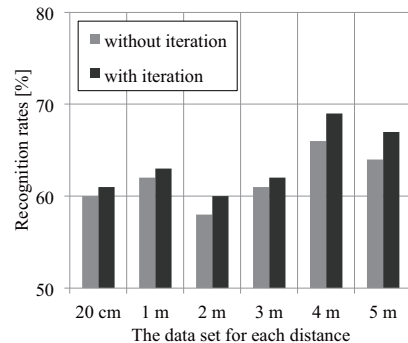


Fig.8 Distance recognition rate using the repeated estimation for the codebook size, 4096.

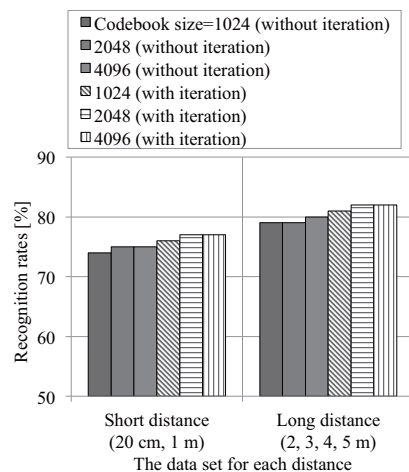


Fig.9 Distance recognition rate for the short distance or the long distance using the repeated estimation.

伝達特性を推定できる．さらに，この処理を繰り返し，より精度の高い音響伝達特性を得ることができる．距離ごとの評価では，60～69%の精度が得られ，繰り返し推定方法により，1～3%の向上が得られた．また，遠近距離別での評価では，2～3%の精度向上が得られ，近距離で77%，遠距離で82%の精度が得られた．

今後の課題としては，音声特徴量に関する検討が必要である．今回は，周波数特性そのままを表すため，256次元対数スペクトルを用いたが，より適切な特徴量を検討する．また，周囲雑音の影響に対する評価が必要である．インパルス応答を得るため，比較的静かな条件で収録を行ったが，実際には，日中，人の出入りが多く，騒がしいときも多い場所である．今後，適切な雑音抑圧手法を用い，雑音抑圧した後，同様な推定を行い，どの程度の性能が得られるか，検討していく予定である．

謝辞

本研究はJSPS 科研費 23500230 の助成を受けた．

参考文献

- [1] M.S.Brandstein, H.F.Silverman, "A practical methodology for speech source localization with microphone arrays," Computer Speech & Language, vol.11, no.2, pp.91-126, 1997.
- [2] P.Bergamo, S.Asgari, H.Wang, D.Maniezzo, L.Yip, R.E.Hudson, K.Yao, D.Estrin, "Collaborative sensor networking towards real-time acoustical beamforming in free-space and limited reverberance," IEEE Trans. Mobile Computing, vol.3, issue 3, pp.211-224, 2004.
- [3] F.Asano, H.Asoh, T.Matsui, "Sound source localization and separation in near field," IEICE Trans. Fundamentals, vol.83, no.11, pp.2286-2294, 2000.
- [4] S.Esaki, K.Niwa, T.Nishino, K.Takeda, "Estimating sound source depth using a small-size array," Proceedings of ICASSP 2012, pp.401-404, Mar., 2012.
- [5] R.Takashima, T.Takiguchi, Y.Ariki, "HMM-based separation of acoustic transfer function for single-channel sound source localization," ICASSP2010, pp.2830-2833, Mar., 2010.
- [6] 李 津, 實廣 貴敏, "音響モデルを用いた発話者までの距離推定," 平成 23 年度 電気関係学会東海支部連合大会, Sept., 2012.
- [7] 李 津, 實廣 貴敏, 武田 一哉, "単一マイクロホンによる音響モデルを用いた発話者までの距離推定," 日本音響学会 2013 年春季研究発表会, Mar., 2013.
- [8] K.Ito, M.Yamamoto, K.Takeda, T.Takezawa, T.Matsuoka, T.Kobayashi, K.Shikano, S.Itahashi, "JNAS : Japanese speech corpus for large vocabulary continuous speech recognition research," Journal of the Acoustical Society of Japan (E) 20(3), pp.199-206, 1999.

創作したオブジェへのプロジェクションマッピング 《私の左眼は何を見ている》を事例として

杉森順子*

(2016年9月30日受理)

A case of Projection Mapping to Sculpture What is my left eye looking at?

Junko Sugimori

(Received September 30, 2016)

概要

本論は、創作したオブジェにプロジェクションマッピングを行った作品《私の左眼は何を見ている》を事例として、その制作手法や工程を明らかにすることを目的としている。この作品は、筆者自身の左眼を撮影した情報をもとに白色のオブジェを制作し、その形状に合わせて、実写映像とCGによる映像を投影したインスタレーションである。そのコンセプトは、視覚から得た情報が記憶され、脳の中で様々な情報が変化しながら繋がることで新たなインスピレーションを得て、創作物が生まれる様子を表現することである。従来のプロジェクションマッピングの作品事例では、建築物などのように既存の立体物を投影対象とすることが多い。しかし、本作品では、オリジナルのオブジェを作成し、そのオブジェをスクリーンとして投影を行う手法で制作を行った。

Abstract

“What is my left eye looking at?” is the installation that made by Projection Mapping based on the sculpture of the left eye. In this paper, the production method and process of the artwork is clarified. A white object is created adjusting by author's left eye took with video cameras, and video images and CG image was taken on the white object using Projection Mapping. The concept of this art work is to express information about the creation of information obtained from the vision, which is memorized, changed and connected each other in the brain in order to acquire new inspiration. In the case of conventional projection mapping, images are projected to existing three-dimensional objects, like buildings in many cases. As to this art work, an ordinal object is created and images are projected to this created object as a screen.

キーワード：プロジェクションマッピング，メディアアート，映像インスタレーション

Keywords: Projection Mapping ,media art ,video installation

1. 研究目的

本論では、筆者が制作した《私の左眼は何を見ている》[Fig.1, 2]の作品事例をもとに、創作したオブジェ¹に、プロジェクションマッピングを行った作品の制作手法と、展覧会で展示するまでのプロセスについて、明らかにすることを目的とする。本作品は、実写映像をもとに

オブジェを制作し、そのオブジェにプロジェクションマッピングを行った映像インスタレーション²である。

従来のプロジェクションマッピングの作品事例では、建築物などのように、既存にある立体物を投影対象とすることが多い。しかし、本作品では、オリジナルのオブジェを作成し、そのオブジェをスクリーンとして投影

* 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, Nishihasama-cho, Gamagori 443-0047, Japan

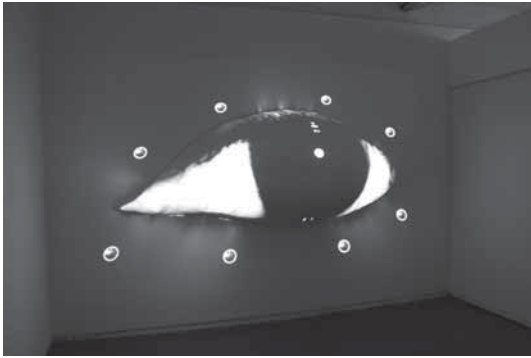


Fig.1 「私の左眼は何を見ている」壁掛型展示
愛知県立芸術大学サテライトギャラリー



Fig.2 「私の左眼は何を見ている」床置型展示
生命の海科学館「SAISEI展」

を行う手法を採った。作品はまず、250×100×60cmの左眼の形状をしたオブジェを作成する。次に、実写映像とCGを用いて投影映像を制作し、その形状に合わせてプロジェクションマッピングを行った。投影対象に自作のオブジェを用いることで、立体物と映像を融合させた新たな表現手法を目指している。

2. 研究の背景

2-1. プロジェクションマッピング

近年、映像表現手法のひとつとして、プロジェクションマッピングが社会から注目されている。プロジェクションマッピングとは、Projection（投影）と Mapping（対応付け）を組み合わせた造語で、立体物の形状に合わせて映像を変形し、投影する手法である。

2012年9月に東京駅丸の内駅舎保存・修復完成記念イベントとして行なわれた、映像スペクタクルショー「TOKYO STATION VISION」³が、プロジェクションマッピングという言葉は広く社会に知られる転機となっ

た。アンケート調査⁴によれば、10代から60代以上まで幅広い年代の62.1%が、プロジェクションマッピングを「知っている」「聞いたことがある」と回答している。なかでも、10代、20代は7割を超えており、認知度は高い。

日本ではプロジェクションマッピングやプロジェクション・マッピング、3Dプロジェクションマッピングという呼び方が定着しているが、欧米ではビデオマッピング (Video Mapping)、あるいはビジュアルマッピング (Visual Mapping) などとも呼ばれている。なかでも建築物への投影は、アーキテクチャルマッピング (Architectural Mapping) と呼ばれ、とりわけ人気の高い映像コンテンツである。日本でも近年、大阪城、二条城、会津若松城の城壁や東京ディズニーランド、ユニバーサル・スタジオ・ジャパンなどで建築物の外壁に投影する作品が数多く制作され、話題となった。

しかし、プロジェクションマッピングは必ずしも最新の手法では無いことは、十分に知られてはいない。プロジェクションマッピングの始まりには諸説があり、いまだ明らかではないが、20年以上前から行なわれてきた技法である。

筆者自身も映像プロデューサーと制作を担当し、2009年5月に開館した、静岡市治水交流資料館「かわなび」⁵での常設展示映像のコンテンツ制作に、プロジェクションマッピングを活用している。同館では、5台の業務用プロジェクタを連動させて、床に設置してされた大型立体白地図や壁面に映像投影を行っている [Fig.3]。

このように、以前から映像制作者が行なってきた手法が、近年急速に制作数を伸ばしている。その背景には、技術の進歩によってプロジェクタやPCなどの投影に関わる機器、映像を制作するためのCGや映像編集、投影



Fig.3 床面大型立体白地図と壁面へのプロジェクションマッピング
静岡市治水交流資料館「かわなび」(写真提供：丹青社)

するためのソフトウェアなどの開発が進み、大型の建築物にでも投影できる制作環境が整ってきたことがあげられる。

2-2. 民生用プロジェクタ機器の変遷

プロジェクションマッピングでは、投影する対象物の大きさ、環境、表現内容、予算などを考慮して、プロジェクタの機種を選択する。使用するプロジェクタは、民生用の2,000 lm程度の明るさのものから、業務用の40,000 lmと高照度のもので多様な機種が用いられ、価格も数万円から二千万円程まで様々である。屋外で、巨大な建築物などに投影する大規模な上映イベントの場合は、高照度の業務用プロジェクタが複数台用必要となり、費用が掛かる大きな要因のひとつとなっている。筆者の制作した事例のなかでは、トヨタ産業技術館⁶や静岡市治水交流資料館などで、業務用プロジェクタを用いて投影を行っている。

一方で個人などで制作するような小規模な作品の場合は、プレゼンテーションなどに使われている民生用の機種が活用されている。この背景には近年、民生用プロジェクタが安価になったことで、個人でも活用し易い環境が整ってきたことがある。

ビジネスプロジェクタ市場でトップシェア⁷のセイコーエプソン社の機器を見ると、1994年に初めて発売したELP-3000は、定価898,000円⁸であった。照度も250 lmで、現在は3000 lm程度の明るさの機器が主流である事を考えると、暗いものであったことがわかる。2002年に発売されたELP-730(2,000lm)は1.9kgと軽量で現行のパイルプロジェクタに近い性能であるが、定価548,000円⁹であった。現在では、より高照度のEB-X31(3,200 lm)の販売価格が79,000円である。定価と販売価格であるため、単純な比較はできないものの、20年あまりの間に急速に価格が低下し、安価になっていることがわかる。また、高照度化はもとより、画質、自動台形補正、コントラスト比などの機能も大幅に向上している。

20年前には、映像制作者が作品を制作したいと望んでも、コストの面から個人では活用が難しかった。しかし、技術やデバイスの発展によって実現できる環境が整ったと言える。また、会社や学校でも日常的に活用する機会が増え、プロジェクタは身近な機器となっている。本作品でも、3,000 lmの民生用プロジェクタを活用して、白色オブジェ映像に投影を行い、展示を行っている [Fig.1, 2]。

3. 作品《私の左眼は何を見ている》

3-1. 展覧会「SAISEI 再生・最盛・彩醒」展

この《私の左眼は何を見ている》は、筆者の作品展として、蒲都市立生命の海科学館 [Fig.4] の企画で開催された「SAISEI 再生・最盛・彩醒展 融合するアート&テクノロジー～」のために制作された。同展では、約215 m²の会場内に、立体物と映像を融合して制作した、メディアアートなどの5作品が展示された。同時に、作品制作の技術に関連した小沢慎治名誉教授（画像工学）の研究内容についてもパネル展示が行なわれた。

一般的にこのような展覧会では、完成した作品だけを展示することが多く、作品制作の過程で、どのような技術が使われているかを明示することは、あまり行われない。しかし同展では、科学館で開催する作品展であることを考慮して、制作の裏側にある技術的な背景や制作手法をあわせて公開するという新たな試みを行った。

2か月間の会期中には、年齢層も、幼児から年配者まで様々な11,000人以上の来場者があり、1999年の開館して以来、最高の入場者を数えている。また、新聞3紙、広報誌3紙、ケーブルテレビによる報道取材も行われた。

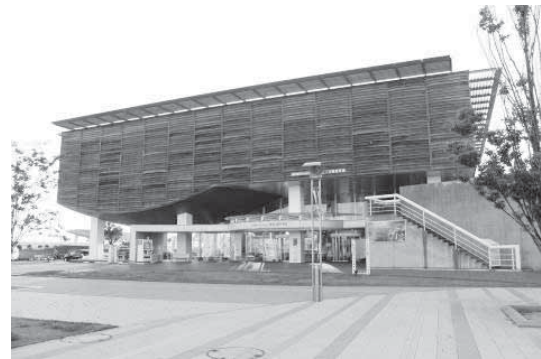


Fig.4 蒲都市生命の海科学館

12月には、愛知県立芸術大学サテライトギャラリー（名古屋市）において、同作品の展示を行った。ここでは、オブジェを壁に掛けて、正面からプロジェクタで投影する手法で展示を行い、映像と立体との融合による、新たな表現の可能性を広げる試みを行っている [Fig.1]。

3-2. 制作の流れ

次に蒲都市生命の海科学館での展示事例 [Fig.2] をもとに、作品制作の手法と展示に至るプロセスについて解説する。

作品の制作工程は、 作品構想・企画、 投影設計、

左眼オブジェ制作， CG， 投影映像制作， 設置・マスク画像の抽出 マスク画像と投影映像を合成・投影， 完成， という流れで行なった [Fig.5] .

筆者は，テクノロジーを見せるために作品を制作するのではなく，表現したい内容にもとづいて，それを実現するために必要な技術を用いるものと考えている．そのため，制作作業に着手する前に行なう作品で何を表現するのかというコンセプトの構想は，最も重要な工程である．本作品でも，まず何を表現するのかを試行錯誤しながら熟慮したあとに，投影対象となるオブジェを制作した．次に，プロジェクタで投影する映像を制作し，展示会場の設置状況にあわせて，オブジェの形状からマスク画像を作成する．そのマスク画像と実写映像やCGから作成した投影映像と合成し，オブジェの形状に合わせてプロジェクションマッピングを行うというプロセスで行った．



Fig.5 作品制作の流れ

4. 制作工程

4-1. 作品着想と企画

本作品のコンセプトは，視覚や刺激から得た情報が新たなイメージを生み出す過程を視覚化し，自らが思考する過程を作品として表現することである．作品では，目を通じて得た情報が脳の中で，カオス図形のように次々と形を変えて感性が増幅しながら変化していき，やがて新たな創作物の誕生に結び付けられている．

本作品の制作にあたり，筆者はまず自分自身が何からインスピレーションを得て，どのように思考し，創作し

ているのか考察することから始めた．これまでに，様々な作品やプロジェクトを制作してきたが，クリエイティブな発想やイメージを生み出すなかで，特に視覚による情報や刺激が重要で，無意識のうちに影響されてことに気づいた．筆者にとって創作や表現することは，意識の奥深くにある，わずかに光る何かを見つけ出すことに似ている．蜘蛛の糸のように細く繊細なイメージを，意識が途切れないように注意深く，少しずつたぐり寄せていくかのようなのである．今にも消え入そうなその光に向かって試行錯誤を繰り返す過程は，長くまた孤独な作業の連続である．これまでの記憶と視覚情報が密接に関係しながら，脳の中で新たなイメージが生み出されていく．本作品では，自身が思考し創作するその過程そのものを作品化するという発想が生まれた．

また「左眼」のオブジェは，記憶と従属の象徴である．筆者の利き目は右眼であり，左眼は常に右眼に従うようにして世の中の事象を見てきた．右眼に影のように寄り添う左眼は，存在が希薄な自分自身の象徴でもある．左眼によって長い間記憶されて取り込まれた情報は，やがて脳のなかで増幅し繋がり，変化しながら離れてはまた繋がり，刻々と形を変えていく．そして，蓄積された情報からある瞬間にインスピレーションを得て，新たな創作物として生み出されていく．その過程を，オブジェと映像を融合させることで表現した．

4-2. 投影設計

プロジェクションマッピングで投影をおこなうための事前準備として，投影設計が必要である．これは，使用するプロジェクタが決まっていれば，その性能や投影サイズから，プロジェクタを設置する位置を事前に計算し，距離からオブジェの設置位置と投影範囲を決める，作品の内容，投影サイズ，投影環境，距離，プロジェクタの表示性能や照度などを考慮しながら，何をどのよう投影するのかの設計を行う．

同展では，科学館から提供された会場の図面をもとに，筆者自身で壁面や柱の位置，天井高などを実測して図面を作成した．これは，展示場所によっては，施工されたあとに改修などが行われている場合もあり，実際の数値と異なる場合があるため実測を行う必要がある．それをもとに，展示する作品の点数，作品を区切る壁の配置などの設計や作品レイアウト図の作成を行った．また，天井高，電源からの配線，入場者の導線，設営費用，既存の柱や壁の利用など様々な点も考慮しながら，作品を配置するために綿密な展示計画を事前に行っている．同展の場合は，多くの来館者が訪れることが予想されたため，

できるだけ動線を妨げないように、プロジェクタは、天井から下向きに固定して、オブジェを床に配置する展示手法とした。[Fig.6]

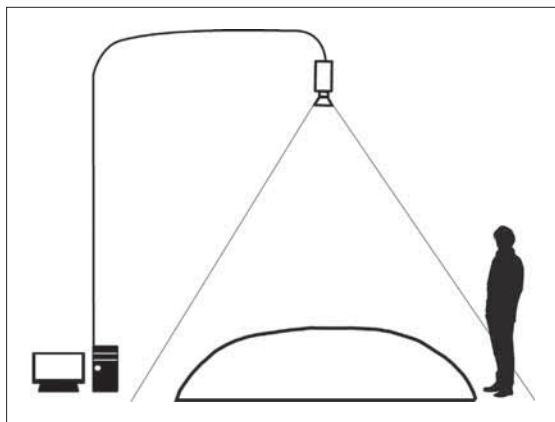


Fig.6 機材とオブジェの配置図

4-3. 左眼オブジェの制作

本作品は、発泡ウレタンで白色のオブジェを作成し、そのオブジェをスクリーンとしてプロジェクションマッピングを行った作品である。まず、筆者自身の左眼を撮影して、その実写映像をもとにオブジェを創作した。

(1) 左眼の撮影と輪郭トレース

左眼の実写映像を撮るために、眼球に丸型のキャッチライトを写り込ませて、デジタルハイビジョンビデオカメラで撮影を行った。キャッチライトとは、瞳に写り込ませる白い光のことで、被写体に生き生きとした表情を出す効果があるため、ポートレート写真の撮影などで使われる手法である。本作品でも眼の立体感や輝きを出すため、箱に丸い穴をあけて瞳に丸く光をあて、キャッチライトをつくり撮影を行った [Fig.7]。

次に、撮影した実写映像をノンリニア編集機に取り込み、静止画を出力する [Fig.8]。その画像から Adobe Illustrator を使って目の輪郭の形をトレースし、左眼の正面図を作成した [Fig.9]。

(2) オブジェの模型と図面作成

左眼の輪郭をもとに、白色の粘土を使い幅 10cm の大きさの左眼オブジェの模型を作成した [Fig.10]。模型は、左眼を忠実に再現することが目的ではなく、オブジェとしての形状の美しさやバランス、ボリューム感を確認するために行う工程である。出来上がった模型の形状を参考に 25 倍に拡大して 250×100×80cm の大きさの三面図を作成した。



Fig.7 眼の撮影機材

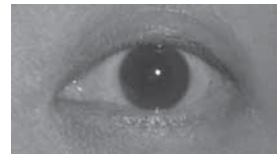


Fig.8 撮影した左眼の映像



Fig.9 トレースした輪郭



Fig.10 作成した模型

(3) 模型をもとにオブジェ制作

三面図の寸法に合わせて、小刀で発砲ウレタンの削りだしを行い、オブジェの制作を行った [Fig.11]。背面には、床置型展示と壁掛型展示の両方で設置ができるように考慮し、あらかじめオブジェの背面に金物を埋め込んだ。

制作途中では、実際の投影距離から、プロジェクタでグリッド映像を投影して、細かな凹凸や曲面の角度によって映らない部分がないかを確認しながら、削りだしやパテ埋めをして細かな形状の修正を行わない、滑らかな曲面に整えた [Fig.12, 13]。



Fig.11 発砲ウレタンの削り出し

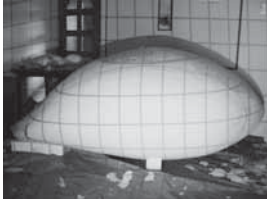


Fig.12 グリッドを投影して確認



Fig.13 映りにくい箇所の修正

また、オブジェが映像のスクリーンになった場合は、どのような効果が得られるかを確認し、映像内容の検討を行った。また、科学館館内は観客の誘導や防災上の観点から、真暗な空間にすることができない。そのため、館内がある程度明るいことが予想される。事前の投影実験の結果から、こうした明るい状況でも、実写映像、CGいずれも使用できる画質が得られることが確認できた [Fig.14]。



Fig.14 映像効果の確認

オブジェの形状が出来たところで、衝撃や落下などで変形することが無いように、ウレタンの表面にFRP樹脂を塗り補強して強度を高め、オブジェを作成している [Fig.15]。

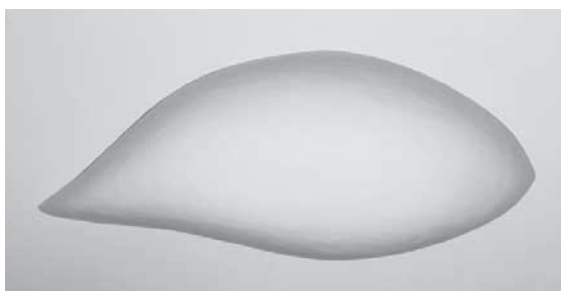


Fig.15 完成した左眼のオブジェ

4-4. CG, 投影映像制作

オブジェの制作と平行しながら、投影する映像の制作を行った。情報やイメージ、思考といった抽象的で、形の無いものを映像化するために、Autodesk社の3dsmaxを用いて、直線や曲線などからCGアニメーションを作成した。また、自身の脳なかで、知識や思考、イメージがつながり、新しい発想や作品が生まれていくことを表すために、Visual Basicを用いて、ジュリア集合を図示したものをベースにCG映像を制作した。このジュリア集合とは、 $Z_{n+1}=Z_n^2+C$ で表される漸化式において、複素平面上の各点が収束するか発散するかを判定し、収束領域と発散領域を表示したものである。

ここでは、 Z は複素平面上の座標、 C は初期値、また複素平面上の座標のうち、実数部を x 座標、虚部を y 座標として、表示している。

プログラムでは、 $C=a+bi$ (i は複素数)とし、 a と b を時間とともに変化させることで、図形の変化を連続的に表現させることが可能である。また、ジュリア集合を用いると、触覚のように伸びる領域が他の領域と融合しながら、生命体のように変化していく。その様子から、あかたかも自身の脳なかで知識やイメージが他とつながり、新しい発想や作品が生まれていくことを表している [Fig.16]。

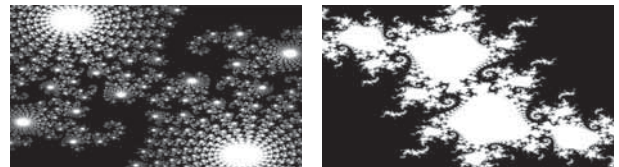


Fig.16 ジュリア集合を用いた投影映像

眼からの情報が、心のなかに取り込まれ、拡散や変化を繰り返すことの動きをCGで表現している。また、ジュリア集合を用いた映像も作成し、撮影した左眼の実写などを組み入れながらノンリニア編集機で編集作業を行い、投影映像を制作した。その映像は、投影設計の計算から得られた、プロジェクタの照射距離に合わせてテスト投影を行い、半球状のオブジェに投影された状況の効果を想定しながら、映像の修正を重ねた [Fig.17]。



Fig.17 プロジェクタ位置を想定したテスト投影

4-5. 設営，マスク画像の抽出

作成したオブジェは，Fig.6のように展覧会会場に床置きして設置を行った．プロジェクタは映像の投影される範囲を確認しながら，その位置に合わせて，天井から下向きに固定した．事前の投影設計の段階で，プロジェクタの性能から，投写距離とスクリーンサイズを計算から割り出しているが，その想定どおりに設置することができた．

次に，マスク自動生成プログラムを用いて，画像からオブジェの形状抽出を行った¹¹．プロジェクションマッピングを行うためには，任意の部分だけに投影できるように，その形状に合わせたマスク画像が必要である．

そのためにまず，天井のプロジェクタからオブジェに，形状抽出の基準となるグリッド画像を投影する [Fig.18, 19] ．

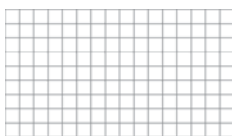


Fig.18 グリッド画像



Fig.19 上部からグリッド投影

次にプロジェクタとほぼ同じ位置から，デジタルカメラで撮影する [Fig.20] ．その画像をもとに，マスク抽出プログラムでマスクを生成し，その画像をさらにプロジェクタ画像へと変換を行う．プロジェクタ画像とは，オ

ブジェに投影された結果が立体の形状に合うよう，予め変形して置く画像のことである．これは投影したときに映像とオブジェが一致するように歪みを補正するための作業で，この変換を行わない場合は正確にオブジェに合わせて投影をすることが出来ない．

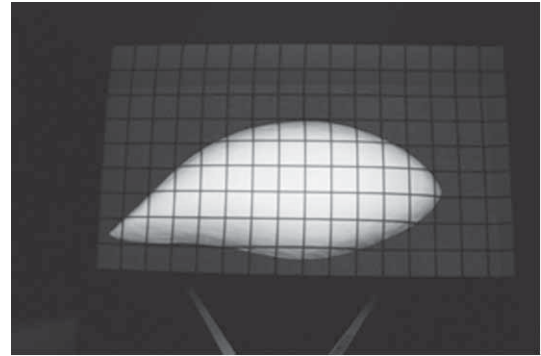


Fig.20 プロジェクタ位置から撮影

このように作成されたマスク画像 [Fig.21] と，あらかじめ制作しておいた実写映像と CG で制作した映像をノンリニア編集機で合成し，投影映像を制作した [Fig.22] ．

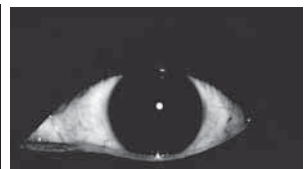
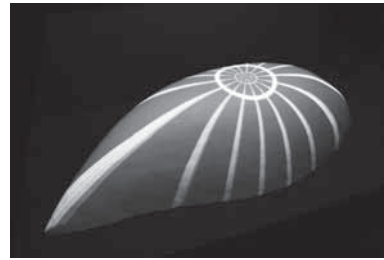


Fig.21 作成されたマスク画像 Fig.22 マスクと合成した映像

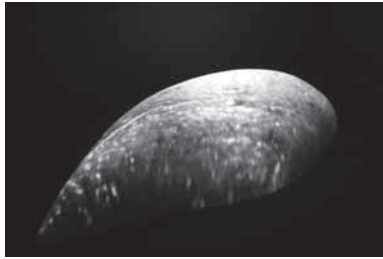
4-6. 公開

展覧会会場では，PC から送出した投影映像をオブジェに映して，調整作業を行う．プロジェクションマッピングでは，オブジェと映像が，ほんのわずかにずれても，光が立体からはみ出し，映像効果が損なわれてしまう．また，オブジェの形状と投影映像を一致させ投影すると，オブジェ自体が発光しながら，様々に変化しているかのようにも見える効果があった．そのため，現地でマスク画像が完全に一致するように 1pixel 単位で最終調整を行い，映像を完成させたのち一般公開を行った [Fig.23] ．

作品名： 私の左眼は何を見ている
 サイズ：250×100×60cm(オブジェ)
 制作年：2013年
 素材：発泡ウレタン，FRP
 機材：PC，プロジェクタ(3,000ルーメン)
 映像：5分46秒
 展示：蒲都市生命の海科学館(床置展示)
 愛知県立芸術大学ギャラリー(壁掛展示)



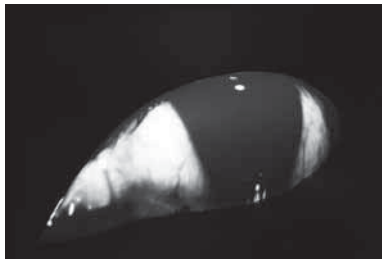
1分41秒



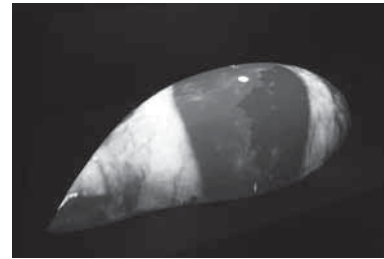
0分7秒



2分13秒



0分19秒



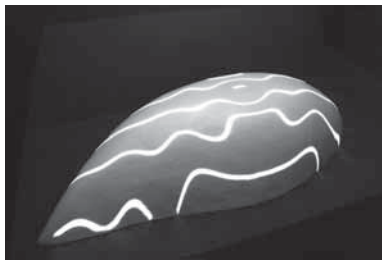
2分44秒



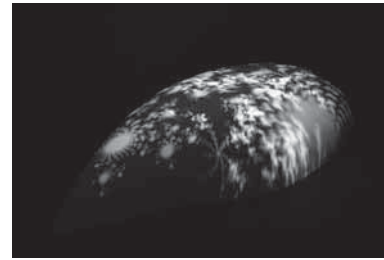
0分26秒



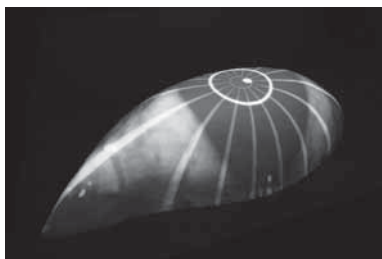
3分41秒



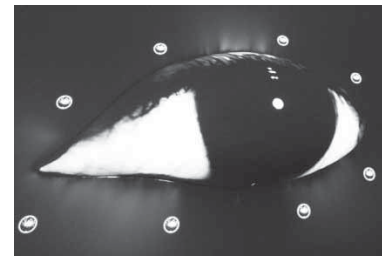
0分57秒



4分12秒



1分34秒



5分37秒

Fig.23 私の左眼は何を見ている

5. 手法の応用

同手法を用いて、複数のオブジェに投影する新たな作品「逡巡」[Fig.24]を制作した。これは、4個の50×20×12cmサイズの左眼オブジェを創作し、壁面に縦に並べて固定し、そのオブジェと壁面にプロジェクションマッピングを行った作品である。

