

令和 5 年 5 月 12 日現在

機関番号：11301

研究種目：挑戦的研究（萌芽）

研究期間：2020～2022

課題番号：20K21028

研究課題名（和文）熱注入による免震ゴム支承の潜在的自己治癒能力の解放

研究課題名（英文）Release of Potential Self-Healing Ability of Seismic Isolation Rubber Bearings by Thermal Injection

研究代表者

山田 正太郎（Yamada, Shotaro）

東北大学・工学研究科・准教授

研究者番号：70346815

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 4,900,000円

研究成果の概要（和文）：ゴムは載荷履歴を受けるとMullins効果と称される内部損傷に起因する履歴挙動を呈する。ゴムは自己治癒能力を有し、受けた損傷は時間とともに緩やかに回復し得る。このゴムの損傷回復現象は外部から熱を注入することによって回復を早めることができる。本研究では、このような一連の現象を記述可能な数理モデルを構築した。また、構造物の免振ゴム支承が地震の際に損傷を受けた後、その損傷を回復させることで免震機能が回復されることを数値解析によって例証した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

構造物の免震ゴム支承は地震履歴を受けることで内部損傷を生じる。ゴムは潜在的な自己治癒能力を有し、受けた損傷は時間とともに緩やかに回復し得るが、外部から熱を注入することによって損傷回復を早めることが可能である。大きな構造物になるほど、免振ゴム支承の取り換え費用は高額になるため、外部から熱を注入することで損傷回復を早めることができるのであれば、大変有意義である。本研究では損傷回復をシミュレーション可能な数値モデルを構築し、このような方法が効果を発揮し得ることを示した。

研究成果の概要（英文）：When subjected to a cyclic loading, rubber exhibits a hysteresis behavior due to internal damage, known as the Mullins effect. Rubber has a self-healing ability and can recover slowly over time. This damage recovery phenomenon of rubber can be accelerated by injecting heat from the outside. In this study, we developed a mathematical model that can describe such a series of phenomena. In addition, the numerical analysis illustrates that the seismic isolation function of a structure can be restored by recovering from the damage of rubber isolation bearings caused by earthquake damage.

研究分野：Civil Engineering

キーワード：ゴム Mullins効果 損傷 損傷回復 異方性損傷 熱連成 動的解析 免震

1. 研究開始当初の背景

本研究課題において免震ゴム支承の損傷回復問題を取り上げる背景として、熊本地震にて前震と本震の二度の大きな揺れが生じたことが挙げられる。現行の耐震基準は共用期間中に一度受けるかどうかの強い揺れに対しては、空間を残して人命を守れば、建物は壊れてもよいとしている。つまり建物が損壊しないまでも、今の耐震基準は一度強い揺れを経験した免震ゴムがその後の大きな揺れに耐えることまでは保証していない。本研究では、「共用期間中に一度」という想定にそもそも難しさが伴うことを鑑み、損傷を受けた免震機構に、早急に、しかも大きな負担を強いることなく、本来の性能を取り戻させることを視野に入れて行う基礎研究である。

また、ゴム材料の工学的用途は極めて広い。ゴムが潜在的に自己治癒能力を有し、熱注入によりその潜在能力が解放され、しかもその効果を知る手立てが確立されているとなれば、別の応用分野が開拓されることに繋がると考えられる。基礎研究としての熱注入によるゴムの潜在的自己治癒能力解放が有する応用面での工学的ポテンシャルは高いと考えられる。

2. 研究の目的

地震履歴により免震ゴムは損傷を受け、揺れの減衰能力が低下する。一方で、ゴム材料は潜在的に自己治癒能力を有しており、その能力は熱を与えることで引き出すことができる。本研究は熱注入によりゴムの自己治癒能力を積極的に引き出す可能性を照査することを目的とする。また、その一環として、自己治癒能力を利用したゴムの損傷回復が構造物の免震機構に与える効果を定量的に評価するために、損傷回復効果を再現可能な数理モデルを構築し、その妥当性を評価する。さらに、熱連成解析と動的解析により地震履歴によって損傷を受けた免震ゴムを熱注入することで機能回復させることの効果を例証する。

