

令和 3 年 6 月 8 日現在

機関番号：15401

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2018～2020

課題番号：18H01659

研究課題名(和文) Data Fusionによる貿易統計の高度活用

研究課題名(英文) Advanced use of trade statistics based on data fusion

研究代表者

布施 正暁 (Fuse, Masaaki)

広島大学・先進理工系科学研究科(工)・准教授

研究者番号：70415743

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 13,000,000円

研究成果の概要(和文)：本研究は、貿易統計の高度活用としてData Fusionに基づく貿易統計から真の貿易量を効率的に作成する方法を確立するため、貿易統計の不整合問題発生機構の解明に資する不整合要因診断システムを構築した。さらに、各国が整備する貿易統計のData Fusion技術として、教師なし機械学習である非負値行列因子分解法を不整合問題に適用した。エネルギー・環境・資源リスクに影響を与える水俣条約に着目し、水俣条約の規制対象である水銀・水銀含有製品に関する貿易統計の不整合問題を活用することで、水俣条約の実効性を評価した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究の学術的意義は、貿易統計の不整合問題を「修正すべく統計的問題」から「活用すべき統計的性質」と再解釈することで、貿易統計の新しい用途とそのための新しい方法論を提示した点である。貿易統計の新しい用途である国際条約の実効性評価と、貿易統計の新しい方法論である不整合要因診断システムや非負値行列因子分解法はビックデータサイエンスに貢献するため、社会的意義の高い研究成果といえる。

研究成果の概要(英文)：This study aims to develop a method for create true trade volume from trade statistics based on data fusion approach. As the results, the study built an identification system of factors affecting the discrepancies with trade statistics. In addition, Non-negative Matrix Factorization method was applied into the discrepancies with trade statistics as a newly data fusion approach. Finally, the effectiveness of trade regulation to mercury and mercury added products in the Minamata Convention was evaluated from the perspective of the trade discrepancy.

研究分野：社会システム

キーワード：貿易統計 不整合問題 Data Fusion 機械学習 非負値行列因子分解 水俣条約 不整合要因

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属します。

様式 C-19、F-19-1、Z-19（共通）

1. 研究開始当初の背景

社会システムのグローバル化に伴い、国際貿易による大気汚染、生物多様性、食料問題などのエネルギー、環境、資源リスクへの影響^{1,3)}が注目を集めている。このようなリスクの評価では、国境を越えたリスク発現の背景にある、リスクの起因となる製品はどの国で生産され、最終的にどの国で消費されるか、この「真の貿易量」を捉えることが大前提となる。真の貿易量の情報源として、各国で整備される貿易統計が存在する。国連が約 150 カ国の貿易統計を収集し、1960 年から 5000 品目を超える製品の国間貿易量を金額、数量単位で提供する⁴⁾。しかし、経由貿易が生じる場合、貿易統計から真の貿易量を追跡することは極めて難しくなる。例えば、経由国から輸入された製品の真の原産地国を、また経由貿易国へ輸出された製品の真の最終消費国を、経由貿易国の貿易統計から知ることはできない。よって、貿易統計をそのまま使用する既存研究^{1,3)}の結果は経由貿易によるバイアスを内包している。さらに、貿易統計は不整合問題と呼ばれる独自の問題を有する。貿易統計はある一つの国間貿易に対して、その輸出国と輸入国の貿易統計でそれぞれ報告される二つのデータが存在する。不整合問題とは、本来一致すべきこの二つのデータの値が乖離する現象を指す。不整合問題はゲーム理論の生みの親である Morgenstern によって指摘され⁵⁾、今まで多くの研究が行われているが^{6,7)}、その解決に至っていない。不整合問題では、ある貿易に対する輸出、輸入両国の報告する二つのデータは同一と考えられている。より正確にいうと、輸出、輸入両国の貿易統計で報告される貿易相手国の定義（原産地国・最終消費国か、直前・直後取引国か）は同じと仮定している。しかし、この仮定は本当に正しいのだろうか。この仮定が正しくない場合（二つのデータは別物と解釈され）、異なるデータの情報を最大限活用する Data Fusion の適用が可能になる。以上より、本研究の核心をなす学術的「問い」は、1)貿易統計報告国によって相手国の定義が異なるか、2)Data Fusion より貿易統計から真の貿易量を作成できるか、の 2 点である。

