

平成 30 年 6 月 19 日現在

機関番号：15401

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2015～2017

課題番号：15K16157

研究課題名(和文) 金属資源を対象にした国際貿易モニタリングシステムの構築

研究課題名(英文) Monitoring system for international trade of metal resources

研究代表者

布施 正暁 (Fuse, Masaaki)

広島大学・工学研究科・准教授

研究者番号：70415743

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,200,000円

研究成果の概要(和文)：持続可能な資源管理には国連の提供する貿易統計サービス(UN comtrade)を活用した金属資源の国際貿易モニタリングシステムが必要である。そこで、UN comtradeから入手可能な鉱石・スクラップの国間貿易量と金属組成の不確実性を考慮した鉱石・スクラップ含有金属の国間フロー量推定手法を確立した。そこで、UN-comtradeから入手可能な主要な鉱石・スクラップの国間貿易量の不確実性を級内相関係数(ICC)を用いて定量的に評価した。さらに、鉱石・スクラップの金属組成の不確実性を既存文献値のメタ分析より定量的に評価した。最終的に、国間貿易量と金属組成の不確実性に対処した国間フロー量を推定した。

研究成果の概要(英文)：Sustainable resource management needs a monitoring system of international trade on metal resources using the UN comtrade that provides trade statistics collected by each country. This study explored to estimate the inter-country flows for metal ores and scraps considering the uncertainty with the inter-country trades from the UN comtrade and with the metal composition. This study assessed the uncertainty of the inter-country flows of major metal ores and scraps that are available from the UN comtrade by using Intraclass Correlation Coefficients. The meta analysis based on systematical literature review was conducted to assess the uncertainty with the composition of major metal ores and scraps. This study estimated the inter-country flows of major metal ores and scraps by modifying the both uncertainty mentioned before.

研究分野：土木環境システム

キーワード：マテリアルフロー分析 貿易統計 不整合問題 金属組成 不確実性 鉱石 スクラップ

1. 研究開始当初の背景

持続可能な資源管理を目指して、金属を対象にしたマテリアルフロー分析 (MFA: Material Flow Analysis) の研究が進んでいる¹⁾。金属の MFA では、国レベルの鉄、銅、アルミといったコモンメタルを対象に採掘から製造、使用、廃棄、リサイクルにいたる全ライフサイクル中のフローを定量化する研究が多い²⁾。最近では、燃料電池などの最新環境技術に欠かすことのできないネオジウム、コバルト、プラチナといったレアメタルを対象に国間フローを評価する研究が行われ³⁾、国内のマテリアルフローから国をまたぐマテリアルフローへとグローバル経済の実態を反映した研究に深化している。

金属の国間フロー評価は、貿易統計から得られる製品輸出入量に当該製品中の金属組成を乗じて推定する。このような推定では、貿易統計と金属組成がそれぞれ有する不確実性が問題となる。

貿易統計の不確実性は、MFA で重要視されるものの⁴⁾、定量的に評価した事例は申請者の知る限り存在しない。この貿易統計の不確実性は、経済統計学で古くから知られる貿易統計の不整合問題と言い換えることができる。貿易統計の不整合問題とは、ある国の貿易統計で報告される輸入量と、それに対応する相手国の貿易統計で報告される輸出量が一致しない問題である。貿易統計の不整合問題に関する研究は数多く存在するが、国単位の貿易収支額を評価することを目的とするため、MFA で知りたい詳細かつ特定品目、数量単位、国間取引を対象としていない⁵⁾。

金属組成の不確実性はさらに研究が難しい状況である。金属組成自体が企業秘密となりえるため、組成データを入手することは極めて困難である。そのため、MFA で使われる金属組成は限られたデータソースを基にしており、その代表性は低いと考えられる。産業連関分析を応用した金属組成推定手法も開発されているが⁶⁾、不確実性分析は課題である。以上より、金属組成の不確実性は本研究で対象とする国間フロー評価に留まらず MFA 全体の課題と位置づけられる。

MFA はデータの存在が研究の進捗を左右するデータ制約型研究である。そのため、文献・ヒアリングなどの一時的な情報より既存の政府系統計を活用し、恒久的なデータ入手可能な仕組みを構築することが重要である。MFA のデータインフラ整備は産業連関表を用いるアプローチが主流である⁶⁾。政府系統計の一つである産業連関表は、一次統計を基に推定された二次統計であり、経年、最新年データの入手は困難であり、データインフラ面で即時性に欠ける。貿易統計は各国が整備する一次統計であり、産業連関表の問題は緩和される。また、国連統計局が各国貿易統計データを収集・整理し、5000 品目、世界 250 カ国、1960 年代から現在までの貿易量を提供するサービス行っている (UN comtrade)