4つの目は、ひとつが自分自身を意味し、3つの目は他者を比喻している。自身が、他者たちに振り回され、苦悩し、次第に精神が混乱していく様子を表現した。こうした作品のなかに、筆者自身の心境を映し出している。

作品名： 逡巡
サイズ：320×260×12cm
制作年：2015年
素材：発砲ウレタン、FRP
機材：PC、プロジェクタ(3,000ルーメン)
手法：壁掛け立体造形、
壁面へのプロジェクションマッピング
映像：3分

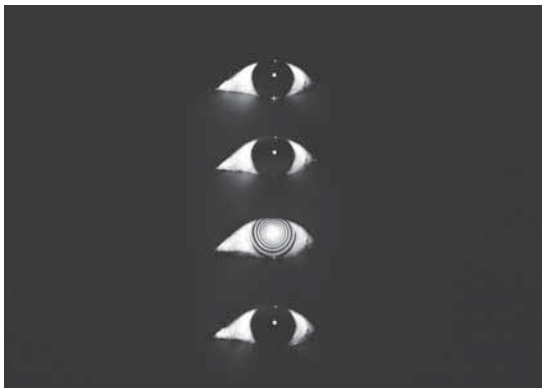


Fig.24 逡巡

6. 考察と今後の課題

本論では、プロジェクションマッピングの投影対象は既存の立体物では無く、新たに創作したオブジェに行い、その制作手法を明らかにした。

本作品の制作過程から、映像インスタレーションの作品は、オブジェとプロジェクタを現地で設置してからマスク画像を生成するため、その作業に時間が掛かるという問題点が明らかになった。また、壁掛け事例の展示期間中には、鑑賞者がプロジェクタに触れたために、わずかではあるが動いてしまい、オブジェと映像にズレが出るという問題が生じた。こうした問題点を解決するため

にも、リアルタイムでマスク画像が生成され、動きに追従できることが必要である。これを今後の課題として、更に研究を進めていきたい。

また、実写映像から制作したオブジェにプロジェクションマッピングを行うと、平面のスクリーンに投影するよりも立体感が強調され、新たな表現手法が生まれる可能性を感じた。今後、オブジェと平面(床面、壁面)のそれぞれについて、どのような映像が効果的なのかを続けて研究することで、映像と立体物の融合による空間表現の検証を行っていきたい。さらに、本研究の成果を発展させ、研究と制作の両側面から進めることで、新たな映像表現を見出していきたいと考えている。そして、アートやデザインから産業まで、社会のさまざまな分野でプロジェクションマッピングが活用され、斬新な空間表現やコンテンツなどが、生み出されてくることを期待している。

謝辞

本作品の制作に際して、マスク生成プログラム開発者の小沢慎治名誉教授に、多大なご協力を頂きました。また、ジュリア集合映像の制作では荒川俊也教授、展示では蒲都市生命の海科学館、小堤製作所、愛知工科大学にご協力頂きました。皆様のご厚意に感謝し、心より御礼申し上げます。

(Endnotes)

- 1 オブジェ(仏 objet)とは現代美術で一般に、彫刻ではない石、木、金属で作られた作品のこと
- 2 インスタレーションとは、展示空間を含めて作品とする手法
- 3 「TOKYO STATION VISION - トウキョウステーションビジョン-」の開催について、東日本旅客鉄道株式会社プレスリリース、2012.9.11
- 4 プロジェクションマッピングに関する調査、東京工芸大学調べ、2015.1
- 5 静岡市治水交流資料館「かわなび」、静岡市駿河区大谷2丁目24-11
- 6 杉森順子、トヨタ産業技術記念館プロジェクションマッピング「未来へ続く夢」、映像情報メディア学会技術報告39(14)、pp11-14、2015.03.07
- 7 1995～2014年のプロジェクター国内販売台数、富士キメラ総研調べ
- 8 EPSON インフォメーションセンターからの回答、2016.11.18
- 9 エプソンビジネスプロジェクタ モバイルユースカタログ CLELBLE1B(2003.5.26)
- 10 エプソンダイレクトショップ調べ、2016.11.14
- 11 蒲都市立生命の海科学館「SAISEI 再生・最盛・彩醒」展紹介記事、中日新聞、2013.7.20 朝刊

三角管上に置かれた氷の接触融解解析

椎名 保顕 ^{*1}

(2016年9月30日受理)

Analysis of Close Contact Melting of Ice on Triangular Cylinders

Yasuaki Shiina ^{*1}

(Received September 30, 2016)

Abstract

Close contact melting of solid phase on hot triangular cylinders horizontally arranged in line was studied analytically. Momentum and energy equations were treated on the assumption that nonlinear term in the momentum equation can be neglected because of low velocity in thin liquid layer between two surfaces of the cylinders and the solid phase. Momentum and energy equations were integrated based on the approximation that temperature profile in the liquid layer can be expressed by polynomial function. Functional correlation between the height of a solid phase and time was obtained.

The results show that the melting rate is high at the first stage of melting, and it gradually decreases as time passes. It is also shown that the melting time decreases with decrease in the length of the side length and decrease in the vertical angle.

Keywords: Close contact melting, Triangular cylinder, Melting, Phase change, Vertical angle, Heat transfer Analysis

1. まえがき

固液相変化潜熱を利用した潜熱蓄熱の実用化には、相変化時の伝熱促進がきわめて重要である。現在、潜熱蓄熱が一部実用化されている氷蓄熱においては、従来行われてきた伝熱面に氷を固着させて氷を作る静的方法から、水溶液や過冷却を利用して氷を水や水溶液と共存させる動的方法などの方法が工夫されてきている。一方、融解時には水の自然対流が利用できるため、凝固時より伝熱特性を高めることは可能であるが、伝熱特性が大きく改善されるとは言いがたい。この場合、接触融解の効果が期待される。

接触融解は固相と伝熱面が非常に薄い液層を介して接触し、融解する現象である。接触面において固相は伝熱面からの熱を受けて融解し、融解した液層は固相の自重により排出される。接触融解の研究は近年活発に行われている。斉藤ら⁽¹⁾⁽²⁾、Bareissら⁽³⁾、Bahramiら⁽⁴⁾、Prasad

ら⁽⁵⁾、Fominら⁽⁶⁾は平板上や円柱や球内あるいは楕円カプセル内の氷の接触融解を取り扱い、実験と解析の比較を行っている。また Emermanら⁽⁷⁾、Moallemiら⁽⁸⁾⁽⁹⁾は固相上に置かれた加熱球が固相を融解しながら沈降する場合の挙動を取り扱っている。また、接触融解の伝熱促進の観点から、斉藤ら⁽¹⁰⁾は伝熱面に放射状に小さな溝を掘り、伝熱面を分割するとともに、融解液が溝を流れて排出できるようにして接触融解特性を測定し、2倍程度の伝熱促進効果を得ている。

これらの研究から示されたことは、接触融解では液層厚さは非常に薄く、熱伝導が支配的伝熱機構となるため伝熱促進のためには液層厚さを薄くすることが非常に重要であるということである。このことから、著者らは、液層厚さを小さくするために伝熱面として発泡金属を使用することを考え、気孔率約0.96の発泡ニッケルを用いて実験を行った⁽¹¹⁾。その結果、氷と発泡金属の接触

^{*1} 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 System Engineering, Faculty of Engineering, Aichi University of Technology, 50-2 Manori, Nishihama-cho, gamagori, 443-0047 Japan

点に置いて伝熱特性は非常に高くなるが、接触面積が小さいため融解時間は滑らかな水平伝熱面より大きくなる事が示された。そこで、著者らは、水平円管を配列した伝熱面を考え、接触融解実験を行うとともに、解析と実験を行った⁽¹²⁾⁽¹³⁾。この場合、伝熱面積は滑らかな平板より大きくなるのみならず、融解した液相は円管の間を垂直に落下するため、液相の排出が速やかに行われ、液層厚さは小さくなり融解速度は速くなると考えられる。実験と解析の結果、融解速度は滑らかな伝熱面の場合よりかなり向上するとともに、両者は比較的良好一致することが示された。

本研究では、円管伝熱面に換えて、三角形伝熱面を用いた場合の接触融解解析を行ったので報告する。特に、三角形頂角の大きさと融解特性の関係に着目して解析を行った。

2. 主な記号

- c_p : 液相の比熱
- g : 重力加速度
- G : 固相の質量
- H, H^* : 円管頂点上の固相の高さ, $H^* = H/s$
- H_0 : 固相の初期高さ
- l, l^* : 三角形管間ギャップ, $l^* = l/R$
- L : 固液相変化潜熱
- p : 圧力
- p_0 : 大気圧
- s : 三角形管の斜辺長さ
- Ste : ステファン数,
- T : 温度
- T_m : 融点
- T_w : 円管伝熱面表面温度
- t, t^* : 時間, $t^* = \kappa t/s^2$ (フーリエ数)
- u, v : x, y 方向速度
- u_0, u_0^* : $u_0 = -dH/dt$, $u_0^* = -dH^*/dt^*$

ギリシャ文字

- 2α : 三角形管の頂角
- δ, δ^* : 液層厚さ, $\delta^* = \delta/s$
- κ : 熱拡散係数
- λ_l : 液層の熱伝導率
- μ : 流体の粘性係数
- ν : 動粘性係数
- ρ_l, ρ_s : 液相及び固相の密度

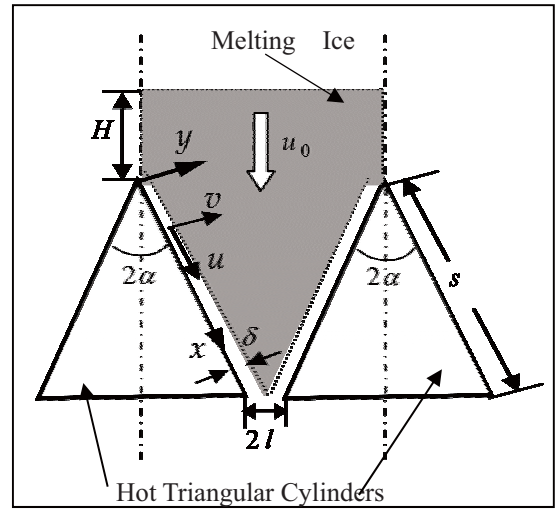


Fig.1 Physical system of closed contact melting on triangular cylinders

3. 解析

Fig.1 に水平に配列された表面温度一定 $= T_w$ の加熱三角管上に氷が置かれた場合の接触融解の模式図を示す。三角管断面は頂角が 2α の 2 等辺三角形とし、底辺は鉛直線に対して直交して置かれるものとする。三角形管斜辺長さを s 、管の水平方向間隔を $2l$ とする。三角形管上の氷高さを、図に示すように頂点から上の寸法で H とする。三角形管斜辺に沿って x 軸、斜辺に直交方向に y 軸をとり、 xy 軸方向の液相速度成分をそれぞれ u, v とする。三角形管により固相が融解して落下する速度を $u_0(t)$ とし、氷と三角形管の間の液層厚さを δ とする。液層厚さ δ 内の液層速度を u, v 、流体温度を T として基礎方程式を記述する。液層内の流体速度は非常に小さいことから非線形項は無視することができ、以下の基礎方程式が成立する。

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = 0 \quad (1) \\ \frac{\partial p}{\partial x} = \mu \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \quad (2) \\ \frac{\partial p}{\partial y} = 0 \quad (3) \\ u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y} = \kappa \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \quad (4) \end{array} \right.$$

境界条件は以下のようなになる。

$$y = 0: u = v = 0, T = T_w \quad (5)$$

$$y = \delta: u = 0, v = -u_0 \sin \alpha, T = T_m \quad (6)$$

$$y = \delta: v = \frac{\lambda_l}{\rho_l \cdot L} \left(\frac{\partial T}{\partial y} \right)_{y=\delta} \quad (7)$$

$$x = s: p = p_0 \quad (8)$$

(7) 式は固液界面において、 y 方向伝熱量と、それにより融解して流出する液相が保持する潜熱量が等しいとして得られる。また、液層内圧力が固相の重量を支えることから次式が成立する。

$$\int_0^s (p - p_0) \sin \alpha \cdot dx = G \cdot g, \quad (9)$$

$$G = \rho_s \left\{ \left(H + \frac{1}{2} s \cos \alpha \right) \cdot s \sin \alpha + l (H + s \cos \alpha) \right\}$$

上式で G は固相の質量、 ρ_s は固相の密度である。

(3) 式より $p = p(x)$ であるから、(2) 式を y で積分して次式が得られる。

$$u = \frac{1}{2\mu} \frac{dp}{dx} y(y - \delta) \quad (10)$$

(1) 式を $0 \sim \delta$ で積分すると、次式が得られる。

$$v_\delta = \frac{1}{12\mu} \frac{d}{dx} \left(\frac{dp}{dx} \delta^3 \right) \quad (11)$$

境界条件 $v_\delta = -u_0 \sin \alpha$ を用いて上式を積分すると

$$\frac{dp}{dx} \delta^3 = -12\mu u_0 \sin \alpha \cdot x + C \quad (12)$$

が得られる。上式で C は (11) 式の積分において表れる積分定数である。ここで、 C について考察しよう。

(12) 式より、 $x=0$ のとき、

$$\left(\frac{dp}{dx} \right)_{x=0} = \frac{C}{\delta^3}$$

となる。 $x=0$ は伝熱開始点であり、ここで初めて固相は融解し、流出するから、 $x=0$ において $u=0$ と考えてよい。すなわち、(10) 式より $x=0$ において

$$\frac{dp}{dx} = 0$$

となる。したがって、(12) 式の積分定数 $C=0$ において

$$\frac{dp}{dx} = -12\mu u_0 \frac{\sin \alpha}{\delta^3} \cdot x \quad (13)$$

が得られるとしてよい。これを (10) 式に代入して、 u は以下のように求められる。

$$u = -6u_0 R \frac{\sin \alpha}{\delta^3} y(y - \delta)x \quad (14)$$

(1) 式を $0 \sim y$ で積分し、 v として次式を得る。

$$v = -\frac{1}{12\mu} y^2 \left\{ 2y \frac{d^2 p}{dx^2} - 3 \frac{d}{dx} \left(\delta \frac{dp}{dx} \right) \right\} \quad (15)$$

ここで、温度分布を以下のように 3 次式で近似する。

$$T = a_0 + a_1 y + a_2 y^2 + a_3 y^3 \quad (16)$$

未知数は $a_0 \sim a_3$ の 4 個であるが、これらは (5) ~ (7) 式、及び、(4) 式で $y=0$ とおいたときに成立する次式

$$\frac{\partial^2 T}{\partial y^2} = 0 \quad (17)$$

を用いて定められ、 T は以下のように表される。

$$T = T_w + \left\{ \frac{\rho_l L u_0 \sin \alpha}{2\lambda_l} - \frac{3(T_w - T_m)}{2\delta} \right\} y + \left\{ -\frac{\rho_l L u_0 \sin \alpha}{2\lambda_l \delta^2} + \frac{T_w - T_m}{2\delta^3} \right\} y^3 \quad (18)$$

エネルギー式 (4) 式を $0 \sim \delta$ で積分すると次式が得られる。

$$\frac{\partial}{\partial x} \int_0^\delta u T dy + T_m v_\delta = \kappa \left[\left(\frac{\partial T}{\partial y} \right)_\delta - \left(\frac{\partial T}{\partial y} \right)_0 \right] \quad (19)$$

(14)(18) 式を (19) 式に代入し、整理すると δ に関して次式が導かれる。

$$\sin \alpha \frac{d}{dx^*} (\delta^* x^*) + \frac{30 + 7Ste}{3u_0^*} - \frac{10Ste}{u_0^{*2} \delta^* \sin \alpha} = 0 \quad (20)$$

$$\text{ここで } x^* = \frac{x}{s}, u_0^* = \frac{u_0 s}{\kappa}, \delta^* = \frac{\delta}{s}, Ste = \frac{c_p (T_w - T_m)}{L}$$

δ^* として次式を採用すると (20) 式を満たす。

$$\delta^* = \frac{f(Ste)}{u_0^* \sin \alpha} \quad (21)$$

ここで、 $f(Ste)$ は以下の式を満たす。

$$f(Ste) = \frac{1}{6} \left\{ -30 - 7Ste + \sqrt{900 + 780Ste + 49Ste^2} \right\} \quad (22)$$

ここで、ステファン数が 1 より十分小さいとき

$$Ste \ll 1 : f(Ste) \cong Ste - \frac{1}{3} Ste^2 \quad (23)$$

が成立する．

x 方向の圧力分布は，(21)(22) 式を (13) 式に代入して求められる．これを $0 \sim x$ ($0 \sim \theta$) で積分すると

$$p - p_0 = \frac{6\mu\kappa_l u_0^* \sin^4 \alpha}{s^2 \cdot f(Ste)^3} \left(1 - \frac{x^2}{s^2} \right) \quad (24)$$

が得られる．これを (9) 式に代入し，積分して整理すると次式が求められる．

$$u_0^* = \left[\frac{1}{4} \frac{f(Ste)^3 s^3 g}{\sin^5 \alpha \kappa_l \nu} \cdot \frac{\rho_s}{\rho_l} \left\{ \left(H^* + \frac{1}{2} \cos \alpha \right) \sin \alpha + l^* (H^* + \cos \alpha) \right\} \right]^{1/4} \quad (25)$$

上式で $H^* = \frac{H}{s}$, $l^* = \frac{l}{s}$ である．

$u_0 = -\frac{dH}{dt}$, または $u_0^* = -\frac{dH^*}{dt^*}$ ($t^* = \frac{\kappa_l}{s^2} t$: フーリエ数)

であるから，(25) 式を書き直して次式を得る．

$$\frac{dH^*}{dt^*} = - \left[\frac{1}{4} \frac{f(Ste)^3 s^3 g}{\sin^4 \alpha \kappa_l \nu} \cdot \frac{\rho_s}{\rho_l} \left\{ H^* + \frac{1}{2} \cos \alpha + (H^* + \cos \alpha) \frac{l^*}{\sin \alpha} \right\} \right]^{1/4} \quad (26)$$

$$= -B \left\{ H^* + \frac{1}{2} \cos \alpha + (H^* + \cos \alpha) \frac{l^*}{\sin \alpha} \right\}^{1/4} \quad (27)$$

$$(27) \text{ 式で } B = \left[\frac{1}{4} \frac{f(Ste)^3 s^3 g}{\sin^4 \alpha \kappa_l \nu} \cdot \frac{\rho_s}{\rho_l} \right]^{1/4} \quad (28)$$

である．

さらに変形して次式を得る．

$$\frac{dH^*}{dt^*} = -B' \left\{ H^* + \frac{2l^* + \sin \alpha}{2(l^* + \sin \alpha)} \cos \alpha \right\}^{1/4} \quad (29)$$

$$\text{ここで, } B' = B \left(1 + \frac{l^*}{\sin \alpha} \right)^{1/4} \quad (29)$$

である．

(29) 式を時間 $0 \sim t$ で積分する．このとき固相高さが初期高さ H_0 から H まで変化したとすると H_0 , H 及び

時間 t の関係は以下ようになる．

$$\frac{4}{3} \left[(H_0^* + A)^{3/4} - (H^* + A)^{3/4} \right] = B' t^* \quad (30)$$

$$\text{ここで } A = \frac{l^* + (1/2) \sin \alpha}{l^* + \sin \alpha} \quad (30)$$

変形して次式が得られる．

$$H^* = \left[(H_0^* + A)^{3/4} - \frac{3}{4} B' t^* \right]^{4/3} - A \quad (31)$$

融解が終了するとき $H = 0$, すなわち $H^* = 0$. したがって，融解完了時間を τ とし， $\tau^* = \tau \kappa_l / s^2$ とすると τ^* は (30) 式より以下のように求められる．

$$\tau^* = \frac{4}{3B'} \left[(H_0^* + A)^{3/4} - A^{3/4} \right] \quad (32)$$

Fig.2 の $l = 0$ のとき $A = 1/2$ であり，融解完了時間は

$$\tau^* = \frac{4}{3B} \left[\left(H_0^* + \frac{1}{2} \right)^{3/4} - \left(\frac{1}{2} \right)^{3/4} \right] \quad (33)$$

となる．

4. 結果と考察

3章で得られた解析結果を，三角管上に氷を置いた場合の接触融解に適用する．水及び氷の物性値を Table 1 に示す．流体の物性値は 0 の水の物性値である．接触融解解析結果を Fig.2 から Fig.5 に示す．計算条件は以下のとおりである．すべての計算において氷の初期高さ $H_0 = 10 \text{ cm}$, 伝熱面温度 (三角形管表面温度) = 20°C (この場合のステファン数 $Ste \cong 0.25$) とした．また，三角形管の頂角 2α は $2\alpha = 90^\circ, 45^\circ$ として計算を行った．三角形管斜辺長さは $s = 1 \text{ cm}, 2 \text{ cm}$, 三角形管間隔は $l = 0 \text{ mm}, 5 \text{ mm}$ として計算を行い，結果を比較した．

Fig.2 に $2\alpha = 90^\circ$, $s = 1 \text{ cm}$ の場合接触融解に及ぼす三角形管間隔 l の影響を， H^* 及び t^* の関係で示す．図

Table 1 Thermal properties of water and ice

Density(liquid) : ρ_l	1000	(kg/m^3)
Density (solid) : ρ_s	917	(kg/m^3)
Kinematic viscosity: ν	1.792×10^{-6}	(m^2/s)
Thermal diffusivity: κ	1.32×10^{-6}	(m^2/s)
Specific heat (liquid): c_p	4.199	($\text{kJ}/\text{kg}\cdot\text{K}$)
Latent heat: L	334.9	(kJ/kg)

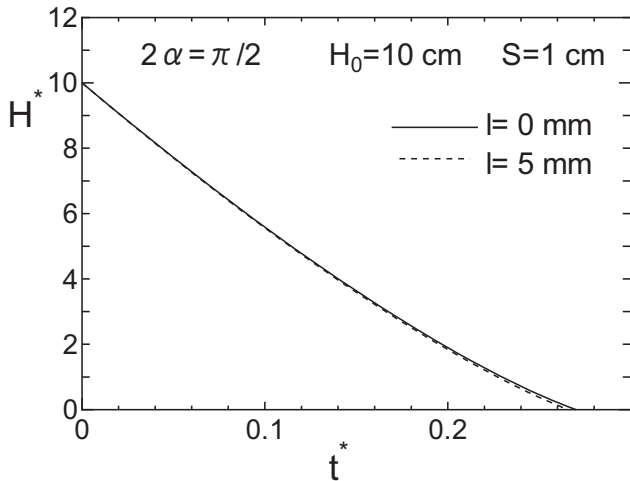


Fig.2 Plot of H^* against t^* where $H_0=10\text{cm}$, $s=1\text{cm}$ and $T_w=20^\circ\text{C}$ with l as a parameter

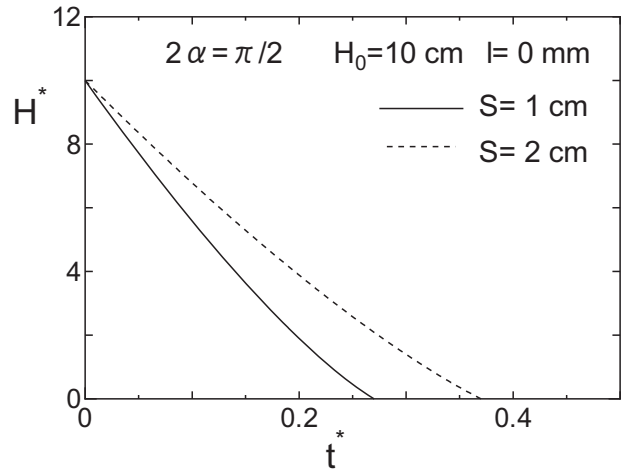


Fig.3 Plot of H^* against t^* where $H_0=10\text{cm}$, $s=1\text{cm}$ and $T_w=20^\circ\text{C}$ with s as a parameter

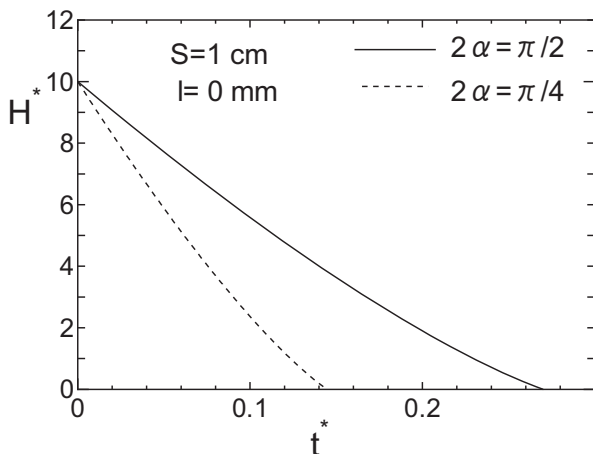


Fig.4 Plot of H^* against t^* where $H_0=10\text{cm}$, $s=1\text{cm}$ and $T_w=20^\circ\text{C}$ with 2α as a parameter

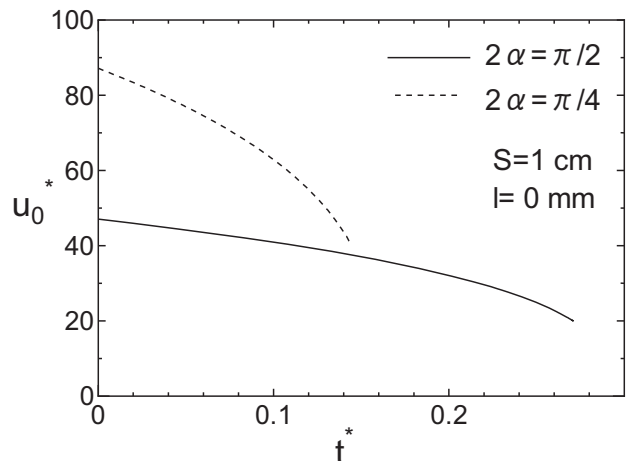


Fig.5 Plot of u_0^* against t^* for the case of same condition as Fig.4

で実線は $l=0\text{mm}$ 、破線は $l=5\text{mm}$ の場合の結果である。図に示すように、 H^* は初期に早く融解し、後半にゆっくり融解することが観察される。また、 $l=5\text{mm}$ の方が $l=0\text{mm}$ より融解時間は小さくなるが、その差はわずかであり、伝熱管間隔が融解速度に及ぼす影響は小さいと考えられる。

Fig.3に三角形管の斜辺長さ s をパラメータとしたときの H^* 及び t^* の関係を示す。図は $s=1\text{cm}$ 及び $s=2\text{cm}$ 、三角形の頂角 90° 、隙間 $l=0\text{mm}$ の場合の結果である。この場合 t^* は $s=2\text{cm}$ の結果に対しても $s=1\text{cm}$ を用いて計算した。図で実線は $s=1\text{cm}$ 、破線は $s=2\text{cm}$ の結果を示す。図からわかるように、斜辺長さが小さい方が融解時間が小さくなることわかる。

Fig.4に三角形管の頂角 $2\alpha=90^\circ$ 及び $2\alpha=45^\circ$ の場合の H^* と t^* の関係を示す。図は $s=1\text{cm}$ かつ $l=0\text{mm}$ の場合の結果である。(28)式から B は $\sin\alpha$ に比例するから、融解完了時間は(32)式から $l=0$ の場合には $\sin\alpha$ に反比例する。したがって、頂角が小さい場合、融解速度が大きくなることわかる。

Fig.5にFig.4の条件下の氷の融解速度 u_0^* と t^* の関係を示す。図で実線は $2\alpha=90^\circ$ の場合、破線は $2\alpha=45^\circ$ の場合を示す。図から融解速度は初期が最も大きく、融解完了間近に急速に低下することがわかる。

これらから、三角形管を用いた接触融解では、管の辺長さが短く、頂角が小さいと融解速度が向上することがわかる。

5. 結 論

Fig.1 で示される一列に配列された高温三角形管伝熱面上に氷等の固相を置いた場合の接触融解解析を行い、以下の結論を得た。

- (1) 三角形管伝熱面上の固相の高さと時間の関係は (31) 式で、また、融解完了時間は (33) 式で表される。
- (2) 三角形管上の固相の融解時間は三角形管斜辺長さの約 $3/4$ 乗に反比例する。したがって、斜辺長さが小さいほど融解時間は短くなる。
- (3) 固相融解時間は、三角形管頂角が 2α のとき、 $\sin\alpha$ に反比例する。すなわち、頂角が小さいほど融解時間は短くなる。

参考文献

- (1) 齊藤彬夫, 宇高義郎, 秋吉正寛, 片山功蔵, 溶融を伴う接触伝熱の研究 (第1報, 実験的検討), 機械学会論文集, B編, 50巻, 458号, pp2393-2400(1984)
- (2) 齊藤彬夫, 宇高義郎, 秋吉正寛, 片山功蔵, 溶融を伴う接触伝熱の研究 (第2報, 解析的検討), 機械学会論文集, B編, 50巻, 460号, pp2977-2984(1984)
- (3) Bareiss, M. and Beer, H., An Analytical Solution of the Heat transfer Process During Melting of an Unfixed Solid Phase Change Material Inside a Horizontal tube, Int.J.Heat Mass Transfer, Vol.27, pp.739-746 (1984)
- (4) Bahrami, P.A. and Wang, T.G., Analysis of Gravity and Conduction-Driven Melting in a Sphere, Trans. ASME., C, pp.806-809(1987)
- (5) Prasad, A. and Sengupta, S., Numerical Investigation of Melting Inside a Horizontal Cylinder Including the Effects of Natural Convection, Trans ASME. C, Vol.109, pp.803-806 (1987)
- (6) Fomin, S.A., Alexander, V. et al., Shape Factor Effect on Melting in an Elliptic Capsule, Int.J.Heat Mass Transfer, Vol.45, pp.3045-3054 (2002)
- (7) Emerman, S.H, Turcotte, D.L., Stokes Problem with Melting, Int.J.Heat Mass Transfer, Vol.26, pp.1625(1983)
- (8) Moallemi, M.K., Viakanta, R., Melting around a Migrating Heat Source, Trans.ASME.C, Vol.107, pp.451-458(1985)
- (9) Moallemi, M.K., Viakanta, R., Analysis of Close Contact Melting Heat Transfer, Int.J.Heat Mass Transfer, Vol.29, pp855-867(1986)
- (10) 齊藤彬夫, 洪熙基, 広兼修, 接触溶融過程の伝熱促進, 機械学会論文集, B編, 57巻, 541号, pp3141-3148 (1991)
- (11) 椎名保顕, 山下鉄矢, 荻巣大地, 亀山信弘, 多孔体金属表面に置かれた氷の融解現象, 愛知工科大学紀要, Vol.12, pp.12-18(2014)
- (12) 伊福輝, 森山覚, 椎名保顕, 円管伝熱面上における氷の融解実験, 機械学会東海支部学生卒業研究発表会, A114(2013)
- (13) 椎名保顕, 円管伝熱面上に置かれた氷の接触融解, 愛知工科大学紀要, Vol.13, pp12-17(2016)

公道走行用ソーラーカーの開発

鈴木宏和*, 中島 守*, 永田英雄*, 岩瀬正幸*, 甲村一貴*, 小野秀文*

(2016年9月30日受理)

Development of the Solar Car for Running in Public Road

Hirokazu Suzuki*, Mamoru Nakashima*, Hideo Nagata*, Masayuki Iwase*, Kazuki Koumura*, Hidefumi Ono*

(Received September 30, 2016)

Abstract

The authors participate in many races by solar car manufactured so far and have gained experience of the vehicle making. In this report, the race run data was analyzed by the solar car race of SUZUKA in 2016. After that the solar car was improved as a vehicle for public road and the permission number on the public road was acquired. Further, the driving experiment on the public road was performed by this vehicle. When there is sunshine of more than 21 hours in a week, it was revealed that the average mileage of the car commutation (23.4Km) can be served by solar energy.

