

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 5 月 19 日現在

機関番号：11301

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2013～2014

課題番号：25630436

研究課題名(和文) 空力弾性の振幅増大不安定を逆手に取った革新的高出力スイッチング振動発電

研究課題名(英文) Powerful power-generation by using in underhanded way aeroelastic instability of growing vibration

研究代表者

楨原 幹十郎 (Makihara, Kanjuro)

東北大学・工学(系)研究科(研究院)・准教授

研究者番号：60392817

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,100,000円

研究成果の概要(和文)：翼フラッタから効果的に電気エネルギーを取り出す環境発電(ハーベスティング)システムを研究した。片持ち板翼のダイナミクスを解析するため、準定常空気力学理論および有限要素法を用いた。スイッチング電気回路とピエゾパッチを使用することにより、超音速フラッタから効果的なハーベスティングを実現した。超音速フラッタにおいて、ピエゾパッチを用いたスイッチング手法の評価を行った。従来のハーベスティングシステムと比較して10倍以上の電気エネルギーを発生させることを実証した。

研究成果の概要(英文)：Eco-generation of electrical energy harvested from the flutter phenomenon of a plate wing is studied using the quasi-steady aerodynamic theory and the finite element method. The wing is modeled as sounding rockets' wings. We harvest electrical energy from supersonic flutter by using piezoelectric patches and electric devices. To assess their harvesting performances, we simulate flutter dynamics of the plate wing to which piezoelectric patches are attached. We demonstrate that our harvesting system can generate 10 times more electrical energy from wing flutter than conventional harvesting systems can.

研究分野：航空宇宙工学

キーワード：自然エネルギー フラッタ振動発電 空力弾性 環境対応 知能機械

1. 研究開始当初の背景

これまで、フラッタ現象は、特に航空宇宙工学の分野では避けるべきものと考えられてきた。空力弾性振動の下で、電磁誘導変換器を翼に付加してエネルギーを取り出す試みは提唱されている。しかしながら、空気力学の専門家だけで研究がなされ、空気力学のフラッタ計算に終始していた。構造・制御・電気の観点に欠けており、現実的实现には程遠かった。しかも、整流ダイオードブリッジを繋ぐのみで、回路制御の工夫が無いために、回収エネルギーが圧倒的に低く、発展性・将来性が無かった。

2. 研究の目的

申請者が提案する「空力弾性の振幅増大不安定を逆手に取った革新的高出力スイッチング振動発電」の数値解析などによる実証が研究目的である。元来、空力弾性（空気力学と構造弾性力学の練成）によって生じるフラッタは、振幅を増大させるので、有害な現象として避けられてきた。しかし、近年注目されている自然エネルギー利用の一つである風振動発電の立場から見直せば、電気エネルギーを取り出すハーベスティング源として振幅が大きい現象は魅力的である。

3. 研究の方法

「空力弾性の振幅増大不安定を逆手に取った革新的高出力スイッチング振動発電」を多角的に考察する。エネルギー損失を小さくし発電能力を上げる新規アイデア考案を重要視する。スイッチング発電能力・外部信号のエラーやノイズに対するロバスト性・各素子のエネルギー損失・フラッタ・スイッチング発電器としての将来性や拡張性などを考察する。解析結果と構造・圧電特性を踏まえ、スイッチング発電を実現する電気・電子素子回路を含めたスイッチング発電システムを設計する。制御器と振動モード推定を行うオブザーバーのパラメータ決定の為に、数値計算プログラムを自作する。このプログラムは、実験だけでは得られないパラメトリックスタディやシステム最適化に用いる。

4. 研究成果

(1) 観測ロケットの翼フラッタモデル

本研究では、観測ロケットの翼フラッタからエネルギーを取り出す技術に着目する。宇宙科学研究所・宇宙航空研究開発機構は観測ロケット S-310 を開発しており、本研究ではこれを例として考える。このロケットは直径 310 mm の 1 段式ロケットであり、高度 150 km まで到達する。後方に 4 つのチタン合金製の尾翼を有している。約 23 秒間で約マッハ 4.6 に到達することから、ほとんどの間超音速で飛行する。図 1 に示すチタン合金板により、超音速で飛行する観測ロケットの翼構造を模