⁷⁾。このような UN comtrade は MFA を支援するデータインフラとして高いポテンシャルをもつといえる。

2. 研究の目的

本研究は、貿易統計と金属組成の不確実性を分析し、その上で UN comtrade を活用することで、金属資源の国間フロー量を恒久的に把握できるシステムを研究する。ここでは、金属資源として、一次資源の鉱石と二次資源のスクラップを取り上げ、それらの含有金属を対象とする。

3. 研究の方法

金属資源の国間フロー量を恒久的に把握できるシステムには、貿易統計の不確実性を評価する方法とその修正する方法が必要である。ただし、金属組成の不確実性は既存文献のメタ分析により評価し、その修正は行わないものとする。したがって、金属組成の不確実性による国間フロー量への影響は、金属組成のメタ分析から得られる中央値、下限値、上限値を与えて評価するものとする。以下、貿易統計の不確実性評価法を (1) で、不確実性修正法を (2) で説明する。

(1) 貿易統計の不確実性評価法

1. で説明したように、貿易統計の不確実性は貿易統計の不整合問題と言い換えることができる。既存の貿易統計の不整合問題を評価法は 3 タイプに分けらる。国間貿易量を集計した上で整合率を計算して評価する方法 (集計整合率法)⁵⁾、国間貿易量ごとに整合率を計算して評価する方法 (個別整合率法)⁵⁾、国間貿易量に対して回帰モデルを推定してその適合度とパラメータで評価する方法 (回帰モデル法)⁸⁾である。

集計整合率法では、輸出報告国の報告値 M と輸入報告国の報告値 X を世界単位で集計して、(1) 式より整合率 R を求める。整合率が 1 に近いほど不整合問題は小さいと判断する。

$$R = \frac{\sum_i \sum_j X_{ij}}{\sum_i \sum_j M_{ij}} \quad (1)$$

ここで、 i は輸出国、 j は輸入国を示す。

集計整合率法は、「集計」することである国からある国の個別の貿易量に対する不確実性 (不整合問題) は無視される欠点がある。このような個別貿易量の不整合問題を考慮したのが、個別整合率法である。個別整合率法では、個別貿易量の整合率 R をそれぞれ計算し、対数整合率分布を作成し、その分布形状より、不整合問題を評価する。つまり、中央値が 0 に近い値でかつ分散が小さいほど、不整合問題は小さいと判断する。図 1 に 2002 年から 2015 年の銅鉱石の国間貿易量に関する対数整合率分布を示す。

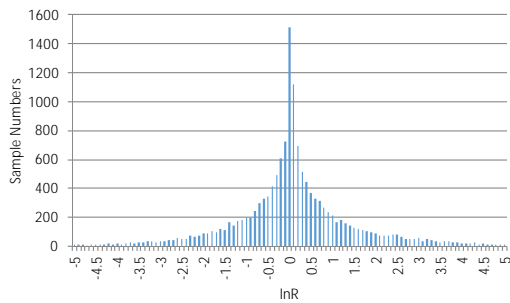


図 1.個別整合率法の例

個別整合率法は個別の国間貿易量に対して対数整合率を計算する。しかし、輸出報告値または輸入報告値が 0 の場合、対数整合率が計算できない欠点が存在する。また、集計型整合率法は整合率の一指標で不整合問題を評価できるが、個別整合率法は対数整合率分布の中央値と分散の二指標で不整合問題を評価する必要がある。中央値が 0 に近い値で分散が大きい値（または、その逆に中央値が 0 から遠い値で分散が小さい値）を示した時に不整合問題の評価が難しい。