キーワード：ソーラーカー，太陽電池，リチウムポリマ電池，オリンピッククラス

Key Words : Solar Car, Solar Cell, Lithium Ion Polymer Battery, OLYMPIA CLASS

1. はじめに

近年，異常な猛暑や厳しい寒さが相次いで発生しており，豪雨の発生数も増加傾向にある．これらの発生原因は地球温暖化にあると言われており，温暖化への寄与度が最も高いガスは二酸化炭素で，運輸部門からの二酸化炭素排出量は日本全体の17.2%を占める¹⁾．温暖化対策の1つとして，国は自動車の新燃費基準を策定して，燃費基準達成車両にはエコカー減税をするなど低公害車の普及促進を図っている．中でも二酸化炭素の排出量が少ないハイブリッドカーが次世代自動車として脚光を浴び，生産台数においてはトヨタ自動車(株)のみでも累計で年内に一千万台を超える勢いである．

しかし，ハイブリッドカーよりも二酸化炭素排出量の少ない電気自動車は，航続距離が短いことや充電のためのインフラ整備が不十分であることなどの理由で普及には今一步のところである．そこで，これらのデメリットを補うために太陽エネルギーを有効利用するソーラーカーが研究されている²⁾⁻⁵⁾．ソーラーカーは，競技用としてはいろいろと研究開発されてはいるものの公道を走行

できるものはほとんどない．

著者らは，国内で開催されるソーラーカー・レースであるDREAM CUP(2010年よりFIA ALTERNATIVE ENERGIES CUPに名称変更)ソーラーカー・レース鈴鹿に2006年より2016年まで参加した．そして，毎年レースでの走行データを分析して，その結果をもとに開発改良を行ってきた⁶⁾⁻⁹⁾．

本報では，FIA ALTERNATIVE ENERGIES CUPソーラーカー・レース鈴鹿2016(オリンピッククラス)5時間耐久レースの走行データの分析結果を報告するとともに，競技用ソーラーカーを公道走行用に変更して原付ナンバーを取得し，その車両の公道走行実験を行ったので，その分析結果についても併せて報告する．

2. 競技用車両と公道走行用車両

車両は，株式会社光岡自動車のキットカー(K-2)をEVにコンバートしてソーラーパネルを取り付けたもの

* 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
Aichi University of Technology Automotive Junior College, 50-2 Manori, Nishihasama-cho, Gamagori, Aichi 443-0047, Japan

で、ソーラーパネルを取り付ける支柱は、安全構造体と兼用した。競技用と公道走行用では、車両寸法、太陽電池、MPPT（最大電力点追従制御装置）およびバッテリーが異なる。

競技用ソーラーカーの諸元表を Table 1 に、公道走行用ソーラーカーからみた競技用ソーラーカーとの相違点を Table 2 に示す。また、競技用ソーラーカーの外観を Fig.1 に、公道走行用ソーラーカーの外観を Fig.2 に示す。製作した公道走行用ソーラーカーは、大学の所在地である蒲郡市役所に原付ナンバーを登録申請し、取得した。

3. レース結果及び走行データの分析

3.1 レース結果

2016年8月6日(土)に行われた FIA ALTERNATIVE ENERGIES CUP ソーラーカー・レース鈴鹿 2016 (オリンピッククラス) 5時間耐久レースの結果は、Laps: 40 周、Total Time: 5 時間 5 分 12 秒でオリンピッククラス 11 台中 9 位であったが、革新性、独創性に優れたチームに与えられる特別賞のひとつ「Trina Solar 賞」を受賞した。Fig.3 に特別賞受賞の様子を示す。写真中央が本学のチーム。

Table 2 公道走行用ソーラーカーからみた競技用ソーラーカーとの相違点

全長×全幅×全高	2500mm×1300mm×1280mm
空車質量	206kg
太陽電池	単結晶シリコン(サンパワー社: SC35-S) 変換効率: 18.8%/module 面積: 2.364m ² 総出力: 444W
MPPT	PT209HV×2(浪越エレクトロニクス)
バッテリー	リチウムイオン(エレクセル社: MX-10B) 構成: 2並列×27直列=102.6V(14.47kg) 総容量: 2050Wh



Fig.1 競技用ソーラーカーの外観

Table 1 競技用ソーラーカーの諸元表

全長×全幅×全高	3340mm×1620mm×1280mm
最低地上高	100mm
ホイールベース	1720mm
トレッド	[前]1090mm [後]980mm
車輪配置	[前]2輪 [後]2輪
空車質量	216kg(バラストを除く)
シャシ	鉄鋼
ボディ	FRP
ホイール	サイズ 14×2inch
ブレーキ	メイン:[前]油圧ドラム [後]油圧ディスク + モータ回生 サイド:[前]ドラムブレーキ内蔵式
サスペンション	[前]ストラット [後]トレーリングアーム
ステアリング	ラック&ピニオン
動力伝達装置	ダイレクトドライブ後輪二輪駆動
太陽電池	単結晶シリコン(サンパワー社: SC35-A) 変換効率: 17.3%/module 面積: 4.025m ² 総出力: 850W
MPPT(パネル内)	分散型KW-PPT×15(柏会)
モータ	DCブラシレスインホイールDD (ミツバ社: M1096) 定格: 1kW(Max2.5kW)×2
バッテリー	リチウムポリマ(NOMURA社: 8543125SH1) 構成: 8並列×33直列=120.5V(21.91kg) 総容量: 5590Wh



Fig.2 公道走行用ソーラーカーの外観



Fig.3 特別賞受賞の様子

3.2 レース走行データの分析

データの収集には、midi LOGGER GL200A (グラフィック社製) を使用した。外観を Fig.4 に示す。5 時間耐久レースのスタート時刻は 12:00 であるが、ピットを出たときからソーラーパネルによるバッテリーへの充電が始まるので、ピットを出た時刻 (11:45 頃) からレース終了後ピットに戻るまでの約 5 時間 24 分間のデータを 1 秒間隔で収集した。収集した「バッテリー残容量」、「パネル電流」、「負荷電流」、「車速」についての変化状況を Fig.5 ~ Fig.8 に示す。ここで、「パネル電流」とは太陽電池から駆動モータ及びバッテリーに供給される発電電流であり、「負荷電流」とは駆動モータで消費する電流と方向指示器、ブレーキランプなどで消費する電流を総合したものである。

Fig.5 のバッテリー残容量の推移は、バッテリー満充電時の容量 (5590Wh) を 100% とし、1 秒ごとの消費電力量を求め残容量を算出したものである。Fig.6 より日射量 (天候) の変化の状況が確認でき、Fig.7 よりドライバに

よる消費電力量の違いを確認することができる。また、Fig.8 よりドライバの交代およびトラブルでピットインした回数や修理に要した時間を知ることができる。

収集したデータをもとに 1 周あたりの消費電力量などを算出した。ピットを出てから戻るまでの 5 時間 24 分 19 秒 (19459 秒) 間の消費電力量は



Fig.4 データロガーの外観

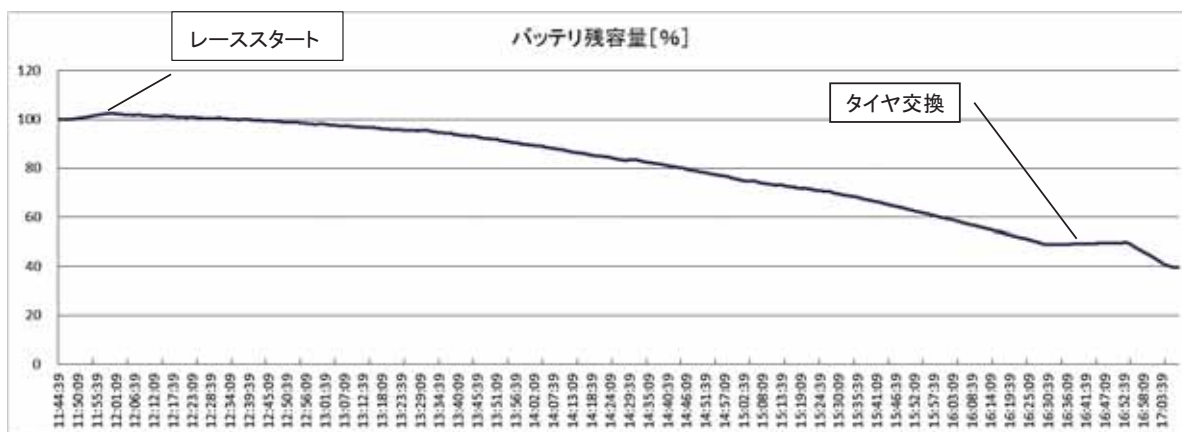


Fig.5 バッテリー残容量の推移

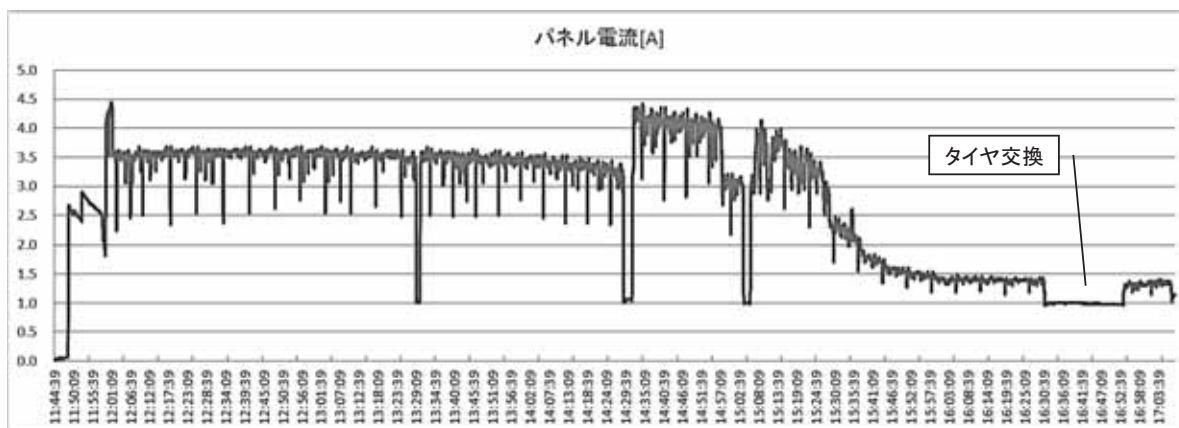


Fig.6 パネル電流の変化

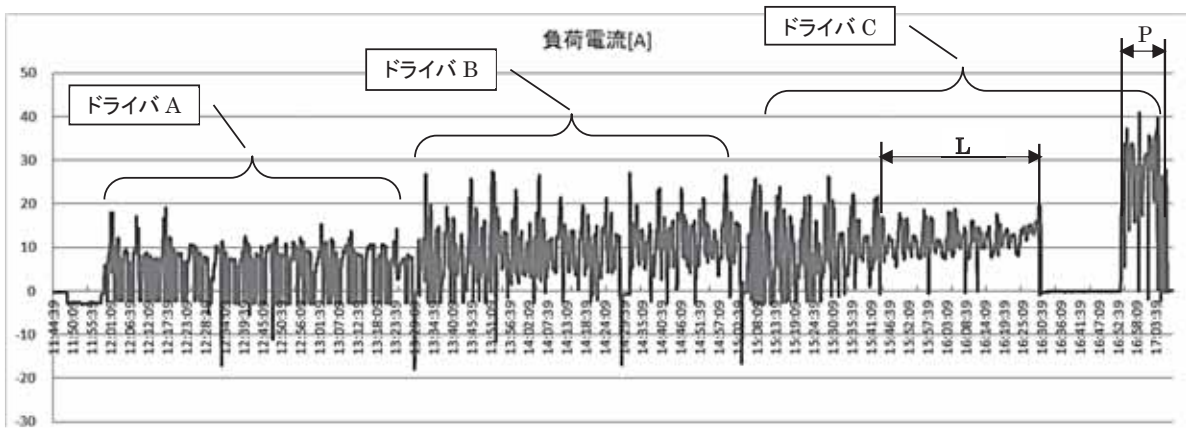


Fig.7 負荷電流の変化

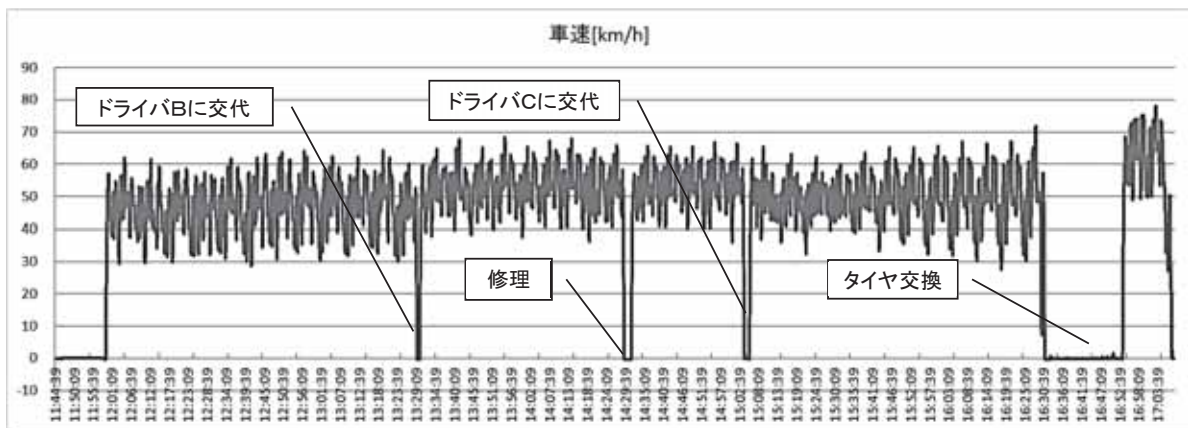


Fig.8 車速の変化

$$\sum_{i=1}^{19459} I_{Li}V_{Bi}/3600 \cong 5321[\text{Wh}]$$

I_{Li} : i 秒後の負荷電流 [A]

V_{Bi} : i 秒後のバッテリー電圧 [V]

同発電電力量は

$$\sum_{i=1}^{19459} I_{Pi}V_{Bi}/3600 \cong 1912[\text{Wh}]$$

I_{Pi} : i 秒後のパネル電流 [A]

V_{Bi} : i 秒後のバッテリー電圧 [V]

平均速度は 49.5 [km/h] であった . 40 周走行したので ,
これより 1 周あたりの平均消費電力量は ,

$$5321 [\text{Wh}] / 40 \text{ 周} = 133 [\text{Wh}]$$

となる .

バッテリー満充電時の電力量が 5590 [Wh] であること
より , ソーラーパネルの発電電力量を合わせた総電力量
は ,

$$5590 [\text{Wh}] + 1912 [\text{Wh}] = 7502 [\text{Wh}]$$

となり , これらの条件で走行できる周回数を算出すると ,

$$7502 [\text{Wh}] / 133 [\text{Wh}] = 56.4 [\text{周}]$$

となる . 1 周の距離は約 5.8km であり , 平均速度
49.5km/h では 6.6 時間かかってしまうので , この速度で
は 56.4 周は不可能となる .

また , Fig.7 において , ドライバ C が Last2 周を走行
した時の消費電力量を計算すると 1 周あたり約 265[Wh]
となり ,

$$7502 [\text{Wh}] / 265 [\text{Wh}] = 28.3 [\text{周}]$$

と 40 周よりも少なくなる .

仮に 50 周を目標とした場合 , 平均速度約 58km/h , 1
周を 6 分 , 1 周の消費電力量 150Wh で走行すれば達成
できることになる .

以上のことから推測すると , 本学のソーラーカー仕様
では 50 周程度が限界と考えられる .

次に、ドライバごとの1週のラップタイムと消費電力量を算出してこれらを比較した。その結果を Table 3 に示す。

ドライバ A は、平均速度が最も遅い (46.4km/h) ので、1 週の消費電力量は最も少ない。しかし、ドライバ B とドライバ C を比較すると、ドライバ B の平均速度が 51.5km/h、ドライバ C は 49.0km/h とドライバ B の方が速いにもかかわらず、消費電力量はドライバ B の方が少ない。原因を推測すると、Fig.7 の図中 L の区間 (15:43 ~ 16:26) では、負荷電流 7 ~ 8 A 以上がほとんどであり、下り坂でもアクセルを踏んでいることになる。そのため、全体の消費電力量が増え、1 周あたりの消費電力量も増えたものと思われる。

なお、ドライバ C の最後の 2 周 (図中 P) については、パンク後のタイヤ交換で 20 分以上の時間をロスし、残り競技時間も僅かであったため、周回数を稼ぐためにバッテリー消費を気にすることなく走行したところ、1 周あたり 5 分 30 秒で走行することとなった。

また、Fig.7 のドライバ B とドライバ C の負荷電流の比較および Table 3 に示すドライバの違いによる消費電力の変化より、消費電力量は常にアクセルを踏んで一定速度で走行するより、下りは惰性で走行する運転のテクニックの方が少なくなることが分かった。運転のテクニックにより、消費電力量にかなり大きな差が出ることを確認できたので、今後は鈴鹿サーキットにて練習走行を行い、コース取りをはじめ、最適な運転の手法を検討して、ドライバにその運転技術を習得させてレースに臨めば、今回のソーラーカー仕様でも 50 周以上は走行可能と考えられる。

4. 公道走行用車両による公道走行実験

4.1 公道走行実験の走行経路

実験は平成 28 年 2 月 18 日 (木) の午後に行った。天気は快晴、大学近辺を 4 周、約 16.8km を走行した。公道走行の様子を Fig.9 に、公道用ソーラーカーの走行実験の走行経路を Fig.10 に示す。今回走行した経路は、大学の東門を含めると 3 か所にアップダウンの勾配があり、特に大学の東門付近は急勾配である。通勤を想定した経路としては一般的であると思われる。

4.2 公道走行データの分析

公道走行実験において収集した走行経路 1 周分のデータを Fig.11 ~ Fig.13 に示す。Fig.11 のバッテリー電圧、Fig.12 の負荷電流から消費電力量を算出すると 139Wh

となり、同様に Fig.11 のバッテリー電圧と Fig.13 のパネル電流から発電量を算出すると 37Wh となる。日本人が自動車通勤に使用する平均距離 (往復) を 1 日あたり 23.4km (H11 全国都市パーソントリップ調査¹⁰⁾) とすると、通勤 1 日に使用する電力量は約 780Wh (139Wh/4.2km × 23.4km) となり、1 週間 (週 5 日制) では 3900Wh となる。一方、発電量は 12 分間で 37Wh なので 1 時間では 185Wh となり、1 週間に 21 時間の日照時間があれば、1 週間分の消費電力量を太陽エネルギーのみの充電で賄うことができることになる。

気象庁調査¹¹⁾ による 1984 年 ~ 2013 年までの 30 年間の日照時間の全国平均は 1908.6 時間 / 年であるので、1 週間に換算すると 36.7 時間となり、ソーラーカーが 1

Table 3 ドライバの違いによる消費電力の変化

	周回数	平均ラップタイム	平均消費電力量 [Wh]	平均速度 [km/h]
ドライバ A	12	7分30秒	93	46.4
ドライバ B	14	6分33秒	134	51.5
ドライバ C	12	7分07秒	151	49.0
ドライバ C (Last 2)	2	5分30秒	265	62.5



Fig.9 公道走行の様子



Fig.10 公道走行実験の走行経路

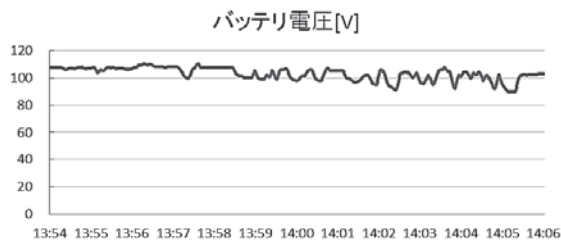


Fig.11 1周分のバッテリー電圧の変化

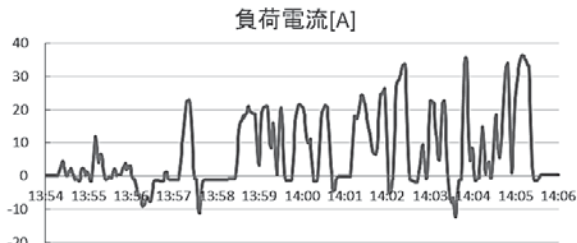


Fig.12 1周分の負荷電流の変化

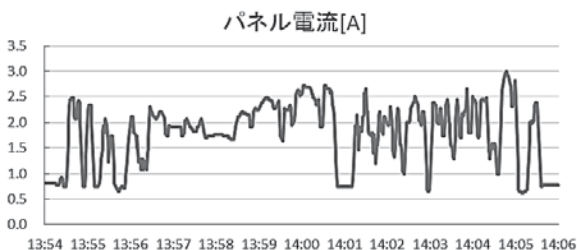


Fig.13 1周分のパネル電流の変化

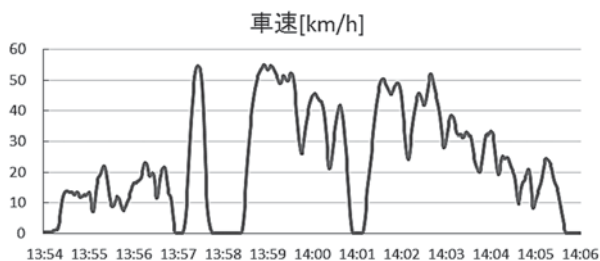


Fig.14 1周分の車速の変化

週間で消費する電力量を十分賄うことができる。すなわち、外部から充電することなく通勤できることになり、年間の通勤費ゼロ円が実現できるのである。

しかし、現時点ではソーラーパネル、リチウムイオン電池、モータおよびその制御回路などの価格が高く、通勤用車両としては初期投資がかかり過ぎるので、これらの今後の開発に期待したい。

5. おわりに

FIA ALTERNATIVE ENERGIES CUP ソーラーカー・レース鈴鹿 2016 においては、バッテリー容量を約 40% 残す形で終了したため、悔いが残るレース展開となった。

バッテリー容量が 40% 残った理由は 3 点あり、1 点目は、平均速度の設定が低めであったことである。2 点目は、ドライバの運転技術にバラツキがあったことである。3 点目は、発電量やバッテリー残量などを表示するモニタ装置のマイコンが 2 度暴走して、その都度リセットしたため、残量が初期化され、正確なバッテリー残容量が把握できなかったことである。今後は、これらの対策をたてレースに臨み、50 周以上を達成したい。

また、公道走行実験においては、今回は 1 日のみのデータから算出したものであるが、今後は毎月走行実験を行うなど年間を通してのデータを収集して、今回の結果をより確かなものにするとともに、ソーラーカーの有用性を実証していきたい。

また、実際に通勤用としてソーラーカーを使用するためには、車両および搭乗者の防水対策をはじめ、乗り心地やドライバビリティの向上、リチウムイオン電池のバッテリー管理システム搭載など追加・改良すべき点が多く、今後の課題としたい。

参考文献

- 1) 国土交通省: http://www.mlit.go.jp/Sogoseisaku/Environment/sosei_environment_tk_000007.html
- 2) 藤田久和, 安藤友二, 山田智一: 競技用ソーラーカーの走行性能, 自動車整備技術に関する研究報告誌第 31 号, pp.24-27 (2002)
- 3) 崔皓然, 黒岩純一, 石綿良三: 競技用ソーラーカーの横風安定性と走行抵抗に関する研究, 日本機械学会流体工学部門講演会講演論文集, pp.25-26 (2014)
- 4) 加藤 大輝, 荒井 大輔, 小柳出 匠 他: 実用化を目指した競技用ソーラーカー HORUS の研究, 太陽 / 風力エネルギー講演論文集 / 日本太陽エネルギー学会編 pp.161-164 (2008)
- 5) 榎屋治紀: ソーラーアシスト・ビークルの設計, 日本太陽エネルギー学会, Vol.32, No.3, pp.57-62 (2006)
- 6) 鈴木宏和, 橋本孝明, 永田英雄, 小野秀文: ソーラーカーの電気システムの研究, 愛知工科大学紀要第 5 巻, pp.19-26 (2007)
- 7) 鈴木宏和, 石原荘一: ソーラーカーの電気システムに関する研究, 名城大学総合研究所 総合学術研究論文集 No.8, pp.129-138 (2009)
- 8) 鈴木宏和, 永田英雄, 橋本孝明: ソーラーカー用モニタリングシステムの開発, 愛知工科大学紀要第 9 巻, pp.15-20 (2011)
- 9) 鈴木宏和, 中島守, 永田英雄, 岩瀬正幸, 小野秀文, 甲村一貴: ソーラーカーの設計製作, 愛知工科大学紀要第 11 巻, pp.9-14 (2013)
- 10) 国土交通省: <http://www.mlit.go.jp/crd/tosiko/zpt/>
- 11) 気象庁: <http://www.data.jma.go.jp/obd/stats/data/mdrr/tenkou/alltable/sun00.html>

Two-Dimensional Heat Conduction Problems for Functionally Graded Orthotropic Materials

Manabu Ohmichi*

(Received September 30, 2016)

Abstract

This article deals with two-dimensional heat conduction problems for functionally graded orthotropic materials (FGOM) in Cartesian coordinates. The material properties such as specific heat c , density ρ , thermal conductivities λ_x and λ_y , in x and y directions, respectively are assumed to be functions of position (x, y) . For steady state, the following four types of FGOM [(1) $\lambda_x = \lambda_{x0} e^{\beta x}$, $\lambda_y = \lambda_{y0} e^{\beta x}$, (2) $\lambda_x = \lambda_{x0} e^{\beta x}$, $\lambda_y = \lambda_{y0} e^{\beta y}$, (3) $\lambda_x = \lambda_{x0} (1 + \alpha x^\beta)$, $\lambda_y = \lambda_{y0} (1 + \alpha x^\beta)$ and (4) $\lambda_x = \lambda_x(x)$, $\lambda_y = \lambda_y(x)$] are treated. For transient state, the following two types of FGOM [(1) $c(x)\rho(x) = c_0\rho_0 e^{\beta x}$, $\lambda_x = \lambda_{x0} e^{\beta x}$, $\lambda_y = \lambda_{y0} e^{\beta x}$ (2) $c = c(x)$, $\rho = \rho(x)$, $\lambda_x = \lambda_x(x)$, $\lambda_y = \lambda_y(x)$] are taken up. Transformation of variables, Laplace transform and the perturbation technique are adopted. Performing inverse Laplace transform, the temperatures are obtained theoretically. The numerical calculations using perturbation method were carried out and compared with those obtained by exact solutions.

Keywords : Heat conduction problem, Functionally graded material, Orthotropy, Two-dimensional problem

1. Introduction

The concept of functionally graded materials (FGMs) was firstly proposed by Koizumi and his colleagues^{1), 2)}. Noda³⁾ presented the first overview of the thermal stress problems in FGMs. Many entries on the thermal stress problems in FGMs have been introduced in the Encyclopedia of Thermal Stresses by Hetnarski⁴⁾. For the analyses of heat conduction or thermal stresses in anisotropic or orthotropic materials, Ferrari⁵⁾ discussed a thermo-elastic problem in an inhomogeneous anisotropic layer. Tarn et al.⁶⁾ presented a state space approach to heat conduction in a cylindrically anisotropic circular tube of functionally graded material. Chen et al.⁷⁾ investigated the thermal fracture problem in a functionally graded orthotropic strip. Berger et al.⁸⁾ considered the heat conduction in an anisotropic inhomogeneous medium using the Green's function. Ootao et al.⁹⁾ treated the transient thermal stresses in an orthotropic functionally graded thick strip due to non-uniform heat supply in the width direction. FGMs have been used as cutting edge of the tools, pipe couplings under high temperature and wrist watches, etc. FGOM is one of the

future industrial materials which can resist high temperature differences in x and y directions, independently. FGOMs are applicable to space vehicles, aircrafts, sports and leisure widely. The target of this contribution is to clarify the analytical methods of heat conduction in FGOM.

2. Heat conduction in FGOM whose thermal properties are functions of x and y

When material properties are functions of variables x and y , the two-dimensional transient heat conduction equation in FGOM is given by

$$c(x, y)\rho(x, y)\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x}[\lambda_x(x, y)\frac{\partial T}{\partial x}] + \frac{\partial}{\partial y}[\lambda_y(x, y)\frac{\partial T}{\partial y}] + W(x, y) \quad (1)$$

where $c(x, y)$ denotes the specific heat, $\rho(x, y)$ is the density, $\lambda_x(x, y)$ and $\lambda_y(x, y)$ are the thermal conductivities along x and y directions, respectively. $W(x, y)$ denotes the internal heat generation per unit time and unit area. For the steady state without internal heat generation, Eq. (1) reduces to

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

$$\frac{\partial}{\partial x}[\lambda_x(x,y)\frac{\partial T}{\partial x}] + \frac{\partial}{\partial y}[\lambda_y(x,y)\frac{\partial T}{\partial y}] = 0 \quad (2)$$

When material properties are arbitrary functions of x only

$$c = c(x), \rho = \rho(x), \lambda_x = \lambda_x(x), \lambda_y = \lambda_y(x) \quad (3)$$

Eq. (1) reduces to the following equation for the transient state without internal heat generation

$$c(x)\rho(x)\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x}[\lambda_x(x)\frac{\partial T}{\partial x}] + \lambda_y(x)\frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \quad (4)$$

For the steady state without internal heat generation, Eq. (4) becomes

$$\frac{\partial}{\partial x}[\lambda_x(x)\frac{\partial T}{\partial x}] + \lambda_y(x)\frac{\partial^2 T}{\partial y^2} = 0 \quad (5)$$

3 Two-dimensional steady heat conduction in FGOM

3.1 Thermal conductivities with exponential functions of x

We consider the case when the thermal conductivities in x and y directions are expressed in exponential functions of x

$$\lambda_x(x) = \lambda_{x0}e^{\beta x}, \quad \lambda_y(x) = \lambda_{y0}e^{\beta x} \quad (6)$$

where β, λ_{x0} and λ_{y0} are constants.

