

機関番号：17102

研究種目：若手研究（B）

研究期間：2009～2010

課題番号：21710044

研究課題名（和文） スペクトラルグラフ理論に基づく汚染クラスターの構造分解分析

研究課題名（英文） Structural Decomposition Analysis of Pollution Clusters:  
Spectral Graph Analysis

研究代表者

加河 茂美 (KAGAWA SHIGEMI)

九州大学・経済学研究院・准教授

研究者番号：20353534

研究成果の概要（和文）：本研究では、スペクトラルグラフ理論と産業連関分析を融合して、製品サプライチェーンからエネルギー集約的な産業クラスターを検出する方法を開発した。乗用車のサプライチェーンを研究対象にすると、自動車部品クラスター、板ガラス・安全ガラスクラスター、自動車車体クラスターの3つの産業クラスターが重要な位置を占めていることが分かった、この3つの産業クラスターのエネルギー集約度を合計すると、乗用車のサプライチェーン全体によって誘発されるエネルギー消費量の74%を占めていることが分かった。

研究成果の概要（英文）：Reconciling Spectral Graph Theory with Input-Output Analysis, this paper develops a method to detect groups of industries that are strongly connected through exchanges of energy inputs. This method developed was applied to automobile supply chain in Japan, and major clusters with high energy intensity in the automobile supply-chain, Motor vehicle parts and accessories cluster, Sheet glass and safety glass cluster, and Motor vehicle bodies cluster, were identified. I find that the energy consumptions in the three clusters account for 74% of the total energy consumption associated with the automobile supply chain of Japan.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2009年度	1,400,000	420,000	1,820,000
2010年度	1,000,000	300,000	1,300,000
年度			
年度			
年度			
総計	2,400,000	720,000	3,120,000

研究分野：経済統計学

科研費の分科・細目：環境学・環境影響評価・環境政策

キーワード：スペクトラルグラフ理論、産業連関分析、汚染クラスター、構造分解

## 1. 研究開始当初の背景

地球温暖化問題の解決に向けて、ISO14040シリーズやWRI(World Resources Institute)とWBCSD(World Business Council for Sustainable Development)によるThe Greenhouse Gas Protocol Initiativeにおいて、ライフサイクル全体を視野においたScope3の排出量勘定が

議論されているように、企業によるライフサイクルCO<sub>2</sub>排出量の管理による排出削減がますます重要視されている。ライフサイクルCO<sub>2</sub>排出量に着目する1つの理由は、下流産業に直接的な排出の責任だけでなく、原材料や部品などを供給する上流産業から間接的に排出されるCO<sub>2</sub>の責任も求めることによ

て、下流産業自身の生産工程の省エネルギー化などの排出削減やエネルギー集約的な材料や部品の使用をなるべく控えさせる効果を狙っているためである。

その上流から下流への生産連鎖におけるライフサイクル排出量の責任分担量を下流産業、上流産業、そして消費者に割り当てることを可能とするのが排出分担分析(Gallego and Lenzen, 2005; Lenzen et al., 2007; Lenzen, 2007)であり、その生産連鎖が排出するライフサイクルCO<sub>2</sub>排出量の特定を可能とするのが構造経路分析 (Structural Path Analysis: SPA) (例えば、Lenzen, 2003)である。

これらの分析方法の有用性については言うまでもないが、その一方で分析の限界についても理解しなければいけない。SPAは、与えられた産業間ネットワークから排出集約的なリンクを抽出する手法であるが、抽出された膨大なリンク情報に基づいて産業間連携による排出削減可能性を考察することが時に非常に困難になる。そこで本研究では、近年急速に発展しているスペクトラルクラスター理論を利用して、上流産業から下流産業までの膨大なリンク情報を網羅的に抽出するのではなく、その膨大なリンク情報を適切な評価基準に基づいてグルーピング化することによって、エネルギー・排出集約的な産業クラスターを検出する。

## 2. 研究の目的

そこで本研究では、産業連関理論とスペクトラルグラフ理論を組み合わせることにより、巨大な産業間ネットワークからエネルギー集約的なクラスターを検出する手法を提案することを1つ目の目的とする。2つ目の目的は、その提案された手法を利用して、自動車サプライチェーンからエネルギー集約的な産業クラスターの検出を行い、その分析手法の有用性について確認し、政策提言を行う。