回帰モデル法は、下記の(2)式で与えられる回帰モデルの勾配パラメータ a と決定係数 R^2 より不整合問題を評価する。勾配パラメータ a と決定係数 R^2 はそれぞれ 1 に近い値のとき、不整合問題は小さいと判断する。

$$X_{ij} = aM_{ij} + e_{ij} \quad (2)$$

ここで、 e は平均 0 の正規分布に従う誤差項を示す。回帰モデル法は整合率を用いないため、対数整合率が計算できない問題は回避できる。しかし、個別整合率法と同様に、二指標で不整合問題を評価する問題は残る。また、集計型整合率法、個別整合率法、回帰モデル法のいずれも共通して輸入報告値を真値と仮定している点も問題である。例えば、整合率の計算で輸入報告値を分母に置いている点、回帰モデルで輸入報告値を説明変数に置いている点はその仮定の証左である。しかし、貿易統計の不整合問題において、輸入報告値が真値である保証は存在しない。

本研究では、輸入報告値が真値という強い仮定を緩め、かつ整合率を使用せず、二指標問題を回避した、新しい不整合問題の評価法を提案する。それは、級内相関係数 (ICC: Intraclass Correlation Coefficients)⁹⁾ を使用する方法 (ICC 法) である。ICC は医療統計学で用いられる方法で、同じ対象に対して異なる測定者の測定結果間の一致度を評価する指標である。ICC を 2 測定者の測定結果の誤差である貿易統計の不整合問題に適用することで、既存評価法の問題を解決した。ICC では、全測定結果の分散 (全分散) に測定結果間誤差の分散 (誤差分散) を差し引いたものを真値の分散と仮定し、ICC は真値の分散から全分散を算出したものである。ICC は 1 に近い値ほど不整合問題は少ないと判断できる。

(2)貿易統計の不確実性修正法

貿易統計の不確実性修正法の全体像を図 2 に示す。本修正法では、ICC を用いて不確実性要因を検出し、各要因に応じた不確実性修正法を提案する。ここでは、不確実性要因として、外れ値・欠損値、年またぎ集計 (輸出国で 12 月の報告値が輸入相手国で翌年 1 月の報告値となる現象)、品目変更 (輸出国と輸入相手国で異なる品目で申請される現象)、違法な貿易 (密輸)、過小申告を対象にする。ここで、不確実性は系統誤差と解釈し、修正可能と判断した。偶然誤差については通常の統計学と同様に平均値で評価する。よって、図 2 のフローに従い不確実性要因が検出できない場合は誤差は偶然誤差と解釈し、輸出報告値と輸入報告値の算術平均値を採用する ((I) 平均値法)。

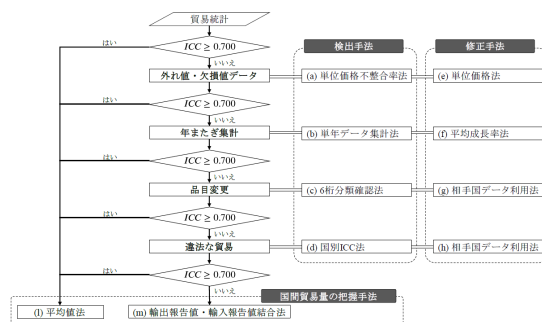


図 2. 貿易統計の不確実性修正法の全体像

図 2 のフローに従い、本研究で提案する貿易統計の不確実性修正法の概要を説明する。

まず、貿易統計から対象とする品目の国間貿易量の輸出国報告値と輸入国報告値を用意する。ICC より不整合問題を評価する。不整合問題が確認できなければ (I) 平均値法で対応する (上記の偶然誤差としての処理を行う)。無視できない不整合問題を確認した場合は、まず外れ値・欠損値の可能性を検証する ((a) 単位価格不整合率法)。外れ値の検出は貿易統計の数量データと金額データより単位価格を計算し、その値で外れ値を識別する。また、欠損値は輸出報告値または輸入報告値が欠損しているか調査する。外れ値・欠損値の修正は (e) 単位価格法を用いる。単位価格法は外れ値を検出した報告値を当該期前後の単価を用いて修正する方法である。外れ値は当該期前後の報告値で代替する。

外れ値・欠損値修正後の貿易データに関して再度 ICC で不整合問題を検証し、不整合問題を確認すれば、年またぎ集計を検出する ((b) 単年データ集計法)。ここで、不整合問題が確認できない場合は (I) 平均値法に行く。単年データ集計法は不整合問題が発現した報告値の当該年前後の報告値を集計し、再度不整合問題を評価することで、年またぎ集計を検出する。年またぎ集計の修正法は (f) 平均成長率法である。平均成長率法は年またぎが行われる前後の年の報告値を集計し、各年に再配分する。再配分する際に、過去の報告値の