3. 研究の方法

(1) 材料定数を同定可能な損傷モデルの開発

ゴムは載荷履歴を受けると Mullins 効果と称される内部損傷に起因する履歴挙動を呈する。Mullins 効果を記述可能な構成則を構築するために、超弾性体に損傷理論を導入した。既往の損傷理論のほとんどは処女載荷曲線に損傷の影響が現れるため、材料定数の同定に困難を来す。この課題を解消するために、材料定数を同定可能な損傷モデルを開発することを試みた。

(2) 損傷回復を考慮した異方性損傷モデルの開発

損傷モデルの多くはひずみエネルギー関数の履歴最大値を損傷進展基準に用いるため、等方性超弾性体を基本モデルに選ぶと等方性損傷しか表現することができない。本研究では、(1)で提案する損傷モデルの基本モデルに、損傷を考慮しない Micro-Sphere モデルを選択することで異方性損傷を考慮可能な実用的モデルへと拡張することを試みた。

また、ゴムは自己治癒能力を有し、受けた損傷は時間とともに緩やかに回復し得る。このゴムの損傷回復現象は外部から熱を注入することによって回復を早めることができる。本研究では、このような一連の現象を記述可能な数理モデルの構築を図った。

(3) 熱連成解析コードの開発

ゴムは損傷を受ける際に発熱する。また、本研究では、損傷回復を早めるために、外部からの熱注入を考える。これらの熱移動が損傷進展および損傷回復に与える影響を定量的に把握するために、有限変形理論に基づく熱連成解析コードの開発を試みた。

(4) 免震ゴム支承の損傷回復効果の検証

地震時の免震ゴム支承の損傷進展程度および熱注入による損傷回復が免震機能の回復にもたらす効果を定量的に把握するために動的解析が必要である。本研究で用いる材料非線形性と幾何学的非線形性を考慮した陰的解析手法を安定した動的解析が可能となるように拡張することを試みた。また、この手法を用いて、地震によって構造物の免振ゴム支承が受ける損傷進展の様子や、熱注入によって損傷が回復する様子を再現するとともに、損傷を回復させることで、免振機能がどの程度回復するか定量的に把握することを試みた。

4. 研究成果

(1) 隠れ損傷モデルの提案

本研究では材料定数を同定可能な損傷モデルとして隠れ損傷モデルを提案した。隠れ損傷モデルでは、ひずみエネルギー関数を次式のように与える。

$$\Psi(C, \zeta) = (1 - e)\Psi_0(C) + e \frac{(\Psi_0(C))^{s+1}}{(s+1)\alpha^s}$$

ただし、 s と e は履歴曲線に与える損傷の影響を制御するための材料定数である。 $\Psi_0(\mathbf{C})$ は基本モデルのひずみエネルギー関数であり、 α はその履歴最大値である。 このようにひずみエネルギー関数を与えることにより、応力は基本モデルの $\gamma = 1 - e[1 - (\Psi_0/\alpha)^s]$ 倍で表される。 処女載荷時は $\gamma = 1$ 、除荷・再載荷時は $\gamma < 1$ となるため、除荷・再載荷時は基本モデルよりも応力が低下する一方で、処女載荷時は基本モデルと応力が一致する。 図 1 は損傷を制御する材料定数を変化させた場合の載荷・除荷曲線である。 このように材料定数を変化させると除荷曲線は変化するが、処女曲線は基本モデルに一致したままである。 このような性質から、処女載荷曲線を元に基本モデルの材料定数を決定した後に、除荷・再載荷曲線を元に損傷に関する材料定数 s と e を決定することができる。 Mullins & Tobin (1957) による実験結果を、隠れ損傷モデルによりシミュレートした結果を図 2 に示す。 基本モデルには Ogden モデルを用い、材料定数は Ogden & Roxburgh (1999) が同定した値を用いた。 処女載荷曲線を元に基本モデルの材料定数をそのまま用い、損傷制御定数 s と e を同定するだけで実験結果を再現することができている。

