

技 報

# こまくさ

K O M A K U S A 発行:平成15年10月

第二号

長野・上田地域  
知的クラスター創成構想プロジェクトについて  
—— 機械システム工学科 杉本 公一

超音波光回折効果を用いた溶液濃度センサー  
—— 電気電子工学科 池田 清志

WWWを利用した環境騒音に対する  
感性情報収集システム  
—— 電気電子工学科 降旗 建治

道路交通騒音自動監視を目的とした移動音源の  
音響インテンシティ計測の検討  
—— 電気電子工学科 降旗 建治

バーチャルリアリティシステムのための  
耳栓駆動型イヤホンの開発  
—— 電気電子工学科 降旗 建治

有孔板の引張り座屈に関するパラメーター解析  
—— 社会開発工学科 清水 茂

圧電アクチュエータのオープンループ精密位置決め  
に関する研究  
—— 機械システム工学科 辺見 信彦

インドネシアにおける居住空間の  
歴史的変遷を対象とした室内熱環境の実測調査による  
建築技術の再評価に関する研究  
—— 社会開発工学科 西山 マルセーロ







## 目 次

発刊にあたって	(財) 信州大学工学部若里会 副理事長 北澤 文教	2
長野・上田地域知的クラスター創成構想プロジェクトについて	機械システム工学科 杉本 公一	3
超音波光回折効果を用いた溶液濃度センサー	電気電子工学科 池田 清志	6
WWWを利用した環境騒音に対する感性情報収集システム	電気電子工学科 降旗 建治	11
道路交通騒音自動監視を目的とした移動音源の 音響インテンシティ計測の検討	電気電子工学科 降旗 建治	17
バーチャルリアリティシステムのための耳栓駆動型イヤホンの開発	電気電子工学科 降旗 建治	23
有孔板の引張り座屈に関するパラメーター解析	社会開発工学科 清水 茂	29
圧電アクチュエータのオープンループ精密位置決めに関する研究	機械システム工学科 辺見 信彦	35
インドネシアにおける居住空間の歴史的変遷を対象とした 室内熱環境の実測調査による建築技術の再評価に関する研究	社会開発工学科 西山 マルセーロ	39
研究助成受領者名簿		47

## 技報「こまくさ」の発刊にあたって

財団法人信州大学工学部若里会

副理事長 北澤 文教

技報「こまくさ」の発刊にあたり、ご挨拶を申し上げます。

さて、我が国の経済は、国内総生産の4・6月期が前期に比べてプラスになり一部で国内景気に持ち直しの兆しがうかがえるとも言われておりますが、景気の回復を阻害している悪性デフレからの脱却に至っておらず、設備投資に一部では回復も見られるが、依然として民間住宅の減少や消費低迷等を招き、変化の時代に十分な対応が出来ていない状況とも言えます。

また、8月後半から株価が上昇傾向を示していることは、デフレ脱却や景気の自立回復に繋げる上からも大いに期待致しております。持続的な回復を頼みと致しております。

一日も早い景気回復がなされ、関係企業等の益々の繁栄を願うものであります。

最近の天候は、国内では冷夏、フランスでは猛暑と何か異常を感じておりますが、地球環境の変化については、身近なものとして皆が取り組みをして行かなければならないのではないかと思います。地球の温暖化対策への対応をはじめとして、排出量の減少・リサイクルの推進等資源有限の上に立ち、爽やかな大気・清らかな水・豊かな緑等素晴らしい自然環境保持に努めて参ることが大切であると思っております。自然と人間のより調和のとれた環境を作り上げ、保全して行くことが必要であります。

次に、大学改革であります。ご存知のように数年にわたる国立大学法人化の議論を経て、7月に「国立大学法人法案」が成立致しました。法人化の意義と致しましては、国立大学の存在意義・大学としての特色や個性の目指すべき方向・直接社会と意思疎通を図り、社会的存在としての大学の在り方等が言われております。大学マネジメントの改革が期待されております。さらにその業績の評価がされるということであるかと思われれます。若里会といたしましても、地域社会は勿論・国内・海外に貢献している信州大学工学部に今まで以上の飛躍的な発展を期待し、一層の支援を致していくべきであると思っておりますし、更なる関係者のご活躍・ご発展をお願い致します。

若里会の活動の一つに、「信州大学工学部若手教官研究助成金」事業があります。これは、信州大学工学部に在職する若手教官（助教授・講師・助手）の研究活動を支援する目的で創設されたものであります。対象者は、工学部長を長とする研究助成金交付選考委員会で選考・推薦された者であります。

この技報「こまくさ」は、「信州大学工学部若手教官研究助成金」の対象者等の研究成果を発表して頂いたものであります。国内・外からも大いに評価されております。皆様におかれましても、十分な評価を願うものであります。今後も若里会からの情報誌として発刊して参りたいと思っておりますのでご支援・ご指導のほどお願い申し上げます。

終わりに、ご投稿頂いた方々や編集にご尽力頂きました方々に感謝とお礼を申し上げご挨拶と致します。

(2003. 8. 記)



## 長野・上田地域知的クラスター創成構想プロジェクトについて

信州大学工学部 機械システム工学科

教授 杉本 公一

(スマート機構デバイスプロジェクト サブリーダー)

文部科学省「長野・上田地域知的クラスター創成構想」プロジェクトは昨年7月に開始して既に1年が経過した。このプロジェクトは「特定の技術分野に特化し、地域の知的創造の拠点たる大学等の公的機関を核とし、研究機関、ベンチャー企業等の研究開発型企业等による国際的な競争力のある技術革新のための集積（知的クラスター）の創成を目指す」もので、全国で以下の10クラスター（12地域）が採択された。また、平成15年度からは新たに3地域が追加採択された。事業期間は5年間、予算規模は年間60億円（1地域当たり年間5億円程度）である。

### [平成14年度採択分]

- 1) 札幌クラスター：「札幌ITカロッツェリアの創成」
- 2) 仙台クラスター：「仙台サイバーフォレスト構想」
- 3) 長野・上田クラスター：「長野・上田地域知的クラスター創成構想」
- 4) 浜松クラスター：「浜松地域オプトロニクスクラスター構想」
- 5) 関西文化学術研究都市クラスター：「ヒューマン・エルキュープ産業創成のための研究プロジェクト」
- 6) 京都クラスター：「京都ナノテク事業創成クラスター」

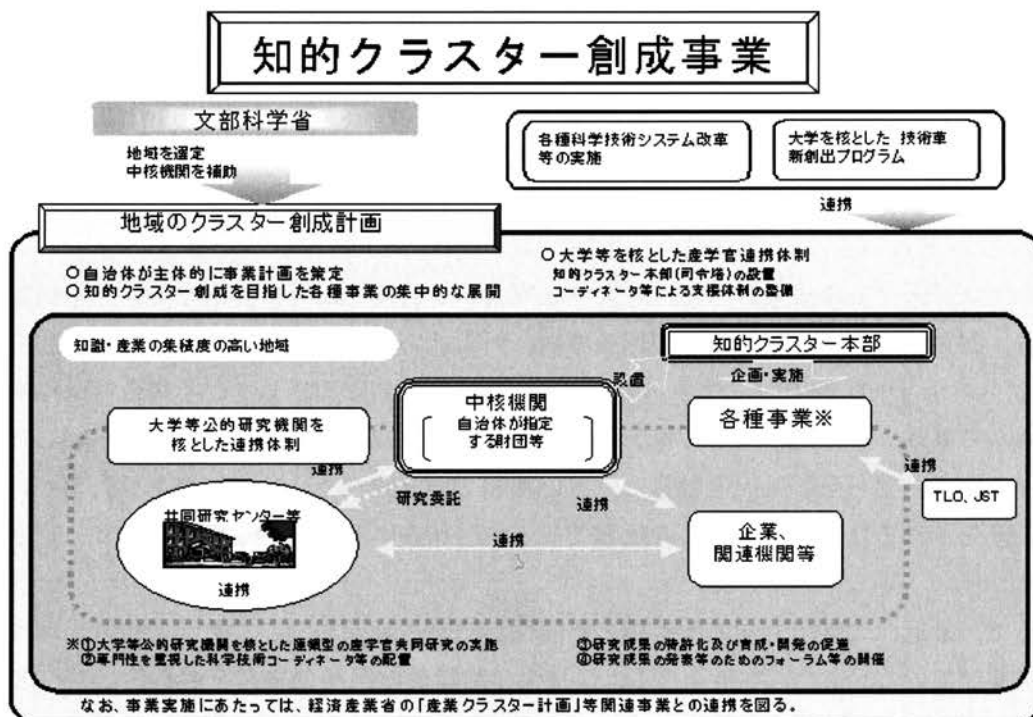


図1 文部科学省知的クラスター創成事業の全体像（出典：文部科学省ホームページ）

- 7) 関西広域クラスター（大阪府彩都地域，神戸地域）
  - ・大阪府（彩都）：「彩都バイオメディカルクラスター構想」
  - ・神戸市：「再生医療等の先端医療クラスター形成に向けたトランスレーショナルリサーチ」
- 8) 広島クラスター：「広島中央バイオクラスター構想」
- 9) 高松クラスター：「希少糖（生理活性単糖）を核とした糖質バイオクラスター構想」
- 10) 九州広域クラスター（福岡地域，北九州学術研究都市地域）
  - ・福岡県：「システム LSI 設計開発クラスター構想」
  - ・北九州市：「北九州ヒューマンテクノクラスター構想」

〔平成 15 年度採択分〕

- 11) 富山・高岡クラスター：「とやま医薬バイオクラスター」
- 12) 名古屋クラスター：「ナノテクを利用した環境にやさしいものづくり構想」
- 13) 徳島クラスター：「ヘルステクノロジーを核とした健康・医療クラスターの創成」

「長野・上田地域知的クラスター創成構想」では「スマートデバイスクラスターの形成」を目的としており，本学工学部と繊維学部でそれぞれ遠藤守信教授，谷口彬雄教授をリーダーとして，以下の研究開発を開始している。このうち，工学部を中心としたプロジェクトには 20 数名の工学部教官，数名の繊維学部教官，数名の長野高専教官，9 名の博士研究員のほかには，県内 15 企業，信州大学地域共同研究センター，信州大学情報処理センター，長野県工業試験場等の研究者が参加している。

#### 1. ナノカーボンコンポジットによるスマート機構デバイスの研究開発（主担当：工学部）

Endo Fiber 及び同製法をベースに，超潤滑性，高耐摩耗性，超精密加工法，導電性など，全く新しい機能を有する革新的機構部品の開発を目的としたナノ複合プロセス，ナノ構造評価・機能評価，機能性付与と実用化についての研究。

#### 2. 機能性ナノ高分子材料によるスマート情報デバイスの研究開発（主担当：繊維学部）

有機 LED 素子技術の開発とそれらをベースとした応用製品開発。また，新たな光デバイス等として有機半導体レーザーの研究開発。

今回のプロジェクトの成果としては，大学研究者がこれまで最も重要視してきた学術論文の数よりも，国際的競争力のある特許の出願件数，新製品の实用化件数（これに伴う新聞発表件数），及びベンチャー企業の設立件数が評価される。県内企業に不足している技術等は秘密保持契約を結んで県外大手企業の技術力をお借りして，昨年度は 10 件ほどの特許を出願したが，ベンチャー企業の立ち上げは大学教官には重い課題で少々困っている状況である。また，特許出願が最優先されるため，大学本来の仕事である学会発表が制限される場合もあり，悩みも多い。

ところで，最近，大学でも知的所有権の重要性が認識され始め，ここ数年で特許出願件数が飛躍的に伸びている。また，本年 4 月には信州大学教職員と県内企業人を中心として，(株) 信州 TLO（本部は繊維学部内）が設立され，大学等の知的財産（特許の売買の他に解析力，人脈等を含む）を産業界へ積極的に役立てようとする動きがある。さらに，平成 16 年度からの国



立大学の独立法人化移行に向けて各大学では特色作りに奔走しており、工学部関連では知的クラスター創成構想プロジェクト後のナノテクノロジー研究の受け皿として、カーボン科学研究所（仮称）の設立も計画されている。

日経ビジネス誌（2003年7月28日号）によれば、大手企業に在職する部長400名が投票した「頼れる大学トップ30」に地方国立大学では唯一信州大学が選ばれている（26位）。ちなみに、このアンケートでは「改革に積極的である」、「過去10年でレベルが向上している」、「産学連携に積極的である」、「10年後にレベル向上が期待できる」、「競争力のある研究を行っている」などの項目で高得点を得ている。今回の知的クラスター創成構想プロジェクトで支給される研究費は、工学部に毎年分配される教官研究費にほぼ匹敵する。したがって、この研究資金を将来の研究のための基盤整備にも効果的に利用し、ナノテクノロジー分野で国際競争力のあ  
る研究成果を出していく必要性を感じる。

# 超音波光回折効果を用いた溶液濃度センサー

## Solution-Concentration Sensor Using Ultrasonic Light Diffraction Effect

氏名：池田 清志

所属：工学部 電気電子工学科 助手

発表会議名：2002年アメリカ合衆国電気電子学会 周波数制御国際会議

開催年月日：平成14年5月28日～6月3日

開催場所：アメリカ合衆国 ルイジアナ州 ニューオリンズ市

ヒルトン ニューオリンズ リバーサイドホテル

### 概要

この論文では、超音波光回折効果を用いた従来になく新規な溶液濃度センサーについて述べている。ラマン・ナスマード回折が生じる超音波駆動周波数  $f_0=9\sim 30\text{MHz}$  における NaCl 溶液と蔗糖溶液の 0～20.0% 濃度トラッカ電圧特性の実験結果と測定感度を中心に論述している。 $f_0=29.998\text{MHz}$  で NaCl 溶液では、 $35.20\text{mV}/\%$ 、 $f_0=29.298\text{MHz}$  で蔗糖溶液では、 $13.48\text{mV}/\%$  の測定感度を得た。測定感度は駆動周波数に比例して増加し、その比例係数  $S_{cr}$  は、NaCl 溶液で  $1.14\text{mV}/\% \cdot \text{MHz}$ 、蔗糖溶液で  $0.341\text{mV}/\% \cdot \text{MHz}$  となることが明らかにされた。さらに、測定感度の改善方法として、通常型 AO に比して PLL 型 AO を用いる方が、トラッカ電圧の駆動周波数特性の実験結果と PLL 法の偏移係数の計算値から、 $f_0=22.898\text{MHz}$  で 2.35 倍感度改善できる知見を得た。

### 1. はじめに

現在、醤油製造・飲料製造の食塩濃度・糖度の調整工程において、人手によらない簡易な測定技術で、調整の自動化と省力化を図り、生産性の向上をすすめる測定法が強く求められている [1]・[2]。食品工業分野における溶液濃度の測定精度に要求される一つの目安は、標準的に 0.01% 位とされている [3]。超音波を用いて溶液濃度を測ると、比較的精度よく連続的にモニタできる上、非接触で実現されて衛生的となる利点がある [4]。筆者は、汎用音響セルの送受波器間の位相差検出法 (PDM) と位相差固定化法 (PLL) による軽便な超音波溶液濃度測定法を開発し [5]・[6]、その測定システムを解析し設計法を確立した [7]。この技法は、アナログ回路のみで構成される回路と温度補正回路および音響セルから構成され、0.01% 精度で実時間温度キャンセル処理を行い測定する。しかし、この方法は、水と一成分混合物量のみを音速度変化 [8]・[9] に対応させて測定する原理に基づいているので、多成分系の測定を連続的に、溶液の状態では測定するのは困難である。多成分混合溶液の状態では、短時間に各成分濃度を連続的に測定する要求がアルコール製造工程にある [3]。

そこで、音響光学偏向素子 (AOD) を用いた全く新しい簡易型溶液濃度センサーを提案する。この方法では、溶液濃度変化を音速度変化と屈折率変化の 2 つの物理パラメータの変化として測定する音波と光の相互作用で生じる音響光学効果を利用する技術である。従来、液体中の音響光回折効果の音波物性応用として、0.1GHz～2GHz 帯での液体音速度と吸収量の高精度測定法の開発 [10]・[11]・[12] や、光メモリなど情報処理工業への応用が試みられた [13]・[14]。これらの音響光回折効果は、変換効率のよい一次回折光を利用した Bragg 回折を利用した方法である [15]・[16]。これは、液体中の回折条件として、数十 MHz 以上の駆動超音波周波数が必要とされるので、VHF 帯動作となり、さらに Bragg 回折角の調整設定が必要とされる [17]・[18]・[19]。これに比して著者は、液体媒体 AOD に NaCl 溶液と蔗糖溶液を用いた超音波光回折効果の基礎的な実験を Raman-Nath 回折の生じる数十 MHz 以下の HF 帯超音波周波数で行った [20]。Raman-Nath 回折の一次回折光を利用した測定系の基礎的な実験として、輝点変位をトラッカ電圧に変換した特性および溶液濃度変化によるトラッカ電圧特性を得た。本報告では、構成原理、実験結果と測定感度を中心に述べる。



## 2. 超音波光回折効果

超音波による光回折効果には、高次回折光まで生じさせるラマン-ナス回折と一次回折光のみを高い回折効率で生じさせるブラック回折とがある。両者の境界回折条件は、文献 [21] に述べられているが、定量的な基準値  $Q$  は文献 [22] に報告されている。

$Q$  が次式を満たすとき、ラマン-ナス回折が生じる。

$$Q = \frac{2\pi\lambda_0 L f_a^2}{nV^2} < 0.3 \quad (1)$$

ここで、 $L$ : 超音波と光の相互作用距離、 $\lambda_0$ : 光の真空中での波長、 $V$ : 溶液中の超音波速度、 $f_a$ : 超音波周波数、 $n$ : 溶液の屈折率である。ラマン-ナス回折の各成分の入射方向からの回折角  $\theta_m$  は、超音波の波長を  $\Lambda$  として、

$$\theta_m = \sin^{-1}\left(\frac{m\Lambda}{\lambda}\right) \quad (2)$$

で与えられる [12]。ただし、 $m$  は、回折次数で、入射方向を 0 次、超音波の進行方向への回折を +1 次、+2 次、 $\dots$ 、逆方向を 1 次、2 次、 $\dots$  とする。したがって、音響セルからの距離  $l$  における偏向距離  $D_d$  は、式 (2) と超音波の波長  $\Lambda = V/f_a$  の関係より、

$$D_d = l \tan\left(\sin^{-1}\left(\frac{m\Lambda f_a}{V}\right)\right) \quad (3)$$

となる。偏向された輝点位置を XY トラッカ電圧  $V_T$  に変換する。ビジコンと偏向された輝点との距離で決まる変換係数を  $k$  とすると、トラッカ電圧と偏向距離  $D_d$  の関係式は  $V_T = kD_d$  となり、溶液中の音速度  $V$  が溶液濃度  $s$  に応じて一次の関係式  $V = Ks$  で変化すれば、式 (3) は次式となる。

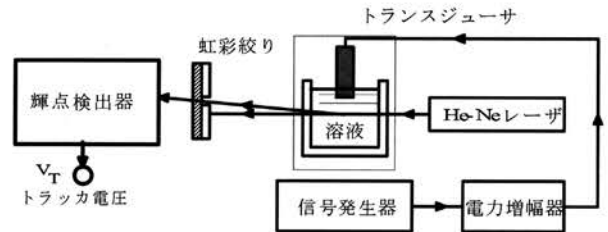
$$V_T = kl \tan\left(\sin^{-1}\left(\frac{m\Lambda f_a}{Ks}\right)\right) \quad (4)$$

したがって、溶液濃度  $s$  の変化でトラッカー電圧  $V_T$  が変化するので、トラッカ電圧変化を測定することで、溶液濃度を測ることができる。

## 3. センサー構成

第 1 図に測定構成図を示す。測定システムは、レーザー光源、トランスジューサ駆動信号発生器、音響光学偏向器 (AOD) セル部、輝点検出器およびラマン-ナス回折+1 次回折光を選択する光学系からなる。レーザー光源には、日本科学エンジニアリング社製 NEO-15MS、ビーム径 1.3mm、出力 15mW の

He-Ne レーザを用い、トランスジューサ駆動信号発生器には、アンリツ社製の SG (MG440C, 16dBm) を用いて駆動電力は最大 40mW を印加した実験を行い、電力増幅器を一部併用して最大 30dBm (1W) まで印可した。



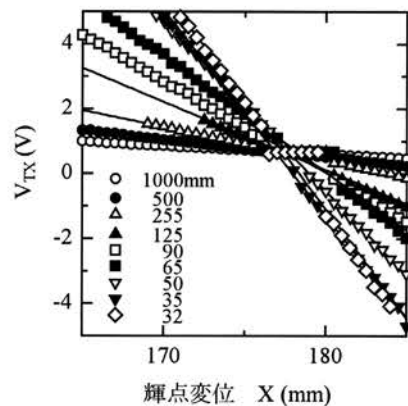
第 1 図 超音波光回折型溶液濃度測定構成図

簡易型 AOD セルとして、寸法形状  $50 \times 50 \times 75\text{mm}$  のアクリル材質容器を用いた。回折効率の大きな +1 次回折光のみを選択するのに虹彩絞り (駿河精機製 F512G) を用いた。これで 0 次光を遮蔽し、+1 次回折光のみを虹彩絞り孔のスクリーン上に結像させた。スクリーン上の輝点をビジコンで撮像し、輝点検出器を構成する XY トラッカ (浜松ホトニクス社製 C1055, カメラコントロール C1000) で、輝点位置をトラッカ電圧  $V_T$  に変換し測定した。

## 4. 実験結果

### 4.1 輝点検出特性

ビジコンと輝点との距離で決まる  $k$  の最適値を求めるために、輝点変位によるトラッカ電圧特性を測定した。



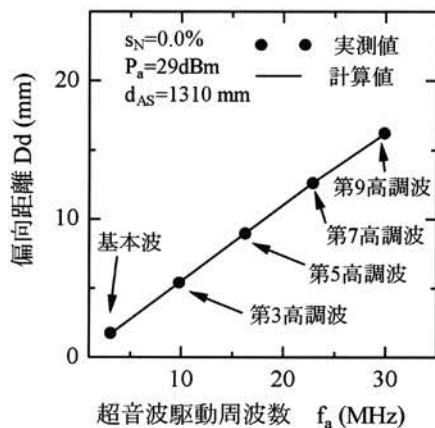
第 2 図 輝点変位とトラッカ電圧の関係

第 2 図には、ビジコンと輝点の距離  $d$  を 32mm から 1000mm に変えた時、輝点移動距離  $X$  とトラッ

カ電圧  $V_{Tx}$  の変化特性を示す。d の減少に従い、直線の傾きを示す移動電圧感度  $S$  は、26.4mV/mm から 668V/mm に増大した。

