

令和 5 年 6 月 15 日現在

機関番号：23604

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2020～2022

課題番号：20K05009

研究課題名(和文) 老朽化インフラ事故対策のための応力聴診器を用いたき裂検出と応力拡大係数解析の研究

研究課題名(英文) Study on crack detection and stress intensity factor analysis using a stress stethoscope for countermeasures for aging infrastructure accidents

研究代表者

志村 穰 (Shimura, Jyo)

公立諏訪東京理科大学・工学部・准教授

研究者番号：70390424

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,300,000円

研究成果の概要(和文)：本研究内容は構造材料のき裂検出及びき裂の応力拡大係数解析の双方を含むが、き裂の応力拡大係数解析研究に進捗が見られたため、こちらの成果概要を報告する。本研究では、応力聴診器と引張せん断平板試験片を用いて、面内せん断モードの応力拡大係数 K の解析を試みるとともに、2軸直交型ひずみゲージによる解析値、FEM解析及び外挿法により得られた理論値と比較し解析精度を検証した。また、き裂長さ a 、き裂間距離 L が K 解析精度に及ぼす影響を検討した。得られた知見として、本提案手法による K 解析手法を提案した。応力聴診器を用いた K 解析精度は一部を除き、 $\pm 10\%$ 以内に収まることが確認され、その有用性を示唆した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

応力聴診器を用いた構造部材のき裂検出及びき裂の応力拡大係数解析に関する技術は、低コストかつ簡易性を有する新たな健全性・安全性評価手法として位置付けられ、主として国内の老朽化橋梁構造物の保全・改修に役立てることができる。また、土木分野に限らず、機械及び建築分野でも本技術が適用可能であり将来性・発展性が推察される。

本研究成果は、現状としては実験室レベルであるが、様々な条件下での実験結果を蓄積し知見を深めること、及び次の段階として実地試験に臨むことで、将来的な現場での応用が期待される。これにより、喫緊の問題である老朽化社会インフラの健全性評価技術として、その一翼を担うものと推察される。

研究成果の概要(英文)：In this study, we attempted to analyze the stress intensity factor (K) for a crack of in-plane shear mode using a strain checker and a tensile shear plate specimen. The strain checker is built in with three friction type strain gauges, and is installed at the measurement point by the magnetic force of the magnet base of the main body. The slits were made in the specimen by wire-cut electric discharge machining, and these were treated as the artificial cracks. The strain at the crack tip is obtained from the strain checker and the specimen, and the K value can be calculated by applying that value to the analytical equation. Furthermore, the possibility of this analytical method was verified by comparing the case of using the conventional 2-axis orthogonal strain gauge and the extrapolation value using FEM results. As a result, it was found that the analysis accuracy is about 10% except for some cases, while suggesting the possibility of the analysis method using the strain checker.

研究分野：材料力学

キーワード：応力拡大係数 き裂検出 ひずみ測定 応力聴診器 ひずみゲージ FEM解析

1. 研究開始当初の背景

国内の橋梁等の社会インフラの多くは高度成長期に建てられ、2020年を境に建設から70年が経過し寿命を迎えようとしている。近年の急激な交通量増加および車両の重量化、塩害・アルカリ骨材反応等により、コンクリート部材のひび割れ、剥離・剥落、鋼部材の疲労によるき裂、腐食による損傷が顕在化している。近年の世間を震撼させた事故として、2012年の笹子トンネル天井板落下事故が記憶に新しい。この事故ではボルトの緩みや欠落などの不具合が多数確認されており、構造部材の老朽化が直接的な原因と考えられている。このように経年劣化による各種構造物の破壊や破損事故が後を絶たず、国内の社会インフラの安全性や健全度は予断を許さない状況である。国や地方自治体の早急な対応が望まれるが、経済的負担が足枷となっている。このような背景から老朽化インフラの安全性や健全度を低コストで手軽に予測・評価できる非破壊検査技術が期待されている。