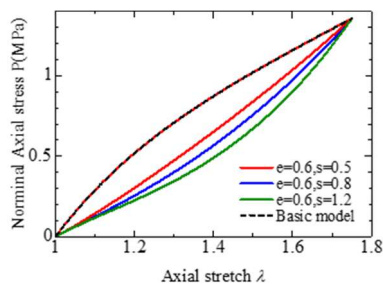


図 1 損傷制御定数 (s と e) を変化させた
載荷・除荷曲線

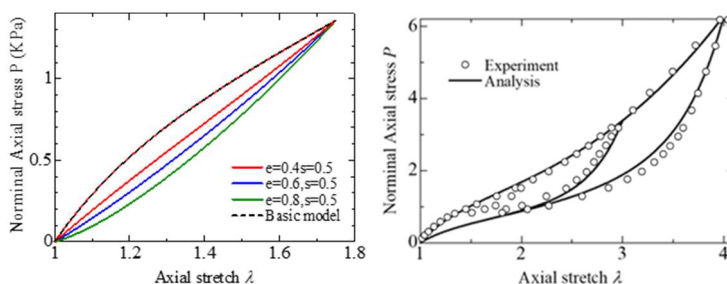


図 2 Mullins & Tobin (1957) による
実験結果と提案モデルによる計算結果

(2) 熱力学第 2 法則を満たす損傷回復モデルの提案

Micro-Sphere モデルに隠れ損傷理論を適用することにより異方性損傷の表現を可能にした。これらの損傷モデルにおいて、損傷回復の記述を図った。時間の経過とともに損傷を回復させるようにモデル化を図ると、熱力学の第 2 法則に抵触する。そこで、損傷回復ポテンシャルを考慮することと、損傷回復条件において熱力学第 2 法則を満たすような制約を課すことでこの課題を克服した。提案したモデルに図 3 の載荷履歴を与えた場合の載荷曲線を図 4 に示す。図 5 は Micro-Sphere 上に投影した提案モデルのマイクロ損傷分布図を表している。提案したモデルでは 1 回目の載荷サイクルにおける除荷時の応力は載荷時の応力を下回りながら除荷曲線が描けているため Mullins 効果が再現されている。また 2 回目の載荷時の応力は 1 回目の除荷時の応力を上回る応答を示しており、変形途中で損傷回復の効果が確認できる。次に変形の変えた 3 回目の載荷サイクルにおける載荷時の応力は同伸長比で 1 回目の除荷時の応力を上回っており、異方性損傷の効果が描けている。損傷分布図からも新たな方向に損傷が進展したことが確認できる。4 回目の載荷時の応力は 3 回目の除荷時の応力を上回る応答を示しており、変形の変えた場合でも変形途中で損傷回復の効果が現れている。

