

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 6 月 19 日現在

機関番号：13102

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2014～2016

課題番号：26289003

研究課題名(和文) 接合体の特異場を利用した電磁気センサの創成

研究課題名(英文) Creation of electromagnetic sensor using the singular fields in joints

研究代表者

古口 日出男 (Koguchi, Hideo)

長岡技術科学大学・工学(系)研究科(研究院)・教授

研究者番号：90143693

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 12,900,000円

研究成果の概要(和文)：本研究は、三次元圧電圧磁接合体の界面端角部における電気変位の特異場の特性を利用して、高性能な電磁気センサ作製の指針を得ようとするものである。接合体の接合界面に対して垂直に圧縮荷重を与えると接合界面端に強い特異場が発生し、特異場近傍の空気中の電気変位場は単相体の場合に比べ大きくなる。圧電接合体の接着層を厚くすると、特異場の強さが大きくなり、空気中に生じる電気変位も大きくなる。接合体の圧電定数を大きくすると特異場の強さが大きくなる。圧電接合体の製作では、加熱無しあるいはキュリ一点以下で硬化する接着剤を用いることが必要である。実験で圧電接合体の接合界面端部に生じる電圧は、圧電材単相体と比較して高い。

研究成果の概要(英文)：The object of this study is to obtain the guidelines on manufacture of high sensitive electromagnetic sensors by utilizing the characteristics of singular fields of piezoelectric displacements at the vertex in three-dimensional piezoelectric joints. Large singular fields of stress and electric displacement occur around the edge of interface including the outside of joints for compressive stress in the vertical direction of the interface, and the intensity of electric displacement near the edge of interface in the joint is larger than that in single-phase materials. When the value of dielectric constant in the piezoelectric material increases, the intensity of singularity increases. In manufacturing the piezoelectric joints, it is desirable that a resin with curing temperature of room temperature or below Curie's temperature should be used. In experiments, the voltage between the upper and lower surfaces in the joints is higher than that in single-phase materials.

研究分野：材料力学

キーワード：三次元圧電接合体 特異場 界面 特異場の強さ 保存積分法 センサ 電界 電圧

1. 研究開始当初の背景

(1) 次世代の情報機器には、新しいデバイス・センサの実現のため新しい原理や機能を導入した構造および材料が求められている。それらの構造および材料は他の材料と様々な形で組み合わせられ使用される。すなわち、次世代の携帯情報端末、高性能・高機能センサには様々な材料との接合構造が存在すると考えられる。接合界面の端部には、材料特性の違いから応力特異場が発生し、剥離あるいはき裂の発生の可能性が高まると考えられる。その結果、接合構造の信頼性の低下を招くことが考えられ、これまでに多くの研究が国内外で行われてきている。すなわち、従来の研究は応力の特異場を消滅するか弱体化する方法を研究し、接合体の信頼性を向上することを目指していた。

(2) 様々な機能性材料が次世代小型携帯情報機器に用いられようになり、見方を変えることにより特異場の有効利用が考えられた。

2. 研究の目的

(1) 圧電体 / 圧磁体 / 誘電体 / 導体等の接合構造体に外力・電気・磁気作用すると、応力、電気変位、磁気誘導の特異場が界面端に発生する。応力特異場は、上述したように接合体界面の剥離の発生の要因となるため、その強さを低減することが求められる。一方、圧電圧磁接合体の場合、界面端に電束密度、磁場が集中する特異場が発生し、それを有効利用することにより、従来の性能を凌駕するセンサを開発できると考えた。

(2) 本研究の目的は、従来の接合体の特異応力場の解析を圧電圧磁接合体に拡張し、電気変位（電束密度）あるいは磁気誘導の特異場の特性とその領域サイズの限界を明らかにし、それらの特異場の特性を用いた高性能電磁気センサの創成の指針を得ることを目指すものである。

3. 研究の方法

本研究は、三次元圧電圧磁接合体の界面端角部における特異場（応力、電気変位、磁気誘導）の特性を利用して、高性能な電磁気センサ作製の指針を得ようとするものである。研究は実験と解析の両面から以下のように行った。

