

## 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25年 5月31日現在

機関番号：12608

研究種目：基盤研究（B）

研究期間：2010～2012

課題番号：22360223

研究課題名（和文） 地震・風外乱に対する空間構造物の包括的な応答制御手法の開発

研究課題名（英文） Development of Comprehensive Response Control Methods for Spatial Structures Subjected to Earthquake and Wind Excitation

研究代表者

小河 利行 (OGAWA TOSHIYUKI)

東京工業大学・大学院理工学研究科・教授

研究者番号：20126270

研究成果の概要（和文）：本研究は、地震や台風のような自然災害に対する空間構造物の挙動の解明および包括的な応答制御手法の開発を目標として行われた。振動台実験、風洞実験、数値解析を行うことで、大地震時、強風中における空間構造物の挙動を分析した。また、応答制御手法に関しては、パッシブなエネルギー吸収ダンパーのみでなく、フィードバック制御によるアクティブ制御や応答制御を最適化問題として扱うことで応答が最小となる形態を探索する手法について検討した。

研究成果の概要（英文）：This study was performed with the aims of elucidation of response behavior of spatial structures and development of comprehensive response control methods for natural disasters such as earthquakes or typhoon. The response behavior of spatial structures subjected to large earthquake motions or in strong wind was investigated by carrying out the vibration tests, wind tunnel tests and numerical analyses. For the response control methods, in addition to the passive response control, the active response control by feedback control and the method of searching for the forms with minimum response by treating the response control as an optimization problem were examined.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2010年度	1,700,000	510,000	2,210,000
2011年度	2,000,000	600,000	2,600,000
2012年度	2,500,000	750,000	3,250,000
年度			0
年度			0
総計	6,200,000	1,860,000	8,060,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：建築学・建築構造・材料

キーワード：空間構造物、地震時応答、強風時応答、応答制御手法、パッシブ制振、アクティブ制振、最適化問題、防災技術

## 1. 研究開始当初の背景

我が国を取り巻く自然災害条件は年々厳しさを増している。地震に関しては2008年岩手・宮城内陸地震に続き東海、中部、関東

を震源とする大規模地震の発生が高い確率で予測されている。台風の規模も毎年拡大する傾向にあり、今までの想定を超えた強風が構造物に加わる可能性が高まっている。これ

らによる被害は防災拠点となるべき空間構造物においても発生しており、近年の大地震（2004年新潟中越地震、2008年岩手・宮城内陸地震等）では、構造部材への被害に加え、天井、照明などの大規模な崩落が生じ、また、2005年には台風に伴う膜構造屋根や屋根仕上げの被害が相次いだ。空間構造物の損傷は、災害時の人的被害およびライフラインへの甚大な影響を与えるにも関わらず、形状が特殊であるために普遍的な外乱に対する応答性状の把握および損傷制御に有効な防災技術の開発は進んでいないのが現状である。

これらに関係する研究については、以下のような現状である。空間構造物では地震荷重がクリティカルになる場合と風荷重がクリティカルになる場合が交錯しているにも関わらず、研究者が耐震分野と耐風分野に分かれているため、総合的評価があまり行われていない。また、海外においても相応する研究は殆ど行われていない。一方、エネルギー吸収機構を用いた振動制御手法は、ビル構造物に対しては研究開発が進んでいるものの、空間構造物に関しては、応答性状自体も整理されておらず、未だに一般化していない。また、強風に対する応答制御手法については研究が緒についていない。さらに、天井材、屋根材等に関しては、近年研究が始められたばかりであるというのが現状である。

## 2. 研究の目的

本研究の目的は、地震や台風のような自然災害に対する空間構造物（イベントスペースや体育館等）の挙動の解明および包括的な防災技術の確立である。空間構造物は、地震や台風等の災害時に避難場所、防災拠点となるべき建築物である。しかし、年々規模が拡大している台風や多発している大地震では、屋根構造部材および下部構造部材の破断、座屈、天井材の落下、屋根仕上げの破損等が発生し、避難施設としての機能を維持できない空間構造物が多く見られた。このような現状においても、形状の特殊性のため、外乱に対する普遍的な応答性状の把握および損傷制御に有効な防災技術の開発が進んでいない。

