

産業連関分析法を基礎とした日本の
環境負荷解析に関する研究

小田 秀充

システム情報工学研究科
筑波大学

2014年 3月

論文概要

本論文では産業連関分析法(Input-Output Analysis:IOA)を基礎として行った日本の環境負荷解析について述べる。地球温暖化の主要因である高炭素社会、およびそれと表裏をなす高エネルギー社会の存在が動機的前提にある。問題への対策を講じていくためには、現状を精緻に定量化し分析することが必須である。そこで本論文では LCA(Life Cycle Assessment)の中核たる LCI(Life Cycle Inventory Analysis)の方法論に立脚する。そして本論文の目的を LCI による生産活動に起因する環境負荷の解析に基づき、低炭素社会構築に寄与していくことを前提とした工学的知見を見出すことに定めた。本論文の意義および分析分野は次のとおりである。

(1)本研究における方法論は、LCI法の中でも IOA を深化・発展させる。そして、使用段階を捨象可能な食料品と工業中間財を分析対象財とする。

(2)農・水・畜産物と鋳鍛造品は産業としての裾野が広い部門であると同時に、エネルギー多消費型・CO₂多排出型の財である。これらの特質は、漏れなく生産波及効果を把握できる IOA に適するとともに、本研究で目指す低炭素社会構築のための知見を得るための分析対象として相応しい。

(3)本研究においては、LCI法の一方向の柱であるプロセス法を組合せるハイブリッド LCI 法として IOA を技法的に発展させる。本研究の方法論的な新規性は、IO を既存部門より細かく分解し、製品レベルの分析を可能とした点にある。農・水・畜産物も特定溶解炉から生産される鋳鍛造品も既存 IO 部門分類のままでは分析できずプロセス法の導入により分析可能となる。

(4)更に本研究では、IOA の課題として残されていた"data age", 即ち IO の対象年と発行年の時間的乖離への対処法を提示する。突然発生し得る事象の影響を反映し、IO 各表のない年についても推計可能な手法は IOA の実用性向上に資する。また IO とプロセス法のデータが時間的に統一され、より統合的なハイブリッド LCI 法が構築される。

以上を踏まえ、本論文は I.食料品部門のエネルギー・環境負荷分析、II.地域性を考慮した農作物の生産・輸送に伴う CO₂排出量評価、III.キューボラと誘導炉の経済性分析と環境 LCA 分析、IV. エネルギー分析における変動因子係数を用いたインベントリ分析の提案および検証、の 4 部から構成する。

I. では、全国レベルでの農・水・畜産物の 70 品目について品目別エネルギー投入量・CO₂排出量を定量化した。その結果、生産活動に投入するエネルギー量が大きいほど、CO₂排出量が大きくなった。また食品熱量当りの生産投入エネルギー量の分析より、その食品熱量の数倍～数百倍のエネルギー投入が必要になるという結果が得られた。エネルギー・CO₂負荷削減の観点からは、温室栽培品や養殖品よりも旬の食品、自然に採取される食品を選択することが好ましいと分析した。地産地消型の生産システムは低炭素社会を構築していく上で重要であり、その実現が政策課題の一つであると考察した。

II.では、地域レベルでの地産地消型生産の効果を把握するため、モデル県として採用した茨城県の農作物の生産プロセスCO₂排出量と、同県を最終消費地として輸送まで含めたCO₂排出量を定量化した。更に他都道府県から輸送した場合の排出量と比較した。その結果、次の3点が明らかとなった。(i) 生産プロセスにおけるCO₂排出量は光熱動力費の相違が全体の排出量の差異に大きく影響する。(ii) 輸送プロセスにおけるCO₂排出量は距離だけではなく、輸送手段にも依存する。(iii) 生産および輸送プロセスを考慮すると、露地栽培、温室栽培によるCO₂排出量の相違により、生産プロセスからの排出量が輸送プロセスからの排出量よりも大きくなる場合がある。以上から、輸送を最小化できる地産地消はCO₂削減にとって有効であることが示された。加えて生産方法が農業の低炭素化において重要であることが明らかとなった。

III.では、鋳鉄製造における誘導炉とキュボラの経済性と環境性の比較を行った。経済性では、耐用年数12年のうち、イニシャルコストの割合はキュボラで約2%、誘導炉で約4%、ランニングコストの割合は同約98%、同約96%と推計された。ライフサイクルコスト全体では誘導炉が優位であった。耐用年数12年を仮定すると、重要な位置を占める要素はランニングコストであった。キュボラの経済性はコークス比とコークス費の影響を受けていると分析した。CO₂負荷では、設備および運用、間接影響に至るまで、誘導炉の負荷はキュボラに比べて小さいことが確認された。負荷の差異は、運転の部分が大きかった。鋳鍛造品の中間財負荷の推計からは、二次三次と続く他の加工部門の最終消費から多くのCO₂が発生していると推察され、サプライチェーン全体を俯瞰した対策が必要であることが定量的に示された。

IV.では、IOを用いるLCIに関し、“データの鮮度”の問題に対処するための一方法論を構築した。具体的にはIO基本表の未発行年における、産業構造の突発的変化が発生した場合、その影響を迅速に反映し、簡易に推計するために、変動因子係数法によるIOAの提案とその検証を行った。それらの評価・分析から以下の結果が確認された。2005年の基本表・同年度のエネルギーバランス表を通して得られた直接・間接のエネルギー消費原単位を確定値Kとし、提案法、延長表、簡易表の3方法による2005年推計値とを比較した結果、Kとの相対誤差率は昇順に延長表、提案法、簡易表となった。更に推計の際、エネルギーバランス表がない場合を想定し、線型補外を用いた3方法による推計値をKと比較した結果、提案法の精度は延長表未満、簡易表以上であり、予測時にも使用可能と判断できた。以上から、本論文での検討の範囲では提案法は迅速・簡易に変化を反映し、予測にも応用可能なLCIの1手法となり得るとの結果を得た。

本論文全体に対する結論は次の通りである。低炭素社会を実現していくためには、ほぼ2世紀に亘り定着した化石燃料への依存体質から脱却しなくてはならない。生産活動の拡大に伴い、物流も指数的に増大するため、運輸部門の低炭素化のための対策を早急に講じる必要がある。また、あらゆる生産活動の基盤であり、サプライチェーン全体に影響する電源の低炭素化が図られない限り、施策効果は限定的なものに留るため電源の低炭素化は喫緊の課題である。

目次

第1章 緒言	11
1.1 社会的背景.....	11
1.1.1 「経済成長第一主義」から「環境重視主義」へ.....	11
1.1.2 高炭素社会の現状.....	13
1.1.3 高エネルギー社会の現状とエネルギー分析の必要性.....	14
1.2 学術的背景.....	18
1.2.1 ライフサイクルアセスメントの手法.....	18
1.2.2 ライフサイクルアセスメントの対象.....	19
1.3 本研究の目的と意義.....	19
1.4 本研究の方法.....	21
1.5 本論文の構成.....	21
参考文献.....	23
第2章 LCIの概要と先行研究	27
2.1 はじめに.....	27
2.2 分析法の基礎と範囲.....	27
2.2.1 LCAとLCI.....	28
2.2.2 LCIの方向性と分類.....	28
2.3 LCIの各分析法.....	29
2.3.1 プロセス法.....	29
2.3.2 積み上げ法.....	29
2.3.3 マトリックス法.....	30
2.3.4 産業連関分析法.....	32
2.3.5 産業連関分析モデルの種類.....	32
2.3.6 競争輸入型モデル： $L = (I - A)^{-1}$ 型.....	33
2.3.7 競争輸入型モデル： $L = (I - (I - \hat{M})A)^{-1}$ 型.....	34
2.3.8 非競争輸入型モデル： $L = (I - A^d)^{-1}$ 型.....	37
2.3.9 産業連関分析法による環境負荷分析.....	38
2.3.10 産業連関分析の課題と本研究の特徴.....	39
2.4 ハイブリッド法.....	40
2.4.1 ハイブリッド法の理論と特徴.....	40
2.4.2 ダブルカウンティングの問題.....	42
2.4.3 海外におけるハイブリッド法の先行研究.....	43

2.5	LCI 事例研究	45
2.5.1	農産物・水産物・畜産物分野	46
2.5.2	金属・素材分野	47
2.5.3	運輸・サービス関連分野	47
2.6	本章のまとめ	48
	参考文献	50

第3章 食料品部門のエネルギー・環境負荷分析 57

3.1	はじめに	57
3.2	食料品部門の分析方法	58
3.3	食料品部門のデータ整備と分析結果	59
3.4	品目別のエネルギー・環境負荷分析	62
3.4.1	農業部門	62
3.4.1.1	分析方法(農業部門)	62
3.4.1.2	費目別生産プロセスエネルギー原単位の推計(農業部門)	62
3.4.1.3	分析結果(農業部門)	63
3.4.2	水産業部門	68
3.4.2.1	分析方法(水産業部門)	68
3.4.2.2	費目別生産プロセスエネルギー原単位の推計(水産業部門)	68
3.4.2.3	分析結果(水産業部門)	68
3.4.3	畜産業部門	70
3.4.3.1	分析方法(畜産業部門)	70
3.4.3.2	費目別生産プロセスエネルギー原単位の推計(畜産業部門)	71
3.4.3.3	分析結果(畜産業部門)	71
3.5	本章のまとめ	73
	参考文献	74

第4章 地域性を考慮した農作物の生産および輸送に伴う CO₂ 排出量評価 75

4.1	はじめに	75
4.2	研究手法	76
4.2.1	生産プロセスの CO ₂ 排出量推計方法	76
4.2.1.1	部門別 CO ₂ 排出原単位の推計方法	76
4.2.1.2	部門別直接 CO ₂ 排出量の推計方法	77
4.2.1.3	CO ₂ 排出量の推計方法	78
4.2.2	輸送プロセスの CO ₂ 排出量推計方法	80
4.2.3	生産および輸送に伴う CO ₂ 排出量の推計方法	80

4.3 推計結果	80
4.3.1 生産プロセスの CO ₂ 排出原単位と CO ₂ 排出量	80
4.3.2 輸送プロセスにおける CO ₂ 排出量	83
4.3.3 生産および輸送に伴う CO ₂ 排出量	84
4.4 本章のまとめ	85
参考文献	86

第 5 章 キュポラと誘導炉の経済性分析と環境 LCA 分析……………89

5.1 はじめに	89
5.2 研究手法	90
5.2.1 範囲	90
5.2.2 分析方法	90
5.2.2.1 経済性分析	90
5.2.2.2 環境性分析	92
5.3 結果	96
5.3.1 経済性の分析結果	96
5.3.1.1 資本コスト化によるキュポラと誘導炉の経済性の比較	97
5.3.1.2 キュポラと誘導炉のコスト分岐点	97
5.3.2 環境性の分析結果	97
5.3.2.1 設備製造時と運用時の CO ₂ 発生量の推計	97
5.3.2.2 鋳鍛造品の CO ₂ 負荷と間接影響の推計(最終財)	99
5.3.2.3 鋳鍛造品の CO ₂ 負荷と間接影響の推計(中間財)	99
5.4 本章のまとめ	100
参考文献	101

第 6 章 エネルギー分析における変動因子係数を用いたインベントリ分析の提案および検証……………103

6.1 はじめに	103
6.2 関連手法および本研究の意義	106
6.2.1 補完的 IO	106
6.2.1.1 簡易表	106
6.2.1.2 延長表	107
6.2.2 時系列 IO	107
6.2.3 本研究の提案法の位置付け	107
6.3 変動因子係数法	108
6.3.1 基本的な考え方	108