(1) 4つの直方体の圧電体を絶縁性接着剤で接着し圧電接合体を作成する。

数値解析を用いて圧電接合体の材料特性の組み合わせ及び負荷方法を変えて圧電接合体界面端の電気変位の特異場の強さが大きくなる条件を調べる。

同じく、界面端近傍の形状を変えて、圧電接合体界面端の電気変位の特異場の強さが大きくなる条件を調べる。

(2) 圧電接合体の負荷試験機の試作を行い、接合体の界面端における電圧分布を測定し、特異場の特性を調べる。

(3) 従来の三次元接合体の解析手法を圧電

圧磁接合体に拡張するため、新たな基本解を用いた応力解析プログラムを作成する。

(4) 三次元圧電接合体の界面端角部の特異場の強さを求めるため、新たに保存積分法による解析法を開発する。

(5) 圧電接合体の特異場の特性の下限界を調べるために従来のナノメカニックスの理論を拡張する。

(6) 圧電接合体の界面端に生じる特異場が周りの空気の電場に対する影響を有限要素法により調べる。圧電接合体の接着層の厚さ、荷重条件を変更した際に空気に生じる電場を比較し、各条件における電場に対する影響を調べる。

4. 研究成果

(1) 当研究者は、これまで接合体に対する基本解を用いた境界要素法を接合体界面端の特異場の解析に用いてきた。境界要素法では異方性を有する圧電材の解析が困難となったため、有限要素法 MARC を用いて、特異場の解析を行うこととした。さらに、特異点の強さを求めることが出来る保存積分法を提案し、得られた値の妥当性を検証した。また、圧電材と空気を含む電場解析をマルチフィジックスソフトウェア AMPS により行った。

設定した荷重条件のうち水平方向圧縮荷重条件を与えた時、接合界面端に最も強い特異場が発生することがわかった。

保存積分法によって算出した特異場の強さは積分半径に対してあまり変化せず、有限要素法圧電解析結果とほぼ一致した。

圧電接合体の接着層を厚くすると、特異場の強さが大きくなり、接合界面端に生じる電気変位も大きくなる。

圧電接合体の材料定数を変更した結果、圧電材の圧電定数を大きくすると特異場の強さが大きくなる。

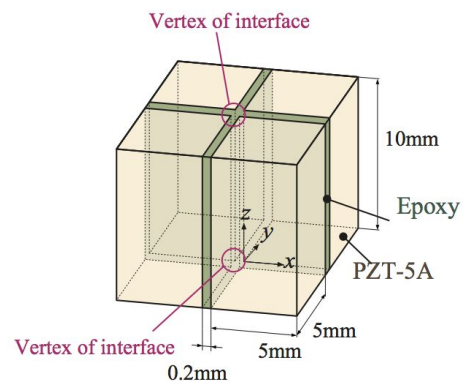


図1 圧電接合体の実験および解析モデル

以上が MARC を用いて得られた結果である。

圧電接合体に圧縮荷重を加えると、圧電接合体だけでなく、その近傍の空気中にも特異場が生じ、電場および電気変位場が単相体の

場合に比べ大きくなる。また、接合体電極面の中心では特異場の影響により圧電単層体に比べて強い電場が発生するが、接合界面端と比べると約 0.1 倍となった。

圧電接合体の接着層を厚くすると特異場の強さは大きくなり、界面端近傍の空気中の電場、電気変位も大きくなる。しかし、電極面中心部の電場は特異点からの距離が離れるため、特異場の影響が小さくなる。よって、接着層厚さが 0.05mm より厚くなると、電場、電気変位は電極面の中心部ではほとんど変わらない。

圧電接合体に時間的に変化する圧縮応力を加えた場合、空气中発生する電場は、与えた応力の時間微分に比例する。

以上が AMPS を用いて得られた結果である。

(2) 圧電接合体の試作において、接着時に温度を圧電材のキュリー点以上に上げると圧電特性が消失するため、加熱無しあるいはキュリー点以下で硬化する接着剤を用いることが必要である。

(3) 4 つの直方体形状の圧電材を接着剤で接合し、センサの構造を模擬した圧電接合体を作成し、試作した負荷装置を用いて接合体の側面から圧縮荷重を加えて以下の実験を行った。