Eq. (5) reduces to

$$\frac{\lambda_{x0}}{\lambda_{y0}}\left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \beta\frac{\partial T}{\partial x}\right) + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} = 0 \quad (7)$$

By using the separation of variables

$$T(x,y) = f(x)g(y) \quad (8)$$

Eq. (7) becomes

$$\frac{\lambda_{x0}}{\lambda_{y0}}\left[\frac{d^2 f(x)}{dx^2} + \beta\frac{df(x)}{dx}\right]\frac{1}{f(x)} = -\frac{1}{g(y)}\frac{d^2 g(y)}{dy^2} \equiv s^2 \quad (9)$$

where s denotes the separation constant.

Eq. (9) yields the following two ordinary differential equations

$$\frac{d^2 f(x)}{dx^2} + \beta\frac{df(x)}{dx} - \frac{\lambda_{y0}}{\lambda_{x0}}s^2 f(x) = 0 \quad (10)$$

$$\frac{d^2 g(y)}{dy^2} + s^2 g(y) = 0 \quad (11)$$

The solution is obtained as

$$T(x,y) = (A_{10}e^{-\beta x} + A_{20})(B_{10}y + B_{20}) + \int_0^\infty (A_{1s}e^{\eta x} + A_{2s}e^{\eta x})(B_{1s}\cos sy + B_{2s}\sin sy)ds \quad (12)$$

where r_1 and r_2 are given by

$$r_1 = -\frac{\beta}{2} + \sqrt{\frac{\beta^2}{4} + s^2 q^2}, \quad r_2 = -\frac{\beta}{2} - \sqrt{\frac{\beta^2}{4} + s^2 q^2} \quad (13)$$

$$q = \sqrt{\frac{\lambda_{y0}}{\lambda_{x0}}}$$

We consider the functionally graded orthotropic strip (FGOS) shown in **Fig.1**.

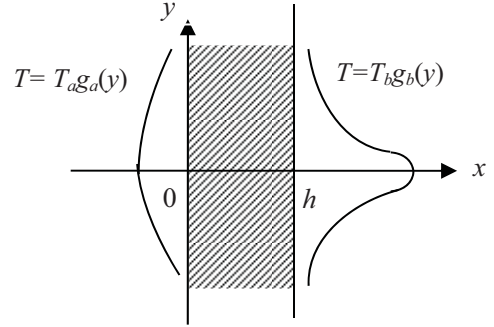


Fig.1 The boundary conditions of FGOS

The boundary conditions are assumed to be even functions of y and they are expressed in Fourier cosine transform

$$T = T_a g_a(y) = T_a \int_0^\infty \bar{g}_a(s) \cos sy ds \quad \text{at } x=0 \quad (14)$$

$$T = T_b g_b(y) = T_b \int_0^\infty \bar{g}_b(s) \cos sy ds \quad \text{at } x=h \quad (15)$$

where

$$\bar{g}_a(s) = \frac{2}{\pi} \int_0^\infty g_a(y) \cos sy dy$$

$$\bar{g}_b(s) = \frac{2}{\pi} \int_0^\infty g_b(y) \cos sy dy \quad (16)$$

The temperature which satisfies the boundary conditions is obtained from Eqs. (12), (14) and (15)

$$T(x,y) = e^{-\frac{\beta x}{2}} \int_0^\infty \left[\frac{T_a \bar{g}_a(s) \sinh(h-x)\sqrt{\beta^2/4 + q^2 s^2}}{\sinh h\sqrt{\beta^2/4 + q^2 s^2}} + \frac{T_b \bar{g}_b(s) \sinh x\sqrt{\beta^2/4 + q^2 s^2}}{\sinh h\sqrt{\beta^2/4 + q^2 s^2}} \right] \cos sy dy \quad (17)$$

As an example, we consider the following specific boundary conditions

$$T(0,y) = 0, \quad T(h,y) = T_b e^{-\alpha y^2} \quad (18)$$

By using the formula for Laplace integral¹⁰⁾

$$\int_0^\infty e^{-bx^2} \cos 2ax dx = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{\pi}{b}} e^{-\frac{a^2}{b}} \quad (b > 0) \quad (19)$$

we get

$$\bar{g}_a(s) = 0 \quad (20)$$

$$\bar{g}_b(s) = \frac{1}{\sqrt{\pi a}} e^{-\frac{s^2}{4a}} \quad (21)$$

Using the following non-dimensional variables

$$\bar{x} = x/h, \bar{y} = y/h, \bar{\beta} = \beta/h, \bar{a} = h^2 a, \bar{s} = sh$$

$$\bar{T}(\bar{x}, \bar{y}) = T(x, y) / T_b, \quad (22)$$

the exact temperature for the specific boundary conditions shown in Eq. (18) is obtained.

$$\bar{T}(\bar{x}, \bar{y}) = \frac{1}{\sqrt{\pi \bar{a}}} e^{\frac{\bar{\beta}(1-\bar{x})}{2}} \int_0^\infty \frac{\sinh \bar{x} \sqrt{\bar{\beta}^2/4 + q^2 \bar{s}^2}}{\sinh \sqrt{\bar{\beta}^2/4 + q^2 \bar{s}^2}} e^{-\frac{\bar{s}^2}{4\bar{a}}} \cos \bar{s} \bar{y} d\bar{s} \quad (23)$$

3.2 Thermal conductivities with exponential functions of x and y

We consider the case when the thermal conductivities in x and y directions are expressed in exponential functions of x and y

$$\lambda_x = \lambda_{x0} e^{\beta x}, \lambda_y = \lambda_{y0} e^{\gamma y} \quad (24)$$

where $\beta, \gamma, \lambda_{x0}$ and λ_{y0} are constants.

By using the separation of variables as shown in Eq. (8), Eq. (2) becomes

$$\lambda_{x0} e^{\beta x} \left[\frac{d^2 f(x)}{dx^2} + \beta \frac{df(x)}{dx} \right] \frac{1}{f(x)} = -\lambda_{y0} \frac{d^2 g(y)}{dy^2} \frac{1}{g(y)} \equiv s^2 \quad (25)$$

where s denotes the separation constant.

From Eq. (25), we obtain the following two ordinary differential equations

$$\frac{d^2 f(x)}{dx^2} + \beta \frac{df(x)}{dx} - \frac{s^2}{\lambda_{x0}} e^{-\beta x} f(x) = 0 \quad (26)$$

$$\frac{d^2 g(y)}{dy^2} + \gamma \frac{dg(y)}{dy} + \frac{s^2}{\lambda_{y0}} e^{-\gamma y} g(y) = 0 \quad (27)$$

Here, we use the next transformation of variables

$$e^{-\beta x} = z_1, \quad e^{-\gamma y} = z_2 \quad (28)$$

Using z_1 and z_2 , Eqs. (26) and (27) are possible to express

$$\frac{d^2 f(z_1)}{dz_1^2} - \frac{s^2}{\lambda_{x0} \beta^2} \frac{1}{z_1} f(z_1) = 0 \quad (29)$$

$$\frac{d^2 g(z_2)}{dz_2^2} + \frac{s^2}{\lambda_{y0} \gamma^2} \frac{1}{z_2} g(z_2) = 0 \quad (30)$$

Meanwhile, the solution of differential equation

$$\frac{d^2 u}{dz^2} + \alpha z^\nu u = 0 \quad (31)$$

is given by¹¹⁾

$$\sqrt{z} Z_{\frac{\nu+1}{2}} \left(\frac{2\sqrt{\alpha}}{\nu+2} z^{\frac{\nu+2}{2}} \right) \quad (32)$$

where $Z_\nu(z)$ denotes $J_\nu(z), Y_\nu(z), I_\nu(z)$ and $K_\nu(z), J_\nu(y)$ and $Y_\nu(y)$ are the Bessel functions of order ν , and $I_\nu(y)$ and $K_\nu(y)$ are the modified Bessel functions of order ν .

By using these Bessel functions, temperature is obtained from Eqs. (29) and (30)

$$T(x, y) = (A_{01} e^{-\beta x} + A_{02})(B_{01} e^{-\gamma y} + B_{02})$$

$$+ \int_0^\infty e^{-\frac{\beta x}{2}} [AI_1(2\sqrt{\frac{s^2}{\lambda_{x0} \beta^2}} e^{-\frac{\beta x}{2}}) + BK_1(2\sqrt{\frac{s^2}{\lambda_{x0} \beta^2}} e^{-\frac{\beta x}{2}})]$$

$$\times e^{-\frac{\gamma y}{2}} [CJ_1(2\sqrt{\frac{s^2}{\lambda_{y0} \gamma^2}} e^{-\frac{\gamma y}{2}}) + DY_1(2\sqrt{\frac{s^2}{\lambda_{y0} \gamma^2}} e^{-\frac{\gamma y}{2}})] ds \quad (33)$$

where $A_{01}, A_{02}, B_{01}, B_{02}, A, B, C$ and D are constants which are determined by the boundary conditions.

3.3 Thermal conductivities with power functions of x

We consider the case when the thermal conductivities in x and y directions are expressed in power functions of x

$$\lambda_x = \lambda_{x0} (1 + \alpha x^\beta), \lambda_y = \lambda_{y0} (1 + \alpha x^\beta) \quad (34)$$

where $\alpha, \beta, \lambda_{x0}$ and λ_{y0} are constants.

By using the separation of variables as shown in Eq. (8), Eq. (5) becomes

$$[\lambda_{x0} (1 + \alpha x^\beta) \frac{d^2 f(x)}{dx^2} + \beta \lambda_{x0} \alpha x^{\beta-1} \frac{df(x)}{dx}] \frac{1}{\lambda_{y0} (1 + \alpha x^\beta) f(x)} = -\frac{d^2 g(y)}{dy^2} \frac{1}{g(y)} \equiv s^2 \quad (35)$$

where s is a separation constant.

Eq. (35) yields the following two ordinary differential equations

$$\lambda_{x0} (1 + \alpha x^\beta) \frac{d^2 f(x)}{dx^2} + \beta \lambda_{x0} \alpha x^{\beta-1} \frac{df(x)}{dx} - \lambda_{y0} (1 + \alpha x^\beta) s^2 f(x) = 0 \quad (36)$$

$$\frac{d^2 g}{dy^2} + s^2 g = 0 \quad (37)$$

We express the solutions of eq. (36) in power series

$$f_1(x) = \sum_{n=0}^{\infty} a_n x^n, f_2(x) = \sum_{n=1}^{\infty} b_n x^{-n} \quad (38)$$

Substitution of Eq. (38) into Eq. (36) yields

$$a_{n+2} = q^2 \frac{s^2}{(n+1)(n+2)} a_n \quad \text{for } 0 \leq n < \beta - 2$$

$$a_{n+2} = q^2 \frac{s^2}{(n+1)(n+2)} a_n - \frac{n+2-\beta}{n+2} a a_{n+2-\beta} \quad \text{for } \beta-2 \leq n < \beta$$

$$a_{n+2} = q^2 \frac{s^2}{(n+1)(n+2)} a_n - \frac{n+2-\beta}{n+2} a a_{n+2-\beta}$$

$$+ q^2 \frac{s^2}{(n+1)(n+2)} a a_{n-\beta} \quad \text{for } \beta \leq n$$

$$b_{n-2} = q^2 \frac{s^2}{(n-2)(n-1)} b_n \quad \text{for } 1 \leq n < \beta-2$$

$$b_{n-2} = q^2 \frac{s^2}{(n-2)(n-1)} b_n - \frac{n-2+\beta}{n-2} a b_{n-2+\beta} \quad \text{for } \beta-2 \leq n < \beta$$

$$b_{n-2} = q^2 \frac{s^2}{(n-2)(n-1)} b_n - \frac{n-2+\beta}{n-2} a b_{n-2+\beta}$$

$$+ q^2 \frac{s^2}{(n-2)(n-1)} a b_{n-\beta} \quad \text{for } \beta \leq n \quad (39)$$

where q is given by Eq. (13).

Meanwhile, the solution of Eq. (37) is given by

$$g(y) = C_0 + D_0 y + C_s \sin sy + D_s \cos sy \quad (40)$$

where C_0, D_0, C_s and D_s are constants.

Then, the temperature is obtained as

$$T(x, y) = \int_0^\infty [A f_1(x) + B f_2(x)] \times [C_0 + D_0 y + C_s \sin sy + D_s \cos sy] ds \quad (41)$$

where A and B are constants. The constants in Eq. (41) are determined by boundary conditions.

3.4 Thermal conductivities with arbitrary functions of x

When the thermal conductivities are expressed in arbitrary functions of x only

$$\lambda_x = \lambda_x(x), \quad \lambda_y = \lambda_y(x) \quad (42)$$

Eq. (5) becomes

$$\frac{\lambda_x(x)}{\lambda_y(x)} \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{1}{\lambda_y(x)} \frac{d\lambda_x(x)}{dx} \frac{\partial T}{\partial x} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} = 0 \quad (43)$$

By using the separation of variables as shown in Eq. (8), Eq. (43) becomes

$$\frac{\lambda_x(x)}{\lambda_y(x)} \frac{1}{f(x)} \frac{\partial^2 f(x)}{\partial x^2} + \frac{1}{\lambda_y(x)} \frac{1}{f(x)} \frac{d\lambda_x(x)}{dx} \frac{\partial f}{\partial x} = -\frac{1}{g(y)} \frac{\partial^2 g}{\partial y^2} \equiv s^2 \quad (44)$$

where s is a separation constant.

Eq. (44) yields the following two ordinary differential equations

$$\frac{d^2 f}{dx^2} + \frac{1}{\lambda_x(x)} \frac{d\lambda_x(x)}{dx} \frac{df}{dx} - \frac{\lambda_y(x)}{\lambda_x(x)} s^2 f = 0 \quad (45)$$

$$\frac{d^2 g}{dy^2} + s^2 g = 0 \quad (46)$$

When the relation between $\lambda_x(x)$ and $\lambda_y(x)$ is given by

$$q = \sqrt{\frac{\lambda_y(x)}{\lambda_x(x)}} = \text{const.} \quad (47)$$

we can solve Eq. (45) by the perturbation technique

$$\frac{d \ln \lambda_x(x)}{dx} \equiv \delta \phi(x), \quad f(x) = \sum_{m=0}^{\infty} \delta^m f^m(x) \quad (48)$$

where δ is a small parameter, $\phi(x)$ is a function of x and $f^m(x)$ is a sequence of functions.

Substitution of Eq. (48) into Eq. (45) yields

$$\frac{d^2 f^0(x)}{dx^2} - s^2 q^2 f^0(x) = 0 \quad \text{for } m = 0 \quad (49)$$

$$\frac{d^2 f^m(x)}{dx^2} - s^2 q^2 f^m(x) = -\phi(x) \frac{df^{m-1}(x)}{dx} \quad \text{for } m = 1, 2, 3 \dots \quad (50)$$

By solving Eqs. (49) and (50), the general solution of Eq. (43) can be obtained in the form

$$T(x, y) = f(x)g(y) = (A \int \frac{1}{\lambda_x(x)} dx + B)(C + Dy) + \int_0^\infty \left\{ \sum_{m=0}^{\infty} \delta^m [A_{ms} e^{sqx} + B_{ms} e^{-sqx}] - \frac{1}{sq} \int_0^x \phi(\xi) \frac{df^{m-1}(\xi)}{d\xi} \sinh sq(x-\xi) d\xi \right\} [C_s \sin sy + D_s \cos sy] ds \quad (51)$$

where $A, B, C, D, A_{ms}, B_{ms}, C_s$ and D_s are constants.

As one example, we consider the functionally graded orthotropic strip (FGOS) whose boundary conditions are shown in Eqs. (14) and (15). The temperature which satisfies the boundary conditions is simplified to

$$T(x, y) = \int_0^\infty \left[\frac{T_b \bar{g}_b(s) \sinh sqx + T_a \bar{g}_a(s) \sinh sq(h-x)}{\sinh sqh} + \sum_{m=1}^{\infty} \frac{\delta^m \sinh sqx}{sq \sinh sqh} \int_0^h \phi(\xi) \frac{df^{m-1}(\xi)}{d\xi} \sinh sq(h-\xi) d\xi - \frac{\delta^m}{sq} \int_0^x \phi(\xi) \frac{df^{m-1}(\xi)}{d\xi} \sinh sq(x-\xi) d\xi \right] \cos sy ds \quad (52)$$

For specific boundary conditions shown in Eq. (18), we can apply Laplace integral shown in Eq. (19) and the temperature shown in Eq. (52) reduces to

$$T(x, y) = \int_0^\infty \left\{ \frac{T_b}{\sqrt{\pi a} \sinh sqh} e^{-\frac{s^2}{4a} x} \sinh sqx + \sum_{m=1}^{\infty} \frac{\delta^m}{sq \sinh sqh} [\sinh sqx \int_0^h \phi(\xi) \frac{df^{m-1}(\xi)}{d\xi} \sinh sq(h-\xi) d\xi - \int_0^x \phi(\xi) \frac{df^{m-1}(\xi)}{d\xi} \sinh sq(x-\xi) d\xi] \right\} \cos sy ds$$

$$-\sinh sqh \int_0^x \phi(\xi) \frac{df^{m-1}(\xi)}{d\xi} \sinh sq(x-\xi) d\xi \} \cos sy ds \quad (53)$$

where the first term of $f^{m-1}(x)$ is obtained from Eq. (49) and boundary condition Eq. (14) as

$$f^0(x) = 2A_0 \sinh sqx \quad (54)$$

where A_0 is a constant.

When the thermal conductivities $\lambda_x(x)$, $\lambda_y(x)$ are expressed by Eq. (6), Eq. (48) leads to

$$\frac{d}{dx}(\ln \lambda_x) = \frac{d}{dx}[\ln(\lambda_{x0} e^{\beta x})] = \beta = \delta \phi(x) \quad (55)$$

and

$$\beta = \delta, \phi(x) = 1 \quad (56)$$

By using the non-dimensional variables shown in Eq. (22), we get the following approximate temperatures

$$\bar{T}(\bar{x}, \bar{y}) = \frac{1}{\sqrt{\pi \bar{a}}} \int_0^{\bar{x}} \frac{\sinh \bar{s} q \bar{x}}{\sinh \bar{s} q} e^{-\frac{\bar{y}^2}{4\bar{a}}} \cos \bar{s} \bar{y} d\bar{s} \quad \text{for } m=0 \quad (57)$$

and

$$\bar{T}(\bar{x}, \bar{y}) = \frac{[1 + \frac{\bar{\beta}}{2}(1-\bar{x})]}{\sqrt{\pi \bar{a}}} \int_0^{\bar{x}} \frac{\sinh \bar{s} q \bar{x}}{\sinh \bar{s} q} e^{-\frac{\bar{y}^2}{4\bar{a}}} \cos \bar{s} \bar{y} d\bar{s} \quad \text{for } m=0, 1 \quad (58)$$

4. Two-dimensional transient heat conduction in FGOM

4.1 Thermal conductivities with exponential functions of x

When material properties are exponential functions of x only

$$c(x)\rho(x) = c_0\rho_0 e^{\beta x}, \lambda_x(x) = \lambda_{x0} e^{\beta x}, \lambda_y(x) = \lambda_{y0} e^{\beta x} \quad (59)$$

where $c_0, \rho_0, \beta, \lambda_{x0}$ and λ_{y0} are constants,

Eq. (4) without internal heat generation leads to

$$\frac{1}{\kappa_0} \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \beta \frac{\partial T}{\partial x} + q^2 \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \quad (60)$$

where q is given in Eq. (13) and $\kappa_0 = \lambda_{x0} / (c_0\rho_0)$.

By using the Laplace transform

$$f^*(p) = \int_0^\infty f(t) e^{-pt} dt \quad (61)$$

Eq. (60) can be transformed into

$$\frac{\partial^2 T^*}{\partial x^2} + \beta \frac{\partial T^*}{\partial x} + q^2 \frac{\partial^2 T^*}{\partial y^2} - \frac{p}{\kappa_0} T^* = -\frac{1}{\kappa_0} T_i \quad (62)$$

where T_i is the initial temperature.

By using the separation of variables

$$T^*(p, x, y) = \frac{1}{p} T_i + f(x)g(y) \quad (63)$$

we obtain

$$\left[\frac{d^2 f(x)}{dx^2} + \beta \frac{df(x)}{dx} - \frac{p}{\kappa_0} f(x) \right] \frac{1}{f(x)} = -q^2 \frac{d^2 g(y)}{dy^2} \frac{1}{g(y)} \equiv q^2 s^2 \quad (64)$$

where s is a separation constant.

Eq. (64) yields the following two ordinary differential equations

$$\frac{d^2 f(x)}{dx^2} + \beta \frac{df(x)}{dx} - \left(\frac{p}{\kappa_0} + q^2 s^2 \right) f(x) = 0 \quad (65)$$

$$\frac{d^2 g(y)}{dy^2} + s^2 g(y) = 0 \quad (66)$$

The general solution in the Laplace domain can be obtained as

$$T^*(p, x, y) = \frac{1}{p} T_i + \int_0^\infty (A_1 e^{r_1 x} + A_2 e^{r_2 x}) (B_1 \cos sy + B_2 \sin sy) ds \quad (67)$$

where r_1 and r_2 are given by

$$r_1 = -\frac{\beta}{2} + \sqrt{\frac{\beta^2}{4} + \frac{p}{\kappa_0} + q^2 s^2}$$

$$r_2 = -\frac{\beta}{2} - \sqrt{\frac{\beta^2}{4} + \frac{p}{\kappa_0} + q^2 s^2} \quad (68)$$

We consider the next boundary conditions

$$T = T_i + T_a g_a(y) = T_i + T_a \int_0^\infty \bar{g}_a(s) \cos sy ds \quad \text{at } x=0 \quad (69)$$

$$T = T_i + T_b g_b(y) = T_i + T_b \int_0^\infty \bar{g}_b(s) \cos sy ds \quad \text{at } x=h \quad (70)$$

where $\bar{g}_a(s)$ and $\bar{g}_b(s)$ are given by Eq. (16).

The Laplace transform of boundary conditions shown in Eqs. (69) and (70) yields

$$T^* = \frac{T_i}{p} + \frac{T_a}{p} \int_0^\infty \bar{g}_a(s) \cos sy ds \quad \text{at } x=0 \quad (71)$$

$$T^* = \frac{T_i}{p} + \frac{T_b}{p} \int_0^\infty \bar{g}_b(s) \cos sy ds \quad \text{at } x=h \quad (72)$$

The solution in the Laplace domain which satisfies the boundary conditions in Eqs. (71) and (72) becomes

$$T^* = \frac{1}{p} T_i + \int_0^\infty \frac{[T_a \bar{g}_a(s)(e^{r_1 h + r_2 x} - e^{r_2 h + r_1 x}) + T_b \bar{g}_b(s)(e^{r_2 x} - e^{r_1 x})]}{p(e^{r_2 h} - e^{r_1 h})} \cos sy ds$$

$$= \frac{1}{p} T_i + \int_0^\infty \frac{1}{p \sinh h \sqrt{\beta^2 / 4 + p / \kappa_0 + q^2 s^2}}$$

$$\times [T_a \bar{g}_a(s) e^{-\frac{\beta}{2} x} \sinh(h-x) \sqrt{\beta^2 / 4 + p / \kappa_0 + q^2 s^2}$$

$$+ T_b \bar{g}_b(s) e^{\frac{\beta}{2}(h-x)} \sinh x \sqrt{\beta^2 / 4 + p / \kappa_0 + q^2 s^2}] \cos sy ds \quad (73)$$

The formula of inverse Laplace transform¹²⁾ is given by

$$f(t) = \frac{1}{2\pi i} \int_{c-i\infty}^{c+i\infty} e^{pt} f^*(p) dp = \sum_{i=1}^N \text{Res}[e^{pt} f^*(p), p_i]$$

$$\text{Res}[f(p_i)] = \frac{1}{(N-1)!} \lim_{z \rightarrow p_i} \frac{d^{N-1}}{dz^{N-1}} (z - p_i)^N f(z) \quad (74)$$

where p_i is a pole of order N .

Since the hyperbolic sine function is represented by

$$\sinh i\theta = \frac{e^{i\theta} - e^{-i\theta}}{2} = i \sin \theta \quad (75)$$

the first order pole of denominator of Eq. (73) is obtained from

$$\sinh h \sqrt{\beta^2 / 4 + p_i / \kappa_0 + q^2 s^2} = 0 \quad (76)$$

as

$$p_i = -\kappa_0 [(n\pi / h)^2 + q^2 s^2 + \beta^2 / 4] \quad (n = 0, 1, 2, \dots) \quad (77)$$

We introduce following non-dimensional variables

$$\bar{x} = x / h, \bar{y} = y / h, \bar{\beta} = \beta h, \bar{t} = \kappa_0 t / h^2, \kappa_0 c_0 \rho_0 = \lambda_{x0}, \bar{s} = sh, ,$$

$$\bar{T} = (T - T_0) / (T_h - T_0) \quad (78)$$

where T_0 is a reference temperature.

By using the inverse Laplace transform, the exact temperature which satisfies the boundary conditions is obtained

$$\bar{T}(\bar{t}, \bar{x}, \bar{y}) = \bar{T}_i + \int_0^\infty \frac{1}{\sinh \sqrt{\beta^2 / 4 + q^2 s^2}}$$

$$\times \{ \bar{T}_a \bar{g}_a(\bar{s}) e^{\frac{\bar{\beta} \bar{x}}{2}} \sinh[(1 - \bar{x}) \sqrt{\beta^2 / 4 + q^2 s^2}]$$

$$+ \bar{T}_b \bar{g}_b(\bar{s}) e^{\frac{\bar{\beta} (1 - \bar{x})}{2}} \sinh[\bar{x} \sqrt{\beta^2 / 4 + q^2 s^2}] \} \cos \bar{s} \bar{y} d\bar{s}$$

$$+ 2\pi \int_0^\infty \sum_{n=1}^\infty \frac{n(-)^n}{\beta^2 / 4 + q^2 s^2 + n^2 \pi^2} \exp[-(\bar{\beta}^2 / 4 + q^2 s^2 + n^2 \pi^2) \bar{t}]$$

$$\times \{ \bar{T}_a \bar{g}_a(\bar{s}) e^{\frac{\bar{\beta} \bar{x}}{2}} \sin[(1 - \bar{x}) n \pi] + \bar{T}_b \bar{g}_b(\bar{s}) e^{\frac{\bar{\beta} (1 - \bar{x})}{2}} \sin(n \pi \bar{x}) \} \cos \bar{s} \bar{y} d\bar{s} \quad (79)$$

For specific boundary conditions shown in Eq. (18), the exact temperature (79) becomes

$$\bar{T}(\bar{x}, \bar{y}, \bar{t}) = \frac{1}{\sqrt{\pi \bar{a}}} e^{\frac{\bar{\beta} (1 - \bar{x})}{2}} \int_0^\infty \frac{\sinh \bar{x} \sqrt{\beta^2 / 4 + q^2 s^2}}{\sinh \sqrt{\beta^2 / 4 + q^2 s^2}} e^{-\frac{\bar{s}^2}{4 \bar{a}}} \cos \bar{s} \bar{y} d\bar{s}$$

$$+ 2 \sqrt{\frac{\pi}{\bar{a}}} \int_0^\infty \sum_{n=1}^\infty \frac{n(-1)^n \sin n \pi \bar{x}}{\beta^2 / 4 + \bar{s}^2 q^2 + n^2 \pi^2} e^{-[\bar{\beta}^2 / 4 + (q^2 + \frac{1}{4 \bar{a}}) \bar{s}^2 + n^2 \pi^2] \bar{t}} \cos \bar{s} \bar{y} d\bar{s} \quad (80)$$

4.2 Thermal conductivities with arbitrary functions of x

Let's consider two-dimensional transient heat conduction problems of FGOM without internal heat generation. We

introduce the following non-dimensional variables

$$\bar{x} = x / h, \eta = \bar{y} = y / h, \bar{c}(\bar{x}) = c(x) / c_0, \bar{\rho}(\bar{x}) = \rho(x) / \rho_0, \bar{\kappa}(\bar{x}) = \kappa(x) / \kappa_0,$$

$$\bar{\lambda}_x(\bar{x}) = \lambda_x(x) / \lambda_{x0}, \bar{\lambda}_y(\bar{x}) = \lambda_y(x) / \lambda_{y0}, \tau = \kappa_0 t / h^2 \quad (81)$$

where $\kappa(x)$ is the thermal diffusivity, $c_0, \rho_0, \kappa_0, \lambda_{x0}, \lambda_{y0}$ are material constants, h is the thickness of the strip.

Introducing new variable ξ

$$\xi = \int_0^{\bar{x}} \frac{1}{\sqrt{\bar{\kappa}(\bar{x})}} d\bar{x} \quad (82)$$

the heat conduction equation (4) becomes

$$\frac{\partial T}{\partial \tau} = \frac{\partial^2 T}{\partial \xi^2} + \frac{d \ln \sqrt{\bar{c}(\xi) \bar{\rho}(\xi) \bar{\lambda}_x(\xi)}}{d\xi} \frac{\partial T}{\partial \xi} + \frac{\lambda_{y0}}{\lambda_{x0}} \frac{\bar{\lambda}_y(\xi)}{\bar{c}(\xi) \bar{\rho}(\xi)} \frac{\partial^2 T}{\partial \eta^2} \quad (83)$$

By using the Laplace transform given by

$$f^*(p) = \int_0^\infty f(\tau) e^{-p\tau} d\tau \quad (84)$$

Eq. (83) reduces to

$$\frac{\partial^2 T^*}{\partial \xi^2} + \frac{d \ln \sqrt{\bar{c}(\xi) \bar{\rho}(\xi) \bar{\lambda}_x(\xi)}}{d\xi} \frac{\partial T^*}{\partial \xi} + \frac{\lambda_{y0}}{\lambda_{x0}} \frac{\bar{\lambda}_y(\xi)}{\bar{c}(\xi) \bar{\rho}(\xi)} \frac{\partial^2 T^*}{\partial \eta^2} - p T^* = -T_i \quad (85)$$

By using the separation of variables

$$T^*(p, \xi, \eta) = \frac{1}{p} T_i + f(\xi) g(\eta) \quad (86)$$

we obtain

$$\left[\frac{d^2 f(\xi)}{d\xi^2} + \frac{d \ln \sqrt{\bar{c}(\xi) \bar{\rho}(\xi) \bar{\lambda}_x(\xi)}}{d\xi} \frac{df(\xi)}{d\xi} - p f(\xi) \right] \frac{1}{f(\xi)} \left(\frac{\lambda_{x0}}{\lambda_{y0}} \frac{\bar{c}(\xi) \bar{\rho}(\xi)}{\bar{\lambda}_y(\xi)} \right)$$

$$= -\frac{1}{g(\eta)} \frac{d^2 g(\eta)}{d\eta^2} \equiv s^2 \quad (87)$$

where s is a separation constant.