そこで本研究では、現在までに行ってきた基盤研究を更に発展させ、応答制御手法として、パッシブな制振技術であるエネルギー吸収ダンパーのみでなく、アクティブな制振技術であるフィードバック制御を取り入れた新しい損傷低減構法および改修構法の提案を行う。さらに、応答制御を最適化問題として扱い、応答を低減させる形態やダンパーの最適配置を探索する。最終的に、現在までの基盤研究による成果と併せ、空間構造物の応答制御技術を体系化し、耐震・耐風の双方を対象とする包括的な防災技術を確立する。

## 3. 研究の方法

本研究では、以下に示す方法に従い研究を遂行し、目的の達成を目指す。

### (1) 提案した応答制御手法の適用性の検証

現在までに提案してきた応答制御手法の適用性を検証するため、改修の必要な空間構造物の抽出を行う。この結果を基に以降で行う検討で対象とする空間構造物を設定する。

### (2) アクティブな応答制御技術を応用した応答制御手法の提案

アクティブな応答制御技術を応用した応答制御手法を開発し、その応答低減効果について数値解析により検討する。ここでは、フィードバック制御を応答制御手法として採用する。屋根構造部材または節点に制御力を与えることにより、屋根部の応答を低減する。この結果より具体的な損傷低減構法を開発する。

### (3) 振動台実験によるアクティブな応答制御技術の適用性の検証

(2)において検討したアクティブな応答制御技術による応答低減効果を振動台実験によって確認する。フィードバック制御による応答制御には、フィルム状圧電素子を使用する。ここで対象とする空間構造物は、アーチ構造物、屋根型円筒ラチスシェル構造である。計測装置として、非接触型光学式変位計であるモーションキャプチャシステムを使用することにより、現在まで明らかにできなかった構造物全体の挙動が明らかになる。

### (4) 強風に対する空間構造物の応答制御を目指した数値解析手法の開発

アクティブな応答制御手法を強風中の空間構造物に適用することを目指し、流体解析手法の開発を行う。流体解析により応答制御手法を適用した場合の強風中の空間構造物の応答を再現するためには、数値解析の高速化、流体と構造物の連成解析の適用、解析精度の向上が不可欠となる。解析には MCGG 法（マルチグリッド法）を適用した三次元流体解析プログラムを使用し、流体と構造物の連成解析の適用を試みる。最終的に、強風に対する空間構造物の応答制御に関する解析を行い、応答低減について分析する。

### (5) 最適化問題を利用した応答制御手法の提案

最適化問題を応答制御手法として応用することで、新たな応答制御手法の開発を試みる。ここでは、耐震・耐風の両者を対象とすることで、自然災害に対しロバスト性のある応答制御手法の開発を目指す。形状最適化により、例えば応答変位、応答軸力等の応答を

抑制する形態を創生する。

(6) 制振部材を用いた学校体育館の改修および2次部材の損傷制御評価

東日本大震災で被災した茨城県の学校体育館を対象に、制振技術を応用した改修検討、およびそれらが天井材、照明等の損傷・落下にどのような改善効果を及ぼすかを検討する。対象建物は地震により鉛直ブレースが座屈・破断し、天井照明が多数落下した中学校体育館である。まず、ブレースの繰り返し実験により被災状況を詳細に再現し、続いて現在一般的に行われている強度型補強および制振部材を用いた補強について実験的・解析的に検討し、最適な制振改修工法を提案するとともに、同工法が建物の耐震性能および2次部材被害の改善に与える効果を検証する。

(7) 空間構造物に対応した応答制御技術の体系的整理と耐震・耐風を対象とした包括的防災技術の確立

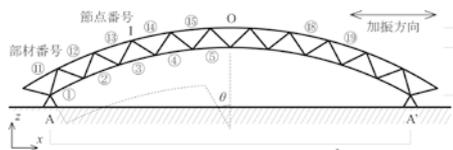
本研究における最終的な目的は、空間構造物に対応した耐震・耐風の双方に対する応答制御技術および応答制御手法の体系的整理である。上記の成果をまとめることにより、構造部材のみでなく、天井材、屋根材等の2次部材までを対象とした包括的な応答制御手法が確立され、大地震時、強風時にも、構造体だけでなく2次部材も健全に保つことができ、避難拠点として機能する空間構造物が実現されることとなる。