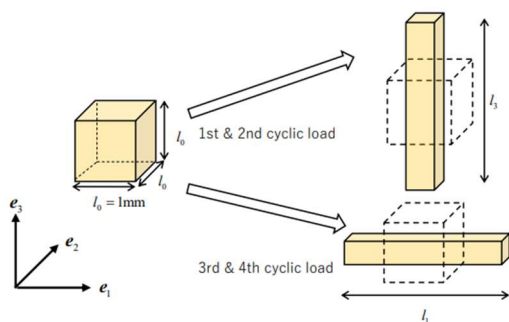


図 3 載荷履歴

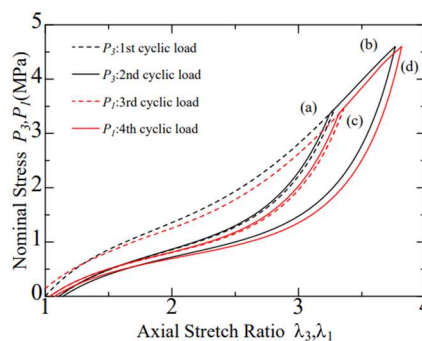


図 4 載荷曲線

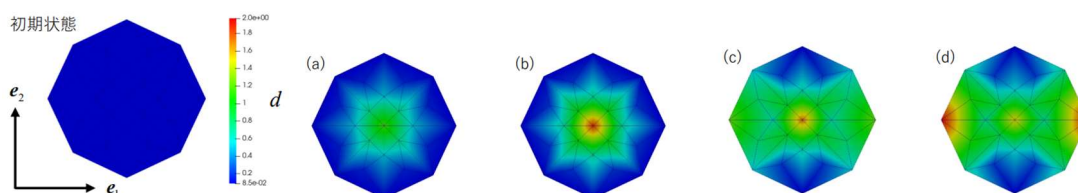


図 5 提案モデルのマイクロ損傷分布図

(3) 熱連成解析コードの開発と検証

ゴム材料の微圧縮性を考慮するために u-p formulation に基づく有限変形解析コードを作成した。さらに、損傷進展時の発熱と損傷回復時の吸熱の定量評価が可能のように絶対温度を場の未知数に加えた熱連成解析コードを開発した。ゴムの試験片の繰返し载荷を対象に、開発したコードを用いて熱連成解析を行った。図 6 と図 7 に損傷変数 d と絶対温度 Θ のコンター図を示す。損傷が進展する過程では発熱が生じており、損傷が回復する過程では吸熱していることが確認できる。図 8 に载荷曲線を示す。比較のために表面温度を 298K から 320K に高めた場合の解析結果も示す。これらの解析では表面温度を一定に保っているが、積極的に熱注入を行わないような条件でも外界から熱を取り入れ損傷が回復するために再载荷時に閉じたヒステリシスループが描かれている。また、表面温度が高い方が吸熱量が大きくなるために、ループの閉じ具合が顕著になることが確認できる。このように、開発したコードに提案した損傷回復モデルを組み込むことで、力学挙動に対する熱の連成効果が定量的に評価可能であることが例証された。