6.3.2	提案法における入出力仕様	108
6.3.3	変動因子係数法モデルの導出	109
6.3.4	実装方法と変動因子の反映方法	110
6.4	変動因子係数法の検証	111
6.4.1	検証の手順と方法	111
6.4.2	結果と評価	113
6.4.2.1	誤差の計算方法	113
6.4.2.2	全体の傾向	113
6.4.2.3	直接エネルギー消費量予測時における傾向	114
6.4.2.4	各方法の順位の組み合わせにおける傾向	115
6.4.2.5	相対誤差率の傾向	117
6.5	鋳鍛造品部門におけるケーススタディ	118
6.5.1	変動因子係数法を用いた直接・間接エネルギー消費量・同原単位の推計	119
6.5.2	変動因子係数法を用いた直接・間接エネルギー消費量・同原単位の推計結果	119
6.6	本章のまとめ	120
	参考文献	121
第7章 結言		125
7.1	本論文の結論	125
7.2	問題点と今後の課題	129
7.2.1	限定的な分析範囲	129
7.2.2	単一モデルによる解析の限界	130
7.2.3	分析・対象境界の乖離	130
7.2.4	変動因子係数法検証の緻密化	131
7.3	展望	132
7.3.1	データベース整備とソフトウェア開発	132
7.3.2	国際産業連関表の整備・地理的拡張	132
7.3.3	変動因子係数法の可汎性の拡大	133
7.3.4	化石燃料への依存体質からの脱却	133
	参考文献	134
	付録	137
	研究業績一覧	139
	謝辞	141

目次

図 1-1 我が国の温室効果ガス排出量	13
図 1-2 最終エネルギー消費と実質 GDP の推移	15
図 1-3 日本の電力化率の推移	16
図 1-4 日本の電源別発電電力量構成比	16
図 1-5 LCA の枠組み	18
図 2-1 本論文の構成	50
図 3-1 (1)(2)食料品部門の直接間接原単位(エネルギー消費原単位・CO ₂ 排出原単位)	60
図 3-2 (1)農産物の投入エネルギー量	63
図 3-2 (2)農産物の投入エネルギー量	64
図 3-3 (1)農産物の CO ₂ 排出量	64
図 3-3 (2)農産物の CO ₂ 排出量	65
図 3-4 (1)農産物の(生産投入エネルギー)/(食品熱量)比の推計	66
図 3-4 (2)農産物の(生産投入エネルギー)/(食品熱量)比の推計	67
図 3-5 水産物の投入エネルギー量	69
図 3-6 水産物の CO ₂ 排出量	69
図 3-7 水産物の(生産投入エネルギー)/(食品熱量)比の推計	70
図 3-8 畜産物のエネルギー投入量	72
図 3-9 畜産物の CO ₂ 排出量	72
図 3-10 畜産物の(生産投入エネルギー)/(食品熱量)比の推計	73
図 4-1 農作物の直接間接 CO ₂ 排出原単位	81
図 4-2 生産プロセスにおける CO ₂ 排出量(重量当たり)	81
図 4-3 生産プロセスにおける CO ₂ 排出量(価格当たり)	82
図 4-4 生産プロセスにおける CO ₂ 排出割合	82
図 4-5 各都道府県から茨城県への輸送分担率(農林業)	83
図 4-6 茨城県までの輸送プロセスにおける CO ₂ 排出量	83
図 4-7 レタスの各都道府県での生産と茨城県への輸送に伴う CO ₂ 排出量	84
図 4-8 ねぎの各都道府県での生産と茨城県への輸送に伴う CO ₂ 排出量	85
図 5-1 分析範囲	90
図 5-2 ハイブリッド法による分析の枠組み	94
図 5-3 産業連関表の二地域への分割	95
図 5-4 ライフサイクルコスト比較	96
図 5-5 コークス単価変動による経済性比較(コークス比 15%)	97
図 5-6 コークス単価変動による経済性比較(コークス比 12%)	97
図 5-7 キュボラのコークス比変化による CO ₂ 排出量の比較(12 年間:設備+運	

用).....	99
図 5-8 キュボラのヨークス比変化による CO ₂ 排出量の比較(12 年間:設備+運転+間接).....	100
図 6-1 各 IO および変動因子係数法を用いたエネルギー消費原単位推計値の比較(44 部門平均値).....	114
図 6-2 直接エネルギー消費量の予測年数に対する相対誤差率の推移.....	115
図 6-3 昇順ソートされた 44 部門における直接・間接エネルギー消費原単位の相対誤差率(a)延長表.....	117
図 6-3 昇順ソートされた 44 部門における直接・間接エネルギー消費原単位の相対誤差率(b)簡易表.....	117
図 6-3 昇順ソートされた 44 部門における直接・間接エネルギー消費原単位の相対誤差率(c)変動因子係数法.....	118
図 6-4 鋳鍛造品の直接・間接のエネルギー消費量・同原単位推計結果(a)エネルギー消費量.....	119
図 6-4 鋳鍛造品の直接・間接のエネルギー消費量・同原単位推計結果(b)エネルギー消費原単位.....	120

表目次

表 2-1 競争輸入型産業連関表	33
表 3-1 国民一人あたりの年間エネルギー消費・CO ₂ 排出量	61
表 3-2 食料品部門の内訳と全産業内における割合	61
表 4-1 農林業の直接エネルギー配分方法	78
表 4-2 生産プロセスと産業連関表の部門対応	79
表 5-1 分析の前提(金額は2008年価格)	90
表 5-2 ライフサイクルコスト比較	96
表 5-3 キュボラと誘導炉のコスト分岐点	97
表 5-4 運用時のCO ₂ 発生量	98
表 5-5 鋳鍛造品のCO ₂ 負荷と間接影響(最終財)	99
表 5-6 鋳鍛造品のCO ₂ 負荷と間接影響(中間財)	100
表 6-1 産業連関表(基本表)の発行年	104
表 6-2 延長産業連関表(延長表)の発行年	105
表 6-3 簡易延長産業連関表(簡易表)の発行年	105
表 6-4 3方法の順位の組み合わせにおける内訳(a)0年予測時	116
表 6-4 3方法の順位の組み合わせにおける内訳(b)1年予測時	116
表 6-4 3方法の順位の組み合わせにおける内訳(c)2年予測時	116

第1章 緒言

本章は本論文の主題である産業連関分析法(Input-Output Analysis:IOA)を基礎とした日本の環境負荷解析における背景, 意義, 方法を述べる. 以下, 1.1 では社会的背景としての「経済成長第一主義」から「環境重視主義」の転換, 高炭素・高エネルギー社会の現状およびエネルギー分析の必要性について述べる. 1.2 では学術的背景であるライフサイクルアセスメントの方法論について, 具体的には手法と対象について概説する. 1.3 にて本研究の目的と意義, 1.4 で本研究の方法について述べる. 1.5 で本論文の構成を示す.

1.1 社会的背景

1.1.1「経済成長第一主義」から「環境重視主義」へ

1972年にローマクラブのMIT¹グループが「成長の限界」という報告書を発表した[大北 1972][茅 1992]. 同報告書では, 人類が直面している資源, 環境といった様々な問題に対して世界全体で取り組む必要性の指摘がなされた. 以来, 「経済成長第一主義」から「環境重視主義」へという先進国における基本的潮流は一貫して現在まで続いている.

一方, この潮流は世界レベルで俯瞰すると一様ではない. 計画型経済を意図した社会主義が1989年のベルリンの壁崩壊に象徴される「大いなる失敗」[Brzeziński 1990]として終焉する頃と前後して, アジア地域を中心とした諸国は, 経済成長を至上命題とする国家建設に次々に転じていった. 1980年代におけるアジアNIEs²はその代表的存在であり, 現在では分野的には日本を凌駕する工業国となっている. 2000年代に入るとBRICS³[O'Neill 2001]と呼ばれる国家群が台頭し始めたが, BRICSは人口, 面積, 地下資源といった面から見ると, かつてのアジアNIEsとは比較にならないポテンシャルを有している. BRICSの代表格とも言える中国は, GDPでは2010年に日本を抜いて世界第二位の経済大国となった. これら新興工業国においては, 戦後復興期の日本やかつての社会主義国と同様に, 「環境の持つ価値」はほぼ外部化され「経済成長第一主義」の道を突き進んでいる.

所謂, 従来からの先進国(G7⁴)とその他の新興工業国, 発展途上国において, 地球温暖化, 酸性化, オゾン層破壊, 富栄養化といった環境負荷に対する意識・取り組みの乖離は未だに大きい. しかし人類は同じ「宇宙船地球号」[芹沢 1992]の乗員であり, 異常気象, 酸性雨による自然破壊, 特定フロンによるオゾン層破壊などの地球環境問題を避けて通ることはできない. その中でも「地球温暖化問題」は, 前述のような国家間の意

¹ マサチューセッツ工科大学: Massachusetts Institute of Technology

² Newly Industrializing Countries: アジアNIEsは韓国, 台湾, 香港, シンガポールを指す.

³ ブラジル (Brazil), ロシア (Russia), インド (India), 中国 (China), 南アフリカ共和国 (South Africa)の頭文字を合わせた五カ国の総称.

⁴ Group of Seven. アメリカ合衆国, イギリス, イタリア, カナダ, ドイツ, フランス, 日本.

識の乖離を内包しつつも世界的な取組みが行われている。

地球温暖化に関しては、1992年6月ブラジル・リオデジャネイロの地球サミットでの気候変動枠組条約⁵締結を本格的な起点として[WCED 1987]、先進国では、代表的な温室効果ガスであるCO₂の排出量削減に向けた一層の努力が求められていた。1997年12月には、京都で開催された気候変動枠組条約第3回締約国会議(以下、COP3⁶)にて、先進国の温室効果ガス排出量削減の具体的な数値目標などが定められた[西井 1987]。京都議定書⁷の採択によって、各国が当面取り組むべきおおよその大枠が作られた[茅 2008]。京都議定書⁸の採択に関しては、世界の温室効果ガス排出量の約四分の一を占めるアメリカの離脱、更に今後温室効果ガス排出量の過半数を占めると予想された新興工業国・発展途上国に数値目標が課されないことなどを理由に、議定書の意義・効果に対する疑問も呈された。しかし、地球環境問題に関して、世界レベルで議論を行い、拘束力を持つ具体的な数値目標を課すことに合意できたことは歴史的な前進であったと言える。以後、国際的な議論と取組みは継続され、2012年末にはカタール・ドーハにおいて、国連気候変動枠組条約第18回締約国会議(COP18)が開催されるに至っている。本稿執筆時点(2013年12月)では、COP3以来の枠組みの再構築する為に、ポスト京都議定書に向けた国際的議論が行われている段階にあり、温暖化防止への地球規模的取組みは新局面を迎えている[環境省 2013a]。

地球温暖化の進行を巡る研究に関しては自然科学的な不確実性が大きいとして、根強い懐疑論[Thejll 2000]もあり、長く議論が交わされてきていた。しかしデータや調査・研究の蓄積、スーパーコンピュータの解析力の飛躍的向上などにより、気候変動が発生する可能性が高いということが次第に確認されるようになった。2007年には国連の下部組織である気候変動に関する政府間パネル(以下、IPCC⁹)によって第4次評価報告書が発表された。その結論は「気候システムの温暖化は疑う余地がなく、その原因は人為的なものである」[IPCC 2007a] というものであった。世界130カ国から参加した専門家集団2千人以上の科学技術的・社会経済的な知見を集約し、かつ参加195カ国の政府代表団のパネルによって認められたこの報告書は、現代の最高水準の科学力の集結によって導かれた結論に他ならない。地球温暖化を巡る分析と議論は、「地球上での人類の活動によって発生する環境負荷の複合的な総量が、自然(地球)の受容できる総容量を超えていないのか、それとも超えているのか」を判断するという側面を有していたが、この命題に人類最高の叡智を集集した最先端科学の結論はほぼ「超えている」という解答を出した。

⁵ 気候変動に関する国際連合枠組条約：United Nations Framework Convention on Climate Change

⁶ 気候変動枠組条約第3回締約国会議：Third Session of the Conference of the Parties [略] COP3

⁷ 気候変動に関する国際連合枠組条約の京都議定書：Kyoto Protocol to the United Nations Framework Convention on Climate Change

⁸ 気候変動に関する国際連合枠組条約の京都議定書：Kyoto Protocol to the United Nations Framework Convention on Climate Change

⁹ IPCC: Intergovernmental Panel on Climate Change

IPCC 第 4 次評価報告書において、本論文の学術的基盤であり次節にて詳しく述べるライフサイクルアセスメント(Life Cycle Assessment), ライフサイクルアナリシス(Life Cycle Analysis)の方法論は、「環境影響を評価するための最も包括的・体系的な方法」[IPCC 2007b]として位置付けられ、IPCC の技術分科会(WG3)においても、基盤的役割を果たした。一例として、輸送技術における各燃料(化石燃料, バイオ燃料, 水素燃料)のライフサイクル CO₂ 比較分析を挙げることができる[IPCC 2007c].