#### 4.2 偏向距離特性

NaCl 溶液の AOD セルを用いて、偏向距離の周波数特性を測定した。第3図には、超音波駆動周波数と偏向距離との関係を示す。共振周波数 3 MHz の PTZ を用い、各高調波で生じた +1 次回折光の偏向距離を測定した。各高調波での回折強度特性から求めた  $Q$  は、第3、第5、第7、第9高調波で 12.4、17.7、33.2、26.6 である。計算値は、式 (3) と文献 [8] からの音速度より、求めた値である。両者は良く一致した。第1・3高調波では、+4次まで、第5・7高調波までは、+2次まで、第9高調波は、+1次とラマン-ナス回折が観測され、30MHz に近づくと高次回折光強度が減少し、ブラック回折との境界領域となった。



第3図 駆動周波数と偏向距離の関係

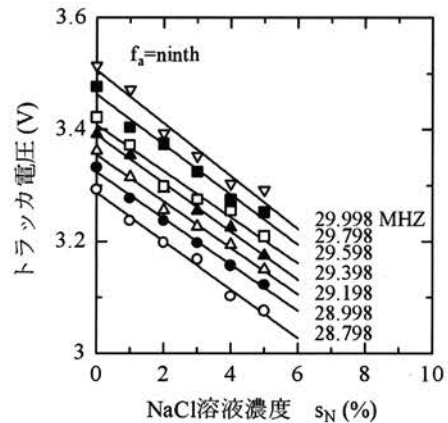
### 5. 溶液濃度特性

#### 5.1 NaCl 溶液

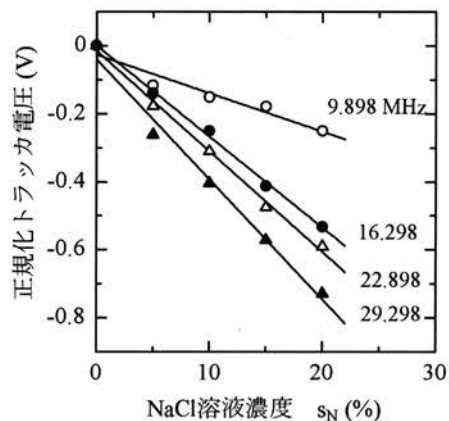
溶液濃度測定用 AOD セルに NaCl 溶液と蔗糖溶液を用いた。超音波光回折効果の基礎的な実験をラマン-ナス回折の生じる 3~30MHz 帯の HF 帯超音波周波数で溶液濃度特性を測定した。第4図は NaCl 溶液濃度  $s_N$  を 5% まで変化させたとき、検出トラッカ電圧の特性を示す。駆動周波数は、28.798MHz から 29.998MHz まで変化させたときの特性である。第9高調波 29.998MHz での濃度感度の絶対値は 47.26mV/% となった。第3・第5・

第7・第9高調波のとき、0.0-20.0%NaCl 濃度変化に対する 0.0%電圧を基準に正規化した電圧変化を第5図に示す。

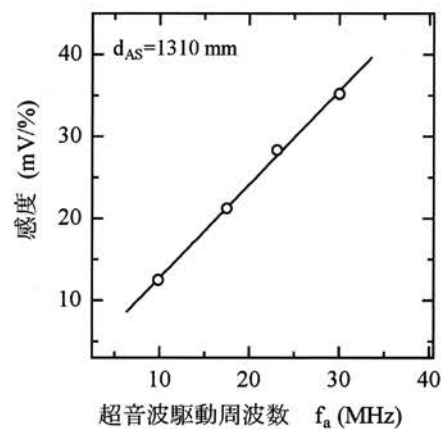
周波数が高くなるにつれて、電圧変化割合すなわち電圧感度が増える傾向にある。図6に駆動周波数に対する濃度感度の絶対値特性を示す。



第4図 トラッカ電圧の NaCl 溶液濃度依存性



第5図 濃度と正規化トラッカ電圧の関係



第6図 感度の周波数特性

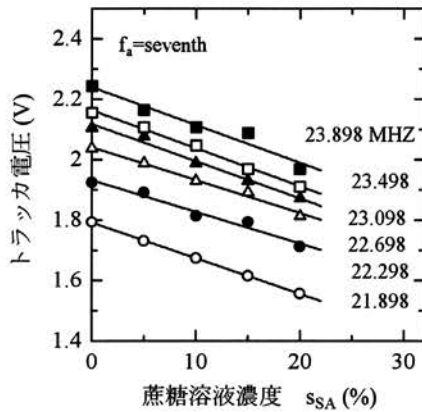
図から、周波数にほぼ比例して感度が増加し、比例係数  $S_{CF}=1.14\text{mV}/\% \cdot \text{MHz}$  知見を得た。この結果



から、濃度感度を2倍に大きくするには、トランスジューサを駆動する信号発生器の周波数を2倍に大きくすればよいことが明らかにされた。

## 5.2 蔗糖溶液

第7図に蔗糖溶液濃度  $s_{SA}$  を 0.0-20.0%まで変化させたトラッカ電圧変化特性を示す。



第7図 トラッカ電圧の蔗糖溶液濃度依存性

第7高調波 23.898MHz とき、濃度感度の絶対値は 11.7mV/%となった。さらに、第9高調波 29.298MHz では、濃度感度の絶対値 13.48mV/%が得られた。感度の周波数比例係数  $S_{cf}=0.341\text{mV}/^\circ\text{C}\cdot\text{MHz}$  を得た。

## 6. 考察

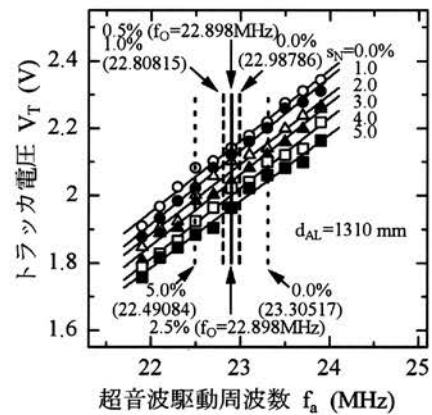
溶液濃度に対するトラッカ電圧変化すなわち測定感度を大きくするには、式(4)のパラメータの超音波駆動周波数  $f_a$ 、AODと結像スポット距離  $l$ 、変換係数  $k$ 、回折光の次数  $m$ 、光の波長  $\lambda$  をすべて大きくすればトラッカ電圧を大きくでき測定感度の改善が図られる。

- (1) 超音波駆動周波数  $f_a$  を高くする。トランスジューサとして、基本周波数の高いものを選び、より高い高調波で駆動する。あるいは AOD に PLL 動作を兼ね備えることで、溶液濃度変化で超音波速度が変化するので、測定電圧変化がより大きくできる。
- (2) AOD と結像スポット距離  $l$  を長くするか、ミラー等を用いて光学距離を長くする。
- (3) 結像スポットとビジコンとの距離を短くするとトラッカの測定感度が向上し、変換係数  $k$  を大きくできる。しかし、測定系の簡易化を考える

と距離  $l$  および変換係数  $k$  には、制約がある。

- (4)  $m$  を大きくするため、高次の回折光を用いる。強い回折光を得るには、超音波の駆動パワーを大きくする必要がある。
- (5) 利用する光の波長  $\lambda$  を長くする。それほどの感度改善は期待できない。

測定システムの簡易化より、駆動周波数を低い状態で、等価的に測定感度を改善させる手法として、溶液濃度変化で駆動周波数を変化させるために AOD に PLL 動作を兼ね備えると、PD 動作 AOD と比較し、より感度向上が可能となる。第8図に第7高調波近傍での NaCl 溶液 0.0-1.0%濃度範囲をパラメータとしたトラッカ電圧特性を示す。



第8図 超音波周波数とトラッカ電圧の関係

この図から、感度改善度について述べる。0.5% NaCl 溶液濃度の中心周波数を 22.898MHz に設定し、濃度 0.0-1.0%変化に対応した PLL 動作周波数は、22.80815MHz から 22.98786MHz に変化する (PLL 設計用の偏移係数  $d_f$  より求めた計算値)。これにより、68mV トラッカ電圧変化を生ずる。29mV PD 動作電圧の約 2.345 倍の感度改善化が図られて、約 53.7MHz の PD 動作駆動周波数に相当する。

## 7. おわりに

超音波とレーザー光を組み合わせた技術で、新しい超音波光回折型溶液濃度センサーの構成と NaCl 溶液・蔗糖溶液の濃度測定結果を述べた。基礎的な実験結果から、超音波周波数を高くすると測定感度の改善が図れることを明らかにした。開発したセンサーは、食品製造工程の食塩濃度・糖度調整用装置として、十分に有用である。

## 謝 辞

本研究の一部は、文部科学省科学研究費補助金(基盤研究(C)12650051)によって行われた。ここに記して感謝致します。また、旅費の一部は、財団法人 信州大学工学部若里会よりご援助を賜ったので、記して感謝の辞を表します。

## 参考文献

- [1] 食品産業技術研究組合編:光琳, 1988.
- [2] (株) アタゴ:総合カタログ, pp6-11, 2000.
- [3] R.C. Asher:London,Institute of Physics Publishing, 1997.
- [4] Edited by Erika Kress-Rogers : Oxford, Butterworth-Heinemann Ltd, 1993.
- [5] K.Ikeda : Jpn. J. Appl. Phys., Vol.36, No.5B pp.3180-3183, 1997.
- [6] K. Ikeda : Jpn. J. Appl. Phys., vol.40, No.5B pp.3566-3569, 2001.
- [7] K. Ikeda : Jpn. J. Appl. Phys., Vol. 41, No.5B pp.3339-3343, 2002.
- [8] K. Ikeda : Jpn. J. Appl. Phys., vol. 39, No.5B pp.3130-3133, 2000.
- [9] K. Ikeda : Jpn. J. Appl. Phys., vol. 37, No. 5B pp.3047-3048, 1998.
- [10] K. Takagi and K. Negishi : Jpn. J. Appl. Phys., Vol.14, pp.29-34, 1975.
- [11] K. Takagi and K.Negishi : Jpn. J. Appl. Phys., Vol. 14, pp.149-150, 1975.
- [12] 根岸・高木: 超音波技術, pp.80-81, 1984.
- [13] L. K. Anderson : Bell Lab. Rec., vol.46, pp.318-325, 1968.
- [14] N. Uchida and H. Iwasaki : Jpn. J. Appl. Phys, Vol.8, pp.811, 1969.
- [15] R. Adler : IEEE Spectrum, vol.4, pp.42-54, 1967.
- [16] Jieping XU and R. Stroud : John Wiley & Sons. Inc., 1992.
- [17] W. R. Klein and B. D. Cook : IEEE Trans. Sonics Ultrason., Vol.14, No.3, (pp.123-134, 1977.
- [18] J. R. Boyd, E. H. Young, S.K. Yao : Opt. Eng., vol. 16, No.5,pp.452-454, 1977.
- [19] I. Gorog, J. D. Knox, and P. V. Goedertier : RCA Review, vol. 33, No. 4, pp.623-673, 1977.
- [20] 池田 : 第 46 回音波の物性と化学討論会講演論文集, pp.28-30, 2001.
- [21] G. W. Willard : J.Acoust.Soc.Amer., Vol.21,

No.2, pp.101-108, 1949.

[22] J. R. Boyd, E. H. Young, S. K. Yao, : Optical Engineering, Vol.16, No.5, 1977.



# WWW を利用した環境騒音に対する感性情報収集システム

小林和弘 安田徳興 降旗建治 柳沢武三郎

信州大学工学部

第 31 回国際騒音制御工学会議 (Inter-noise2002)

2002 年 8 月 19 日(月)～21 日(木)

アメリカ合衆国ミシガン州ディアボーン

ハイアット・リージェンシー・ディアボーン

## 要 旨

道路交通騒音問題が、世界的に深刻な問題になっている。この問題を解決するため、我々は、以下のような帰納法を用いた新しいアンケート調査法を提案している。(a) 住民の日常生活の中で、使用頻度の高い評価語の中から心理尺度を構成。(b) 感覚的に理解しやすく、騒音マップに用いられる色相の国際的検証。(c) 階層分析法を用いた防音設備の選定のための新しいアプローチ。インターネットが世界的に発展していることに着目し、我々は現場の騒音環境を再現するため、WWW システムを利用した耳栓型イヤホン再生環境騒音シミュレータを利用する。これにより被験者は、環境騒音を物理的だけでなく心理的にも体験することができる。本システムを日本で検証した結果、本システムを用いることにより、道路交通騒音の心理的影響(評価語、色相)を収集することが可能であることが示唆された。また、等価騒音レベルが 60dB のとき、定量的に判断された重要度を基に客観的に判断された騒音の感受性が、防音設備の選択に大きく寄与していることが分かった。

## 1. はじめに

道路交通騒音は、すべての国々で最も広く行き渡った騒音源であり、住宅環境における日常生活の「うるささ」や「妨害感」の主要な要因である。有効な騒音軽減策を講ずるためには、世界共通の基盤に立った物理量(環境騒音では等価騒音レベル[dB]であり、自動車単体規制では単発騒音暴露レベル[dB]あるいは最大騒音レベル[dB]である)と心理量(心理的影響の程度を表現する程度表現語と評価語、あるいは騒音マップに利用する色相)との対応関係を表す騒音評価尺度が必要である。

この観点から、自動車交通騒音の「うるささ」に関して、数多くの調査研究が行われてきた。しかし、ICBEN Team6 (Community Response to Noise Team of the International Commission on the Biological Effects of Noise) に代表される現在の調査研究は演繹法が採用され、実験者があらかじめ定めた心理尺度を用いて検討されている。

そこで、上記とは逆に、我々は帰納法を採用し、長野市近郊で、住民による日常生活の中で使用頻度の高い評価語の中から、心理尺度を構成した。しかしながら、評価語は地域性や言語圏によって異なることから、国際的に騒音評価尺度を導き出す必要がある [1][2]。

評価語に対して、色に対する感受性は地域性や文化などの影響が少ないといわれている [3][4]。そこで、我々が日本で構成した色相尺度についても国際的に有効であるかどうかを検証する必要がある。

一方、自己診断法による騒音に対する感受性は、主観的判断によるものでほかの客観的なパーソナリティ要因との関連性が認められない [5]。そこで、被験者に各種防音対策を施した代替案を呈示することにより、階層構造で示された評価項目の重要度に関して一対比較判断を行ってもらおう。このとき階層分析法は、個人の選択基準を重要度という形で数値化する [6]。つまり、騒音に対する感受性が客観的に分析できると考えられる。

本報では、インターネットの世界的発展に注目して、WWW を利用した環境騒音に対する感性情報収集システムの構築を行った。本システムでは、現場の騒音環境を再現するために、耳栓型イヤホンを用いた環境騒音シミュレータを利用している。本研究の目的は、本システムが国際的に有効であるか否かである。

## 2. 環境騒音シミュレータ

本シミュレータは、バイノーラル録音と耳栓型イヤホン再生によるバーチャルリアリティにより構成される [7]。さらに、無響室のような特別な部屋

を必要とせず環境騒音を物理的かつ感覚的に体験できるシステムである。

## 2.1 録画録音系

自動車走行映像は、3都市（長野市、アムステルダム、ローマ）において車線から一定距離（7.5m）離れた地点の高さ 1.2m に設置されたデジタルビデオ (SONY DCR-VX1000) により録画されている。自動車走行音は、前述したデジタルビデオ設置地点において、小型エレクトレットコンデンサマイクロホン（ホシデン九州 KUC2423-o40540、直径 2.6mm）を用いてバイノーラル録音されている。バイノーラル録音は、マイクロホンを筆者の左右の外耳道内入り口から約 1 cm の位置に装着して行った。この位置は、後述するイヤホンを装着したときの位置に一致させている。

## 2.2 再生系

本シミュレータは、WWW を利用したシステムである。道路交通騒音は、耳栓型イヤホン（スター精密 PH-001A）で再生する。本イヤホンの遮音量は、125Hz において 15dB、8kHz において 25dB である。イヤホンの周波数特性は、1mW 駆動で人工耳（B&K4159）により測定された。図 1 はイヤホンの周波数特性と THD を示す。感度は 109.6dB/mW である。再生時には、音源に任意特性 FIR フィルタソフト（日東紡音響エンジニアリング社）を用い、イヤホンの周波数特性が影響しないように、逆フィルタによる周波数補正を行った<sup>[8]</sup>。

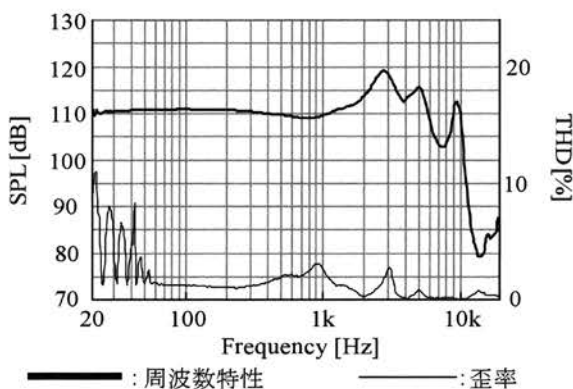


図 1 イヤホンの周波数特性と歪率

## 2.3 心理実験

被験者は、本シミュレータから再生された道路交通騒音の「うるささ」を評価している。「うるささ」の評価尺度は、7段階「非常にうるさい、かなりうるさい、うるさい、少しうるさい、あまり気にならない、気にならない、全く気にならない」である。被験者は、視・聴覚の正常な大学生 13 人である。

## 2.4 結果

心理尺度構成法は系列範疇法で行っている。「うるささ」の評価得点は、式 (1) の線形モデルで与えられる。

$$A = \alpha + \beta (L_{Aeq(5min)} / 10). \quad (1)$$

ここで  $A$  は「うるささ」に関する評価得点、 $\alpha$  は定数、および  $\beta$  は傾斜である。

図 2 は道路交通騒音の「うるささ」と  $L_{Aeq}$  の関係を示す。同図から、「うるささ」と  $L_{Aeq}$  の関係は現場実験の結果とよく一致しているといえる。

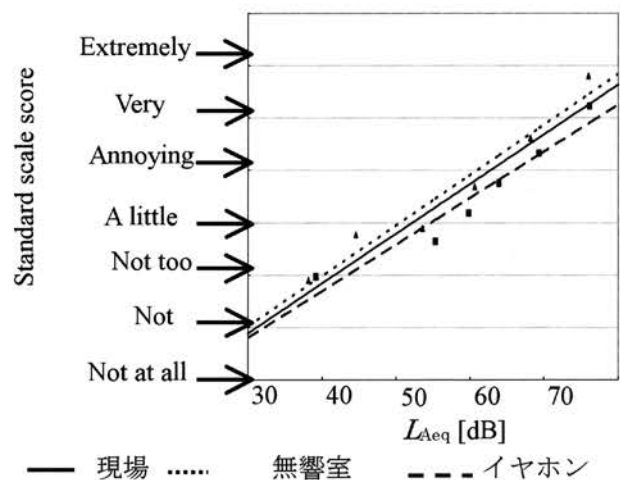


図 2 「うるささ」と  $L_{Aeq}$  の関係

## 3. WWW を利用した感性情報収集システム

我々は、道路交通騒音の心理的影響を国際的に収集するために、WWW を利用した感性情報収集システムを構築した。本システムは、CGI により構成されているため、収集した結果をリアルタイムに反映させることも可能である。

### 3.1 感性情報収集システム

本システムにおいて、被験者は本研究室のホーム

ページ (<http://acousticsg.shinshu-u.ac.jp/exp>) にアクセスし、以下に示す手順に従い実験を行う。

#### 校正方法

騒音による心理的影響の程度を評価するには、騒音環境をどの WWW クライアントにも共通に再現する必要がある。そこで、再生音の校正を行う。校正信号は、純音（周波数：500Hz, SPL：80dB）を用いる。被験者は、イヤホンの入力電圧が 80mV となるように PC のボリュームを調整する。

#### 個人情報

被験者は、性別、年代、主に使用している言語、国および騒音に関する感受性（非常に敏感、敏感、普通、敏感でない）を記入する。ここで、感受性を調査する理由は、前報からパーソナリティ要因の中で道路交通騒音のうるささに影響を及ぼす主要な要因であることが分かっているからである<sup>[9]</sup>。

#### 道路交通騒音による心理的影響の収集

##### (1) 呈示騒音

文脈効果の影響を避けるため、再生する道路交通騒音の等価騒音レベルの範囲は、生活環境を想定して 25dB から 85dB に設定した<sup>[1]</sup>。従って、様々な自動車走行映像を、車線から 9 m 離れた地点において録画・録音した。加えて、ISO 規格による騒音伝搬予測に基づいて、2通りの住宅モデルを設定した。表 1 はその住宅モデルを示す。これらのモデルの道路交通騒音は、FIR フィルタ（サンプリング周波数：32kHz, タップ長：4096）を畳み込むことにより合成した。

##### (2) 実験方法

被験者は、7種類のランダムに再生される交通騒音に対する、心理的影響の程度を表す評価語を自由に記入する。また、色相円環の中から再生音の印象に合う色を選択する。得られた騒音評価尺度は騒音マップに利用することを前提としているため、色相円環の背景は白とし、黒の線で区切られている。また、何かコメントがあれば自由に書くことができる。

7種類の騒音に対する評価が終了したら、アンケート結果を騒音レベルの大きい順に並べた評価語と色の確認を行う。アンケート結果の訂正を行いたい場合は、再度交通騒音を体験し、評価語と色を編集する。訂正回数は限定されていない。最後にアンケート結果に対して、ISO1996-2 および我々の日本での調査結果の3つの色相尺度を比較し、一番よいものを選択する。

#### 感受性の客観的評価

##### (1) 階層分析法

道路交通騒音による心理的影響を客観的に判断するため、本システムでは階層分析法を用いる。階層分析法では、評価項目と代替案は階層化される。

##### (2) 階層構造

被験者は、防音設備を備えた新築の住宅を道路端に建てる場合について、最も適した防音設備の選択を行う。住宅から道路までの距離は、7.5m, 15m, 30m および 45m である。その時の等価騒音レベルはそれぞれ 65.4dB, 60.9dB, 58.9dB および 54.9dB である。図 3 は防音設備の選択の階層構造を示す。また、表 2 は防音設備の代替案を示す。

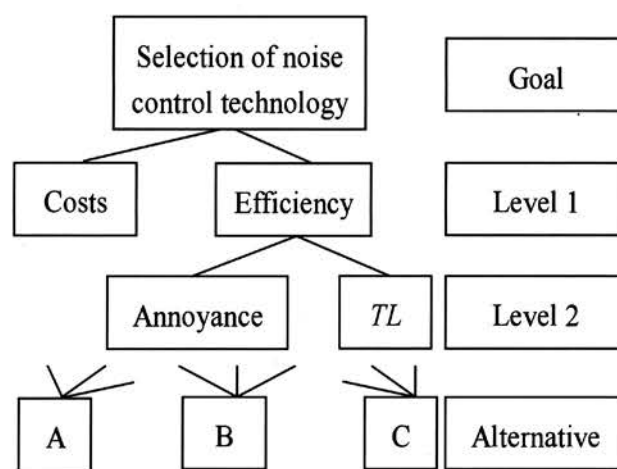


図 3 防音設備の選択に関する階層構造

表 1 シミュレートした住宅モデル.