2. 研究の目的

上記の背景を受け、筆者らは市販の“応力聴診器”に着目し、これを用いた“欠陥検出法”及び“ボルト締結体の緩み”を検討してきた。応力聴診器は非測定物に磁力を利用し押し当て、その接触面の摩擦を介してひずみを測定するものであり、非破壊検査の一手法として位置付けられる。本研究では応力聴診器によるひずみ測定を発展、応用させ、社会基盤施設の老朽化に影響を及ぼすとされる“き裂”を対象に、“その検出法”及び破壊力学パラメータの一つである“応力拡大係数”の実験解析を試みた。なお、本稿では後者の応力聴診器用いたき裂の応力拡大係数解析研究について報告する。

3. 研究の方法

3. 1 き裂先端部のモードIIにおけるひずみ成分

図1はき裂先端部がせん断負荷モードの場合を示している。このような負荷を受けるき裂先端部領域について、J. W. Dallyら¹⁾は、上記の領域に分けてP点の応力成分とひずみ成分を表している。すなわち、応力拡大係数の特異項が支配する第I領域、その外側領域を第II領域、さらに外側を第III領域として応力とひずみ式を表している。そのうち、有限長さを有するひずみゲージを対象とする本研究では、第I領域と第II領域までのひずみ成分を対象とし、ひずみ成分式の展開項数を多く採り、第3項まで表すと次式になる。ただし、第2項の $r^{0/2}$ の項は0のため $\epsilon_{x\text{-shear}}, \epsilon_{y\text{-shear}}, \gamma_{xy\text{-shear}}$ に現れてこない。そのため、 $r^{1/2}$ の第3項が第1項の次に現れる。式中の C_0, C_1 は未知係数である。

$$E\epsilon_{x\text{-shear}} = -C_0 r^{-1/2} \sin \frac{\theta}{2} \left[2 + (1+\nu) \cos \frac{\theta}{2} \cos \frac{3\theta}{2} \right] + C_1 r^{1/2} \sin \frac{\theta}{2} \left[2 + (1+\nu) \cos^2 \frac{\theta}{2} \right] \quad (1)$$

$$E\epsilon_{y\text{-shear}} = C_0 r^{-1/2} \sin \frac{\theta}{2} \left[2\nu + (1+\nu) \cos \frac{\theta}{2} \cos \frac{3\theta}{2} \right] - C_1 r^{1/2} \sin \frac{\theta}{2} \left[2\nu + (1+\nu) \cos^2 \frac{\theta}{2} \right] \quad (2)$$

$$G\gamma_{xy\text{-shear}} = C_0 r^{-1/2} \cos \frac{\theta}{2} \left(1 - \sin \frac{\theta}{2} \sin \frac{3\theta}{2} \right) + C_1 r^{1/2} \cos \frac{\theta}{2} \left(\sin^2 \frac{\theta}{2} + 1 \right) \quad (3)$$

上式右辺第1項の係数 C_0 がせん断モードの K_{II} を含んだ次式で表される。

$$C_0 = \frac{K_{II}}{\sqrt{2\pi}} \quad (4)$$

式(3)に $\theta = 0$ を代入し、せん断ひずみ成分 $\gamma_{xy\text{-shear}}$ を第2、第3項まで採用した式を以下に示す。
第2項目までを採用した場合 (第2項の $r^{0/2}$ の項が0のため、第1項のみで表される)

$$G\gamma_{xy\text{-shear}} = \frac{K_{II}}{\sqrt{2\pi r}} \quad (5)$$

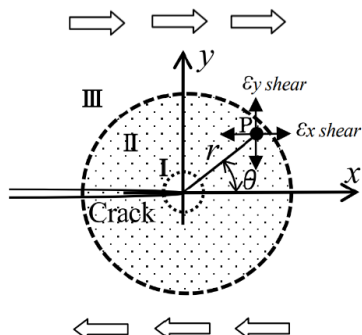
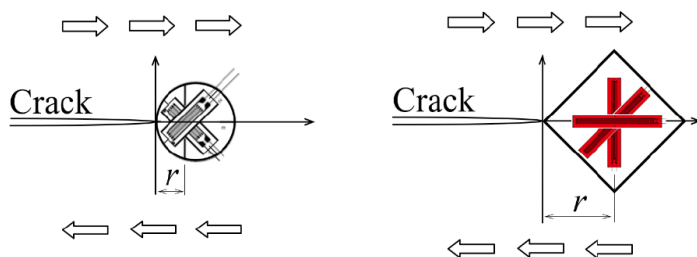