IPCC 第 5 次評価報告書は本稿執筆時点(2013 年 12 月)において、まだ全体は明らかになってはいない。しかし報告書骨子等[環境省 2013b]を見る限り、第 4 次評価報告書と基本的方向に変化はない。今まさに国家の枠を超え、地球レベルでの人類の社会経済システムや、人類一人ひとりのライフスタイルの在り方が改めて問い直されている。しかしながらライフスタイルの変革に留まらず、次項で述べるとおり、産業構造およびそれと連動するエネルギー供給のあり方がより強く考慮すべき問題である。

1.1.2 高炭素社会の現状

1997 年に京都で開催された COP3 では、先進国の温室効果ガス排出量削減の具体的な数値目標などが議定書により定められた。この京都議定書により 1998 年から 2012 年の間に、温室効果ガスを先進国全体で基準年(1990 年)の排出量より少なくとも 5%削減することが国際的な取り決めとなった。議長国である日本には基準年比で 6%削減が課せられた[UNITED NATIONS 1998].

日本の削減目標の最新の情勢について、環境省の資料から以下に要点を引用する[環境省 2013c].

「2011 年度の我が国の温室効果ガスの総排出量(確定値)は、13 億 800 万トンで、これは基準年比 3.7%の増加となっています。また、2010 年度の総排出量と比べると、火力発電の増加等によって、4.0%の増加となっています。」

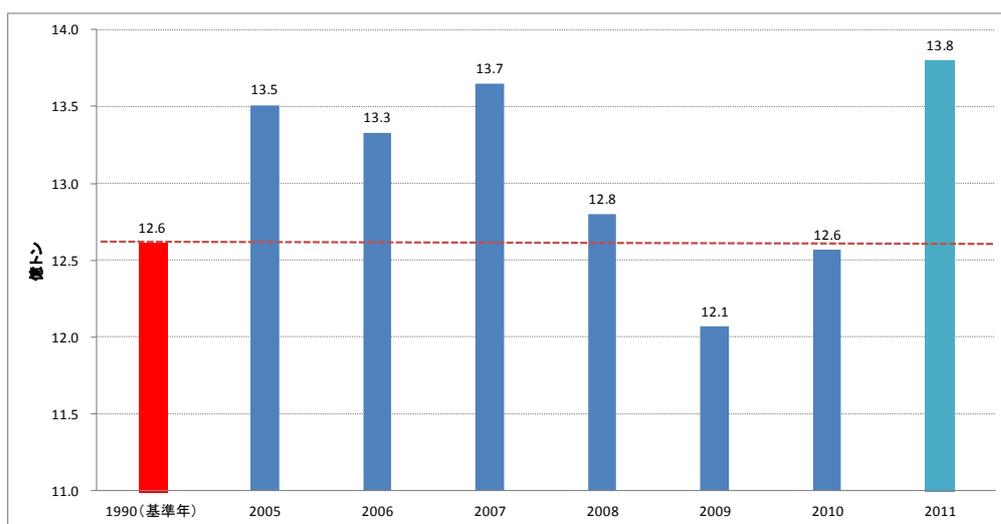


図 1-1 我が国の温室効果ガス排出量(環境省資料より筆者作成)

日本の温室効果ガスの排出状況は基準年(1990年)比で-6.0%削減しなくてはならないのに対し、逆に3.7%増加している。同資料では森林吸収量の目標と京都メカニズムクレジット[環境省 2013b]を加味することにより、京都議定書第一約束期間の4カ年平均(2008～2011年度)で基準年比-9.2%の成果を上げたとしているが、第1次約束期間2011年度における温室効果ガス削減数値目標への取り組みは結果を見る限り、達成できずに終わった。前年度比で3.9%増加しているが、同報告によればこの要因について、「東日本大震災の影響等により製造業の生産量が減少する一方、火力発電の増加によって化石燃料消費量が増加したことが挙げられる」と指摘されている。京都議定書第一約束期間の最終年である2012年度の温室効果ガスの排出状況はまだ明らかになっていないが、原子力発電の稼働率の低下分を火力発電で代替している現状に変化はないことから[JANSI 2013]、2011年度の傾向が継続するものと推察される。日本は京都議定書が採択されたCOP3の議長国であったため、採択各国の中でも削減目標達成に向けて、最大の努力を払った国のひとつであったと考えられる。そして目標の達成にあたっては、京都メカニズム等の社会経済的システムを駆使すると同時に、デマンドサイド(需要面)ではトップランナー方式¹⁰やエコポイント制度¹¹等によって与えられた規制とインセンティブによる省エネルギーの浸透による効果、カーボンフットプリント試行事業等に代表されるCO₂の可視化による購買行動の変化[稲葉 2009]、サプライサイド(供給面)ではエネルギー1単位を生み出す際の有毒化学物質排出量および温室効果ガス排出量が火力発電に比して遥かに少ない原子力発電の基幹電源としての拡大に期待していたと推察される[八田 2004]。

日本は京都議定書の議長国として、第一約束期間の結果を総合的に分析し、引き継ぐものは引き継ぎつつ、学術的方法論により深く根付いた施策を構築していかななくてはならない。その際に基礎となるCO₂排出量等の分析法は、簡易かつ費用対効果に優れるものであることが望ましい。

1.1.3 高エネルギー社会の現状とエネルギー分析の必要性

前項で触れた高炭素社会の背景として、エネルギーを大量生産・大量消費する高エネルギー社会の存在があることは否定できない。高炭素社会が招いた地球温暖化問題は、化石燃料の大量消費、即ちエネルギーの大量消費が主原因であるため、温暖化問題に対処していくためには、エネルギー問題の正確な把握と分析を避けて通ることはできない。

日本のエネルギー消費は、経済発展とともに増え続けた。エネルギー白書2012によると第一次石油危機時(1973年)と2010年度の比較では、産業部門が0.9倍、民生部門が2.5倍(家庭部門2.2倍、業務部門2.8倍)、運輸部門が1.9倍となっている[経済産業省 2012]。この間のGDPの伸びは2.4倍であり、経済成長とエネルギー消費がほぼ符合していることが分かる。日本経済の低迷に呼応して、2008年～2009年の最終エネルギ

¹⁰ 電気製品・自動車などの省エネルギーの基準を、現在最も高性能な製品に合わせる方式

¹¹ 対象となる家電製品の購入や住宅の新築等に対して、様々な商品・サービスと交換可能なポイントを付与する制度

一消費は一時減少したが、景気回復により 2010 年には再び増加に転じている[経済産業省 2012]。図 1-2 に日本の最終エネルギー消費と実質 GDP の推移を示す。

一方で人口の面からエネルギー消費を見た場合、国立社会保障・人口問題研究所より日本の人口は 2040 年には全ての都道府県で 2010 年より減少し、65 歳以上の人口が 40%以上を占める自治体が約半数になるという調査結果が報告されている[IPSS2013]。高齢化の進行は高齢者に合わせた電気設備や介護機器の使用の増加などによりエネルギー消費増加の要因となり得る。人口の減少とは逆に核家族化の進展により世帯数は増加すると予想されている。世帯数が増えれば、増えた世帯数の分だけ家電製品や自家用車などが必要になるため、核家族化の進展もまたエネルギー消費増加の要因となり得る。

エネルギーの中でも利便性の高い電力の消費量は生活水準の向上、オール電化住宅の普及、IT 関連機器による高度情報化社会の進展、高齢化社会の進展により年々増える傾向にある。

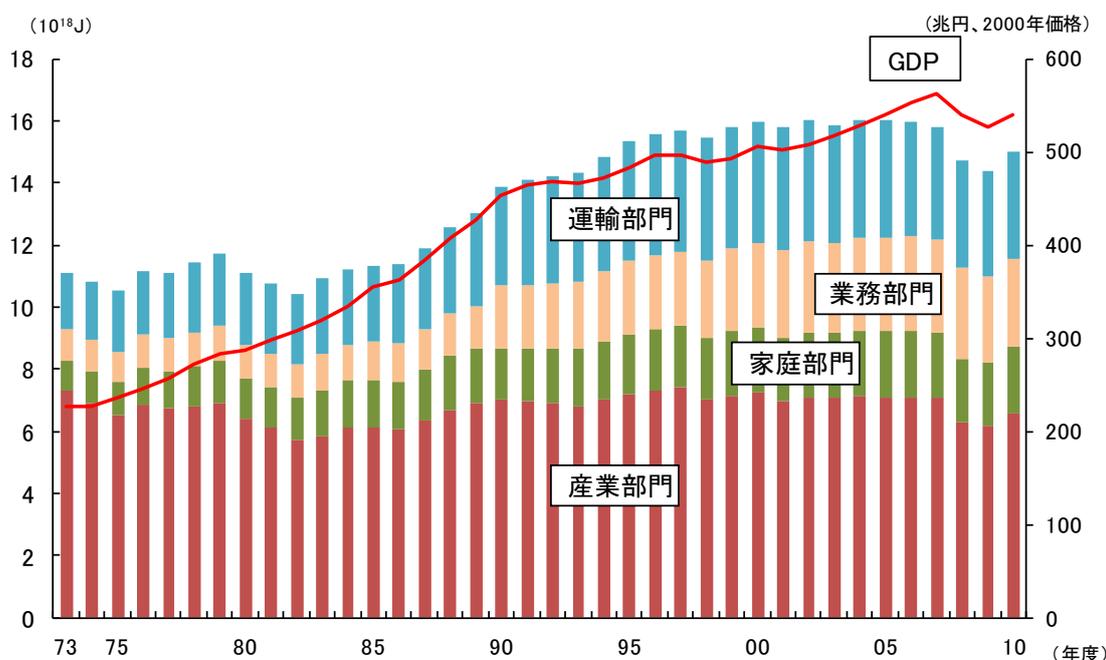


図 1-2 最終エネルギー消費と実質 GDP の推移(エネルギー白書 2012 から筆者作成)

電気事業連合会資料によると販売電力量では、1990 年度が 6.5tWh, 1995 年度が 8.1tWh, 2000 年度が 8.3 tWh, 2005 年度が 8.8 tWh, 2010 年度が 9.0 tWh と増加基調にある。全エネルギーにおける電力の比率(電力化率¹²)も 1990 年度が 39.8%, 1995 年度が 40.8%, 2000 年度が 41.7%, 2005 年度が 42.6%と、着実に増加しており、2010 年度に至っては 44.9%と約 45%を占めるに至っている[FEPC2012a]。

電力の安定供給については、1973 年の第一次石油危機以降、脱石油、エネルギー供

¹² 総エネルギー需要に占める電力需要の割合

給の多様化といった点で原子力が大きな役割を果たしてきたことは否定できない。2010年度の電源別発電電力量では原子力 28.6%, 石炭 25.0%, LNG ガス 29.3%, 石油等 7.5%, 水力 8.5%, 地熱および新エネルギーが 1.1%であり, 原子力発電により電力の約 3 割が生産されていた[FEPC2012b] .

