

貿易と環境

——貿易に体化された二酸化炭素排出に関する実証研究展——

松 村 敦 子

東京国際大学論叢 経済学研究 第7号 抜刷
2023年（令和5年）3月20日

貿易と環境

——貿易に体化された二酸化炭素排出に関する実証研究展望——

松 村 敦 子

要 旨

本稿では、貿易に体化された二酸化炭素排出量の推計に関する国際産業連関分析について2000年以降の文献を中心にサーベイを行い、分析手法、分析結果と政策提言について考察した。ここで明らかにされた重要点は、第一に、グローバル化による生産のフラグメンテーションの進展と国際的サプライチェーンの複雑化を受けて、貿易増加によるCO₂排出への影響が高まっていること、第二に、多くの研究において輸出に体化されたCO₂と輸入に体化されたCO₂との差に焦点が当てられ、先進国でマイナス、新興国でプラスという非対称的な結果が示されたことから、先進国と新興国との間でのCO₂排出の責任についての議論が重要性をもってきたこと、第三に、各研究において分析結果に基づきCO₂排出削減に資する特徴的な環境政策への提言がなされていることが挙げられる。世界レベルでの環境保護政策が進められる中で貿易に体化されたCO₂排出の議論が深まっていくことが明らかで、この種の分析の精度を高め、現状把握と政策提言のための詳細な分析結果を提示することが求められる。

キーワード：国際産業連関分析，貿易に体化された二酸化炭素，カーボンリーケージ，国連気候変動枠組条約

Trade and Environment

— A Survey of the Literature Estimating Carbon Emissions Embodied in International Trade —

MATSUMURA, Atsuko

Abstract

This paper surveys the empirical research papers estimating embodied carbon in international trade focusing on the analytical methodology and the estimated results accompanied by the political

implications. The following facts are resulted by the survey. First, embodied carbon in international trade is increasing according to the complicated supply chain based on the accelerated international production fragmentation. Second, the balance between carbon emissions embodied in export and that in import for each country is shown positive for the developing countries and negative for the developed countries, which has activated the debate on the responsibility of carbon emissions. For the current global environmental policies to be effective and harmonized, this kind of research would be useful for giving the precise facts about the situation of detailed carbon emissions estimated by country and by industry.

目 次

1. はじめに
2. 貿易自由化による環境への影響
3. 貿易に体化されたCO₂排出（EET）研究：論点と分析手法
 - 3.1 主要な論点
 - 3.2 分析の種類
 - 3.3 分析手法
 - 3.4 多地域産業連関表（MRIO）データベースについて
4. 輸出EETと輸入EETのバランスに関する計測
 - 4.1 マクロレベル分析の計測結果に関する国際比較
 - 4.2 特徴的な分析
5. 近年の研究について
 - 5.1 中国の貿易、消費に体化されたCO₂の研究
 - 5.2 中国の二国間貿易におけるCO₂排出に焦点を当てた研究
 - 5.3 ヨーロッパ地域の貿易の環境効果に関する研究
6. 結論

1. はじめに

地球温暖化が原因とみられる自然災害が世界各地で発生し、温室効果ガス削減に対する世界的取り組みが進められている。1995年の世界貿易機関（WTO）成立時には、WTOにおいて貿易面から環境保護を進めようとする機運が高まり、「貿易と環境」といったテーマでの議論が深まった。一方、1992年に採択された国連気候変動枠組条約に基づいて1995年から国連気候変動枠組条約締約国会議（COP）が継続的に開催されている。2015年12月にフランスのパリで開催された第21回国連気候変動枠組条約締約国会議（COP21）では、2020年以降の温室効果ガス排出削減等のためのパリ協定が採択されたことで、2005年に発効した京都議定書に代わる新たな国際枠組みが成立し、先進国のみならず「全ての国による取り組み」が実現した。その結果、COP26が終了した2021年11月時点では、世界154カ国・1地域が2050年等の年限を区切ったカーボンニュートラルの実現を表明しており、さらにCOP26では脱炭素に向けた国際的なルール作りや機運の醸成が進展し、パリ協定第6条に基づく市場メカニズムの実施指針が合意されている。ⁱ⁾

一方、WTO等の場における「貿易と環境」に関する議論の深まりを受けて、経済のグローバル化による貿易拡大が環境にどのような影響を及ぼすのかについての学術的研究が進められてきた。経済成長と貿易拡大が環境汚染物質排出に及ぼす影響に関する問題について、さまざまな手法に

より理論的・実証的に分析した論文が数多く発表されている。

このテーマについて考察した先駆的研究としては、Copeland and Taylorが行った一連の研究が重要であり、ⁱⁱ⁾ さまざまな影響を考慮した分析に基づいていくつかの効果が明らかにされた。そのため、こうした効果について実証しようとする研究も登場した。同時に、貿易拡大による環境効果を捉えるためには、貿易が引き起こす温室効果ガスの排出、その中でも特にCO₂排出量そのものを算出する必要性が認識されるようになった。グローバル化による貿易拡大が生産構造に与える影響を捉え、生産の国際的フラグメンテーションとサプライチェーンの広がりを把握しながらCO₂排出量を算出するためには、各国の最終製品への投入財の世界生産により発生するCO₂を算出しなければならない。こうした考え方のもと、国際産業連関表を用いた多くの分析が登場することとなった。

本論文では、「貿易と環境」のテーマにおける重要分野である「貿易自由化が環境に与える経済的影響」についてのこれまでの流れを振り返ったうえで、国際産業連関表を用いたCO₂排出量の推計に関する文献に焦点を当てて展望し、分析手法と使用データの特徴、分析結果の解釈についての検討を行い、世界的な環境政策への提言等について考察する。第2節では、1990年代後半から2000年代前半までに展開された「貿易自由化による環境への影響」に関する議論を振り返る。第3節では貿易に体化されたCO₂排出推計研究の論点と分析手法について考察し、第4節では輸出と輸入、それぞれに体化されたCO₂とそのバランスに関する計測を行っている文献を取り上げ、第5節では近年の研究に焦点を当てて検討する。第6節では、文献展望から得られた結論と世界的な規模での環境政策に向けた提言について述べる。

2. 貿易自由化による環境への影響

貿易自由化によって生じる環境への影響に関する分析は、1990年代半ばから盛んに行われるようになり、当初は地球温暖化、生物の種の絶滅、産業の環境汚染が重視され、そうした中で国際間での越境環境汚染も問題視されるようになったことから、1994年に締結された北米自由貿易協定（NAFTA）の交渉では米国とメキシコの国境地帯での越境環境汚染の問題が議論され、NAFTAにおける環境に関する合意が付属文書として盛り込まれた。ⁱⁱⁱ⁾ さらにこのテーマは1995年のWTO成立に向けた議論でも取り上げられ、2001年に開始されたドーハ・ラウンド交渉では「貿易と環境」がテーマのひとつとなった。

2000年前後の「貿易と環境」に関する学術論文における論点は、貿易自由化を行う国では貿易活発化とそれによる生産構造の変化と所得増加が実現することになるが、そうした道筋を通して環境に対していかなる効果が生じるのかを分析することであった。Copeland *et al.* (1999; 2004) はこうしたテーマに関して、以下のような効果を理論的に明らかにした。貿易自由化による比較優位財生産を増加させることによって生じる生産構造変化の効果、貿易自由化による市場規模拡大による生産規模拡大効果、貿易自由化による所得増加がもたらす環境規制強化と環境保護生産技術高度化の効果という3つの効果である。^{iv)}

一方で、こうした研究を受けて実証研究も行われるようになった。Antweiler *et al.* (2001) では、環境汚染物質として二酸化硫黄濃度を取り上げ、1970年代から1990年代までの43カ国のデータを用いたパネル分析を行い、貿易自由化によって生じる生産構造変化の効果は小さいものの、貿易によって引き起こされる技術効果と市場規模拡大効果により、二酸化硫黄排出が減少することが示された。Frankel *et al.* (2002) では、環境汚染物質として二酸化硫黄、二酸化窒素、浮遊微小粒

子、CO₂等を取り上げ、1990年代の40カ国程度のデータを用いた推計の結果、二酸化硫黄、二酸化窒素については貿易により減少することが明らかにされ、さらに他の汚染物質についても、貿易によって増加するという結果は示されていない。またここでは、一定の所得水準を超えると所得の増加にともなって環境が良化するというクズネッツカーブの存在を実証している。

関連するその他の実証分析として、環境保護に有用な財である環境物品を対象とした貿易自由化に関する研究が行われてきた。WTOは、環境物品を選定してリストを作成し、そうした環境物品の関税・非関税障壁の削減・撤廃を通じて自由貿易と環境保護の両立を目指してきた。^{v)} 環境物品貿易の自由化と貿易拡大に関する実証分析としては、グラヴィティ・モデルを用いて分析した論文が多くあり、Cantore *et al.* (2018) はOECDの環境物品リストを用いて、環境税、環境イノベーションが輸出に与える効果を分析している。Matsumura (2016) では、アジア太平洋経済協力(APEC)が先駆的に作成した環境物品リストを用いて、近年における環境物品貿易の地域効果とフラグメンテーションによる貿易拡大効果を明らかにしており、Matsumura (2019) では、環境物品のうち再生可能エネルギー関連物品と環境計測用精密機器に焦点を当てて、財別に関税引き下げによる貿易自由化の貿易拡大効果を分析している。