Fig.1 Shearing mode of a crack tip



(a) 2-axis orthogonal strain gauge (b) 3-axis frictional type strain gauge (Strain checker)

Fig.2 Positional relationship between strain gauge and crack tip

第3項目までを採用した場合（前述より第2項は0のため、項数は2個で表される）

$$G\gamma_{xy\text{-shear}} = \frac{K_{II}}{\sqrt{2\pi r}} + C_1\sqrt{r} \quad (6)$$

3. 2 モードIIにおける応力拡大係数 K_{II} の解析方法

応力聴診器およびひずみゲージを用いた場合

前述の式(5)を K_{II} について解くと、次式(7)となる。式(7)は、先行研究にて黒崎ら^{2,3)}が解析式として使用したものであり、本研究でもこれを使用する。図2(a)に示す市販のゲージ長1mmの2軸直交型ひずみゲージ(共和電業製, KFGS-1-120-D16-11)1枚をき裂延長線上に $\pm 45^\circ$ の角度で貼り付け、ひずみを測定する。なお、図2(a)のようにき裂先端直近にひずみゲージを貼付すると、 $r = 1.3\text{mm}$ となる。ひずみゲージの出力値は2倍となり(= 2ϵ)、この測定値がそのまま、せん断ひずみ $\gamma_{xy\text{-shear SG}}$ の値として得られる。せん断ひずみ $\gamma_{xy\text{-shear SG}}$ 値およびき裂先端からの距離 $r = 1.3\text{mm}$ を式(7)に代入し、 K_{II} を算出する。

$$K_{II} = G\gamma_{xy\text{-shear}}\sqrt{2\pi r} \quad (7)$$

図2(b)は3軸型応力聴診器(東京測器研究所製, FMGH-3A, ゲージ長3mm)の受感部(3軸摩擦型ひずみゲージ)とき裂先端との位置関係を示す。このように応力聴診器を設置すると、 $r = 6.1\text{mm}$ となる。各ゲージからのひずみ値を用いてせん断ひずみ $\gamma_{xy\text{-shear SC}}$ を算出し、式(7)に代入することで K_{II} の値が得られる。

有限要素解析を用いた場合

図3は後述の精度検証実験に用いる引張せん断平板試験片の寸法および形状である。本試験片の実験状況を想定した有限要素解析(FEM)を行い、き裂先端付近の要素せん断ひずみを用いて K_{II} を外挿して求める。その際の解析式は、式(6)のせん断ひずみ成分式第3項目までを考慮したものとする。式(6)の両辺に $\sqrt{2\pi r}$ を掛け合わせると次式となる。

$$G\gamma_{xy\text{-shear}} = K_{II} + \sqrt{2\pi}C_1r \quad (8)$$

ここで、式(8)の左辺を F とおき、右辺第2項の r 以外の係数を $C (= \sqrt{2\pi}C_1)$ として書き直すと次式になる。

$$F = K_{II} + Cr \quad (9)$$

上式は r に関する1次関数であり、切片が応力拡大係数となる。すなわち、図4に示すように r で左辺の F 値を外挿することにより、 K_{II} を求めることができる。本研究ではこの値を理論値 $K_{II\text{ theory}}$ とする。

FEMモデルの境界条件として、図3の左側のピン結合用円孔部分における x, y, z 軸方向並進変位拘束、右側円孔部分の x 軸方向並進変位以外の拘束、および x 軸方向荷重(最大2000N)をそれぞれ付与した。材料特性値はステンレス鋼材 SUS430 の使用を想定し、縦弾性係数 E を200GPa、ポアソン比 ν を0.27として定義した。要素の基本形状は4面体一次要素であるが、き裂端周辺の要素ひずみを取得する部分では6面体一次要素を採用した。応力集中が予想される箇所には最小で1辺0.05mm、それ以外の箇所には最大で1辺1.5mmの要素サイズとした。