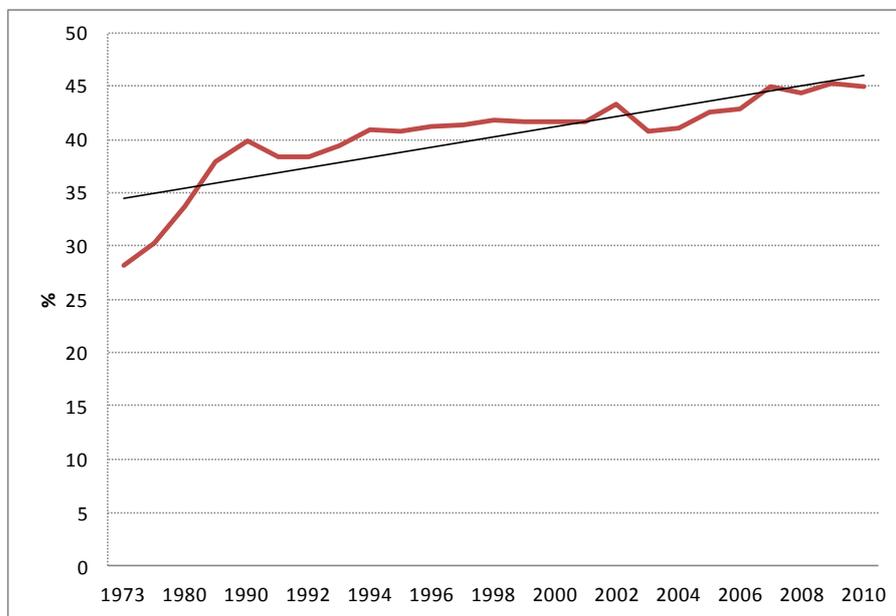


図 1-3 日本の電力化率の推移(電気事業連合会資料から筆者作成)

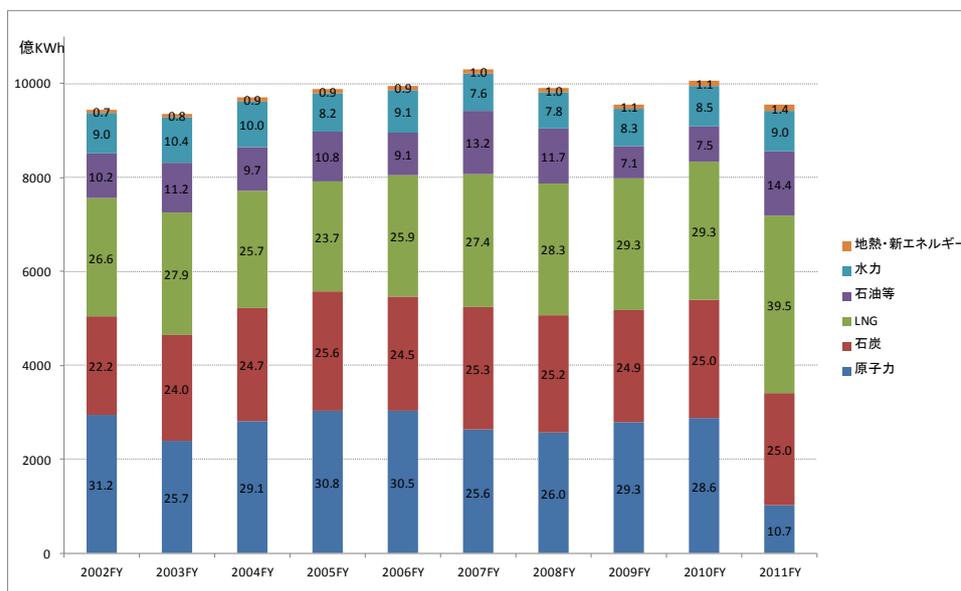


図 1-4 日本の電源別発電電力量構成比(電気事業連合会資料から筆者作成。10 電力計, 他社受電分を含む。グラフ内の数値は構成比(%))

先に述べた通り, エネルギー消費量と CO₂ 排出量は強い相関があり, エネルギー問題

と CO₂問題は表裏一体の関係にある[河村 2010]. Kaya は CO₂排出量とエネルギー諸量, 経済成長率の関係を kaya identity(茅恒等式)により明確化した[kaya1989][茅 2009].以下, kaya identity の引用に基づいて, CO₂対策とエネルギー分析の必要性について述べる.

Kaya によれば, CO₂排出量(CO₂), エネルギー(E), 経済成長率(GDP)の関係は次式によって表される.

$$CO_2 = \frac{CO_2}{E} \cdot \frac{E}{GDP} \cdot GDP \quad (1.1)$$

(1.1)式より CO₂ 排出増加率(ΔCO_2)は次式により導かれる. なお Δ は平均変化率, C は CO₂, G は GDP を表す.

$$\Delta C = \Delta \frac{C}{E} + \Delta \frac{E}{G} + \Delta G \quad (1.2)$$

(1.2)式において, $\Delta \frac{C}{E}$ はエネルギーの炭素依存率, $\Delta \frac{E}{G}$ はエネルギーの経済集約率, GDP は経済活動規模を意味する. 当式は CO₂排出増加率がこの三要素の変化率の和によって表されることを示している. 技術進歩等により $\Delta \frac{C}{E}$ および $\Delta \frac{E}{G}$ が負値, 経済規模の拡大に

より ΔG が正値を取ると考えれば, $-\Delta \frac{C}{E}$ は脱炭素率, $-\Delta \frac{E}{G}$ は省エネルギー率と読み替えることができる. すなわち経済成長率から脱炭素率, 省エネルギー率を差し引いた値が CO₂排出増加率となる.

茅ら[茅 2009]は, 1980 年度から 2005 年度に亘る過去の先進諸国の上記三要素を定量的に分析した. その結果, 東西が統合した 1990 年度~1995 年度のドイツを唯一の例外として, 日本を含むすべての先進国において GDP の増加率が省エネルギー率の上昇率を上回っていることを明らかにした. GDP 増加率が省エネルギー率を上回っている状況は次式のように表される.

$$\Delta E = \Delta G - \left(-\Delta \frac{E}{G}\right) > 0 \quad (1.3)$$

(1.3)式で表される状況が継続する場合, 前述の(1.2)式は次式のようになる.

$$\Delta C > \Delta \frac{C}{E} \quad (1.4)$$

(1.4)式の両辺は通常, 負値と考えられるため, マイナスを乗じてプラスに変換すると次式となる.

$$-\Delta C < -\Delta \frac{C}{E} \quad (1.5)$$

(1.5)式から、今後 CO₂ 排出量削減を達成するにはサプライサイドにおけるエネルギー由来の CO₂ 削減対策、すなわち $\Delta \frac{C}{E}$ (エネルギーの炭素依存率) の低減なしに CO₂ 削減を達成することはできないことが分かる。以上よりエネルギー分析、中でも次節以降にて詳しく述べるエネルギー LCI は低炭素社会構築の処方箋を用意する上で欠くことはできない。

1.2. 学術的背景

1.2.1 ライフサイクルアセスメントの手法

あらゆる科学においては、分析対象の把握手段として「定量化」が必須であり、基礎である。それを土台として分析や評価、総合的解釈が行われる。ライフサイクルアセスメント(Life Cycle Assessment: LCA)は、財やサービスの生涯(採り籠から墓場まで)に亘る環境負荷を定量化し、影響を評価する科学的診断法であり、環境を対象とする研究の基礎として欠くことができない方法である。LCA は ISO¹³14040 シリーズとして規格化されており環境関連の分野はもとより、エネルギー技術の諸量の分析にも広範に活用されている。LCA には(1)目的と範囲の設定、(2)インベントリ分析、(3)影響評価、(4)解釈の4段階がある。図 1-5 に ISO14040 による LCA の枠組みを示す[伊坪 2007]。

(1)「目的と範囲の設定」(Goal and scope definition)では、実施しようとする LCA の目的を明確化し LCA の範囲すなわちシステム境界(System boundary)¹⁴[伊坪 2007]を設定する。

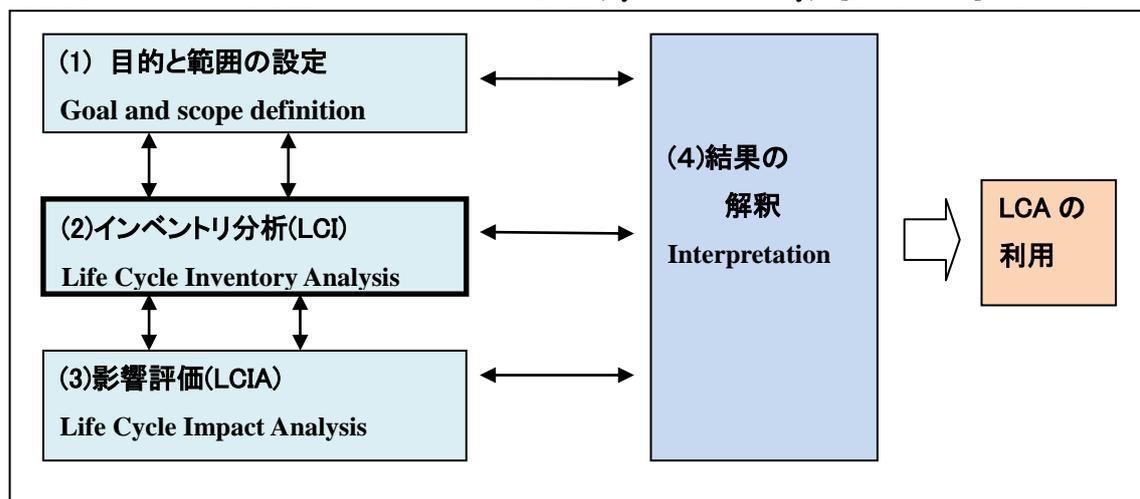


図 1-5 LCA の枠組み(「LCA 概論」より筆者作成)

¹³国際標準化機構:International Organization for Standardization

¹⁴ LCA において分析の対象となる範囲

(2) 「インベントリ分析」(Life Cycle Inventory Analysis:LCI)では、「目的と範囲」の設定に則り、LCA の対象である財やサービスについて、投入資源やエネルギー等のインプットデータと製造される財や排出物等のアウトプットデータの一覧を作成する。すなわち入出力データの明細目録(インベントリ)が作成され、LCA の対象に対して定量的な分析・評価が実施される。インベントリ分析は LCA において中核的な位置を占めている。分析法もプロセス法、産業連関分析法等に細分化されるが、それぞれの技法に長所短所があり、分析法の選択と適用の仕方により、LCA の性格が左右されるという側面を持つため、今なお、技法の開発と研究が積み重ねられている。インベントリ分析については本論文第 2 章で改めて述べるため、詳細はそちらを参照されたい。