擬する。観測ロケットの飛行中にこの板は超音速フラッタにさらされる。本研究では、翼フラッタからエネルギーを取り出すことを想定しており、片持ち板翼を用いる。

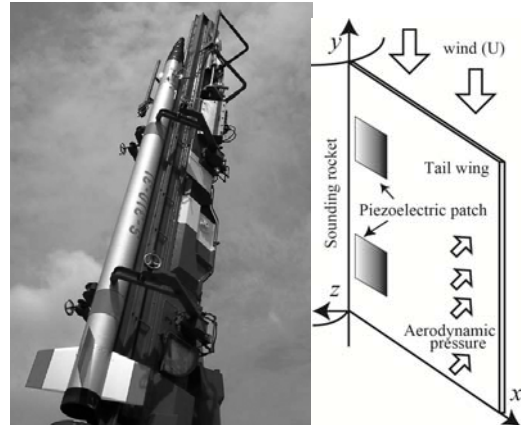


図1 フラッタを受けるロケット尾翼（左）とその数学モデル（右）

翼表面には piezo パッチが取り付けられており、翼変形から電気エネルギーを発生させる。超音速における空気力学的圧力は、準定常一次ピストン理論で表され、速度 U で飛行するロケット翼板に働く圧力は次式で示される。

$$p - p_\infty = \frac{2q}{\sqrt{M^2 - 1}} \left[\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{M^2 - 2}{M^2 - 1} \frac{1}{U} \frac{\partial u}{\partial t} \right] \quad (1)$$

他のパラメータは付録 A と B で定義される。翼両側に圧力が作用すると、翼に働く圧力 $p_a(x, y, t)$ は次式で表される。

$$p_a(x, y, t) = \frac{4q}{\sqrt{M^2 - 1}} \left[\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{M^2 - 2}{M^2 - 1} \frac{1}{U} \frac{\partial u}{\partial t} \right] \quad (2)$$

(2) 翼のハーベスティング理論

図 1 に示される piezo パッチは、厚さ方向 (z 方向) に分極し、面内方向 ($x-y$ 平面) は等方性であると仮定する。従って、その構成方程式は次式で与えられる。

$$\sigma_p = \mathbf{c}_p^D \varepsilon_p - \mathbf{h} D_z, \quad E_z = -\mathbf{h}^T \varepsilon_p + \beta_z^S D_z \quad (3)$$

翼構造に働く応力とひずみの関係は

$$\sigma_w = \mathbf{c}_w \varepsilon_w \quad (4)$$

となり、線形ひずみと変位の関係は、Kirchhoff-Love 仮定に基づき次式で表される。

$$\varepsilon = -z \left[\frac{\partial^2}{\partial x^2}, \frac{\partial^2}{\partial y^2}, 2 \frac{\partial^2}{\partial x \partial y} \right]^T u(x, y, t) \quad (5)$$

ハミルトンの原理を考え、仮想仕事 δW は次式で示される。

$$\delta W = \int_S \delta u [f(x, y, t) + p_a(x, y, t)] dS + \sum_{j=1}^{n_p} V_j \int_{S_{pj}} \delta D_{zj} g_j(x, y, z) dS \quad (6)$$

ここで、 $f(x, y, t)$ は翼に垂直な外力であり、 V_j は一般化外力として j 番目の Piezoパッチにかかる電圧である。式(1)~(6)より、複数の Piezoパッチを取り付けた片持ち翼の運動方程式は以下で表される。

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{x}} + \mathbf{K}\mathbf{x} + \theta\mathbf{A}\mathbf{x} = \mathbf{B}\mathbf{Q} + \mathbf{f}, \quad (7)$$

$$\mathbf{V} = -\mathbf{B}^T\mathbf{x} + \mathbf{C}^{-1}\mathbf{Q} \quad (8)$$

$\mathbf{x} = \Phi\mathbf{q}$ によって変換し、モード減衰比を導入すると、式(7)は次式で表される。

$$\ddot{\mathbf{q}} + \Xi\dot{\mathbf{q}} + (\Omega + \theta\Phi^T\mathbf{A}\Phi)\mathbf{q} = \Phi^T\mathbf{B}\mathbf{Q} + \Phi^T\mathbf{f} \quad (9)$$

