

## 科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成 24 年 4 月 16 日現在

機関番号：22604

研究種目：基盤研究(B)

研究期間：2009～2011

課題番号：21360109

研究課題名（和文） 構造音響・強連成場における本質的静粛化に関する研究

研究課題名（英文） Essential control of sound and vibration in a strongly-coupled system

研究代表者

田中 信雄 (TANAKA NOBUO)

首都大学東京・システムデザイン研究科・教授

研究者番号：70305423

研究成果の概要（和文）：

本研究では、これまで未解明であった強連成場における固有ペアを陽な形で表現し、それによるモデルを基調とした静粛化制御法の提案を主目的としている。まず、境界条件などの条件から固有値問題を定式化し、固有ペアを導出した。次に、強連成場における固有関数の直交条件を導出し、これを用いることで固有ペアの正当性をチェックした。さらに、これを基調としたポテンシャルエネルギー制御法を提案し、その有用性を明らかにした。

研究成果の概要（英文）：

The main objective of this study is to present the essential control of sound and vibration for a strongly-coupled system based on a model consisting of eigenpairs in an explicit form. Firstly, an eigenvalue problem is formulated based on some conditions such as boundary conditions, eigenpairs for the system is then derived. This is followed by validity check of the eigenfunctions using orthotropic condition. Furthermore, a control method of acoustical potential energy based on this model is presented, demonstrating its performance by numerical analyses.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2009年度	4,300,000	1,290,000	5,590,000
2010年度	6,000,000	1,800,000	7,800,000
2011年度	4,300,000	1,290,000	5,590,000
年度			
年度			
総計	14,600,000	4,380,000	18,980,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：機械工学 機械力学・制御

キーワード：振動制御

## 1. 研究開始当初の背景

1960年代に盛んに議論された音響・構造連成場の固有値問題は、ごく最近まで未解決のままにおかれた。一面弾性・五面剛壁で構成される単純な直方体キャビティにおいてすら、固有ペア（固有関数と固有値）が陽な形で求まらなかったためである。連成問題の

難しさは境界条件に尽きよう。弾性平板のあらゆる箇所、平板速度と粒子速度が等しくなければならないという空間整合条件が固有値問題を難しいものにする。固有値問題は自由振動を対象とするので、展開定理を適用することができず、境界条件マッチングのための変数が不足するからである。そこで、有

有限要素法などの数値解析法を援用して強制応答解を得る手法をとることが一般的であった。しかしながら、連成問題の本質を理解してプログラミングされた数値解析法が仮にあったとしても、そこで得た解はそれでも単なる数値データの集合に過ぎず、対象としている構造システムの背後に潜在する本質的な特性を理解するのは困難であり、条件が変わればその都度、最初から再解析する必要があった。

## 2. 研究の目的

上記の背景を元に、本研究は複数の弾性壁と複数の剛壁で構成される直方体キャビティを対象とし、固有ペアを陽な形で導出する。その正当性が証明されれば、これをベースにさらに、グリーン関数が定義でき、音場の支配因子である音圧と粒子速度が一意に記述できる。すると最適システムを構築する際に系統だったアプローチが可能となり、評価指標として音響ポテンシャルエネルギーや構造運動エネルギーなどを用いる場合、その記述は

固有ペアを基調として展開することができる。そして何よりも重要な点は、系統だった設計を行う基盤を確立することにより、理論的に到達できる静粛化限界を知ることができることである。最後に、本研究課題の最終段階として、これを基調としたポテンシャルエネルギー制御法を提案し、その有用性を明らかにする。

## 3. 研究の方法

まず、以下の2つの条件を用いて強連成場における固有値問題を定式化する。

- (i) 平板の表面にキャビティ内の音圧が分布外乱として印可する（この場合、平板の振動速度は展開定理を用いて記述できる）。
- (ii) 平板振動の速度分布と平板表面における粒子速度の分布が一致する。

これにより、 $\mathbf{Ax}=\mathbf{0}$  という形式の固有値問題が定式化される。次に、強連成場における固有関数の直交条件を導出し、これを用いることで当該固有値問題の解の正当性をチェック