圧電接合体の接合界面端部に生じる電圧を測定した。圧電材単相体と比較して、接合体にすることにより高い電圧が発生していることがわかった。

弾性定数が低い圧電材を使用した圧電接合体では、接合界面端部に生じる電圧は小さくなることがわかった。

(4) ナノメカニクスによる圧電接合体の特異場解析に必要な界面特性の値の導出には、第一原理計算などを考える必要がある。

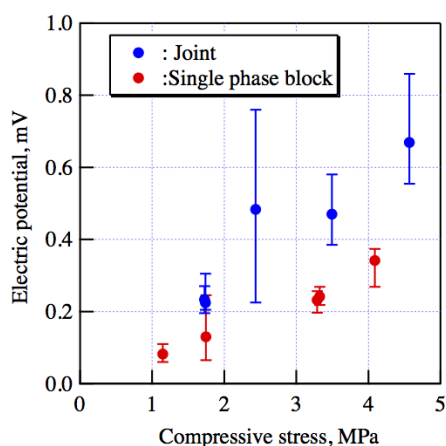


図2 電極に生じた電圧と圧縮応力の関係

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 14 件)

古口日出男, 田中悠介, 界面特性を考慮した異方性弾性論によるナノスケール異材接合体の特異応力場解析, 日本機械学会論文集, Vol.83(No.845), 2017. DOI: 10.1299/transjsme.16-00368.

Hideo Koguchi, Yusuke Tanaka, Interaction of Dislocations at Interfaces in Multilayered Materials, Materials Structure & Micromechanics of Fracture VIII, Vol.258, pp.102-105, 2016. DOI: 10.4028/www.scientific.net/SSP.258.

Luangarpa Chonlada, Hideo Koguchi, Analysis of singular stresses at a vertex and along a singular line in three-dimensional bonded joints using a conservative integral, European Journal of Mechanics, A/Solids, Vol.60, Nov. pp.208-216, 2016.

古口日出男, 横山 洸幾, Luangarpa Chonlada, 保存積分による三次元異材接合体界面端の特異応力場の強さ(積分半径, 要素サイズおよび接合体幅の影響), 日本機械学会論文集, Vol.82(No.833), 2015. DOI: 10.1299/transjsme.15-00372.

Luangarpa Chonlada and Hideo Koguchi, A conservative integral for calculating intensities of singularities at 3D piezoelectric bonded joints, IMECE2015, Vol.9: Mechanics of Solids, Structures and Fluids, Houston, Texas, USA, 11月13日-19日, 2015. ASME. ISBN:978-0-7918-5752-6, doi:10.1115/IMECE2015-51404.

Hideo Koguchi and Koki Yokoyama, Stress analysis in three-dimensional joints with a crack at the vertex of interface In case of mode II, Acta Mechanica, 2015.

DOI:10.1007/s00707-015-1525-x. Tomiya MAEKAWA, Hideo Koguchi, Investigation on Singular Fields at the Vertex of Interface in Piezo Electric Material Joints and its Application, InterPACK & ICNMM2015, Vol.3, San Francisco, California, USA, 7月6日-9日, 2015. ISBN: 978-0-7918-5690-1, doi:10.1115/IPACK2015-48381.

Hideo Koguchi and Naoki KIMURA, Evaluation of the strength of interface for multi-layered materials in photonic devices, InterPACK & ICNMM2015, Vol.2, San Francisco, California, USA, 7月6日-9日, 2015.

ISBN:978-0-7918-5689-5, doi: 10.1115/IPACK2015-48105.

Hideo Koguchi, Koki Yokoyama and Chonlada Luangarpa, Variation of stress intensity factor along a small

interface crack front in singular stress fields, International Journal of Solids and Structures, Vol.71, pp.156-168, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.ijsolstr.2015.06.016>

Hideo Koguchi, Yuki Hirasawa, Stress and displacement fields around misfit dislocation in anisotropic dissimilar materials with interface stress and interface elasticity, Journal of Applied Mechanics, doi: 10.1115/1.4030522, 2015.

古口日出男, 木村直紀, 引張荷重下における三次元接合体角部の特異応力場内の微小き裂の応力解析, 日本機械学会論文集, Vol.80(No.816), DOI: 10.1299/transjsme.2014smm0220, pp.1-14, 2014.

Chonlada Luangarpa and Hideo Koguchi, Analysis of a three-dimensional dissimilar material joint with one real singularity using a conservative integral, International Journal of Solids and Structures, Vol.51, No.15-16, pp.2908-2919, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.ijsolstr.2014.04.018>.

Hideo Koguchi, Nobuyasu Suzuki, Singular stress fields in anisotropic bonded joints considering interface stress and interface elasticity, J. Applied Mech., 81, 071003, 2014; doi: 10.1115/1.4026840.