4. 研究成果

本研究課題により、以下のような研究成果が得られた。

(1) アクティブ制振による空間構造物の応答低減に関する検討

ここでは、空間構造物の制振手法としてアクティブ制振を採用し、その応答低減効果について、数値解析および振動実験により分析



(a) 解析モデル



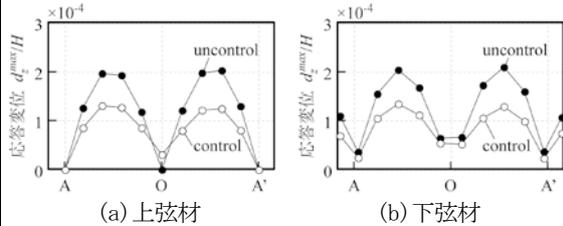
(b) 実験モデル

図1 対象とした空間構造物

した。

対象とした空間構造物を図1に示す。対象とする構造物は、基本的な空間構造物であるアーチ構造物である。

アクティブ制振の手法としては、最適制御理論を採用した。なお、数値解析による検討では、より高速な制御力の算出を目指し、モード制御手法を最適制御理論に適用した手法を採用している。数値解析による応答低減効果の一例を図2に示す。アクティブ制振を適用することにより、最大変位応答を約6割に低減可能であることがわかる。



(a) 上弦材 (b) 下弦材  
図2 アクティブ制振による応答低減効果  
(地震波入力, 数値解析)

図3に振動実験における最大応答変位の制御の有無による応答の比を数値解析結果と比較して示す。振動実験においては、制御に遅れ時間が発生することが原因となり、地震波入力においては応答低減効果が小さくなる場合がある。しかし、正弦波入力においては約7割に低減することができた。

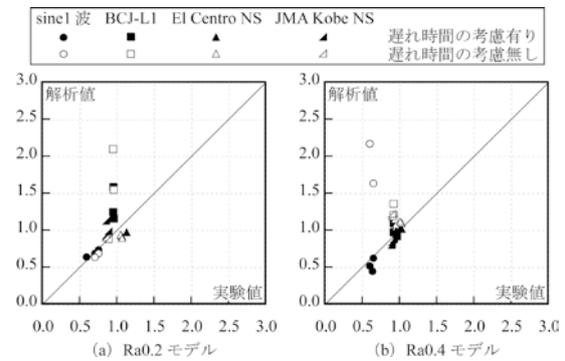


図3 アクティブ制振実験による応答低減効果

(2) 強風に対する空間構造物の応答制御を目指した数値解析手法の開発

ここでは、(1)に示したアクティブな応答制御を強風に対しても行うことを目指し、流体解析手法の開発を行った。

対象とした空間構造物は、図4に示すHP



図4 風洞実験モデル (柔模型, HP ラチスシェル)

ラチスシェルである。

まず、強風中における空間構造物の挙動を把握、分析することを目的として、柔模型による風洞実験を行った。その結果、膜屋根面の平均変位は速度圧に比例し、HP 屋根のアーチ方向である風向  $0^\circ$  で大きく、サスペンション方向である風向  $90^\circ$  で小さくなること、変位 RMS 値は速度圧の 1.2 乗程度に比例して大きくなることがわかった。実験結果を目標として、流体解析による再現を試みた。流体解析手法では、三次元流体解析に ALE 法を導入することで、流体と構造の連成を再現した。図 5 に風洞実験と流体解析結果の比較を示す。平均変位、変位 RMS 値共に、変形量に若干の差があるものの、分布性状では概ね良い対応が見られた。

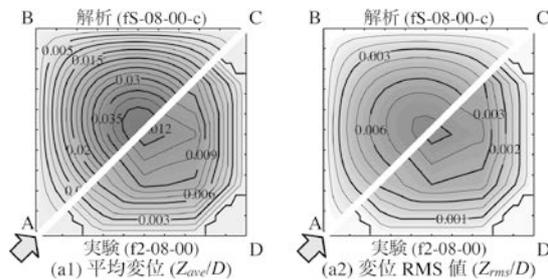


図 5 風洞実験と流体解析結果の比較 (風向  $0^\circ$ )