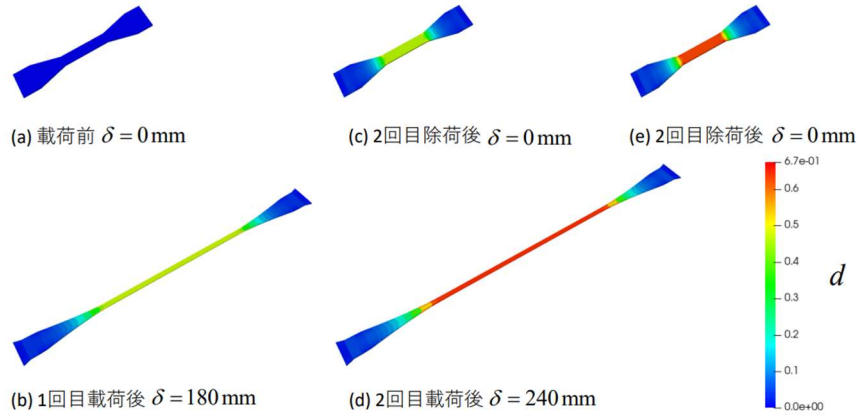


図 6 中心断面の損傷変数のコンター図

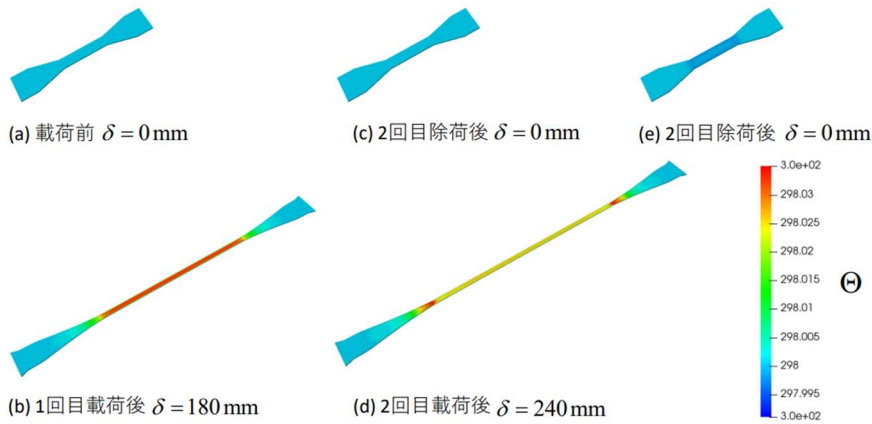


図 7 中心断面の絶対温度のコンター図

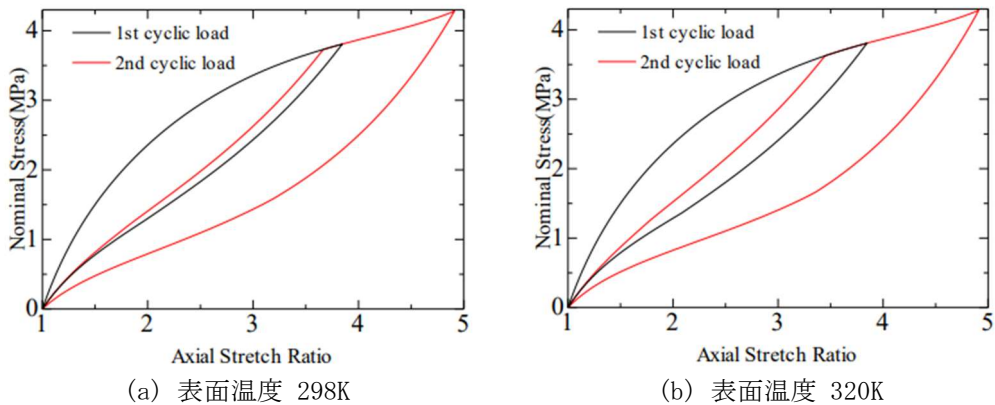


図 8 载荷曲線

(4) 数値解析による免震ゴム支承の損傷回復効果の例証

免震ゴム単体で見れば損傷は好ましいものではないが、構造物にとっては履歴減衰による揺れの低減効果をもたらす好ましい性質となる可能性がある。そこで、粘弾性構成則に損傷を考慮したモデルを搭載した動的な有限要素解析コードを開発した上で、免震ゴムの損傷が構造物の地震時応答に与える影響について調べた。

ゴム材料の力学特性の表現には超弾性構成則に基づく損傷モデルを用いた。ただし、時間的制約から、損傷回復については考慮しないモデルを用いた。一方で、ゴム材料は粘性特性を有することから、一般化 Maxwell モデルを用いて粘性も考慮した。構造物と免震ゴムからなる単純化したモデルを用いて免震ゴムの損傷が揺れの低減に与える効果について調べた。図 9 は解析結果の一例を示している。損傷を考慮する場合と考慮しない場合とで比較を行った。赤線は構造物頂部での加速度応答を、青線は損傷の度合いの時間推移を表している。履歴減衰の効果によって、損傷を受ける方が加速度応答が小さくなることが示されている。図 10 は損傷のしやすさを表すパラメータを変化させることで、揺れの最大加速度がどのように変化するか示した図である。損傷が生じやすいほど、最大加速度が小さくなる傾向が現れており、やはり損傷は揺れの低減に有効に働くことがわかる。

さらに、1 度地震履歴を受けた構造物に再度同じ地震動を与えた解析を行った結果を図 11 に示す。2 度目の地震動では損傷による揺れの低減効果が得られないために、1 度目の地震動よりも揺れが大きくなっていることが分かる。これより、熱を与えて積極的にゴムの損傷を回復させることによって、ゴムの免振機能を回復・維持できる可能性を示すことができた。