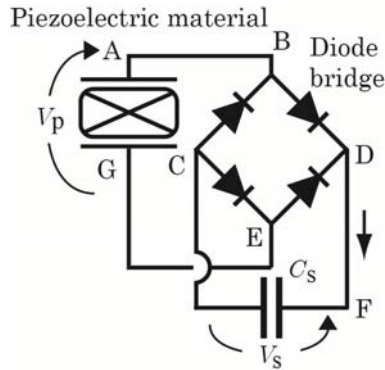


図2 回路I：従来のハーベスティング回路

圧電材料を用いてエネルギーを発生させる、従来のエネルギーハーベスティング装置は、振動する圧電構造物とダイオード整流システムを用いている。図2に示される従来型の回路Iは、4つのダイオードを用いたダイオードブリッジから成る従来のハーベスティング回路である。ダイオードブリッジは圧電材料に接続され整流を行っている。このハーベスティングシステムは多くの振動系で使用されているが、一般に電気エネルギーを十分に取り出すことができない。

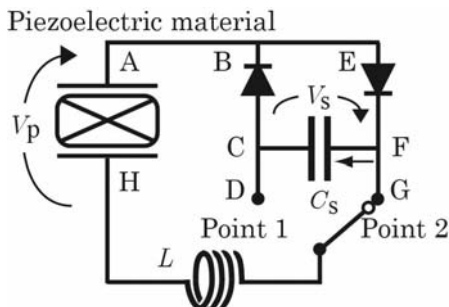


図3 回路II：高効率ハーベスティング回路

エネルギーハーベスティングの性能を向上させるため、効果的なエネルギーハーベスティング機構として、我々はエネルギー回生型準能動的手法を利用する。この手法は図3に示されるように圧電材料に接続された回路IIを用いている。エネルギー回生メカニズムでは、圧電素子に切り替えスイッチ付きのLC電気回路を取り付ける。構造振動により圧電素子に

力が生じ、その結果電荷が溜まる。圧電素子に望ましい変形が発生するように、スイッチングによって電流を流し溜まった電荷の符号を反転させる。電流を流さない状態で、構造物が振動すると圧電効果により圧電素子に電荷が蓄えられる。次に適切にスイッチを切り替えると、電流が流れ、電荷の正負を反転する。電荷量はスイッチングの度に加算的に増加するので、バンバン制御のように強力な制御となる。スイッチの切り替え操作のみで制御を行うので、系にエネルギーを与えず、制御機能に不具合があっても常に安定である事が特徴である。回路IIは2つのダイオードと切り替えスイッチのみで構成される。切り替えスイッチはポイント1またはポイント2に接続され、電流の流れを制御する。我々の過去の研究によると、この先進的エネルギー回生型手法は同時に複数の回路と複数Piezoパッチを扱うことが可能である。ハーベスティングシステムは回路と n_p 個のPiezoパッチから成ると仮定する。 Q_j は j 番目のPiezoパッチの電荷量である。 Q_{Tj} は j 番目のPiezoパッチに於けるターゲット(Target)として制御目標とされる電荷量である。この Q_j は、能動的制御則により決定される能動的フィードバック入力である。スイッチングロジックは以下の通りである。

$$Q_{Tj} < 0, \quad j \text{ 番スイッチをポイント1,}$$

$$Q_{Tj} > 0, \quad j \text{ 番スイッチをポイント2.} \quad (10)$$

この準能動的手法は、単にスイッチをポイント1とポイント2に切り替えているだけであるため、スイッチの動作によって振動エネルギーが増加されることはない。通常スループットのように不安定になる危険性がある能動的手法に比べ安全である。フラッタ問題では動圧によってモード周波数が変わる可能性がある。従って、モード分解に基づいた高度な制御は実用的ではない。モードに関する情報を用いずに適応的なスイッチング制御を行う一つの方法は、直接速度フィードバック制御に基づいた手法を取り入れるものである。すなわち Q_{Tj} を次式で表す。

$$Q_{Tj} \equiv -\dot{\epsilon}_{pj} \quad (11)$$

ϵ_{pj} は j 番目のPiezoパッチの歪である。

(3) 数値シミュレーション

図1に示した板翼におけるエネルギーハーベスティングの数値シミュレーションを行った。尾翼の大きさは $0.37 \times 0.49 \text{ m}$ 、厚さは 6.75 mm であり、材質はチタン合金 (Ti-6Al-4V) である。本研究において着目するハーベスティング性能を説明する S-310 の尾翼の簡単な