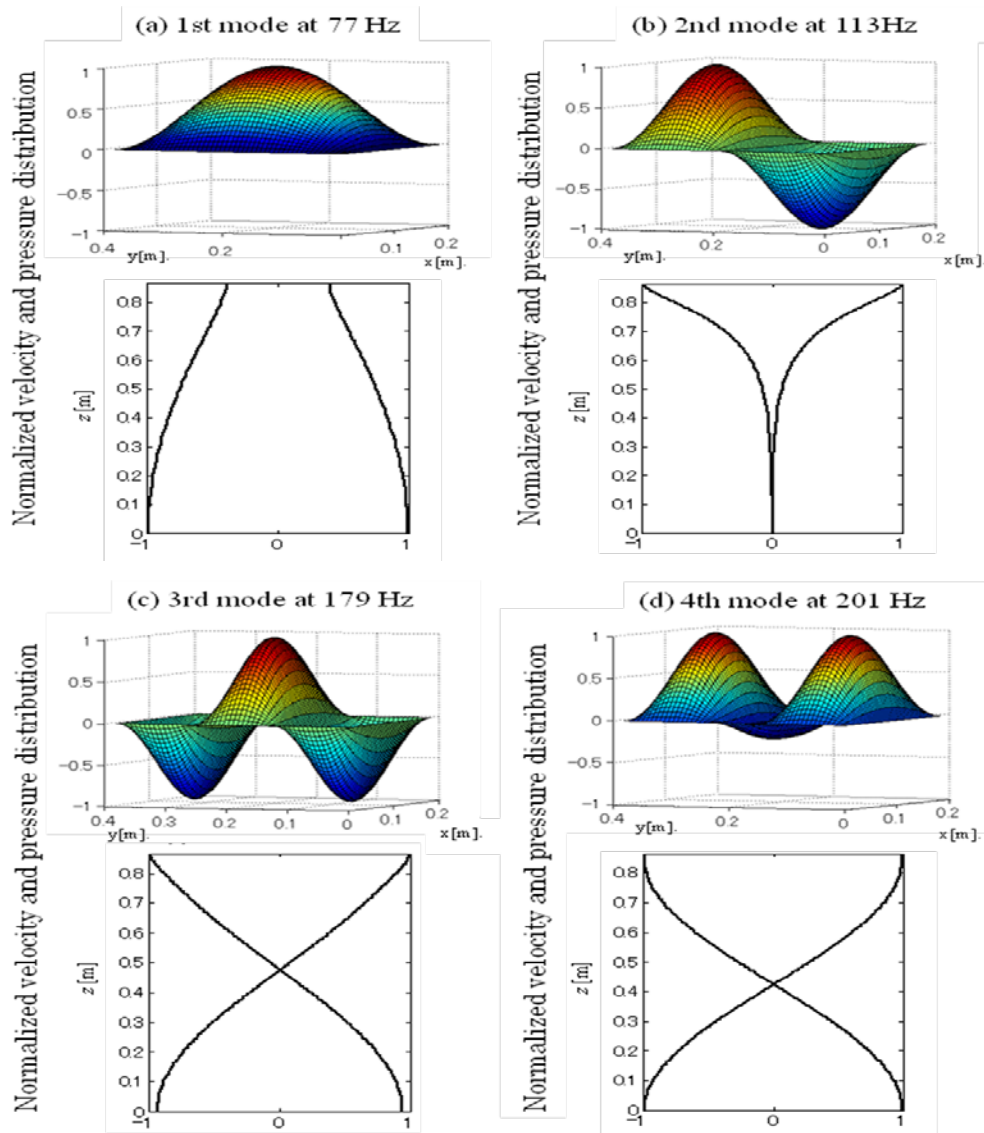


図1. 強連成場における固有関数

クする。最後に、導出された固有ペアによって与えられるモード方程式をベースにキャビティ内の音響ポテンシャルエネルギーを定式化し、その抑制手法を検討する。

#### 4. 研究成果

数値解析を進めるに当たり、キャビティ仕様としては  $0.18\text{m} \times 0.38\text{m} \times 0.866\text{m}$ 、弾性平板は厚さ  $0.8\text{mm}$  の単純支持矩形鉄板とする。図1は音響・構造連成キャビティの1次から4次までのモード姿態が、構造および音響モードのセットとして示されている。正規化された平板速度モードは式(26)を用いて描かれており、1次から3次までのモードは、in vacuo な平板モード  $(1, 1)$ ,  $(1, 2)$  および  $(1, 3)$  モードによって支配されている。しかしながら4次モードに関しては連成の結果、in vacuo な  $(2, 1)$  次モードではなく、変形した  $(1, 3)$  モードに影響されていることが分かる。また、 $z$  方向の音圧分布も提示されているが、剛壁音響モード姿態とは大きく様変わりしている点に注目されたい。図1に示す1次音響モードは、剛壁モードにおける二本の平行線形状ではなく、 $z$  方向に先細りの形状となっており、その究極が開口端キャビティにおける音響モード姿態である。図1(c)および(d)における音響モード姿態は類似した形状を呈しており、4次モードは連成効果はかなり顕著である。

さて、図1(b)に示されている2次の音響モード姿態に着目されたい。これは通常の定在波型音響モードとは異なり、振動平板より遠ざかるにつれて指数関数的に減衰しているエバネセントモードである。モード姿態は音圧分布と等価であるので、この場合のモード状態は、平板近傍には音圧が分布しているが、その音圧は伝搬することなく平板から遠ざかるにしたがい急速に減衰する。したがって、たとえ平板が共振周波数で激しく振動していても、キャビティ内の音場は平板から離れるにつれて静かになるという不思議な現象である。この現象は、音響場と構造場の連成効果の産物であり、キャビティ長が大きければエバネセント現象も顕著となる。逆に、キャビティ長が小さければエバネセント効果は認識され難い。

次に、導出された固有ペアによるモデルを元にキャビティ内の音響ポテンシャルエネルギーの最小化結果を図2に示す。この場合、外乱力を  $(L_x/11, L_y/10)$  の位置に、制御力を  $(L_x/12, L_y/12)$  位置に設置している。図より明らかなように、十分な抑制効果が得られている。また、非制御の場合、2番目のピークの値がその他と比べてやや低く出ているが、それは当該モードがエバネセントモードであることに起因すると考えられる。以上の考察からも分かる通り、解析解が導出でき