倉橋貴彦, 渡辺裕太郎, 近藤俊美, 古口日出男, 三次元特異性オーダを用いた Akin 特異要素による異材接合体の界面端角部近傍における特異応力場の評価 (四面体要素と特異要素使用時の結果の比較), 日本機械学会論文集, Vol.80 (No.809), pp.1-18, 2014.

[学会発表] (計 6 件)

Chonlada Luangarpa, Hideo Koguchi, Analysis of singular stress fields along a singular line near the vertex in 3D Piezoelectric bonded joint with 3-Real Singularities using a conservative integral, ACSM2016, バンコク, 2月 25-26日, 2017.

Chonlada Luangarpa, Hideo Koguchi, 保存積分を用いた 3次元 piezo 接合体の界面角部近傍の応力特異線上の特異応力の強さの評価, 日本機械学会北陸信越支部 第 54 期総会・講演会, 金沢大学, 3月 9日, 2017.

佐藤広実, 古口日出男, Chonlada Luangarpa, 3次元圧電接合体の界面端における電気変位特異場の特性解明とその応用, 日本機械学会北陸信越支部 第 54 期総会・講演会, 金沢大学, 3月 9

日, 2017.

石井裕也, 古口日出男, 分子力学法および異方性弾性論を用いた多層積層体の特異応力場の解析, 日本機械学会北陸信越支部 第 54 期総会・講演会, 金沢大学, 3月 9日, 2017.

Hiromi SATOU, Hideo Koguchi, Chonlada Luangarpa, Influence of singular fields at the vertex of interface on electric flux density in and outside domain of three-dimensional piezoelectric material joints, ICMES2016, HongKong, 12月 4-6日, 2016.

Chonlada Luangarpa, Hideo Koguchi, Analysis of singular stress fields at 3D piezoelectric bonded joints using a conservative integral, IMECE2016, Phoenix, USA, 11月 11-17日, 2016.

Chonlada Luangarpa, Hideo Koguchi, 保存積分を用いた電氣的力が作用する三次元 piezo 接合体の特異応力解析, 日本機械学会 M&M2016 材料力学カンファレンス, 神戸大学, 10月 8-10日, 2016. 佐藤広実, 古口日出男, Chonlada Luangarpa, 3次元圧電接合体の電場に及ぼす界面端における特異場の影響とその応用, 日本機械学会 M&M2016 材料力学カンファレンス, 神戸大学, 10月 8-10日, 2016.

石井裕也, 古口日出男, 分子力学法による異材接合体の特異応力場解析, 日本機械学会 M&M2016 材料力学カンファレンス, 神戸大学, 10月 8-10日, 2016.

Chonlada Luangarpa, Hideo Koguchi, 保存積分を用いた 3次元 piezo 接合体の界面角部近傍の応力特異線上の特異応力解析, 日本機械学会第 29 回計算力学講演会 (CMD2016), 名古屋大学, 9月 22-24日, 2016.

石井裕也, 古口日出男, 分子力学法による異材接合体の三次元特異応力場解析, 日本機械学会第 29 回計算力学講演会 (CMD2016), 名古屋大学, 9月 22-24日, 2016.

Chonlada Luangarpa, Hideo Koguchi, 保存積分による三次元 piezo 接合体の特異応力場の強さの評価 (三つの実数の特異性の場合), 日本機械学会 2016 年度年次大会, 北海道大学, 9月 11-14日, 2016.

佐藤広実, 古口日出男, Chonlada Luangarpa, 3次元圧電接合体の電場に及ぼす界面端における特異場の影響, 日本機械学会 2016 年度年次大会, 北海道大学, 9月 11-14日, 2016.