(3) 応答の抑制を目的とした最適化問題を利用した形態の創生

ここでは、最適化問題を応答制御手法の 1 つとして応用することで、地震荷重下における空間構造物の線形座屈荷重 (強度) が最大となる形態の創生を試みた。

対象とした空間構造物は、図 6 に示す矩形平面を有する二方向格子シェル (初期形状) である。

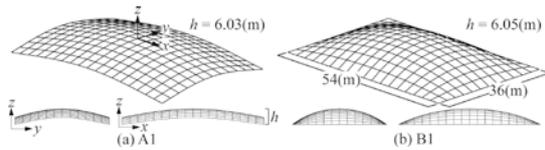


図 6 解析対象モデル (二方向格子シェル)

曲面の記述にはベジエ曲面を、最適化手法には逐次二次計画法を用いた。対象とする荷重は、静的荷重であり、固定荷重と静的地震荷重とした。図 7 に静的地震荷重下において座屈荷重が最大化された時の形状を示す。図中の数値より、最適化を行うことで図 6 に示

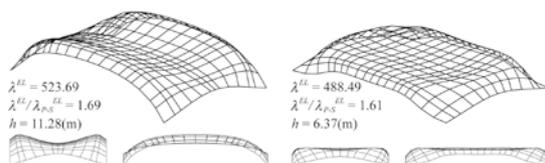


図 7 地震荷重下における最適化形状

す初期形状に比べて、約 1.6 倍強度の大きな形状を創生することができた。ここでは、強度に着目した最適化を行ったが、今後は応答の低減を考えた剛性に着目した最適化についても考える必要がある。

(4) 制振部材を用いた体育館の耐震改修とその地震応答

ここでは、実在する学校体育館を対象とし、耐震改修手法の違いが、空間構造物の屋根面の応答に与える違いについて分析した。

対象とした学校体育館を図 8 に示す。屋根

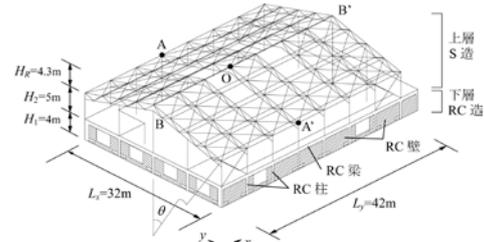


図 8 解析対象モデル (学校体育館, 山形モデル)

形状は、円筒形および山形の 2 種類とした。

耐震改修手法としては、強度型補強、弾塑性ダンパーまたは粘性ダンパーを用いた制震型補強を対象とした。

図 9 に各層の規準化応答加速度を示す。図より、制震型補強の応答加速度は、強度型補強に比較して、抑えられていることがわかる。

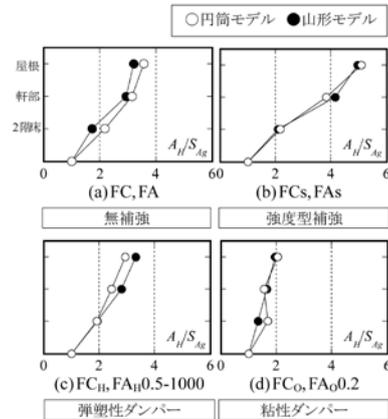


図 9 各層の規準化応答加速度

最後に、構造耐震判定指標  $I_{SD}$  による屋根 2

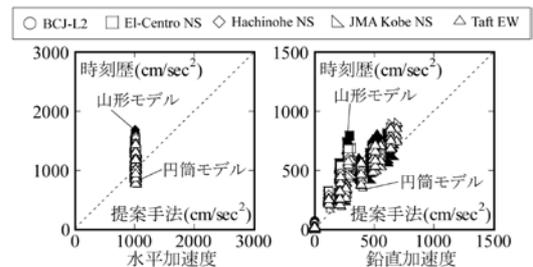


図 10 屋根 2 次部材検定用応答評価

次部材検定用応答評価についても検討している。その結果を図 10 に示す。提案手法については割愛するが、時刻歴応答と提案手法による全節点の応答値を比較すると、概ね良い対応が見られる。

(5) 成果によるインパクト、今後の課題

以上の研究成果により、空間構造物の地震・風外乱に対する応答制御手法が一步前進したものとする。この中で、今まで空間構造物にはほとんど適用されてこなかった、アクティブ制振の有用性が示された。また、最適化問題を応答制御に利用することの可能性も示された。学校体育館の改修手法に関しては、応答低減を実現しながら、二次部材までを含めた応答評価が可能となった。また、風外乱に関しては、本研究課題において作成された数値解析プログラムにより、流体と空間構造物の連成を考慮した解析が可能となった。また、本解析プログラムを用いることにより、今後、応答制御手法の開発を推進して行く予定である。