ば、理論的にどれだけ騒音を下げることができるのかを定量的に求めることができ、かつモードの観点から連成場を読み解くこともできる。これらは数値解析的手法では得られない知見であり、騒音対策の幅が一挙に広まることを示唆するものである。

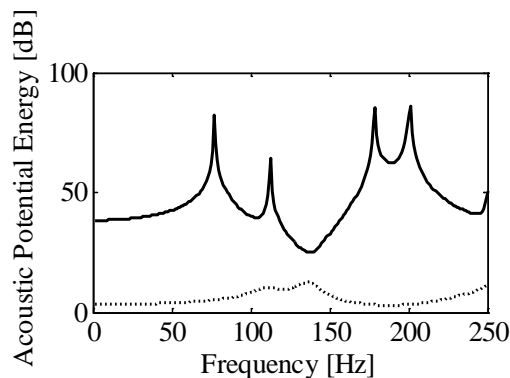


図2. 制御時および非制御時における音響ポテンシャルエネルギー

#### 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 30 件)

1. 田中信雄, 多嘉良佑介, 岩本宏之, Eigenpairs of a coupled rectangular cavity and its fundamental properties, Journal of the Acoustical Society of America, Vol. 131, (2012), pp. 1910-1921, 査読有り
2. 岩本宏之, 田中信雄, 多嘉良佑介, Active feedforward wave control of a rectangular panel using a wave filter constructed with smart mode sensors, Journal of System Design and Dynamics, Vol. 5, No. 6, (2011), pp. 1347-1360, 査読有り
3. 岩本宏之, 田中信雄, 多嘉良佑介, スマートモードセンサによる波動フィルタを基調とした薄肉矩形平板のフィードフォワード型波動制御に関する研究, 日本機械学会論文集C編, Vol. 77, No. 776, (2011), pp. 1223-1237, 査読有り
4. 米山 聡, 田中信雄, Smart film actuators using biomass plastic, Smart materials and Structures, Vol. 20, (2011), art. no. 045012, 査読有り
5. 田中信雄, 舘亮佑, パラメトリックスピーカーの反射を用いたアクティブノイズコントロール, 日本機械学会論文集C編, Vol. 77, No. 775, (2011), pp. 764-773, 査読有り
6. 田中信雄, 田中基貴, Trivial control of