Eq. (87) yields the following two ordinary differential equations.

$$\frac{d^2 f(\xi)}{d\xi^2} + \frac{d \ln \sqrt{\bar{c}(\xi) \bar{\rho}(\xi) \bar{\lambda}_x(\xi)}}{d\xi} \frac{df(\xi)}{d\xi} - (p + \frac{\lambda_{y0}}{\lambda_{x0}} \frac{\bar{\lambda}_y(\xi)}{\bar{c}(\xi) \bar{\rho}(\xi)} s^2) f(\xi) = 0 \quad (88)$$

$$\frac{d^2 g(\eta)}{d\eta^2} + s^2 g(\eta) = 0 \quad (89)$$

When there is a relation between material properties

$$\frac{\lambda_{y0}}{\lambda_{x0}} \frac{\bar{\lambda}_y(\xi)}{\bar{c}(\xi) \bar{\rho}(\xi)} = q^2 \quad (90)$$

Eq. (88) becomes

$$\frac{d^2 f(\xi)}{d\xi^2} + \frac{d \ln \sqrt{\bar{c}(\xi) \bar{\rho}(\xi) \bar{\lambda}_x(\xi)}}{d\xi} \frac{df(\xi)}{d\xi} - (p + q^2 s^2) f(\xi) = 0 \quad (91)$$

Eq. (91) can be solved by using the perturbation technique

$$\frac{d}{d\xi} \ln \sqrt{\bar{c}(\xi) \bar{\rho}(\xi) \bar{\lambda}_x(\xi)} \equiv \delta \phi(\xi), f(\xi) = \sum_{m=0}^{\infty} \delta^m f^m(\xi) \quad (92)$$

The temperature in the Laplace domain becomes

$$\begin{aligned} T^*(p, \xi, \eta) &= \frac{1}{p} T_i + \{A_{00} e^{\sqrt{p}\xi} + B_{00} e^{-\sqrt{p}\xi} + \sum_{m=1}^{\infty} \delta^m [A_{0m} e^{\sqrt{p}\xi} + B_{0m} e^{-\sqrt{p}\xi}] \\ &- \frac{1}{\sqrt{p}} \int_0^{\xi} \phi(\zeta) \frac{df^{m-1}(\zeta)}{d\zeta} \sinh \sqrt{p}(\xi - \zeta) d\zeta\} (C_0 + D_0 \eta) \\ &+ \int_0^{\infty} \{A_{0s} e^{\sqrt{p+s^2} \xi} + B_{0s} e^{-\sqrt{p+s^2} \xi} + \sum_{m=1}^{\infty} \delta^m [A_{ms} e^{\sqrt{p+s^2} \xi} + B_{ms} e^{-\sqrt{p+s^2} \xi}] \\ &- \frac{1}{\sqrt{p+s^2}} \int_0^{\xi} \phi(\zeta) \frac{df^{m-1}(\zeta)}{d\zeta} \sinh \sqrt{p+s^2}(\xi - \zeta) d\zeta\} (C \sin \eta s + D \cos \eta s) ds \quad (93) \end{aligned}$$

We consider the following boundary conditions

$$T = T_i + T_a \int_0^{\infty} \bar{g}_a(s) \cos s \eta ds \quad \text{at } x=0 \quad (94)$$

$$T = T_i + T_b \int_0^{\infty} \bar{g}_b(s) \cos s \eta ds \quad \text{at } \bar{x}=1 \left[\xi = \int_0^1 (1/\sqrt{\bar{k}(\bar{x})}) d\bar{x} \equiv \varepsilon \right] \quad (95)$$

The Laplace transforms of boundary conditions are

$$T^*(p, 0, \eta) = \frac{T_i}{p} + \frac{T_a}{p} \int_0^{\infty} \bar{g}_a(s) \cos s \eta ds \quad (96)$$

$$T^*(p, \varepsilon, \eta) = \frac{T_i}{p} + \frac{T_b}{p} \int_0^{\infty} \bar{g}_b(s) \cos s \eta ds \quad (97)$$

where $\bar{g}_a(s)$ and $\bar{g}_b(s)$ are given by Eq. (16).

The solution which satisfies the boundary conditions becomes

$$\begin{aligned} T^*(p, \xi, \eta) &= \frac{1}{p} T_i + \int_0^{\infty} \left(\frac{1}{p \sinh \sqrt{p+s^2} \varepsilon} [T_b \bar{g}_b(s) \sinh \sqrt{p+s^2} \xi \right. \\ &+ T_a \bar{g}_a(s) \sinh \sqrt{p+s^2}(\varepsilon - \xi)] \\ &+ \sum_{m=1}^{\infty} \delta^m \left[\frac{\sinh \sqrt{p+s^2} \xi}{\sqrt{p+s^2} \sinh \sqrt{p+s^2} \varepsilon} \int_0^{\varepsilon} \phi(\zeta) \frac{df^{m-1}(\zeta)}{d\zeta} \sinh \sqrt{p+s^2}(\varepsilon - \zeta) d\zeta \right. \\ &\left. - \frac{1}{\sqrt{p+s^2}} \int_0^{\xi} \phi(\zeta) \frac{df^{m-1}(\zeta)}{d\zeta} \sinh \sqrt{p+s^2}(\xi - \zeta) d\zeta \right] \cos \eta s ds \quad (98) \end{aligned}$$

Performing the inverse Laplace transform for $m=0$, we obtain the approximate temperature.

$$\begin{aligned} T_{m=0}(\tau, \xi, \eta) &= T_i + \int_0^{\infty} \frac{1}{\sinh s q \varepsilon} [T_b \bar{g}_b(s) \sinh s q \xi \\ &+ T_a \bar{g}_a(s) \sinh s q(\varepsilon - \xi)] \cos \eta s ds \\ &+ 2 \sum_{n=1}^{\infty} \int_0^{\infty} \frac{(n\pi/\varepsilon)(-1)^n}{(s^2 q^2 + (n\pi/\varepsilon)^2) \varepsilon} [T_b \bar{g}_b(s) \sin \frac{n\pi}{\varepsilon} \xi \\ &+ T_a \bar{g}_a(s) \sin \frac{n\pi}{\varepsilon}(\varepsilon - \xi)] e^{-[s^2 q^2 + (n\pi/\varepsilon)^2] \tau} \cos \eta s ds \quad (99) \end{aligned}$$

For $m=0$ and 1, the approximate temperature is expressed in the form

$$\begin{aligned} T_{m=0,1}(\tau, \xi, \eta) &= T_i + \int_0^{\infty} \left[\frac{1}{\sinh s q \varepsilon} T_b \bar{g}_b(s) \sinh s q \xi \right. \\ &+ T_a \bar{g}_a(s) \sinh s q(\varepsilon - \xi)] \cos \eta s ds \\ &+ 2 \sum_{n=1}^{\infty} \int_0^{\infty} \frac{(n\pi/\varepsilon)(-1)^n}{[s^2 q^2 + (n\pi/\varepsilon)^2] \varepsilon} [T_b \bar{g}_b(s) \sin \frac{n\pi}{\varepsilon} \xi \\ &+ T_a \bar{g}_a(s) \sin \frac{n\pi}{\varepsilon}(\varepsilon - \xi)] e^{-[s^2 q^2 + (n\pi/\varepsilon)^2] \tau} \cos \eta s ds \\ &+ \frac{1}{2} \int_0^{\infty} \left(\frac{\sinh s q \xi}{\sinh^2 s q \varepsilon} \int_0^{\varepsilon} \frac{d}{d\zeta} \ln \sqrt{\bar{c}(\zeta) \bar{\rho}(\zeta) \bar{\lambda}_x(\zeta)} \right. \\ &\times \{T_b \bar{g}_b(s) [\sinh s q \varepsilon + \sinh s q(\varepsilon - 2\zeta)] \\ &- T_a \bar{g}_a(s) \sinh 2s q(\varepsilon - \zeta)] d\zeta \\ &- \frac{1}{\sinh s q \varepsilon} \int_0^{\xi} \frac{d}{d\zeta} \ln \sqrt{\bar{c}(\zeta) \bar{\rho}(\zeta) \bar{\lambda}_x(\zeta)} \\ &\times \{T_b \bar{g}_b(s) [\sinh s q \xi + \sinh s q(\xi - 2\zeta)] \\ &- T_a \bar{g}_a(s) [\sinh s q(\xi - \varepsilon) + \sinh s q(\xi + \varepsilon - 2\zeta)]\} d\zeta \} \cos \eta s ds \\ &+ \int_0^{\infty} \sum_{n=1}^{\infty} \left(\frac{(-1)^{n+1} (n\pi/\varepsilon)}{[s^2 q^2 + (n\pi/\varepsilon)^2] \varepsilon} \int_0^{\varepsilon} \frac{d}{d\zeta} \ln \sqrt{\bar{c}(\zeta) \bar{\rho}(\zeta) \bar{\lambda}_x(\zeta)} \right. \\ &\times \{T_b \bar{g}_b(s) [\sin \frac{n\pi}{\varepsilon} \xi + \sin \frac{n\pi}{\varepsilon}(\xi - 2\zeta)] \\ &- T_a \bar{g}_a(s) [\sin \frac{n\pi}{\varepsilon}(\xi - \varepsilon) + \sin \frac{n\pi}{\varepsilon}(\xi + \varepsilon - 2\zeta)]\} d\zeta \\ &- \left. \frac{(n\pi/\varepsilon)^2 \left\{ \frac{\sin(n\pi\xi/\varepsilon)}{[s^2 q^2 + (n\pi/\varepsilon)^2] \varepsilon^2} \left[\frac{(n\pi/\varepsilon)^2 - s^2 q^2}{(n\pi/\varepsilon)^2} + 2\tau(s^2 q^2 + n^2 \pi^2/\varepsilon^2) \right] \right\}}{[s^2 q^2 + (n\pi/\varepsilon)^2]^2} \int_0^{\varepsilon} \frac{d}{d\zeta} \ln \sqrt{\bar{c}(\zeta) \bar{\rho}(\zeta) \bar{\lambda}_x(\zeta)} \right. \\ &\times [T_b \bar{g}_b(s) \sin \frac{n\pi}{\varepsilon}(\varepsilon - 2\zeta) - T_a \bar{g}_a(s) \sin \frac{2n\pi}{\varepsilon}(\varepsilon - \zeta)] d\zeta \\ &+ \frac{n\pi}{\varepsilon} \frac{\sin(n\pi\xi/\varepsilon)}{[s^2 q^2 + (n\pi/\varepsilon)^2] \varepsilon^2} \int_0^{\varepsilon} \frac{d}{d\zeta} \ln \sqrt{\bar{c}(\zeta) \bar{\rho}(\zeta) \bar{\lambda}_x(\zeta)} \\ &\times \{T_b \bar{g}_b(s) [(\varepsilon - 2\zeta) \cos \frac{n\pi}{\varepsilon}(\varepsilon - 2\zeta) + (-)^n \varepsilon] \\ &- 2T_a \bar{g}_a(s) (\varepsilon - \zeta) \cos \frac{2n\pi}{\varepsilon}(\varepsilon - \zeta)\} d\zeta \left. \right) e^{-[s^2 q^2 + (n\pi/\varepsilon)^2] \tau} \cos \eta s ds \quad (100) \end{aligned}$$

We introduce another non-dimensional variables

$$\bar{\xi} = \frac{\xi}{\varepsilon}, \bar{s} = s\varepsilon, \bar{\eta} = \frac{\eta}{\varepsilon}, \bar{\tau} = \frac{\tau}{\varepsilon^2}, \bar{a} = \varepsilon^2 a, \bar{T} = \frac{T}{T_b}, \bar{\beta} = \beta\varepsilon \quad (101)$$

where ε is defined by Eq. (95).

For specific boundary conditions shown in Eq. (18), the approximate temperature (99) for $m=0$ reduces to

$$\begin{aligned} \bar{T}(\bar{\tau}, \bar{\xi}, \bar{\eta}) &= \frac{1}{\sqrt{\pi \bar{a}}} \int_0^{\infty} \frac{\sinh \bar{s} \bar{q} \bar{\xi}}{\sinh \bar{s} \bar{q}} e^{-\frac{\bar{s}^2}{4\bar{a}} \cos \bar{\eta} \bar{s} \bar{d} \bar{s}} \\ &+ 2 \sqrt{\frac{\pi}{\bar{a}}} \int_0^{\infty} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{n(-1)^n \sin n\pi \bar{\xi}}{\bar{s}^2 \bar{q}^2 + n^2 \pi^2} e^{-\frac{-(\bar{q}^2 + \frac{1}{4\bar{a}}) \bar{s}^2 + n^2 \pi^2}{\bar{a}} \bar{\tau}} \cos \bar{\eta} \bar{s} \bar{d} \bar{s} \quad (102) \end{aligned}$$

The approximate temperature (100) for $m=0, 1$ is expressed in the form

$$\begin{aligned} \bar{T}(\bar{x}, \bar{\xi}, \bar{\eta}) = & \frac{1}{\sqrt{\pi \bar{a}}} \left[1 + \frac{\bar{\beta}}{2} (1 - \bar{\xi}) \right] \int_0^\infty \frac{\sinh \bar{s} q \bar{\xi}}{\sinh \bar{s} q} e^{-\frac{\bar{s}^2}{4\bar{a}}} \cos \bar{\eta} \bar{s} d\bar{s} \\ & + 2\sqrt{\frac{\pi}{\bar{a}}} \left[1 + \frac{\bar{\beta}}{2} (1 - \bar{\xi}) \right] \int_0^\infty \sum_{n=1}^\infty \frac{n(-1)^n \sin n\pi \bar{\xi}}{\bar{s}^2 q^2 + n^2 \pi^2} e^{-\left(\frac{q^2 + \frac{1}{4\bar{a}}\right)\bar{s}^2 + n^2 \pi^2 \bar{s}} \cos \bar{\eta} \bar{s} d\bar{s} \quad (103) \end{aligned}$$

The temperatures for $m=2, 3, \dots$ are omitted here.

5. Results and discussions

Fig.2 shows the stereographic temperature distribution in FGOP denoted by Eq. (23) in section 3.1 in the functionally graded orthotropic strip (FGOS) for $\bar{\beta}=1.0, q=1.2$.

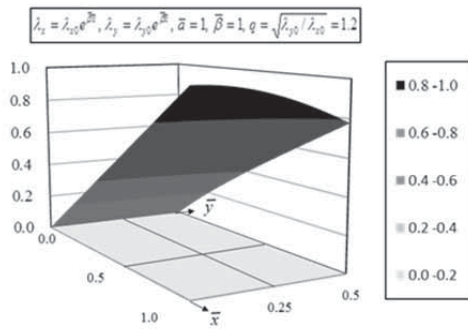


Fig.2 Stereographic temperature distribution in FGOP

Fig.3 shows the difference of temperature distributions among HM (homogeneous materials), FGM and FGOM along \bar{x} -axis denoted by Eq. (23). Since the thermal conductivities of FGM and FGOM become larger than that of HM for $\bar{\beta}=1$, the heat input of FGM and FGOM from the boundary $\bar{x}=1$ become larger than that of HM. That is the reason why the temperature of HM is the lowest in three materials. The temperature of FGOM is lower than that of FGM since the thermal conductivity along the \bar{y} -axis of FGOM is larger than that of FGM for $q=1.2$.

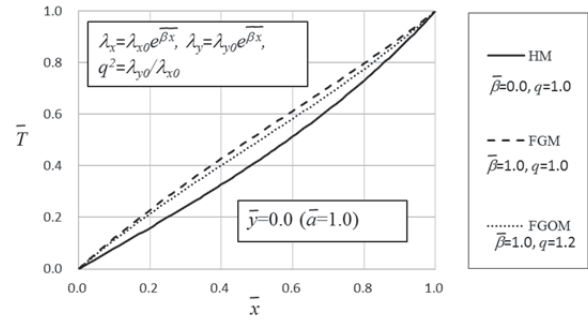


Fig.3 The difference of temperature distributions among HM, FGM and FGOM along \bar{x} -axis

Fig.4 shows the difference of temperature distributions denoted by Eq. (23) among HM, FGM and FGOM along \bar{y} -axis at $\bar{x}=0.5$. The temperature of FGM is the highest in three materials for the same reason as **Fig.3**.

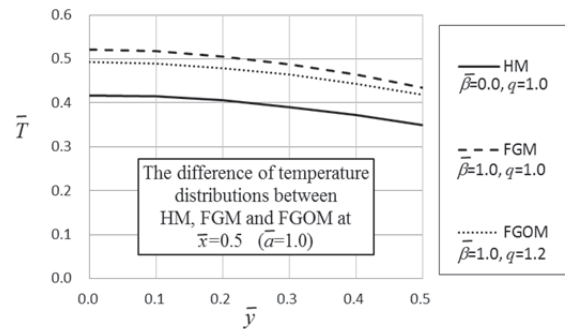


Fig.4 The difference of temperature distributions among HM, FGM and FGOM at $\bar{x}=0.5$ along \bar{y} -axis

Fig.5 shows the effect of the FGM parameter $\bar{\beta}$ on the temperature distributions denoted by Eq. (23) at $\bar{x}=0.5$ in the FGOS. The temperatures increase with increasing of parameter $\bar{\beta}$ since the heat flow from the boundary $\bar{x}=1$ increases with increase of parameter $\bar{\beta}$.

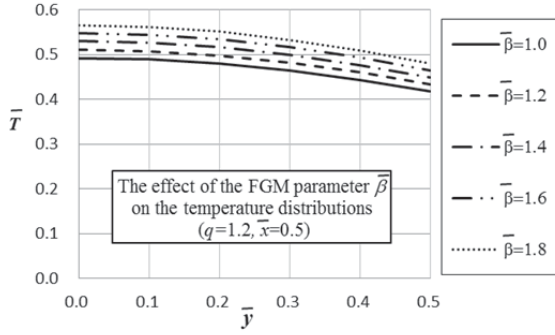


Fig.5 The effect of the FGM parameter $\bar{\beta}$ on the temperature distributions

Fig.6 shows the accuracy of the perturbation technique. The exact temperature T_{exact} is given in Eq. (23). The approximate temperature T_{app} for $m=0$ and 1 is given in Eq. (58) in section 3.4. The error ratio is defined by

$$\frac{T_{app} - T_{exact}}{T_{exact}} \times 100 \quad [\%] \quad (104)$$

The maximum error ratio is 0.611 at $\bar{x}=0.8$ and $\bar{y}=0.0$. The solution by the perturbation technique for the thermal conductivities with arbitrary functions of \bar{x} has high accuracy even in two terms.

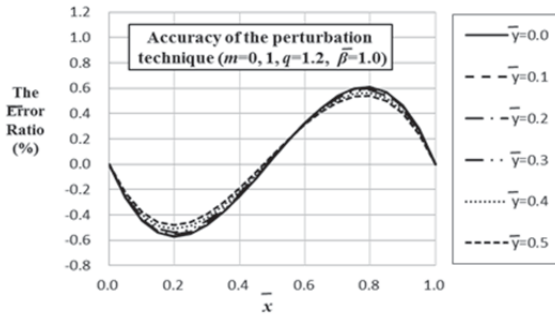


Fig.6 Accuracy of the perturbation technique

Fig.7 shows the transient temperature distributions. The solid line shows the steady part of exact temperature distribution T_{exact} shown in Eq. (80) which is exactly the same as Eq. (23). Other lines are approximate temperature T_{app} shown in Eq. (102) for $m=0$ along $\bar{\eta}$ -axis at $\bar{\xi}=0.5$ with time. The error ratio at $\bar{\tau}=0.8$ is about -20 %.

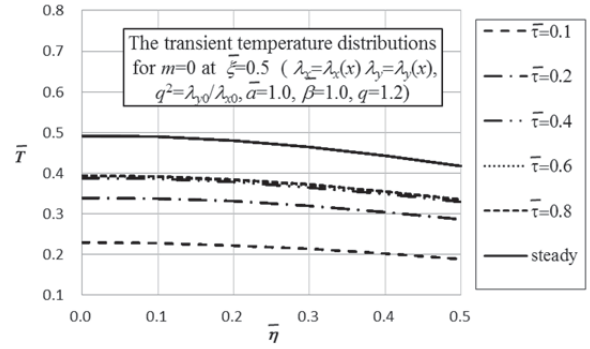


Fig.7 The transient temperature distributions for $m=0$ at $\bar{\xi}=0.5$ with time

Fig.8 shows the transient temperature distributions given in Eq. (103) for $m=0, 1$ along $\bar{\eta}$ -axis at $\bar{\xi}=0.5$ with time. The solid line is the same as **Fig.7**. The error ratio given by Eq. (104) at $\bar{\tau}=0.8$ is about -0.13%. From the results of **Fig.7** and **Fig.8**, we can say that adequate accuracy is assured by adopting the first two terms in Eq. (98).

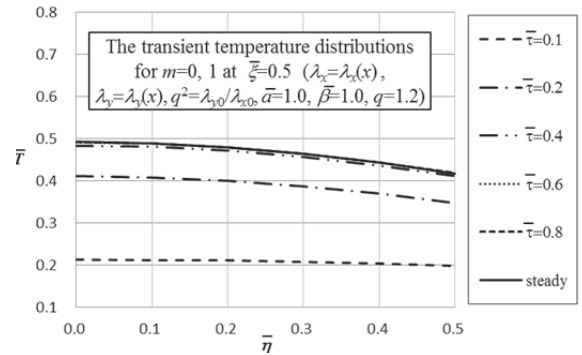


Fig.8 The transient temperature distributions for $m=0, 1$ along $\bar{\eta}$ -axis at $\bar{\xi}=0.5$ with time

Fig.9 shows the exact transient temperature distributions given in Eq. (80) along $\bar{\eta}$ -axis at $\bar{\xi}=0.5$ with time.

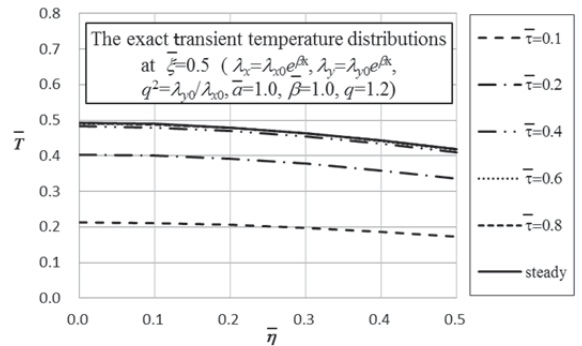


Fig.9 The exact transient temperature distributions along $\bar{\eta}$ -axis at $\bar{\xi}=0.5$ with time

6. Conclusions

- [1] The two-dimensional steady heat conduction problems for four types of thermal conductivities [(1) $\lambda_x = \lambda_{x0} e^{\beta x}$, $\lambda_y = \lambda_{y0} e^{\beta y}$, (2) $\lambda_x = \lambda_{x0} e^{\beta x}$, $\lambda_y = \lambda_{y0} e^{\gamma y}$, (3) $\lambda_x = \lambda_{x0} (1 + \alpha x^\beta)$, $\lambda_y = \lambda_{y0} (1 + \alpha y^\beta)$, (4) $\lambda_x = \lambda_x(x)$, $\lambda_y = \lambda_y(x)$] in FGOM are discussed.
- [2] The two-dimensional transient heat conduction problems for two types of thermal conductivities [(1) $c(x) \rho(x) = c_0 \rho_0 e^{\beta x}$, $\lambda_x = \lambda_{x0} e^{\beta x}$, $\lambda_y = \lambda_{y0} e^{\beta y}$, (2) $c = c(x)$, $\rho = \rho(x)$, $\lambda_x = \lambda_x(x)$, $\lambda_y = \lambda_y(x)$] in FGOM can be solved by Laplace transform, the perturbation technique and transformation of variables.

References

- 1) M. Yamanouchi et al., Proc. First Int. Sympos. on Functionally Gradient Materials, Sendai, 1990.
- 2) M. Koizumi, The concept of FGM, Trans. The American Ceramic Society, Functionally Gradient Materials, 34, J.B. Holt, M. Koizumi, T. Hirai and Z. A. Munir, (eds.), pp. 3-9, 1993.
- 3) N. Noda, Thermal stresses in functionally graded materials, Journal of Thermal Stresses, Vol. 22, Issues. 4-5, pp. 477-512, 1999.
- 4) R.B. Hetnarski, Encyclopedia of Thermal Stresses, Springer, 2013.
- 5) M. Ferrari, Journal of Thermal Stresses, Anisotropic layers with through-thickness thermal and material variations, Vol. 15, Issue 3, pp. 439-445, 1992.
- 6) J.Q. Tarn, Y. M. Wang, Heat conduction in a cylindrically anisotropic tube of a functionally graded material, Journal of Mechanics, Vol. 19, Issue 3, pp. 365-372, 2003.
- 7) J. Chen et al., Thermal fracture analysis of a functionally graded orthotropic strip with a crack, International Journal of Mechanics and Materials in Design, Vol.1, Issue 2, pp.131-141, 2004.
- 8) J. R. Berger, et al., Fundamental solutions for steady-state heat transfer in an exponentially graded anisotropic material, Zeitschrift für angewandte Mathematik und Physik, Vol.56, Issue 2, pp. 293-303, 2005.
- 9) Y. Ootao, Y. Tanigawa, Transient thermal stresses of orthotropic functionally graded thick strip due to nonuniform heat supply, Structural Engineering and Mechanics, Vol. 20, Issue 5, pp. 559-573, 2005.
- 10) K. Terasawa, Introductory Mathematics for Natural Scientist (Enlarged and Revised Edition), Iwanami Shoten, p.89, 1972.
- 11) S. Moriguchi, K. Utagawa, S. Hitotsumatsu, Mathematical Formula, Iwanami Shoten, p.162, 1973.
- 12) K. Gotou, Introductory Mathematics for Modern Science, Kyoritsu Shuppan Co., Ltd, p.211, p.123, 1981.

データ圧縮における Python プログラムの性能について

吉田 茂*

(2016年9月30日受理)

On Performance of Data Compression Program in Python

Shigeru Yoshida*

(Received September 30, 2016)

Abstract

This paper describes the portability to Python from C language and their processing speed in the field of data compression. Programming language, Python is used at lots of field in recent years. Various software libraries of statistical analysis, image learning/recognition, artificial intelligence, multimedia and web development are made with Python as open source, and Python is used widely as a newly developed language in 1990's. However as for data compression, any major library for studies doesn't seem to exist. A data compression software is offered to use finally in C language. Since program in Python is easy to write and also easy to read its logic, as with other fields, in the field of data compression, at simulation level, writing programs in Python is expected to improve the efficiency of work. The performance with Python compared with C language are shown.

キーワード: 移植性, 処理速度

Keywords: Portability, Processing speed

1. はじめに

近年, プログラム言語 Python^[1] が各方面で使われて話題になっている. 雑誌 Interface では2016年10月号が Python 特集号であった^[2]. Python には, 「インデント(字下げ)が文法として決められており, インデントの違いがブロックの区切りとなっているため, コードが読みやすい」という大きな特徴がある^[2]. 統計解析, 画像学習/認識, 人工知能, マルチメディア, ウェブ開発などの様々なライブラリがオープンソースで作られ, 1990年代に新しくできた言語にしては, 幅広く使用されるようになっている. しかしながら, バイナリデータの処理やデータ圧縮の分野については, 研究用のライブラリが整っていないようである. データ圧縮のC言語のソフトウェアは幾つか公開されている^{[4][5][6]}. データ圧縮ソフトウェアは, シミュレーションで性能が確認された後, 最終的に実用に供されるので, 処理速度を取るためにC

言語で実装されるのが, 普通である. コンパイラ言語のC言語に対して, Python はスクリプト言語であるため, 処理速度が遅いと予想される. しかし, シミュレーションのレベルならば, Python で実装した方が, 様々な試行は作業の効率が上がると思われる.

それから, これは大学で教えていて感じるのだが, C言語の場合, インデントをきちんと取っていないプログラムを, 学生に書かれることもあり, 論理が読み取り難い. Python を導入すれば, 強制的にインデントを取るようになるので, 学生のプログラムも, 読みやすくなり, プログラミング技術の上達につながると予想する.

Python の導入を考える立場から, 関心事として, Python へのプログラムの移植性と処理速度がある. 以下では, 第2章で従来例について触れ, 第3章で Python のC言語からの移植性と, 第4章でC言語と Python の処理速度, 第5章で考察し, まとめとする.