Case No.	Simulated models	TL [dB(A)]
1	Indoor image (house model: 4.2×~6.0×~2.3 Wall: the composition of wooden A window with single glass (1.15×~1.6m, thickness : 5mm) A door made of aluminum (0.9×~2.1m)	23.4
2	Indoor image (house model: 4.2×~6.0×~2.3 A barrier (height: 2m) at 5m from the traffic line under the condition 1	42.7

表2 防音設備の選択に関する代替案.

Alternatives	Wall	Window 0.9×~1.7	Noise barire	TL [dB(A)]	Costs [\$]
A	Normal Wall	Single window glass	×	26.3	717.8
B	Normal Wall	Double window glasses	×	27.3	792.9
C	Normal Wall	Single window glass	○	34.2~ 36.2	2464.6

### (3) 一対比較法

最初に被験者は、住宅の立地条件として上記の距離の中から1つを選択する。次に、住宅施工前の道路交通騒音を聴取し、騒音のうるさを確認する。さらに、図3の階層構造に基づき、各レベルの要素に対し、以下に示す一対比較値を用いて一対比較を行う。

1. 要素*i*は*j*と同程度重要
3. 要素*i*は*j*と比べてやや重要
5. 要素*i*は*j*と比べてかなり重要
7. 要素*i*は*j*と比べて非常に重要
9. 要素*i*は*j*と比べてきわめて重要

同様に、子要素をもたない要素に対し各代替案に関する一対比較を行う。ここで、うるささに関する一対比較では、環境騒音シミュレータを用い、住宅施工後の道路交通騒音を聴取してもらう。

被験者は、正常な視・聴覚を有する33人の大学生である。

## 3.1 結果と考察

### 3.2.1 心理的影響の収集

表3は7段階評価語の使用頻度百分率と等価騒音レベルの関係を示す。また、表4は「うるささ」に関する評価語とそれぞれの評価語に対する色相の使用頻度百分率の関係を示す。両者の心理的影響と呈示された等価騒音レベルの関係から、本システムで行った結果は、現場実験の結果と一致していることがわかる。これにより、本システムを用いて、道路交通騒音により引き起こされる心理的影響を国際的に収集できる可能性が示唆された。

### 3.2.2 騒音に対する感受性の客観的評価

表5は、各距離に対する選択された代替案の分布

を示す。同表から、等価騒音レベルが約60dBのとき、代替案Bと代替案Cがほぼ同じ割合で選択されていることがわかる。これは、感受性が防音設備の選択に大きく影響していることを意味していると考えられる。また、表6は、等価騒音レベルが約60dBの時、各被験者の感受性、選択された代替案、および被験者が最も重要だと判断した評価項目の関係を示す。同表から、階層分析法により定量的に判断された重要度を基に、あいまいな判断であった個人の騒音に対する感受性を、客観的に判断することの可能性が示唆される。

## 4. まとめ

本論文では、我々が提案しているWWWを利用した環境騒音に対する感性情報収集システムが有効であるかどうかを実験的に検討した。得られた主要な結果は以下のようにまとめられる。

- (a) 環境騒音シミュレータを用いることにより、道路交通騒音に対する心理的影響の程度を評価することが可能である。
- (b) 感性情報収集システムを用いることにより、道路交通騒音に対する心理的影響の程度(評価語と色相)を収集することが可能である。
- (c) 騒音に対する感受性は、特に等価騒音レベルが60dBのとき、階層分析法により定量的に判断された重要度から、防音設備の選択に大きく寄与していることがわかった。

結論として、本システムは国際的に環境騒音に対する感性情報を収集するために有効であるといえよう。

今後、帰納法による騒音に対する心理的影響の程度を表現する「評価語と色相」収集を国際的に推進する必要がある。そのため、海外の多くの皆様が以下のURL (<http://acousticsg.shisnu-u.ac.jp/exp>) にアクセスすることを希望します。



## 謝 辞

本研究は、財団法人信州大学工学部若里会から多大なるご支援を頂き、米国ミシガン州ディアボーンのハイアット・リージェンシー・ディアボーンホテルで開催された第 31 回国際騒音制御工学会議 (inter-noise 2002) で発表することができました。ここに感謝の意を表します。

## 参考文献

1. K. Furihata and T. Yanagisawa, Reconstruction of vehicle noise-rating scale based on judgment of residents in and around Nagano City and its effectiveness, *Journal Acoustic Society of Japan* 44(2), 108-115, 1988.
2. K. Furihata and T. Yanagisawa, Investigation on composition of a rating scale possible common to evaluate psychological effects on various kinds of noise sources, *Journal Acoustic Society of Japan* 45(8), 577-582, 1989.
3. T. Oyama, Y. Tanaka and J. Haga, Sensitivity and Hue Symbolism among Japanese and American Students, *Psychology Research* 34, 109-121, 1963.
4. K. Furihata and T. Yanagisawa, The application of a noise-rating scale composed of hue-scale and  $L_{eq}$  on various kinds of noise sources for noise map, *J. Acoust. Soc. America* 108(5), 2498, 2000.
5. W. Ellermeier, M. Eigenstetter and K. Zimmer, Psychoacoustic correlates of individual noise sensitivity, *J. Acoust. Soc. Am.* 109, 1464-1473, 2001.  
Satty, T.L. The analytic hierarchy process, New York: McGraw-Hill, 1980.
6. T. Nagano, K. Furihata and T. Yanagisawa, Psychological evaluation by vehicle noise simulator using new earphone of earplug type for virtual reality, *Inter-noise2000* 6, 3494-3497, 2000.
7. Durand R. Begault, 3-D Sound for Virtual Reality and Multimedia, NASA / TM-2000-000000, 2000.
8. K. Furihata and T. Yanagisawa, A path model applied to field hearing data on road traffic noise annoyance constructed with the induction method, *Inter-noise2001*, 1633-1636,

表3 7段階評価語の使用頻度百分率と等価騒音レベルの関係

Words represented by subjects	Field		This questionnaire	
	Percentage [%]	$L_{Aeq}$ [dB]	Percentage [%]	$L_{Aeq}$ [dB]
Hijoni urusai	6.0	83	12.5	85
Kanari urusai	14.4	73	14.5	73
Urusai	48.8	64	25.0	64
Sukoshi urusai	8.4	53	12.5	54
Amari kininaranai	22.7	45	9.5	44
Kininaranai	36.1	33	42.9	33
Mattaku kininaranai	13.4	21	19.0	22

表4 「うるささ」に関する評価語とそれぞれの評価語に対する色相の使用頻度百分率の関係

Urusasa	Field		This questionnaire	
	color	Percentage [%]	color	Percentage [%]
Hijoni urusai	red	25.0	dark red	15.2
Kanari urusai	purple	24.7	Red	21.2
Urusai	brown	19.0	Brown	15.2
Sukoshi urusai	bright yellow	16.0	bright yellow	9
Amari kininaranai	light green	18.8	light green	15.2
Kininaranai	light blue	28.7	light sky blue	15.2
Mattaku kininaranai	White	54.1	White	15.2

表5 各距離に対する選択された代替案の分布

	Alternative A	Alternative B	Alternative C
7.5m(65.4dB)	8%	8%	83%
15m(60.9dB)	8%	50%	42%
30m(58.9dB)	25%	67%	8%
45m(54.9dB)	83%	17%	0%

表6 等価騒音レベルが約60dBの時の感受性、選択された代替案および被験者が最も重要だと判断した評価項目の関係

Subjects	Self-reported sensitivity	Alternative selected	Most importance decision element
A	Very-sensitive	Alternative B (45%)	Costs (50%)
B		Alternative B (44%)	Annoyance (66%)
C	Sensitive	Alternative C (57%)	Annoyance (63%)
D		Alternative C (52%)	Annoyance (69%)
E	Neutral	Alternative C (48%)	Annoyance (69%)
F		Alternative C (39%)	Costs (50%)
G		Alternative B (61%)	Costs (88%)
H		Alternative B (42%)	Costs (83%)
I		Alternative B (40%)	Costs (80%)
J		Alternative A (51%)	Costs (75%)
K		Non-sensitive	Alternative B (55%)
L	Alternative B (55%)		Costs (75%)

# 道路交通騒音自動監視を目的とした移動音源の 音響インテンシティ計測の検討

和田友宏, 降旗建治, 柳沢武三郎

信州大学工学部

第 31 回国際騒音制御工学会議 (inter-noise2002)

2002 年 8 月 19 日(月)~21 日(水)

アメリカ合衆国ミシガン州ディアボーン

ハイアット・リージェンシー・ディアボーン

## 要 旨

現在, 日本において道路交通量の増加に伴い多くの都市部や主要幹線道路付近などにおいて測定された等価騒音レベル値は, 89% 以上が環境基準を超えている。前報[1]でこの環境基準を満たすためには, 自動車単体の  $L_{Amax}$  を 74dB (車線から観測点までの距離 7.5m) 以下に抑えることが有効であることを明らかにした。この観点から, 本論文では, 音響インテンシティベクトルを用いた道路交通騒音自動監視を提案する。その際, 移動音源の計測には以下に示すいくつかの問題点が存在する。具体的には, (a)ドップラー効果の影響, (b)音の伝搬に伴う遅延の影響, (c)FFT 解析方法と分析精度, および(d)任意走行状態の自動車に関する主な騒音源の特定などである。これらの影響を明らかにするために, 定常走行自動車を対象とし, 実験的検討を行った。その結果から,  $IL_x$  が最小値 (車線と平行方向), および  $IL_y$  が最大値 (車線に対して垂直方向) を示した地点において  $L_{Amax}$  と  $IL_y$ [dBA]は 1dB 前後の精度 (FFT ポイント数 4096, サンプリング周波数 32kHz) で一致することを確認した。結論として, 音響インテンシティベクトル計測は移動音源計測に有効であるといえる。

## 1. はじめに

前報 [1] で, 騒音環境基準を満たすためには, 長野市内の代表的な国道における検討結果から, 自動車単体の  $L_{Amax}$  を 74dB 以下に抑えることが有効であることを示した。この見地から, スピード違反の取り締りと同様に高騒音で走行する自動車の取り締りが必要であると考えられる。その際, 高騒音車取り締りでは, 自動車単体規制と同様に車線から 7.5m 地点における走行車の映像とその  $L_{Amax}$  値を自動計測することが必要である。本報では, 任意走行状態の自動車騒音自動監視が可能かどうか実験的検討を行った。音響インテンシティは計測点における音の流れを向きと大きさのベクトル量として計測することが可能である。そこで, 音響インテンシティ計測がどの程度移動音源の方向と音の強さを正確に測定できるかを検証するため, 一般的な計測法である 2 マイクロホン法を採用し, 以下に示す測定と検討を行っている。すなわち, (a)ドップラー効果の影響が少ない計測法, (b)音源から計測点までの遅延時間の考慮, (c)音響インテンシティレベル  $IL$  算出時の FFT 解析方法, および(d)任意走行状態の自動車に関

する主な騒音源の特定などである。以下本文では, 上記内容の音響インテンシティ法による移動音源計測における誤差の基礎的検討を行ったので報告する。

## 2. 使用マイクロホンの選定と配置

図 1 にインテンシティプローブのマイクロホン配置を示す。このプローブは二組の 2 マイクロホンプローブを使用し, x-y 平面の 2 次元音響インテンシ

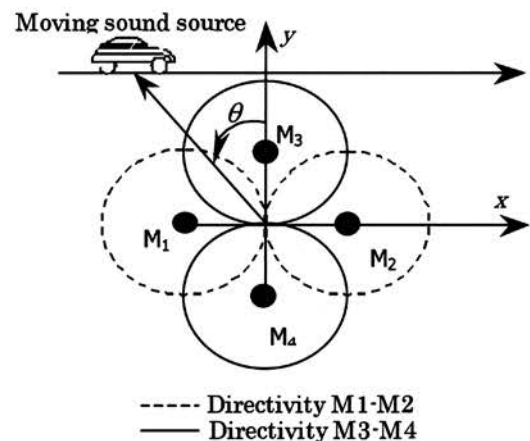
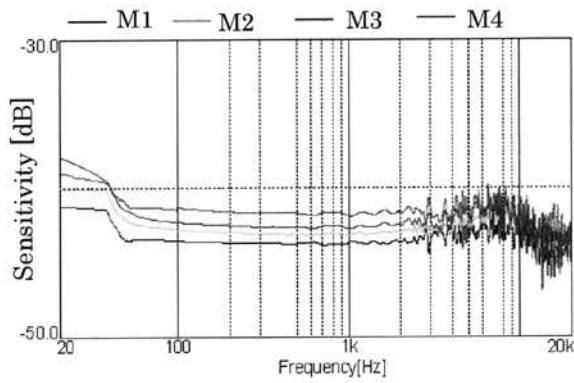
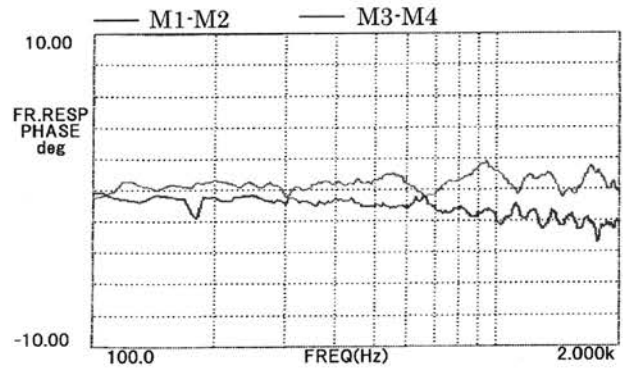


図 1 マイクロホン配置



(a) Frequency response



(b) 位相差

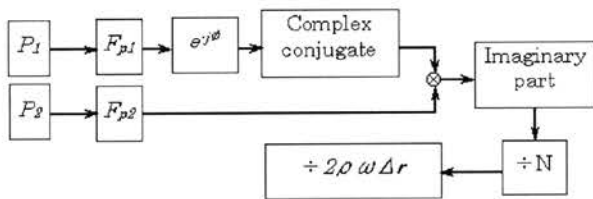
図2 4個のマイクロホンの特性

ティベクトルを計測することができる。また、有限差近似誤差を 1 dB 以下にするため各マイクロホンペアの間隔は 0.03m<sup>[2]</sup> である。計測には 4 個のエレクトレットコンデンサマイクロホン（直径 6mm）を採用した。選定の際、2 個のマイクロホン間の位相特性は一致したものを選定する必要がある。図 2 は選定したマイクロホンの周波数特性と各組の位相差を示す。同図から、各マイクロホンは使用周波数帯域においてほぼ平坦であることがわかる。また、

各マイクロホンペアの位相差は最大で 2° であることがわかる。

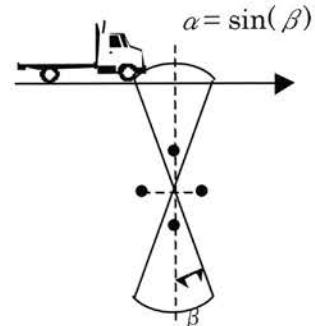
### 3. 音響インテンシティ演算

図 3 はマイクロホン間位相差の補正を含めた周波数領域における音響インテンシティ演算のブロックダイアグラムを示す。プローブによって計測された 4 ch のアナログ出力は、2 台のデジタルビデオカ

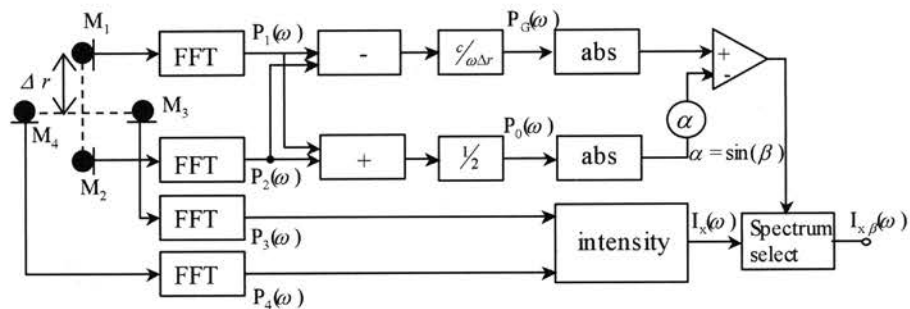


$F_{p1}, F_{p2}$ : フーリエ変換された  $P_1, P_2$ ,  
 $N$ : FFT ポイント数,  $\Delta r$ : マイクロホン間隔

図3 インテンシティ計算のブロック図



(a) マイクロホンシステムの指向特性



(b) 演算処理過程

$p_0$ : 音圧スペクトル,  $p_G$ : 音圧傾度スペクトル  
 $a$ : 指向角度設定係数,  $b$ : 方向分離角度

図4 可変指向性マイクロホンシステム構成図



メラ (Sony DCR-VX1000, VX2000, サンプリング周波数 32kHz) により AD 変換される。デジタルビデオテープに記録されたデータは、i.LINK ケーブルでコンピュータ (Sony PCV-R73K) に転送される。そのデータから、図 3 の流れに因にしたがってソフトウェア (MATLAB) を用いて音響インテンシティベクトルが計算される。チャンネル間位相差は、一方のチャンネルにあらかじめ計測しておいた位相差を共役複素数として掛け合わせることで補正している。

また、音響インテンシティ計測における可変指向性マイクロホンシステムの原理<sup>[6]</sup>に基づいて、任意走行状態の自動車に関する主な騒音源の特定を行うために、プローブの指向性を鋭くする演算処理を施す。図 4 (a) は可変指向性マイクロホンシステムの指向特性を示し、および同図 (b) は可変指向性マイクロホンシステムの構成図を示す。可変指向性マイクロホンシステムは、音圧スペクトルとマイクロホン対の音圧傾度スペクトル信号両者の振幅を比較し、目的の方向から入射する音のスペクトルのみを選択できる。その比較の際、指向性の幅は目的とする角度  $\beta$  によって表される指向角度設定係数  $\alpha$  が用いられている。

#### 4. 実験目的

音源は、純音と自動車音を採用した。最初に、純音は、車の後部座席に設置されたスピーカから放射した。その計測目的は、(1)  $IL_x$  と  $IL_y$  の関係を明らかにする、(2) ドップラー効果の影響、(3) 音響インテンシティベクトルによる音源方向推定精度、および (4) A 特性を付加した  $IL$  と  $L_{Amax}$  の関係を検証することである。次に、自動車騒音に関して上記と同様の検証を行うことである。このとき、 $IL$  の計測結果と騒音計 (Fast mode) を対応させるための FFT 解析方法と分析精度を検討する。最後に、可変指向性マイクロホンシステムを適応し、走行自動車上の音源分布を調べる。

#### 5. 実験

図 5 は測定条件を示す。防風スクリーンを取り付けたインテンシティプローブは、車線から 7.5m、および高さ 1.2m の位置に設定した<sup>[6]</sup>。ここで、比較のため同位置に設置した騒音計 (RION NL-14) により  $L_{Amax}$  を同時計測した。走行車を計測する区間は 30m である。また、走行車線周辺に建造物はな

い。最初に、放射した純音の周波数は 250Hz、500Hz、1kHz、および 1.5kHz である。各自動車の車速は 36 km/h、47km/h、50km/h、および 73km/h である。

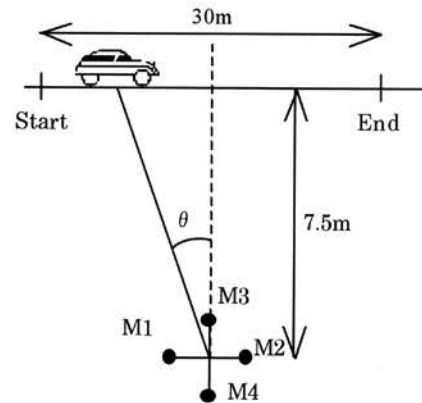


図 5 測定条件

### 6. 結果

#### 6.1 純音の場合

図 6 は計測された  $IL$  の  $x$ ,  $y$  方向成分を示す。同図から、全ての周波数で 15.3m 地点において  $IL_x$  は 67dB のディップを持ち、 $IL_y$  は 82dB のピークを示していることがわかる。図 7 は  $IL_y$  の計測周波数に現れたドップラー効果を示す。同図から、計測結果の周波数は 15.3m 地点において音源周波数と一致していることがわかる。また、図 8 はインテンシティベクトルによる音源方向推定結果を示す。同図から、10m から 20m の区間は、理論値と概ね一致していることがわかる。図 9 は A 特性を付加した  $IL[dBA]$  と  $L_{Amax}$  の差を示す。同図から、それぞれの速度においても  $IL[dBA]$  と  $L_{Amax}$  の差は 1dB 以下であることがわかる。

以上の純音を用いた基礎的な実験結果から、 $IL_x$  がディップを示す位置で、 $L_{Amax}$  に対応した  $IL[dBA]$  と音源周波数を得ることが可能であるといえる。

#### 6.2 自動車騒音の場合

図 10 は普通自動車に関する  $IL[dB]$  の測定結果を示す。同図 (a) のオーバーラップは 0% であり、および (b) は 75% である。 $IL$  の時間的レベル変化に着目すると、同図 (a) からオーバーラップが 0% の場合には多くの起伏を示すこと、同図 (b) から 75% の場合には騒音レベル変動と同様にピークレベル特性を示し