(3) 「影響評価」(Life Cycle Impact Analysis:LCIA)は、インベントリ分析で得られた分析結果を基礎的情報として用い、環境への影響の程度・重要度を評価する段階である。「影響評価」は「インパクト評価」(Impact assessment)とも呼ばれる。分類化(Classification)、特性化(Characterization)、重み付け(Weighting)の 3 フェイズから構成され、分類化、特性化までが LCA における必須事項とされる。「影響評価」における重み付けでは、人間の主観に左右される「環境の価値」を客観的に定量化していくためにコンジョイント分析(Conjoint analysis)[Douglas 1995]等の環境経済評価(Environment-Economy Assessment)の理論を用いる[大野 2000]。以上のように、この段階に進むと、社会科学的側面も強くなる。影響評価はインベントリ分析と同様に、技法の研究が続けられている。

1.2.2 ライフサイクルアセスメントの対象

LCA の対象は基本的に環境にストレスを与えるすべての因子が対象となりうる。具体的な環境負荷としては、エネルギー投入量、温暖化負荷、酸性化負荷、オゾン層破壊負荷、富栄養化負荷などが対象として挙げられる。

1980 年代に入ってから、地球温暖化問題が地球規模における重要な環境問題として認識されてきたこともあり、CO₂ 排出量を対象とした多くの LCA が行われてきた。特に CO₂ を対象とした LCA は独立してライフサイクル CO₂ (Life Cycle CO₂) と呼ばれている。また、CO₂ 排出量と強い相関にあるエネルギーについても多くの研究や分析がなされてきた。エネルギー消費量を対象とした LCA はエネルギー・アナリシス (Energy Analysis) [茅 1980] においても重要な一分野として、特にライフサイクルエネルギー (Life Cycle Energy) と呼ばれる。

1.3 本研究の目的と意義

本研究では、LCI の方法論、特に産業連関分析法(IOA : Input-Output Analysis , 以下 IOA)を主として用いて生産活動に起因する環境負荷の具体的解析に基づき CO₂ 排出量・エネルギー消費量を削減し、低炭素社会構築に寄与していくことを前提とした工学的知見を見出すことを目的とする。より具体的には生産活動における環境負荷発生の実状を把握することが必要となるが、本研究の分析対象財は農・水・畜産物と鋳鍛造品で

ある。

以下にこの分析対象財選定の理由に触れるとともに本研究の意義を示す。

(1)本研究においては、LCI法の中でもIOAを深化・発展させることを主眼としている。IOAはライフサイクル段階における生産・製造段階までを間接影響をも網羅することにより緻密に分析することに極めて優れている。そのため、生産・製造段階までの環境負荷分析に相応しい財を分析対象として選定した。本論文の分析対象財のひとつである農・水・畜産物においては、基本的にライフサイクル段階における使用段階は存在しない。もう一つの分析対象財である鋳鍛造品(中間財)は、製造後に他産業へ素材として供給され加工されるため、使用段階は分析範囲に含まれない。それに対して家電製品等の大衆消費財、自動車・工作機械などの工業製品等は使用段階がライフサイクルステージ全体を通して最も重要な位置を占めるため[未踏技術科学協会 1995] [内山 2006]、使用段階を抜きにして環境負荷を解析・評価することはできない財である。

(2)農・水・畜産物と鋳鍛造品は産業としての裾野が広い部門であると同時に、エネルギー多消費型・CO₂多排出型の財である。これらの特質は、漏れなく生産波及効果を把握できるIOAに適するとともに、本研究で目指す低炭素社会構築のための知見を得るための分析対象として相応しい財である。農・水・畜産物は背後に広大なフードサービス分野が存在している。また食生活において年々高まる高付加価値化へのニーズに対応する形で、温室栽培・養殖等が進展し、加工食品産業が発展するとともに、肥育用の輸入飼料の増加等を招いているが、これらがエネルギー消費量増大に直結し[資源協会 1992]、ひいてはCO₂の多排出に繋がっている。鋳鍛造品(中間財)は、製造業の広く基盤となっている分野であるとともに、高周波誘導炉をはじめとする電炉の普及により、エネルギー多消費化が進んでいる[産業研究所 2007]。

(3)本研究においては、IOAを深化させることに力点を置いているが、LCI法のもう一つの柱であるプロセス法を利用してハイブリッドLCI法[Suh 2005]としてIOAを従来より技法的に発展させた。ハイブリッドLCI法は1990年代に入ってから開発され、多くの研究例がある。本研究がIOAあるいはハイブリッドLCI法として従来の手法より新しい点は、生産費等文献の精査、生産工場の現地調査・データ分析等の手法を用いて、IOの部門を既存の部門より細かく分解し、製品レベルの分析をIOAにより可能としたところにある。農・水・畜産物も特定の溶解炉から生産される鋳鍛造品(中間財)も既存のIO部門分類のままでは分析できず、プロセス法導入により分析が可能となる。

(4)更に本研究においては、IOAの課題として残されていた"data age"[Suh 2005] [Suh 2007],すなわちIOの対象年度と発行年度の時間差の問題に対する理論的1方法論として変動因子係数法を提案している。日常の中で突然発生し得る自然災害や市場情勢の急変等が発生した場合、その影響を迅速に反映し、更にはIO基本表・延長表・簡易表のない年についても補外的かつ簡易に推計できるIOAの構築は、IOAの実用性向上に資する。また変動因子係数法によりIOデータとプロセス法データが時間的に統一され、IOA

を用いるハイブリッド LCI 法の時間的不一致が解消されることにより、より整合的なハイブリッド LCI 法が構築されてゆく。提案法を実際の分析に適用するにあたっては、前述の(1)(2)(3)の理由より、分析財は鋳鍛造品を選定している。

以上、分析対象財選定の理由に触れつつ本研究の意義を述べた。本論文では、既存の理論の検証に基づき実際の事例分析を展開し、それに基づいて分析法改良と新方法の提案を行うという流れになっているのが特徴である。

1.4.本研究の方法

本研究では、ライフサイクルアセスメントの方法論を基礎とする。そして LCA の中核たるインベントリ分析の各分析法の中でも、あらゆる間接影響を把握する際に有効な IOA とのハイブリッド・インベントリ分析(Hybrid analysis) [Heijungs 2002]を採用する。そして実際の分析を通して、ハイブリッド・インベントリ分析のもつ課題を洗い出すことを目的の 1 つとして、代表的財について分析する。分析財選定の理由は前節で述べた。一つは食料品関連分野の分析であり全国レベルでの農産品・水産品・畜産品と、地域レベルでの農産品の環境負荷解析である。食料品は生産が即最終消費に繋がる代表的な財である。もうひとつは鋳鍛造品の分析であり、素材型・加工型の財であるために中間財と最終財の 2 種類の製品パターンが存在する。これらの財を分析対象として、IOA とその発展であるハイブリッド・インベントリ分析の分析技法上の問題点を抽出し、個々に解決方法を提示していくとともに、得られた分析結果に基づき低炭素社会構築に向けての論考を行う。最終的には、産業連関分析法を用いる以上、避けて通れないデータの時間的遅延という根本的課題に対処するための変動因子係数法を提案し、あらゆるハイブリッド型インベントリ分析を強化・発展させるための方法論の構築を行う。

なお、2011 年 3 月 11 日に東日本大震災が発生した。本研究は 2007 年から開始し、調査・研究を主として行った時点は東日本大震災前であり、その後も震災後の状況分析に使用できるデータは殆ど存在していなかった。ところが福島第二原子力発電所事故を発端として原子力発電の稼働状況に劇的変化が生じた。2013 年 12 月末現在で、稼働している原子力発電所は全国の商用原子力発電所 54 基中、関西電力の大飯発電所 3 号機、同 4 号機の 2 機のみである[JANSI 2013]。2011 年度では化石燃料による発電の割合が約 8 割に増加した[FEPC2012b]。したがって、本研究の第 5 章までの結果だけでは東日本大震災後の状況分析に資するには十分ではない。よって、第 3 章、第 4 章、第 5 章の分析を震災後の状況を踏まえて把握するためには、第 6 章で提案する変動因子係数法を適用した解析が有用である。

1.5 本論文の構成

本論文における構成を以下に示す。

第 1 章緒言の後、第 2 章にて現在の社会状況と照らし合わせつつ過去の先行研究の間

題点と課題を整理し、本研究の学術的位置付けを明確化する。2.1 では、当章の背景について述べ、2.2 にて分析法の基礎と範囲を示す。2.3 では LCI の各分析法、特に本研究の基礎である IOA の理論とその課題、および本研究の特徴について示す。2.4 ではハイブリッド法の理論とダブルカウンティング問題を示し、海外の先行研究を概説する。2.5 では LCI の事例研究について概観し、2.6 で本章のまとめを述べるとともに、それに基づき以後の本論文各章への道標を与える。

第 3 章では、産業連関表(Input-output table:IO)を用いた食料品部門のエネルギー・環境負荷分析について農・水・畜産業に焦点をあてて分析する。3.1 では研究の背景と分析対象について述べる。3.2 では食料品部門の分析方法について説明し、3.3 は食料品部門のデータ整備と食料品部門全体の分析結果について述べる。3.4 からは農・水・畜産業 3 部門について品目別にエネルギー・環境負荷を推計する。3.5 では当章の結論を述べる。

第 4 章では、地域レベルでの農作物の生産と、輸送に伴い発生する CO₂ 排出量について評価する。4.1 では研究の背景について述べる。4.2 では研究の手法について説明し、生産プロセス・輸送プロセスの CO₂ 排出量推計方法、生産・輸送に伴う CO₂ 排出量推計の方法についてそれぞれ説明する。4.3 では生産プロセスの CO₂ 排出原単位と CO₂ 排出量、および輸送プロセスの CO₂ 排出量と生産・輸送に伴う CO₂ 排出量について推計結果を示す。4.4 では当章の結論について述べる。

第 5 章では、キュボラと誘導炉の経済性と環境性の分析について述べる。5.1 で研究の背景と目的について述べる。5.2 にて研究方法として分析範囲を説明した後、経済性分析について、前提条件、経済性の比較法、キュボラと誘導炉のコスト分岐点算定法について説明する。続いて環境性分析について、ハイブリッド LCI 法、中間財の CO₂ 負荷分析法、環境負荷分析用データについて説明する。5.3 では経済性と環境性の分析結果について述べる。環境性分析結果では設備製造時・運用時における CO₂ 発生量、および鋳鍛造品最終財・中間財についての CO₂ 負荷と間接影響の分析結果について述べる。5.4 にて当章の結論を述べる。

第 6 章では、エネルギー分析における変動因子係数を用いたインベントリ分析の提案および検証について述べる。6.1 で研究の背景と目的について述べる。6.2 にて関連手法および本研究の意義を示す。6.3 にて変動因子係数法の基本的考え方を提示し、提案法を定式化する。そして提案法の実装方法と変動因子の反映方法について示す。6.4 にて延長表・簡易表との比較を通して提案法を検証する。2005 年度の IO の基本表・同年度のエネルギーバランス表から得られた直接・間接のエネルギー消費原単位を確定値と定義し、提案法・延長表・簡易表それぞれから得られた同原単位との相対誤差率を求め、全体の傾向、直接エネルギー消費原単位予測時における傾向、各方法の順位の組み合わせにおける傾向、相対誤差率の傾向について分析と評価を行う。6.5 ではケーススタディとして鋳鍛造品部門を対象に本章で提案した変動因子係数法の有効性を確認する。6.6