2. 研究の目的

本研究は経済統計界のビックデータである貿易統計の高度活用を目指して、貿易統計の不整合問題に注目する。不整合問題を「修正すべく統計的問題」から「活用すべき統計的性質」と再解釈することで、各国貿易統計に Data Fusion（データ融合手法）を適用し、真の貿易量を効率的に作成する方法を確立する。

3. 研究の方法

貿易統計の高度活用として Data Fusion に基づく貿易統計から真の貿易量を効率的に作成する方法を確立するため、1)不整合発生機構の解明、2)Data Fusion 技術の構築、3)貿易影響評価への適用、の 3 つの研究課題を実施した。1)不整合発生機構の解明では、不整合問題の発生機構を解明する方法として、をさらなる改良と体系化を進め、不整合要因のツリー構造とそのツリー分岐点での統計モデルを有する不整合要因診断システムを構築した。2)Data Fusion 技術の構築では、ネットワーク理論と欠損値補完の分析枠組みに加えて、教師なし機械学習である非負値行列因子分解法を不整合問題に適用した。3)貿易影響評価への適用では、本研究が注目するエネルギー・環境・資源リスクに影響を与える水俣条約に着目し、同条約で規制する水銀・水銀含有製品に関する貿易統計の不整合問題により同条約の実効性を評価した。

4. 研究成果

4.1. 不整合発生機構の解明

ここでは、本研究の不整合発生機構の解明に関する研究成果を示す。本研究は貿易統計の不整合要因として、貿易システム要因、統計システム要因、ヒューマンエラー要因を挙げる。貿易システムとは、貿易現象特有の経由貿易、関税回避のための別品目申告・過少申告・密輸に由来する不整合要因である。統計システム要因とは、FOB（生産者）価格と CIF（購入者）価格の違い、数量単位の集計問題、報告時期の国間のタイムラグなどの貿易統計作成に由来する不整合要因である。ヒューマンエラー要因とは誤記入、誤集計などの単純な人為的なミスに由来する不整合要因である。以上の不整合要因を診断するシステムの概念図を図 1 に示す。本不整合要因診断システムは、貿易統計から得られる輸出報告値と輸入報告値を、不整合値、相手国欠損値、欠損値、外れ値の不整合要因に紐づけられる個別診断指標指標と許容値の総合診断指標により評価する。そして、個別診断指標より、不整合要因の影響を定量的に判断する。本診断システムはツリー構造をもち、最初の分岐点で当該報告値の外れ値検知を行う。外れ値検知では、MSD 法（Modified Stahel-Donoho Method）を採用した。外れ値が検知されなかった報告値は次の分岐点で数量報告の欠損の有無が判定される。ここでは、当該報告値の金額報告があるが、数量報告がない場合を欠損値と判定する。続く、欠損値が判定されなかった報告値は続く分岐点で相手国報告の欠損の有無が判定される。輸出報告値の場合は対応する輸入報告値、輸入報告値の場合は対応する輸出報告値において数量報告がない場合を相手国欠損値と判定する。最後の分岐点において、相手国欠損値が判定されなかった報告値の整合性が評価される。整合性は輸出報告値と輸入報告値の整合比から評価される。

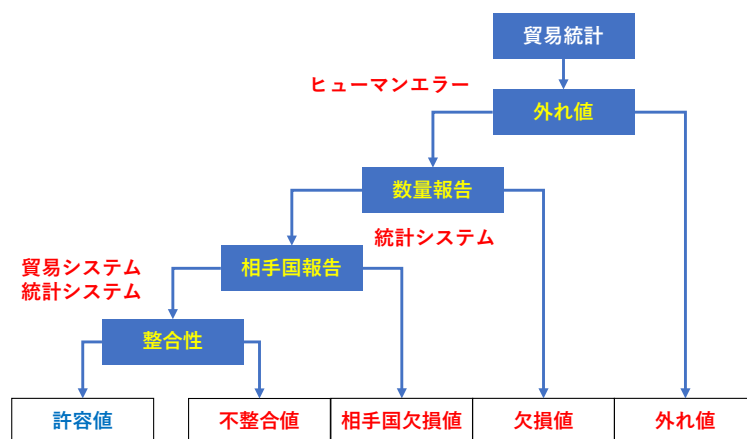


図 1. 不整合要因診断システム

不整合要因診断システムを検証するため、2002年から2015年にまでの鉄鉱石のODペア別の輸出報告値を対象としたケーススタディを実施した。表1に鉄鉱石のODペア別輸出報告値に対する各診断指標のODペア比率を示す。表1では、すべてのODペアの重みを同じと仮定して診断しているため、各ODペアの輸出金額を重みとして使用した結果を表2に示す。