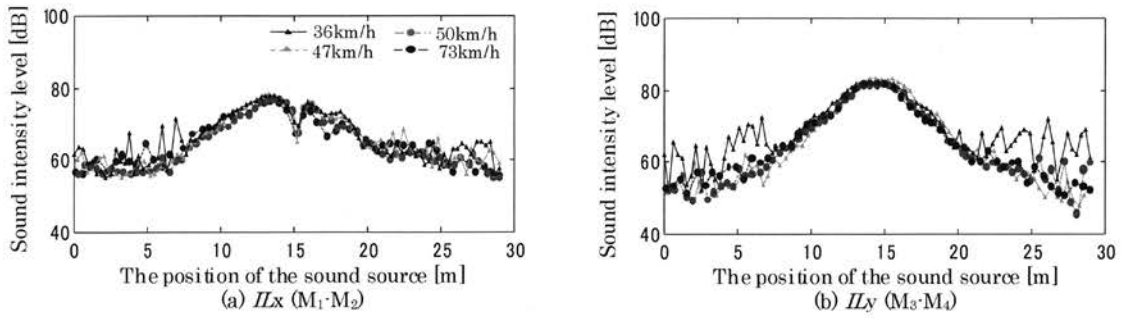


図6 純音の音響インテンシティレベル (500 Hz, 1024points)

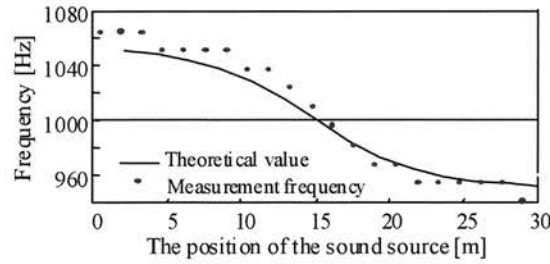


図7  $IL_y$  におけるドップラー効果 (1 kHz, 4096points)

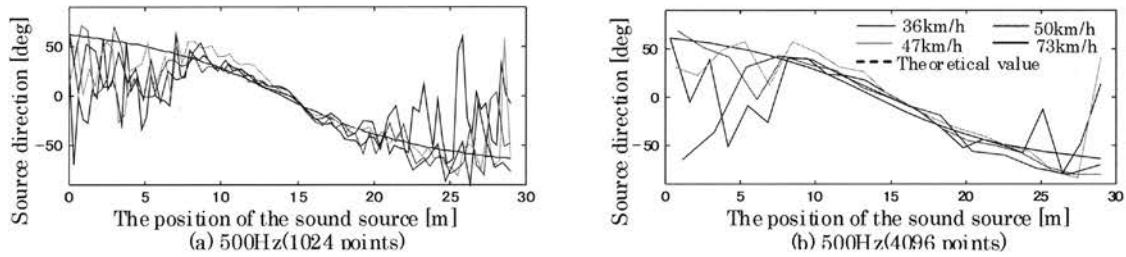


図8 インテンシティベクトルによる音源方向推定

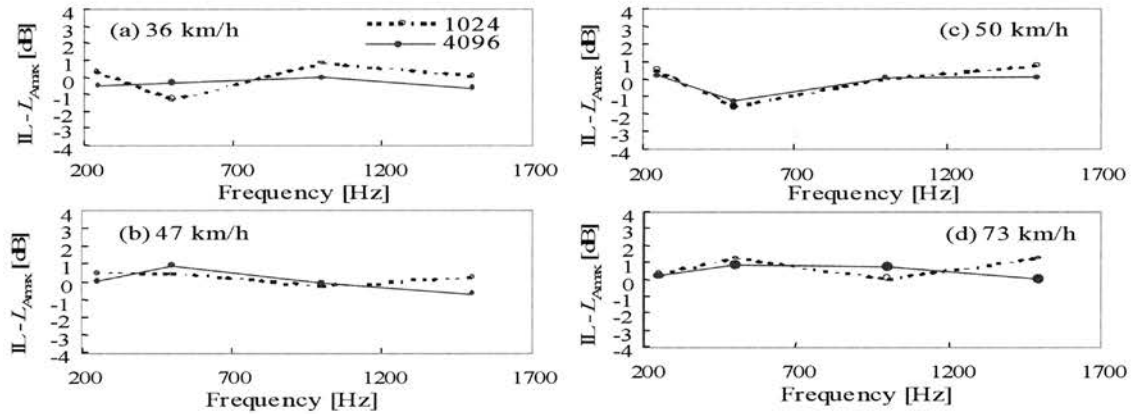


図9  $IL$  [dBA] と  $L_{Amax}$  の比較

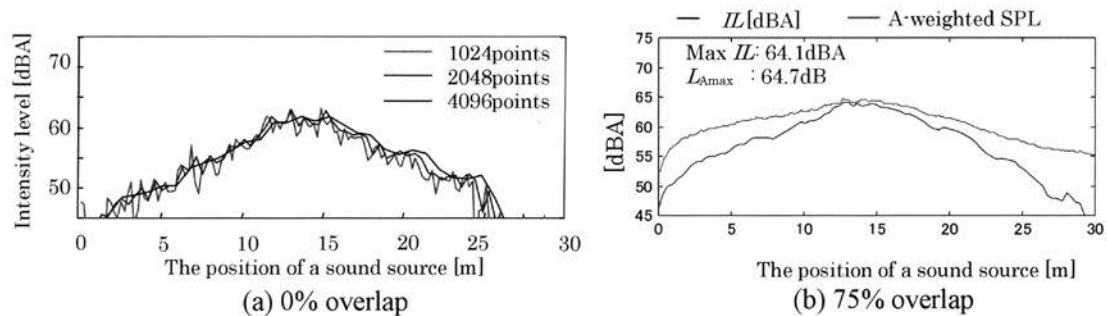


図10 自動車騒音の音響インテンシティレベル

ていること、および  $IL$  のピークと  $L_{Amax}$  の差は 1dB 以下であることなどがわかる。

図 11 は大型自動車に関する  $IL_x$ [dB] と  $IL_y$ [dB] の測定結果を示す。同図(a)から、 $IL_x$  中央のディップは 55dB であること、および同図(b)から  $IL_y$  のピークは 74.4dB であり、このピークと  $L_{Amax}$  の差は 1dB 以下であることなどがわかる。また、表 1 は、他の 6 台の自動車に関する  $IL$  のピークと  $L_{Amax}$  の測定結果を示す。同表から、どの場合も両者のレベル差は 1dB 以下であることがわかる。図 12 は音響インテンシティベクトルによる大型自動車の音源方向推定の結果を示す。ただし、破線の理論値は大型自動車の中心位置を基準にしている。同図から、音源方向は 15.3m 地点で  $15^\circ$  であることがわかる。このことから、大型自動車の主な音源は後部にあることが示唆される。

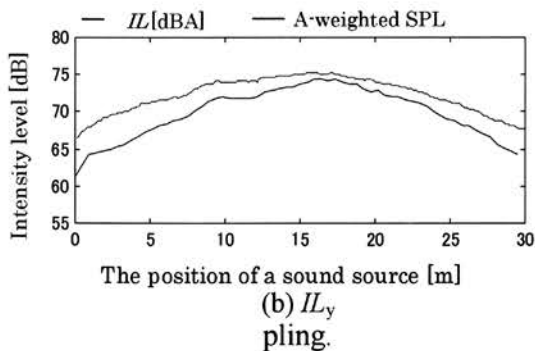
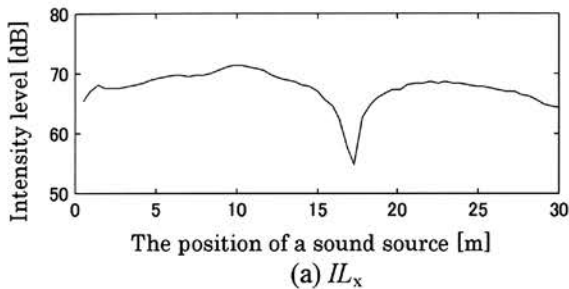


図 11 大型自動車の音響インテンシティレベル

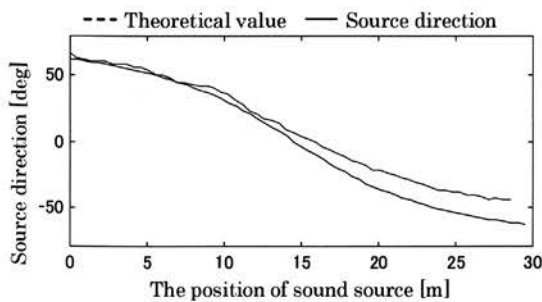


図 12 大型自動車の音源方向推定

表 1  $IL$  と  $L_{Amax}$  の比較

	$L_{Amax}$	$IL$ [dBA]
vehicle1	64.7	64.1
vehicle2	65.6	65.4
vehicle3	68.7	68.5
Heavy vehicle1	75.3	74.4
Heavy vehicle2	70.4	69.4
Heavy vehicle3	77.1	76.4

### 6.3 可変指向性マイクロホンシステムによる解析

図 13 は、可変指向性マイクロホンシステムで指向角度設定係数  $\alpha$  を 0.1, 0.423 および 0.894 に設定したとき、大型自動車 (全長 6 m) の  $IL$  計測結果を示す。同図から、 $\alpha$  が小さくなるとプローブの指向性が鋭くなり、音響インテンシティレベルが低下していること、その際、計測対象の全長より指向性が鋭くなったとき  $IL$  と  $L_{Amax}$  との差が 5 dB 前後であることなどがわかる。

図 14 は、同じ大型自動車に関して指向角度設定係数  $\alpha$  を 0.02 に設定したときの解析結果である。同図中に示す自動車のイラストの位置関係は、横軸の長さに対応している。同図から、大型自動車上の音源は後部に集中していることがわかる。以上の結果から、可変指向性マイクロホンシステムは、任意走行自動車騒音の騒音源特定にかなり有効であるといえる。

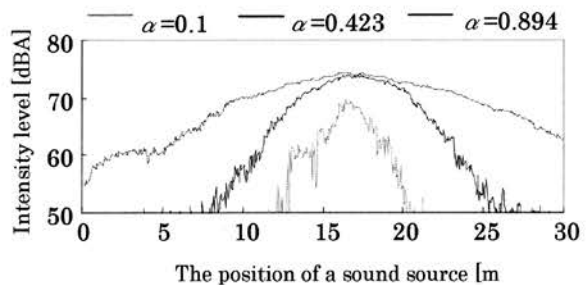


図 13 可変指向性マイクロホンシステムによる音響インテンシティレベルの解析結果

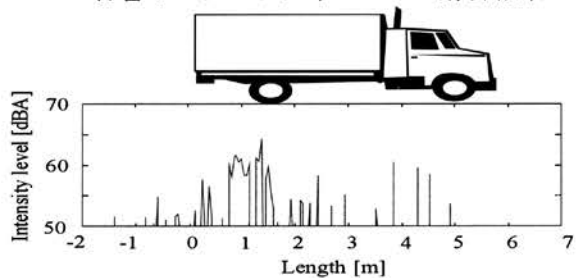


図 14 走行大型自動車上の推定された各音源の音響インテンシティレベル ( $\alpha=0.02$ )

## 7. まとめ

本報では、音響インテンシティベクトル計測が道路交通騒音監視を目的とした移動音源計測に有効であるかどうかを実験的に検証した。その過程で、最適デジタル演算処理条件は、サンプリング周波数 32kHz, FFT ポイント 4096 および 75%オーバーラップであることを明らかにした。得られた主要な結果をまとめると下記のようになる。

- (a) 周波数帯域が 100Hz から 2kHz までのインテンシティプローブを用いても、 $IL[dBA]$  のピークと  $L_{Amax}$  の差は、1 dB 以内で計測することが可能である。
- (b) 音源方向は、正面を中心とし約  $\pm 40^\circ$  の範囲内で推定できる。
- (c) 可変指向性マイクロホンシステムは、走行自動車上に分布する各音源の音響インテンシティレベルを推測できることを検証した。

結論として、音響インテンシティベクトル計測は、道路交通騒音の自動監視を目的とした計測に有効であるといえよう。

## 謝 辞

本研究は、財団法人信州大学工学部若里会から多大なるご支援を頂き、米国ミシガン州ディアボーンのハイアット・リージェンシー・ディアボーンホテルで開催された第 31 回国際騒音制御工学会議 (inter-noise 2002) で発表することができました。ここに感謝の意を表します。

## 参考文献

1. Y. Yasuda, K. Furihata and T. Yanagisawa, Verification of safety regulations to further reduce the noise generated by individual motor vehicles, *inter-noise 2001*, 2685-2688, 2001.
2. J. K. Thompson, D. R. Tree, Finite difference approximation errors in acoustic intensity measurements, *Journal of Sound and Vibration* 75(2), 229-238, 1981.
3. T. Sone, S. Kono and T. Iwase, Power levels and their spectra of automobile noise, *J. Acoust. Soc. Japan* 50, 227-252, 1994.
4. J. Y. Chung, Cross-spectral method of measuring acoustic intensity without error caused by instrument phase mismatch, *J.*

*Acoust. Soc. Am.* 64(6), Dec. 1978

5. N. Koike and T. Yanagisawa, Separation of sound intensity vector using variable directional microphone, *inter-noise 94*, 1761-1764, 1994.
6. T. Katsuta, Measuring method of noise of motor vehicle, *The Journal of the INCE of Japan*, 19(3), 4-7, 1995.



# バーチャルリアリティシステムのための耳栓駆動型イヤホンの開発

宮下雄一郎\*, 松山英司\*\*, 降旗建治\*, 柳沢武三郎\*

\*信州大学工学部, \*\*スター精密株式会社

第31回国際騒音制御工学会議 (inter-noise 2002)

2002年8月19日(月)~21日(水)

アメリカ合衆国ミシガン州ディアボーン

ハイアット・リージェンシー・ディアボーン

## 要旨

バーチャルリアリティシステムは、原音に近い再生音を得るために、周囲騒音から独立した環境が必要である。それを実現するために、我々は耳栓の遮音効果により高騒音下でも使用できる耳栓駆動型イヤホンを開発した。このイヤホンは、多目的な耳栓、伝達棒および電磁型サウンダから構成され、普通の耳栓同様に外耳道に装着可能であり、耳栓と鼓膜とで閉じられた小容積を直接駆動することができる。この耳栓駆動型イヤホンの音質改善を目的として、本論文では、そのメカニズムを明らかにするため低音域は集中定数による等価回路で検討し、および高音域は有限要素法 (FEM) を用いて解析を行なった。解析結果から、電磁型サウンダの枠は耳栓に固定し、さらに伝達棒はコルクを採用した新しいイヤホンを開発・製作した。このイヤホンの周波数特性は、低音域 20Hz から高音域 13kHz まで平坦特性を示している。これにより、新たに開発された耳栓駆動型イヤホンはバーチャルリアリティシステムに使用可能であることが示唆された。

## 1. はじめに

これまでに、我々は耳栓駆動型イヤホンを利用した騒音体験シミュレータを開発した [1][2][3]。耳栓駆動型イヤホンは、耳栓の遮音効果により、周囲騒音の影響を低減できるため、このシミュレータは、無響室や防音室のような特別な部屋を必要としない。したがって、インターネットを利用した、場所を選ばず騒音体験をすることができるシステムの構築が可能である。しかしながら、以前の耳栓駆動型イヤホンの周波数特性は音声通信に使用するためには十分であるが、音楽聴取および聴覚実験に使用するには十分な特性ではなかった。そこで、本論文では、耳栓駆動型イヤホンの音質を改善するためにイヤホンのメカニズム解析を行なう。さらに、解析に基づいて周波数特性が改善されたイヤホンの試作をする。最後に、実際に測定した周波数特性と解析結果とを比較することにより、解析の有効性について検討する。

## 2. 耳栓駆動型イヤホン

図1は、耳栓駆動型イヤホンの構成を示している。この耳栓駆動型イヤホンは電磁型サウンダ (STAR MICRONICS MMX-01C) の振動板に耳栓 (CABOT SAFETY CO.: E·A·R EXPRESS™ Pod Plug™) の

グリップを接着し耳栓を直接駆動する構造である。このイヤホンは、普通の耳栓同様に外耳道に挿入可能であり、耳栓と鼓膜とで閉じられた小容積を直接駆動することができる。

このイヤホンの特性は、実耳における装着状態を模擬するために、ある男性の耳介のレプリカを用いたシリコン製人工耳によって測定した。鼓膜位置には 1/4 インチコンデンサマイクロホン (RION UC-19) が取り付けられている。小容積内の音圧レベルは、イヤホンをこの人工耳に挿入、入力電力 1mW で駆動し、精密騒音計 (RION NA-54A) により測定した。さらに、周波数特性は、M 系列信号を用いた音響測定システム (CORETEX CTX1010) により測定した。

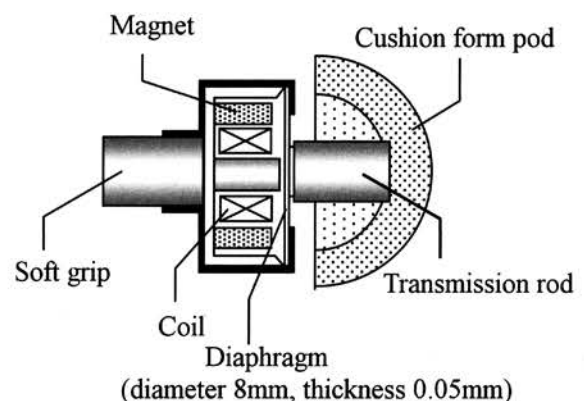


図1 耳栓駆動型イヤホンの構成

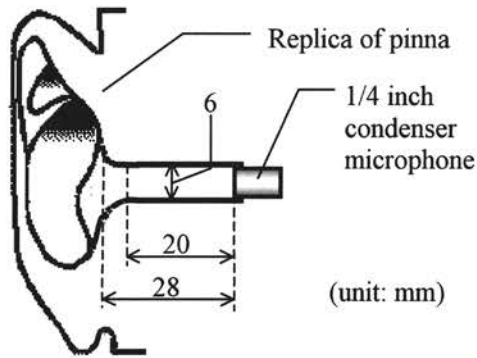


図2 人工耳の構造

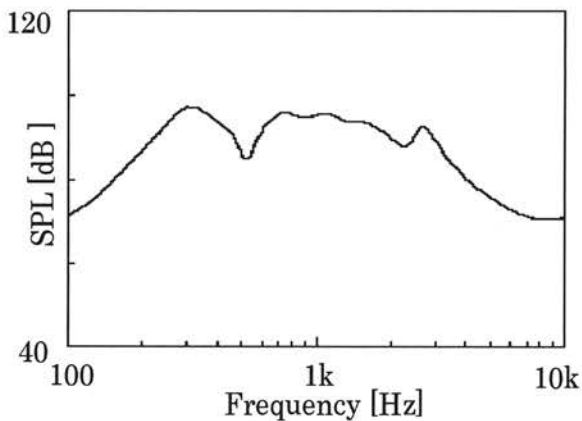


図3 耳栓駆動型イヤホンの周波数特性 (伝達棒：ねじ)

図3は、伝達棒をねじ (M2×5) とした耳栓駆動型イヤホンの周波数特性を示している。感度は、1mW 入力時 1kHz で 97dB である。さらに、このイヤホンの平坦周波数帯域は 300Hz から 3kHz までである。この平坦帯域は、市販されている他のイヤホンに比べて狭いため、改善が必要であるといえる。

### 3. 耳栓駆動型イヤホンのメカニズム解析

イヤホンのメカニズムは周波数特性に大きく影響を及ぼす。したがって、本章において、低音域は等価回路により、および高音域は有限要素法を用いて解析を行なう。

#### 3.1 耳栓駆動型イヤホンの機能分離

ここでは、耳栓駆動型イヤホンの周波数特性に影響を及ぼす要素を検討するために、イヤホンの機能分離を行なう。耳栓駆動型イヤホンは、図1に示したモデルから、その機能を大きく分けて次のように分離することができる。

(a) 駆動部：電気入力を機械振動に変換する (図1

では、電磁型サウンダが該当するが、その質量はグリップ部分を含めて考える)。

(b) 振動伝達部：駆動部で生じた機械振動を耳栓に伝搬する (図1では伝達棒)。

(c) 支持部：イヤホンを外耳道内において支持する (図1では耳栓の外側外耳道と接触する部分)。

(d) 音響放射部：機械振動を音響振動として、外耳道小容積内に放射する (図1では耳栓先端部分)。

#### 3.2 耳栓駆動型イヤホンの等価回路

ここでは、耳栓駆動型イヤホンの周波数特性において、低音域の感度が低くなる理由を等価回路により検討する。また、解析結果に基づいて低音域の感度を改善するイヤホンを試作する。

これまで検討してきた耳栓駆動型イヤホンは、図1に示すように駆動部が支持されていない。したがって、駆動部から振動伝達部、支持部、音響放射部へと作用する力と等しい力が、駆動部の質量に反作用力として加わると考えられる。

図4は、外耳道に装着した状態における耳栓駆動型イヤホンの等価回路を示す。ここで、 $m_0$  は振動板の等価質量、 $s_0$  は等価ステイフネス、 $m_1$  は駆動部の等価質量、 $m_2$  は耳栓の等価質量、 $s_2$  は等価ステイフネス、 $r_2$  は等価抵抗、および  $s_3$  は外耳道内小容積の等価ステイフネスである。したがって、振動板から

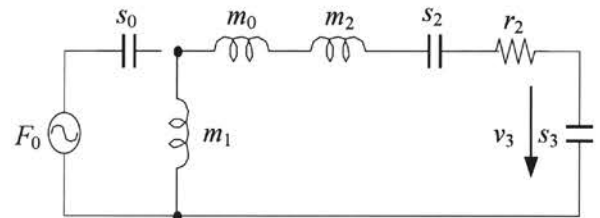


図4 耳栓駆動型イヤホンの等価回路

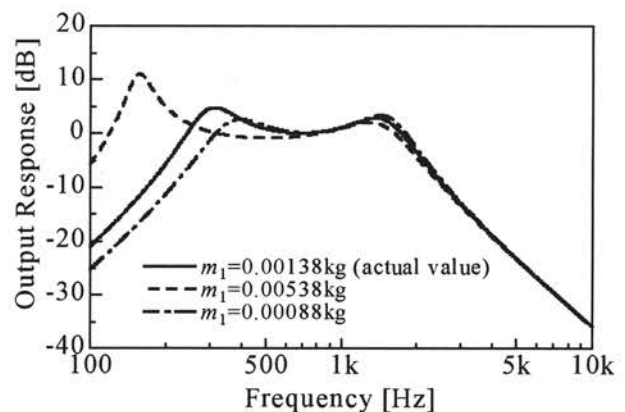


図5 等価回路による解析結果

外耳道側をみたときの各素子は同じ速度で振動し、振動板のステイフネス  $s_0$  の前後には等しい力が加わっている。外耳道内に生じる音圧は、図4において  $s_3$  の両端の電圧によって表されるので、一定入力に対する出力音圧周波数特性は、 $|s_3 v_3 / j\omega F_0|$  に比例する。