## 3. 研究の方法

まず、産業連関産出モデルを用いると、部門  $j$  の最終需要によって誘発するエネルギー  $k$  の消費量は以下の推計することができる。

$$\mathbf{q} = \text{diag}(\tilde{\mathbf{E}})(\mathbf{I} - \mathbf{A})^{-1} \mathbf{f}_j \quad (1)$$

ここで、 $\mathbf{q} = (q_i)$  は、部門  $j$  の最終需要によって誘発する部門  $i$  の生産に必要なエネルギー  $k$  の消費量を示し、 $\text{diag}(\tilde{\mathbf{E}})$  は各部門の生産1単位あたりのエネルギー  $k$  の消費量を対角成分に持つ対角行列を示し、 $\mathbf{I}$  は単位行列、 $\mathbf{A}$  は投入係数行列、 $\mathbf{f}_j$  は部門  $j$  の最終需要のみ値を持ち、その他の部門の最終需要はゼロである最終需要ベクトルである。(1)式の逆行列部分は、

$$(\mathbf{I} - \mathbf{A})^{-1} = \mathbf{I} + \mathbf{A} + \mathbf{A}^2 + \dots$$

と展開できることを利用すると、(1)式は(2)式のように展開できる。

$$\mathbf{q} = \text{diag}(\tilde{\mathbf{E}})\mathbf{f}_j + \text{diag}(\tilde{\mathbf{E}})\mathbf{A}\mathbf{f}_j + \text{diag}(\tilde{\mathbf{E}})\mathbf{A}^2\mathbf{f}_j + \dots \quad (3)$$

本研究では、(3)式によって表現された環境産業連関モデルを更に尾崎(1990)によって提案された以下の単位構造モデルへと変形した(詳細は、尾崎(1990)を参照されたい)。

$$\mathbf{Q} = \text{diag}(\tilde{\mathbf{E}})\text{diag}(\mathbf{f}_j) + \text{diag}(\tilde{\mathbf{E}})\mathbf{A}\text{diag}(\mathbf{f}_j) + \text{diag}(\tilde{\mathbf{E}})\mathbf{A}\text{diag}(\mathbf{A}\mathbf{f}_j) + \dots \quad (4)$$

ここで、 $\mathbf{Q} = (Q_{ij})$  は、部門  $j$  の最終需要によって誘発する部門  $i$  から部門  $j$  への中間投入物の生産に必要なエネルギー  $k$  の消費量を示している。したがって、(4)式の  $\mathbf{Q} = (Q_{ij})$  は、エネルギー消費量を重みに持つ有向グラフとして解釈できる。部門  $i$  と部門  $j$  の間のエネルギー集約度を計測するため、この有向グラフを以下のように無向グラフに変換する。

$$\begin{cases} Q_{ij}^* = Q_{ij} + Q_{ji} & (i \neq j) \\ Q_{ij}^* = 0 & (i = j) \end{cases} \quad (5)$$

このとき、部門  $i$  (これ以降、頂点  $i$  と呼ぶ)

の重み付き次数は  $d_i = \sum_j Q_{ij}^*$  として計算で

きる。本研究では、エネルギー集約的な産業クラスターを検出するため、(5)式で示される産業ネットワークを適切な個数の集合に分割することを考える。ネットワークを適切な集合に分割する評価基準として、本研究では二分割スペクトラルクラスタリング法 (Shi and Malik (2000)) で用いられる以下(6)式の分割評価基準を採用する。

$$Ncut(C, D) = \frac{Cut(C, D)}{\sum_{u \in C} d_u} + \frac{Cut(D, C)}{\sum_{v \in D} d_v} \quad (6)$$

ここで、 $C$  と  $D$  はそれぞれ二分割されたクラスターを示しており、(6)式の分母の  $\sum_{u \in C} d_u$  はクラスター  $C$  に属する頂点の次数の合計 (つまりクラスター  $C$  に属する頂点と他の全ての頂点間の重みの合計) を、 $\sum_{v \in C} d_v$  は

クラスター $D$ に属する頂点の次数の合計（つまりクラスター $D$ に属する頂点と他の全ての頂点間の重みの合計）を示している。また、分子は

$$Cut(C, D) = Cut(D, C) = \sum_{u \in C} \sum_{v \in D} Q_{uv}^*$$

として定義されており、クラスター $C$ に属する頂点とクラスター $D$ に属する頂点を結ぶ辺の重みの合計を示している。

(6)式を最小化する問題は、同じクラスターに属する頂点間の重み（同じ産業クラスターに属する部門間の中間投入によって誘発するエネルギー消費量）を最大にし、異なるクラスターに属する頂点間の重み（異なる産業クラスターに属する部門間の中間投入によって誘発するエネルギー消費量）を最小にするような集合（クラスター）にネットワークを二分割する問題となる。