- sound using a parametric beam focusing source, Journal of the Acoustical Society of America, Vol.129, (2011), pp. 165-172, 査読有り
7. 田中信雄, 菅野秀, 二重壁キャビティにおける連成問題とパワーモード制御, 日本機械学会論文集C編, Vol. 77, No. 773, (2011), pp. 64-74, 査読有り
  8. 岩本 宏之, 田中 信雄, S. G. Hill, Adaptive feedforward control of a rectangular panel using a wave filter constructed with point sensors, Journal of Sound and Vibration, Vol. 330, Issue 11, (2011), pp. 2401-2418, 査読有り
  9. 岩本 宏之, 田中 信雄, S. G. Hill, Smart wave filtering method for a rectangular panel using Hilbert transformers and its application to an adaptive control system, Smart Materials and Structures, Vol. 19, (2010), art. no. 085023, 査読有り
  10. 皆川健彦, 田中信雄, 3Dビームステアリングを用いたアクティブノイズコントロール, 日本機械学会論文集C編, Vol. 76, No. 772, (2010), pp. 3414-3421, 査読有り
  11. 田中信雄, 田中基貴, Active noise control using a steerable parametric array loudspeaker, Journal of the Acoustical Society of America, Vol.127, (2010), pp. 3526-3537, 査読有り
  12. 阿部崇一, 田中信雄, 参照信号を必要としないパーティシャルセンシングアクティブノイズコントロール, 日本機械学会論文集C編, Vol. 76, No. 769, (2010), pp. 2240-2247, 査読有り
  13. 川尻規貴, 田中信雄, グローバル場における統合静粛化制御, 日本機械学会論文集C編, Vol. 76, No. 768, (2010), pp. 2066-2073, 査読有り
  14. 米山聡, 田中信雄, 導電性高分子を用いた透明スマートフィルムアクチュエータ, 日本機械学会論文集C編, Vol. 76, No. 768, (2010), pp. 2059-2065, 査読有り
  15. S. G. Hill, 田中 信雄, 岩本 宏之, Local sensing/control against global error sensing/control: A comparison of two techniques influence over sound power, Applied Acoustics, Vol.71, (2010), pp. 965-978, 査読有り
  16. 田中信雄, 梶山大希, 多嘉良佑介, 二重壁構造物を用いたクラスタ遮音制御, 日本機械学会論文集C編, Vol. 76, No. 766, (2010), pp. 1427-1435, 査読有り
  17. 米山 聡, 田中 信雄, 岩本 宏之, スマートフィルムセンサ・アクチュエータを用いた平板構造物のモード制御に関する研究, 日本機械学会論文集C編, Vol. 76, No. 763, (2010), pp. 565-571, 査読有り
  18. 米山 聡, 田中 信雄, ポリマーフィルムの振動放射音特性とクラスタ制御を基調としたアクティブ遮音制御に関する研究, 日本機械学会論文集C編, Vol. 76, No. 761, (2010), pp. 185-192, 査読有り
  19. 山本 克也, 田中 信雄, 朝比奈峰之, 鉄道車両の内装透過音制御システムの開発 (第3報-新幹線車両デッキ部騒音における制御効果の検証), 日本機械学会論文集C編, Vol. 75, No. 759, (2009), pp. 2957-2964, 査読有り
  20. 山本 克也, 田中 信雄, 朝比奈峰之, 鉄道車両の内装透過音制御システムの開発 (第2報-遮音板配列型騒音制御システムの提案), 日本機械学会論文集C編, Vol. 75, No. 752, (2009), pp. 890-897, 査読有り
  21. 眞田 明, 東山 孝治, 田中 信雄, アクティブ遮音制御におけるアクチュエータ配置法, 日本機械学会論文集C編, Vol. 75, No. 758, (2009), pp. 2686-2694, 査読有り
  22. 米山 聡, 田中 信雄, 分布定数系スマートフィルムアクチュエータ, 日本機械学会論文集C編, Vol. 75, No. 758, (2009), pp. 2679-2686, 査読有り
  23. 米山 聡, 田中 信雄, マルチモードスマートフィルムセンサに関する研究, 日本機械学会論文集C編, Vol. 75, No. 758, (2009), pp. 2672-2677, 査読有り
  24. 米山 聡, 田中 信雄, 電極パターンニングを用いたスマートフィルムセンサ, 日本機械学会論文集C編, Vol. 75, No. 757, (2009), pp. 2489-2496, 査読有り
  25. S. G. Hill, 田中 信雄, S. D. Snyder, A generalised approach for active control of structural-interior global noise, Journal of Sound and Vibration, Vol.324, (2009), pp. 456-475, 査読有り
  26. 田中 信雄, 村瀬 陽平, 岩本 宏之, Active Mode Localization Control of a Periodic Vibratory System, Vol. 3, No. 5, (2009), pp. 744-755, 査読有り
  27. S. G. Hill, 田中 信雄, 岩本 宏之, A Orthogonal contributor number for the measurement of sound power, Applied Acoustics, Vol.70, (2009), pp. 1226-1234, 査読有り
  28. 貝塚 勉, 田中 信雄, Vibroacoustic