* 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, Nishihasama-cho, gamagori, 443-0047 Japan

```

#include <stdio.h>
#include <stdlib.h>

FILE *infile, *outfile; /* 入力ファイル, 出力ファイル */
unsigned long outcount = 0; /* 出力バイト数カウンタ */
static int getcount = 0, putcount = 8; /* ビット入出力 */
static unsigned bitbuf = 0; /* ビット入出力バッファ */
#define rightbits(n, x) ((x) & ((1U << (n)) - 1U))
/* x 右 n ビット */

void error(char *message) /* メッセージを表示し終了 */
{ fprintf(stderr, "%n%s%n", message); exit(EXIT_FAILURE); }

unsigned getbit(void) { /* 1 ビット読む */
    if (--getcount >= 0) return (bitbuf >> getcount) & 1U;
    getcount = 7; bitbuf = getc(infile);
    return (bitbuf >> 7) & 1U;
}

unsigned getbits(int n) { /* n ビット読む */
    unsigned x;
    x = 0;
    while (n > getcount) {
        n -= getcount;
        x |= rightbits(getcount, bitbuf) << n;
        bitbuf = getc(infile); getcount = 8;
    }
    getcount -= n;
    return x | rightbits(n, bitbuf >> getcount);
}

void putbit(unsigned bit) { /* 1 ビット書き出す */
    putcount--;
    if (bit != 0) bitbuf |= (1 << putcount);
    if (putcount == 0) {
        if (putc(bitbuf, outfile) == EOF) error("書けません");
        bitbuf = 0; putcount = 8; outcount++;
    }
}

void putbits(int n, unsigned x) { /* n ビット書き出す */
    while (n >= putcount) {
        n -= putcount;
        bitbuf |= rightbits(putcount, x >> n);
        if (putc(bitbuf, outfile) == EOF) error("書けません");
        bitbuf = 0U; putcount = 8; outcount++;
    }
    putcount -= n;
    bitbuf |= rightbits(n, x) << putcount;
}

```

Fig.1 C 言語のビット処理プログラム

2. 従来技術について

データ圧縮の Python プログラムについては、Interface 誌などに投稿している廣井誠氏が、彼の Web ページで、2006 年頃から先駆的に、種々のアルゴリズムを Python で作り、公開している^[7]。海外では、^[8]のサイトが 2, 3 の Python プログラムを公開している。

Python には開発バージョンには、2 系と 3 系（現時点のバージョンは、2 系が 2.7.12, 3 系が 3.5.2）があり、3 系は 2 系に対して上位互換性はない。そこで、2 系で作るか、3 系にするかが問題になる。廣井氏の Python アルゴリズム公開サイトは 2 系である。ここでは、既に動いているソフトウェアを参考にするにせよ、2 系を中心に話を進める。

```

#coding:utf-8
# 定数の定義
WOPEN = "wb"
ROPEN = "rb"

# バイト単位の入出力
def getc(f):
    c = f.read(1)
    if c == "": return None
    return ord(c) # ord() 文字→数値

def putc(f, x):
    f.write(chr(x & 0xff)) # chr() 数値→文字

# クラス定義
class BitIO:
    def __init__(self, name, mode):
        if mode == "rb":
            self.cnt = 0
        elif mode == "wb":
            self.cnt = 8
        else:
            raise 'BitIO: file mode error'
        self.mode = mode
        self.file = open(name, mode)
        self.buff = 0

    def close(self):
        if self.mode == "wb" and self.cnt < 8:
            putc(self.file, self.buff)
            self.file.close()

# 1 bit input
def getbit(self):
    self.cnt -= 1
    if self.cnt < 0:
        self.buff = getc(self.file)
        if self.buff is None: return None
        self.cnt = 7
    return (self.buff >> self.cnt) & 1

# 1 bit output
def putbit(self, bit):
    self.cnt -= 1
    if bit > 0: self.buff |= (1 << self.cnt)
    if self.cnt == 0:
        putc(self.file, self.buff)
        self.buff = 0
        self.cnt = 8

# n bits input
def getbits(self, n):
    v = 0
    p = 1 << (n - 1)
    while p > 0:
        if self.getbit() == 1: v |= p
        p >>= 1
    return v

# n bits output
def putbits(self, n, x):
    p = 1 << (n - 1)
    while p > 0:
        self.putbit(p & x)
        p >>= 1

```

Fig.2 Python のバイト入出力とビット処理プログラム

3. Python の C 言語からの移植性

C 言語のプログラムを Python に移植するとき、特に問題になるのが、バイトデータのファイル入出力と、バイトデータの中の 1 ビットごとの処理である。はファイルからデータを読み込み、符号を出力するときに必要であり、は符号を作るときと、符号を復号するときに必要になる。

C 言語のプログラムでは、の処理はバイトのファイル入出力として、標準関数 `getc()`, `putc()` を用いて、そ

のまま実装できる。 の処理を Fig.1 に示す^{[4][5]}。また、これに対応する部分を、Python では、前記の廣井氏が Web サイトで公開している。これは Fig.2 のように、

の部分を `getc()` , `putc()` 関数を作って、実現している。バイト単位の入出力では `getc()` は `ord()` 関数によって、文字列を数値に変換している。また、`putc()` では、`chr()` 関数によって、逆に、数値を文字列に変換している。すなわち、Python はバイナリの読み取りでは元々、文字列で入力し、バイナリの書き込みでは文字列を書込むようにしている。バイナリの値を直接、入出力させないのは、統計処理や数値計算を主体に考えられたからと想像する。しかし、データ圧縮では、バイナリデータを直接、入出力させたいので、これは余分な時間を取るようになる。従って、入出力にともなう余分な処理がなくなれば、もっと高速になると思われる。

Fig.2 のプログラムは 2 系では動くが、3 系では必要な対応するライブラリがなく、動かない。

4. Python と C 言語プログラムの処理速度

(1) 測定環境

時間測定には、Table 1 に示すように、一般のパソコンを使った。Python と C 言語の版数も示す。計測したのは、データ圧縮のプログラムで、エントロピー計算のプログラム、LZW の圧縮プログラム、文法圧縮のプログラムを選んだ。は、バイト処理だけなので、入出力性能が分かる。は辞書を作りながら、圧縮する。また、ファイルの入出力と、最後にビット詰めを行うので、ビット処理の基本性能が分かる。は、圧縮時に、繰返しループがあるので、計算の性能が分かる。

評価用サンプルには、圧縮性能の評価に従来より用いられている Calgary コーパス^[10] から 5 種類のデータを選んで試した。Table 2 にしめす。

Python の処理時間は、`time.clock()` 関数を用いた^[7]。C 言語プログラムの処理時間測定には、Windows の組込み関数^[9]をプログラム埋め込み、ミリ秒まで求めた。

(2) エントロピーの計算

まず、バイト単位のファイル入力だけで動かせる、エントロピーの計算を取り上げる。

Table 3 より、Python プログラムの平均処理速度は 2.0 MB/s である。C 言語のプログラムは 5 個のデータ中 4 個で時間が求まらなかった。book1 のデータでみると、Python と C 言語のプログラムでは処理速度は約 10 倍違うことが分かる。それから、C 言語のプログラムの場

Table 1 測定環境

項目	内容
コンピュータ	ノート PC MousePro
OS	Windows 10 Pro
CPU	Intel corei7-6500U 2.50GHz
メモリ RAM	8.0 GB
Python	Version 2.7.3
C 言語	GNU gcc Version 3.4.5

Table 2 評価用サンプル

サンプル名	データ長	データの種類
bib	111 KB	文字コード 経歴
book1	768 KB	" 書籍
geo	102 KB	浮動小数点データ
obj1	21 KB	バイナリデータ プログラム
progc	39 KB	文字コード C プログラム

Table 3 0 次エントロピーの計算

サンプル名	エントロピー	ビットレート	時間 (ms)	速度 (MB/s)	
Python	bib	5.20	0.650	54	2.0
	book1	4.52	0.565	364	2.1
	geo	5.65	0.705	51	2.0
	obj1	5.95	0.743	12	1.8
	progc	5.20	0.649	20	2.0
	平均	5.30	0.663	--	2.0
C 言語	bib	5.20	0.650	0	--
	book1	4.52	0.565	31	24
	geo	5.65	0.705	0	--
	obj1	5.95	0.743	0	--
	progc	5.20	0.649	0	--

Table 4 0 次エントロピーのプログラム・ステップ数

言語名	プログラム行数
Python	25
C 言語	38

(注) プログラム行数にはコメント行は含まない。

合は、Calgary コーパスの数百 KB サイズのデータでは、所要時間は 1 ミリ秒以下であり、処理速度が測れないほど、CPU が速くなっていることが分かる。

Table 4 より、Python プログラムのサイズは、C 言語プログラムより、パラメータの初期化やブロックの括弧の省略などで、短くなっている。

(3) 辞書型圧縮 LZW^{[4][6][7]}

ファイルのバイト単位の入出力と、1 ビット単位の処理を調べるために LZW 圧縮のプログラムを選んだ。LZW 圧縮は、組織的に文字列を蓄えた辞書を作る方法であり、圧縮・復元の処理がほぼ対称になる。LZW 圧縮は、画像フォーマット GIFF や TIFF で利用され、通信規格 ITU-T V42.bis にも用いられているアルゴリズムである。ここでは圧縮の符号語は 12 ビットである。

結果を Table 5 に示す。Python のプログラムは、前述

の廣井氏 [7] の LZW を用いた。C 言語のプログラムは、文献 [4] のプログラムを用いた。アルゴリズムに多少の違いがあるため、圧縮率は全く同じにはなっていないが、ほぼ一致している。Python プログラムの処理速度は、圧縮、復元とも 200KB/s のレベルである。

一方、C 言語のプログラムは、数十 KB のサイズのデータは測定結果が求まらなかった。C 言語では圧縮・復元とも 5MB/s 程度は出ている。ここでも、Python の処理速度は、C 言語プログラムに比べて、1/10 以下であることが分かる。bit 処理を入れても大幅には変わらないようだ。

Table 6 より、Python のプログラム・サイズは、C 言語より、だいぶ小さい。これは C 言語プログラムが、エラー処理を含めて厳密に実装されているため、大きくなっている。この値はプログラム・サイズ比較の参考にならない。

Table 5 LZW 圧縮の計算

サンプル名	圧縮率	圧縮 (ms)	復元 (ms)	圧縮 KB/s	復元 KB/s	
Python	bib	0.484	505	406	220	274
	book1	0.584	2,892	2,712	266	283
	geo	0.769	521	477	197	214
	obj1	0.787	130	105	165	204
	progc	0.618	177	158	224	250
	平均	0.618	--	--	214	245
	C 言語	bib	0.484	31	16	3,600
book1		0.508	94	78	8,200	9,800
geo		0.769	16	16	6,400	6,400
obj1		0.787	0	0	--	--
progc		0.617	16	0	2,400	--
平均		0.633	--	--	--	--

Table 7 文法型 RePair 圧縮

サンプル名	圧縮率	圧縮 (s)	復元 (s)	速度 KB/s	速度 KB/s	
Python	bib	0.355	123.6	0.355	0.89	312.
	book1	0.400	1734.	2.27	0.44	338.
	geo	0.650	63.2	0.455	1.78	225.
	obj1	0.581	24.4	0.125	0.86	172.
	progc	0.431	50.7	0.166	0.78	238.
	平均	0.483	--	--	0.95	257.
	C 言語	bib	0.355	3.53	0.016	31.5
book1		0.400	63.67	0.098	12.1	7,845
geo		0.650	1.91	0.016	53.7	6,400
obj1		0.581	0.66	0.015	32.8	1,433
progc		0.431	1.38	0.000	28.8	--
平均		0.483	--	--	31.8	5,660

Table 6 LZW 圧縮・復元のプログラム行数

言語名	プログラム行数
Python	109
C 言語	本体部分 144 + ビット処理 163

Table 8 RePair 圧縮・復元のプログラム行数

言語名	圧縮	復元	ビット処理
Python	108	67	72
C 言語	104	63	71

(注) プログラム行数にはコメント行は含まない。

(4) 文法型圧縮

これからの研究用として、文法型圧縮で Re-Pair アルゴリズム^[11]の処理速度を測った。文法型圧縮は、圧縮したままの検索できる方法が研究されており、今後の展開が期待される方式である。C 言語のプログラムは文献^[12]のものを使った。符号化には CBT(Complete Binary Tree) 符号を用いた。Python のプログラムは C 言語プログラムを基に自作した。

Re-Pair アルゴリズムは、圧縮するとき、Off-Line の辞書を初めに作るもので、隣合う 2 文字のペアのうち最頻のペアを、一文字に置き換える操作を繰り返して、置換文字列と文字ペア表を作成する。圧縮データは、置換文字列と文字ペア表である。圧縮は、大量にメモリが必要で、時間もかかるが、復元は、文字ペア表の容量があれば、あとは置換文字列を一文字ずつ送っても復元ができる。圧縮が重たく、復元が軽いという特徴がある。復元が正味のデータ量のみで済むので、組み込み系の圧縮に向く。結果を、Table 7 に示す。この表は処理時間が「秒」になっていることに注意する。

C 言語プログラムでは、圧縮は平均 31KB/s であり、復元はばらつきがあり、平均 5MB/s となっている。特に、サンプルの book1 は 768KB で、他のデータの 7 倍以上であるため、時間がかかり、処理速度が落ちている。

一方、Python プログラムは、圧縮において、サンプル book1 の処理速度が他のサンプルの半分になっている。圧縮の処理速度は 1KB/s 以下であり、復元は平均で約 250KB となっている。この値は、C 言語に比べて、圧縮が約 1/30、復元が約 1/20 になっている。

Python の処理時間は、ビット処理を含むバイト単位の入出力で 1/10、繰返しループの計算で数分の一になるようである。

プログラム・サイズは Table 8 より。Python プログラムと C 言語は、ほぼ同じサイズとなった。これは Python で、do {・・・} while() 文が使えないことや、単項演算子が使えないことなどが、プログラム・サイズ増加の原因となった。プログラム全体としての読みやすさは、Python の方が C 言語より優っている。

5. 考察、処理速度の改善に向けて

当初、予想した通り、Python の処理速度は遅いが、Calgary コーパスのようにサイズが数百 KB のデータで、

通常の圧縮ソフトウェアならば、体感的に遅く感じることはない。数百 KB のデータならば、シミュレーションに十分使えるレベルと考える。ただし、繰返しループが多く、長時間がかかるアルゴリズムについては、やはり処理速度の改善が必要である。

処理速度の改善策はいろいろ研究されており、幾つかの方法が使われている^[13]。下記に紹介する。しかし、これらの方法はややハードルが高いので、今後の検討課題とする。

(1) Cython を用いる^[14]

Cython は C 言語のデータ型を使った Python と言われる。Python の変数が動的型付けをするのに対して、データ型を明記して静的型付けをするものである。Cython は、データの入出力だけでなく、実装したアルゴリズムを高速化することができる。10 倍近い高速化が期待できると言われる。

(2) 部分的な改良、使用する要素を工夫する

現在、Python の配列は「リスト」を用いている。

LZW 圧縮の辞書や、文字ペア表の配列は、書き換えられないので、「リスト」(動的配列、値を変更でき、サイズも変更できる)でなく、「タプル」(静的配列、値を変更できない、生成されたら中のデータを変えられない)を使う。

バイナリデータを読み書きする配列に ByteArray を用いる。ByteArray はバイナリデータを、そのままの形で読み書きできる。ByteArray により、入出力速度の改善が期待できる。

6. まとめ

今回は、データ圧縮ソフトウェアにおいて、Python プログラムと C 言語プログラムの比較を、ノート PC で行った。その結果、Python は C 言語の 1/10 以下の処理速度であることが分かった。数百 KB のデータでは、体感的に待たせないで、シミュレーションには使えそうである。ただし、大容量のデータや、複雑な繰返し計算をするアルゴリズムの場合は、長時間を要するので、やはり処理速度の改善が必要である。Python を高速化する場合、使いやすい方法での処理速度の改善が、今後の課題である。

参考文献

- [1] Python: <https://www.python.org/>
- [2] データ解析時代の新定番 ライブラリ 101 選 Python, Interface 2016 年 10 月号, CQ 出版社 (2016.9)
- [3] 大和田勇人・金盛克俊: Python で始めるプログラミング入門, コロナ社 (2016.4).
- [4] M. ネルソン: データ圧縮ハンドブック, 萩原・山口訳, プレンティスホール/トッパン (1994).
- [5] 植松友彦: 文書データ圧縮アルゴリズム入門, CQ 出版社 (1994.10).
- [6] 奥村晴彦: C 言語による最新アルゴリズム事典, 技術評論社 (2009.06).
- [7] 廣井 誠: Algorithms with Python, http://www.geocities.jp/m_hiroi/light/index.html#python_algo (2006~).
- [8] David MacKay December 2005
<http://www.inference.phy.cam.ac.uk/mackay/python/compress/>
- [9] 「効率化のための手なおしの前には測定しよう」, p.10, 日経ソフトウェア, 2011 年 3 月号 (2011.2)
- [10] Calgary corpus: <http://www.data-compression.info/Corpora/CalgaryCorpus/>
- [11] N.J.Larson, A. Moffat: Off-Line Dictionary Based Compression, Proc. of The IEEE, Vol.88, No.11 (2000.10)
- [12] 吉田 茂: 文法型圧縮法における文字ペア表の圧縮, pp.1-7, 愛知工科大学紀要 第 11 巻 (2014.3)
- [13] M.Gorlick, I. Ozswald (著), 相川 (訳): ハイパフォーマンス Python, オライリージャパン (2015.11)
- [14] K.W. Smith (著), 中田秀基 (監修), 長尾高弘 (訳): Cython - C との融合による Python の高速化, オライリージャパン (2015.06)

場面遷移ネットを用いた離散・連続混合システムのモデリングとシミュレーション

舘山武史

(2016年9月30日受理)

A Modeling and Simulation Method for Large-Scale Systems Using Scene Transition Nets (STNs)

Takeshi Tateyama*

(Received September 30, 2016)

Abstract

Simulation is an effective technique for verifying the behavior of complex systems such as manufacturing systems and chemical plant systems. However, many complex industrial systems are actually combinations of both continuous systems and discrete-event systems and are called “discrete-continuous hybrid systems.” Hence, it is difficult to model and simulate such systems by using only the modeling methods applicable to continuous systems or those used discrete-event systems. Kawata et al. have proposed scene transition nets (STN) as graphical modeling and simulation tools for discrete-continuous hybrid systems. The STN is one of the effective modeling methods for large-scale and complex systems. This paper describes an outline and several examples of the applications of the STN.

キーワード：離散・連続混合システム，モデリング，シミュレーション，場面遷移ネット

Keywords: discrete-continuous hybrid systems, simulation, scene transition nets, discrete-continuous hybrid systems

1. はじめに

システムの挙動を検証するためには、システムをモデル化し、シミュレーションを行うことが有効な手段の一つであるが、生産システムやロボットシステムに代表される人工システムの多くは、離散事象間に連続のダイナミクスが含まれる離散・連続混合システムとして扱わざるを得ない。連続変数システムは微分方程式、離散事象システムはペトリネット⁽¹⁾等の代表的なモデリング手法が存在するが、これらが混在した離散・連続混合システムのモデリングは困難であった。そこで川田らは、離散・連続混合システムのモデリング・シミュレーション手法の一つとして、場面遷移ネット (Scene Transition Nets, 以下 STN) を提案しており、搬送システムや化学プラントシステムへの適用例から、その有効性を示して

いる⁽²⁾⁽³⁾。また近年は、舘山らが GUI を導入した STN シミュレータの開発⁽⁴⁾、STN を用いた大規模・複雑システムのモデリング手法⁽⁵⁾、サービスシステムへの適用⁽⁶⁾などを行っている。

本稿では、STN の基礎概念および著者らの STN に関する一連の研究成果について解説する。

2. 場面遷移ネット (Scene Transition Nets, STN)

本章では、STN の概要とその構成要素について説明する。

2.1 STN とは

STN は、アクタとシーンという概念に基づき、離散・連続混合システムを図式的に表現するためのモデルである。また、STN は離散事象システムのモデリングに用

* 愛知工科大学工学部電子制御・ロボット工学科 〒443-0047 愛知県蒲郡市西迫町馬乗 50-2
Department of electronic control and robot engineering, Aichi University of Technology, 50-2, Manori, Nishihasama-Cho, Gamagori, Aichi 443-0047 Japan

いられるペトリネットのコンセプトに基づいており、並列的に動作している複数のサブシステムがどのように関わり合っているかを示すことができる。

2.2 STNの構成要素

Fig.1 に示すように、STN はアクタ (Actor)、シーン (場面, Scene)、トランジション (Transition)、そしてシーンとトランジションを結ぶアーク (Arc) で構成される。以下に各構成要素の詳細を示す。

2.2.1 アクタ (Actor) とアクタクラス (Actor Class)

アクタはペトリネットのトークン (Token) に相当するが、自らの状態変数を保持している点がトークンとの大きな違いである。Fig.1 に示すように、アクタは後述する現行シーン内の図形で表現され (Fig.1 では A1 と書かれた丸)、現行シーンに記述されたダイナミクスに従って自らの状態変数を動的に変化させる。また、アクタ変数がある条件 (後述する出力トランジションに記述されている条件) を満たすと、アクタは別のシーンに遷移する。つまり、アクタは状態変数を変化させながら、ネットワーク内を移動していくことになる。また、オブジェクトとして概念的な共通性を持ち、同一のデータ構造を持つアクタの集合をアクタクラスと呼ぶ。Fig.1 では、アクタ A1 はアクタクラス A のインスタンスであり、アクタ A2, A3, ... もアクタクラス A のインスタンスであるとする、それらはアクタ A1 と同一のデータ構造を持つものとする。

2.2.2 シーン (Scene) とキャスト (Casting)

シーンはペトリネットのプレース (Place) に相当し、Fig.1 に示すように上下に三分割された長方形で表される。最上段にはシーン名が記述され、中段にはそのシーンに遷移することができるアクタクラスが表示されている。このアクタクラスを、そのシーンのキャストと呼ぶ。最下段には、現在そのシーンにあるアクタが表示されている。このとき、そのアクタをシーンのパフォーマンスと呼び、そのアクタにとっては現在のシーンは現行シーン (または現行場面) と呼ぶ。

2.2.3 トランジション (Transition) とアーク (Arc)

STN のトランジションは、ペトリネットのトランジションに相当する。トランジションとシーンは Fig.1 に示すようにアーク (矢印) で結ばれており、シーンの入力側のトランジションを入力トランジション、出力側を出

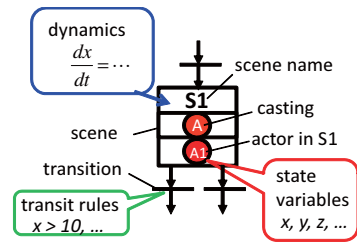


Fig.1 STN components

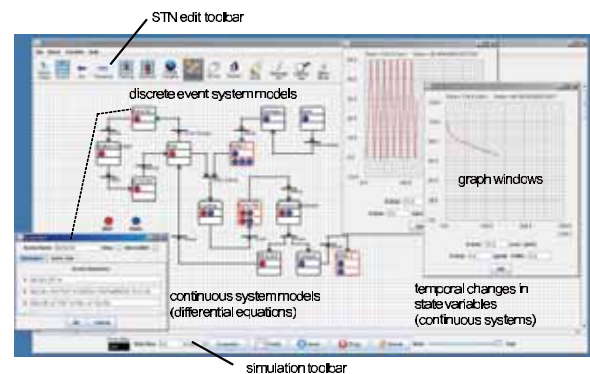


Fig.2 STN GUI Simulator

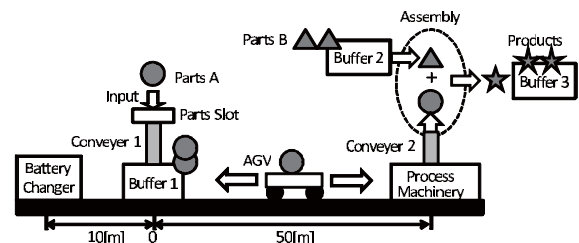


Fig.3 An automated transportation system using battery-powered AGV

カトランジションと呼ぶ。また、トランジションにアークを介して入力側となるシーンをそのトランジションの入力シーン、出力側を出力シーンと呼ぶ。各トランジションには入力シーン内のパフォーマンスとなるアクタが出力シーンに遷移するための発火条件と、遷移時の状態遷移則が記述されている。

2.3 STNによるシミュレーション

上記の要素を組合せてネットワークを構築後、シミュレーションを実行する。シミュレーションでは、ユーザーは各アクタの場面遷移の様子を観察することで離散事象システムの解析、またアクタ変数の時間的推移を観察することで連続変数システムの解析が同時に可能となる。

3. STN GUI Simulator

STN のモデルの構築やシミュレーションを実行するためには、高度な STN の知識とオブジェクト指向プログラミングの知識が要求される。そのため著者らは、ユーザーが容易に STN のモデリングおよびシミュレーションを行うことを可能とすることを目的として、ユーザーフレンドリな GUI (Graphical User Interface) を実装した STN GUI Simulator⁽⁴⁾ を開発している。Fig.2 にシミュレータの外観を示す。本シミュレータの開発言語は JAVA であり、マルチプラットフォームに対応している。本シミュレータは、(1) STN 構築ツールバー、(2) ワークスペース兼シミュレーション実行スペース、(3) シミュレーションツールバーで構成されている。本シミュレータにより、GUI を介して STN のモデル構築、変数の設定、シミュレーションの実行・観測を視覚的・直感的に行うことが可能となる。

4. AGV を用いた部品搬送システムのモデリング・シミュレーション例

本章では、Fig.3 に示すバッテリー駆動の AGV (Automated Guided Vehicle) を用いた部品搬送システムのモデリング例⁽⁴⁾ を示す。まず、作業員によって部品投入口に投入された部品 A は、コンベア 1 によってバッファ 1 に搬入される。部品 A はバッファに到着した順に AGV に積載され、加工機械に搬送される。機械によって加工された部品 A は、コンベア 2 によって組立機械に搬送され、バッファ 2 に置かれている部品 B と組み合わせられ、製品が完成する。完成した製品は、バッファ 3 に保管される。AGV は部品 A を加工機械に投入した後、バッファ 1 の待機所に戻るが、待機所でバッテリーの電圧 $V_a = 100 [V]$ をチェックし、電圧が $V_{th} [V]$ 以上であれば再び部品を搬送し、 $V_{th} [V]$ 未満であればバッテリー交換所に向かう。また、部品 A は定期的にバッファ 1 に搬入されるが、AGV が待機所に到着したときにバッファ 1 に部品 A が到着していない場合、AGV はそのまま待機所で待機する。ここで、AGV の移動とバッテリー電圧変化のダイナミクスを下記のように近似する。

$$\begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{\omega} \\ \dot{V}_a \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & \pm R & 0 \\ 0 & -\psi^2/R_a J & \psi/R_a J \\ 0 & \alpha\psi/R_a & -a/R_a \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ \omega \\ V_a \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ -Tl/J - R_c \\ 0 \end{bmatrix} \cdot \dots \cdot (1)$$

ここで、 $x [m]$: AGV の位置 (バッファ前の待機所を原点とし、加工機械とバッテリー交換所の位置をそれぞれ $+50 [m]$, $-10 [m]$ とする), $\omega [rad/sec]$: モーターの角速度, $V_a [V]$: バッテリーの電圧, R : 最終減速比, $R_a []$: 電機子回路抵抗, $J [kgm]$: 回転系にかかわる総慣性モーメント, $\psi [Nm/A]$: 電機子電流-トルク定数, $Tl [Nm]$: モーター軸に加わる逆トルク, $R_c [Nsec/m]$: 粘性抵抗係数, $a [V/Asec]$: バッテリー特性定数, とし、それぞれ $R_a = 0.1$, $J = 1.0$, $\psi = 1.0$, $Tl = 1.0$, $R_c = 1.0$, $a = 0.2$, V_a の初期値を $100 [V]$, $V_{th} = 45 [V]$ とした。シミュレーションの目的は、AGV の挙動とバッテリー電圧の変化、各部件の搬送の流れを観察することである。

Fig.4 に構築した STN モデルを示す。Fig.5 は AGV のバッテリー電圧 $V_a [V]$ の時系列変化を示したグラフである。また、シミュレータのアニメーションにより、AGV と各部件の挙動を視覚的に確認可能である。

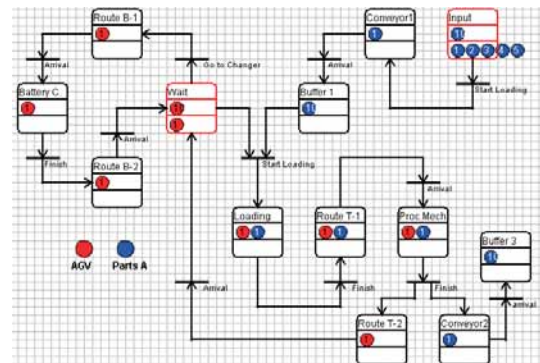


Fig.4 STN model of the automated transportation system

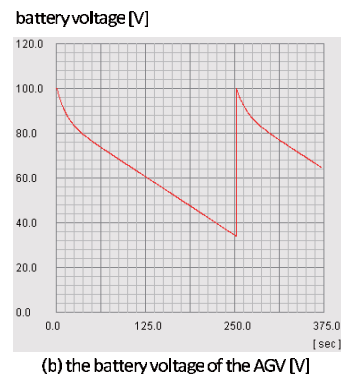


Fig.5 Temporal change in the battery voltage of the AGV [V]

5. 複雑・大規模システムのモデリングのための、STN を用いたマルチアスペクトモデリングの実現

大規模・複雑なシステムは、異なる目的・視点に基づいて設計された複数のシステムの組み合わせで構成されている。このようなシステムの STN モデルを構築するには、個々のサブシステムを、それぞれ独立した視点からエンビジョニング (envisioning)⁽⁷⁾ (人間が物理システムを理解する際に、頭の中でシステムの定性的な挙動を思い浮かべること) という過程によりサブモデルとしてモデル化し、一つの大規模システムをそれらのサブシステムの組み合わせとして表現する、マルチアスペクトモデリングが有効であることが示されている⁽³⁾。

STN を用いてマルチアスペクトモデリングを行う場合、Fig.6 に示すように、必然的に複数の STN のサブモデルが構築される⁽³⁾ ため、必然的に同一のアクタが複数のサブモデル内に存在することになる。あるサブモデル内でのアクタの挙動は、他のサブモデル内のアクタの挙動に影響を及ぼす場合がある。しかし、既存の STN の枠組みは、異なる (アークで接続されていない) STN 間でアクタ変数の値等の情報のやりとりを行うことが不可能であるため、サブシステム間の相互作用を表現することは困難である。

そこで著者らは、複数のアクタ間でアクタ変数を共有するという概念を STN に導入することにより、複数の STN 間の相互作用を表現することを可能とする手法を提案している⁽⁶⁾。Fig.7 は、複数のアクタ間でアクタ変数を共有するという概念を示した図である。まず、上の図に示すように、アクタクラス A のインスタンスとなるアクタ A_1, A_2, \dots, A_N を考える。これらのアクタは、同一の種類のアクタ変数をもつが、通常は互いに独立した異なるアクタとして扱われる。次に、下の図に示すように、それぞれのアクタが異なる視点で構築されたサブモデル sub-STN model 1, 2, ..., N に存在していることを考える。ここでは、これらのアクタ $A_1 \sim A_N$ を同一のアクタとみなし、それぞれのアクタ変数を共有することとする。これにより、各サブモデル内のアクタの挙動が、他のサブモデル内のアクタの挙動に影響を及ぼすことを表現可能となる。つまり、時刻 t におけるアクタ変数 x, y, z, \dots の変化量は、各サブモデルの該当シーンに記述されている微分方程式によって導かれる変化量の総和となる。以上の拡張により、システムの階層構造や並列構造が容易に STN で構築可能となり、大規模・複雑なシステムを、さまざまな視点で構築された複数のサブモデルの組み合わせとして表現することが可能となる。