時系列トレンドを用いる。

年またぎ集計修正後の貿易データに関して再度 ICC で不整合問題を検証し、不整合問題を確認すれば、品目変更を検出する (c)6 桁分類確認法)。ここで、不整合問題が確認できない場合は (l) 平均値法に行く。6 桁分類確認法は不整合問題が発現した国際標準品目分類 6 桁レベルの品目に対し、関連する 4 桁レベルの品目で報告値を集計し、再度不整合問題を評価することで、品目変更を検出する。品目変更の修正法は (g) 相手国データ利用法である。相手国データ利用法は品目変更が検出された報告値の相手国のデータをそのまま利用する。

品目変更修正後の貿易データに関して再度 ICC で不整合問題を検証し、不整合問題を確認すれば、違法な貿易を検出する (d) 国別 ICC 法)。ここで、不整合問題が確認できない場合は (l) 平均値法に行く。国別 ICC 法では、不整合問題が発現した報告値を対象に輸出報告、輸入報告国別に集計した報告値に対して ICC を計算し、不整合問題が突出する国を特定化し、その国で違法な貿易が行われていると解釈する。違法な貿易の修正法は (h) 相手国データ利用法である。相手国データ利用法は違法な貿易が行われていると特定化された国の報告値を使用せず、その相手国の報告値を利用する。

違法な貿易修正後の貿易データに関して再度 ICC で不整合問題を検証し、不整合問題を確認すれば、(m) 輸出報告値・輸入報告値結合法で最後の修正を行う。ここで、不整合問題が確認できない場合は (l) 平均値法に行く。最後の修正では、不確実性要因が明記していないが、過小申告が対象である。輸出報告値・輸入報告値結合法は、過小申告の修正を想定するため、輸出報告値と輸入報告値を比較し、値の大きい方を採用する。

4. 研究成果

(1) 貿易統計の不確実性評価結果

鉱石、スクラップを対象に、3. で開発した不整合評価法を用いて、貿易統計の不確実性を評価した。表 1 に示すように、UN comtrade から入手可能な 16 鉱石と 12 スクラップを対象とする。対象品目の 2002 年から 2015 年の国間貿易量を用いた。

図 3 に、金属別の ICC 計算結果を示す。図中の幅は、年別 ICC の上下限界を示す。不整合問題の大小の判定基準 0.7 に着目すると、鉱石は 16 品目中 8 品目、スクラップは 12 品目 5 品目が 0.7 以上の ICC を示した。一方、鉱石ではコバルト、銀、チタンで 0.5 未満の ICC を確認し、大きな不整合問題の存在が確認できた。また、どの鉱石、スクラップについても共通して、年による ICC のばらつきは大きい結果が得られた。以上より、MFA で貿易統計を利用する際には貿易統計の不確実性には十分留意する必要がある。特に特定年の貿易統計の利用は避ける必要がある。

表 1. 評価対象となる鉱石・スクラップ

| Element | HS code | Ore/scrap |
|---------|---------|--|
| Fe | 2601 | Iron ores and concentrates, roasted iron pyrites |
| Mo | 2613 | Molybdenum ores and concentrates |
| Mn | 260200 | Manganese ores, concentrates, iron ores >20% Manganese |
| Cu | 260300 | Copper ores and concentrates |
| Ni | 260400 | Nickel ores and concentrates |
| Co | 260500 | Cobalt ores and concentrates |
| Al | 260600 | Aluminium ores and concentrates |
| Pb | 260700 | Lead ores and concentrates |
| Zn | 260800 | Zinc ores and concentrates |
| Sn | 260900 | Tin ores and concentrates |
| Cr | 261000 | Chromium ores and concentrates |
| W | 261100 | Tungsten ores and concentrates |
| Ti | 261400 | Titanium ores and concentrates |
| Zr | 261510 | Zirconium ores and concentrates |
| Ag | 261610 | Silver ores and concentrates |
| Sb | 261710 | Antimony ores and concentrates |
| Fe | 7204 | Ferrous waste or scrap, ingots or iron or steel |
| Cu | 740400 | Copper/copper alloy waste or scrap |
| Ni | 750300 | Nickel waste or scrap |
| Al | 760200 | Waste or scrap, aluminium |
| Pb | 780200 | Lead waste or scrap |
| Zn | 790200 | Zinc waste or scrap |
| W | 810197 | Tungsten (wolfram) waste & scrap |
| Mo | 810297 | Molybdenum waste & scrap |
| Ta | 810330 | Tantalum waste & scrap |
| Co | 810530 | Cobalt waste & scrap |
| Ti | 810830 | Titanium waste & scrap |
| Zr | 810930 | Zirconium waste & scrap |