にて本章の結論を述べる。

第7章では、結言として本研究の成果をまとめる。7.1では本論文の結論を述べ、7.2では問題点と今後の課題について示す。7.3で今後の展望を述べる。

参考文献

- [Brzeziński 1990] Zbigniew Kazimierz Brzeziński. Grand Failure: The Birth and Death of Communism in the Twentieth Century. Collier Books, 304p. 1990
- [Douglas1995]Carroll, J. Douglas, and Paul E. Green. "Guest editorial: psychometric methods in marketing research: Part I, conjoint analysis." Journal of marketing Research 32.4. 385-391.1995
- [FEPC 2012a]電気事業連合会(FEPC). “電気事業のデータベース(INFOBASE)”. 電気事業連合会(FEPC). <http://www.fepc.or.jp/library/data/infobase/index.html>, (参照 2013-1-15).
- [FEPC2012b]電気事業連合会(FEPC). “その他リリース情報”. 電気事業連合会(FEPC). http://www.fepc.or.jp/about_us/pr/sonota/1217266_1511.html, (参照 2012-12-1).
- [Heijungs 2002]R. Heijungs, Sangwon Suh . The Computational Structure of Life Cycle Assessment . Springer, 256p. 2002
- [IPCC 2007a]IPCC. 地球温暖化第四次レポート—気候変動. 中央法規出版, 288p. 2007年
- [IPCC 2007b]IPCC. Fourth Assessment Report: Climate Change 2007. http://www.ipcc.ch/publications_and_data/ar4/wg3/en/contents.html, (参照 2013-8-23).
- [IPCC 2007c]IPCC. Fourth Assessment Report: Climate Change 2007.Well-to-wheels analysis of technical mitigation options. http://www.ipcc.ch/publications_and_data/ar4/wg3/en/ch5s5-3-1-4.html (参照 2013-8-25).
- [IPSS 2013] 国立社会保障・人口問題研究所(IPSS). “『日本の地域別将来推計人口』”(平成25年3月推計). 国立社会保障・人口問題研究所(IPSS). <http://www.ipss.go.jp/pp-shicyoson/j/shicyoson13/1kouhyo/gaiyo.pdf>, (参照 2013-4-1).
- [JANSI 2013](社)原子力安全推進協会(JANSI). “原子力発電所運転実績”. (社)原子力安全推進協会. <http://www.gengikyo.jp/db/fm/plantstatus.php?x=y>, (参照 2013-2-1).
- [Kaya 1989]Kaya,Y " Impact of Carbon Dioxide Emission Control on GNP Growth."the IPCC/RSWG,Energy and hdustry Subgroup,Geneva May 8,1989
- [O'Neill 2001]Jim O'Neill. Global Economics Paper, 66. 2001
- [Suh 2005] Sangwon Suh and Gjalt Huppes. "Methods for Life Cycle Inventory of a product". Journal of Cleaner Production13.7,687-697. 2005

- [Suh 2007]Sangwon Suh and Reinout Heijungs. "Power series expansion and structural analysis for life cycle assessment." *The International Journal of Life Cycle Assessment* 12.6. 381-390. 2007
- [Thejll 2000]P Thejll, K Lassen. " Solar forcing of the Northern hemisphere land air temperature: New data Original Research Article". *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 62.13,1207-1213, 2000
- [UNITED NATIONS 1998] UNITED NATIONS."KYOTO PROTOCOL TO THE UNITED NATIONS FRAMEWORK CONVENTION ON CLIMATE CHANGE".
<http://unfccc.int/resource/docs/convkp/kpeng.pdf>(参照 2012-3-1).
- [WCED 1987]World Commission on Environment and Deve . *Our Common Future*. Oxford University Press, 1987, 400p.
- [伊坪 2007]伊坪徳宏, 田原聖隆, 成田暢彦. *LCA 概論: LCA シリーズ 第 1 分冊*. 産業環境管理協会 , 305p. 2007 年
- [稲葉 2012]稲葉敦. *カーボンフットプリント: LCA 評価手法でつくる, 製品別「CO₂排出量見える化」のしくみ*. 工業調査会 , 185p. 2009 年
- [内山 2006]内山洋司. *エネルギー工学と社会 改訂新版*. 放送大学教育振興会 , 518p. 2006 年
- [大北 1972]Donella H. Meadows Dennis I. Meadows, Jorgen Randers, William W. Behrens III:. *成長の限界: ローマ・クラブ 人類の危機レポート*. 大北佐武郎訳. ダイヤモンド社, 203p. 1972 年
- [大野 2000]大野 栄治. *環境経済評価の実務*. 勁草書房, 182p. 2000 年
- [河村 2010] 河村武,岩城秀男.*環境科学 I*,朝倉書店, 328p. 2010 年
- [茅 1980]茅陽一. *エネルギー・アナリシス: —エネルギーからみた社会経済活動の計量分析*. 電力新報社, 294p. 1980 年
- [茅 1992]Donella H. Meadows, Jorgen Randers, Dennis L. Meadows. *限界を超えて : 生きるための選択*. 茅 陽一, 松橋 隆治,村井 昌子訳. ダイヤモンド社, 376p. 1992 年
- [茅 2008]茅陽一,秋元圭吾,永田豊. *低炭素エコノミー*. 日本経済新聞出版社, 228p. 2008 年
- [茅 2009]茅 陽一. *CO₂ 削減はどこまで可能か: —温暖化ガス-25%の検証*. エネルギーフォーラム , 283p. 2009 年
- [環境省 2013a]環境省. 環境省. “1 低炭素社会の構築”. 平成 24 年版 環境・循環型社会・生物多様性白書. 日経印刷, p.122-127. 2013 年
- [環境省 2013b]環境省. 環境省. “ 気候変動枠組条約の究極的な目標の達成に資する科学的知見の収集等”. 日経印刷, p.128. 2013 年
 平成 24 年版 環境・循環型社会・生物多様性白書. 日経印刷, p.122-138. 2013 年
- [環境省 2013c]環境省. “2011 年度(平成 23 年度)の温室効果ガス排出量(確定値)について”. 発表資料. <http://www.env.go.jp/press/press.php?serial=16547>, (参照 2013-4-12).

[産業研究所 2007] (財)産業研究所. "鋳物用原材料問題への対応に関する調査研究・同参考資料 高周波誘導炉操業の現状." 62p.2007 年

[芹沢 1992]Buckminster Fuller. 宇宙船地球号. 芹沢高志訳. 筑摩書房 , 210p. 2000 年

[西井 1987]西井正弘. 地球環境条約. 有斐閣 , 482p. 2005 年

[八田 2012]八田達夫・田中誠. 電力自由化の経済学: RIETI 経済政策分析シリーズ 8 . 東洋経済新報社 , 367p. 2004 年

[未踏科学技術協会 1995] 未踏科学技術協会・エコマテリアル研究会. LCA(ライフサイクルアセスメント)のすべて—環境への負荷を評価する. 工業出版会, 161p. 1995 年

第 2 章 LCI の概要と先行研究

本章では、現在の社会状況と照らし合わせた上で、過去の先行研究の問題点と課題に着目しつつ整理し、本研究の学術的位置付けを明確化する。2.1 では、本章の背景について述べ、2.2 にて分析法の基礎と範囲を示す。2.3 では LCI の各分析法、特に本研究の基礎をなす IOA の理論とその課題、および本研究の特徴について示す。2.4 では IOA を発展させたハイブリッド法の理論とダブルカウンティング問題を示し、海外の先行研究を概説する。2.5 では LCI の事例研究について概観し、2.6 で本章のまとめを述べるとともに、それに基づき以後の本論文各章への道標を与える。

2.1 はじめに

第 1 章で取り上げたように、地球規模の環境問題として、温暖化問題が重要視されはじめた 1980 年代から、CO₂ 削減に向けた研究が進捗してきた。2000 年代、特に後半以降は CO₂ 排出量削減・回収等の研究[下田 2009]、規制やインセンティブのあり方により、技術開発を促進させる研究[有村 2011]、解析や予測に資するモデル研究・分析[村田 2009] [李 2009]等が急速に進んできた。CO₂ 問題と表裏をなすエネルギー問題に関しても、脱化石燃料化という命題のもと、発電技術の効率化の研究[大島 2010]、太陽光発電[岡島 2009] [岡島 2010] [田村 2010]やバイオマス[山地 2007] [佐務田 2011]といった再生可能エネルギーに関する研究、省エネルギーの分析[桑原 2009]も数多く行われてきた。1980 年代から一連の研究が進展する一方で、LCA は諸研究テーマに関わる分析・評価といった点から注目され、活用されるようになっていった。LCA のソフトウェアやデータベースも次々に構築が進み[日本太陽エネルギー学会 2008]、LCA 研究者、実践者が増加してきている。手法自体の研究や事例研究も多数行われるようになり、今もなお蓄積が進んでいる。

2.2 分析法の基礎と範囲

本論文における主たる分析手法は、ライフサイクル CO₂ 分析ならびにライフサイクルエネルギー分析である。前章で記した通り、製品の一生涯、「揺り籠から墓場まで」すなわち資源の採取から製造、使用、輸送、リサイクル、廃棄を含めた全ての段階に亘る CO₂ 排出量を分析・定量化する手法がライフサイクル CO₂ である。同様に、製品が資源状態から製造され、輸送され、使用を経て、廃棄またはリサイクルされる全ての段階を通して投入されるエネルギー量を分析・定量化することをライフサイクルエネルギーと呼ぶ。

ここで留意しなくてはならないことは、分析対象によって、ライフサイクルステージが異なることである。例えば本論文第 3 章で取り上げる農・水・畜産物においては、使用段階・リサイクル段階が基本的に存在しない。電力系統(電力システム)等も同様である。よってこれらを分析する

際には必然的にシステム境界から当該段階は除外される。また分析目的により、使用以降の段階をシステム境界内に含めない場合もある。企業において家電製品の CO₂・エネルギー分析を行う場合、使用以降の段階は企業の手から製品が離れるため、そこまで分析を留めたい場合などである。例えば家電製品等の「揺り籠から墓場まで」のライフサイクル全段階の CO₂ 負荷総計結果は個々のユーザーの使用状況によって全く異なる。このような場合、製品のライフサイクル全段階の負荷を推計するにはユーザーの使用パターンを仮想的に想定してシナリオ化し、ライフサイクル CO₂ を定量化せざるを得ないが、企業の守備範囲として製品が消費者の手元まで届く段階までをシステム境界内として設定する場合も少なくない。このように製品がユーザーに届くまでを分析範囲とする方法は「揺り籠から墓場まで」(Cradle-to-grave analysis) に対して「揺り籠から出口まで」(Cradle-to-gate analysis) と呼ばれる[Heijungs2002]。本論文第 5 章で取り上げる鋳鍛造品は基本的に中間財であり、製造者の元を離れた後、各種工作機械や自動車部品等として加工されていくケースが大半であるため、「揺り籠から出口まで」の分析に留めている。

以上、分析方法と分析範囲について述べたが、ライフサイクル CO₂ もライフサイクルエネルギーも、定量化対象の負荷の種類が異なるだけで LCA の中では LCI のフェーズにほぼ相当する。本論文における分析は LCA における LCI 段階までを対象とする。次項以降では分析手法としての LCI について詳細を記す。