興味深いことに、(6)式を最小化する問題は以下の(7)式のように書き換えられることが知られている（Shi and Malik (2000)を参照）。

$$\begin{aligned} & \text{minimize} && \frac{\mathbf{y}^T (\mathbf{D} - \mathbf{Q}^*) \mathbf{y}}{\mathbf{y}^T \mathbf{D} \mathbf{y}} \\ & \text{subject to} && \mathbf{y}^T \mathbf{D} \mathbf{i} = 0 \\ & && y_i \in \{1, -b\} \end{aligned} \quad (7)$$

ここで、 $\mathbf{D}$ は各頂点の次数 $d_i$ を対角成分に持つ次数行列を示し、 $\mathbf{L} = \mathbf{D} - \mathbf{Q}^*$ はラプラシアン行列と呼ばれている。また、 $V$ を頂点全部の集合、 $Y$ を $y_i$ が1の値をとる頂点の集合とすると、 $b = \sum_{i \in Y} d_i / \sum_{i \in V-Y} d_i$ として計算できる。(7)式は組み合わせ最適化問題（NP 困難）として定式化されているが、重要な点は、 $y_i$ の各成分を実数値空間上の値と見なすと、(7)式は一般化固有値問題のレイリー商として表すことができ、以下の(8)式のように表される（詳しくは、Shi and Malik (2000)を参照）。

$$\begin{aligned} & \text{minimize} && \lambda = \frac{\mathbf{y}^T (\mathbf{D} - \mathbf{Q}^*) \mathbf{y}}{\mathbf{y}^T \mathbf{D} \mathbf{y}} \\ & \text{subject to} && \mathbf{y}^T \mathbf{D} \mathbf{i} = 0 \\ & && y_i \in \mathbb{R} \end{aligned} \quad (8)$$

本研究では、この一般化固有値問題の解 $\mathbf{y}$ の符号を見ることによって、ネットワークに属する頂点を2つのクラスターに二分割した。その二分割されたクラスターに属する頂点が形成するサブネットワークから隣接行列

$\mathbf{Q}^*$ 、次数行列 $\mathbf{D}$ を作成した後、(8)式に代入することによって得られる一般化固有値問題を解くことによって、二分割されたサブネットワークをさらに二分割し、クラスターを検出した。このような繰り返し二分割法をとってエネルギー集約的な産業クラスターの検出を行った。これによって複数の産業クラスターが検出されるが、クラスターの名称については、当該クラスター内の次数が最も高い部門の名前をクラスターの名称とした。

#### 4. 研究成果

国立環境研究所が作成、一般公開している2000年環境産業連関表（393部門）を利用して、乗用車部門の最終需要によって形成される乗用車サプライチェーンが誘発するエネルギー消費構造を(4)式によって求めた。そのエネルギー消費構造から(5)式に示される乗用車サプライチェーンに関する隣接行列を作成し、その隣接行列を利用して、乗用車サプライチェーンからエネルギー集約的な産業クラスターを検出した。

分析の結果、乗用車サプライチェーンから合計で27個の産業クラスターが検出された。図1は最もエネルギー集約なクラスターである自動車部品クラスターを示している。産業クラスター内での産業間取引によって誘発するエネルギー消費量（これ以降、エネルギー集約度）を計測すると、20.7PJと乗用車サプライチェーン全体で誘発するエネルギー消費量の約40%を占めており、省エネルギー、排出削減の観点から優先度の最も高い産業クラスターであることが分かる（エネルギー集約度については図6を参照）。図1から、特に、内燃機関電装品（#244）、自動車用内燃機関・同部分品（#250）、自動車部品（#251）の次数の値が高く、省エネの観点から中心的な役割が期待される。具体的には、図6から、自動車部品クラスターは、電力消費量が高いことから、例えば、電力集約的な鋳鉄品及び鍛工品（鉄）（#171）の利用をなるべく抑えて間接的に電力消費量を抑えるということが必要である。もちろん、部品の安全性、耐久性も担保されなくてはならない。

次にエネルギー集約的な産業クラスターは、板ガラス・安全ガラスクラスターであった（図2を参照）。エネルギー集約度は10.2PJと全体の約20%を占めていることが明らかとなった。図6から、本クラスターは、特に、石油系エネルギーの消費量が高いことが分かる。この理由としては、ガラス製品を製造する際に、溶解の際に大量の重油を利用しており、これが本クラスターのエネルギー集約度が高い一つの要因である。現在、溶解に用いる重油をより環境負荷の低い天然ガスに切り替えることが検討されているが、これによって乗用車サプライチェーンに付随