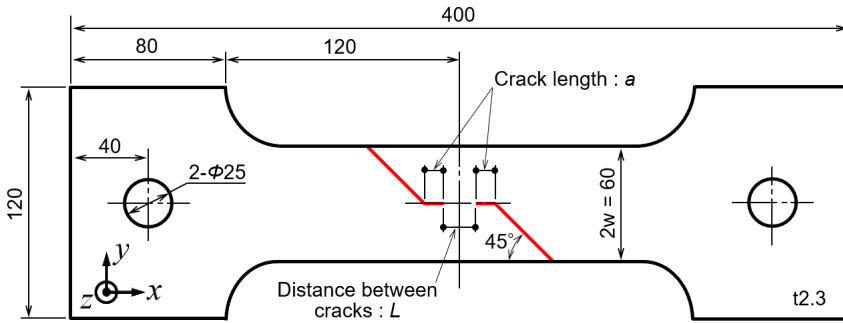


Fig.3 Dimension and geometry of tensile shear plate specimen with the artificial cracks

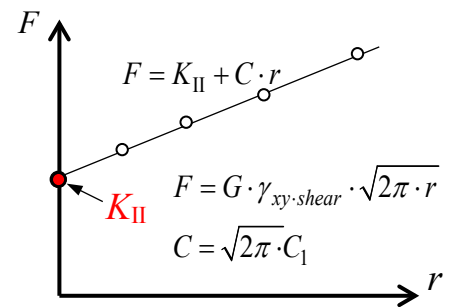


Fig.4 Extrapolation method for K_{II} by FEM

Table 1 Variations of specimen

Specimen No.	1	2	3
Distance between cracks L [mm]	15	15	20
Crack length a [mm]	20	15	15

3. 3 精度検証実験

図3は本研究で用いた引張せん断平板試験片の寸法および形状である。この試験片形状は、中央部のき裂間でせん断応力が支配的になることが先行研究の宮川らにより確認されている⁴⁾。試験片材料はステンレス鋼材SUS430を使用し、図中の赤線部にはワイヤーカットにより幅0.12mmのスリットを入れ、この先端部を擬似的にき裂とみなしている。ひずみゲージおよび応力聴診器は図2のようにき裂先端に貼付・設置するが、き裂を2箇所所有する試験片形状のため、ひずみゲージの場合はその向かいにも貼付することができ、さらに裏面を利用することで、ひとつの試験片で4箇所の貼付が可能となる。本試験片を万能材料試験機(エー・アンド・デイ製、テンシロンRTG-1310)に取り付け、500N/minの負荷速度による引張りを作用させつつ、き裂先端付近に生じるひずみを200N毎に検出し、データロガー(東京測器研究所製、TDS-540)に記録した。ひずみ測定は各試験片に対し3回以上行い、その算術平均値を解析式(7)に適用し K_{II} 値を算出した。なお、き裂長さ a およびき裂間距離 L が K_{II} 値の解析精度に及ぼす影響を調べるため、表1に示す3種類の試験片を対象とした。

4. 結果および考察

図5は引張せん断平板試験片に引張負荷を200N毎2000Nまで(応力聴診器の場合は1200Nまで)作用させた際の、2軸直交型ひずみゲージおよび応力聴診器によるひずみ測定結果であり、き裂長さ a を15mmで固定し、き裂間距離 L を10, 15, 20mmと変化させたものを示している。横軸は負荷せん断応力 τ (荷重 P /せん断面積 A) [MPa]である。いずれの場合も負荷せん断応力 τ に対するせん断ひずみ $\gamma_{xy\text{-shear}}$ の出力は線形性を有していることがわかる。また、各シンボルのプロット点が負荷荷重レベルを意味するが、き裂長さ a とき裂間距離 L との比 a/L が大きくなるにつれてせん断ひずみ $\gamma_{xy\text{-shear}}$ が増加している。これは、せん断面積 A (き裂間距離 L ×板厚 t)の減少によりせん断応力が大きくなるためである。くわえて、同一せん断応力下で比較すると、 a/L が減少するにつれ、 $\gamma_{xy\text{-shear}}$ が増加することも確認できる。