こうした中で、「貿易と環境」のテーマにおいて近年重要性を増してきたのが、「貿易に体化されたCO₂排出 (Emissions Embodied in Trade (EET)) に関する産業連関分析」である。輸出国が生産において排出するCO₂排出量の計測はもちろん重要であるが、輸入国側の排出責任に関する議論も行われるようになった。環境面を考慮した産業連関分析については、1936年に産業連関表を考案したワシリー・レオンチェフ自身がLeontief (1970) において、空気汚染の流れを明示的に組み込んだ産業連関表の仕組みを提示した。そうした表を用いることにより、特定財・サービスの最終需要の変化、いくつかのセクターにおける技術構造の変化、またはその両方の変化に対応して、汚染物質の生産量がどの程度変化するかを解明できることを示している。

こうした研究に端を発して、環境を考慮した多国間産業連関表による分析、「環境拡張された産業連関分析 (EEIOA)」により、貿易に体化されたCO₂について推計しようとする研究が、さまざまな形で進められてきた。さらに、「CO₂排出の責任は、最終製品を生産する国にある」とする従来の考え方に疑問が投げかけられることとなった。CO₂排出の責任国をその財を消費する国とすれば、生産国と消費国の間での排出量のバランスが変化し、生産国が発展途上国、消費国が先進国となる場合、先進国と途上国の間の問題にも発展することになる。COPでの排出削減の取り組みでは、各生産物での消費国の特定に関する分析手法や利用可能データの制約により、現在のところ排出権取引制度なども含めて、生産活動を行った国が排出の責任国となっている。

1単位生産によるCO₂排出量であるCO₂排出係数が明らかにされれば、生産活動におけるCO₂排出と貿易によるその国際間移動を推計することが可能となり、温室効果ガス排出に関する生産者責任と消費者責任に関する議論に結び付く。CO₂の足跡としての「カーボン・フットプリント (CF)」の分析が重視されるようになってきており、近年ではさまざまな視点からCFに関する分析が行われるようになってきている。

3. 貿易に体化されたCO₂排出 (EET) 研究：論点と分析手法

3.1 主要な論点

グローバル化の進展にともなう貿易活発化による温室効果ガス排出の増大の問題が、生産の国際的フラグメンテーションの進展とサプライチェーンの複雑化によってクローズアップされるよ

うになってきた。貿易に体化されるCO₂量は各文献によって差があるものの2004年には世界の年間排出量の約15%～25%であったが、その後年々増加していることが示されている。^{vi)}

国内環境政策の緩い新興国に生産拠点が移転されることにより温室効果ガス排出地の移転が起こり、そうした新興国での生産物が先進国に輸出されることにより、輸出先では環境が汚染されることなく財を消費できる。そのため、こうした生産拠点での輸出財生産による温室効果ガス排出に関して、輸出国が責任を負うべきなのか輸入国が責任を負うべきなのかという問題が生じることになる。特に1990年代後半から2000年代に急速に経済発展を遂げてきた新興国では、輸出に体化された温室効果ガス排出量が急増している一方で、先進国の多くでは生産に体化された温室効果ガスの量よりも消費に体化された量の方が多いため、温室効果ガスの輸入超過となっており、こうした点が注目されている。

温室効果ガスの中で高い排出割合を占めるCO₂に焦点が当てられ、貿易財に体化した炭素の国際移動、カーボンリーケージの問題が世界的に重視されるようになった。2009年のCOP15では、議長国のデンマークが温室効果ガスの中で大きな割合を占めるCO₂の排出の問題に焦点を当て、「貿易と環境」に関する検討課題のひとつとして、貿易に体化されたCO₂の国際移動が取り上げられた。一方で「貿易に体化された温室効果ガス」の推計に関する学術研究が、2000年代以降に盛んに行われるようになった。

また温室効果ガス排出問題はさまざまな政策的議論にも影響を及ぼしてきた。例えば、排出量削減を行っている国は、削減努力を行わず環境対策費用を含めた生産費用が低い国との間での生産と貿易における競争において不利となるため、環境対策を行わない国からの輸入に何らかの制限的措置を設ける必要が生じるといった議論がある。しかしながら先述したように、パリ協定によってすべての国が環境対策での取り組みを進めることとなったため、こうした議論は意味もたなくなり、政策的議論にも変化が生じている。その一方で、貿易に体化されたCO₂量の計測が次々と発表されるようになるにつれ、計測結果をもとにして有用なさまざまな政策提言が行われるようになってきている。

本節では、貿易に体化されたCO₂排出量（Embodied Emissions in Trade, EET）について2000年代以降の分析を中心として、分析の種類、分析手法、分析結果とその解釈についてみていきたい。

3.2 分析の種類

EET分析の種類については、分析対象により、マクロレベル、ミクロレベル、中間レベルでの計測に分類することができる。^{vii)} マクロレベル分析では、一国の総貿易の流れの効果が明らかにされ、一国の消費ベースの輸入と生産ベースの輸出におけるEETを計測することにより、その国がCO₂の純輸出国か純輸入国かを明らかにすることができる。マクロレベルの分析は、データの入手も容易であり政策的な評価を行う上でも適している。

中間レベルの分析では、個々のセクター、もしくは集計された財グループセクターのレベルでのEETに焦点が当てられる。この種の分析では、エネルギー、鉄鋼、農業、衣服のような潜在的に環境効果の高い産業に焦点が当てられ、産業別貿易により環境的圧力がどれくらいかかるのかが分析される一方、いくつかの国にまたがるサプライチェーンの環境効果も重視される。例えば、オランダの繊維消費におけるCO₂排出量を分析するための衣服製造セクターの分析、イギリスの食肉生産におけるCO₂排出量に関する農業セクターの分析において、いずれもサプライチェーンを考慮したCO₂排出量を分析している。^{viii)}

ミクロレベルでの分析においては、細分化された個々の財について、または個別の財グループ

に焦点が当てられ、対象財、または財グループについて、ライフサイクル評価（LCA）を通じた、中間レベル分析よりも複雑な財生産の工程を考慮してCO₂排出量が推計される。例えば、電子製品の生産における複雑な生産のフラグメンテーションを追跡して多くの構成部品のCO₂排出量を計算することができ、そこでは部品貿易を通じたEETの分析が行われることになる。何か国にも及ぶフラグメンテーションによる複雑な生産工程により生産される財について、CO₂排出量を計測することには困難さが存在するものの、LCAを通して環境リスク評価を行おうと試みた分析は多い。^{ix)} こうしたLCAに基づく分析は、ボトムアップ手法と言われており、トップダウン手法である多国間産業連関分析（multi-regional input-output model, MRIOモデル）とは異なる手法である。

3.3 分析手法

細分化されたミクロレベルの分析を除き、EETの分析においては環境的拡張による産業連関分析（EEIOA）に基づいた手法が用いられる。^{x)} そもそも産業連関分析は、中間投入や環境汚染物質が最終需要から発生するとした統合的なフレームワークにおけるトップダウン手法であり、分析目的に合わせて環境的に拡張された利用可能な産業連関表が用いられる。単一地域産業連関表（Single Region Input-Output, SRIO）、相互貿易産業連関表（Bilateral Trade Input-Output, BTIO）、多国間産業連関表（Multi Region Input-Output, MRIO）のいずれかを用いたさまざまなタイプの産業連関分析が行われている。

SRIOモデルは、一カ国における総需要（家計、政府、企業の3部門を含む総需要）を考慮し、すべての相手国との貿易に体化されたCO₂を推計するものである。すべての貿易相手国をひとつの地域として考えることで、自国と外国の生産における同一技術を仮定する単純なモデルである。BTIOモデルでは、一国の総消費におけるCO₂排出を考慮するが、ここでは総貿易ではなく相手国別に二国間貿易をモデル化しCO₂排出に関しても国別要因を考慮することになる。

MRIO分析では、多数国の産業連関表を用いて作成された国際産業連関表に基づく分析モデルが構築される。SRIOモデルとBTIOモデルでは総輸入が総消費のみに割り当てられるのに対して、MRIOモデルでは輸入が最終消費向けと中間的投入財向けとに区別され、中間投入財向け輸入は国内消費向けと輸出向けの生産に投入される。中間投入は、各国の最終需要向けに内生的に決定される仕組みとなっている。したがってMRIOモデルを用いることにより、貿易に体化されたCO₂をより詳細に分析でき、各分析においてさまざまな手法が提示されて分析モデルが複雑化するケースが多くなっている。