表1より、不整合要因診断システムの総合診断指標である許容値に注目する。許容値は不整合が問題にならない報告値の割合を意味し、2002年から2015年において0.11から0.17の値が得られた。つまり、鉄鉱石の輸出報告値において信頼して使えるデータは全体の11から17%程度しかないと判断できる。さらに個別診断指標を見ると、欠損値の影響が大きく0.38から0.44の値が得られた。鉄鉱石に関しては、金額は報告されているが、数量が報告されないデータが全体の38から44%と高い割合を占めることがわかる。本研究の関心である不整合値に関しては、0.26から0.34の値が得られ、欠損値同様に高い割合でデータに不整合が生じていることがわかる。最後に、外れ値は0.14から0.17と許容値と同等もしくはそれ以上の値が得られた。以上より、鉄鉱石の輸出報告値については、不整合値、相手国欠損値、欠損値、外れ値と貿易システム、統計システム、ヒューマンエラーに起因する要因の影響が大きいことがわかる。

表2より、各ODペアの金額（重み）に注目すると、不整合要因の診断結果は大きく変わることがわかる。例えば、重み無しの許容値は0.11から0.17から重みありの許容値と33から77%と増加する結果が得られた。また、重みありの不整合値は0.14から0.63と重みなしと異なる傾向が得られた。許容値と不整合値の値は分散し、2013年の許容値は0.33と低い値に対し、同年の不整合値は0.63と反対に高い値になった。も増加している傾向が得られた。重みがない場合で最も影響が大きかった欠損値は0.02から0.05となり、欠損のODペア数が多いが、その取引される金額は少ない傾向が明らかになった。外れ値は2014年に0.14の値になったが、それ以外の年は0.01以下でほぼ無視できるレベルである。

表 1. 不整合要因診断システムのケーススタディ結果（鉄鉱石輸出報告値，ODペア比率）

| | 許容値 | 不整合値 | 欠損値 | 外れ値 | 計 |
|------|------|------|------|------|------|
| 2002 | 0.17 | 0.28 | 0.39 | 0.16 | 1.00 |
| 2003 | 0.16 | 0.31 | 0.38 | 0.14 | 1.00 |
| 2004 | 0.12 | 0.30 | 0.43 | 0.15 | 1.00 |
| 2005 | 0.15 | 0.26 | 0.44 | 0.15 | 1.00 |
| 2006 | 0.15 | 0.27 | 0.41 | 0.16 | 1.00 |
| 2007 | 0.14 | 0.30 | 0.40 | 0.16 | 1.00 |
| 2008 | 0.12 | 0.31 | 0.42 | 0.15 | 1.00 |
| 2009 | 0.11 | 0.30 | 0.43 | 0.16 | 1.00 |
| 2010 | 0.11 | 0.31 | 0.41 | 0.17 | 1.00 |
| 2011 | 0.12 | 0.32 | 0.40 | 0.16 | 1.00 |
| 2012 | 0.13 | 0.30 | 0.41 | 0.16 | 1.00 |
| 2013 | 0.11 | 0.34 | 0.39 | 0.16 | 1.00 |
| 2014 | 0.14 | 0.29 | 0.40 | 0.16 | 1.00 |
| 2015 | 0.14 | 0.31 | 0.41 | 0.15 | 1.00 |

表 2. 不整合要因診断システムのケーススタディ結果（鉄鉱石輸出報告値，重み付き OD 比率）

| | 許容値 | 不整合値 | 欠損値 | 外れ値 | 計 |
|------|------|------|------|------|------|
| 2002 | 0.64 | 0.34 | 0.02 | 0.00 | 1.00 |
| 2003 | 0.74 | 0.24 | 0.03 | 0.00 | 1.00 |
| 2004 | 0.53 | 0.43 | 0.04 | 0.00 | 1.00 |
| 2005 | 0.55 | 0.41 | 0.04 | 0.00 | 1.00 |
| 2006 | 0.80 | 0.15 | 0.05 | 0.00 | 1.00 |
| 2007 | 0.72 | 0.24 | 0.04 | 0.00 | 1.00 |
| 2008 | 0.67 | 0.29 | 0.03 | 0.01 | 1.00 |
| 2009 | 0.52 | 0.44 | 0.04 | 0.00 | 1.00 |
| 2010 | 0.60 | 0.37 | 0.03 | 0.00 | 1.00 |
| 2011 | 0.61 | 0.35 | 0.03 | 0.00 | 1.00 |
| 2012 | 0.75 | 0.20 | 0.05 | 0.00 | 1.00 |
| 2013 | 0.33 | 0.63 | 0.04 | 0.00 | 1.00 |
| 2014 | 0.69 | 0.14 | 0.04 | 0.14 | 1.00 |
| 2015 | 0.77 | 0.19 | 0.03 | 0.00 | 1.00 |