各素子の実測値は、 $m_0=3.59 \times 10^{-5} \text{kg}$ 、 $s_0=2.05 \times 10^4 \text{N/m}$ 、 $m_1=1.38 \times 10^{-3} \text{kg}$ 、および  $m_2=3.03 \times 10^{-4} \text{kg}$  である。また、耳栓の実効振動面積が人工耳の断面積に等しいと仮定した場合、 $s_3=187 \text{N/m}$  である。さらに、 $m_1$  に付加質量を与えた場合、共振周波数の変化の実測値から  $s_0/(s_2+s_3)=5210 \text{N/m}$  が得られる。従って、 $s_0$  の実測値および  $s_3$  の計算値から、 $s_2=6800 \text{N/m}$  であると考えられる。図5は、 $r_2=2 \Omega$  と仮定して、上記の各値を用いて計算した周波数特性を示す。同図において、 $m_1=1.38 \times 10^{-3} \text{kg}$  として計算した場合、 $300 \text{Hz}$  付近に共振が現れており、人工耳を用いて測定した周波数特性(図3)と概ね一致している。また、駆動部の等価質量  $m_1$  を増加した場合には、低音域の共振周波数が低くなり、 $m_1$  を減少させた場合には、共振周波数が高くなることわかる。従って、周波数特性の低音域を改善するためには、駆動部の質量を増加させれば良いといえる。理想的には、駆動部を質量無限大の剛体によって支持することができれば良い。しかしながら、これを実現することは不可能であり、駆動部の質量を増加させることも現実的ではない。

上記の考察に基づき、耳栓と駆動部を一体化することで、駆動部を外耳道内に支持することができるイヤホンを試作した。図6は、新たに試作したイヤホンを示している。耳栓と駆動部の一体化にはシリコンを用いた。図7は試作イヤホンの周波数特性を示している(1kHzにおいて感度91dB/1mW)。同図と図3との比較から、低音域の特性が改善されていることがわかる。

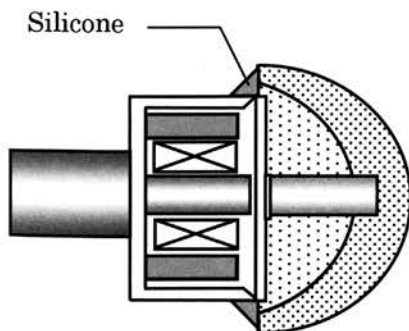


図6 駆動部を外耳道内で支持する耳栓駆動型イヤホン

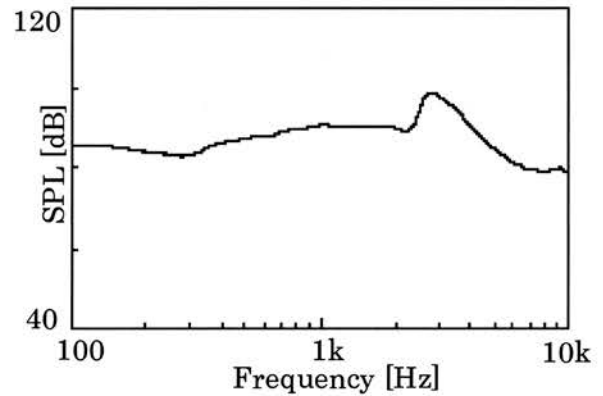


図7 駆動部を外耳道内で支持する耳栓駆動型イヤホンの周波数特性

### 3.3 有限要素法による解析

ここでは、耳栓駆動型イヤホンの周波数特性において高音域で感度が低くなる理由を、有限要素法を用いて検討する。また、解析結果から高音域の感度を改善するイヤホンの試作を行なう。さらに、試作したイヤホンの周波数特性の実測値と解析値を比較することにより、解析の有効性について検討する。

なお、有限要素解析は、数値音響解析プログラム SYSNOISE 5.3A (LMS International) を利用し、および有限要素モデル作成には Hyper Mesh 2.1 (Altair Engineering, Inc.) を用いた。

図8は、耳栓および伝達棒の有限要素モデルおよびその寸法を示している。表1は耳栓および伝達棒の各種条件を示している。また、他の境界条件として常温常圧時の空気中の音速は  $340 \text{ m/s}$  であり、および空気の密度は  $1.225 \text{ kg/m}^3$  である。さらに、伝達棒の先端に周波数に依存しない一定音圧を与え、耳栓先端部の特性を FEM 解析から求めた。

#### 3.3.1 伝達棒の材質および形状による特性の変化

伝達棒の材質および形状を変化させることによって耳栓駆動型イヤホンの周波数特性が変化することは実験的に確かめられている。ここでは、各条件を一つずつ変化させながら詳細に検討した。選択した条件は (a) 密度 ( $100 \text{ kg/m}^3$ ,  $1000 \text{ kg/m}^3$  および  $10000 \text{ kg/m}^3$ )、(b) 伝搬速度 ( $500 \text{ m/s}$ ,  $1000 \text{ m/s}$  および  $5000 \text{ m/s}$ )、(c) 直径 ( $3 \text{ mm}$ ,  $4 \text{ mm}$  および  $5 \text{ mm}$ )、および (d) 長さ ( $5 \text{ mm}$ ,  $6 \text{ mm}$  および  $7 \text{ mm}$ ) である。FEM 解析の結果から、以下のことがわかった。

(a) 密度：密度を小さくするほど共振周波数が高く

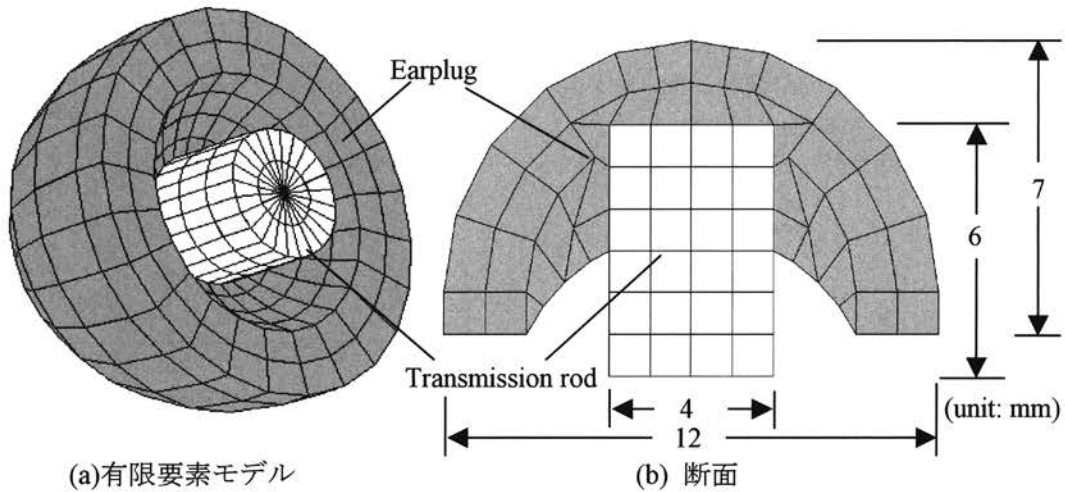


図8 耳栓および伝達棒の有限要素モデルとその断面図

表1 耳栓および伝達棒の材質

	Velocity $v$ [m/s]	Density $\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]	Porosity $Y$	Resistivity $R$ [Ns/m <sup>3</sup> ]
Earplug	400	333	0.68	31000
Transmission rod	500	250	—	—

表2 伝達棒の各材料の材質

Material	Velocity $v$ [m/s]	Density $\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]
Cork	500	250
Rubber	230	1250
Iron	5120	7860
Plastic	1650	1500

なる。

- (b) 伝搬速度：伝搬速度を変化させても、周波数特性にほとんど影響を与えない。
- (c) 直径：直径を大きくするほど共振周波数が高く

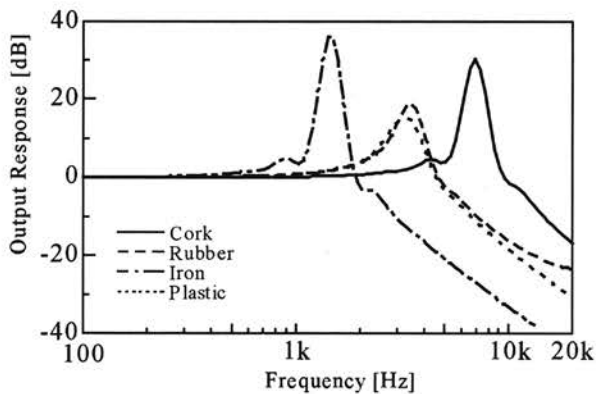


図9 伝達棒の材料による周波数特性の変化

なる。

- (d) 長さ：長さを短くするほど共振周波数が高くなる。

次に、伝達棒が比較的入手しやすく加工の容易な材料であるコルク、ゴム、鉄およびプラスチックの場合において解析を行なった。表2は各材料の伝搬速度および密度を示している。図9は、伝達棒の材料による周波数特性の変化を示している。同図から、伝達棒がコルクとした場合の共振周波数が最も高くなるのに対して、鉄とした場合は最も低くなるのがわかる。

### 3.3.2 耳栓の材質および形状による特性の変化

ここでは、耳栓の(a) 密度 (100 kg/m<sup>3</sup>, 250 kg/m<sup>3</sup> および 1000 kg/m<sup>3</sup>), (b) 伝搬速度 (100 m/s, 250



m/s および 500m/s), (c) 形状の影響について検討する。形状は以下の3モデルについて検討した。(c-1) 一般モデル (図1に示した形状), (c-2) 円柱状モデル, および(c-3) 伝達棒と耳栓との接触面積を大きくしたモデル。ただし, 耳栓の体積は, 形状に関わらずほぼ等しいものとした。FEM 解析の結果から, 次のことがわかった。

- (a) 密度: 密度を大きくするほど共振周波数が高くなる。
- (b) 伝搬速度: 伝搬速度を大きくするほど共振周波数が高くなる。
- (c) 直径: 耳栓を円柱状にしても特性はほとんど変化しないが, 耳栓と伝達棒との接触面積を大きくしたモデルでは共振周波数が高くなる。

しかしながら, 耳栓部は外耳道に挿入されるため, 一般に軽く柔らかい材質が望まれており, 上記改善条件とは相反する。そのため, 特性改善条件, 装着快適条件双方を適度に満たす耳栓を選択する必要がある。このことが, 耳栓の材質決定を難しくしている。この観点から, 現在使用している耳栓は両条件を適度に満足しているといえる。

### 3.3.3 改良された耳栓駆動型イヤホンの周波数特性

解析結果に基づき, 構造は図6と同じであり伝達棒をコルクとした耳栓駆動型イヤホンを試作した。伝達棒は直径4mm, 長さ5mmの円柱形とした。図10(a)は, このイヤホンの周波数特性を示している。同図(a)から, 感度は1kHzにおいて83dB/mWであり, 低音域から高音域13kHzまでほぼ平坦な特性を示していることがわかる。したがって, 以前のイヤホンに比べ, 高音域の特性が改善されたといえる。

しかし, この周波数特性は図9に示したような解析結果に, 外耳道内に発生する定在波の影響が加味されていないため異なっている。そこで, 鼓膜上での周波数特性をイヤホンが外耳道に挿入された有限要素モデルにより解析を行なった。外耳道は直径5mm, 長さ23mmの一方が閉じられた滑らかな円筒形とし, 閉端には鼓膜のインピーダンス  $Z_D = 5.5 \times 10^7 - j[(3.54 \times 10^{10} / f)]$  を付加した<sup>[4]</sup>。図10(b)はシミュレーション結果を示している。同図(b)から, 定在波と伝達棒の共振作用によって3.6kHzおよび11kHzにピークが存在することがわかる。また, 同図(a)と(b)の比較から, 両者はほぼ等しい特性を示していることがわかる。

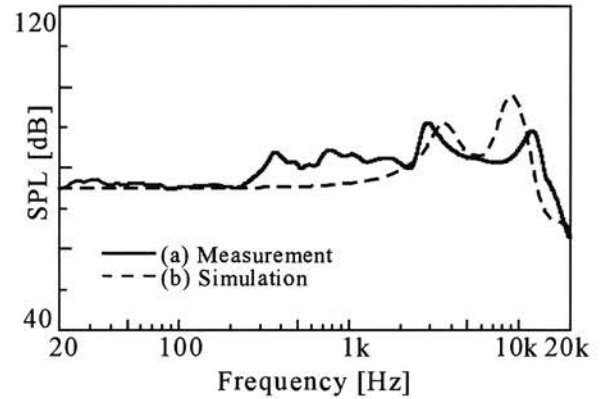


図10 改良された耳栓駆動型イヤホンの周波数特性: (a) 測定値, (b) FEMによる解析により求められた鼓膜上での特性

## 4. まとめ

本論文では, 我々が提案した耳栓駆動型イヤホンの周波数特性を平坦特性とするために, そのメカニズムの解析を行なった。解析は低音域では等価回路, および高音域では有限要素法を用いた。解析結果に基づいて, 伝達棒をコルクとし電磁型サウンダの枠と耳栓をシリコンによって接着した耳栓駆動型イヤホンを試作した。このイヤホンの周波数特性は低音域から高音域13kHzまでほぼ平坦な特性を示した。また, このイヤホンの周波数特性の実測値と解析値がほぼ一致したことから, これらの解析が耳栓駆動型イヤホンの特性改善に有効であることがわかった。さらに, 新たに試作された耳栓駆動型イヤホンがバーチャルリアリティシステムに使用可能であることが示唆された。

## 謝辞

本研究は, 財団法人信州大学工学部若里会から多大なるご支援を頂き, 米国ミシガン州ディアボーンのハイアット・リージェンシー・ディアボーンホテルで開催された第31回国際騒音制御工学会議(inter-noise 2002)で発表することができました。ここに感謝の意を表します。

## 参考文献

1. S. Matsubara, K. Furihata and T. Yanagisawa, Electroacoustic Transducers of Earplug Type for Active Noise Control in External Auditory Canal, *Active99*, 1257-1266, 1999.
2. E. Matsuyama, K. Furihata and T. Yanagisawa, Application of New Bone Conduction Pickups and Earphones of

Earplug Type for Speech Communication under High Ambient Noise, *inter-noise 2000*, 1655-1658, 2000.

3. T. Nagano, K. Furihata and T. Yanagisawa, Psychological evaluation by vehicle noise simulator using new earphone of earplug type for virtual reality, *inter-noise2000*, 3494-3497, 2000.
4. J. H. Siegel, Ear-canal standing waves and high-frequency sound calibration using otoacoustic emission probes, *J. Acoust. Soc. Am.*, 95, 2589-2597, 1994.

# 有孔板の引張り座屈に関するパラメータ解析

## A PARAMETRIC STUDY ON TENSION BUCKLING OF PLATES HAVING A HOLE

氏名：清水 茂

所属：社会開発工学科 助教授

発表会議名：第7回シェル構造物の理論と応用に関する国際会議

開催年月日：平成14年10月9日より10月11日まで

開催場所：ポーランド共和国ユラタ ホテルネプチューン

主催：グダンスク工科大学およびポーランド科学アカデミー

### 概要

座屈は、材料降伏と並び、柱あるいは板のような構造物の破壊の、重要な要因の一つである。

通常、引張応力のもとでは、座屈は起こり得ない。しかし、板が孔を有する場合、引張荷重のもとにおいても、孔の周囲には局部的に圧縮応力が発生し、この局部的な圧縮応力が板の局部座屈を引き起こす場合がある。本論文では、この現象を扱っている。鋼橋をはじめとする薄肉鋼板からなる構造物では、引張のもとでは座屈は生じないという前提で、マンホール等の開口部は引張応力を受ける部分に配置する場合が多い。しかし、現実には、上述のように、板に開口部がある場合には、引張応力のもとでも座屈が起こり得るため、設計に当たっては十分な検討が必要である。

本論文は、これまでの研究に引き続き、引張座屈の座屈強度を支配するパラメータについて調べたものである。座屈強度を支配するパラメータは多いが、本研究では、実際の薄肉鋼構造物の製作で不可避の、板の面外初期たわみに注目し、初期たわみをパラメータとして数値解析を行った。その結果、初期たわみが小さい範囲では、座屈強度が初期たわみの大きさに対して急激に変化すること、また、初期たわみがある程度大きくなると、座屈強度は、あまり変化しなくなることなどがわかった。

### 1. 序論

板は引張り応力のもとでは決して座屈しないとされている。一般に、このことは当然の真実であるが、板が、図-1のように開口部すなわち孔を有する場合には、引張り荷重のもとにおいても孔の周囲の、

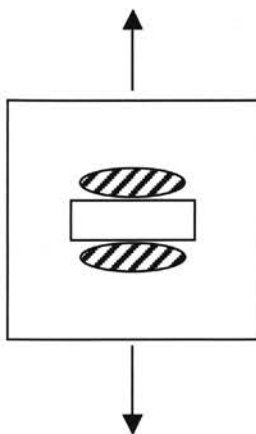


Fig.1 引張り座屈

図中のハッチング部分に局部的に圧縮応力が発生し、この圧縮応力が座屈を引き起こす可能性があることが、Bamberger らによって指摘されている (Bamberger et al. [1])。本研究では、この現象を、「引張り座屈」と呼ぶことにする。

上述のように、引張り荷重のもとでは座屈は発生しないとされているため、通常、引張りを受ける板部材は、座屈に対する対策は全くとられていない。しかし、有孔板においては、Bamberger らの指摘のように、現に座屈が発生する可能性がある以上、引張り荷重のもとにおいても、座屈に対する安全性、及び座屈が発生する場合の板の補強方法について検討しておく必要がある。

この引張り座屈については、これまで、著者の1人がいくつかの研究を実施してきている。(Shimizu et al. [2][5])。これらの論文のうち、[2]は引張り座屈の基本的な性質を、分岐問題(固有値問題)として扱ったもの、[3][4]は引張り座屈を弾塑性大変形問題として解析したものであり、[5]は、板が、引張りとともに、面内曲げなど他の荷重を受ける場合を扱

っている。これらの研究により、引張り座屈の基本的な挙動はある程度明らかになってきた。

本論文では、上記の[2]-[5]の研究に引き続き、引張り座屈の座屈強度に影響を与える要因について、特に初期たわみの大きさに注目し、その影響の程度を有限要素法による数値解析により調べている。

## 2. 解析モデル、パラメーター及び解析方法

解析は、前記図-1に示すような、中央部に 200×400 mmの長方形の孔を有する 800×800 mmの正方形板を対象とした。板の厚さは主として3 mmとしたが、一部、板厚6 mmの板も解析している。

この正方形板は、正弦半波からなる面外初期たわみを持っているものとする。鋼橋を例にとると、鋼鈹の面外初期たわみの大きさは、その板の部位によって、板幅の 1/150 あるいは 1/250 以内とすることが定められている。実際には、鋼橋の発注者は、これよりもさらにきびしい初期たわみの制限値を要求することも少なくない。しかしながら、実際には、鋼鈹が、ある程度大きな初期たわみを有していても、その強度にはほとんど影響がないとの指摘もされている。このことを考慮し、本研究では、初期たわみの大きさは、0.08 mmから 32 mm(板幅の 1/10,000 から 1/25, 板厚の 1/375 からおよそ 10 倍)の範囲で変化させ、その影響を調べることとする。

解析に用いた要素は三角形及び四角形の平面シェル要素で、材料降伏は、Von Mises の降伏条件に従うものとした。この解析に用いた材料は、SM500材を想定している。すなわち、この板の降伏応力は、 $\sigma_y=245$  MPa である。また、ヤング係数  $E$ ・ポアソン比  $\nu$  はそれぞれ  $E=200$  GPa,  $\nu=0.3$  とした。実際には、これらの材料特性を、実鋼材の特性に近似させるため、材料の応力-ひずみとして、図-2に太い実線で示すような、tri-linea 型の応力-ひずみ関係を用いている。

解析は、一部の予備的な解析を弾性領域で行っているが、主として、弾塑性大変形解析によった。大変形・弾塑性領域で、最大荷重後の挙動も追うため、増分の手法としては弧長増分法を採用している。解析には、プログラムパッケージ LUSAS を用いた。なお、解析では、板の対称性を考慮し、板の上半分のみを対象とした。図-3に、解析モデルを示す。この図は、有限要素法の離散化も示している。図中の●印は、後で説明する荷重変形曲線で、変形をとった点である。