EETに関するMRIO分析の構造について、5.2で検討しているWang *et al.* (2021)における手法を用いて以下で考察する。まず、一国の基本モデルは、(1)式で示される。

$$X = AX + Y \tag{1}$$

ここで、 X はこの国の産出列ベクトル、 A は中間財の投入係数行列、 Y は最終需要列ベクトルである。

$$X = (I - A)^{-1}Y = LY \tag{2}$$

ここで、 $L = (I - A)^{-1}$ はレオンチェフ逆行列であり、(2)式は Y と X の間の関係を表し、 Y と L がわかれば X を決定することができ、 Y を満たす経済構造のすべての部門間での包括的なバランスを示すことができる。次に国の数を m 、各国での部門数を n とすると、MRIOモデルは(3)式で示す

ことができる。

$$\begin{aligned}
 \begin{bmatrix} x_{11} & x_{12} & \cdots & x_{1M} \\ x_{21} & x_{22} & \cdots & x_{2M} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ x_{M1} & x_{M2} & \cdots & x_{MM} \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & \cdots & a_{1M} \\ a_{21} & a_{22} & \cdots & a_{2M} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{M1} & a_{M2} & \cdots & a_{MM} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_{11} & x_{12} & \cdots & x_{1M} \\ x_{21} & x_{22} & \cdots & x_{2M} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ x_{M1} & x_{M2} & \cdots & x_{MM} \end{bmatrix} \\
 &+ \begin{bmatrix} y_{12} & y_{12} & \cdots & y_{1M} \\ y_{21} & y_{22} & \cdots & y_{2M} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ y_{M1} & y_{M2} & \cdots & y_{MM} \end{bmatrix}
 \end{aligned} \tag{3}$$

ここで、 x_{ii} は*i*国で生産された*i*国での需要、 x_{ij} は*i*国で生産された*j*国への輸出である。 a_{ii} は同じ国の部門間での投入係数行列、 a_{ij} は異なる国の間での投入係数行列、 y_{ii} は国内最終需要の国内生産、 y_{ij} は*i*国から*j*国の最終需要としての輸出を表している。

$$\begin{aligned}
 \begin{bmatrix} x_{11} & x_{12} & \cdots & x_{1M} \\ x_{21} & x_{22} & \cdots & x_{2M} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ x_{M1} & x_{M2} & \cdots & x_{MM} \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} I - a_{11} & -a_{12} & \cdots & -a_{1M} \\ -a_{21} & I - a_{22} & \cdots & -a_{2M} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ -a_{M1} & -a_{M2} & \cdots & I - a_{MM} \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} y_{12} & y_{12} & \cdots & y_{1M} \\ y_{21} & y_{22} & \cdots & y_{2M} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ y_{M1} & y_{M2} & \cdots & y_{MM} \end{bmatrix}
 \end{aligned} \tag{4}$$

(4) 式の逆行列をレオンチェフ逆行列に置き換えて*l*で表示し、(5) 式を得る。

$$\begin{aligned}
 \begin{bmatrix} x_{11} & x_{12} & \cdots & x_{1M} \\ x_{21} & x_{22} & \cdots & x_{2M} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ x_{M1} & x_{M2} & \cdots & x_{MM} \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} l_{11} & l_{12} & \cdots & l_{1M} \\ l_{12} & l_{22} & \cdots & l_{2M} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ l_{M1} & l_{M2} & \cdots & l_{MM} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} y_{11} & y_{12} & \cdots & y_{1M} \\ y_{21} & y_{22} & \cdots & y_{2M} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ y_{M1} & y_{M2} & \cdots & y_{MM} \end{bmatrix} \\
 &= \begin{bmatrix} \sum_{i=1}^M l_{1i} y_{i1} & \sum_{i=1}^M l_{1i} y_{i2} & \cdots & \sum_{i=1}^M l_{1i} y_{iM} \\ \sum_{i=1}^M l_{2i} y_{i1} & \sum_{i=1}^M l_{2i} y_{i2} & \cdots & \sum_{i=1}^M l_{2i} y_{iM} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \sum_{i=1}^M l_{Mi} y_{i1} & \sum_{i=1}^M l_{Mi} y_{i2} & \cdots & \sum_{i=1}^M l_{Mi} y_{iM} \end{bmatrix}
 \end{aligned} \tag{5}$$

次に、CO₂排出ファクター、Fを導入する。これは、世界産業連関データベース (WIOD) の国際産業連関表の環境勘定と総投入量を用いて算出される「投入1単位当たりで排出されるCO₂排出量」であり、総排出量を総投入量で除したものである。

$$F = \begin{bmatrix} f_1 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & f_2 & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & f_3 & \vdots \\ 0 & 0 & \cdots & f_4 \end{bmatrix} \tag{6}$$

この手法を用いて、世界のCO₂排出量（C）が以下の式で示されている。

$$C = \begin{bmatrix} c_{11} & c_{12} & \cdots & c_{1M} \\ c_{21} & c_{22} & \cdots & c_{2M} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ c_{M1} & c_{M2} & \cdots & c_{MM} \end{bmatrix} = FLY$$

$$= \begin{bmatrix} f_1 \sum_{i=1}^M l_{1i} y_{i1} & f_1 \sum_{i=1}^M l_{1i} y_{i2} & \cdots & f_1 \sum_{i=1}^M l_{1i} y_{iM} \\ f_2 \sum_{i=1}^M l_{2i} y_{i1} & f_2 \sum_{i=1}^M l_{2i} y_{i2} & \cdots & f_2 \sum_{i=1}^M l_{2i} y_{iM} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ f_M \sum_{i=1}^M l_{Mi} y_{i1} & f_M \sum_{i=1}^M l_{Mi} y_{i2} & \cdots & f_M \sum_{i=1}^M l_{Mi} y_{iM} \end{bmatrix}$$

ここで、 c_{ii} は国内需要から発生した国内生産とCO₂排出を示し、 c_{ij} は、i国からj国への輸出に体化されたCO₂排出量を示している。各列のCO₂排出について、i国の需要によるCO₂排出として合計することができる。

3.4 多地域産業連関表（MRIO）データベースについて

ここでは、環境の効果を推計するために環境関連データで拡張されている産業連関表について、いくつかのデータベースをみていきたい。Global Trade Analysis Project（GTAP）は、パデュー大学農学部においてCenter for Global Trade Analysisとの協力により1992年に立ち上げられた。各国の産業連関表、貿易、マクロ経済、エネルギー、さまざまな政策についての情報を総合して統合的なデータベースを作成している。このため、GTAPデータベースでは世界経済全体を知ることができ、これを用いて世界経済に関する応用一般均衡分析を行うことができる。2022年9月現在、2004年、2007年、2011年、2014年の4時点での情報を提供するGTAP10バージョンが提供されている。

国際産業連関表データベースの基となっている各国の産業連関表は、作成方法、基準年、セクター分類などが異なるため、整合性を保つための工夫をしながら統合している。そのため、GTAPデータベースでは単にIO表を提供するのみならず、精度の高いシミュレーションによる世界経済分析のために、統合的な形で世界経済を示すことが目的とされ、計測可能な一般均衡（Computable General Equilibrium（CGE））モデルでの分析用の集計的変数が提供されている。同時にGTAPではCO₂排出量が提供されており、国際エネルギー機関（IEA）が毎年公表しているエネルギーバランス表をもとにGTAPの部門・投入産出表形式に組み替えて推計したエネルギー消費量などから作成されている。^{xi)}

一方、WIODと呼ばれる世界産業連関データベース（World Input-Output Database）は、2009年5月から2012年4月まで実施された「網羅的データベース構築のためのWIODプロジェクト」において、EU委員会により資金提供を受けて作成された。このデータベースは、生産工程の分断化（フラグメンテーション）や社会経済的側面（例えば労働または付加価値の創出など）、さらには環境的側面（例えばエネルギー使用、大気へのさまざまな排出物または水消費など）に関連した課題に適用でき、各国の生産活動と国際貿易のデータに関する詳細な情報を統合して作成されている。各国の表は、59の製品がそれぞれどれだけ供給され、35の産業にそれぞれどれだけ使用されるかを示している。この各国表と貿易データを接続することにより、例えば、ベルギーで生産さ

れた金属製品のうちの何ドル分がフランスの輸送機械産業で使用されるかを推定でき、同時に環境データを用いての分析も可能である。現在のバージョンはWorld Input-Output Database (WIOD) November 2016のものであり、すべてのEU加盟国と15の主要国が対象で、2000年から2014年までのデータがカバーされており、名目価格と前年価格でデフレートされた価格の2つで示される。^{xii)}

経済開発協力機構 (OECD) でも国際間産業連関表 (Inter-Country IO, ICIO) を作成している。Ahmad *et al.* (2003) は、OECDデータベースをその他のデータベースと比較しながら貿易に体化された排出量を推計した最初の研究である。OECD産業連関表は、共通の部門概念および形式で作成されている標準化産業連関表であり、部門分類では国際標準産業分類 (ISIC) と対応しているため外部データとの接合が比較的容易であり、国際比較などの分析に適しているとされる。ここでは、CO₂排出データとしてIEAのCO₂排出データが用いられ、部門別の排出量をOECD産業連関表の国内生産額で除して、部門別CO₂排出原単位を求めている。^{xiii)} 一方で、このデータはOECD職員が各国の統計作成担当者にガイドラインを示して作成されており、OECD内での活用例が多い。