する排出量を低下させることが期待される。自動車産業は、このようなガラス製造においてより環境負荷の低い製品の利用を促進し、ライフサイクル全体のエネルギー消費量、排出量を低減することを目指してほしい。

本研究によって、乗用車サプライチェーンからエネルギー集約的な産業クラスターを検出するだけでなく、そのエネルギー種別の集約度を計測することが可能となった。検出された 27 個の産業クラスターを一つずつ考察することは紙面の都合上避けることにし、特に影響力の大きかった産業クラスターについてここでは考察を行った。図 3~5 もまたエネルギー集約度の高い、産業クラスターを示している。

乗用車のサプライチェーンを研究対象にすると、自動車部品クラスター、板ガラス・安全ガラスクラスター、自動車車体クラスターの 3 つの産業クラスターが重要な位置を占めており、この 3 つの産業クラスターのエネルギー集約度を合計すると、乗用車のサプライチェーン全体によって誘発されるエネルギー消費量の 74% を占めていることが分かった。

本研究では、乗用車を研究対象にして、エネルギー集約度の高い産業クラスターを検出したが、その他の多様な財・サービスに適用可能であり、当該財・サービスのサプライチェーンのどこにエネルギー集約的なクラスターが存在しているのか検証することが可能である。さらには、国内だけのサプライチェーンだけでなく、グローバルサプライチェーンを研究対象にすることも当然可能であり、これらの応用分析については今後の課題としたい。