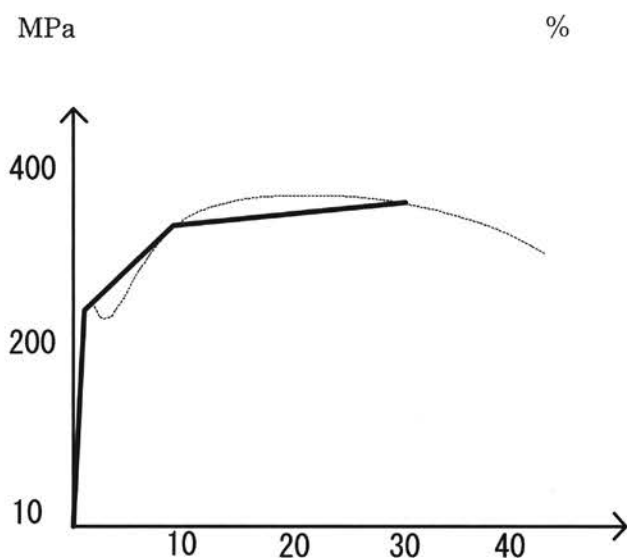


Fig.2 材料の応力-ひずみ関係

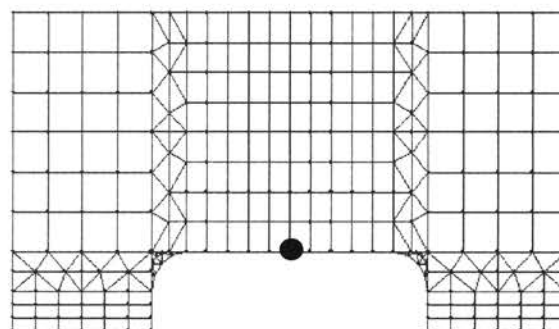


Fig.3 解析モデル

## 3. 数値解析結果

### 3-1 板厚 3 mm の場合

図-4は、解析によって得られた、引張り座屈の変形モードである。この図には、対称性から、直接

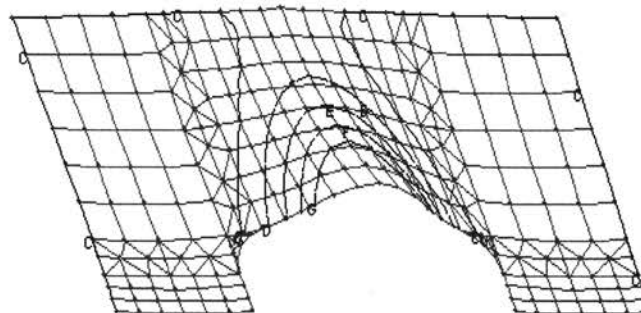
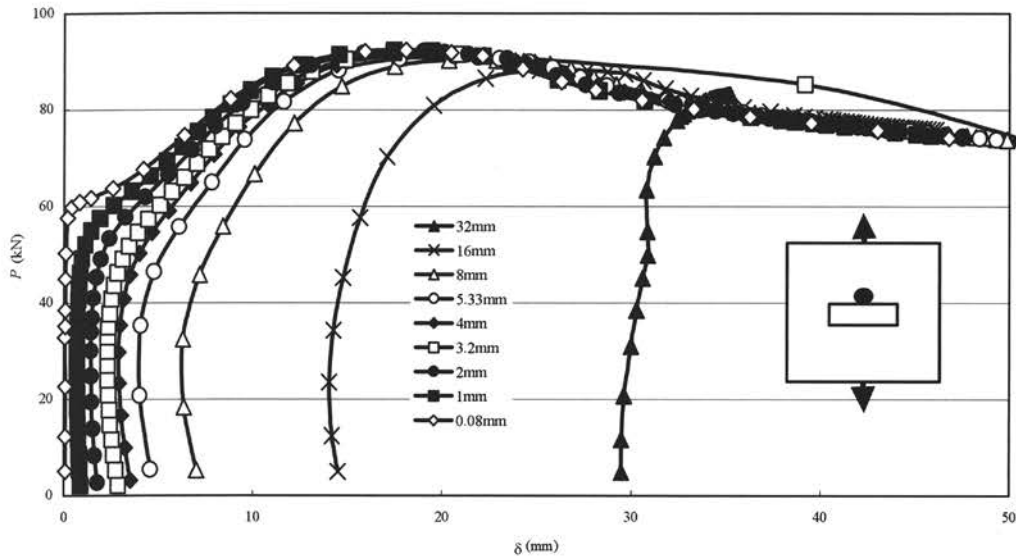


Fig.4 変形パターン例





解析の対象とした、板の上半分の変形のみを示している。この図のモデルは、初期たわみが4mm場合である。図のように、この板は、孔の上部で、面外に、孔のすぐ上で半波を有する変形モードを示している。このたわみ波形の形状は、著者らが以前に行った引張り座屈に関する解析結果と同じものである。

誌面の都合上、この概要中には示していないが、他のモデルについても、ほぼ同様の変形モードが得られている。

図-5に、初期たわみが0.08mmから32mm（板幅の1/10000、から1/25）の荷重-変形曲線を示す。図の縦軸は、板に作用している荷重の値である。また横軸は、図-3中に●で示した点のたわみである。

図を見ると、初期たわみが3.2mmよりも大きなモデルの場合、当初は、板の変形が減少していることがわかる。これは、通常の座屈現象とは異なる、引張り座屈の大きな特徴の一つである。これは、引張り荷重により、板の面外初期たわみが消滅する方向に変形しているためである。図ではわかりにくいですが、初期たわみがこれよりも小さなモデルについても、同様の現象が見られている。一方、これらの荷重-変形曲線の形状に注目すると、初期たわみの大きさが0.08mmのモデルでは、荷重が60kNに達した付近で曲線が高原状になっており、典型的な座屈に伴う荷重-変形曲線となっている。

なお、この図-5は、弾塑性解析によるものであるが、弾性範囲内のみで解析した場合についても、荷重が80kN程度に達するまでは、この図とほぼ同様の結果が得られている。

図から、初期たわみが0.08mmのモデルでは、座屈

応力は、ほぼ61MPaである。初期たわみが1mmのモデルでは、0.08mmのモデルほど明瞭ではないが、座屈応力はおおよそ50MPaであることがわかる。他のモデルでは座屈応力はそれほど明確ではないが、 $P\delta^2$  曲線を用いることにより、おおよその座屈応力を推定することができる。このようにして求めた座屈応力を、初期たわみに対してプロットしたものが、図-6である。この図によると、初期たわみがおおよそ6mm程度以下の領域では、座屈応力は、初期たわみの増加に応じて急激に減少しており、初期たわみが10mmよりも大きな領域では、座屈応力は初期たわみの増加に対して、それほど大きくは減少していない。すなわち、有孔板の座屈強度は、手記たわみの小さな領域では、その初期たわみに対してかなり敏感であるが、初期たわみが大きい場合はあまり敏感ではないと言える。

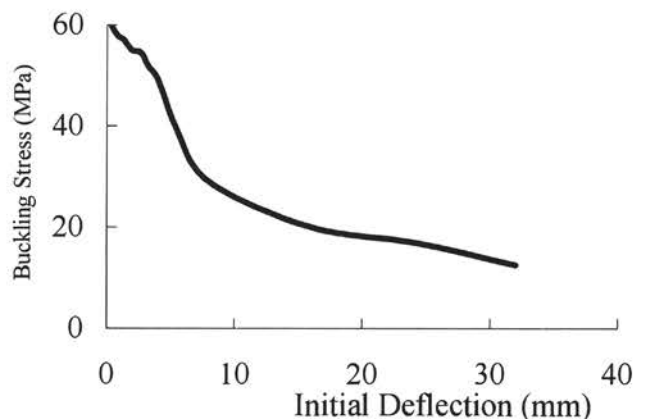
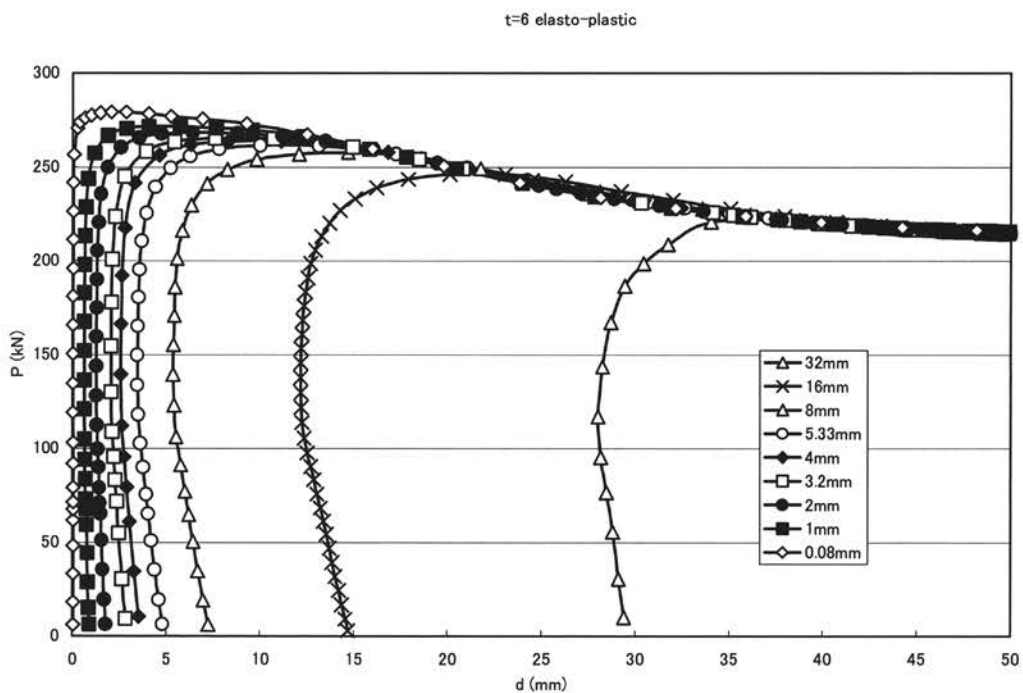
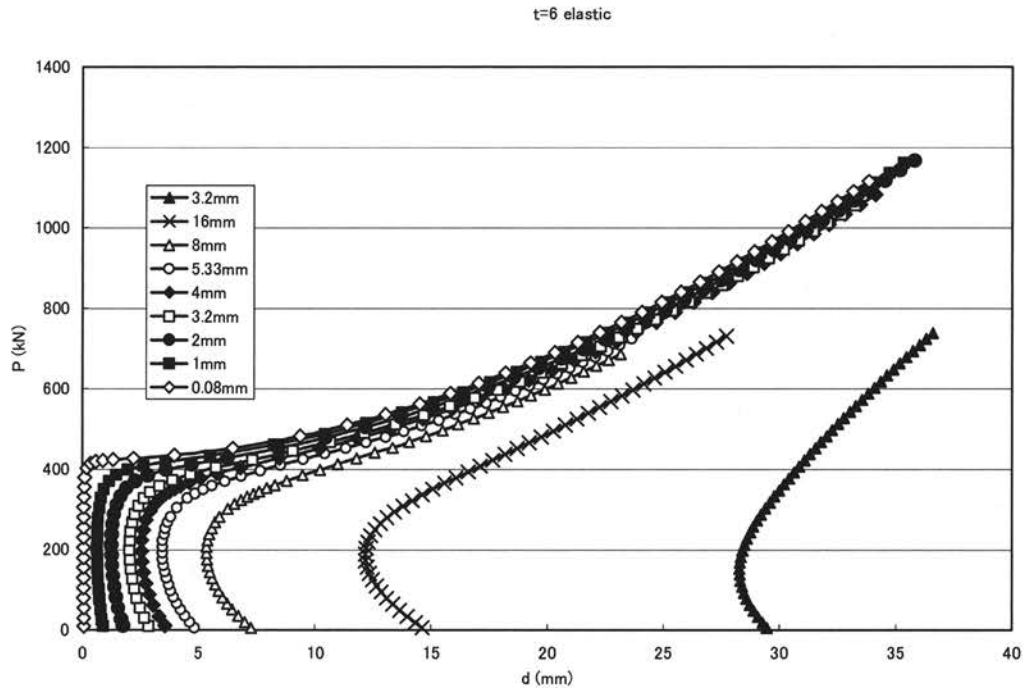


Fig.6 初期たわみに対する座屈敏感性

鋼板を鋼桁の部材として用いる場合、前述のように、初期たわみは板幅の  $1/150$  あるいは  $1/250$  以内とすることが定められている。この制限値を本研究で用いた  $800\text{ mm}$  の板幅に適用すると、初期たわみの制限値は  $5.3\text{ mm}$  あるいは  $3.2\text{ mm}$  となる。すなわち、現行の設計法に基づいた初期たわみを有する板では、初期たわみの大きさは、それが座屈強度に最も影響を与える領域にあることになる。

誌面の都合上、図には示していないが、孔の位置

を板中央部ではなく左右にずらし、左右非対称とした場合の座屈解析も実施した。その場合においても、座屈強度は、初期たわみの大きさによる相違が見られたが、同じ初期たわみを持つ板どうしの比較では、孔の位置による相違は小さいものであった。従って、引張り座屈の座屈強度に対しては、孔の位置よりも初期たわみの方が大きな影響を与えていることがわかった。



### 3-2 板厚 6mm の場合

図-7 および図-8 は、板厚 6mm の場合の荷重-変形曲線である。うち、図-7 は弾性範囲のみで解析を行った場合の結果、図-8 は弾塑性解析の結果である。

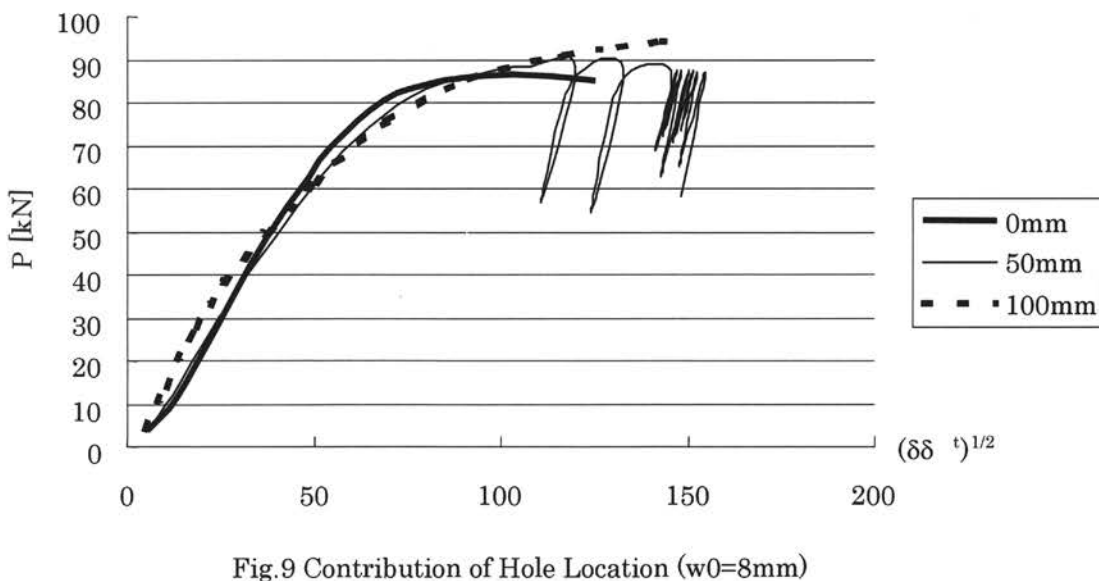
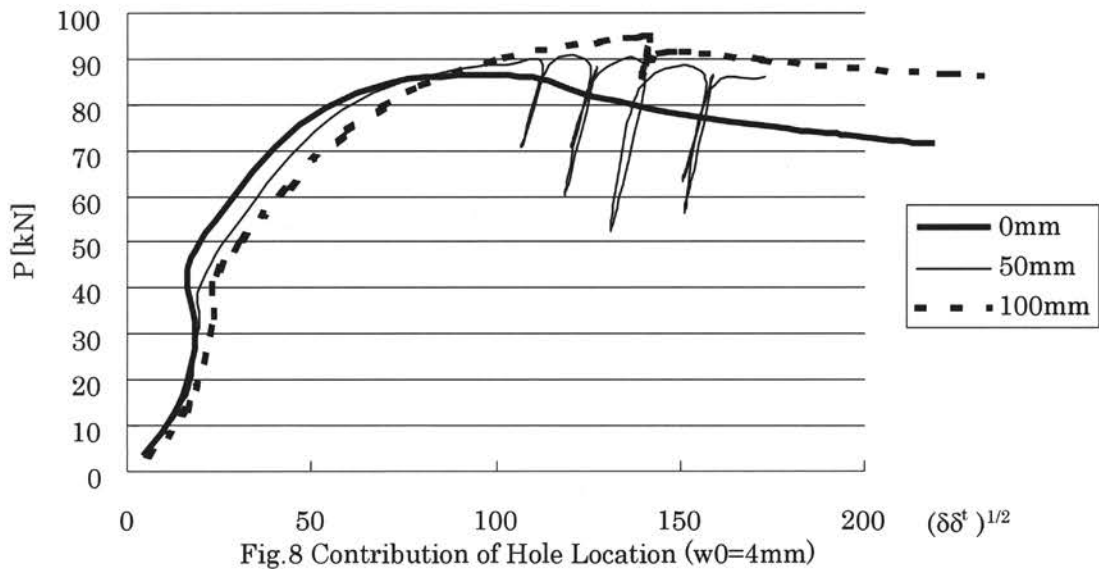
弾性解析の結果である図-7 を見ると、特に初期たわみが小さなモデルでは、荷重が 400kN に達した付近で曲線に高原状の部分が見られ、板厚 3mm の場合と同じく、典型的な板の座屈の場合の荷重-変形曲線を呈している。荷重がまだ小さな段階で、面外変形が一旦減少する、引張り座屈特有の現象も、この図に現れている。

一方、図-8 では、すべての荷重変形曲線には高原状の部分は見られず、どの初期たわみの場合につ

いても、荷重は、変形の増加に伴いその増加の程度が小さくなり、次第に除荷に向かっている。図-8 の場合、板厚が 6mm と厚いため、板は、現実には座屈する以前に材料の降伏により最大荷重に達するためであると思われる。最大荷重は、初期たわみが最も小さい 0.08 ミリの場合で 279 kN であり、初期たわみが大きくなるにつれ、次第に減少している。図-8 を見ると、除荷の段階では、いずれのモデルの曲線もほぼ同一の経路をたどっており、塑性除荷曲線が明瞭にみてとれる。

### 3-3 孔の位置の影響

図-9 および図-10 は、板厚が 3mm で初期たわみの大きさが 4mm 及び 8mm それぞれの場合について、



孔の位置を、板の中心から 50 mm及び 100 mm左方向にずらし、左右非対称とした場合の荷重変形曲線である。荷重の載荷位置は、これまでと同じく板の中心線上である。

これらの図の横軸は、有限要素法で得られた変位ベクトル $\{\delta\}$ のユークリッドノルム $\{\delta\}^2\}^{1/2}$ である。この変位のユークリッドノルムは、有限要素法にの増分過程における弧長の制御にも用いられており、これらの図の横軸は、板の全体的な変形挙動を表していると考えられる。ただし、特定の点の物理的な変形を表すものではない。

孔の位置を 50 mmずらした場合は、初期たわみが 4 mm, 8 mmいずれの場合も、最大荷重付近で収束性が極めて悪くなり、曲線が乱れている。しかし、それを除くと、いずれのモデルの荷重変形曲線も、孔の位置にかかわらず、よく似た経路を示している。すなわち、初期たわみが 4 mmの場合には、3本の曲線いずれも、荷重が 40kNに達する付近で変形の増加が一旦停止、あるいは減少している。その後は、荷重の増加につれ、変形が再び増加し、次第に採光荷重に達している。一方、初期たわみ 8 mmのモデルでは、いずれも、当初は変形は荷重に線形に増加し、次第に最大荷重に達している。

これら二つの図から、孔の位置は、有孔板の引張り座屈挙動には大きな影響は与えないことが推測できる。

#### 4. まとめ

本研究は、著者らが以前に実施した有孔板の引張り座屈に関する研究に引き続き、特に初期たわみの大きさに注目して、引張り座屈強度のパラメーターに関する敏感性を調べた。その結果、引張り座屈強度は初期たわみの大きさに大きく影響されていること、それは、鋼橋の実務でしばしば現れる、初期たわみの小さな領域で、特に顕著であること、また、孔の位置は引張り座屈強度にはそれほど大きな影響を与えないことがわかった。また、孔の位置は、座屈挙動には大きな影響を与えないこともあきらかになった。

これまで、引張り座屈は鋼構造物の設計ではほとんど考慮されていなかったが、今後、開口部を有する部材を用いる場合には、座屈が生じる可能性があること、及びその座屈強度は初期たわみによって大きく影響されることに対して注意が必要である。

#### 5. 参考文献

- [1] Bamberger, Y and Voldoire, F., Stabilité en Traction D'une Plaque Trouée, *Proc. of ECCS Colloquium on Stability of Plate and Shell Structures*, Ghent, Belgium, pp.241-246, 1987
- [2] Shimizu, S., Yoshida, S. and Enomoto, N., Buckling of Plates with a Hole under Tension, *Thin-Walled Structures*, Vol.12, pp.35-49, 1991
- [3] Shimizu, S. and Yoshida, S., Strength of Plates with a Hole under the Tensile Loading, *Proc. of Intl. Conf. of Steel and Aluminium Structures*, Singapore, pp.501-510, 1991
- [4] Shimizu, S. and Yoshida, S., A Large Deflection Analysis of Plates with a Hole having Initial Out-of-plane Deflection, *Journal of Structural Engineering*, JSCE, Vol.38A, pp.203-212, 1992 (in Japanese)
- [5] Shimizu, S. and Nishimura, H., Tension Buckling of Plates Having a Hole under Combined Loading, *2nd International Conference on Thin-Walled Structures*, Singapore, pp.579-586, 1998

#### 6. 謝辞

この論文を、本「第7回シェル構造物の理論と応用に関する国際会議」で発表するに当たり、財団法人信州大学工学部若里会より、若手教官に対する研究助成制度による助成金を頂いた。この発表のための渡航費用の一部は同補助金によるものである。著者は、ここに、財団法人信州大学工学部若里会に深く感謝する次第である。



# A Study on Open-Loop Precise Positioning of Piezoelectric Actuator

## (圧電アクチュエータのオープンループ精密位置決めに関する研究)

辺見 信彦

信州大学 工学部 機械システム工学科

The 1st Korea-Japan Conference on Positioning Technology

(第1回韓日位置決め技術シンポジウム)

平成14年10月14日—平成14年10月17日

大韓民国 大田市 韓国機械研究院

発表した研究内容は以下の通りである。

### 1. はじめに

積層型圧電アクチュエータは発生力が大きく、簡単に精密な動作を発生できるため、精密位置決めに多用されている。圧電アクチュエータには、入力電圧と変位間にヒステリシスやクリープといった非線形特性があるため、位置決めに用いる際にはフルクローズドループ制御系を構成するのが通常である。しかしながら全てのアプリケーションにおいて対象物の位置を直接計測できるとは限らない、またフィードバック用センサの利用により装置全体の小型化が困難になるといった問題もある。そのため本研究では、オープンループ制御により高精度な位置決めを実現することを目的とする。

これまでに、ヒステリシスとクリープを低減させて駆動する圧電アクチュエータのオープンループ制御法について検討してきており、 $30\mu\text{m}$ 程度の可動範囲では約 $0.2\mu\text{m}$ の位置決め精度を得ていた。本報では、可動範囲を限定し、まずは数十ナノメートルオーダの精度を得ることを目指し、最終的にはナノメートルオーダの位置決め精度を目指す。これまでのオープンループ駆動法と同様の方法がどこまで適用できるかについて、また、ステップ高さを微小にすることで生じる問題点について検討する。