なお、これらに加えて国際的な視点から環境分析を行うためのMRIOとして、EORAやEXIOBASEと呼ばれるデータベースなどがある。EORAについてはLenzen *et al.* (2013) において、EXIOBASEにおいてはTukker *et al.* (2013) において詳しい説明がなされている。また、Moran *et al.* (2014) では、EORA, WIOD, EXIOBASE, GTAPをベースとしたOpenEUデータベースについて、各モデルの頑強性の感応度分析や環境項目の勘定に焦点を当てて、モデル間での差異を明らかにするための分析を行っている。

4. 輸出EETと輸入EETのバランスに関する計測

4.1 マクロレベル分析の計測結果に関する国際比較

カーボンフットプリント (CF) 計測のためのEET分析は、与えられた最終需要によって直接的・間接的に引き起こされたCO₂量を計測するものである。世界中に展開されたサプライチェーンを通じたCO₂排出の計測について、MRIOモデルによる分析ではSRIO分析において生じたさまざまな誤謬が修正され、より正確な計測ができるため、最近ではMRIOモデルによるさまざまな国や産業における分析が多く行われるようになってきている。

表1には、中国、米国、日本の3カ国におけるCO₂排出について、生産に体化された排出量と消費に体化された排出量、輸出に体化された排出量と輸入に体化された排出量、輸出に体化された排出量と輸入に体化された排出の差 (バランス) が示されている。いずれもMRIOモデルに基づいて計測されており、Peter *et al.* (2008) は2001年データを用いた分析、Davis *et al.* (2010)、Atkinson *et al.* (2011) は2004年のデータを用いた分析、Brukner *et al.* (2019) は、2005年のデータを用いた分析結果となっている。

これによると、2004年のデータを用いた2つの分析でAtkinson *et al.* (2011) においてDavis *et al.* (2010) よりも推定値が多少小さくなっているものの、ほぼ整合的な結果となっている。まず輸出入での排出バランスに注目して明らかなのは、米国は中国よりも生産での排出量が多いものの、消費での排出量が非常に大きく、したがって輸入での排出量が輸出での排出量を明らかに上回っており、自国消費財生産でのCO₂排出を生産国である中国などの新興国に押し付ける形となっている。一方で、中国では3時点ともに、輸出における排出量が輸入での排出量を上回り、中国の生産による排出が消費での排出を大きく上回っている。日本については、いずれの時期にお

表1 MRIOを用いたCO₂排出量の推計結果：中国，米国，日本の比較（2001，2004，2005）

著者と発行年	対象国	対象年	生産での排出量	消費での排出量	EET(輸出)	EET割合(輸出)	EET(輸入)	EET割合(輸入)	EET(輸出)-EET(輸入)	EET割合(輸出-輸入)
			単位:100万トン	単位:100万トン	単位:100万トン	単位:%	単位:100万トン	単位:%	単位:100万トン	単位:%
Peters et al.(2008)	中国	2001	3289	2704	803	24	217	7	586	18
	米国	2001	6007	6446	499	8	937	16	-438	-7
	日本	2001	1291	1489	187	15	385	30	-198	-15
Davis et al. (2010)	中国	2004	5100	3950	1430	28	279	5	1151	23
	米国	2004	5800	6500	520	9	1220	21	-700	-12
	日本	2004	1310	1600	185	14	420	32	-235	-18
Atkinson et al. (2011)	中国	2004	4226	3122	1393	33	290	7	1103	26
	米国	2004	4999	5561	627	13	1188	24	-561	-11
	日本	2004	940	1200	185	20	468	50	-283	-30
Brukner et al.(2010)	中国	2005	4449	3459	1357	31	366	8	991	22
	米国	2005	4719	5973	423	9	1678	36	-1255	-27
	日本	2005	1070	1450	211	20	592	55	-381	-36

注1：EETは「貿易に体化された二酸化炭素量」であり，EET（輸出），EET（輸入）は，それぞれ輸出，輸入に体化されたCO₂量である。

注2：EET割合（輸出），EET割合（輸入）はそれぞれ国内総排出に対する割合を示している。

出所：原文に加え，Cosbey（2008），星野他（2009），Sato（2014）を参照して作成した。

いても輸出での排出に比較して輸入における排出が非常に大きく，両者の差の総排出に占める割合は米国よりもかなり大きくなっている。

さらに詳しく3カ国の3時点での結果を考察する。2001年を2004年，2005年の結果と比較すると，中国では生産での排出と輸出での排出が2004年において2001年に比べて非常に増加したが，2005年には減少傾向を示している一方，中国での消費と輸入での排出は2004年，2005年ともに2001年に比較して増加しており，輸出入での排出差は2001年から2004年に増加したものの，2005年には減少傾向を示していることが興味深い。米国では生産における排出は，2001年の6007 Mt（100万トン）から2004年の5800 Mt（Davis *et al.*推計），4999 Mt（Atkinson *et al.*推計），2005年の4719 Mtまで明らかに減少傾向を示しており，消費での排出は2001年の6446 Mtから2005年の5973 Mtまで若干減少しているのみである。米国のEETでは，輸出で2001年の499 Mtから2004年に増加したものの2005年には減少し，2001年と2005年ではあまり変化はない一方で，輸入での排出は2001年の937 Mtから2004年の増加を経て2005年には1678 Mtまで増加し，輸出入の排出バランスの総排出に対する割合では，2001年の-7%から2004年の-11～12%，2005年の-27%まで大きな増加を示している。

日本の結果をみると，消費での排出が生産での排出を常に上回り，2005年には生産で1070 Mt，消費で1450 Mtとなっている。EETでは，2001年には輸出で187 Mtと全排出の15%であるのに対して輸入では385 Mtで全排出の30%と非常に高くなっている。輸出入バランスでは全排出の-15%であったが，これが2005年には，輸出で211 Mt（全排出の20%）であるのに対して輸入では592 Mt（全排出の55%），輸出入バランスでは全排出の-36%と，輸入での排出の全排出に占める割合が米国に比べても非常に大きいことが明らかとなっている。

他の国々の推計結果については，表2において2001年データを用いたPeters *et al.*（2008）の分

表2 輸出入のEETバランス (2001年)

国名	EET(輸出)-EET(輸入) 単位：100万トン	EETバランスの一国生産総排出量に対する比率 %
スイス	-63.1	-122.9
英国	-4.6	-16.6
ドイツ	-139.9	-15.7
日本	-197.0	-15.3
米国	-438.9	-7.3
カナダ	15.5	2.8
オーストラリア	57.9	16.5
ロシア	324.8	21.6
シンガポール	-62.8	-128.2
韓国	-45.4	-11.4
モロッコ	-2.5	-6.3
メキシコ	-17.6	-4.5
ブラジル	2.5	0.8
インド	70.9	6.9
中国	585.5	17.8
インドネシア	58.1	19.0
南アフリカ	123.5	38.2

注：EET バランス＝輸出に体化された排出量－輸入に体化された排出量

出所：Peters *et al.* (2008), Cosbey (2008)

析結果が示されている。これによると、国別にかかなりの差があることが明らかとなっている。輸出と輸入それぞれに体化された排出量のバランス（輸出に体化された排出量－輸入に体化された排出量）でマイナスとなるケースのうち、これが一国の総生産に対する割合が120%を超える国はシンガポールとスイスであり、15～16%台の国は英国、ドイツ、日本、韓国では11.4%、米国では7.3%となっている。輸出と輸入でのEETの差がプラスとなっている国では、南アフリカ、ロシア、インドネシア、中国の順で、総生産額に占める割合が大きい。

Wiebe *et al.* (2016) では、OECDのICIOとIEAのCO₂排出データを用いて、最終需要と国際貿易に体化されたCO₂排出推計を行い、OECD加盟国と非加盟国別に、1995年と2011年の排出の比較を行っている点が興味深い。EETの輸出入差に着目すると、OECD加盟国では、両時点ともにEETでの純輸入国であるが、CO₂純輸入量はドイツでは1995年の－171.9 Mtから－84.6 Mtまで半減し、日本でも－252.8 Mtから－187.8 Mtまで減少している。一方で米国や英国では大きく増加しており、国によってかなりの差があることが示されている。非OECD諸国の推計では、中国で1995年の316.5 Mtから2011年の995.7 Mtに、インドで1995年の43.4 Mtから2011年の134.5 Mtまで大幅な増加が明らかにされ、OECD加盟国と非加盟国での結果の対照性が立証されている。