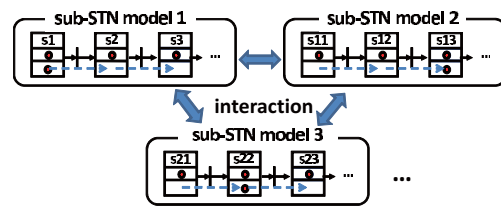


Fig.6 Outline of Multi-aspect STN Modeling

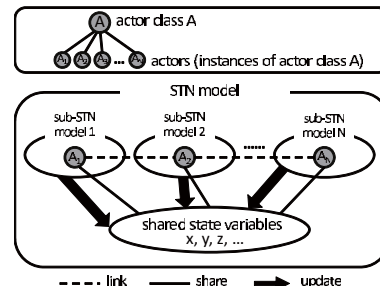


Fig.7 Concept of Actor-links for Multi-aspect Modeling

5.1 部品搬送システムのマルチアスペクトモデリング

ここでは、4章の例題で用いた部品搬送システムを4つの異なる視点でとらえ、4つのサブモデルを構築し、それらの相互作用を考慮しつつ、並列的にシミュレーションを実行することを考える。構築したサブモデルは、(1) AGVのモータ・バッテリー電圧の詳細モデルであるAGVダイナミクスモデル、(2) AGVが実行中であるタスクの種類を示すAGVタスクモデル、部品搬送、バッテリー交換のそれぞれのプロセスのモデルである(3) 部品搬送プロセスモデル、(4) バッテリー交換プロセスモデルである。下記にそれぞれのモデルの詳細を記す。

5.1.1 AGVダイナミクスモデル

Fig.8 に示すように、このモデルではAGVは走行 (Run) が停止 (Stop) の2状態のうちいずれかの状態となる。走行のシーン (Run) には、図に示すように式(1)のモーターとバッテリー電圧のダイナミクスが微分方程式で記されており、走行中はこのダイナミクスに従ってAGVの各連続変数 (x, ω, Va) が時系列で変化する。シーン "Stop" とシーン "Run" 間の状態遷移は、他のモデルのAGVの挙動に依存する。

5.1.2 AGVタスクモデル

Fig.9 に示すように、このモデルはAGVが実行するタスクの遷移を表している。タスクは、部品搬送

(Transport), バッテリー交換 (Battery C.), および部品の到着待ち (Wait) である。このモデルでは, AGV はシーン “Wait” で部品の到着を待つ際, バッテリーの現在の電圧 $V_a(t)$ をチェックし, 電圧が 45 [V] 未満の場合はシーン “Battery C.” へ遷移し, 電圧が 45 [V] 以上でかつパツファ 1 に部品 A が存在している場合, シーン “Transport” へ遷移する。これらの 2 つのシーンからシーン “Wait” への遷移のタイミングは, 下記に示す部品搬送プロセスモデルとバッテリー交換プロセスモデルにおける AGV の挙動に依存する。

5.1.3 部品搬送プロセスモデル

Fig.10 に示すように, このモデルは部品搬送プロセスの詳細を記したモデルであり, アクタは AGV, 部品 A, B, そして製品である。AGV が通路を走行するシーン (Route T-1, T-2) から目的のシーン (加工機械または待機所) への遷移は, AGV ダイナミクスモデルで時系列に変化するモータの角速度, 走行距離, バッテリー電圧の現在値に依存する。また, 部品の組立を行うシーン “Assembly” では, アクタ変換⁽³⁾を用いて部品 A と B から製品 product を生成するように設定する。

5.1.4 バッテリー交換プロセスモデル

このモデルは AGV のバッテリー交換プロセスの詳細を記したモデルである。部品搬送プロセスモデルと同様, AGV の場面の遷移は, AGV ダイナミクスモデル内の AGV の状態変数の変化に依存する。

5.2 アクタ変数の共有によるシミュレーションの並列実行

上記の 4 つのモデルのシミュレーションを並列的に実行し, かつモデル間の相互作用を実現するため, Fig.12 に示すように 4 つのサブモデル内の AGV (AGV1 ~ 4) を同一のアクタとみなし, 状態変数を共有する。この設定により, 部品搬送システム全体の挙動を示すシミュレーションを行うことが可能となる。

ここで, 単一の視点でのモデリングと, マルチアスペクトモデリングを比較して考察を行う。まず, マルチアスペクトモデリングを行った場合, 式 (1) の複雑な AGV のダイナミクスモデルは, AGV ダイナミクスモデルのシーン “Run” のみに記述すればよいため, モデルの構築および構築後の設定変更が容易であるという利点がある。このことは, 複雑なシステムを複数の設計者で (それぞれの専門・担当分野の観点から) モデル化する場合などでも有効であると考えられる。また, 複数の視

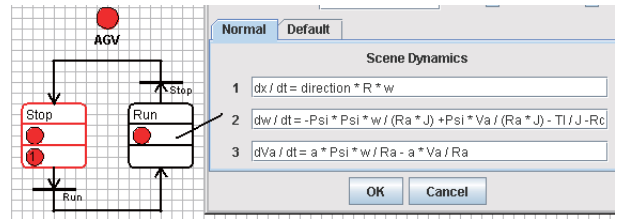


Fig.8 AGV dynamics model

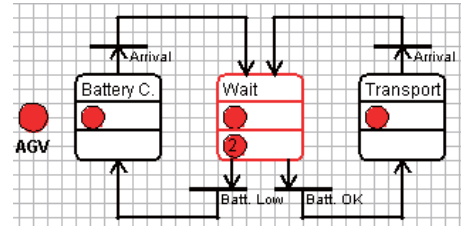


Fig.9 AGV task model

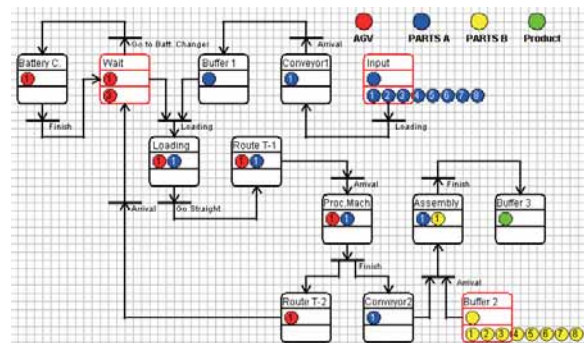


Fig.10 Transportation process model

点で構築した複数の STN モデルを並列的にシミュレーションを実行することにより, 目的に応じたシステムの観測が容易となるという利点もある。例えば, AGV の稼働率を観測したい場合は AGV ダイナミクスモデル, 部品搬送に要する時間やバッテリー交換の頻度等を観測したい場合は, AGV タスクモデル, 部品搬送プロセスにおける AGV の挙動や部品の流れを観測したい場合は部品搬送モデルを観測・解析すればよい。よって本手法は, 複雑なシステムのモデリングと, ユーザーの目的に応じた観測・解析を容易にすることが可能であると考えられる。

6. STN のサービスシステムへの適用例：看護師巡回タスク

本章では、STN のサービスシステムへの適用例の一つとして、病院や介護施設の看護師の巡回タスクのモデリングの例⁽⁶⁾を示す。基本的な業務内容は、看護師がナースステーションを出発し、それぞれ別室にいる患者5名を巡回し、基本的な看護サービスを行うことである。この巡回タスクには、複数のタスクを並行して行う並列作業や、ナースコールによる割り込みが含まれる。看護サービスのタスクは、ここでは体温・血圧などの「各種測定」と、点滴・包帯交換、投薬などの「各種手当」の2種とした。ここでは、これらの2つのタスクを「主業務」とする。看護師は上記の主業務と並行して、患者に関する「各種記録作業」を行う（並列タスク）。また、巡回対象ではない患者からナースコールがあった場合、主業務を中断し、ナースコールに対応するものとする（割り込みタスク）。

本検証の目的は、現実のサービスを再現することではなく、モデルの構築のしやすさ、動作確認のしやすさ、並列・割り込みタスクのモデル化が可能であるか否かを検証することである。そのため、ここでは実際の看護師の業務内容を簡略化したモデルを用いることとし、モデルの各種パラメータは下記のように仮想的な数値とした。看護師の歩行速度は $1[m/s]$ 、部屋間の距離は $10[m]$ とした。各患者の看護サービスに要する時間は、患者 A（測定 5 分、看護 10 分）、患者 B（10 分、15 分）、患者 C（10 分、10 分）、患者 D（5 分、10 分）、患者 E（5 分、15 分）とした。ナースコールは仮想的に巡回開始から 10 分後と 25 分後に発生させ、対応時間は 5 分とした。

ここでは、5 章で紹介したマルチアスペクトの概念をベースとして、まずは抽象的なタスクのモデル化を行い、段階的に各タスクの詳細モデルを構築していく。Fig.13 に、本 STN モデルの階層構造を示す。

それぞれの STN モデルは独立して記述されているが、前述のアクタリンクの設定により、各 STN モデルのアクタ「看護師」は同一アクタとする。これにより、それぞれのモデル間の相互作用をシミュレートすることが可能となる。各 STN サブモデルの詳細は、文献(6)を参照されたい。

Fig.14（左）は、割り込みタスク（ナースコール）が発生しなかった場合の、時刻 0 ~ 60 [min] の作業内容を表したチャートである。上図は移動、各種測定、手当のチャート、下図は記録作業のチャートである。これらのチャートから、変数として設定した通りにシミュレー

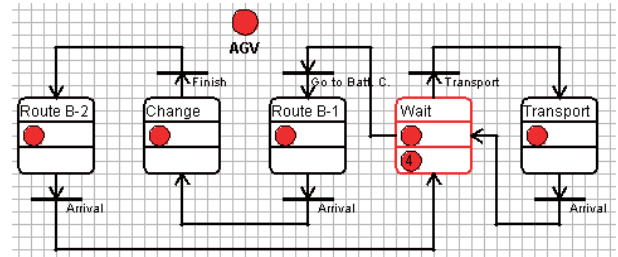


Fig.11 Battery change process model

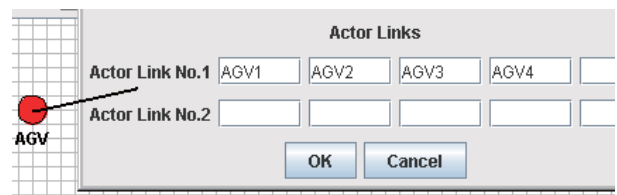


Fig.12 Setting window for actor variables sharing

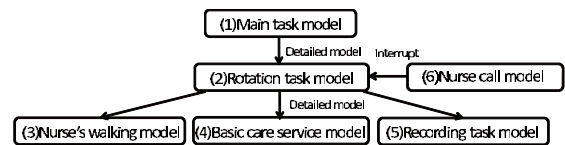


Fig.13 Layered Structure Model of the Nursing Care Service

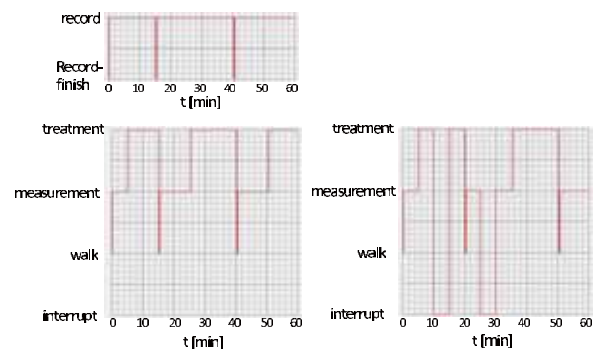


Fig.14 Time Carts of the Activity of the Nurse (Left: without Interrupted Processes), (Right: with Interrupted Processes)

トできていることが確認できる。

Fig.14 (右)は、割り込みを発生させた場合のチャートである。割り込み発生時は、主業務を中断し、ナースコールの対応を行っている。また、主業務の各タスクの所要時間は、ナースコール対応時間の分だけ増加していることがわかる。これらの結果から、本手法を用いることで、サービスの階層的・並列的（並行タスク、割り込みタスク）構造のモデリングが可能であることが示され、また構築した STN モデルは設定したパラメータに従い、正しく動作していることが示された。

本手法の利点は、STN モデルの階層化が可能となるという点と、部分的なモデルが正常に動作するか否かの検証を容易に行うことが可能となることがあげられる。例えば、看護師の移動モデルの動作検証、看護サービスモデルの動作検証などを独立して行うことが可能となり、上位層のモデルも、下位層のモデルの動作確認が完了した後で容易に検証を行うことが可能となる。また、モデルの変更が容易となることも特筆すべき点である。例えば、階層的モデリング手法を用いない場合、看護師が移動を行うシーン全てに看護師の移動モデルを記述する必要があり、変更時はそれらすべての個所を変更する必要があるが、本手法では独立して記述された移動モデルのみを変更すればよいことになる。また、特に現場裁量型⁽⁷⁾と呼ばれる本例題で扱ったようなサービスが多く含む、並列タスク・割り込みタスクのモデル化が容易となる。並行・割り込みタスクの数が多いほど、本手法はシーン数削減の面でもさらに有効となると考えられる。

7. おわりに

本稿では、離散・連続混合システムのモデリング・シミュレーション手法の一つである STN の解説を行った。また、部品搬送システム、介護サービスへの適用例を紹介した。STN は、今後も大規模・複雑システムのモデリングとシミュレーションのための有効な手法となることが期待される。

参考文献

- (1) T. Murata: " Petri Nets: Properties, Analysis and Application" , Proceedings of the IEEE, 77 (4) , pp.541-580(1989) .
- (2) 川田誠一, 川田尚吾, 渡辺敦: 「場面の概念を用いた離散連続混合システムのシミュレーションモデル」, 日本機械学会論文集 C 編, Vol.59, No.563, pp.1976-1982(1993) .
- (3) 川田尚吾, 川田誠一, 川合成治, 松永繁秋, 渡辺敦: 「アクタ変換とマルチアスペクト化による場面遷移ネット (STN) の拡張」, 日本機械学会論文集 C 編, Vol.62, No.599, pp.2905-2912(1996) .
- (4) T. Tateyama, T. Chin, S. Kawata and Y. Shimomura: "Development and Improvement of Scene Transition Nets (STN) GUI Simulator for Discrete-continuous Hybrid Systems" , International Journal of CAD/CAM, Vol.8, No.1, Paper Number 8, pp.55-62(2008) .
- (5) T. Tateyama, S. Kawata, Y. Shimomura, K. Watanabe and R. Chiba: Scene Transition Nets Simulator for Multi-aspect Modeling of Discrete-continuous Hybrid Systems, In Proceedings of 8th International Conference on Informatics in Control, Automation and Robotics (ICINCO 2011) , Vol.2, pp.467-474(2011) .
- (6) 館山武史, 御子柴怜志, 渡辺健太郎, 千葉龍介, 下村芳樹, 川田誠一: 「場面遷移ネットに基づくサービスのマルチアスペクトモデリング手法」, 日本機械学会論文集 C 編 Vol.79, No.798, pp.418-428(2013) .
- (7) J. de Kleer: "Multiple representations of knowledge in a mechanics problemsolver" , Proceedings of 5th IJCAI , pp.299-304(1977) .

ドライバモニタリングシステムの技術動向と展望

荒川俊也*

(2016年9月30日受理)

The Technical Trend and Prospect of Driver Monitoring System

Toshiya Arakawa*

(Received September 30, 2016)

1. はじめに

この10年の間で、「ぶつからない?クルマ」をスローガンとした富士重工業株式会社(スバル)のEyesightを皮切りに、予防安全技術の意識が高まった。特に自動緊急ブレーキはダイハツ工業株式会社が軽自動車用を投入したことで普及に火が付いた^[1]。このように、予防安全技術が量産車に搭載され、予防安全に対するユーザの意識が高まっている。その一方で、平成16年から平成26年の10年間で、第一当事者の死亡事故発生件数は減少している(平成16年:7,084件,平成26年:4,013件)^[2]。ものの、死亡事故の内訳としては、安全運転義務違反^[3]、特に、漫然運転と脇見運転など、ドライバ行動が原因になっているということには変わりがない。

確かに、運転支援という観点では、予防安全技術の普及によってヒューマンエラーが発生した後の被害を最小限に食い止めることができると考えられる。しかし、運転するのは「ドライバ自身」であるので、ドライバを運転に最適な状態、もしくは、不適切な状態に陥らないようにすれば、より一層、事故のリスクが低減されるのではないかと考えられる。2015年8月に発生した東池袋東口乗用車暴走事故では、ドライバにてんかんの持病があったと言われている^[4]。ように、事故発生当時、ドライバが運転に適切な状態に無かったと推定される。また、2016年2月に発生した梅田乗用車暴走事故では、ドライバが心疾患を患っており、事故当時、大動脈解離で意識を失っていたと言われている^[5]。そのため、ドライバの状態をいち早く検知し、暴走しないように車両を制

御するなどができれば、これらの事故は防げた可能性がある。このように、ドライバの状態をセンシングした上で、ドライバが運転に不適な状態に陥る前に、警報や車両制御の観点から事故を防ぐという観点から、ドライバモニタリングのニーズが高まっている印象である。

ドライバモニタリングは来るべき自動運転の時代においても重要な位置付けになると考えられる。NHTSAの自動運転の定義で言う、レベル4の自動運転が実現すれば最早ドライバモニタリングは必要が無いと思われるかも知れないが、それでも、パッセンジャー全員のモニタリングを通じて、快適な居住空間を保ち続けるという目的でドライバモニタリングが必要になるかも知れない。また、ドライバやパッセンジャーに病変が生じた場合、緊急通報する、一旦路肩に車両を停車するなどの目的でもドライバモニタリングが必要になるかも知れない。その一方で、自動運転の実現に際して、インフラ整備、法整備、システムの信頼性、機械への権限委譲などの問題が残る、レベル3、レベル4の自動運転の実現性、量産化の時期が明確化されていない(と思われる)。このような状況の中、当面の自動運転は、ドライバ主体のシステムという位置付けであり、現状の運転支援の延長線上のシステムになるものと筆者は考える。言わば、「部分的な自動運転」と言えよう。その場合、ヒューマンマシンインタフェース(HMI)の観点において重要な項目の一つとして、部分的な自動運転と手動運転の切り替えが挙げられる。通常はドライバが運転するが、ドライバ状態を検出もしくは推定することで、このまま運転を継続

* 愛知工科大学工学部 〒443-0047 愛知県蒲郡市西迫町馬乗 50-2
Faculty of Engineering, Aichi University of Technology, 50-2, Manori, Nishihama-Cho, Gamagori, Aichi 443-0047 Japan

した場合、事故のリスクが高まるとシステム側が判断した場合、自動運転に切り替えるという様に、シームレスな状態遷移をもたらす。これがドライバモニタリングの第二のニーズであると考えられる。

以上のように、予防安全の一環として、また、自動運転へのシームレスな切り替えという観点で、ドライバモニタリングのニーズが高まりつつあるのが現状であろう。

本論では、ドライバモニタリングの技術動向を説明し、今後の予防安全システムのあり方について展望を述べる。

2. ドライバモニタリングの手法

ドライバモニタリングと十把一絡に言っても、モニタリング方法は様々である。ここでは、ドライバモニタリングシステムを2種類に大別する。なお、大別の方法やそれぞれのシステムの概略については参考文献^[6]をベースにしている。

・ドライバ向けカメラによるシステム

主に近赤外カメラによるシステムで、ドライバの状態をモニタする。眠気や疲労、脇見などの走行中の運転リスクを検知し、走行の安全性を高める。

・生体信号を活用したシステム

人の生体信号を取得してドライバの状態を推定する。様々なアプリケーションが考えられるが、安全用途ではドライバモニタリングシステムに組み込み、ドライバの覚醒度を検出する用途が有望とされている。

以下、それぞれのシステムについて説明する。

2.1 ドライバ向けカメラによるシステム

主に近赤外カメラ（カメラ+近赤外LED）によるシステムで、ドライバの状態をモニタする。眠気、脇見などの走行中のリスクを検知し、走行の安全性を高める^[6]。基本的なアルゴリズムは、ドライバの顔画像を撮像し、画像処理部によってドライバの状態を判定、判定されたドライバの状態に基づいて、リスクが高いと判定された場合、ドライバに警報で注意喚起する、というものである。画像処理が本システムの要であり、基本的には撮像した画像から顔の領域を特定し、眼や鼻などの顔のパーツを検出する。そして、顔領域からこれらのパーツの位置との幾何関係を算出し、顔の向き、位置などの姿勢情報を推定する。その後は検出する内容に応じて処理が変



Fig.1 ドライバモニターカメラの搭載例（日野自動車株式会社，セレガ）^[11]

わり、例えば眠気の場合は瞼形状の変化を開眼度として算出し、開眼度が低ければ覚醒度が低下している、と判定する^[7]。脇見の場合は顔や眼の法線ベクトルの向きから脇見が否かを判定する。更に細かく判定することを目的として、それぞれのパーツの特徴点を算出し、特徴点の位置変化や、曲率、パーツの縦横比、パーツの傾きなどの情報から、喜怒哀楽などの顔表情を捉えることもなされている^[8]。

このシステムは非接触・非拘束であるため、ドライバに負荷を与えない利点があるが、個人差や着用物、時々刻々と変化する光環境や姿勢変化の影響により安定的に認識処理することが難しいとされている^[7]。また、眼鏡着用時には風景の映り込みなどの影響があり検出精度の低下も懸念されている。しかし、光学フィルタや近赤外照明のパルス発光、撮像制御や検出アルゴリズムの工夫や改良などにより、これらの問題を解決している例もある^{[7][9]}。

ドライバ向けカメラによるシステムは、既に量産化されており、注意力不足の検出時には警報音で警告し、先行車への衝突の危険性が高まった場合は衝突被害軽減ブレーキを早期に作動させることで予防安全効果をもたらしている例がある（Fig.1）^[10]。

2.2 生体信号を活用したシステム

生体信号を活用したシステムとしては、主として、脳波、心拍、脈波などが挙げられる。その他、血圧、発汗、座圧なども存在するが、紙数の都合で割愛する。なお、血圧については、参考文献^[12]を参照されたい。

2.2.1 脳波によるシステム

脳の中にはおよそ140億個のニューロンが接続された

ネットワークが構成されている。認知、判断、記憶、身体運動を行う際には、神経細胞の間で情報伝達が行われる。この情報伝達は、神経細胞間における、アセチルコリン、ノルアドレナリン、ドーパミンなどの化学物質の受け渡しにより行われるが、これらの化学物質の放出は、電気信号によってコントロールされる。そのため、脳の活動を把握するためには、この電気信号の動き、すなわち脳波を捉えれば良いことになる。実際には、この電気信号の中には、顔の筋肉などを流れる電流もノイズとして印加されるため、フィルタで除去した後、Fourier変換して脳波の成分を取り出している。

脳波は大まかに5つに分けられている。脳波の種類と周波数および特徴をTable 1に示す。例えば α 波などはいわゆるヒーリング・ミュージックや癒やし効果を謳っているグッズの宣伝文句などでよく目にするであろう。この α 波は眼を閉じると発生しやすいが、これは、大脳が処理する上方のうち視覚情報が圧倒的に多くの情報量を持ち、その処理に多くのエネルギーを消費するのであるが、それを行う視覚野が後頭部にあるために、閉眼時には比較的后頭部の安静度が高くなることに起因する(と、言われている)。

脳波を測定する場合は一般的に皿電極を頭皮上に装着する。この時、皿電極を介して検出される電気信号は、対象範囲には数百万個の神経細胞が存在しており、これらの神経細胞の発する電気信号の総和を検出していることとなる。電極の配置は、一般的に、国際脳波学会が推奨する10/20法に準ずる(Fig.2)。10/20法ではアースとなる耳朶電極を除いた19箇所(10箇所)の装着位置が指定されている。しかし、必ずしも19箇所全てに取り付ける必要はなく、解析対象や目的によって必要箇所のみ取り付ければ良い。

脳波を活用したシステムは、車載するにあたって非侵襲型のシステムが存在しないため、ドライバモニタリングシステムとしては実現が難しい。そのため、基礎研究という観点で、その他の手法によるドライバモニタリングシステムやヒューマンファクターの解明に繋がるデータ計測、解析のための手段という位置付けと捉えるべきであろう。但し、特定の用途に限定した場合は、侵襲型であるが、実用可能性はある(後述)。

最近ではヘアバンド式の脳波計も多く見られ、簡単に脳波を検出できることを強みとして市販されている。確かに前頭部に α 波が出現することもあるが、これは大きなものではなく、もし後頭部に比べてあまり減衰せずに高振幅で出現している場合は広汎性 α 波である。前頭部に大きな α 波が出ている場合は、覚醒度が低下

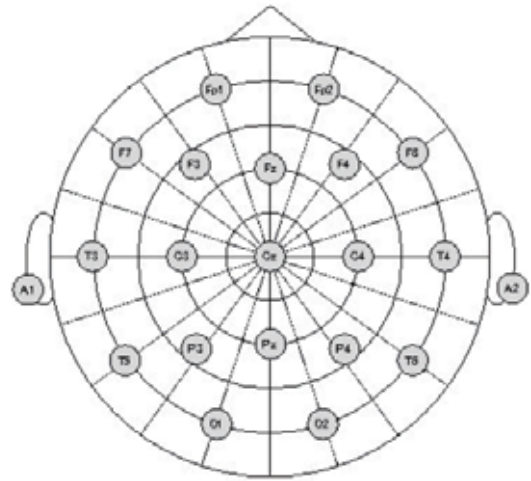


Fig.2 国際10/20法

Table 1 脳波の種類と周波数および特徴

脳波の種類	周波数	脳波の特徴
徐波	δ 波	4Hz以下 深い睡眠時や麻酔時に現れる波
	θ 波	4~7Hz まどろんでいるような浅い睡眠中に見られる波
	α 波	8~13Hz 覚醒安静時に見られる波
速波	β 波	13~30Hz 注意力を集中した精神活動を行っているときに現れる波
	γ 波	30Hz以上 知識や意識に関連付けられていると言われている波



Fig.3 SmartCap



Fig.4 Epic Mind Drive

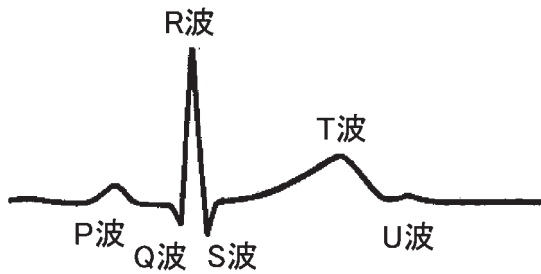


Fig.5 心電図

している場合や、耳朶の基準電極にも脳波が存在しており、本来の基準電位になっていない可能性がある^[13]。

自動車の予防安全システムへの適用例としては、脳波を読み取り居眠り運転を帽子する SmartCap (Fig.3) や、脳波で運転できると言われている Epic Mind Drive (Fig.4) などの開発例がある。しかし、車載に特化して考えた場合、車室内のノイズ対策が必要であり、運転時の体動に伴うノイズによる計測への影響なども懸念される。

2.2.2 心拍を活用したシステム

心臓の機能を調べるために「心電図」が利用される (Fig.5)。心電図は、心臓が収縮する際に発生する電気信号を表したものである。この電気信号は、心臓が収縮する際に心臓内に起こる電気の分布の変化によって引き起こされるものであり、体表面から電位として検出される。そして、心電図には、P 波、Q 波、R 波、S 波、T 波、U 波と名前が付いている。特に心電図において一番鋭いピークである R 波は、心室が急激に収縮し、血液を心臓から送り出している時に発生する。そして、心電図を用いて、心臓の拍動の間隔を示す場合、R 波と R 波の間隔である RRI (R-R Interval, R-R 間隔) を用いることが

一般的である。これは、R 波の発生時刻と、一つ前の R 波の発生時刻の時間差を求めることで得られる。安静時に心臓がゆっくり拍動している際には RRI は長くなる。一方、心臓が速く拍動している際には RRI は短くなる。

RRI の時系列変化を調べる際には、横軸に時間を、縦軸に RR 間隔を取りプロットする手法が一般的である。RRI は自律神経系である心臓交感・副交感神経の神経活動のバランスを反映している。心臓交感神経は身体的・精神的負荷に対して抵抗するため、身体を活性化させる働きを持ち、心臓副交感神経は休息・休養を要求する働きを持つ。身体的・精神的負荷により、心臓交感神経の亢進が起これば、心拍数は増加し、RRI が短縮することから、ストレスを表す指標となる^[14]。RRI の時系列変化を見ることによって、身体的・精神的ストレスの指標になるということは先行研究で示されている^[15-17]。

RRI は常に一定ではなく時間変動している、つまり、ゆらいているという重要な性質を持っており、このことを心拍変動 (Heart Rate Variability: HRV) と呼ぶ。HRV は周波数帯域の異なる成分があることが知られており^[18]、この成分は大きく 2 つに分類される。第 1 の成分は、呼吸に由来する周波数帯域 0.15 ~ 0.4Hz の成分で、呼吸性不整脈 (Respiratory Sinus Arrhythmia: RSA)、心拍変動高周波数帯域成分 (High Frequency component: HF) などと呼ばれる。RSA は主に副交感神経系の指標と考えられており、自律神経障害や作業負荷により副交感神経系の活動が低下すると小さくなるとされている。第 2 の成分は血圧の Mayer 波に由来するとされている周波数帯域 0.04 ~ 0.15Hz の成分で、心拍変動低周波帯域成分 (Low Frequency component: LF) と呼ばれる。これは交感神経系と副交感神経系の両方の活動を反映する^[19]。そのため、この 2 つの成分比である LF/HF を調べることで自律神経活動のバランスが評価できるとされている^[20]。RRI から LF/HF を求めるための処理としては、LF/HF を時間的に等間隔なデータとするため、スプライン補間などによってリサンプリングを施した後、Yule-Walker 法を用いて RRI データを AR モデルで同定する。そして、同定された AR モデルに対して高速フーリエ変換を施すことで周波数帯域の計算を行うという流れが一般的である。

心拍を用いたドライバモニタリングにおいては、概ね、RRI と LF/HF の観点からの評価が多く、緊張、イライラ、疲労などの評価に用いられている事例が多い。但し、LF/HF による評価は、呼吸周波数が概ね HF 領域にあると仮定できる統制呼吸下での評価や、比較的長い時間の測定を前提としている。そのため、呼吸周波数が HF 領

域を外れる場合や、呼吸の深さが変動する場合には、この前提が満たされない。実車運転やシミュレーターの運転では、呼吸周波数が 0.4Hz を超える場合が少なくないと言われている。また、シミュレーターの運転によって酔いが発生した場合には反対に呼吸周波数が低下し、呼吸周波数スペクトルが LF 領域を成分に持つ場合がある。このような場合には呼吸周波数成分が HF として定義された周波数域を逸脱するため、周波数帯域を限定した上で LF/HF の評価を実施することには問題があるとも言われている^[21]。

その他、RRI の正規化分散値に着目して、8 拍分の RRI の正規化分散値から 3 拍分の RRI の正規化分散値を引いた RRV8-3 という指標^[22]や、9 拍分について移動平均によるバンドパスフィルタを適用した RRV9-3 という指標を用いて緊張度を評価する^[23]など、様々な手法が存在している。最近では RRI の分散値を RRI の平均で割った、CVR-R (Coefficient of Variation of R-R) という指標が、ドライバの状態を表す主観評価と比較的高相関の関係にあると言われている。最近の研究動向を見る限りでは、RRI、LF/HF、CVR-R の観点による評価が多い印象である。