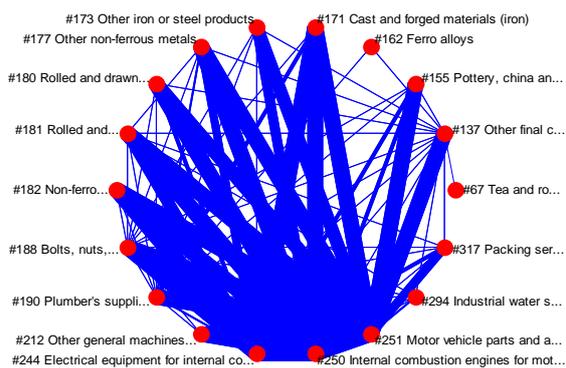


図 1. 自動車部品クラスター

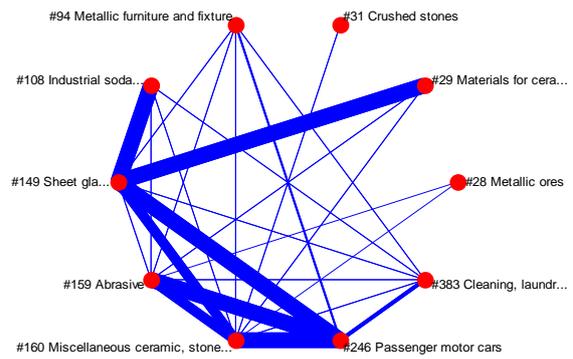


図 2. 板ガラス・安全ガラスクラスター

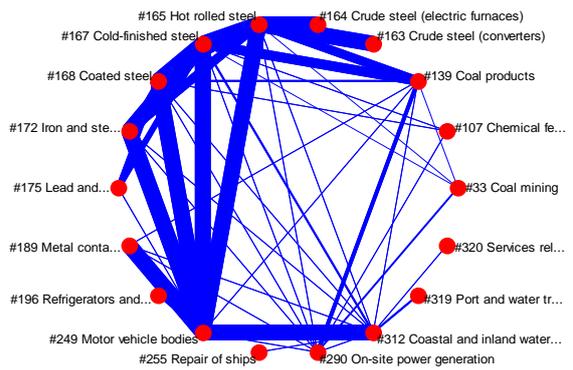


図 3. 自動車車体クラスター

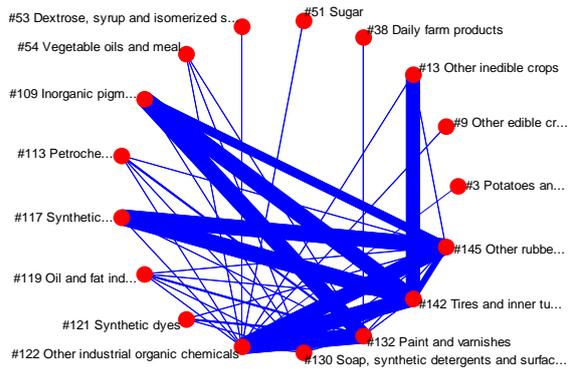


図 4. タイヤ・チューブクラスター

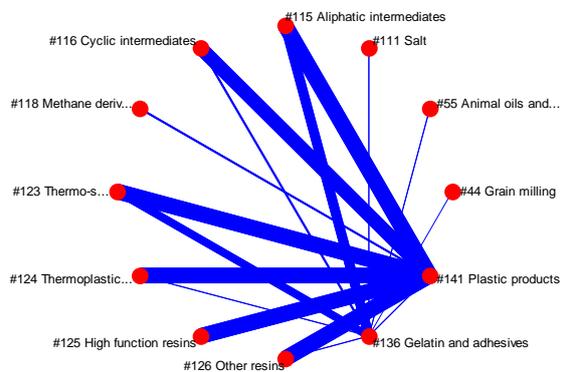


図 5. プラスチック製品クラスター

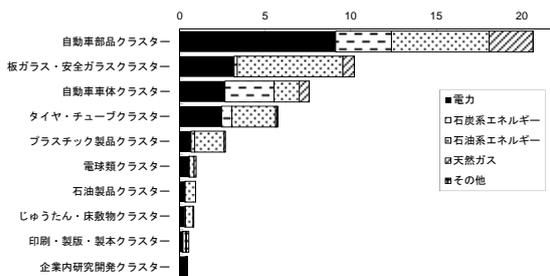


図 6. 産業クラスターのエネルギー集約度 (PJ)

## 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 5 件)

- ① Kagawa, S., Nansai, K., Kondo, Y., Hubacek, K., Suh, S., Minx, J., Kudoh, Y., Tasaki, T., and Nakamura, S., “Role of Motor Vehicle Lifetime Extension in Climate Change Policy,” *Environmental Science & Technology*, 査読有, vol.45, no.4, pp. 1184-1191, 2011.
- ② Nansai, K., Kagawa, S., Kondo, Y., Suh, S., Inaba, R. and Nakajima, K., “Improving the Completeness of Product Carbon Footprints Using a Global Input-Output Model: The Case of Japan,” *Economic Systems Research*, 査読有, vol.21, no.3, pp. 267-290, 2009.
- ③ Nansai, K., Kagawa, S., Suh, S., Fujii, M., Inaba, R. and Hashimoto, S., “Material and Energy Dependence of Services and Its Implications for Climate Change,” *Environmental Science & Technology*, 査読有, vol.43, no.12, pp. 4241-4246, 2009.
- ④ Kagawa, S., Oshita, Y., Nansai, K. and Suh, S., “How Has Dematerialization Contributed to Reducing Oil Price Pressure?: A Qualitative Input-Output Analysis for the Japanese Economy during 1990-2000,” *Environmental Science & Technology*, 査読有, vol.43, no.2, pp.245-252, 2009.
- ⑤ Kagawa, S., Nansai, K. and Kudoh, Y., “Does Product Lifetime Extension Increase Our Income at the Expense of Energy Consumption?,” *Energy Economics*, 査読有, vol.31, no.2, pp. 197-210, 2009.

[学会発表] (計 20 件)

- ① 南斉規介、加河茂美、近藤康之、中島謙一、稲葉陸太「消費者責任論から見た日本のグローバル GHG 排出量」『第 6 回日本 LCA 学会研究発表会』、仙台、2011 年 3 月 2~4 日。
- ② 尾下優子、加河茂美、南斉規介「日本における最終需要起源のライフサイクル CO<sub>2</sub> 排出量の構造経路分解」『第 6 回日本