4.2 特徴的な分析

Andrew *et al.* (2013) では、GTAPデータベース作成に携わった研究者ならではの視点から、このデータベースに関する詳しい説明やMRIOを用いることの意義が述べられており、GTAPデータベースを用いてCFの推計を行っている。ここでは、CF計測において、MRIO手法とEETバランス手法との間で「消費による排出」の定義が異なっている点を指摘している。前者では対象国の「消費に体化されるCO₂排出量」について「最終需要の生産に伴うグローバルなCO₂排出量」と定義し、

後者では対象国の消費について「総排出量—輸出財（中間財と最終財）生産における排出量—総輸入における他国生産での排出量」と定義される。表3において、排出の大きな国々におけるCFについて、MRIO手法とEETバランス手法の計測結果が示されている。

これによると、最も排出の大きな20カ国の中での2つの手法の推定結果の差は、平均で5%、最も差の大きなケースはシンガポールの47%となっており、詳しい原因は明らかにされていないものの、CF計測手法の違いは明確に測定結果に表れている。結果のぶれは政策的議論に用いる際の困難さを生じさせるため、より正確な計測手法が求められる。また、セクター集計の問題については、57セクター分類のデータを用いたケースと8セクター分類を用いたケースで比較し、日本、米国、ヨーロッパ諸国といった先進諸国では集計度が高くなると2~5%程度排出量が多くなるのに対して、アフリカ、中南米の途上国や中国では、集計度が高くなると、大きな割合で排出量が小さくなる傾向がみられることが示されている。

Yamano *et al.* (2020) ではWiebe *et al.* (2016) と同様に、OECDの国際間産業連関表とIEAのCO₂排出データを用いて、2005年から2015年までの65カ国を対象とした最終需要と総貿易に体化されたCO₂排出量を計測した。世界合計では、発展途上国でのCO₂排出と消費の増加により、2005年と2015年の間に燃料からのCO₂排出が19%増加し、人口増加を考慮した1人当たり排出は年あたり1.2%の増加となったことが明らかにされた。輸出に体化されたCO₂排出では、化学品や金属、鉱業やエネルギー産業、電子機器などの7つのセクターで排出の2/3程度を占めることが示されている。また、OECD諸国では、総生産に体化された排出は9%減少し総消費に体化された排出は11%減少したものの、1人当たり消費に体化された排出量は非OECD諸国の3.6倍、世界全体での排出の2.5倍となったことが示されている。

産業別CFの分析については、例えばZhou *et al.* (2013) の鉄鋼産業の分析が挙げられる。ここでは、鉄鋼産業に投入される鉄鉱石、鉄スクラップ、鉄鋼、鉄鋼製品の貿易パターンを通じた各国のCO₂排出量を推計するため、GTAPデータベースを用いて57セクター分類を行い、MRIOモデ

表3 MRIO手法とEETバランス手法に基づくカーボンフットプリント
両手法の推定値差が大きい主要国における計測結果（2007年）

	MRIO手法によるカーボン・フットプリント	EETバランス手法によるカーボン・フットプリント	差(量)	差(率)
	単位:100万トン	単位:100万トン	単位:100万トン	単位:%
米国	8068	7791	277	3
台湾	251	332	-81	-32
英国	1036	958	77	7
韓国	685	758	-73	-11
ベルギー	242	300	-58	-24
シンガポール	114	167	-54	-47
ロシア	1786	1747	40	2
フランス	843	804	39	5
マレーシア	176	213	-37	-21
タイ	285	317	-33	-11

出所：Andrew *et al.* (2013)

ル構築している。グローバル・サプライチェーンを通じた財の流れとCO₂排出源について明らかにした上で、一国として効率的CO₂排出を促すのみでなく、グローバルな資源効率を通じた排出削減を促す政策を考慮する必要があることが強調されている。計測結果は、鉄鋼製品の生産に必要な上流の鉄鉱石から鉄鋼製品が投入される機械類や建設まで9産業を対象とし、日本、中国、オーストラリア、韓国、米国、インド、ブラジル、EU25、インドネシアとマレーシア、石油輸出の主要8か国、GTAPに含まれるその他の国に分けて、生産での直接排出とCFを推計しており、多くの国の多くの鉄鋼関連重要産業において、サプライチェーンを通じたCO₂排出量が非常に高い値となっていることが明らかにされている。ここでは、日本のケースについて細かい解釈がなされているのが興味深い。日本の大部分の製造業セクターにおいては生産からの排出が非常に効率的となっており、生産に直接投入される鉄鉱石も効率化されているが、CFや消費に体化される鉄鉱石の量に注目すると、鉄関連の上流産業の生産がサプライチェーンを通じて他国（オーストラリア、ブラジル、中国、インド、主要石油輸出国）で行われて輸入されているために、鉄鋼関連財生産での排出が非常に多くなっているという結果が示されている。

ヨーロッパの食肉産業のCFの重要性については、Minx *et al.* (2009) において、イギリスの食肉消費がもたらすCFの分析が行われている。57のセクターと87の世界地域を考慮したサプライチェーンを通じたイギリスの食肉消費のCFを計測し、2001年におけるイギリスの食料でのCF (47 Mt) の40%以上が食肉消費によるものであることが明らかにされている。

5. 近年の研究について

5.1 中国の貿易、消費に体化されたCO₂の研究

近年、中国のCO₂排出の問題がクローズアップされる中で、中国を中心とした貿易や中国の消費に体化されたCO₂排出量の推計を行っている分析が多くなっている。本節で考察する分析でのテーマはさまざまであり、中国国内の各地域での消費について、サプライチェーンを通じてCO₂排出にどの程度の差があるのかに関する分析（例えばMa *et al.* (2022)）、中国の輸出生産におけるCO₂排出についての産業別特徴に関する分析（例えばYang *et al.* (2022)）、中国のプラスチック廃棄物再利用のための貿易の環境効果の分析（Liu *et al.* (2021)）などがある。5.2で考察している中国と特定の貿易相手国との貿易に焦点を当てた分析では、中国と米国との貿易に体化されたCO₂排出量に関する分析（例えばWang *et al.* (2021)）、中国とオーストラリアの貿易に体化されたCO₂排出量に焦点を当てた分析（例えばHuang *et al.* (2020)）などがある。

Ma *et al.* (2022) では、MRIO分析により、中国の人口の消費支出データを用いて中国居住者1人当たりの消費におけるCO₂排出を推計している。消費支出は中国製の財消費と輸入財消費の両方から構成される。2012年から2017年の間において中国全体では、年率で約1.76%の増加が示され、2017年については37億6329万トンと推計されている。一方で中国の地域別CO₂排出分布の推計結果からは地域によって排出量に大きな差があり、中国の南東から北西に向けて減少していく傾向が示されている。各地域でCO₂排出につながる産業も異なっていることから、各地域では産業の特徴に沿った形でCO₂排出削減政策を行っていく必要性について提言している。また、Wei *et al.* (2020) においても同様の分析手法が用いられ、中国の消費支出によるCO₂排出量について、2010年から2016年の間に、中国の人口における中流階級と上流階級の消費支出がそれぞれ131%、83%の増加を示し、住居、家庭用機器、輸送費などへの支出増加により、CO₂排出が促されている実態が明らかにされている。

中国の需要としての輸入ではなく、中国の輸出についてのCO₂排出効果に関する分析に関して、Yang *et al.* (2022) では、WIOD国際産業連関表（2016年版）を用いたMRIOモデルによって輸出に体化されたCO₂を推計している。計測結果によると、中国の輸出では第二次産業の輸出に体化されたCO₂は全体量の90%以上を占め、第三次産業では5-7%、第一次産業では1%程度となっている。第二次産業の内訳としては製造業がCO₂排出の50%、電力・ガス・蒸気・空調供給セクターが40%を占めており、第三次産業の内訳としては輸送業と倉庫業でのCO₂排出が70%を占めていることが明らかにされる。こうした結果をもとに中国の環境政策に対しては、輸出構造において第三次産業、特に現代的なサービス産業に比重を移すなど、環境にとって最適輸出構造を模索すべきであるという提言を行っている。

Wang *et al.* (2020) では、MRIOを利用した上でパネル回帰分析を行うという手法が考案されており、中国のハイテク産業の輸出の効果を詳細に分析している。中国の高度技術・最新技術集約的産業の輸出に体化されたCO₂排出の決定要因として輸出による経済的利益と環境コストを導入し、経済的利益を最大化し環境コストを最小化する最適輸出モデルを構築して、輸出に体化されたCO₂排出に対する経済的利益と技術水準の効果を推計している。1995年から2011年までの35産業と41カ国から構成されるMRIOモデルを構築し、WIOD国際産業連関表の環境勘定を利用して、一国の付加価値輸出（経済的利益）とそこに体化されるCO₂排出量（環境コスト）を計算したうえで、この環境費用であるCO₂排出量を従属変数とし、経済的利益、環境費用、機械・電子機器・精密機器・輸送セクターの技術レベル、人口を説明変数として、パネル分析（パネルOLS分析、固定効果分析、変量効果分析）を行っている。その結果、中国の高度技術・最新技術集約的産業における技術進歩は、先進国でのCO₂排出を減らし、発展途上国でのそれを増加させることが明らかにされる。また、先進国での環境規制は低排出で高付加価値の産業を拡大させ、排出量の多い産業をFDIを通じて発展途上国に移転させており、その結果、中国の輸出拡大は先進国でのCO₂排出を減少させる一方、発展途上国の排出を増加させることが示されている。この事実に対応するために中国が採用すべき政策については、中国の先進的生産技術の発展途上国への移転を通じて途上国の技術進歩を促進し、途上国における輸出向け中間財生産において発生するCO₂を減少させるための貢献を行うことを提言している。