モデルである。翼の一端 ($x=0$) は固定されている。翼面上で piezo パッチ (Ceramic-Type, $154 \times 175 \times 0.5$ mm) は $0 \leq x \leq 0.154$ と $0.28 \leq y \leq 0.455$ の領域に取り付けられている。回路の全抵抗は 30Ω であり、圧電キャパシタンス C_p は 1.17×10^{-6} F である。空気力学的影響を考慮しない場合の 1 次モードと 2 次モードの等電荷固有周波数はそれぞれ 43.0 Hz と 84.5 Hz である。現実に即したシミュレーションを行うため、実際の物性材料に基づいてパラメータ値を決定した。

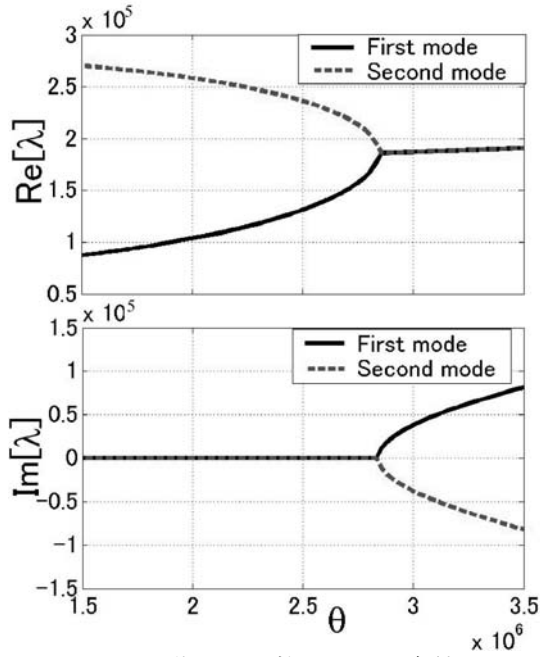


図 4 動圧の関数とした固有値

式(7)は次式の固有値問題に帰着される。

$$\det[-\lambda \mathbf{M} + \mathbf{K} + \theta \mathbf{A}] = 0 \quad (12)$$

ここで、 λ は複素固有値である。固有値解析は非制御系において行い、制御入力と外部擾乱は無視する。図 4 に固有値を動圧パラメータ θ の関数としてプロットしたものを示す。 θ が増加するに従って、実部の 2 つの曲線は相互に接近し、 $\theta = 2.86 \times 10^6$ のとき、 $\text{Re}[\lambda] = 1.86 \times 10^3$ で一致する。 θ がこの臨界値を取るとき、翼はフラッタ現象を生じる。この図は 1 次モードと 2 次モードのみの軌跡を示している。全ての臨界値の中で、この臨界値のときに動圧が最小値を取るため、本研究では 2 つの振動モードのみの関係に着目する。翼表面にホワイトノイズ荷重が作用する場合のフラッタダイナミクスのシミュレーションを行った。ランダム力 (ホワイトノイズ) の単位周波数当たりのパワースペクトル密度 (PSD) は、 $30 \sim 100$ Hz の帯域において $0.1 \text{ N}^2/\text{Hz}$ の一定値を取り、残りの帯域では

0 となる。従って、1 次モードと 2 次モードの周波数は非ゼロの PSD の周波数帯域に含まれる。動圧の臨界値 ($\theta = 2.86 \times 10^6$) における翼のダイナミクスの履歴を図 5 に示す。この履歴は非制御かつハーベスティング装置に接続していない場合のダイナミクスを示す。この臨界値において、翼はフラッタ現象を生じ、 $t = 0.3$ s のとき翼先端の変位は 0.017 m となり、圧電電圧は 96.6 V となった。

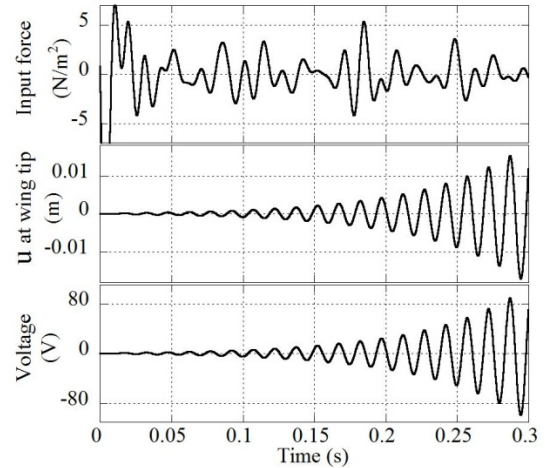


図 5 臨界動圧値における尾翼挙動

次に、蓄電コンデンサとダイオードブリッジをハーベスティング回路に接続した。蓄電キャパシタンスは、キャパシタンス比を用いて次式で表される。

$$C_s = \gamma C_p \quad (13)$$

$\gamma = 1.0$ の場合に、この 2 種類のシステムで取り出されたエネルギーの比較を図 6 に示す。 $t = 0.2$ s において、回路 II を用いたハーベスティングシステムは、回路 I を用いたシステムの 10 倍以上の電気エネルギーを発生できる。