心拍を活用したシステムの例としては、自動車のステアリングを利用して運転者の心電や脈波を測定し、運転中の体調急変の予兆を検出するシステムがある (Fig.6)。ステアリングに心電計測用の電極と、脈波計測用の光センサを搭載するとしており、運転者がステアリングを握ることで、心電と脈波を連続計測・記録し、計測データをリアルタイムに心拍変動解析し、体調急変の予兆と見られる特異なパターンを見出すとされている^[24]。

2.2.3 脈波を活用したシステム

身体組織のある部分への血液の流入によって生じる容積変化を体表面から波形として捉えたものを脈波といい、血管運動反応を捉える。心臓の動きそのものではなく、末梢血管の運動を測定することによって、間接的に心電図 RRI と同様の意味を持つ情報が得られるとされている^[25]。

脈波は指先にセンサを当て取得可能であるため、携帯電話、タブレット型端末、リモコン等といった、ユーザが手に把持して使用する小型デバイスと相性が良い。また、脈波は、先述したことも踏まえると、心拍の情報と血管の内部情報を兼ね備えた生体情報であり、自律神経活動に基づくユーザの様々な情報を入手可能である^[26]という特徴がある。

脈波計測のための一般的な方法は光電式と呼ばれる、



Fig.6 ステアリング把持型体調急変予兆検出システム^[24]



Fig.7 スリープバスター^[28]

赤外光の発光素子および受光素子を組み合わせたセンサを用いるものである^[26]。これは近赤外波長光が生体を透過し血中へヘモグロビンに吸収される特性を利用し^[27]、生体部位の近傍にセンサを設置して赤外光を照射し、反射した散乱光の光量を捉えるものである。しかし、一般的に点のみでの取得が可能であるため、位置合わせが必要である。そのため、システムにおいてセンサが搭載されている箇所に指先等を合わせる必要があるため、多少の位置のズレなどによって検出精度が悪化するという問題もある。

近年はドライバの負担や、先述した位置合わせの問題などもあり、背中から心臓や大動脈の動きを把握できる体表脈波が注目されている。体表脈波より自律神経の動きを解析し、集中、疲労、入眠などを判定するシステムも開発されている。自動車用途ではデルタツーリング株式会社のスリープバスター^[28](Fig.7)が知られている。これは、体表脈波検知センサが、18 秒毎にドライバの脈波を捉え心身の状態を解析し、運転に適さない状態になる前に付属のコントローラがドライバに警告すること

を特徴としている。なお、スリープバスターは、H28 年度自動車運送事業者における自動車事故対策費補助金事業の補助金対象機器に選定されている^[29]。

2.3 ドライバモニタリングシステムで重要な点

以上、一般的に用いられているドライバモニタリングシステムについて紹介したが、車載用途として考えていく上では、運転時にドライバの拘束感が無いことが重要である。量産されている家庭用のセンシングデバイスであれば、短時間・長時間の装着であっても特に問題は無い。しかし、いざ運転時となると、拘束感がドライバに対する負荷となり、ひいては事故に繋がるということも懸念される。そのため、「知らず知らずのうちにモニタリングされる」ような、非侵襲型のセンシング/モニタリングシステムが望ましい。実際、これまでに紹介したシステムの中では、ドライバ向けカメラ、心拍、脈波を用いたドライバモニタリングシステムの提案や開発が行われており、実用化に向けて開発が進められている、もしくは実用化されているが、脳波については、現状、電極を頭皮上に装着する手法が一般的である故に、非侵襲型のシステム開発は厳しいと言えよう。

しかし、職業ドライバについてはその限りではないと筆者は考える。例えば、ユニフォームの一環として就業中は帽子を着用させる、もしくは、ユニフォームやアンダーウェアにデバイスを取り付け、常にドライバのセンシングが可能にすれば、侵襲型のシステムであっても、やむを得ずユニフォームを装着せねばならない故に、脳波であってもオンライン計測が可能であると思われる。

非侵襲型のシステムについては、特にドライバ向けカメラ方式は、演算コストについても考慮する必要がある。覚醒度の低下など、限定的なドライバ状態を検出・推定する用途であればさほど懸念する必要は無いが、多くのドライバ状態をリアルタイムで検出・推定するのであれば演算コストの問題は障壁となる可能性がある。これについては、アルゴリズムの改良や、ハードウェアの低価格化などによって解決することができると思われるが、実際の車載を想定したスペックでの処理を想定した研究開発を行う必要がある。

おわりに

本論では、ドライバモニタリングの技術動向を紹介し、今後の普及に向けて解決すべき課題についても述べた。ドライバモニタリングの手法は多く存在するが、どの手法が良いかということについては、本論で述べたように、

それぞれの手法が一長一短であり、ハードウェアのコスト等の動向にも依存するため、「この手法が良い」と断言することは難しい。また、搭載コストの問題はあるものの、複数のドライバモニタリング手法を併用して、それぞれの短所を補い、検出・推定の信頼性を担保するということも必要である。筆者の印象では、ドライバモニタリングシステムの研究開発は、10 年前からあまり大きな進捗が無い印象であるが、それは本論で述べた困難さに起因していると考えている。また、筆者としては、ムーアの法則の破綻^[30]が影響し、ハードウェア開発のロードマップが想定通りに描けなくなっていることも一因ではないかと考える。しかし、近年、予防安全システムや自動運転車の開発が加速化している状況下において、ドライバモニタリングシステムの関心は一層高まっている。これもまた近年流行の兆しを見せているが、深層学習 (Deep Learning) により、高精度なドライバ状態推定の可能性が示唆されていることも関心の高まりをもたらしているかも知れない。いずれにせよ、この関心の高まりが、今後メーカーおよび学術機関それぞれの研究開発を一層加速させ、真の予防安全に繋がることに期待したい。

付記

本論文は参考文献^[31]を加筆修正したものである。

参考文献

- [1] 荒川俊也：血圧、心拍によるドライバ緊張状態、疲労の評価と推定、ドライバ状態の検出、推定技術と自動運転、運転支援システムへの応用、株式会社技術情報協会、pp.141-151(2016)。
- [2] 内閣府、平成 27 年交通安全白書、http://www8.cao.go.jp/koutu/taisaku/h27kou_haku/zenbun/index.html (最終アクセス日：2016 年 8 月 11 日)
- [3] 内閣府、平成 17 年度版交通安全白書、http://www8.cao.go.jp/koutu/taisaku/h17kou_haku/ (最終アクセス日：2016 年 8 月 11 日)
- [4] 産経ニュース：逮捕の医師、てんかんの持病 危険運転致死傷に切り替え送検 病気隠して免許更新の疑いも、URL: <http://www.sankei.com/affairs/news/150818/afr1508180008-n1.html> (最終アクセス日：2016 年 9 月 15 日)
- [5] 朝日新聞デジタル HP、「運転に潜む急病リスク 心疾患事故、年 20 件 梅田暴走」、URL: <http://www.asahi.com/articles/ASJ2V660RJ2VPTIL024.html> (最終アクセス日：2016 年 9 月 15 日)
- [6] 日経テクノロジー online、スマホ、カメラ、センサ市場を斬る TSR レポート 車室内センシングシステム編 = 自動運転が市場拡大の追い風、URL:<http://techon.nikkeibp.co.jp/article/COLUMN/20150507/417180/?ST=tomict> (最終アクセス日：2016 年 7 月 9 日)
- [7] 大見拓寛：運転者の居眠り状態評価の画像センサ、人工臓

- 器, Vol.42, No.1, pp.99-103(2013) .
- [8] 関真規人, 下谷光生: 次世代自動車センサシステム 画像処理によるドライバ状態監視技術とその応用, 電気学会論文誌 E, Vol.118, No.6, pp.296-299, 1998.
- [9] 丸山勇人, 松岡敦子: ドライバモニタシステムの紹介, OKI テクニカルレビュー, Vol.79, No.2, pp.16-19(2012) .
- [10] 日野自動車 セレガホームページ 安全性能, <http://www.hino.co.jp/selega/safety/#link3> (最終アクセス日: 2016年7月23日)
- [11] トラック情報サイト「トラックNEXT」, http://www.truck-next.com/menu_karou/hirou.html (最終アクセス日: 2016年7月23日)
- [12] 荒川俊也, 榊原規彰, 近藤針次, 小塚一宏: 指尖容積脈波法に基づくステアリング型連続血圧計の開発, 愛知工科大学紀要, 第13巻, pp.13-17(2016) .
- [13] メディカルシステム研修所, 脳波のなぜ? Q&A その2, http://www.kenn.co.jp/qa/eeg/eeg_2.htm (最終アクセス日: 2016年9月15日)
- [14] 土川奏, 岩倉成志, 安藤章: 心拍間隔指標を用いた長距離運転時のストレス計測実験と解析 - AHS の需要予測にむけて -, 土木学会土木計画学研究・講演集, Vol.26, CD-ROM(2002) .
- [15] 岩倉成志, 西脇正倫, 安藤章: 長距離トリップに伴う運転ストレスの測定, 土木計画学研究・論文集, No.18, 2001, pp.439-444(2001) .
- [16] 林博史: 心拍変動の臨床応用, 医学書院, 1999.
- [17] 茂吉雅典, 横山清子, 吉岡貴芳, 渡辺與作, 高田和之: 高速道路の長時間運転における心電図 R-R 間隔時系列の経時変化, 自動車技術会論文集, Vol.27, No.3, pp.107-112(1996) .
- [18] B. M. Sayers: Analysis of heart rate variability, Ergonomics, Vol.16, pp.17-32(1973) .
- [19] 森信彰, 松本佳昭, 江鐘偉: 心拍変動による精神ストレスの短時間解析に関する研究, 第7回生活支援工学系学会連合大会 講演予稿集, pp.114-115(2010) .
- [20] Task Force of the European society cardiology: The North American society of pacing and electro- physiology: Heart rate variability: standard of measurement, physiological interpretation, and clinical use, Circulation, vol.93, pp.1043-1065(1996)
- [21] 三品誠: 心拍変動解析の運転シミュレーター研究への応用, 早稲田大学大学院 人間科学研究科 博士(人間科学) 学位論文(2008) .
- [22] 渥美文治, 心拍計測によるドライバの意識状態評価, 自動車技術会学術講演会前刷集, 946, pp.133-136(1994) .
- [23] 景山一郎, 栗谷川幸代: 心拍変動モデルを用いた心負担の推定に関する研究, 機械学会第6回交通・物流部門大会講演論文集, No.97-12, pp.135-138(1997) .
- [24] 日経デジタルヘルス, トヨタとデンソーなど, ステアリングで心電・脈波を測定し運転中の体調急変を予測するシステム, <http://techon.nikkeibp.co.jp/article/NEWS/20130326/273292/?ST=health> (最終アクセス日: 2016年9月15日)
- [25] 一般社団法人人間生活工学研究センター [HQL], 計測方法データベース, http://www.hql.jp/project/workdb1998/c5/c5_i_03.htm (最終アクセス日: 2016年9月15日)
- [26] 千明裕, 前田篤彦, 小林稔: 容積脈波を取得可能な面センシング手法の実装と評価, 情報処理学会論文誌, Vol.53, No.4, pp.1229-1237(2012) .
- [27] Jöbsis, FF, "Noninvasive infrared monitoring of cerebral, and myocardial oxygen sufficiency and circulatory parameters", Science, Vol. 198, pp.1264-1267(1977) .
- [28] JUKI 株式会社, 居眠り運転警告装置「スリープバスター」, URL: <http://www.juki.co.jp/sleepbuster/sleep-buster/sleep-buster.html> (最終アクセス日: 2016年9月15日)
- [29] JUKI 株式会社, 居眠り運転警告装置「Sleep Buster (スリープバスター)」国土交通省の補助対象機器に選定, URL: <https://www.juki.co.jp/ir/pdf/n130805.pdf> (最終アクセス日: 2016年9月15日)
- [30] GIZMODE: ムーアの法則, インテルが自ら成り立たなくなったと静かに宣言, URL: <http://www.gizmodo.jp/2016/03/MooreEnd.html> (最終アクセス日: 2016年9月15日)
- [31] 荒川俊也: ドライバモニタリングのニーズとドライバ状態検出・推定手法, 生体データ活用の最前線 ~ スマートセンシングによる生体情報計測とその応用 ~ (仮), サイエンス & テクノロジー株式会社(2017 出版予定)

デジタルコンテンツを活用した地域活性化・社会貢献

加藤高明*

(2016年9月30日受理)

Regional Revitalization and Social Contribution Utilizing Digital Contents

Komei Kato*

(Received September 30, 2016)

キーワード：デジタルコンテンツ、地域活性化、社会貢献、プロジェクションマッピング

Keywords : digital contents, regional revitalization, social contribution, projection mapping

1. はじめに

学生が地域の現場に入り、住民や地方自治体、NPOなどと共に地域の課題やまちおこしに取り組み、その活性化に貢献する動きが盛んになってきている。本学においても「がまごおり産学官ネットワーク会議」との連携事業の開催や「三河中央・モノ・地域づくりコンソーシアム」が発足されるなど、地域貢献への気運は高まってきているが、これらの対象は「企業」が中心である。地域は、一般住民や地元商店街などもその構成員であり、それらへの貢献も必要かつ不可欠なものである。活動事例は、「地域資源発掘、地域振興プランづくり、地域マップづくり、地域の教科書づくり」、「地域課題解決に向けた実態調査」、地域ブランドづくり、地域商品開発、プロモーション」、「商店街活性化策検討、アンテナショップ開設」、「観光ガイド実践、海外観光客向けガイドブックづくり」、「環境保全活動、まちなかアート実践、子ども地域塾運営、高齢者健康教室」など¹⁾多種多様にわたるが、筆者の研究室では地域や社会の各テーマに関連したデジタルコンテンツを学生が中心となり制作・出展し、各種イベントを盛り上げるということを行ってきた。活動は現在も継続中であるが、これまでの2年半の取り組みについて報告する。

2. ごりやく市参画への経緯

本学が立地する愛知県蒲郡市には、JR・名鉄蒲郡駅を中心に点在する中央通り発展会をはじめとした、7つの発展会で形成される蒲郡商店街がある。店主の高齢化や後継者不足により、店舗数は全盛期の半数ほどに減少しているが、その現状を打破し、かつての賑わいを取り戻すべく平成19年9月に第1回「福寿稲荷ごりやく市」が開催された。福寿稲荷ごりやく市(以下ごりやく市)は、毎年6回3, 4, 5, 9, 10, 11月の第4日曜日に中央通りの400mが歩行者天国となり、市内・外からの一般公募による出店者と地元商店街からの出店者でカラフルなテントが並ぶほか、落語や大道芸、ちんどん屋、和太鼓演奏、ダンスなど多岐にわたるイベントが用意されるものである。

ごりやく市は、平成26年9月の第62回で10周年を迎えることになったが、10周年という節目に商店街の魅力を新しい方法で伝え盛り上げたいという思いと、学生の制作するデジタルコンテンツがどこかで役立てられる機会はないかという筆者の研究室の思いが一致し、新しい試みに取り組むことになった。詳細な経緯は、次の通りである。

* 愛知工科大学工学部 〒443-0047 愛知県蒲郡市西迫町馬乗 50-2
Faculty of Engineering, Aichi University of Technology, 50-2 Manori Nishihasama-cho, Gamagori, Aichi 443-0047 Japan

【第1段階】

平成20年2月に、蒲郡商工会議所、愛知工科大学、蒲郡市を始めとする産学官関係団体等のネットワークが形成され、連携による新技術・新ビジネスの研究開発等の推進を図り、地元産業の振興及び地域の活性化並びに地域の課題の解決を図るための場として、がまごおり産学官ネットワーク会議が設立された。県内企業の各種取り組みを紹介する講演会や交流会などの開催を通じて、大学と地域、行政との交流が盛んとなり始めた。

【第2段階】

がまごおり産学官ネットワーク会議主催の講演会に関連した「企業、個人事業主のためのソーシャルメディアで情報発信!」というパソソ実習講座を、平成26年2月に筆者の加藤研究室が担当したことから、学生の身に付けた情報技術を地域の活性化に利用できないかという気運が生まれてきた。

【第3段階】

平成26年9月の第62回ごりやく市が10周年の節目を迎えるにあたり、蒲郡観光商工課の仲介で、加藤研究室から商店街の魅力を新しい方法で伝え盛り上げようと、プロジェクションマッピングとスマートフォンゲー

ムの出展を提案。商店街役員、蒲郡市役所観光商工課に対して事前にデモを示して、内容理解の場も設けた。プロジェクションマッピング上映のための空き店舗の提供や昼間の上映ということから暗幕の用意など、商店街や市役所から全面的な協力が得られた。

ごりやく市のチラシや蒲郡市ホームページへの掲載、新聞社の取材²⁾もあり、当日は100人を超える観覧者があった。仕組みに関する質問も何人かから出るなど、大盛況となった。

【第4段階】

平成26年11月の第64回ごりやく市では、9月出展の内容をより高度化したプロジェクションマッピングの第2弾を上映した。これらをきっかけに、継続的なごりやく市への出展依頼や、街づくり活動に関わるNPO、蒲郡市役所企画広報課などからも、商店街以外の地域イベントへの出展依頼が相次ぐようになった。

3. 制作したデジタルコンテンツ

ごりやく市出展を契機に、その活動の範囲が拡大されてきた。これまで制作したデジタルコンテンツ一覧をFig.1に示し、順にその内容を説明する。

実施日	出展イベント	出展内容
平成26年 9月28日	蒲郡商店街 「第62回ごりやく市」	プロジェクションマッピング「ごりやく市の紹介」 スマートフォンゲーム「商店街クイズゲーム」
平成26年 11月23日	蒲郡商店街 「第64回ごりやく市」	プロジェクションマッピング「こんきちの大冒険」
平成26年 11月29日	蒲郡市冬まつり	プロジェクションマッピング「願いの木」
平成27年 2月11日	蒲郡市生命の海科学館 ワークショップ	プロジェクションマッピング「赤い電車応援」
平成27年 4月26日	蒲郡商店街 「第66回ごりやく市」	プロジェクションマッピング「赤い電車応援」
平成27年 11月22日	蒲郡商店街 「第70回ごりやく市」	プロジェクションマッピング「ごりやく市第70回記念」
平成28年 3月5,6日	大阪市東成区役所 「色覚体験イベント」	説明アニメーション「色が見える仕組み」 プロジェクションマッピング「色覚障がい疑似体験」 ワークショップ環境「色が見える違いを体験する」
平成28年 8月9日	名古屋市笠寺観音商店街 「夏祭り」	プロジェクションマッピング「笠寺を、もっと楽しもう」

Fig.1. これまでに制作・出展したデジタルコンテンツ一覧

3.1 蒲郡商店街「第62回ごりやく市」

・プロジェクションマッピング「ごりやく市の紹介」

商店街のマスコットキャラクター「こんきち」がごりやく市を楽しく紹介するストーリーで、そのこんきちが住んでいる中央通り商店街北西の薬證寺のほこらをイメージした背景スクリーンと、鳥居をイメージした前面スクリーンに投影。次の内容を紹介した。

- ・地元名産「ガマゴリうどん」の紹介
- ・ごりやく市認定商品（福寿餅、カレーパン、なごみだんご、福寿弁当）の紹介
- ・こんきち飴の紹介
- ・蒲郡観光大使「しがせいこ」さんの紹介

Fig.2は、ごりやく市認定商品紹介のようすである。上映後に内容に関するクイズが出題されることを事前に告知し、注意深く見てもらえるようにした。クイズ正解者には、ごりやく市で本学のサークルが出店するゲームコーナーの1回無料券を配布し、より盛り上がりをもてた。

・スマートフォンゲーム「商店街クイズゲーム」

こんきちが商店街をめぐり、各店舗に入店するとそれぞれ固有のクイズが出題され、正解に応じてポイントが獲得できるスマートフォンを利用したゲームである。ポイントはごりやく市本部にて景品と交換ができる。各個店から出題されるクイズは、人気商品を答えるものなど、実際の店頭で確認しないと答えられないものもあり、実店舗への誘導も狙った。Fig.3にゲーム画面を示す。

3.2 蒲郡商店街「第64回ごりやく市」

・プロジェクションマッピング「こんきちの大冒険」

第62回ごりやく市の出展のプロジェクションマッピングに、こんきち型スクリーンを追加して、こんきちが

世界各地や時空を超えて冒険して大変身するという、より高度化した演出を取り入れた (Fig.4)。

3.3 蒲郡市冬まつり

・プロジェクションマッピング「願いの木」

ごりやく市での出展をきっかけに蒲郡市冬まつり「冬サタ」での上映依頼があり、生命の海科館の外壁へプロジェクションマッピング作品を投影した。冬サタとは、願いごとを入れたペットボトルをツリーとして積み上げ、それに点灯することを中心イベントとする冬のまつりである。それに関連する「願いの木」というタイトルの作品を制作し、投影した (Fig.5)。



Fig.3 商店街探索クイズゲーム



Fig.2 ごりやく市認定商品の紹介



Fig.4 こんきち型スクリーン



Fig.5 生命の海科学館への「願いの木」投影



Fig.6 「赤い電車応援」の上映

3.4 蒲郡市生命の海科学館ワークショップ

・プロジェクションマッピング「赤い電車応援」

生命の海科学館で、名鉄西尾・蒲郡線利用促進を応援するプロジェクションマッピングを上映した。内容は電車をイメージしたスクリーンに、蒲郡で活躍するマスコットキャラクター達が乗車したり、沿線の風景が移り変わったりするものである。電車正面の窓には運転手役の子供たちの顔も映し出すようになっていて、参加型で楽しめる内容とした。

また上映前に切符型用紙に応援メッセージを記入してもらい、読み上げたり赤い電車スクリーンに貼り付けたりして、応援気分を盛り上げた。

Fig.6 に上映のようす、Fig.7 に応援メッセージを示す。

幼稚園児や小学校低学年の来場者も多く、楽しく赤い電車への意識を高めることができた。120名を超える見学者があった。

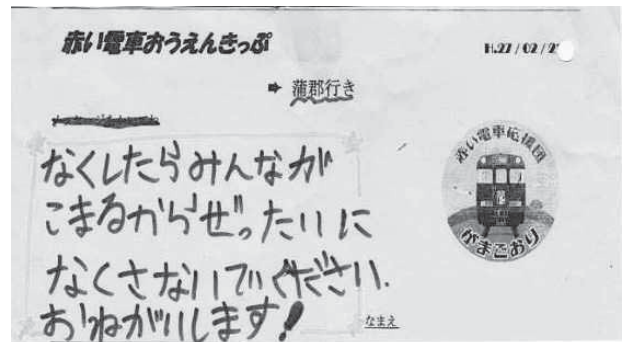


Fig.7 応援メッセージ

3.5 蒲郡商店街「第66回ごりやく市」

・プロジェクションマッピング「赤い電車応援」

商店街キャラクターの「こんきち」型スクリーンと電車型スクリーンを連動させ、こんちきと掛け合いをしながら、蒲郡で活躍するマスコットキャラクター達が乗車してきたり、沿線の風景などを映し出すものである (Fig.8)。

今回も切符型の用紙に応援メッセージを書いてもらい壁に貼り付けて、参加意欲を高めた。

3.6 蒲郡商店街「第70回ごりやく市」

・プロジェクションマッピング「ごりやく市第70回記念」

第70回目という記念のごりやく市で、加えて11月

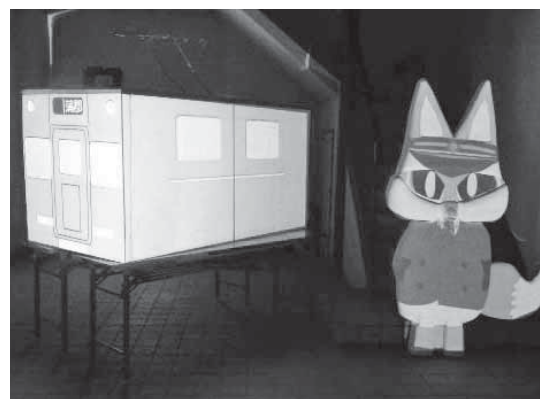


Fig.8 「こんきち」型スクリーンと電車型スクリーン

22日は「いい夫婦（ふうふう）」の日でもあるため、ごりやく市70回の軌跡と「いい夫婦」にちなんだ内容を盛り込んだプロジェクションマッピングを制作、上映した。スクリーンは、これまでのこんきち型、ほこら型に新たに2つのスクリーンを追加し、4つのスクリーンを連動させて過去のごりやく市を振り返ったり、いい夫婦を楽しく表現して応援する内容とした (Fig.9)。

1日で、約100人の観覧があった。

3.7 大阪市東成区役所「色覚体験イベント」

これまでの出展活動をきっかけに、色覚障がい啓発を目的に活動するNPO法人 True Colors (大阪市中央区) から、地域市民へ色覚障がいの意識化を促進するためのデジタルコンテンツ制作・活用ができないかとの要請があり、3つのコンテンツを制作して出展した。

・色が見える仕組みを楽しく解説するアニメーション

これまでパネルを使用して、説明員が口頭で色が見える仕組みを説明してきたが、これをアニメーション化した。説明員が不要となり、小学生でも分かりやすいものとなった (Fig.10)。

・色覚障がい者が見ている風景を疑似体験するプロジェクションマッピング

色覚障がい者が見ている風景を疑似体験できる動画を、L字型に配置したスクリーンに投影した。色が多く使われている地域の商店街や美術室を題材にし、身近な例を多く取り入れて見え方の違いを左右に対比しながら示すなどの工夫をした (Fig.11)。

・緑色の光の中では、色の識別が通常と異なることを体験するワークショップ環境の提供

通常とは異なる緑色の光の中で絵を描くと、色の区別がつきにくく、思った通りの色表現ができないことを体験するワークショップ環境を提供した (Fig.12)。緑色の光の中で描いた絵を、通常の光のもとで見ると、赤色だと思った箇所が茶色になっているなどが体験できるものである。

大阪市東成区役所のイベント・ミーティング会場「ふれ愛バンジー」にて2日間出展し、両日で180名の来場者があった。



Fig.9 4つのスクリーンの連動

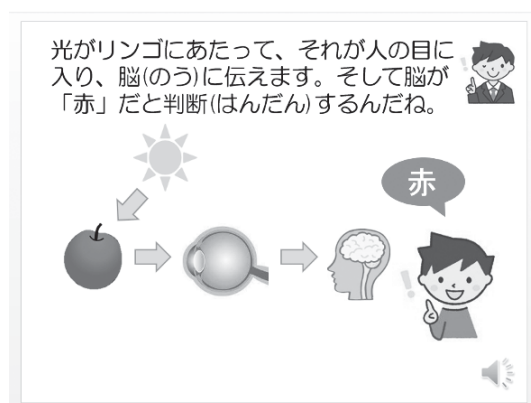


Fig.10 色が見える仕組み解説アニメーション



Fig.11 色覚障がい疑似体験プロジェクションマッピング



Fig.12 色の識別の違いを体験するワークショップ

3.8 名古屋市笠寺観音商店街「夏祭り」

・プロジェクションマッピング「笠寺を、もっと楽しもう」

商店街の納涼夏祭りにおいて、商店街や地域の各種取り組みを紹介するプロジェクションマッピングを制作・出展した。商店街店舗の正面と側面など3箇所に投影した。(Fig.13)



Fig.13 「笠寺を、もっと楽しもう」

4. おわりに

ごりやく市 10 周年記念を盛り上げようと、プロジェクションマッピングとスマホゲームを出展したことを契機に、地元のみならず大阪や名古屋までその活動範囲を拡大することができた。蒲郡商店街振興組合役員の方々や蒲郡市役所観光商工課などの積極的なバックアップや、新聞社の取材、蒲郡市ホームページでの告知、ごりやく市チラシへの掲載などもあって、順調なスタートをきることができた。大阪市東成区役所における「色覚体験イベント」への出展では、社会的啓発活動へのデジタルコンテンツの応用についても、その可能性を見出すことができた。

すべての作品は学生が中心で制作したが、ニーズの把握や企画の段階から参画することでコミュニケーション力が大きく向上し、学んだ知識や技術をどのように地域や社会の課題解決に応用・表現すればいいのかを、実践

を通して十分に学ぶことができた。そして大学内での学びからは得られない、サービスラーニングとしての効果を非常に強く感じ、高い教育効果を確信した。

今後も地域や社会へ貢献できるデジタルコンテンツの制作に、積極的に取り組んでいきたい。

注

- 1) 具体的な事例の紹介は、総務省ホームページ「域学連携」地域づくり活動を参照。

http://www.soumu.go.jp/main_sosiki/jichi_gyousei/c-gyousei/ikigakurenkei.html

- 2) 次の4社の新聞に掲載された。
 - ・東愛知新聞 2014年9月13日1面
『PR映像スクリーンに投影 蒲郡ごりやく市を「こんきち」案内 愛知工科大生が制作』
 - ・読売新聞 2014年9月16日朝刊名古屋版
『蒲郡「ごりやく市」をPR 愛知工科大が映像制作』
 - ・朝日新聞 2014年9月17日朝刊三河版
『映像作品で商店街応援 蒲郡、地元の愛知工科大生が魅力PR』
 - ・中日新聞 2014年9月17日朝刊東三河版
『蒲郡のホコ天「ごりやく市」工科大生が目玉動画』

謝 辞

本報告における活動の多くは、平成26年度から28年度の愛知工科大学教育改革プロジェクトの支援を受けた。またデジタルコンテンツによる地域貢献への学生参画のきっかけを与えていただいた蒲郡市役所観光商工課の水野竜一様や、快く出展場所を提供していただいたり、事前のデモに参加いただいた商店街振興組合小田裕己理事長をはじめとする役員の方々には、この場を借りて感謝の意を表したい。

参考文献

加藤高明：商店街活性化へのデジタルコンテンツの活用 愛知工科大学紀要 第12巻(2014年度)、研究ノート、pp.59-63(2015.3)

BULLETIN
OF
AICHI UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

Vol.14, 2016

CONTENTS

Papers

- Estimation of Distance for a Speaker using Acoustic Models on Input Speech Recorded by a Single Microphone
..... Jin Li, Takatoshi Jitsuhiro, and Kazuya Takeda 1
- A case of Projection Mapping to Sculpture What is my left eye looking at ?
..... Junko Sugimori 9
- Analysis of Close Contact Melting of Ice on Triangular Cylinders
..... Yasuaki Shiina 19
- Development of the Solar Car for Running in Public Road
..... Hirokazu Suzuki, Mamoru Nakajima, Hideo Nagata
..... Masayuki Iwase, Kazuki Koumura, and Hidefumi Ono 25
- Two-Dimensional Heat Conduction Problems for Functionally Graded Orthotropic Materials
..... Manabu Ohmichi 31

Note

- On Performance of Data Compression Program in Python
..... Shigeru Yoshida 41

(continued)

Published by
Aichi University of Technology
50-2 Manori Nishihama-cho Gamagori
Aichi 443-0047, JAPAN