今後の課題としては、より高速に制御力が算出可能なアクティブ制振手法の開発および制振手法の実構造物への適用、最適化問題を利用した応答が低減される形態の創生、流体解析プログラムを使用した風外乱に対する応答制御手法の開発が挙げられる。

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 18 件)

- ① 箕輪健一, 熊谷知彦, 小河利行, モード制御手法を用いたアーチ構造物のアクティブ制振, 日本建築学会構造系論文集, Vol.78, No.687, pp. 939-948, 2013, 査読有
- ② 熊谷知彦, 箕輪健一, 桑原諒子, 小河利行, 圧電フィルムを用いたアーチ構造物のアクティブ制振実験, 日本建築学会構造系論文集, Vol.78, No.686, pp. 771-779, 2013, 査読有
- ③ 小河利行, 綿貫雄太, 熊谷知彦, 安竹涼平, 増田圭司, 佐々木康人, サグスパン比の異なる直線推動型HP屋根面に作用する風圧力の特徴, 構造工学論文集, Vol.59B, pp.497-503, 2013, 査読有
- ④ T.Takeuchi, S.D.Xue, S.Nakazawa, S.Kato, Recent Applications of Response Control Techniques to Metal Spatial Structures, Journal of the International Association for Shell and Spatial Structures, Vol.53, No. 2, n.172, pp.99-110, 2012, 査読有
- ⑤ 三松あずさ, 熊谷知彦, 小河利行, 富本 淳, 複数のTMDを用いたアーチ構造物の振動制御, 構造工学論文集, Vol.58B, pp.489-495,

2012, 査読有

- ⑥ 竹内 徹, 湯澤優登, 熊谷知彦, 小河利行, 制振部材を用いた鉄骨造体育館における屋根面架構の耐震性能, 日本建築学会構造系論文集, Vol.76, No.669, pp.1989-1995, 2011, 査読有
  - ⑦ K.Minowa, T.Kumagai, R.Kuwahara and T.Ogawa, Vibration Control Tests of Arch Structures with Piezoelectric Films, Proceedings of IASS-IABSE 2011, CD-ROM, 2011, 査読有
  - ⑧ 箕輪健一, 熊谷知彦, 小河利行, 最適制御理論を用いたアーチ構造物のアクティブ制振, 構造工学論文集, Vol.57B, pp.169-176, 2011, 査読有
  - ⑨ T.Takeuchi, Y.Tutsumi, T.Kumagai and T.Ogawa, Seismic Retrofit of Steel-structure School Gymnasia with Energy Dissipation Braces, Proceedings of IASS 2010, CD-ROM, 2010, 査読有
  - ⑩ K.Minowa, T.Kumagai and T.Ogawa, Seismic Response Controls of Arch Structures on Optimal Control Theory, Proceedings of IASS 2010, CD-ROM, 2010, 査読有
  - ⑪ T.Kumagai, F.Ushiwata, T.Takeuchi and T.Ogawa, Vibration Tests on Seismic Response Reduction of Cylindrical Lattice Shell Roof by Viscous Damper Added to Substructures, Proceedings of IASS 2010, CD-ROM, 2010, 査読有
  - ⑫ 竹内 徹, 堤 友紀, 熊谷知彦, 小河利行, 制振部材を用いた鉄骨造学校体育館の耐震改修および屋根部の地震応答, 日本建築学会構造系論文集, Vol.75, No.655, pp.1891-1900, 2010, 査読有
- [学会発表] (計 25 件)
- ① T.Takeuchi, Retrofit of Damaged Gymnasia and Towers according to Response Control Concept, Joint Conference 10CUEE, 2013年3月2日, 東京工業大学(東京都)
  - ② T.Kumagai, Vibration Tests on Single Layer Lattice Domes Subjected to Horizontal Bi-directional Earthquake Motions, Joint Conference 10CUEE, 2013年3月1日, 東京工業大学(東京都)
  - ③ K.Minowa, Active Vibration Control Tests of Arch Structures Using Acceleration Feedback, Joint Conference 10CUEE, 2013年3月1日, 東京工業大学(東京都)
  - ④ 箕輪健一, モード制御手法を用いたアーチ構造物のアクティブ制振 その2 実験結果の評価とアクチュエータ最適配置, 日本建築学会大会学術講演会, 2012年9月13日, 名古屋大学(愛知県)
  - ⑤ 重田幸乃, モード制御手法を用いたアーチ