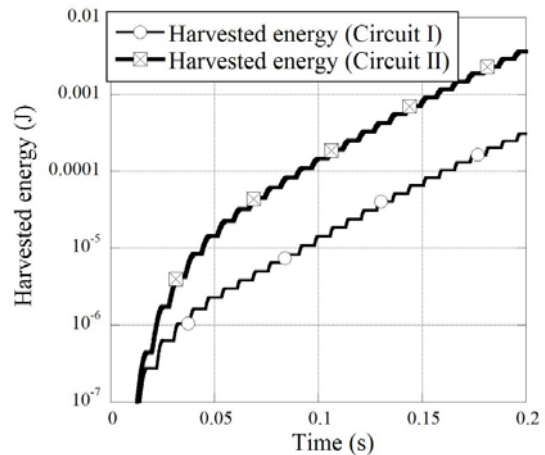


図 6 回収エネルギー比較 ($\gamma = 1.0$)

ハーベスティング性能を広く評価するため、さまざまな蓄電キャパシタンス C_s の値でシミュレーションを行った。各キャパシタンス

比 γ において、0 ~ 0.3 s 間の電力の時間平均値を計算し、 γ の関数としてプロットしたものを図 7 に示す。興味深いことに、回路 I のハーベスティングシステムでは、凡そ $\gamma = 31.6$ において最大電力が得られ、一方、回路 II のシステムでは、凡そ $\gamma = 5.62$ において最大電力が得られた。

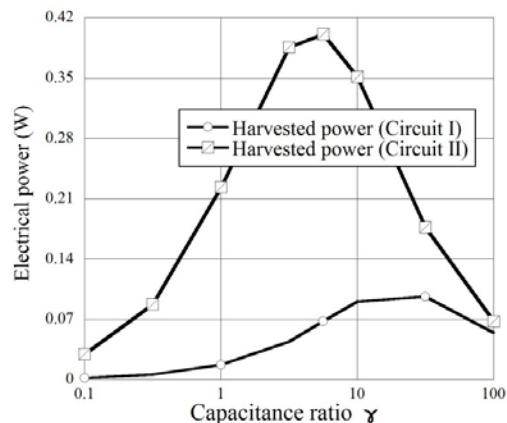


図 7 キャパシタンス比の関数とした電力

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 7 件)

- ① Makihara, K., Hirai, H., Yamamoto, Y., and Fukunaga, H., “Self-Reliant Vibration-Powered Generator for Wireless Health Monitoring Based on a Tuned-Mass-Damper Mechanism,” *Smart Structures and Systems*, 査読有, 2015, (出版中)
- ② Makihara, K., Yamamoto, Y., Yoshimizu, K., Horiguchi, C., Sakaguchi, H., and Fujimoto, K., “A Novel Controller to Increase Harvested Energy from Negating Vibration-Suppression Effect,” *Smart Materials and Structures*, 査読有, Vol. 24, 2015, Article No. 037005
DOI: 10.1088/0964-1726/24/3/037005
- ③ Yamamoto, Y., and Makihara, K., “Development of Wireless Health Monitoring System for Isolated Space Structures,” *Transactions of JSASS, Aerospace Technology Japan*, 査読有, Vol. 12, 2014, pp. 55-60
DOI: 10.2322/tastj.12.55
- ④ Takezawa, A., Makihara, K., Kogiso, N., and Kitamura, M., “Layout Optimization Methodology of Piezoelectric Transducers in Energy-Recycling Semi-Active Vibration Control Systems,” *Journal of Sound and Vibration*, 査読有, Vol. 333, 2014, pp. 327-344
DOI: 10.1016/j.jsv.2013.09.017
- ⑤ 山本雄大, 鈴木孝宜, 榎原幹十朗, 「過渡応答に対する完全セルフパワード・デ