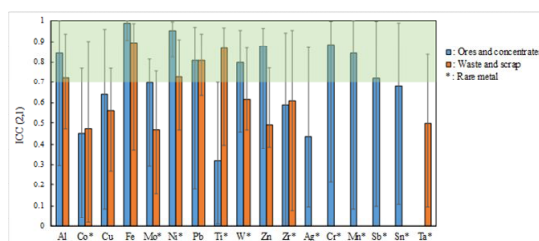


図 3. 金属別貿易データの ICC 計算結果

(2) 貿易統計の不確実性修正法結果

3. で開発した不確実性修正法の適用結果を示す。本修正法を適用する際、不整合問題が顕著である貿易データが望ましい。そこで、本研究では 2006 年の水銀の国間貿易量を対象とする。図 4 に水銀の国間貿易量の ICC 計算結果を示す。2006 年で ICC 値が 0.057 と極めて低い値が観測されている。

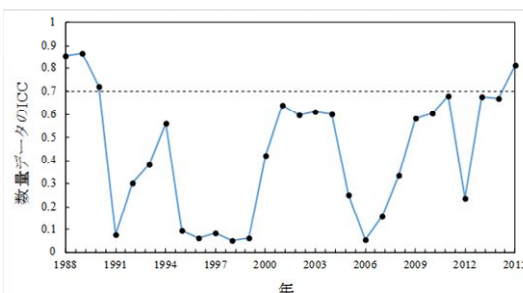


図 4. 水銀貿易データの ICC 計算結果

まず、2006 年の水銀の国間貿易量の概要を示す。輸出報告値は報告国 45 개국 (輸出国)、相手国 105 개국 (輸入国)、得られる国間パターン数 (交通工学分野の OD ペア) は 328 パターンである。輸入報告値に関しては、報告国 116 개국 (輸入国)、相手国 56 개국 (輸出国)、得られる国間パターン数 (交通工学分野の OD ペア) は 409 パターンである。既存の貿易統計の不整合問題研究では、輸入報告値を使用することを推奨し¹⁰⁾、MFA 研究も輸入報告値を使用している^{1,2)}。2006 年の

水銀の国間貿易量の輸入報告値の 30 トン以上の値を図 5 に示す。本研究で開発した貿易統計の不確実性修正法を 2006 年の水銀の国間貿易量に適用した。その結果に得られた国間貿易量は輸出国、輸入国としてそれぞれ 113 国、得られる OD ペアは 543 パターンとなった。さらに、30 トン以上の主要な水銀の国間貿易量を図 6 に示す。