Chonlada Luangarpa, Hideo Koguchi, Evaluation of intensity of singularity at 3D bonded joints between piezoelectric and isotropic materials

- using a conservative integral, WCCM2016, ソウル, 7月24-29日, 2016.
- Chonlada Luangarpa, 古口日出男, 保存積分による3次元ピエゾと等方性材料の接合体の特異応力場の強さの計算, 日本機械学会北陸信越支部第53期総会・講演会, 信州大学, 3月5日, 2016.
- 前川富哉, 古口日出男, Chonlada Luangarpa, 圧電接合体の界面端に生じる特異場の特性解明とその応用, 日本機械学会北陸信越支部第53期総会・講演会, 信州大学, 3月5日, 2016.
- 田中悠介, 古口日出男, 分子動力学法による多層積層構造の応力場解析, 日本機械学会北陸信越支部第53期総会・講演会, 信州大学, 3月5日, 2016.
- 佐藤広実, 古口日出男, Chonlada Luangarpa, 円柱型圧電接合体の界面端における応力・電気変位の特異場の強さの評価, 日本機械学会北陸信越支部第53期総会・講演会, 信州大学, 3月5日, 2016.
- 石井裕也, 古口日出男, 分子動力学法を用いた異材接合体の三次元特異応力場解析, 日本機械学会北陸信越支部第53期総会・講演会, 信州大学, 3月5日, 2016.
- Chonlada Luangarpa, 古口日出男, A conservative integral for evaluation of the intensity of singularity along a singular line near the vertex in 3D dissimilar material joints, 日本機械学会北陸信越支部第52期総会・講演会, 新潟工科大学, 3月7日, 2015.
- ⑳ 平澤勇氣, 古口日出男, 分子動力学法によるパンプと基板の界面特性評価, 日本機械学会北陸信越支部第52期総会・講演会, 新潟工科大学, 3月7日, 2015.
- ㉑ 横山洗幾, 古口日出男, Chonlada Luangarpa, 保存積分による微小き裂を有する三次元異材接合体の特異応力場解析, 日本機械学会北陸信越支部第52期総会・講演会, 新潟工科大学, 3月7日, 2015.
- ㉒ ALIFU BAIHETIYAER, 古口日出男, 三次元境界要素法によるピエゾ接合体の特異応力場と電気変位の解析, 日本機械学会北陸信越支部第52期総会・講演会, 新潟工科大学, 3月7日, 2015.
- ㉓ 田中悠介, 古口日出男, 分子動力学法による異方性接合体の応力解析, 日本機械学会北陸信越支部第52期総会・講演会, 新潟工科大学, 3月7日, 2015.
- ㉔ 前川富哉, 古口日出男, ピエゾ接合体における界面端特異場の解明とその応用, 日本機械学会北陸信越支部第52期総会・講演会, 新潟工科大学, 3月7日, 2015.
- ㉕ Tomiya Maekawa and Hideo Koguchi, Investigation on Singular Fields at the Vertex of Interface in Piezo Electric Material Joints and its Application, InterPACK& ICNMM2015, San Francisco, USA, 7月6日-9日, 2015.
- ㉖ Hideo Koguchi and Naoki Kimura, Evaluation of the strength of interface for multi-layered materials in photonic devices, InterPACK & ICNMM 2015-48105, San Francisco, USA, 7月6日-9日, 2015.
- ㉗ Chonlada Luangarpa and Hideo Koguchi, Evaluation of intensity of singularity at 3D piezoelectric bonded joints using a conservative integral, InterPACK & ICNMM2015, San Francisco, USA, 7月6日-9日, 2015.
- ㉘ Chonlada Luangarpa and Hideo Koguchi, Analysis of singular stress fields along a singular line near the vertex in 3D dissimilar material joints using a conservative integral (Discussion on an influence of angle between side surfaces), 日本機械学会2015年度年次大会, 北海道大学, 9月12日-16日, 2015.
- ㉙ 古口日出男, 横山 洗幾 微小三次元表面き裂の応力拡大係数の分布の定式化, 日本機械学会2015年度年次大会, 北海道大学, 9月12日-16日, 2015.
- ㉚ 前川 富哉, 古口日出男 圧電接合体界面端に生じる特異電気変位場の解明, 日本機械学会2015年度年次大会, 北海道大学, 9月12日-16日, 2015.
- ㉛ 田中 悠介, 古口日出男 分子動力学法による異方性接合体の応力解析, 日本機械学会2015年度年次大会, 北海道大学, 9月12日-16日, 2015.
- ㉜ Chonlada Luangarpa and Hideo Koguchi, Evaluation of intensity of singularity at 3D Piezoelectric bonded joints under electrical load using a conservative integral, 日本機械学会第28回計算力学講演会 (CMD2015), 横浜国立大学, 10月10日-12日, 2015.
- ㉝ 前川 富哉, 古口日出男, Chonlada Luangarpa, 圧電接合体の界面端に生じる特異電気変位場の評価, 日本機械学会第28回計算力学講演会 (CMD2015), 横浜国立大学, 10月10-12日, 2015.
- ㉞ 田中悠介, 古口日出男, 分子動力学法による多積層構造の応力場解析, 日本機械学会第28回計算力学講演会 (CMD2015), 横浜国立大学, 10月10-12日, 2015.
- ㉟ Chonlada Luangarpa and Hideo Koguchi, A conservative integral for calculating intensities of singularities