4. 2. Data Fusion 技術の構築

ここでは，本研究の Data Fusion 技術の構築に関する研究成果を示す．輸出報告値と輸入報告値を結合し，教師なし機械学習である非負値行列因子分解法を用いて OD パターンと OD パターン別の重みに分解し，OD パターンに重みを掛け合わせることで，OD パターン別の OD 貿易量を構築する．OD パターンをネットワーク理論で解釈することで，純流動ベースの OD 貿易量，総流動ベースの OD 貿易量を抽出する．非負値行列因子分解法では， $M \times N$ サイズの非負値行列 X を， $M \times K$ 非負値行列 T と $K \times N$ 非負値行列 V の積の形に分解 K は基底数 ($1 \leq K \leq \min(M, N)$) 基底数と同じ数のパターンが抽出される（図 2 参照）．貿易統計の不整合問題に非負値行列因子分解法を適用する際には，輸出報告値と輸入報告値の結合行列が X ，OD パターン行列が T ，OD パターン別重み行列が V となる．

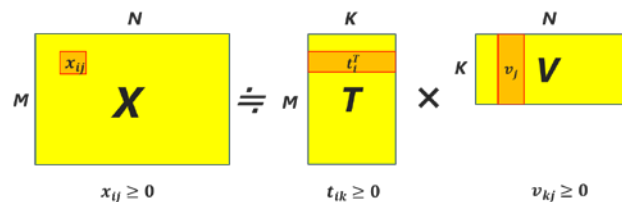


図 2. 非負値行列因子分解法

2017 年の鉄鉱石の輸出報告値と輸入報告値を対象に非負値行列因子分解法を適用した．結果として，3つの OD パターンの抽出に成功した．抽出した OD パターンの内，その重みが大きい OD パターンを図 3 に示す．本 OD パターンのネットワーク理論的解釈は純流動ベースの OD 貿易量の可能性を示唆するものである．

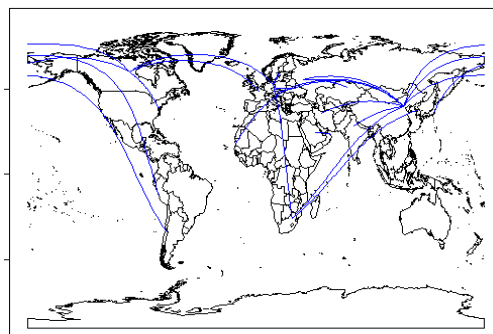


図 3. 非負値行列因子分解法より抽出した OD パターン（2017，鉄鉱石）

4.3. 貿易影響評価への適用

ここでは、本研究の貿易影響評価への適用に関する研究成果を示す。2017年に発効した水俣条約に着目し、同条約で規制する水銀・水銀含有製品に関する貿易統計の不整合問題を活用して同条約の実効性を評価した。水銀・水銀含有製品に関する貿易統計の品目として29品目を取り上げる。貿易統計の対象期間として、1996年から2016年を対象とする。水銀・水銀含有製品に関する貿易統計品目の輸出報告値と輸入報告値についての級内相関係数（intra-class correlation coefficients: ICC）を、品目別、報告別でそれぞれ計算した。図4にその計算結果を示す。ただし、報告国はアジア地域のみを示す。図4の品目別 ICC 計算結果より、圧力計、温度計、塗料、水銀化合物、酸化水銀電池の5品目において0.4未満の低い ICC 値が得られた。これらの品目は水俣条約で規制しても、その不整合状況から別品目申告・過少申告・密輸・などの貿易不正が予想され、十分に貿易規制が機能しない可能性がある。一方で高い ICC 値が得られた品目は、貿易統計で正確に報告されており、十分にトレーサビリティが確保されており、規制品目として問題ないといえる。報告国別 ICC 計算結果を見ると、カンボジア、ベトナム、モンゴル、モルディブ、ミャンマー、フィリピン、ブルネイ、パキスタン、中国（マカオ）の9カ国で低い ICC 値が得られた。モンゴルとフィリピンに関しては水銀関係の密輸の存在が報告されており⁸⁾、品目と同様に貿易規制が機能しない可能性がある。以上より、貿易統計の不整合問題を活用することで、水俣条約のような国際的な貿易規制の実効性を間接的に評価できることから、貿易統計の不整合問題のエネルギー・環境・資源リスク研究への新たな可能性を示した。