以上より、本修正法による国間貿易量は既存修正法の国間貿易量より、大幅に情報量が追加され、貿易構造自体が大きく異なることが分かる。

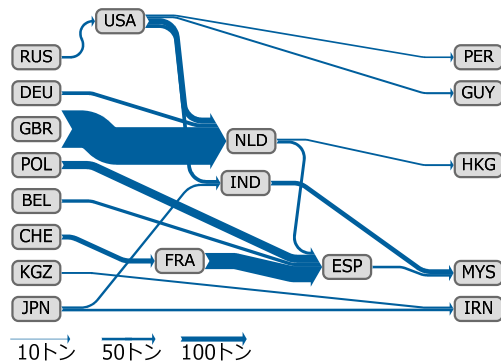


図 5 . 輸入報告値に基づく 2006 年の水銀の主要な国間貿易量

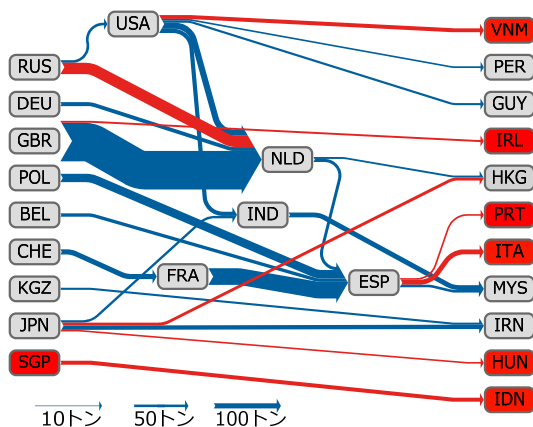


図 6 . 本不確実性修正法によって修正された 2006 年の水銀の主要な国間貿易量

引用文献

- 1) B.Reck et al, Challenges in Metal Recycling, Science, 337(6095), 690-695, 2012.
- 2) WQ.Chen et al, Anthropogenic Cycles of the Elements: A Critical Review, Environ. Sci. Technol, 46, 8574-8586, 2012.
- 3) K.Nansai et al, Global Flows of Critical Metals Necessary for Low-Carbon Technologies: The Case of Neodymium, Cobalt, and Platinum, Environ. Sci. Technol, 48, 1391-1400, 2014.
- 4) DB.Müller et al, Exploring the engine of anthropogenic iron cycles, Proc. Natl. Acad. Sci. USA, 103,

16111-16116, 2006.

- 5) 小坂浩之他、貿易統計の不整合問題、運輸政策研究、15、20-31、2012.
- 6) S.Nakamura et al, The Waste Input-Output Approach to Material Flow Analysis: Concepts and Application to Base Metals, J.Indu. Ecol, 11, 50-63, 2007.
- 7) UN comtrade: <http://comtrade.un.org/>
- 8) K.Endo et al, Uncertainty Analysis of Global Reuse Monitoring, Procedia CIRP, 61, 172-176, 2017.
- 9) 谷 浩明: 評価の信頼性, 理学療法科学, 12 (3), 113-120, 1997.
- 10) G.Federico et al, On the accuracy of foreign trade statistics (1909-1935): Morgenstern revisited, Explorations in Economic History, 28(3), 259-273, 1991.

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 2 件)

K.Endo, M.Fuse, Uncertainty Analysis of Global Reuse Monitoring, Procedia CIRP, 61, 172-176, 2017. 査読有

小坂浩之, 鹿島茂, 坂本将吾, 布施正暁, 貿易統計不整合問題の調整による国際貨物流動量の推計精度の検討, 土木学会論文集 D3, 71 (5), 73-680, 2015. 査読有

[学会発表](計 9 件)

S.Watanabe, M.Fuse, Characterizing Trade Structure for New and Used Automobiles Using Gravity Model, ICCEE-2017, Tainan city in Taiwan, 2017.

K.Endo, M.Fuse, The Accuracy of Trade Statistics: The Case of Metallic Ores, ICCEE-2017, Tainan city in Taiwan, 2017.

遠藤昂平, 布施正暁, 貿易統計を用いた有害金属の国間フロー解析, 第 69 回土木学会中国支部研究発表会, 東広島市, 2017 .

K.Endo, M.Fuse, Uncertainty Analysis of Global Reuse Monitoring, LCE2017, Kamakura, 2017.

K.Endo, M.Fuse, Development of Estimation Method for Trade Flows of Used Products, ICCEE-2016, Higashi-Hiroshima, 2016.

K.Endo, M.Fuse, Advance Method to Estimate International Trade Flows of Used Products, ISIE joint 12th Socio-Economic Metabolism section conference and 5th Asia-Pacific conference, Nagoya, 2016.

遠藤昂平, 布施正暁, 中古製品を対象とした貿易量推定法の開発, 第 68 回土木

学会中国支部研究発表会 ,広島市 ,2016 .
M.Fuse, Advanced Method to Quantify
Global Flows of Used Products, ISIE2015,
Guildford in England, 2015.

川端真治, 布施正暁, 物量単位に着目し
た貿易統計の不整合問題に関する研究,
第 67 回土木学会中国支部研究発表会,
宇部市, 2015 .

〔図書〕(計 0 件)

〔産業財産権〕

- 出願状況 (計 0 件)
- 取得状況 (計 0 件)

〔その他〕

ホームページ等

<http://www.civil-hu.jp/itplan/>

6 . 研究組織

(1)研究代表者

布施 正暁 (FUSE, Masaaki)

広島大学・大学院工学研究科・准教授

研究者番号 : 70415743

(2)研究分担者

なし

(3)連携研究者

なし

(4)研究協力者

鹿島 茂 (KASHIMA, Shigeru)

小坂 浩之 (KOSAKA, Hiroyuki)

村上 進亮 (Shinsuke Murakami)