2.2.1 LCA と LCI

LCA の 4 段階(1)目的と範囲の設定、(2)インベントリ分析、(3)影響評価、(4)解釈において、インベントリ分析(Life Cycle Inventory Analysis: LCI)は中心的位置を占めている。LCI の結果次第で影響評価については解釈の結果も変わるためである。無論、前章で述べた通り、LCA の実践においては、この 4 段階が(1)目的と範囲→(2)LCI→(3)影響評価→(4)解釈といった一方向に向かってのみ実施されるとは必ずしも限らない。しかし、LCI 結果の情報が、影響評価段階で入力される基礎的情報となる以上、影響評価は LCI に規定されるため、LCI が LCA において中核であることには変わりがない。

2.2.2 LCI の方向性と分類

本研究では LCA における LCI の方向性は、時系列型 LCI と系列横断型 LCI に大別されるという前提を置く。時系列型 LCI とは同一製品に対し、その製品の環境負荷の時間的な比較に用いられる LCI である。例えば企業における設計担当部門の者が、新製品と旧製品とのライフサイクルにおける CO₂ 負荷を時系列的に比較する場合などがこれに相当する。これに対し、系列横断型 LCI とは、第三者が複数の製品や生産物に対し、横並比的に環境負荷を比較する LCI である。例えば農産物の場合、みかんとりんごの CO₂ 負荷の比較、温室栽培のいちごと地取りのいちごのエネルギー負荷の比較などがこれに相当する。すなわち時系列型とは時間軸に沿った解析であり、系列横断型とは同一時間軸における別系統の財を解析する。この 2 分類を統計分析におけるデータ系列に当てはめれば、時系列型は同一種類のデータを各時点で観測する時系列に、系列横断型は同一時点での様々なデータを比較する交差系

列に対応する[Wooldridge 2010]. 製品間の系列横断的な比較は, 社会に膨大な量の商品情報が流通する中で, 既に直接間接に日常の中で行われていると推察される. 低炭素社会構築の対策を突き詰めていくと, いずれかの局面でどうしても製品間の比較に突き当たらざるを得ない. 今後は明確な目的意識を持って基準や前提, 分析手法を極力統一化した系列横断型 LCI を構築していくことに傾注していくべきと考える. 中島も指摘するように LCI は比較ツールとして機能することが社会的ニーズにもより合致すると推察されるため[中島 2004], 本論文では系列横断型 LCI を志向している.

次に方法論の分類であるが LCI の手法は大別して, プロセス法と産業連関分析法(input-output analysis: IOA)の2方法がある. また, 第3の手法としてこれら2方法の長所を組み合わせることを意図したハイブリッド法がある[Heijungs2002]. 本研究では一貫して第3の手法であるハイブリッド法を LCI の分析法として採用している. 次項からは, 順を追ってこれらの手法について俯瞰する.

2.3 LCI の各分析法

2.3.1 プロセス法

プロセス法(Process analysis)は分析対象のライフサイクルに沿ってプロセスごとに LCI データを収集し, それに基づきボトムアップ式に環境負荷を推計する手法である. プロセス法には積み上げ法と, マトリックス法の2種類がある[Suh 2005].

2.3.2 積み上げ法

最初に積み上げ法であるが, 国際標準化機構(ISO 14040 シリーズ)が示し, 多くの文献で指摘されているように, 最も広く普及した一般的な方法である[Fava 1991] [Memorial 1994]. プロセス・フロー・ダイアグラム(Process flow diagram)法とも呼ばれ[Suh 2005], 市販されている LCA ソフトウェア¹⁵の多くも, この方法を基盤としている[内山 1998]. 積み上げ法はひとつひとつのプロセスや素材に対してその環境影響をボトムアップ式に積算しながら行う基礎的手法である. 製造時の要素 l , 利用時の要素 m , 廃棄・リサイクル時の要素 n からなる製品の積み上げ法による環境負荷の総和 EP は, (2.1)式のように個々の要素の物理量に環境負荷原単位を乗じて求められる.

$$EP = \sum_i^l mp_i \cdot em_i + \sum_j^m mc_j \cdot ec_j + \sum_k^n mr_k \cdot er_k \quad (2.1)$$

mp_i : 製造時における i 要素の物理量, em_i : 製造時における i 要素の環境負荷原単位, mc_j : 利用時における j 要素の物理量, ec_j : 利用時における j 要素の環境負荷原単位, mr_k : 廃棄・リサイクル時における k 要素の物理量, er_k : 廃棄・リサイクル時における k 要素の環境負荷原単位

¹⁵積み上げ法による代表的なソフトウェアの例として, SimaPro(Pre コンサルタンツ社)等を挙げることができる.

通常積み上げ法においては、最初に機能単位¹⁶を定めると同時に分析対象のライフサイクルフロー図を作成し、システム境界を決定する[伊坪 2007]。ライフサイクルフロー図においては、対象財のライフサイクルにおけるプロセスがツリー状に記述される。実際のデータ収集作業は、ライフサイクルフロー図に基づきデータ収集を行いながら、逆にこのライフサイクルフロー図を必要に応じて随時、加除修正し、再度データを収集するといった作業の繰り返しになる。データ収集終了後、環境負荷をライフサイクルステージごとに集計し、最後に積算した値が対象財の求める環境負荷値となる。

積み上げ法によるLCA研究は極めて多いが、日本における広範な積み上げ法による代表的な研究報告例として、(社)資源協会による家庭におけるライフサイクルエネルギーについての定量化が挙げられる[資源協会1992]。同研究報告においては、住宅(4種類)、家庭用機器・器具(30種類)、自動車(1種類)、農産物(105種類)、水産物(10種類)・畜産物(8種類)、繊維製品(13種類)等の家庭生活で使用される製品等について、ライフサイクルエネルギーの定量化を積み上げ法により行っている。この研究報告はそれぞれの製品の生産プロセスを熟知した専門家集団による徹底的な調査に基づく積み上げ法による緻密な研究報告例である。しかし方法論上、必ずしも間接影響までは把握しきれていない点が課題である。

積み上げ法は全ての LCI の基礎であり、対象として定めた製品の詳細な環境負荷をプロセスごとに定量化することができる。その一方で、データ収集に多大な時間と労力を要するため、それに耐えうる一定の組織力が必要になる。企業が自社製品の LCI を行う場合は、データ収集は比較的容易であるが、その場合でも一社で把握できるプロセスには限りがあるため、ライフサイクル全体のデータ収集は必ずしも容易ではない。データ品質も調査者により様ではない。サービス部門をはじめとした間接的な負荷の把握は特に困難である。全プロセスを完全に網羅するデータ収集は事実上不可能であるため、積み上げ法の LCI 実施に当たっては、時間・マンパワー等の負担と、データ欠損を覚悟しなくてはならない。

2.3.3 マトリックス法

マトリックス法(Matrix method)はプロセス法的一种であり、収集したプロセスデータを全て行列¹⁷形式で整理・記述した上で環境負荷ベクトルとプロセスの逆行列を掛け合わせて環境負荷を導き出す手法である。マトリックス法はマトリックス反転法(Matrix inversion method)として Heijungs によって開発された[Heijungs 1994]。2000 年代から徐々に研究や応用が進み、Raymond et al.によるライフサイクルモデル研究はその一つとして挙げられる[Raymond 2008]。

Raymond によれば環境負荷や天然資源排出量ベクトル g は次の式(2.2)と式(2.3)から導出することができる。

¹⁶ LCA において評価する財・サービスの機能を定量化する単位

¹⁷ 以後、本論文では行列とマトリックスを同義として扱う。

$$As=f \quad (2.2)$$

$$g=BA^{-1}f \quad (2.3)$$

A : 技術マトリックス, s : プロセス活動量ベクトル, f : システムの機能ベクトル,
 g : 天然資源利用・環境負荷排出ベクトル, B : 干渉マトリックス

上述の式においてマトリックス A はマテリアルのフローを示している。 A の列はプロセスを示し、行はエネルギーや物質、製品やサービスなどを示す。ベクトル s の要素は対応するプロセスの活動量を示す値である。マトリックス B の列はプロセスを示し、行は環境へ影響を与える物質を示す。

マトリックス法は各プロセス間に反復するループがある場合、威力を発揮する。 Myung et al. は LCA に対応する ISO 基準(この場合, 14040, 14041 および 14049)は、「過去のプロセスに戻る, あるいは再循環するプロセスのある産業」の状況を考慮に入れていないことを明らかにした上で、石油化学産業を例にマトリックス法の LCI への適用を提案している[Myung 2003]。 Heijungs et al. は、マトリックス法の LCI には、 Myung et al. が用いたプロセスバランスに基づく方法(1 ユニットプロセスあたり 1 変数, 1 生産物あたり 1 変数)と、生産物バランスに基づく方法(1 生産物あたり 1 方程式, 1 ユニットプロセスあたり 1 変数)の 2 方法があるとした上で、これら比較検討を行っている[Heijungs 2006]。 Heijungs et al. はまた、マトリックス法の応用分野として、配分とカットオフ(cut off)¹⁸の処理[Heijungs 1998]、プロセス法ベースの LCI を産業連関表に接続する方法[Suh 2005]、システムのフィードバック構造を分析する方法[Suh 2007]、感応度係数を計算する方法 [Heijungs 1994]等を挙げ、特に感応度係数計算と不確実性分析が時間コスト上、合理化されることを指摘している[Heijungs 2010]。

同じプロセス法である積み上げ法による積算では、プロセス間に複雑なループがある場合、環境負荷の推計は必ずしも容易ではないが、マトリックス法ではこのような場合にもプロセスデータをマトリックス化することにより整合的に環境負荷を求めることが可能である。マトリックス法を用いた環境負荷分析としては代表的なものとして角鹿らによる製油所副生水素製造に関わるCO₂排出量の定量化等を挙げる事ができる[角鹿 2011] [角鹿 2012]。

本方法は整合的に環境負荷を求めることができる反面、収集したプロセスデータを整理しマトリックスを構築化する緻密な作業が必要になる。更に分析対象のシステム境界が広くなれば成る程、マトリックス構築は困難を極めるという問題を孕む。角鹿ら[角鹿 2011] [角鹿 2012]の研究においてもプロセスデータの収集およびマトリックス構築に時間を費やしており、システム境界は基本的に製油所内に留まっている。

マトリックス法を使用したLCIはデータの行列化に習熟した分析者が実施するに留まり、積み上げ法に比べて分析財が限定され普及も遅れていた。しかし盧らのマトリックス構築方法の

¹⁸環境負荷の定量化において大きな影響を及ぼさないとして、一定の基準以下のものは算定を行わなくてもよいとする取扱いを指す。

一般化と汎用システムの開発[盧 2006], 福原らのグラフ理論を用いたマトリックス構築法の定式化[福原 2011]等により一般化が進み, ソフトウェア¹⁹も開発されるなど普及が進みつつある。マトリックス法は方法論や応用研究が進展する一方で, データ収集に関わる作業負荷と, データ欠損, 品質面での不確実性等, プロセス法自体がもつ課題を引き継いでおり, 分析法としての今後の一層の発展が期待されている。