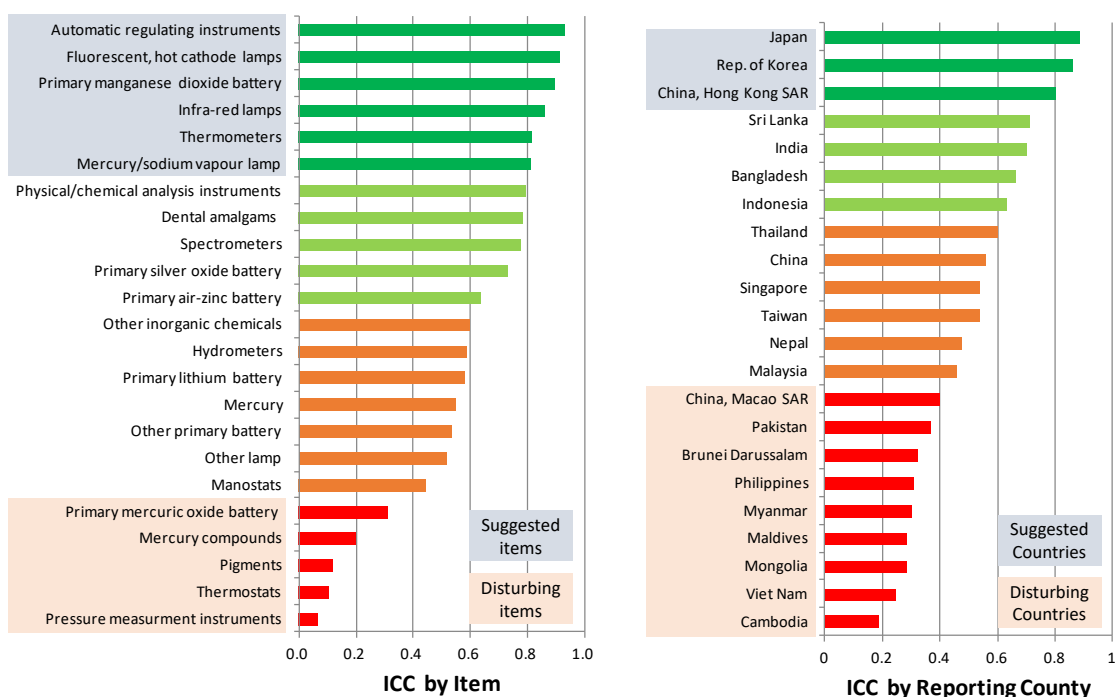


図4. 水銀・水銀含有製品に関わる輸出報告値と輸入報告値における品目別・報告国別級内相関係数の計算結果

参考文献

- 1) Zhang, A. et al. Transboundary health impacts of transported global air pollution and international trade, *Nature*. 543, 705-709 (2017).
- 2) Lenzen, M. et al. International trade drives biodiversity threats in developing nations, *Nature*, 486, 109-112 (2012).
- 3) Dalin, C. et al. Groundwater depletion embedded in international food trade, *Nature*. 543, 700-704 (2017).
- 4) UN comtrade: <https://comtrade.un.org/> .
- 5) Morgenstern, O, *On the Accuracy of Economic Observations*, Princeton University Press. (1950).
- 6) 小坂浩之他, 国際海上貨物流動統計とその精度の検討, *運輸政策研究* 4, 109-31 (2001) .
- 7) 小坂浩之他, 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, 673-680 (2016).
- 8) 環境省, 平成 29 年度環境経済の政策研究, 水俣条約に基づく水銀削減政策として経済手法の活用可能性と期待される効果に関する調査・分析 (2018).