ジタル振動制御システムの特性」, 日本機械学会論文集 C 編, 査読有, Vol. 79, No. 808, 2013, pp. 490-493

DOI: 10.1299/kikaic.79.5015

- ⑥ Makihara, K., Kuroishi, C., and Fukunaga, H., “Adaptive Multimodal Vibration Suppression using Fuzzy-Based Control with Limited Structural Data,” *Smart Materials and Structures*, 査読有, Vol. 22, 2013, Article No. 075031
DOI: 10.1088/0964-1726/22/7/075031
- ⑦ Shimose, S., Makihara, K., and Onoda, J., “Energy-Harvesting Using an Analog Circuit under Multimodal Vibration,” *Smart Materials Research*, 査読有, Vol. 2013, 2013, Article No. 736487
DOI: 10.1155/2013/736487

[学会発表] (計 7 件)

- ① 中野陽平, 竹澤晃弘, 榎原幹十朗, 北村充, 「エネルギー回生式セミアクティブ振動制御法の海洋構造物への適用に関する研究」, 平成 26 年日本船舶海洋工学会秋季講演会, 2014 年 11 月 20 日, 長崎ブリックホール, 長崎.
- ② Makihara, K., Yamamoto, Y., Horiguchi, C., Sakaguchi, H., and Fujimoto, K., “An Innovative Controller to Increase Harvested Energy,” *14th International Conference on Micro and Nanotechnology for Power Generation and Energy Conversion Applications*, 2014 年 11 月 19 日, Awaji Yumebutai International Conference Center, Awaji, Japan.
- ③ Yamamoto, Y., and Makihara, K., “Comprehensive Assessment of Smart Energy-Harvesting from Multimodal Vibrations,” *12th International Conference on Motion and Vibration Control*, 2014 年 8 月 5 日, Sapporo Convention Center, Sapporo, Japan.
- ④ Sakiyama, H., and Makihara, K., “Flutter Analysis of Deployable Wing using Multibody Dynamics,” *10th International Conference on Flow Dynamics*, 2013 年 11 月 26 日, Sendai International Center, Sendai, Japan.
- ⑤ Yamamoto, Y., and Makihara, K., “Smart Energy Harvester using Digitally Autonomous Device.” *10th International Conference on Flow Dynamics*, 2013 年 11 月 25 日, Sendai International Center, Sendai, Japan.
- ⑥ Makihara, K., and Yamamoto, Y., “Digital Energy Harvester for Random or Multimodal Structural Vibrations.” *ASME Conference on Smart Materials, Adaptive Structures and Intelligent Systems*, 2013 年 9 月 15 日, Snowbird, USA.
- ⑦ Yamamoto, Y., Suzuki, T., Shigeta, D., and

Makihara, K., “Wireless Vibration Monitoring using Harvested Energy via Self-powered System,” 29th International Symposium on Space Technology and Science, 2013年6月2日, Nagoya Congress Center, Nagoya, Japan.

〔図書〕（計 0 件）

〔産業財産権〕

○出願状況（計 2 件）

名称：発電装置

発明者：榎原幹十郎, 坂口仁志, 堀口睦弘

権利者：同上

種類：特許

番号：特願 2013-168141

出願年月日：平成 25 年 8 月 13 日

国内外の別： 国内

名称：Harvesting device

発明者：Makihara, K., Sakaguchi, H., and Horiguchi, C.

権利者：同上

種類：特許

番号：PCT/JP2014/063319

出願年月日：平成 26 年 5 月 20 日

国内外の別： 国外

○取得状況（計 0 件）

〔その他〕

なし

6. 研究組織

(1)研究代表者

榎原 幹十郎 (MAKIHARA, Kanjuro)
東北大学・大学院工学研究科・准教授
研究者番号：60392817

(2)研究分担者

亀山 正樹 (KAMEYAMA, Masaki)
信州大学・工学部・准教授
研究者番号：30302178

竹澤 晃弘 (TAKEZAWA, Akihiro)
広島大学・大学院工学研究院・准教授
研究者番号：10452608

跡部 哲士 (ATOBE, Satoshi)
東北大学・大学院工学研究科・助教
研究者番号：40586468

下瀬 滋 (SHIMOSE, Shigeru)
独立行政法人宇宙航空研究開発機構・宇宙
科学研究所・主任開発員
研究者番号：80443282