- at 3D piezoelectric bonded joints ,
IMECE2015 , Houston, USA, 11 月 13
日-19 日 , 2015.
- ③7 Yusuke Tanaka and Hideo Koguchi ,
Analysis of singular stress fields in
three-phase anisotropic wedge joints
considering interface stress and
interface elasticity , IMECE2015 ,
Houston, USA, 11 月 13 日-19 日 ,2015.
- ③8 Hideo Koguchi, Koki Yokoyama
Variation of stress intensity factor
along a crack front in a
three-dimensional joint , IMECE2015 ,
Houston, USA, 11 月 13 日-19 日 ,2015.
- ③9 Hideo Koguchi, Yuki Hirasawa,
Analysis of singular stress fields near
the edge of interface in a small bump
considering interface stresses ,
IMECE2015 , Houston, USA, 11 月 13
日-19 日 , 2015.
- ④0 Chonlada Luangarpa and Hideo
Koguchi. On the computation of
intensity of singularity at 3D
Piezoelectric bonded joints under
mechanical load using a conservative
integral , 日本機械学会 M&M2015 材
料力学カンファレンス , 慶應義塾大学 ,
11 月 21 日-23 日 , 2015.
- ④1 前川 富哉, 古口日出男, Chonlada
Luangarpa. 圧電接合体界面端に生じ
る特異場の解明 , 日本機械学会
M&M2015 材料力学カンファレンス , 慶
應義塾大学 , 11 月 21 日-23 日 , 2015.
- ④2 田中悠介, 古口日出男 分子動力学法に
よる多積層構造の界面特性評価 , 日本
機械学会 M&M2015 材料力学カンファ
レンス , 慶應義塾大学 , 11 月 21 日-23
日 , 2015.
- ④3 Hideo Koguchi, Nobuyasu Suzuki,
Interface Dislocation in Aisotropic
Dissimilar Materials with Interface
Stress and Interface Elasticity,
IMECE2014, 2014, Montreal,
Nov.14-20,2014.
- ④4 Hideo Koguchi, Naoki Kimura, Stress
analysis in three-dimensional joints
with a crack at the vertex of interface,
ACMFMS 2014, Nara, Oct.10-13,
2014.
- ④5 Hideo Koguchi, Yuki Hirasawa,
Singular stress analysis near edge of a
bump on substrate using molecular
dynamics, 11th WCCM ,バルセロナ , 7
月 20 日-25 日 , 2014.
- ④6 平澤勇氣, 田中悠介, 古口日出男, 分子
動力学法によるバンプと基板の界面特
性評価 , 日本機械学会 M&M2014 材料
力学カンファレンス , 7 月 18 日-21 日 ,
福島大学, 2014.
- ④7 横山洗幾, 古口日出男, 引張荷重下にお

- ける三次元接合体角部の特異応力場内
の微小き裂に対する応力解析 , 日本機械
学会 M&M2014 材料力学カンファレン
ス , 7 月 18 日-21 日 , 福島大学, 2014.
- ④8 Chonlada Luangarpa and Hideo
Koguchi, Evaluation of intensity of
singularity at the 3D dissimilar
material joints using a conservative
integral, APACM Thematic
Conference & IACM Special Interest
Conference, COMPSAFE 2014,
Computational Engineering and
Science for Safety and Environmental
Problems, 13-16 April 2014 / Sendai
International Center, Sendai.

〔その他〕
ホームページ等
旧 <http://mcweb.nagaokaut.ac.jp/~koguchi>
新 新潟工科大で整備中

- 6 . 研究組織
- (1) 研究代表者
古口 日出男 (KOGUCHI Hideo)
長岡技術科学大学・大学院工学研究科・教
授
研究者番号 : 90143693
- (2) 研究分担者
ルアンアパ チョンラダ (LUANGARPA
Chonlada)
長岡技術科学大学・大学院工学研究科・助
教
研究者番号 : 00751968