Liu *et al.* (2021) では、再利用とリサイクル目的のプラスチック廃棄物貿易において、中国の輸出が循環型経済促進を通してCO₂排出削減に貢献するかどうかについて、1992年から2017年までの25年間の貿易を対象として、LCA分析手法を用いて検証している。輸送や積み替えによって発生する温室効果ガスの量を正確に計測することが困難であるなどの分析の制約はあるものの、分析結果では、中国のプラスチック廃棄物輸出によって達成された温室効果ガス削減は、25年間に着実に進んできたことが示されている。

5.2 中国の二国間貿易におけるCO₂排出に焦点を当てた研究

ここでは、大きな政策的重要性をもつ中国の2国間貿易でのCO₂排出の分析を行った研究について考察したい。Wang *et al.* (2021) では、2010年代末に貿易摩擦が深刻化した中国と米国との間の貿易に焦点を当てた詳細な分析が行われ、さまざまな有益な結果が導出されている。この研究では、CO₂排出の推計を行うために、WIODデータベース（2016年版）を用いたMRIO分析モデル、貿易に体化されたCO₂排出を貿易変化から切り離すためのTapio分離モデル、貿易に体化されたCO₂排出の決定要因分析のための構造的分解（SDA）モデルの手法を用いて、貿易量が増加するときに貿易に体化されたCO₂排出の増加が促されるのか否かについて解明すべく、貿易の変化と体化

されたCO₂排出の変化との間の関係について分析している。Tapio分離モデルでは、輸出に体化されたCO₂排出の変化について、最も望ましい「輸出拡大と炭素排出削減の組み合わせ」から最も理想から離れた状態まで8つの状態に分けてCO₂排出状況について詳しく分析される。産業分類では炭素排出の特徴に応じて5産業に分類している。

ここでの計測結果においては、米国の中国への輸出が増加するほどCO₂排出量も増加する一方、中国からの米国への輸出に体化されたCO₂の排出量は改善傾向がみられる。産業別の結果では、中国から米国への輸出に体化されたCO₂排出量は知識集約的製造業、資本集約的製造業、サービス産業で排出比率が高くなっており、米国から中国への輸出に体化されたCO₂はサービス産業で圧倒的に高く増加傾向にある一方で、他の産業でのCO₂排出増加率は減少傾向にあることが示された。貿易に体化されたCO₂排出量に大きな影響を及ぼす要因については、中国から米国への輸出においては技術効果と規模効果が顕著である一方、米国から中国への輸出では規模効果が大きいことが示されている。CO₂排出に対する中間財生産構造効果は中国から米国への輸出で大きく、米国からの中国への輸出におけるCO₂排出に対する中間財生産構造の効果については、中国への他の国からの輸出よりは圧倒的に大きいとされる。中国から米国への輸出に体化されるCO₂排出に対する最終需要の効果は、中国の米国への輸出構造に影響を及ぼすもののCO₂排出に対して抑制的效果をもつとされる。こうした結果を受けた政策提言については、中国で米国よりも中間財輸出額が多いことから、中国は中間財生産における排出削減技術開発を促進すべきであること、中国のCO₂排出に対する中間財生産構造効果が徐々に減少傾向にあることから中国の下流産業でのサプライチェーンでの立場が安定的であることがわかり、今後は上流産業でのサプライチェーンにおけるCO₂削減の役割を強化し、ハイテク・ハイエンドの産業とローエンド産業をバランスさせる産業調整が必要であること、さらに中国と米国の環境技術開発での協力体制構築を模索する必要性などが挙げられている。

Huang *et al.* (2020) においても、Wang *et al.* (2021) と同様の分析が中国とオーストラリアの間の貿易に体化されたCO₂排出を対象として行われている。中国・オーストラリア間貿易の分析を行うことの意義として、この2国間貿易では構成財が特殊であるため貿易財構成の最適化のための政策が、世界的なCO₂排出削減に貢献することを指摘する。EORAデータベースを用いたMRIO分析で、産業別の1990年から2015年までの長期的時系列データを用い、構造的分解(SDA)モデルにより、EETバランス推定法に基づいてCO₂排出量の決定要因を分析している。分析結果から、中国はオーストラリアとの貿易に体化されたCO₂からみると、CO₂の純輸出国であり、輸出されたCO₂は、中国のエネルギー集約産業である発電業、輸送業、セメント業などから発生し、いずれも前方連関と後方連関の両方での強い効果をもつ産業となっている。SDA分析結果では、両国の輸出量の増加が貿易に体化されたCO₂排出量増加の主要因である一方で、排出集約度の低下がこうした排出を相殺する効果を有することが明らかにされている。輸出構造はあまり変化していないためにCO₂排出に対する輸出構造効果は小さい。

ここでの分析結果に基づいて提言されている政策についてみてみたい。第一に、中国・オーストラリア間貿易の拡大は経済成長と世界的炭素排出削減の両方を達成することができるため、この貿易における保護貿易の台頭を抑えることが必要であること、第二に、中国もオーストラリアも、先進国から新興国への技術協力や技術移転を促進するための国際協力についての重要性を認識して実現させることが重要であること、第三に、中国の発電、輸送、セメント業における炭素集約度を下げる努力を行うことで確実に炭素排出を抑えることができること、オーストラリア側では、例えばハイテク農業や再生可能エネルギーなどの低炭素財・サービスを開発して輸出につ

なげることによって体化されたCO₂を削減する輸出構造を実現することなどが挙げられている。

5.3 ヨーロッパ地域の貿易の環境効果に関する分析

Beylot *et al.* (2019) は、2000年から2010年までのEUの貿易に体化されたCO₂排出について、EEIOAとLCAの分析との両方を行い、細かく分類された財における貿易に体化されたCO₂排出などの環境悪化の効果について、結果を比較研究したものである。財は14のカテゴリーに分類され、EEIOAではEXIOBASE3データを用いている。これら2つの分析では置かれている仮定、データの性質、品目分類などが異なっており、両方の分析結果を比較することで、分析結果についてより正確な解釈を行うことができる。EEIOAとLCAでは対象産業が異なり、LCAはサービスを扱うことができない一方で、EEIOAの計測結果では輸送産業での輸出に体化されたCO₂が大きいこと、輸入に体化されたCO₂でのサービス輸入の重要性が示されている。また食肉産業と食肉をベースとする産業がLCAから除外されており、ヨーロッパで重要性をもつ食肉産業の貿易によるCO₂排出を含めるか否かで、分析結果の異なりが生じている。一方で、LCAでは、代表的産業における製造工程に基づき、細かなサプライチェーンを把握することが可能となる。

両分析結果での共通点として、EUでは輸入に体化されたCO₂が輸出に体化されたCO₂を上回り、しかも重要産業においては年を追うごとに差が増加していること、製造業品、特に一般機械機器と輸送用機器においてEUからの輸出でのCO₂排出への影響が大きいこと、サプライチェーン構造が限定されているほどEUの輸入でのCO₂排出が少なくなること、両分析において環境悪化に影響を与える要因が似ていることなどを挙げている。両分析結果で異なる点は、EEIOAではサービス産業が含まれ対象産業数も多いことによりLCAよりも環境悪化効果が大きく計測されること、2000年から2010年までの対象期間に、LCAの結果では13のカテゴリーの産業で輸出での環境悪化効果が輸入での効果よりも速いペースで増加している一方で、EEIOAの結果からは増加のペースは輸出と輸入でバランスしているとしている。この分析では、EEIOAとLCAという2つの異なる分析を行った結果、両分析の利点を生かして正確な分析結果を導くことの重要性が指摘されている。

6. 結 論

1990年代末からの「貿易と環境」の議論においては、貿易自由化による貿易拡大により環境にどのような影響が生じるのかについて、理論的研究によってさまざまな効果が明らかにされ、そうした理論的分析結果の検証が実証研究によって行われてきた。その一方で、WTOでは、環境保護に対して貿易と貿易政策がどのように貢献できるのかという点が中心テーマとなり、環境悪化を招く財の貿易に関する貿易政策や、環境保護的な物品、いわゆる環境物品における貿易の活発化の意義などが議論され、環境物品貿易自由化に向けた努力がなされてきた。近年、世界的に地球環境保護に向けた脱炭素への取り組みが加速し、「貿易と環境」の分野においても、脱炭素に向け、貿易を通じた環境政策提言の重要性が高まっている。