Independent Contributors and Active Control of Vibration and Sound in Double Walls: Part 1. Vibroacoustic Modal Control, Journal of System Design and Dynamics, Vol. 3, No. 2, (2009), pp. 173-187, 査読有り

29. 貝塚 勉, 田中 信雄, Vibroacoustic Independent Contributors and Active Control of Vibration and Sound in Double Walls: Part 2. Cluster Control, Journal of System Design and Dynamics, Vol. 3, No. 2, (2009), pp. 188-202, 査読有り
30. 田中 信雄, Cluster control of distributed-parameter structures, International Journal of Acoustics and Vibration, Vol.14, (2009), pp.24-34, 査読有り

[学会発表] (計 59 件)

1. 東山・真田・田中, Acoustic enclosure with active sound transmission control (On the comparison of enclosure size), Inter-noise 2011, 2011年9月, Osaka, Japan
2. 真田・東山・田中, Active control of sound transmission through a panel using point force actuators and PVDF film sensors, Inter-noise 2011, 2011年9月, Osaka, Japan
3. 田中, Active control of distributed structures-Toward the realization of a vibration-free state, Asia Pacific Vibration Conference2009 (招待講演), 2011年12月, Hong Kong, China
4. 岩本・田中, Generation of a quiet space in a rectangular cavity using wave-filter-based active wave control, Asia Pacific Vibration Conference2009, 2011年12月, Hong Kong, China
5. 田中, Active control of distributed structures-Toward the realization of a vibration-free state, Asia Pacific Vibration Conference2009 (招待講演), 2011年12月, Hong Kong, China
6. 菅野・田中・岩本, Sound confinement control of a multiple-wall structure, Asia Pacific Vibration Conference2009, 2011年12月, Hong Kong, China
7. 目坂・田中・岩本, Cluster control of the acoustic power radiated from a rectangular panel with asymmetric boundary conditions, Asia Pacific Vibration Conference2009, 2011年12月, Hong Kong, China
8. 信井・田中, Two-dimensional non-contact transportation using ultrasonic levitation, Asia Pacific Vibration Conference2009, 2011年12月, Hong Kong, China
9. 石森・田中, Three-dimensional global active noise control using a delayed driving parametric array loudspeaker, Asia Pacific Vibration Conference2009, 2011年12月, Hong Kong, China
10. 平・田中, Virtual sensor ANC with the noise source searching, Asia Pacific Vibration Conference2009, 2011年12月, Hong Kong, China
11. 田中・田中, Active Noise Control using a Parametric Array Loudspeaker, The 17th International Congress on Sound and Vibration, 2010年7月, Cairo, Egypt
12. 菅野・田中, Coupling problems and active control of acoustic power mode in a double-wall cavity, The 17th International Congress on Sound and Vibration, 2010年7月, Cairo, Egypt
13. 多嘉良・田中, Study on effects of generating vibration-free-state in a flexible structure on sound power radiation, The 17th International Congress on Sound and Vibration, 2010年7月, Cairo, Egypt
14. 岩本・田中, Experiment on the active wave control of a rectangular panel using a wave filter constructed with smart mode sensors, The 17th International Congress on Sound and Vibration, 2010年7月, Cairo, Egypt
15. 岩本・田中, Adaptive control of wave propagation in a rectangular panel using a smart wave filter, The 10th International Conference on Motion and Vibration Control, 2010年8月, Tokyo, Japan
16. 多嘉良・田中, Cluster Control of Sound Transmission Loss Using Double-leaf Wall, The 10th International Conference on Motion and Vibration Control, 2010年8月, Tokyo, Japan
17. 田中・田中, Non-contact Transportation Using Ultrasonic Levitation, The 10th International Conference on Motion and Vibration Control, 2010年8月, Tokyo, Japan
18. 菅野・田中, Acoustic Power Mode Control Theory of a Double-wall Cavity, The 10th International Conference on Motion and Vibration Control, 2010年8月, Tokyo, Japan
19. 米山・田中, transparent Smart Film Actuator Using Conductive Polymer,