LCA 学会研究発表会』、仙台、2011 年 3 月 2~4 日。

- ③ 片岡美理、加河茂美「エコカー減税・補助金政策が使用済み自動車リサイクルに与える影響」『第 6 回日本 LCA 学会研究発表会』、仙台、2011 年 3 月 2~4 日。
- ④ 岡本隼輔、加河茂美、南斉規介「エネルギー転換に着目した CO<sub>2</sub> 排出変化の要因分析」『第 6 回日本 LCA 学会研究発表会』、仙台、2011 年 3 月 2~4 日。
- ⑤ 筑井麻紀子、加河茂美、近藤康之「地域間 WIO 分析による大都市における消費が他地域に及ぼす影響の評価」『第 6 回日本 LCA 学会研究発表会』、仙台、2011 年 3 月 2~4 日。
- ⑥ Tsukui, M., Kagawa, S., Kondo, Y. “How Consumption Activities in a Metropolitan Area Affect Waste Treatment and Recycling Activities in Surrounding Regions?: An Interregional Waste Input-Output Analysis of Tokyo”, ISIE Asia-Pacific Meeting 2010, Tokyo, 7-9 November 2010.
- ⑦ Takezono, K., Kagawa, S., Keisuke, N. “Eco-efficiency Analysis of the Biodiesel from Used Cooking Oil: Data Envelopment Analysis,” International Conference on Ecobalance 2010, Tokyo, 9-12 November 2010.
- ⑧ Gotoh, Y., Kagawa, S., Kudoh, Y., Keisuke, N. “Structural Decomposition Analysis of the Automobile Gasoline Consumptions,” International Conference on Ecobalance 2010, Tokyo, 9-12 November 2010.
- ⑨ Kondo, Y., Strømman, A.H., Kagawa, S. “Structural Path Analysis and Triangulation of Input-Output Table for Understanding Carbon Footprint”, International Conference on Ecobalance 2010, Tokyo, 9-12 November 2010.
- ⑩ Baiocchi, G., Kagawa, S., Minx, J., Nansai, K., Peters, G. “Understanding the Drivers Behind the Changing Carbon Footprint of Services: A Global, Trade-linked Analysis,” International Conference on Ecobalance 2010, Tokyo, 9-12 November 2010.
- ⑪ Kagawa, S., Nansai, K., Kondo, Y., Hubacek, K., Suh, S., Minx, J., Kudoh, Y., Tasaki, T., Nakamura, S. “The Role of Motor Vehicle Lifetime Extension in Climate Change Policy,” International Conference on Ecobalance 2010, Tokyo, 9-12 November 2010.
- ⑫ 尾下優子、加河茂美、南斉規介「アジア経済における二酸化炭素集約的な産業クラスターの構造比較分析：スペクトラルグラフアプローチ」『環太平洋産業連関分析学会第 21 回(2010 年度)大会』、長崎、

- 2010年10月30～31日。
- ⑬ 尾下優子、加河茂美「日本におけるライフサイクル CO<sub>2</sub> 排出量の構造経路分解」『環境経済・政策学会 2010年大会』、名古屋、2010年9月11～12日。
  - ⑭ Oshita, Y., Nansai, K. and Kagawa, S. “Structural Decomposition Analysis Using Spectral Graph Theory and Its Application to the Energy Issue in Japan,” 18th International Input-output Conference, Sydney, 20-25 June 2010.
  - ⑮ Nansai, K., Nakajima, K., Inaba, R., Suh, S., Kagawa, S. and Kondo, Y. “Finding a Global Energy and Resource Network in a Product Supply Chain using a Global Link Input-Output Model,” 18th International Input-output Conference, Sydney, 20-25 June 2010.
  - ⑯ Kagawa, S., Nansai, K., Suh, S. and Kondo, Y. “Detecting Energy Clusters from the Automobile Supply Chain: Spectral Clustering Approach,” 18th International Input-output Conference, Sydney, 20-25 June 2010.
  - ⑰ 南齊規介、加河茂美、近藤康之、稲葉陸太、中島謙一「GLIO(Global Link Input-Output)モデルのカーボンフットプリント算定への利用」『第5回日本 LCA 学会研究発表会』、横浜、2010年3月4～6日。
  - ⑱ 尾下優子、加河茂美、南齊規介「スペクトラルクラスター解析による原油上昇圧力の構造分解分析とその感度分析」『第5回日本 LCA 学会研究発表会』、横浜、2010年3月4～6日。
  - ⑲ 尾下優子、加河茂美「スペクトラルグラフ理論を利用した構造分解分析とその応用—日本の原油問題を例として—」『環太平洋産業連関分析学会第20回(2009年度)大会』、函館、2009年10月31日～11月1日。
  - ⑳ Nansai, K., Kondo, Y., Kagawa, S. and Suh, S., “Virtual Global Carbon Network Supporting Japan's Economy: Application of Global Link Input-Output Model,” 5th International Conference of the International Society for Industrial Ecology, Lisbon, Portugal, 21-24 June 2009.

〔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.en.kyushu-u.ac.jp/kagawa/top.html>

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

加河 茂美 (KAGAWA SHIGEMI)

研究者番号：20353534

### (2) 研究分担者

研究者番号：

### (3) 連携研究者

研究者番号：