国連気候変動枠組条約締約国会議（COP）での世界的な地球温暖化防止への取り組みを進めていく際には、国際間での平等性が重要性をもつ。しかし実際には、輸出拡大による生産増加によって環境悪化が進む国と、輸入拡大によって他国に貿易悪化を生じさせる国が存在し、このことは、貿易を通じた先進国から新興国へのCO₂排出の負荷の移転につながる。これは貿易に体化されたCO₂の国際移動という形でのカーボンリーケージを引き起こし、一国のCO₂排出削減努力がどこか

の国の排出を引き起こして世界的にみて環境政策の効果が打ち消される可能性があるのではないかという議論につながる。^{xiv)} こうした実態を解明するために、CO₂の足跡、カーボンフットプリントを明らかにすることが重要視されるようになった。

貿易が引き起こすCO₂排出、言い換えれば貿易に体化されたCO₂排出量（Embodied Emissions in Trade, EET）を推計するためには、環境効果を含む産業連関分析（EEIOA）を行う必要があり、多国間産業連関表（MRIO）を用いた膨大なデータ処理が必要となる。こうしたMRIO分析によれば、貿易パターンとCO₂排出構造を明らかにすることが可能となる。1990年代から産業連関分析に基づいた貿易によるCO₂排出量推計の初期の分析が行われるようになり、2000年代からは各種のEEIO表を用いて世界各国の貿易によるCO₂排出について輸出と輸入の両面から計測され、そのバランスが重要視されるようになった。近年ではCO₂排出量が問題視されている中国を中心とした貿易におけるCO₂排出について、詳細な研究が多く発表されている。

本稿では、2000年以降に発表されたEETに関する主要文献に焦点を当てて展望した。EETに関する研究を行う際に重要な分析手法やデータについて示したうえで、文献毎に、分析の目的、分析対象、分析手法、分析データを検討し、何が明らかにされているのかについて考察し、分析結果とそれに基づいて提言される世界レベルでの環境保護に向けた政策対応についての評価を行った。LCA手法を用いて詳細な財別貿易での環境効果を分析した研究を除き多くの研究では、MRIOを用いたEEIOAによる分析手法を用いて、一国全体のマクロレベルにおいて、輸出に体化されたCO₂排出と輸入に体化されたCO₂排出、そのバランスについて推計し、国際間比較によりCO₂排出に関する国際的平等性についての考察が行われている。一方で、鉄鋼関連セクターというように対象セクターを設定したうえで、セクター内での各財における輸出と輸入に体化されたCO₂を推計する分析も取り上げて検討した。

本稿での文献サーベイから明らかにされた重要点としては、第一に、グローバル化による生産のフラグメンテーションの進展と国際的サプライチェーンの複雑化を受けて、貿易増加によるCO₂排出への影響が高まっていること、第二に、多くの文献で、輸出に体化されたCO₂から輸入に体化されたCO₂を差し引いたバランスに焦点が当てられ、先進国でマイナス、新興国などでプラスという計測結果が示され、先進国と新興国との間でのCO₂排出の責任に関する公平性を求める議論が展開されていることが挙げられる。第三に、いずれの研究においても、それぞれの詳細な分析結果に基づき、世界でのCO₂排出削減に資する特徴的な環境政策が提言されている点が挙げられる。

提言されている環境良化に向けた重要政策としては、産業別のCO₂排出の計測結果を受けて、CO₂排出に産業間で差がある場合にCO₂排出の少ない産業に重点をおいた産業構造調整を行っていくこと、排出度の高い産業ではCO₂排出集約度を低下させるような技術改良を行って排出低減を図っていくことなどが挙げられる。こうした提言の多くは、貿易による環境への影響に関する先駆的理論研究であるCopeland *et al.* (1999; 2004) で明らかにされた生産構造効果、生産規模効果、技術効果に関連するものであると考えられ、実証的な発展的研究を行うに際して先行的理論研究を再考することが重要性をもつ。

国際間協力については、上述の先進国と新興国の間でのCO₂排出責任に関する不平等を解消していくために、新興国でのCO₂排出の負荷を減少させるような技術向上のための研究開発を先進国側でも行い、その成果を新興国に移転することが重要であり、同時に先進国による経済的支援が有効性をもつと考えられる。

世界レベルでの環境保護政策を進めていくことが求められる現在、貿易を通じたCO₂の国際間移転による問題点を世界に発信し、改善策を講じていくことがますます重要となる。こうした状況

下で、本稿で考察したEETの研究についてはマクロレベルのみならず産業別に捉える研究を進めることにより詳細な現状把握に努め、国別・産業別に細かな環境政策への提言を行っていくことが求められる。

付 記

本研究は、日本学術振興会 科学研究費，基盤研究（C）課題番号17K03703の助成を受けた。

謝 辞

2名の匿名査読者から貴重なコメントを頂いたことに対して、感謝の意を表したい。

注

- i) エネルギー白書2022年版による。
- ii) Copeland and Taylor (1999; 2004) を参照されたい。
- iii) Pugel (2007) 第12章，松村 (2010a) 第15章 を参照されたい。
- iv) 松村 (2010b) では，こうした効果について詳細な解説がなされている。
- v) 日野 (2019) では，環境物品交渉について詳しい解説がなされている。
- vi) 例えば，Bin *et al.* (2013)，Sato (2014) を参照されたい。
- vii) 例えば，Sato (2014)，Wiedmann (2009) を参照されたい。
- viii) Wilting (2008)，Minx *et al.* (2008) を参照されたい。
- ix) Rukayya *et al.* (2021) では，LCAを用いた環境リスク分析を行った文献のサーベイが行われている。
- x) Sato (2014)，Wiebe *et al.* (2016) を参照されたい。
- xi) GTAPのホームページ掲載“About GTAP”による。
- xii) WIODのホームページ (<http://www.rug.nl/ggdc/valuechain/wiod/wiod-2016-release>) 及びドイツエンバツハー他 (2013) による。
- xiii) OECDのICIOの説明は中野 (2007) による。
- xiv) 例えばKondo *et al.* (1998)，Andrew *et al.* (2013) を参照されたい。

参考文献

- Ahmad, N. and A. Wyckoff (2003) *Carbon Dioxide Emissions Embodied in International Trade of Goods*. Paris, Directorate for Science, Technology and Industry, OECD.
- Andrew, R.M. and G.P. Peters. (2013) “A Multi-Region Input-Output Table Based on the Global Trade Analysis Project Database.” *Economic Systems Research*, 25(1) 99-121.
- Antweiler, W., B. Copeland and M.S. Taylor, (2001) “Is Free Trade Good for the Environment?” NBER Working Paper no.6707, *American Economic Review*, 91(4), 877-908.
- Atkinson, G., Hamilton, K., R., G. and Van Der Mensbrugge, D. (2011) “Trade in ‘Virtual Carbon’: Empirical Results and Implications for Policy.” *Global Environmental Change*, 21(2): 563-574.
- Beylot A., S. Corrado and S. Sala (2019) “Environmental impacts of European trade: interpreting results of process-based LCA and environmentally extended input-output analysis toward hotspot identification.” *The International Journal of Life Cycle Assessment*.
- Beylot A.S., S. Corrado and S. Sala, E. Crenna, E. Sanyé-Mengual and M. Secchi(2019) *Indicators and assessment of the environmental impact of EU consumption, Consumption and consumer footprint for assessing and monitoring EU policies with Life Cycle Assessment. Science for policy report*. (Publication Office of the European Union).
- Bin S. and B.W. Ang (2013) “Input-output analysis of CO₂ emissions embodied in trade: Competitive versus non-competitive imports.” *Energy Policy* 56, pp.83-87.