- The 10th International Conference on Motion and Vibration Control, 2010年8月, Tokyo, Japan
20. 川尻・田中, Acoustic control in a cavity with multiple panels, The 13th Asia-Pacific Vibration Conference, 2009年11月, Christchurch, New Zealand
  21. 田中・田中, Non-contact Transportation using Ultrasonic Levitation (Proposition of Position Control using Low Frequency), The 13th Asia-Pacific Vibration Conference, 2009年11月, Christchurch, New Zealand
  22. 阿部・田中, Active Noise Control without reference signals for periodic noise, The 13th Asia-Pacific Vibration Conference, 2009年11月, Christchurch, New Zealand
  23. 秋山・田中, Tracking-type Active Noise Control Using Strongly High Directivity Speaker, The 13th Asia-Pacific Vibration Conference, 2009年11月, Christchurch, New Zealand
  24. 田中・田中, Active Control of Sound using Digital Beam Steering Technique, The 13th Asia-Pacific Vibration Conference, 2009年11月, Christchurch, New Zealand
  25. 岩本・田中, Active wave control of a rectangular panel using a wave filter constructed with smart mode sensors, The 13th Asia-Pacific Vibration Conference, 2009年11月, Christchurch, New Zealand
  26. 米山・田中, Smart Film Sensors and Actuators Using Electrode Patterning Technique of Film Surface, The 13th Asia-Pacific Vibration Conference, 2009年11月, Christchurch, New Zealand
  27. 福田・貝塚・田中・中野, Active Vibration Control for Improving Sound Transmission Loss using Window Pane, The 13th Asia-Pacific Vibration Conference, 2009年11月, Christchurch, New Zealand
  28. 多嘉良・田中, Active control of sound in a cavity using power mode theory, The 13th Asia-Pacific Vibration Conference, 2009年11月, Christchurch, New Zealand
  29. 秦・田中, Self-levitated machinery using ultrasonic wave levitation, The 13th Asia-Pacific Vibration Conference, 2009年11月, Christchurch, New Zealand
  30. 田中・野副, Non-contact transportation using ultrasonic wave levitation, Euronize 2009, 2009年10月, Edinburgh, Scotland
  31. 眞田・東山・田中, Investigation of optimal excitation methods used in the active control of sound transmission through a panel, Euronize 2009, 2009年10月, Edinburgh, Scotland
  32. 岩本・田中, Active control of progressive waves in a rectangular cavity, Euronize 2009, 2009年10月, Edinburgh, Scotland
  33. 岩本・田中, Active wave control of a rectangular panel using smart sensors, The 16th International Congress on Sound and Vibration, 2009年10月, Krakow, Poland
  34. 田中, Active mode localization control of a periodical vibratory system, The 16th International Congress on Sound and Vibration, 2009年10月, Krakow, Poland
  35. 田中・高橋, Active acoustic power control using zero power strategy, Internoise 2009, 2009年8月, Ottawa, Canada
  36. 田中・田中, Active noise control using a steerable parametric array loudspeaker, ACTIVE 2009, 2009年8月, Ottawa, Canada
- ほか国内学会の発表 23 件
- 〔図書〕 (計 1 件)  
『振動音響制御』, 田中信雄著, コロナ社, 2009, 258p
- 〔その他〕  
ホームページ等  
<http://mctnt5.sd.tmu.ac.jp>
6. 研究組織
- (1) 研究代表者  
田中 信雄 (TANAKA NOBUO)  
首都大学東京・システムデザイン研究科・教授  
研究者番号 : 70305423
- (2) 研究分担者  
岩本 宏之 (IWAMOTO HIROYUKI)  
首都大学東京・システムデザイン研究科・助教  
研究者番号 : 90404938