### 2. 入力波形の概要

本研究ではアクチュエータを駆動する入力電圧を特殊な波形にすることにより、オープンループで

Point-to-point (PTP) 位置決めをしている。ここで入力波形について説明する。図1はアクチュエータで対象物を変位させる時の様子と、その時の入力電圧波形の時間変化の様子を示している。図のように、位置 $x_1$ から次の目標位置 $x_2$ まで対象を変位させる場合(状態[1]→[2])に対しては、入力電圧を $x_1$ に対応した値 $v_1$ から、圧電アクチュエータの状態を揃えるための初期化電圧(①) $v_{ini}$ まで上昇させ、さらに $0\text{V}$ まで降下させた後、初期基準電圧(②) $v_0$ までまず変化させる。その後変位 $x_2$ に対応した電圧値(③) $v_2$ に電圧を上昇させるが、その際オーバーシュート(④)させてから $v_2$ に保持する。さらに状態[2]から[3]に変化させる場合は同様に入力電圧を変化させる。また、本研究では駆動電圧は $10\text{Hz}$ の正弦波形により上昇降下させている。

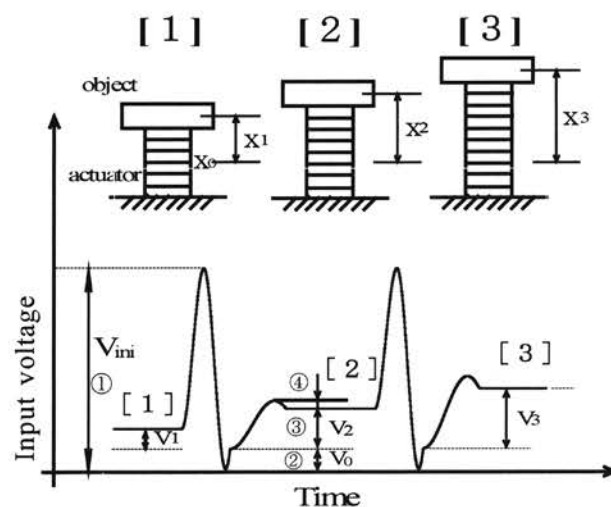


図1 階段状位置決め駆動のための入力電圧波形の概略

図2は一定階段状に入力変位を変化させた場合の変位挙動であり、図3は本研究で提案する方法で駆動した場合の位置決め結果で、ステップ高さが比較的大きい場合 ( $5\mu\text{m}$ ) の挙動である。図2ではヒステリシスの影響から、上昇側と下降側ではステップ高さの変化が異なり、またクリープの影響により、各ステップの立ち上がり(立ち下がり)部分が鈍っている。図3に示されるように、本駆動方法による挙動では一定ステップで、かつクリープの影響もなく階段状に変化していることがわかる。ただし、位置決め精度は  $0.2\mu$  程度であり、ステップ高さが  $50\text{nm}$  というようなオーダーになると、これまでと同様の駆動パラメータの値では、一定のステップ高さを維持できない。

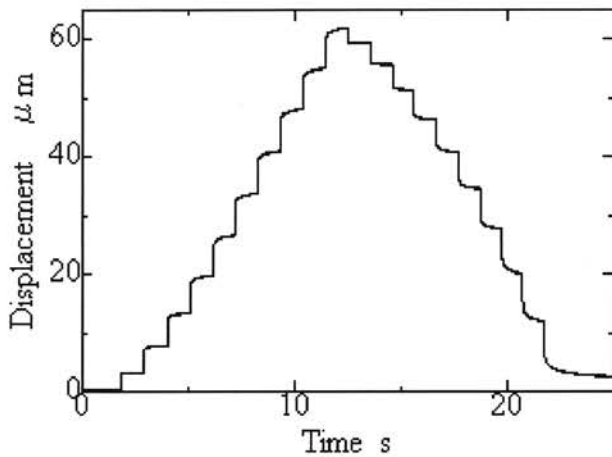


図2 一定階段状に駆動した場合の変位挙動

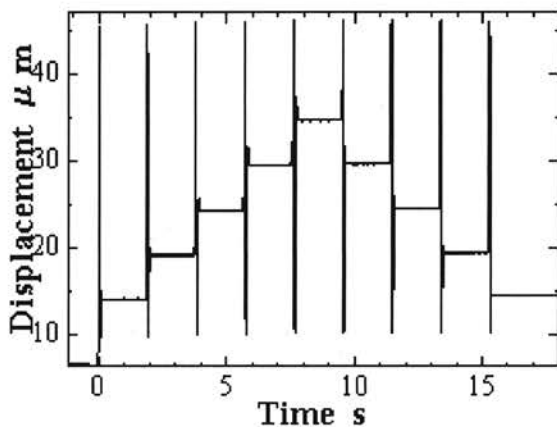


図3 提案した駆動法による階段状位置決め結果 ( $5\mu\text{m}$ ステップ)

### 3. 実験結果

#### 3.1 初期化電圧の影響

これまでの研究によって、位置決めの直前に印加する初期化電圧の大きさが位置決めの繰り返し性に深く影響することがわかっている。図4は初期化電圧と位置決めの繰り返し性の関係を表している。 $50\text{nm}$  のステップ高さに複数回位置決めする際に、最初のステップと24回目のステップとの位置の相対的な変位差を、初期化電圧の値に対してどのように変化するかを示している。変位が増加する場合を正として表している。この結果により、初期化電圧が  $450\text{V}\sim 460\text{V}$  の間ときに変位差が0になり適切な値となることがわかる。また、この初期化電圧の適切な値はステップ高さにより異なることも、実験によりわかっている。

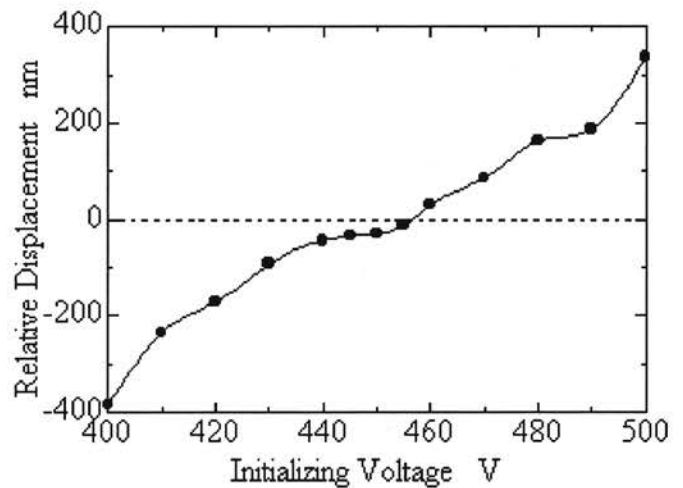


図4 初期化電圧とクリープによる変化量

#### 3.2 第一初期化電圧の影響

図4で示した結果を基に全ての初期化電圧を  $455\text{V}$  として階段状の位置決めを実行すると図5のようになる。図5を見ると、最初のステップ位置が著しく高い位置にあることがわかる。図の駆動では4ステップ上がって4ステップ下げているので、本来最初と最後のステップ高さは一致せねばならない。そこで一番始めに加える初期化電圧(第一初期化電圧)の大きさが最初のステップ高さに影響するが、最初と最後のステップ高さとも一致するように大きさを調整することとした。

階段状に位置決めしていった際に、第一初期化電

庄の大きさと最初と最後のステップ高さの差との関係を実験的に調査した結果を図6に示す。本図により、第一初期化電圧は約496Vのときに適正であることがわかる。

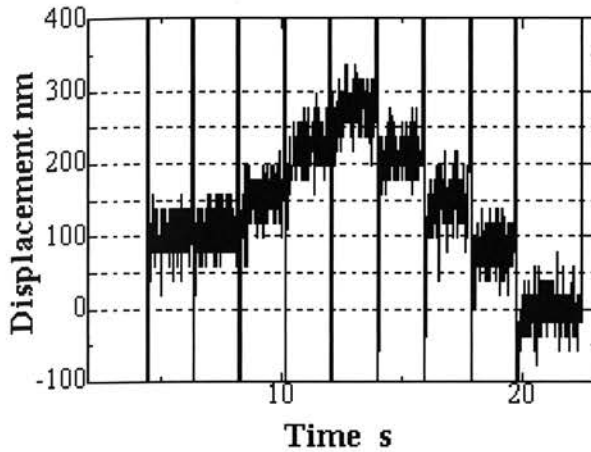


図5 全初期化電圧を455Vとして50nmステップ駆動した際の挙動

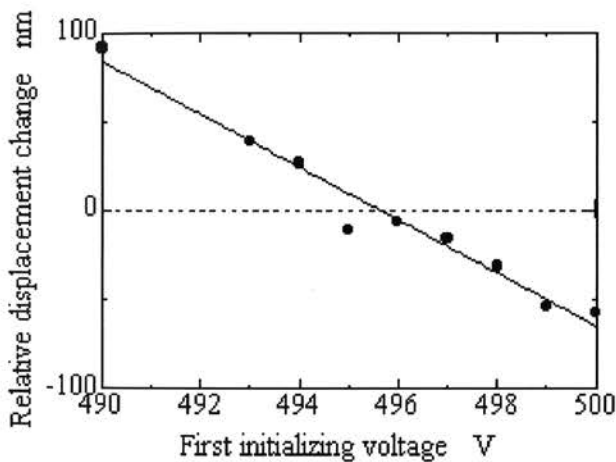


図6 第一初期化電圧の影響

### 3.3 オーバシュート量の影響

ステップ駆動する際に適切な量だけオーバシュートさせると、立ち上がり後のクリープ変位が除去される。ステップ高さが大きい値の場合には、入力ステップ電圧値の約30%のオーバシュート量が適切であった。しかしながら、ステップ高さが50nmというオーダーになると、クリープを除去するためには30%では十分ではない。オーバシュート量とクリープ変位との関係を実験的に調査した結果を図7に示す。図では、50nmステップで階段状に駆動した際の、各ステップでの約2秒間におけるクリープによる変位増加量を示している。この結果により、50nm

ステップでは約200%が適切であることがわかる。

### 3.4 微小ステップ位置決め

図8は50nmのステップで階段状にオープンループ駆動したときの最終的な結果である。図4、図6および図7の結果に基づき、通常の初期化電圧を455V、第一初期化電圧を496V、オーバシュート量200%とした。変位センサには静電容量型の非接触変位計を用いているが、本実験ではノイズカット用にカットオフ2kHzのローパスフィルタを用いている。この結果により、ヒステリシスとクリープの影響が除去されて一定ステップで位置決めが達成されていることがわかる。ただし、各ステップの高さを見ると、目標値50nmに対して、実際には約65nmのステップ高さで位置決めされている。今後は位置決め of 正確さについて検討せねばならない。

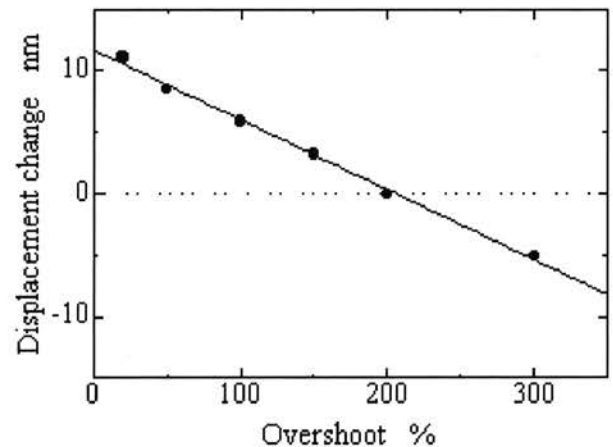


図7 オーバシュート量の影響

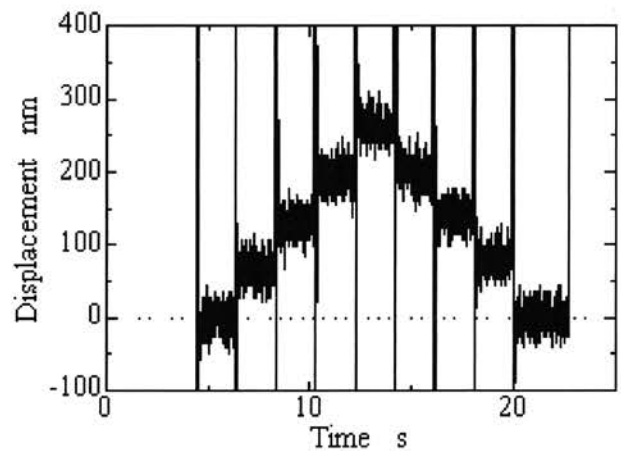


図8 階段状位置決め結果

#### 4. おわりに

本研究で提案するオープンループ駆動法において、初期化電圧が位置決めに及ぼす影響について検討し、適切な初期化電圧値により 50nm で階段状に駆動した結果を示した。位置決め精度を向上させるためには、微小位置決めにおける目標変位と入力電圧の再調査やセンサ信号のノイズ処理などの検討が必要である。

#### 謝 辞

本研究を発表するにあたり、渡航費を（財）信州大学工学部若里会より助成いただいた。記して謝意を表す。



# インドネシアにおける居住空間の歴史的変遷を対象とした室内熱環境の実測調査による建築技術の再評価に関する研究

## Evaluation of Indonesian historical houses from the viewpoint of architectural history and building environmental engineering

著者（和文）；西山マルセーロ，長谷川兼一，パウラス・マリア・タタン

著者（英文）；Marcelo Nishiyama, Kenichi Hasegawa and Paurus Maria Tatang

所属；信州大学工学部，秋田県立大学システム科学技術学部，パラヒャンガン・カトリック大学

発表学会；First International Congress on Construction History

年月日；2003年1月20日～24日

場所；マドリード（スペイン）

### 1. 研究の背景と目的

本研究は、アジアにおける旧ヨーロッパ植民地の住宅建築を対象に室内熱環境に関して実測調査を行い、その実態を把握するとともに、熱環境レベルについて建築技術と形態の歴史的な変遷過程を併せて考察することによって評価しようと試みるものである。嘗てのヨーロッパ人の植民地建設において、極端に気候の異なるアジアに持込まれた西洋人住居がどのような変容をし、何を得てきたのか、そして、そこで生き残った技術とはどのような理由によるのかを再評価しようとするものである。また、最終的には個々の形態の性能評価を時代別の類型ごとに集積していくことを目的としている。

本研究では、アジアにおける歴史的建造物の建築技術の再評価に関する考察のうち、主にインドネシアの山岳都市バンドンならびに沿岸都市のチレボンの住宅建築を取り上げる。

インドネシアの旧植民地時代の建築や都市構成に関する研究はこれまでに幾多の例があり、既に住宅形式の変遷についての調査が幾多報告されている。ここで当時のオランダ人の植民地での建築活動に関する研究例をあげるまでもなく、ヴェランダや屋根の巨大化などの形式と平面形式の展開は、これまで一様に猛暑に適応させるために変容してきたものとして理解されてきた。しかし、それらが実際にどの程度の効果があったのかは、数値的な検証を伴わなければ不十分である。また、歴史的建造物の熱環境実測を行った例1として、これまでも幾つかの民家や土蔵の熱環境実測調査があった。しかし、本研

究の視点は、むしろ各形式ごとの性能を変遷過程の中で比較評価するものである。本稿では、同形式で個体差の大きい個々の住宅評価するため、同タイプのみ限定している。

### 2. 対象地域と対象住宅の選定

対象地域の選定にあたって、嘗てのヨーロッパ人の植民地政策が行われた地域で現存例が多いこと、また、現地の協力が得られ既に対象物件に関する調査が十分になされていること、そして、支配者の本国の気候と大きく異なることを選定の条件とした。西洋人の定住当初において持込まれた建築形式は、多くの場合、ヨーロッパの気候風土に順応して築かれたものであったが、熱帯の生活条件に適応するために徐々に形態上の変化が見られることに着目している。

本研究においては、インドネシアの山岳都市バンドンと沿岸地域チレボンでヨーロッパスタイルと民家建築の双方を実測し、周辺環境の違いに配慮した。チレボンは古来小さな漁村であったが、バンドンの商業都市としての重要性が増すに連れ、内陸バンドンの港湾都市として再編された都市である。また、本調査では、オランダ影響下の住宅形式の中でも、現在のインドネシアの住宅形式に比較的多くの類例がある形態を優先した。

#### 2.1 バンドンの都市形成と選定住居

1808年から1811年の新総督H.W.ダンデルスは、広大な領地を外国人に売ることを許可し、ジャワ島

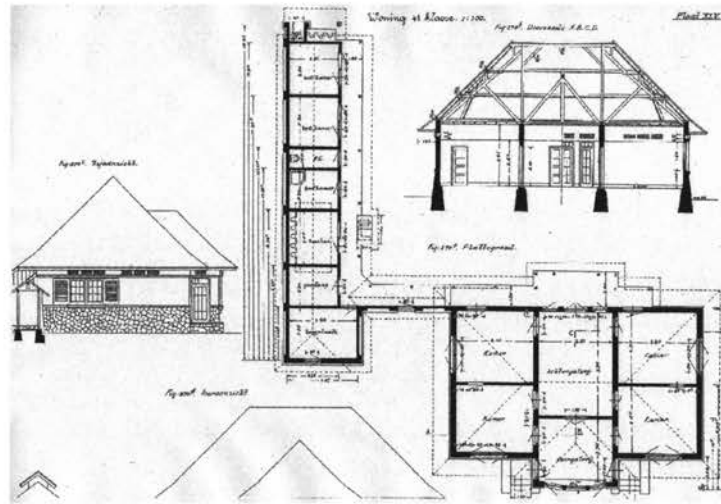


Figure 1. One example of a model

の開発を促進した。この政策によって整備された道路は西のアンヤールから東のパナルカンにまでおよび、1810年に軍事防衛線の目的で建設された主要幹線道グルーテ・ポストウェグが建設された。この道沿いに発展した街が、オランダ人時代のバンドンの誕生と言われている。やがて、オランダ人によって都市の中心部が建設されていくが、初期段階においては、戸建住宅が散々に建設されるに留まっていた<sup>[2]</sup>。現在の都市の骨格が築かれるのは、1920年の遷都計画当時である。この時、政府の主要な機関がバンドンに移され、その後の建築の典型に大きな影響を与える模範建築の図集が1927年に発行された(図1<sup>[3]</sup>)。このモデルは、この後のインドネシアの各種建築の典型となるが、実際に建設された例が最も多かったのも発行地のバンドンであった。特に本調査において対象地域に選定したバンドンの旧市街地チカパヤン周辺は、こうした典型に従った1930年代の中産階級の住宅が多く現存する地域である。

## 2.2 インドネシアの主要都市の気候

図2にインドネシアの3つの主要都市(ジャカルタ、スラバヤ、バンドン)と東京、那覇のクリモグラフを示す。インドネシアは日本とは異なり雨期と乾期を持つ地域であるため、気温の月変動は小さいが相対湿度に変動が見られる。気温はスラバヤが最も高く厳しい気候条件となっているが、バンドンは標高が高いため年間を通じて気温は比較的低温で、東京の夏期を下回る程度である。ジャカルタの雨期是那覇における夏期と類似した傾向を示し、雨期と乾期の相対湿度の差がスラバヤよりも小さい。図に

は示していないが、チレボンの気候はジャカルタとバンドンの中間程度<sup>3</sup>である。

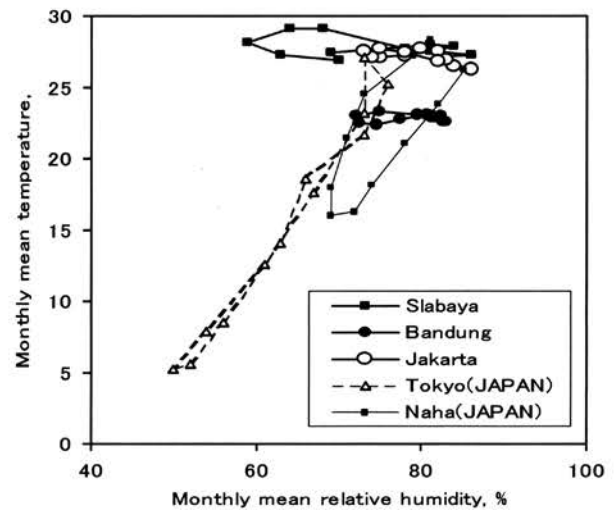


Figure 2. Comparison of a climate of Indonesian major cities

## 2.3 ジャワ島における住宅形式の変遷過程

19世紀半ばからのインドネシアのヨーロッパスタイルの住宅形態は、バンドンの建築通史を解説したイワン・スドラジャの研究<sup>[4]</sup>を参照すれば、以下に分類される。まず、オランダ人による規則的に配置された縦長の開口部をもったヨーロッパ風のファサードに既に巨大化した屋根を載せるものが18世紀後半に出現する(以下、第1期)。やがて19世紀に入り、大農場主の住宅形式が出現する(第2期、図3)。



Figure 3. An example of a farmer house (the second period)

それまでの閉じたファサードからヴェランダ付の開放的な形態となる。この形態は 1930 年代程まで継承されるが、戦後に建設例はない。そして、少し遅れ、1920～30 年代にかけて建築規則の整備、ヴァナキュラリズム、社会主義などのスタイル上の変革が起きる（第 3 期）。平面計画が自由に構成されるようになるのと時期を同じくしている。このうち、バンドンで特に大きな動向となったのがこの建築規則の整備である。本稿で対象とするのは、この第 2 期から第 3 期にかけての住宅である。

#### 2.4 室内温熱環境の実測対象住宅の選定

以上の考察により選定された住居は、表 1 に示す 12 棟である。ただし、チレボンの事例は何れも郊外の農場住宅である。上記の農場主の住宅は CE2 が該

当している。その他は雇員住宅であり、何れも小型で個室型のヴェランダ付となっている。

### 3. 室内温熱環境の調査

#### 3.1 測定方法

測定には、データ保存機能を備えた小型データロガー 4 を用い、室内外温湿度の計測を行った。各住宅の測定箇所は、外気、居間の床上 1.5m 温湿度・グローブ温度を基本とし、必要に応じて寝室温湿度、小屋裏温湿度換気口温度なども計測した 5。測定は雨期と乾期を対象として行い、それぞれの期間において 10 日間の連続する 10 分ごとのデータが得られるように行った。雨期は 1999 年 11 月～2000 年 2 月、乾期は 2000 年 7 月～9 月にかけて実施した。