図6は引張負荷状態にある引張せん断平板試験片を想定した有限要素解析結果の要素せん断ひずみを式(7)に適用し、 K_{II} 値を外挿法により求める外挿線図を示す。図中には3種類プロット(400, 800, 1200N時)した。縦軸との交点(切片)が K_{II} 値の外挿値であり、これらの値を本研究での理論値 $K_{II\text{ theory}}$ とする。400, 800, 1200Nに対する $K_{II\text{ theory}}$ (外挿値)はそれぞれ、1.383, 2.766, 4.149 $\text{MPa}\sqrt{\text{m}}$ である。なお、これらの数値は $a/L=1.0$ (試験片No.2, $a=15, L=15$)の場合である。同様な流れで残り全ての試験片の $K_{II\text{ theory}}$ を求めることができる。

続いて、本提案手法により得られた $K_{II\text{ exp}}$ の解析精度を検証するため、次式より誤差率 e を算出した。

$$e = \frac{K_{II\text{ exp}} - K_{II\text{ theory}}}{K_{II\text{ theory}}} [\%] \quad (10)$$

図7に各試験片に対する作用せん断応力 τ と誤差率 e との関係を示す。応力聴診器の $a/L=1.5$ (試験片No.1, $a=15, L=10$)の場合以外はほぼ $\pm 10\%$ 内の誤差率に収まっており、良好な解析精度であると言える。図2(a)に示すように応力聴診器は、摩擦型ひずみゲージのベース対角線長さが約12mmであるに対し、 $a/L=1.5$ の試験

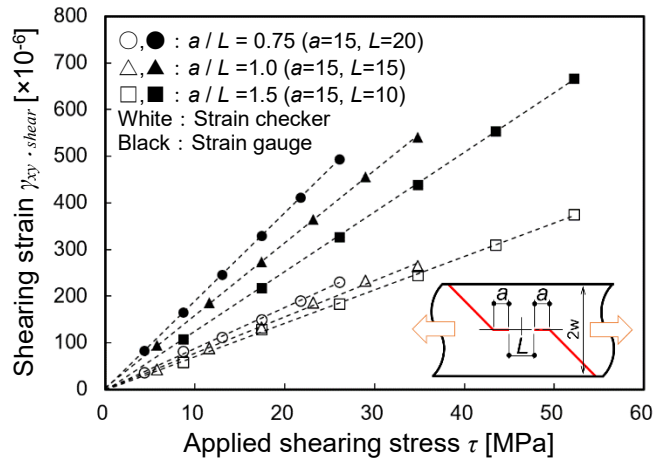


Fig.5 Shearing strain measured by experiment

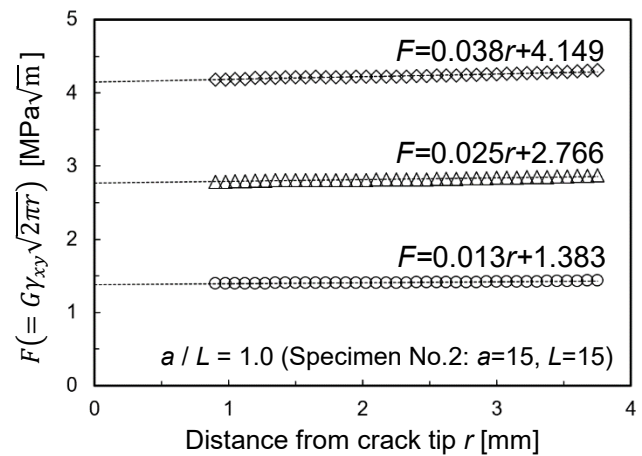


Fig.6 Theoretical K_{II} obtained by extrapolation method using FEM result

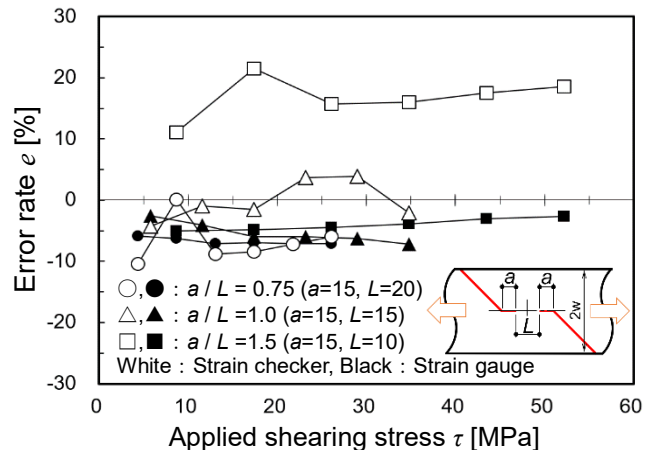


Fig.7 Verification result of accuracy for K_{II} analysis

片はき裂間距離が $L = 10\text{mm}$ であるため、両側の擬似き裂先端にベースが跨がった状態となっている。このことが解析精度の低下の一因と考えられる。