構造物のアクティブ制振 その 1 アクティブ制振実験による地震応答制御, 日本建築学会大会学術講演会, 2012年9月13日, 名古屋大学 (愛知県)

⑥綿貫雄太, 直線推動型 HP 屋根面に作用する風圧力の性状 その 2 サグスパン比が風圧力に与える影響, 日本建築学会大会学術講演会, 2012年9月12日, 名古屋大学 (愛知県)

⑦安竹涼平, 直線推動型 HP 屋根面に作用する風圧力の性状 その 1 実験及び数値解析概要と変動風圧の特性, 日本建築学会大会学術講演会, 2012年9月12日, 名古屋大学 (愛知県)

⑧ T.Kumagai, Dynamic Responses of Arch Structures with Plural TMDs, Joint Conference 9CUEE & 4ACEE, 2012年3月7日, 東京工業大学 (東京都)

⑨安竹涼平, 複数の二次元コースメッシュを用いたマルチグリッド法によるドーム周辺の強風シミュレーション, 日本建築学会大会学術講演会, 2011年8月25日, 早稲田大学 (東京都)

⑩湯澤優登, 制振部材を用いた鉄骨造学校体育館における屋根面架構の耐震性能 その 2 制振部材剛性, 降伏変形の最適化, 日本建築学会大会学術講演会, 2011年8月23日, 早稲田大学 (東京都)

⑪渡辺覚, 制振部材を用いた鉄骨造学校体育館における屋根面架構の耐震性能 その 1 屋根面ブレースの降伏を考慮した架構の応答, 日本建築学会大会学術講演会, 2011年8月23日, 早稲田大学 (東京都)

⑫熊谷知彦, 圧電フィルムを用いたアーチ構造物のアクティブ制振実験 その 2 制御時におけるアーチ構造物の応答性状, 日本建築学会大会学術講演会, 2011年8月23日, 早稲田大学 (東京都)

⑬箕輪健一, 圧電フィルムを用いたアーチ構造物のアクティブ制振実験 その 1 試験体および制御システム, 日本建築学会大会学術講演会, 2011年8月23日, 早稲田大学 (東京都)

⑭三松あずさ, 複数の TMD を用いたアーチ構造物の振動制御, 日本建築学会大会学術講演会, 2011年8月23日, 早稲田大学 (東京都)

⑮綿貫雄太, 複数の二次元コースメッシュを用いたマルチグリッド法による円筒屋根周りの乱流解析 その 2 マルチグリッド法の効果の検証, 日本建築学会大会学術講演会, 2010年9月10日, 富山大学 (富山県)

⑯山下拓三, 複数の二次元コースメッシュを用いたマルチグリッド法による円筒屋根周りの乱流解析 その 1 提案するマルチグリッド法の概要, 日本建築学会大会学術講演会, 2010年9月10日, 富山大学 (富山県)

⑰箕輪健一, 最適制御理論を用いたアーチ構

造物の地震応答制御, 日本建築学会大会学術講演会, 2010年9月9日, 富山大学 (富山県)

⑱湯澤優登, 制振部材を用いた学校体育館の耐震改修および屋根部の地震応答評価 その 2 耐震指標の評価手法, 日本建築学会大会学術講演会, 2010年9月9日, 富山大学 (富山県)

⑲中山雄貴, 制振部材を用いた学校体育館の耐震改修および屋根部の地震応答評価 その 1 制振部材による屋根部の応答低減効果, 日本建築学会大会学術講演会, 2010年9月9日, 富山大学 (富山県)

〔図書〕 (計 1 件)

①小河利行 他, 日本建築学会, ラチスシェルの座屈と耐力, 2010, pp.367 (pp.261-281)

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

小河 利行 (OGAWA TOSHIYUKI)  
東京工業大学・大学院理工学研究科・教授  
研究者番号: 20126270

### (2) 研究分担者

熊谷 知彦 (KUMAGAI TOMOHIKO)  
東京工業大学・大学院理工学研究科・助教  
研究者番号: 70376945

竹内 徹 (TAKEUCHI TORU)

東京工業大学・大学院理工学研究科・教授  
研究者番号: 80361757

### (3) 連携研究者

無し