- Brukner, M., S. Giljum, C. Lutz and K. Wiebe (2010) “Consumption-based CO₂ Emissions and Carbon Leakage: Results from the Global Resource Accounting Model GRAM.” In *Proceedings of the International Conference on Economic Modeling*, Istanbul.
- Cantore N. and C.F.C. Cheng (2018) “International Trade of Environmental Goods in Gravity Models.” *Journal of Environmental Management*, 223, 1047-1060.
- Copeland B. R. and M.S Taylor (2004) “Trade, Growth, and the Environment.” *Journal of Economic Literature*, 17, pp. 7-71.
- Copeland B. R. and M.S. Taylor (1999) “Trade, Spatial Separation, and the Environment.” *Journal of International Economics*, 47: 1, pp. 137-68.
- Cosbey A. ed. (2008) *Trade and Climate Change: Issues in Perspective, Final Report and Synthesis of Discussions Trade and Climate Change Seminar*, Copenhagen, June 18-20. International Centre for Trade and Sustainable Development (ICTSD).
- Davis, S.J. and Caldiera, K. (2010). “Consumption-based Accounting of CO₂ Emissions.” *Proceedings of the National Academy of Sciences* 107(12): 5687-5692.
- ドイツエンバッハー E.・B.ロス・M.テイマー著 尾下優子訳「WIODデータベースにおける世界の産業連関表」, *Journal of Life Cycle Assessment, Japan*, 9(2), pp. 91-96. (Dietzenbacher, E., B.Los and M. Timmer, The World Input-Output Tables in the WIOD Database.)
- Engstrom, R., A. Wadeskog and G. Finnveden (2007) “Environmental Assessment of Swedish Agriculture.” *Ecological Economics*, 60(3), pp. 550-563.
- Frankel, J. A. and A. K. Rose (2002) “Is Trade Good or Bad for the Environment? Sorting out the Causality.” *NBER Working Paper*, 9201, National Bureau of Economic Research.
- Huang R., G. Chen, G. Lv, A. Malik and X. Shi (2020) “The effect of technology spillover on CO₂ emissions embodied in China-Australia trade.” *Energy Policy*, 144.
- 日野道啓 (2019) 『環境物品交渉・貿易の経済分析』第6章, 文眞堂.
- 星野優子, 杉山大志, 上野貴弘, (2009) 「貿易に体化したCO₂排出量——日本・中国・米国・英国の国際比較——」『研究報告』Y08028, 電力中央研究所.
- GTAP ホームページ : About GTAP: Center for Global Trade Analysis (purdue.edu)
<https://www.gtap.agecon.purdue.edu/about/center.aspx#mission>.
- 猪俣哲史 (2019) 『グローバル・バリューチェーン』第8章, 日本経済新聞出版社.
- Kondo, Y. and Y. Moriguchi (1998) “CO₂ Emissions in Japan: Influences of Imports and Exports.” *Applied Energy*, 59, pp. 163-174.
- Lenzen, M., D. Moran, K. Kanemoto and A. Geschke (2013) “Building EORA: A global multi-region input-output database at high country and sector resolution.” *Economic System Research*, 25(1). pp. 20-49.
- Leontief, W. (1970) “Environmental Repercussions and the Economic Structure: an Input-Output Approach.” *Review of Economics and Statistics* 52(3), 262-271.
- Liu, Z., W. Liu, T.R. Walker, M. Adams and J. Zhao (2021) “How does the global plastic waste trade contribute to environmental benefits: Implication for reductions of greenhouse gas emissions?” *Journal of Environmental Management* 287, 1-9.
- Ma, R., X. Zheng, C. Zhang , J. Li, and Y. Ma (2022) “Distribution of CO₂ Emissions in China’s supply chains: A sub-national MRIO analysis.” *Journal of Cleaner Production*, 345.
- Managi, S., A. Hibiki, and T. Tsurumi (2009) “Does trade openness improve environmental quality?” *Journal of Environmental Economics and Management*, 58 (3), 346-363.
- Matsumura, A. (2021) “Gravity Analysis of Trade for Environmental Goods Focusing on Tariff Rates and Regional Integration.” *Asia-Pacific Journal of Regional Science*, Vol. 5, No. 2, pp. 477-511.
- Matsumura, A. (2019) “The Effects of Tariffs and Regions on Bilateral Trade for Environmental Goods: Cases for Some Renewable Energy Goods.” *Journal of Japan Academy for International Trade and Business* (日本貿易学会誌) 56, pp. 3-21.
- Matsumura, A. (2016) “Regional Trade Integration by Environmental Goods.” *Journal of Economic Integration*

- 31(1) pp. 1-49.
- Matsumura, A. (2016) "World Trade Flows in Photovoltaic Cells: A Gravity Approach Including Bilateral Tariff Rates." *The Journal of Tokyo International University, Economic Research*, 1 pp. 19-34.
- 松村敦子 (2010a) 『入門 国際貿易』, 多賀出版.
- 松村敦子 (2010b) 「貿易と環境に関する経済分析: 方法論的考察」『東京国際大学論叢 経済学部編』第42号, 17-30.
- Minx, J., G. Peters, T. Wiedman, and J. Barrett (2008) *GHG Emissions in the Global Supply Chain of Food Products. International Input-Output Meeting on Managing the Environment*, 9-11 July 2008. Seville, Spain.
- Minx, J. C., T. Wiedmann, R. Wood, G.P. Peters, M. Lenzen, A. Owen, K. Scott, J. Barrett, K. Hubacek, G. Baiocchi, A. Paul, E. Dawkins, J. Briggs, D. Guan, S. Suh and F. Ackerman (2009) "Input-Output Analysis and Carbon Footprinting: An Overview of Applications." *Economic Systems Research*, No. 21(3).
- Moran, D., K. Kanemoto, M. Jiborn, R. Wood, J. Tobben and K. C. Seto (2018) "Carbon footprints of 13,000 cities." *Environmental Research Letters*, 13 pp. 1-8.
- Moran D. and R. Wood (2014) "Convergence between the Eora, WIOD, EXIOBASE, and OpenEU's consumption-based carbon accoutns." *Economic Systems Research*.
- 中野 論 (2007) 「OECD 産業連関表の活用」『産業連関』15 (3), 12-21.
- Nakano, S., A. Okamura, N. Sakurai, M. Suzuki, Y. Tojo, and N. Yamano (2009) "The measurement of CO₂ embodiments in international trade: evidence from the harmonized input-output and bilateral trade database." *OECD Science, Technology and Industry Working Papers* 2009/03.
- Peters, G.P. and E.G. Hertwich (2008) "CO₂ embodied in international trade with implication for global climate policy." *Environmental Science and Technology*, 42(5), 1401-1407.
- Pugel, T.A. (2007) *International Economics*, New York. McGraw-Hill Irwin, Chapter 13.
- Sato, M (2014) "Embodied Carbon In Trade: A Survey of the empirical literature." *Journal of Economic Surveys*, 28(5), pp. 831-861.
- Rukayya, I, M., R. Rothman, and L. Maltby (2021) "Integrating life cycle assessment and environmental risk assessment: A critical review." *Journal of Cleaner Production*, 293.
- Timmer, M.P., E. Dietzenbacher, B. Los, R. Stehrer, and G.J.de Vries (2015) "An illustrated user guide to the world input-output database: the case of global automotive production." *Review of International Economics*, (23)3, pp. 575-605.
- Tukker, A., A. de Doning, R. Wood, T. Hawkins, S. Lutter and J. Acosta (2013) "EXIOPOL-development and illustrative analyses of a detailed global MR EE SUT/IOT." *Economic System Research*, No. 25.
- Tukker, A., E. Poliakov, R. Heijungs, T. Hawkins, F. Neuwahl, J.A.M. Rueda-Cantuche, S. Giljum, S. Moll, J. Owsterhaven, and M. Bouwmeester (2009) "Towards a global multi-regional environmentally extended input-output database." *Ecological Economics*, 68(7), pp. 928-1937.
- Wang, Q. and X. Han (2021) "Is decoupling embodied carbon emissions from economic output in Sino-US trade possible?" *Technological Forecasting & Social Change*, 169.
- Wang, S., Y. Tang, Z. Du and M. Song (2020) "Export trade, embodied carbon emission, and environmental pollution: An empirical analysis of China's high-and new-technology industries." *Journal of Environmental Management*, 276.
- Wiebe, K.C. and N. Yamano (2016) "Estimating CO₂ Emissions Embodied in Final Demand and Trade Using the OECD ICIO 2015." *OECD Science, Technology and Industry Working Papers* 2016/05.
- Wei, L., C. Li, J. Wang, X. Wang, Z. Wang, C.C. ShaPeng, Y. Liu, S. Yu, L. Wang and Z. Shi (2020) "Rising middle and rich classes drove China's carbon emissions." *Resources, Conservation and Recycling*, 159.
- Wilting, H.C. (2008) "Analysis of the sustainability of supply chains with a multi-regional input-output model." *International Input-Output Meeting on Managing the Environment*, July 2008.
- WIOD (2016) *Groningen Growth and Development Center, University of Groningen* による資料. <http://www.rug.nl/ggdc/valuechain/wiod/wiod-2016-release>

- Wiedmann, T., H. Wilting, S. Lutter, V. Palm, S. Giljum, A. Wadeskog, and D. Nijdam (2009) *Development of a methodology for the assessment of global environmental impacts of traded goods and services Final Report*, Scientific Knowledge for Environmental Protection (SKEP) Environmental Impact of Trade (EIPOT) Project.
- Xin, Z., A. Ambiyah, S. Kojima and H. Shirakawa. (2013) “Accounting for the carbon footprints and embodied primary resources using multi-region input-output analysis.” Report of PSEE Resource Study, Institute for Global Environmental Strategies.
- Yamano, N. and J.M.J. Guilhoto (2020) “CO₂ Emissions Embodied in International Trade and Domestic Final Demand, Using the OECD Inter-Country Input-Output Database Methodology and Results.” *OECD Science, Technology and Industry Working Papers* 2020/11.
- Yang, W., H. Gao, Y. Yang, and J. Liao (2022) “Embodied carbon in China’s export trade: A multi region input-output analysis.” *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 19.