Table 1. An object house sign

BE1 : A Cikapayang district, Bandung,	the third period European house
BE2 : Prabudimuntu Bandung district	European house
BT1 : Lembang 1 Bandung Lembang district	wooden tradition form private house
BT2 : Lembang 2 Bandung Lembang district	wooden tradition form private house
BT3 : Atang House Bandung Lembang district	wooden tradition form private house
BT4 : Pasir Impun 1 Bandung Pasir Impun district	wooden tradition form private house
BT5 : Pasir Impun 2 Bandung Pasir Impun district	wooden tradition form private house
CE1 : Agus's House Cirebon / suburbs farm	the second period European house
CE2 : Prayitno House Cirebon / suburbs farm	the second period European house
CE3 : Suwaryo's House Cirebon / suburbs farm	the second period European house
CT1 : Maman's House Cirebon / suburbs farm	wooden tradition form private house the second period
CT2 : Suraji's House Cirebon / suburbs farm	wooden tradition form private house the second period

### 3.2 各住宅の室内熱環境

測定結果の一例6として、図3-1に乾期におけるCT2とCE2の温湿度変動を示す。CT2は木造伝統形式民家、CE2はヨーロッパ住居である。測定期間は異なるものの、外気温との比較により両者の差異は明らかである。CT2の室内温度は外気温と同様に変動し、外気温の上昇・下降に強く影響を受けている。一方、CE2の室内温度の変動は外気温に比べ緩やかであり、一日の最高気温は外気温よりも2～3℃低くなっている。これは、躯体の熱容量の違いが影響しており、ヨーロッパ住居に用いられているレンガ等の材料を用いることにより外気温の変動が緩和されるため、日中の温度上昇が抑えられている。しかし、夜間の温度低下は逆に小さくなるため、室内温度は外気温よりも最大で5℃程度高くなっている。温度低下を促進させるためには積極的な換気を行う必要がある。

表3-1、表3-2に雨期ならびに乾期における居間温湿度の日平均値を示す。測定期間が異なるため単純には比較できないが、チレボンにおける住宅の室内温度の方が全体的に高くなっている。バンドンの住宅には平均温度が20℃程度のものがあるが、これらの住宅は標高が高い地域に位置しているため外気温が低いことが影響している。木造伝統形式民家とヨーロッパ式住宅とは日較差に違いが明確に現れており、熱的に軽い材料を用いている木造伝統形式民家の方が室内の温度変動が大きいことが伺える。ヨーロッパ式の住宅では熱容量と夜間換気を巧みに活用すれば、適切に温度制御できる可能性が

高い。

### 3.3 各住宅の熱環境の比較

#### (1) 室内温度と外気温の関係

図3-2、図3-3に雨期と乾期における居間温度と外気温との関係を示す。図中の値は、連続する10日間のデータを時刻別に平均化したものであり、測定期間中の典型的な一日の変動をモデル化している。

乾期、雨期ともチレボンの方が外気温は高く、最大気温は35℃にまで達している。一方、バンドンの木造伝統形式民家は標高が高い場所に位置しているために、外気温は15～25℃と低い範囲に収まっており、ヨーロッパ住居においてもチレボンと比較すると外気温は5℃程度低いことになる。

ここで着目すべき点は、ヨーロッパ住居と木造伝統形式民家が示す室内外温度の関係の違いである。ヨーロッパ住居は躯体の熱容量が大きいいため室内温度の一日の最大・最小値が抑えられており、その結果、データの傾きが小さくなっているのがわかる。この傾向は、乾期において顕著に見られる。

#### (2) 居間温度の頻度分布

図3-4、図3-5に雨期と乾期における測定期間中の居間温度と外気温の頻度分布を示す。全体的な傾向として、ヨーロッパ住居のデータ形状はピークが急な鋭い山形を示しているのに対し、伝統木造形式住居の場合はピークが緩くデータ範囲が広がっていることが分かる。これは、躯体の熱容量により室内温度の変動が緩和されていることに起因

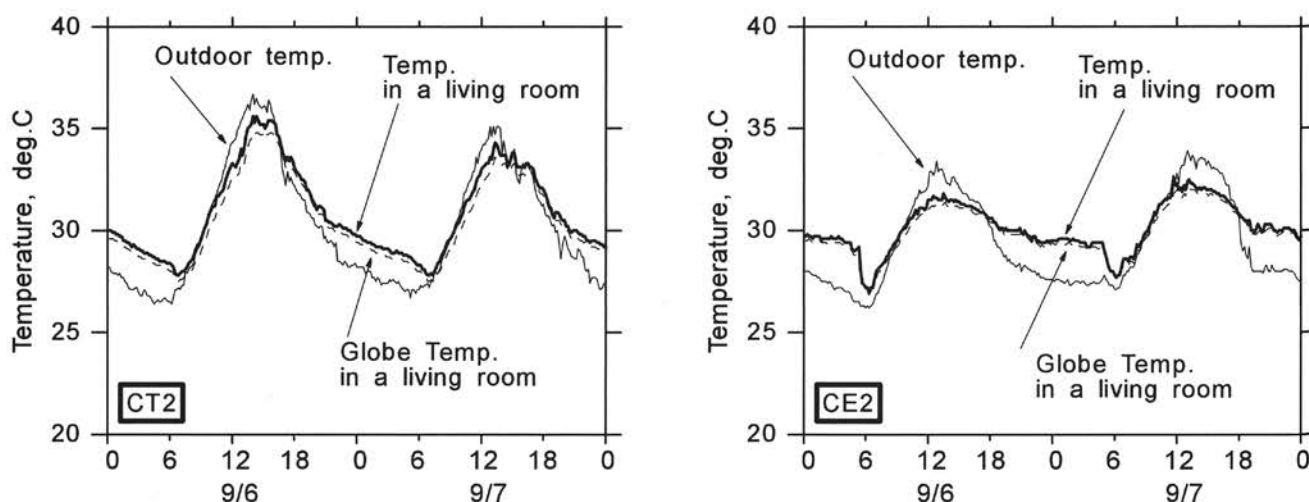


Figure 4. The fluctuation of Indoor temperature and humidity of CT2 and CE2 in the dry season



Table 2. Dairy average temperature and relative humidity in living room during the wet season

	Indoor temperature, deg.C			Relative temperature,%		Radiational Temp., drg.C	
	AVG.	SD.	Ratio of temp. swing	AVG.	SD.	AVG.	SD.
BE1 : Cikapayang	27.1	0.8	3.1	61.9	7.3	26.6	0.8
BE2 : Prabudimuntur	26.2	1.4	6.3	58.4	7.9	25.0	1.7
BT1 : Lembang 1	20.2	2.3	10.2	75.2	6.5	19.8	2.3
BT2 : Lembang 2	20.7	2.6	10.9	67.9	5.7	20.7	2.7
BT3 : Atang House	23.3	3.5	13.8	—	—	23.3	3.5
BT4 : Pasir Impun 1	24.0	3.0	11.5	62.9	9.6	24.1	3.1
BT5 : Pasir Impun 2	25.3	3.7	15.7	61.3	10.9	25.4	3.8
CE1 : Agus's House	29.8	1.4	6.7	58.2	7.3	29.8	1.3
CE2 : Prayitno House	30.3	1.0	6.5	83.7	3.3	27.0	0.9
CE3 : Suwaryo's House	29.5	1.2	6.1	59.3	7.1	—	—
CT1 : Maman's House	30.8	2.2	9.1	55.8	9.1	30.8	2.2
CT2 : Suraji's House	30.3	2.1	9.4	57.6	9.4	30.1	2.1

Table 3. Dairy average temperature and relative humidity in living room during the dry season

	Indoor temperature, deg.C			Relative temperature,%		Radiational Temp., drg.C	
	AVG.	SD.	Ratio of temp. swing	AVG.	SD.	AVG.	SD.
BE1 : Cikapayang	25.6	0.8	3.9	71.5	6.3	25.5	0.8
BE2 : Prabudimuntur	24.2	1.1	6.8	77.6	8.0	24.1	1.0
BT1 : Lembang 1	20.2	1.4	6.9	87.2	6.3	20.1	1.4
BT2 : Lembang 2	19.7	2.0	9.8	85.3	8.7	19.6	2.1
BT3 : Atang House	21.6	1.7	8.5	—	—	21.5	1.7
BT4 : Pasir Impun 1	24.0	1.9	8.7	83.1	7.9	23.8	1.9
BT5 : Pasir Impun 2	23.7	2.6	12.6	74.9	9.3	23.8	2.7
CE1 : Agus's House	27.1	1.0	5.6	83.5	3.4	27.0	0.9
CE2 : Prayitno House	28.2	0.8	5.8	78.7	3.0	27.9	0.8
CE3 : Suwaryo's House	27.4	0.9	4.7	82.3	2.7	—	—
CT1 : Maman's House	28.6	1.3	5.9	77.6	4.1	28.4	1.3
CT2 : Suraji's House	27.8	1.3	6.0	81.3	4.4	27.7	1.3

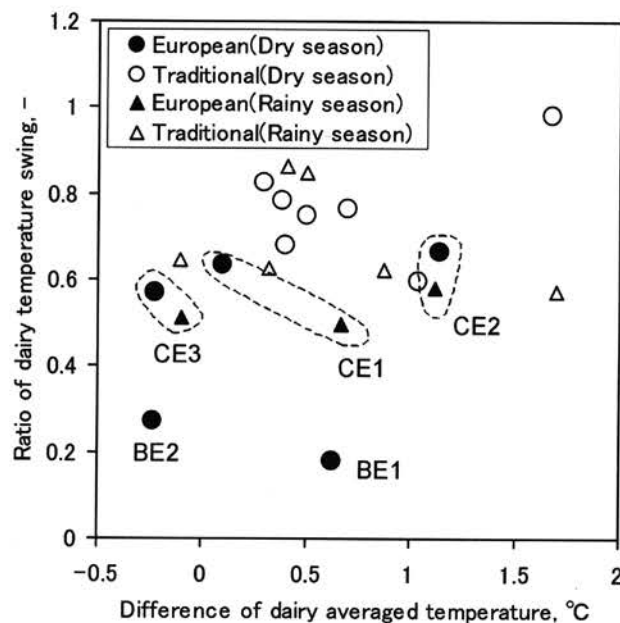


Figure 5. Overall distribution of temperature swing

している。

外気温度の頻度分布との関連でそれぞれの温度状況を見ると、外気温度幅の広がりに対してヨーロッパ住居の室内温度幅は小さくなっている。特に、乾期のチレボンの状況を見ると、外気温度は 25～36℃の範囲で分布しているが、ヨーロッパ住居では 30℃付近にピークを持ち 27～33℃の範囲を持つ分布となっており、日中のピークカットが木造伝統形式住居より顕著になされている。バンドンの住居では、比較対象としている木造伝統形式住居が位置する地域の外気温度が低いことや、バンドン自身が比較的過ごしやすい気候であることにより、ヨーロッパ住居の特徴が明確には現れていない。

### (3) 居間 PMV の累積度数分布

図 3-6 に雨期と乾期における測定期間中の PMV7 の頻度分布を示す。チレボンの住居よりもバンドンの住居の方が PMV 値は小さく、不快と感じる時間帯は少ない。また、バンドンの木造伝統形式住居では“寒い”側に位置している。チレボンの住居では室内温度にて見られた傾向を反映しており、ヨーロッパ住居の PMV 分布の範囲が、木造伝統形式住居よりも狭くなっており、“暑い”側に位置する割合が少ない。

ここでは、室内温熱環境の快適性評価に当たり評価指標として PMV を用いたが、この指標は本来、均一な環境条件で変動が少ない執務空間の環境評価に適用されているものである。従って、今回評価対象とした住居の環境評価を行うには、適用範囲を超えている可能性が高い。また、PMV 自体が欧米人を対象とした被験者実験に基づいているために、現地の居住者との温冷感の相違が生じていることも否

めない。今後は、標準有効温度 SET\*や熱帯夏季蒸暑指数 TSI などの評価指標の適用を検討するとともに、人種による温冷感の違いを考慮した評価指標の提案を試みる必要がある。

### 3.4 各住宅の各部温度

図 3-6 に CE2 と BE1 における小屋裏温度、各部位表面温度の変動を示す。BE1 はバンドン市内に建設されている住宅であるため、外気温度が全体的に低くなっているが、両住宅とも測定期間中は晴れであった。両住宅の小屋裏温度に注目すると、CE2の方が日中に急激な温度上昇を示し 40℃まで達しているのに対し、BE2 では 33℃程度にとどまっている。この違いは測定期間中の日射条件による影響も考えられるが、外気温度を基準に比較すれば、CE2の方が温度上昇が顕著である。壁体各部に用いられている材料は両者とも同じであることを考慮すれば、この違いは屋根形状に起因している可能性が高いと判断できる。さらに、この小屋裏温度の違いは天井表面温度にも影響を与えており、BE2 の表面温度は日中には外気温よりも低いが CE2 の場合には外気温よりも高く、この表面温度の違いが居室内の温熱環境に少なからず影響していると推察できる。

### 4. 測定結果から見られる住宅形態の変遷過程の考察

チレボンの測定対象住宅のうち、典型的な農場主住宅の形態 CE2 の熱環境について、躯体の熱容量の影響により日中の温度上昇が緩和されていることがわかった。バンドンの測定例のうち、BE1 と BE2

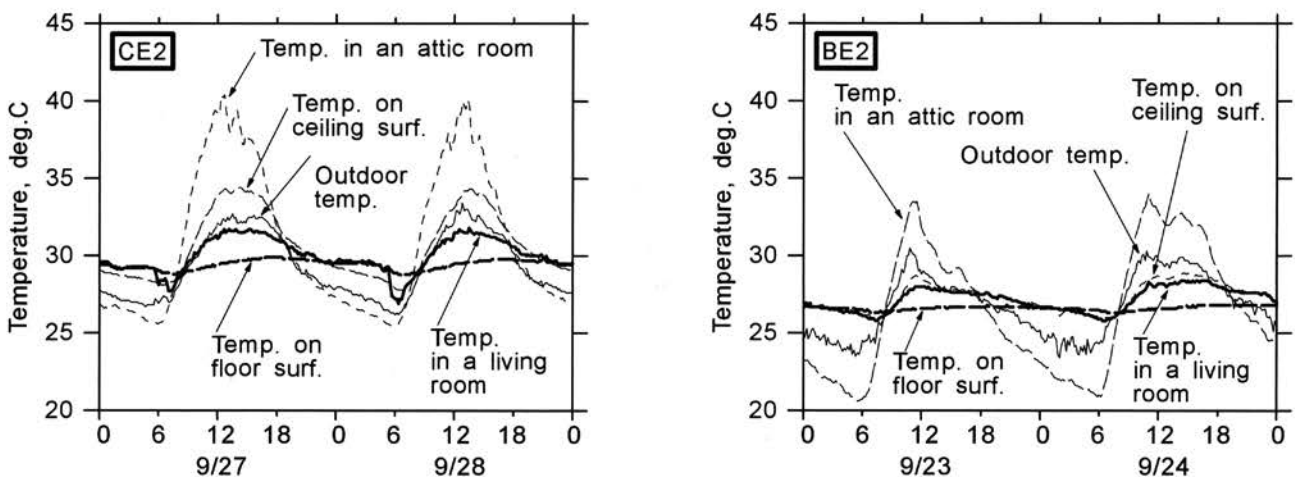


Figure 6. Indoor surface temperature and the temperature of attic room in CE2 and BE2 during dry

の形態はこの CE2 を小型化し変形させたものであり両者の室内温度には顕著な差異は認められないものの、屋根形状に起因する小屋温度状況に差異が認められた。

チレボンの大農場主住宅 (CE2) とその雇員住宅 (CE1, CE3) において、小型化と部屋割りの変更に伴う平面形の簡略化は、熱環境の側面からは必ずしも成功していたとは言い難い。さらに、都市環境下に適応させた住宅プランにおいては、より積極的な工夫が必要とされたのであろう。小屋裏部分の肥大化は、こうした工法上の変化を反映させたバンドンでの例であるが、天井面の表面温度の測定値からその成果が認められたことになる。

この結果により、インドネシアの住宅形式の変遷について、従来考えられていた熱帯環境への対応という側面を、第3期でのモデル化の初期段階において屋根面の形態の変遷により説明できる可能性を見出すことができた。

なお、木造伝統形式の民家については、何れの場合も外気温の影響を強く受けていることが確認でき、各地の構法の差異や建設年代による違いを考慮するまでの性能差は認められなかった。

## 5. まとめと今後の課題

本研究においては室内熱環境に焦点を絞り、建築史的な観点から住宅形態の分類を行い、それに基づき各住宅の性能について考察した。その結果、熱帯地方の住宅形態の変遷過程において、転機となったモデルプランの熱環境について屋根形状の変遷が建築史的ならびに建築環境工学的に意義深いものであるという指摘ができた。

今回得られた結果は基礎的な段階にとどまっているため、さらに詳細な実測を継続する必要がある。特に、バンドンはインドネシアの中でも気候条件に恵まれており、気候条件がそれほど厳しくないため、測定点数を限った方法では建物仕様の差異が室内環境に及ぼす効果を明確に把握することは困難である。従って、次の段階として各部温湿度を詳細に計測することにより小屋組、ベランダ、躯体熱容量が室内熱環境に与える影響を定量的に捉える必要がある。これにより、構法や平面形式などの差異と周辺環境条件を加えた評価指標での考察を行うことが可能と考えられる。

このような詳細な測定により、ある程度の状況が把握できれば、引き続き簡易測定を継続することによりサンプル数を増やし、東南アジアの住環境改善

に資するためにデータベースを構築し、研究成果を体系化することを次の課題として挙げるができる。

註:

- 1 例えば、木村建一他：伝統的民家における自然エネルギー利用技術の現代的利用に関する研究、平成6年度～平成8年度科学研究費補助金基盤研究総合(A) (課題番号 32689)。同じく、近年中国や韓国をはじめとするアジア諸国での調査報告がなされている。また、インドネシアの非西欧社会の都市に重点をおいて、その都市の構成原理の調査を進めてきた布野修司は、スラバヤで室内熱環境を考慮したエコハウスの研究と建設を実施している。そして、建築研究所を中心とする我国の研究協力もある。
- 2 ジャカルタ、那覇、東京のデータは理科年表(1999年)の値、バンドンのデータはバンドン气象台より得た1971年から1997年のデータの平均値である。
- 3 チレボンの気象データには欠測が多いため図2には掲載していない。1981年のみのデータをもとにすれば、各地の年平均気温はジャカルタ 22.7℃、チレボン 24.5℃、バンドン 27.2℃となり、各地の相対湿度はほぼ等しい。
- 4 センサー(温度はサーミスター、湿度は電気抵抗式の高分子吸収エレメント)の精度は、温度が±0.5℃、相対湿度が±5%(25℃、50%のとき)である。
- 5 各住宅における測定箇所、測定状況は付録に示した。
- 6 雨期ならびに乾期における測定結果を付録に示した。
- 7 代謝量 1.0met, 着衣量 0.8clo, 気流 0.2m/s を固定値とし、その他は測定値を用いて算出した。PMV は+3～-3までの値を示し、これらが“非常に暑い”から“非常に寒い”という温冷感に対応している。

参考文献:

- [1] F. Wieland, Hendrik, AgBraga, Revitation in an Urban Development Ah, Bandung, 1997, pp10-11.
- [2] Pola structural dan teknik bangunan di Indonesia, AgDasar-dasar, eko-arsitekturO, Bandung, 1927.
- [3] Sudradjat, Iwan, 鄭 Study of Indonesian

Architectural History • A thesis submitted in fulfilment of the requirements for the degree of Doctor of Philosophy, Dept. of Architecture, University of Sydney, 1991.

## 研究助成受領者名簿

平成 7 年度	橋本 佳男 清野龍太郎 山本佳志 石川 正昭 梅崎 健夫	電気電子 物質 生産システム 生産システム 物質	150,000	フランス
			100,000	ハワイ
			100,000	ハワイ
			150,000	カナダ
			100,000	中国
			600,000	
平成 8 年度	中村 正行 橋本 昌巳 川原 琢也 降旗 健治 曹 西 大久保慶治	生産システム 情報 情報 電気電子 社会開発 電気電子	150,000	フランス
			150,000	オーストリア
			150,000	ドイツ
			150,000	イギリス
			150,000	イタリア
			100,000	中国
			850,000	
平成 9 年度	大久保慶治 李 健 田中 伸明 伊東 一典 牛 立斌 邵 長城 榊 和彦 アサノ・デービット・ケン	電気電子 社会開発 物質 情報 生産システム 生産システム 生産システム 情報	135,000	メキシコ
			135,000	米国
			35,000	千葉県
			135,000	米国
			135,000	中国
			135,000	米国
			135,000	フランス
			135,000	オーストラリア
			980,000	
平成 10 年度	萱津 理佳 北原 司 清水 茂 田中 清	情報 情報 社会開発 電気電子	150,000	スロバキヤ
			100,000	中国
			100,000	シンガポール
			100,000	インド
			450,000	
平成 11 年度	邵 長城 池田 清志 伊東 栄次 田中 清 田守伸一郎 和崎 克巳 中村 正行	機械システム 電気電子 電気電子 電気電子 社会開発 情報 環境機能	115,000	米国
			115,000	フランス
			115,000	米国
			115,000	米国
			115,000	ニュージーランド
			115,000	ドイツ
			80,000	中国
			770,000	
平成 12 年度	川村 隆 松原 雅春 山口 朋浩	社会開発 機械システム 物質	150,000	イタリア
			150,000	米国
			150,000	米国
			450,000	
平成 13 年度	伊東 一典 海谷 治彦 榊 和彦 菅 博幸 高瀬 達夫 樽田 誠一 中屋 眞司 牛 立斌 吉野 正人 和崎 克巳	情報 情報 機械システム 物質 社会開発 物質 社会開発 環境機能 機械システム 情報	120,000	米国
			80,000	中国
			120,000	ドイツ
			40,000	横浜市
			80,000	中国
			120,000	米国
			120,000	米国
			80,000	中国
			120,000	フランス
			120,000	ドイツ
			1,000,000	
平成 14 年度	西山 宗雄 辺見 信彦 清水 茂 池田 清志 降旗 建治	社会開発 機械システム 社会開発 電気電子 電気電子	150,000	スペイン
			90,000	韓国
			150,000	ポーランド
			150,000	米国
			150,000	米国
			690,000	



「技報 こまくさ」 第2号 平成15年9月発行  
(非売品)

発行者 財団法人信州大学工学部若里会  
〒380-8553

住 所 長野県長野市若里4丁目17-1  
TEL (026) 266-8209 (FAX 共有)

印刷・製本 カシヨ株式会社  
〒381-0037 長野市西和田286  
TEL (026) 251-0510

本書の内容の一部あるいは全部を無断で複製すると、著作権及び出版権の侵害となる場合がありますのでご注意ください。







(財)信州大学工学部 若里会