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計4件（うち査読付論文 0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 Noguchi Hiroki, Fuse Masaaki | 4. 巻 558 |
| 2. 論文標題 Rethinking critical node problem for railway networks from the perspective of turn-back operation | 5. 発行年 2020年 |
| 3. 雑誌名 Physica A: Statistical Mechanics and its Applications | 6. 最初と最後の頁 124950 ~ 124950 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.physa.2020.124950 | 査読の有無 無 |
| 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 - |
| 1. 著者名 Noguchi H., Hienuki S., Fuse M. | 4. 巻 203 |
| 2. 論文標題 Network theory-based accident scenario analysis for hazardous material transport: A case study of liquefied petroleum gas transport in Japan | 5. 発行年 2020年 |
| 3. 雑誌名 Reliability Engineering & System Safety | 6. 最初と最後の頁 107107 ~ 107107 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.res.2020.107107 | 査読の有無 無 |
| 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 - |
| 1. 著者名 Noguchi Hiroki, Nishizawa Takuma, Fuse Masaaki | 4. 巻 107 |
| 2. 論文標題 A method to characterize the social cascading damage processes of disasters using media information | 5. 発行年 2021年 |
| 3. 雑誌名 Natural Hazards | 6. 最初と最後の頁 231 ~ 247 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/s11069-021-04581-4 | 査読の有無 無 |
| 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 - |
| 1. 著者名 Lam C.Y., Fuse M., Shimizu T. | 4. 巻 44 |
| 2. 論文標題 Assessment of risk factors and effects in hydrogen logistics incidents from a network modeling perspective | 5. 発行年 2019年 |
| 3. 雑誌名 International Journal of Hydrogen Energy | 6. 最初と最後の頁 20572 ~ 20586 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.ijhydene.2019.05.187 | 査読の有無 無 |
| 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8件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 4件）

| |
|---------------------------------------|
| 1. 発表者名 中野友弘, 野口寛貴, 布施正暁 |
| 2. 発表標題 フィリピンを対象とした水銀の動的マテリアルフロー分析 |
| 3. 学会等名 第71回土木学会中国支部研究発表会 |
| 4. 発表年 2019年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 Tomohiro Nakano, Hiroki Noguchi, Masaaki Fuse |
| 2. 発表標題 Dynamic Material Flow Analysis of Mercury in Philippine |
| 3. 学会等名 18th International Conference on Civil and Environmental Engineering (国際学会) |
| 4. 発表年 2019年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 Makoto Hamahara, Hiroki Noguchi, Masaaki Fuse |
| 2. 発表標題 Development of Used Product Trade Amount Estimation Method based on Price Distribution Characteristics |
| 3. 学会等名 18th International Conference on Civil and Environmental Engineering (国際学会) |
| 4. 発表年 2019年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 Junya Nakagawa, Hiroki Noguchi, Masaaki Fuse |
| 2. 発表標題 Factor Analysis of Mirror Statistics Problem in Trade Statistics |
| 3. 学会等名 18th International Conference on Civil and Environmental Engineering (国際学会) |
| 4. 発表年 2019年 |

| |
|----------------------------------|
| 1. 発表者名 渡邊駿, 野口寛貴, 布施正暁 |
| 2. 発表標題 自動車グローバルサプライチェーンの構造分析 |
| 3. 学会等名 第70回土木学会中国支部研究発表会 |
| 4. 発表年 2018年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 Shun Watanabe, Hiroki Noguchi, Masaaki Fuse |
| 2. 発表標題 Structural Analysis of global Supply Chain on Automobile |
| 3. 学会等名 17th International Conference on Civil and Environmental Engineering (国際学会) |
| 4. 発表年 2018年 |

| |
|------------------------------|
| 1. 発表者名 西澤巧真, 野口寛貴, 布施正暁 |
| 2. 発表標題 相乗型豪雨災害のネットワーク分析 |
| 3. 学会等名 第72回土木学会中国支部研究発表会 |
| 4. 発表年 2020年 |

| |
|-------------------------------------|
| 1. 発表者名 中根大輔, 野口寛貴, 布施正暁 |
| 2. 発表標題 水銀マテリアルフローにおける貿易不整合の影響評価 |
| 3. 学会等名 第72回土木学会中国支部研究発表会 |
| 4. 発表年 2020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 | 瀬谷 創 (Seya Hajime) (20584296) | 神戸大学・工学研究科・准教授 (14501) | |
| 研究分担者 | 塚井 誠人 (Tsukai Makoto) (70304409) | 広島大学・先進理工系科学研究科(工)・准教授 (15401) | |
| 研究分担者 | 力石 真 (Chikaraishi Makoto) (90585845) | 広島大学・先進理工系科学研究科(国)・准教授 (15401) | |
| 研究分担者 | 坂本 将吾 (Sakamoto Shogo) (50580057) | 一般財団法人電力中央研究所・環境科学研究所・主任研究員 (82641) | |

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 |
|---------|---------|
|---------|---------|