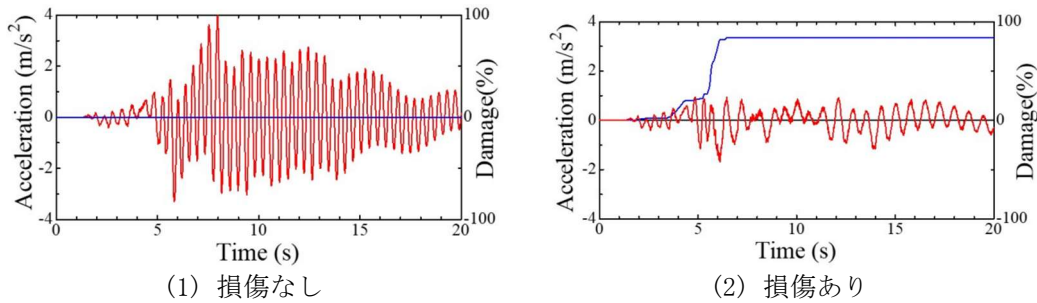


図 9 応答加速度に及ぼす損傷の影響

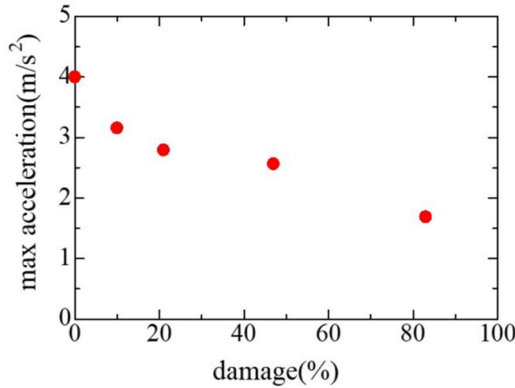


図 10 最大応答加速度と損傷の関係

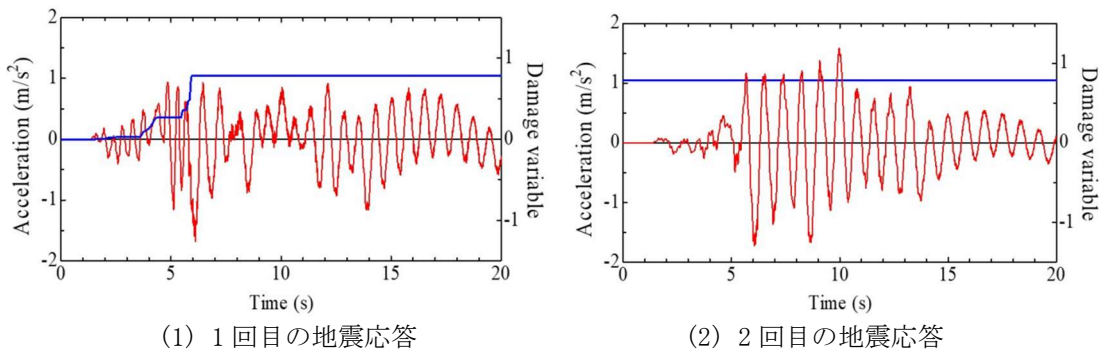


図 11 繰返し地震時の応答加速度

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計9件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 野崎陽明, 山田正太郎, 京谷孝史
2. 発表標題 熱力学第2 法則を満足するゴムの損傷回復現象のモデル化
3. 学会等名 計算工学講演会論文集
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 川村駿介, 山田正太郎, 野崎陽明, 京谷孝史
2. 発表標題 免震ゴムの損傷特性が構造物の地震時応答に及ぼす減衰効果に関する数値解析的検討
3. 学会等名 計算工学講演会論文集
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 田中康平, 山田正太郎, 京谷孝史
2. 発表標題 Micro-sphere modelを用いたゴムの異方性損傷挙動に関する数値解析
3. 学会等名 令和3年度土木学会東北支部技術研究発表会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 米田玄德, 山田正太郎, 京谷孝史
2. 発表標題 陰的Runge-Kutta法を用いた動的解析手法の構築および検証
3. 学会等名 令和3年度土木学会東北支部技術研究発表会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 野崎陽明, 山田正太郎, 京谷孝史, 松原誠志朗
2. 発表標題 熱注入によるゴムの損傷回復現象の数値シミュレーション
3. 学会等名 第75回土木学会年次学術講演会講演概要集
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 野崎陽明, 山田正太郎, 松原誠志朗, 京谷孝史, 尾崎伸吾
2. 発表標題 熱注入によるゴムの損傷回復現象の数値シミュレーション
3. 学会等名 計算工学講演会論文集
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 川村駿介, 山田正太郎, 京谷孝史, 野崎陽明史
2. 発表標題 免震ゴム支承のMullins効果が構造物の地震時応答に及ぼす効果に関する数値解析的検討
3. 学会等名 令和2年度土木学会東北支部技術研究発表会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 工藤大介, 山田正太郎, 京谷孝史
2. 発表標題 隠れ損傷理論の提案
3. 学会等名 令和4年度土木学会東北支部技術研究発表会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 工藤大介, 山田正太郎, 京谷孝史
2. 発表標題 ゴムのMullins効果を再現する隠れ損傷モデルの提案
3. 学会等名 計算工学講演会論文集
4. 発表年 2023年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	京谷 孝史 (Kyoya Takashi) (00186347)	東北大学・工学研究科・教授 (11301)	
研究分担者	松原 成志朗 (Matsubara Seishiro) (40823638)	名古屋大学・工学研究科・助教 (13901)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------