5. 研究成果

本研究では、応力聴診器および引張せん断平板試験片を用いて、面内せん断モードの応力拡大係数 K_{II} の解析を試みるとともに、2 軸直交型ひずみゲージによる解析値、FEM 解析および外挿法を用いて得られた理論値と比較し解析精度を検証した。また、き裂長さ a 、き裂間距離 L が K_{II} 解析精度に及ぼす影響を検討した。これまでに得られた知見を以下に記す。

- 1) 応力聴診器および引張せん断平板試験片による K_{II} 解析手法を提案した。
- 2) 本提案手法の K_{II} 解析精度は一部を除き、 $\pm 10\%$ 以内に収まることが確認され、その有用性が示唆された。

<引用文献>

- 1) Berger, J. R., and Dally, J. W., *Experimental Mechanics*, Vol. 28, No.2 (1988), pp. 142-145.
- 2) 黒崎ら, 日本機械学会通常総会講演会講演論文集, Vol.70 (1993), pp. 801-803.
- 3) Shigeru, K., and Shuichi, F., *Proceedings of The 14th World Conference on Non Destructive Testing (1996)*, pp. 8-13.
- 4) 宮川ら, 日本機械学会誌, Vol.68, No.559 (1965), pp. 1064-1072.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 1件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Shimura Jyo, Miyagawa Mutsumi, Kimizuka Masafumi, Kurosaki Shigeru	4. 巻 None
2. 論文標題 Experimental Stress Intensity Factor Analysis of Mode II using Strain Gauge and Tensile Shear Plate Specimen	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Proceedings of the 10th IIAE International Conference on Industrial Application Engineering 2022	6. 最初と最後の頁 28-33
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.12792/iciae2022.008	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計6件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 1件）

1. 発表者名 Jyo Shimura, Mutsumi Miyagawa, Masafumi Kimizuka, Shigeru Kurosaki
2. 発表標題 Experimental Stress Intensity Factor Analysis of Mode using Strain Gauge and Tensile Shear Plate Specimen
3. 学会等名 The 10th IIAE International Conference on Industrial Application Engineering 2022（国際学会）
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 志村 穰, 西村神之将, 高田宗一朗, 黒崎茂
2. 発表標題 応力聴診器および引張せん断平板試験片を用いたき裂のモード 応力拡大係数実験解析法
3. 学会等名 日本機械学会北陸信越支部 2022年合同講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 志村 穰, 高田宗一朗, 林 丈晴, 黒崎 茂
2. 発表標題 ひずみゲージを用いたき裂のモード 応力拡大係数実験解析法の検討
3. 学会等名 日本機械学会関東支部 山梨講演会2021
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 志村 穰, 高田宗一郎, 林 文晴, 黒崎 茂
2. 発表標題 応力聴診器を用いたモード 応力拡大係数測定を試み
3. 学会等名 日本機械学会関東支部 山梨講演会2020
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 志村 穰, 高田宗一郎, 林 文晴, 黒崎 茂
2. 発表標題 応力聴診器を用いたき裂の面内せん断モード応力拡大係数解析を試み
3. 学会等名 日本機械学会北陸信越支部 第58期総会・講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 川崎竜馬, 高田宗一郎, 志村 穰
2. 発表標題 切り欠きを有する厚肉梁の固有振動の実験解析
3. 学会等名 日本機械学会関東支部 第27期総会・講演会
4. 発表年 2021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	高田 宗一郎 (TAKATA Soichiro) (30835517)	東京工業高等専門学校・機械工学科・准教授 (52601)	

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
---------	---------