2.3.4 産業連関分析法

産業連関分析法は, 旧ソビエト連邦出身のアメリカの経済学者 W. Leontief によって開発された経済分析理論である。現代の各産業は, 相互に関連しながら生産活動を営んでおり, その相互依存関係は極めて複雑であるが, 産業連関分析法は, 特定の産業の活動が他産業に及ぼす生産波及効果(repercussion effect of production)を定量的に算出することが可能である。すなわちある産業部門の最終需要(final demand)が与えられた場合に, 各産業間の生産波及過程を通じ, 最終的に産業全体に対しどの程度影響を与えるかを, 具体的数値で示すことができる。この功績により Leontief はノーベル経済学賞を受賞している。産業連関分析法の基礎データとなる産業連関表は Leontief によれば, 「各産業が中間産業生産物の製造と消費を通じて相互に関係している仕組みを, 産業間の金融取引の流れで示したものとされ, 一国の経済取引における部門間の投入と産出を行列形式で表示した表である」[Leontief 1936]。

産業連関表の基本的な考え方は 18 世紀のフランスの医師であり重農派経済学者でもあった F. Quesnay にまで遡ることができる。Quesnay は 3 つの経済主体に分かれた一国経済を, 財と貨幣の交換からなる体系としてとらえ, 循環・再生産の構造を視覚化した経済表(Tableau Economique)を作成した[吉原 1960]。Quesnay の研究は K.Marx に受け継がれ, 再生産表式(Reproduction Schema) [Carr 1934] として構築されることになるが, Leontief はこの再生産表式から産業連関分析法の構想を得たとされる[Leontief 1937] [Leontief 1938]。産業連関分析の理論的バックグラウンドとしては, 近代経済学の祖の一人とされる L.Walras による一般均衡理論(Theory of General Equilibrium) がある[宇沢 1986] [小谷 1987]。これは相互に依存する経済現象を連立方程式の体系として集約するもので, 産業連関表は一般均衡理論を体現した統計表である。産業連関分析法が適用できる経済分析として, 例えば国民経済の構造分析, 公共投資や減税などによる政策シミュレーション, 公共料金上昇による価格波及分析などを挙げるができる。

2.3.5 産業連関分析モデルの類型

産業連関分析モデルは輸入財の取り扱いにより「競争輸入型」(competitive import type)および「非競争輸入型」(non-competitive import type)の 2 種類に大別される。競争輸入型は輸入財と国産財を区別しないモデルであり, 非競争輸入型は両者の取引を区別するモデルである。分析へのモデル選択については, 研究目的により各分析者の手に委ねられる。各モデルの詳細は次項 2.3.6 以降を参照されたい。

産業連関分析における競争輸入型モデル・非競争輸入型モデルともに各部門の生産活

¹⁹ マトリックス法を用いたした代表的なソフトウェアの例として, EMLCA を挙げるができる。

動によって直接間接に誘発される生産波及効果が推計される。各モデルは後述するレオンチェフの逆行列(Leontief inverse matrix)の型によって分類できる。次項以降で、産業連関分析の各モデルについて分類するが、その需給均衡方程式(Supply and Demand Balance Equation)は次式で表される。

$$X=L \cdot F \tag{2.4}$$

X :国内生産額の列ベクトル, F :最終需要の列ベクトル

ここでいう均衡とは、投入の総和と産出の総和が等しいという条件を表す。上記の式で左辺の F の係数 L をレオンチェフの逆行列という。なおレオンチェフの逆行列の具体的な内容は次項で説明する。以後、各モデルについて俯瞰するが、内容については宮沢[宮沢 2005]および宍戸 [宍戸 2010]を参考にしつつ、先行研究等のレビューを加え論じる。

2.3.6 競争輸入型モデル: $L = (I - A)^{-1}$ 型

あるひとつの産業部門に一定の最終需要が発生した場合に、それが各産業部門に対して直接・間接的にどのような影響を及ぼすのかを分析することが産業連関分析の最も中核的な分析の一つである。

ここで説明を単純にするために、2部門モデルを考える。

表 2-1 競争輸入型産業連関表(competitive import type I-O table)

	部門 1	部門 2	最終需要		輸入	国内生産額
			国内需要	輸出		
部門 1	x_{11}	x_{12}	Y_1	E_1	$-M_1$	X_1
部門 2	x_{21}	x_{22}	Y_2	E_2	$-M_2$	X_2
粗付加価値	V_1	V_2				
国内生産額	X_1	X_2				

産業連関分析における産業別の需給均衡連立方程式は(2.5)式で表わされる。

$$\begin{aligned} a_{11}X_1 + a_{12}X_2 + F_1 &= X_1 \\ a_{21}X_1 + a_{22}X_2 + F_2 &= X_2 \end{aligned} \tag{2.5}$$

ここで a は投入係数(input coefficient)を示す。投入係数は下記式のように定義される。

$$a_{ij} = \frac{x_{ij}}{X_j} \quad (i, j = 1, 2) \tag{2.6}$$

x_{ij} は中間投入額, X_j は部門 j の生産額である。このとき a_{ij} は部門 j が 1 単位生産するために必要となる部門 i からの投入額を示す係数であり、これを投入係数と呼ぶ。投入係数は投入構造を表すことから、生産の技術的關係を表す係数である。

(2.5)式を行列の成分表示で書き改めると、次式となる。

$$\begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} \\ a_{21} & a_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_1 \\ X_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} F_1 \\ F_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X_1 \\ X_2 \end{bmatrix} \quad (2.7)$$

上記の式において、投入係数の行列を \mathbf{A} 、最終需要の列ベクトルを \mathbf{F} 、国内生産額の列ベクトルを \mathbf{X} とおくと、次式が得られる。

$$\mathbf{X} - \mathbf{A}\mathbf{X} = \mathbf{F} \quad (2.8)$$

また上記の式を \mathbf{X} について解き、単位行列 \mathbf{I} を用いることにより次式が得られる。

$$\mathbf{X} = (\mathbf{I} - \mathbf{A})^{-1} \cdot \mathbf{F} \quad (2.9)$$

(2.9)式は産業連関分析モデルの最も基本的なモデル式 $(\mathbf{I} - \mathbf{A})^{-1}$ 型である。この式における $(\mathbf{I} - \mathbf{A})^{-1}$ の成分がレオンチェフの逆行列[宮沢 2005][宍戸 2010]である。その成分は、産業 j の最終需要が 1 単位増加し、他産業部門の最終需要は一定であるとしたとき、部門 i で増加される生産額の量を示している。なおここで示したレオンチェフの逆行列は、輸入を考慮していない。

競争輸入型モデル $(\mathbf{I} - \mathbf{A})^{-1}$ 型の特徴であるが、現状における産業部門構造を把握するのに適している反面、輸入品と国産品を区別しないため、わが国のような輸入比率の高い市場経済を分析するには必ずしも適しているとは言えない。当モデルの適用ケースとしては分析対象財の存在する国の経済構造が国内需要を国産品で殆ど賄っており、輸入がごく少ないある場合、または分析対象財について国内外を問わず全世界における影響を分析する場合が考えられる。水本ら[水本 2012]は太陽光発電システムの CO_2 排出量について、国内・海外など場所を問わず、その総量を把握するため、ライフサイクル CO_2 分析に $(\mathbf{I} - \mathbf{A})^{-1}$ 型モデルを適用している。

2.3.7 競争輸入型モデル: $L = (\mathbf{I} - (\mathbf{I} - \hat{\mathbf{M}})\mathbf{A})^{-1}$ 型

前項の基本モデルでは、輸入を考慮しておらず、最終需要 \mathbf{F} に輸入が包含されている。現実には輸入は国内の生産活動によって規定される。すなわち内生的に決定されるべき性質を持つ。そのため輸入を内生化したモデルが分析上、必要になる。競争輸入型モデル $(\mathbf{I} - (\mathbf{I} - \hat{\mathbf{M}})\mathbf{A})^{-1}$ 型は後述する理由により本研究のベースとして採用するため、他 2 モデルより詳しく説明する。

輸入を内生化した競争輸入型モデルは次のように導出することができる。
部門 i の需給均衡方程式は以下の通り表わされる。

$$\sum_{j=1}^n a_{ij}X_j + F_i^d + E_i = X_i + M_i, \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (2.10)$$

ここで、 a_{ij} は投入係数、 E_i, M_i は*i*部門の輸出および輸入である。なお、在庫変動については最終需要 F_i^d に内包されている。輸入の水準は国内需要に依存すると仮定し、輸入係数 m_i を用いて以下のように表現する。

$$M_i = m_i \left(\sum_{j=1}^n a_{ij}X_j + F_i^d \right) \quad (2.11)$$

(2.11)式を(2.10)式に代入した上で X について整理し行列表示すると、次のモデル式 $(\mathbf{I} - (\mathbf{I} - \hat{\mathbf{M}})\mathbf{A})^{-1}$ 型を得る。

$$\mathbf{X} = [\mathbf{I} - (\mathbf{I} - \hat{\mathbf{M}})\mathbf{A}]^{-1} [(\mathbf{I} - \hat{\mathbf{M}})\mathbf{F}^d + \mathbf{E}] \quad (2.12)$$

ただし $\hat{\mathbf{M}}$ は輸入係数 m_i を主対角要素にとった対角行列である。右辺第二項の $[(\mathbf{I} - \hat{\mathbf{M}})\mathbf{F}^d + \mathbf{E}]$ が国産品に対する最終需要であり、これにレオンチェフの逆行列 $[\mathbf{I} - (\mathbf{I} - \hat{\mathbf{M}})\mathbf{A}]^{-1}$ を左から乗ずることにより、最終需要によって誘発される \mathbf{X} が算出される。

競争輸入型モデル $(\mathbf{I} - (\mathbf{I} - \hat{\mathbf{M}})\mathbf{A})^{-1}$ 型は、輸入比率の高い市場経済において生産波及効果を求める際に適しており、分析に適用されることが最も多いモデルである。このモデルを基礎として用いた研究の代表的な例として本藤ら[本藤 2000]、湯浅ら[湯浅 2005]、塚本ら[塚本 2008]を挙げることができる。またこのモデルを基礎として発展させた分析法が多く存在するのも特徴のひとつである。本モデル適用上の問題点としては最終需要が負値または小さい部門の場合、推計されるエネルギー・環境負荷も負値となる場合がある点である。この問題については、2.3.9で改めて述べる。前出の本藤ら[本藤 2000]をはじめとする研究では、分析対象についてこのような問題が存在しないため、負荷の推計が可能であったが、全ての財がこのモデルで分析できる訳ではない。本論文ではこの問題に対応するため在庫内生型モデルを展開するが、これもまた発展モデルの例である。

競争輸入型モデル $(\mathbf{I} - (\mathbf{I} - \hat{\mathbf{M}})\mathbf{A})^{-1}$ 型においては、輸入係数 $\hat{\mathbf{M}}$ によって輸入がモデルに組み込まれており、次項で述べる非競争型モデル $(\mathbf{I} - \mathbf{A}^d)^{-1}$ 型のように需要部門毎に

輸入係数を決定していない。このことは経済の現状を緻密に描写するという点では必ずしも十分ではないものの、その反面、国産品投入係数 $(\mathbf{I} - \hat{\mathbf{M}})\mathbf{A}$ に対してより高い安定性をもたらす。そのため他 2 モデルに比べると、時系列分析に比較的適している。野村[野村 2007]は、長期時系列 IO, 産業・生産物, 資本投入量, 労働投入量, 人口・世帯, エネルギー等の実証基盤に基づいた多部門一般均衡モデル[黒田 1998]を用い、想定し得る電源構成変化をいくつかのシナリオとして設定し、それに対応した 2030 年までのマクロ経済や CO₂ 排出量予測を行った。同分析においては、エネルギー部門を環境分析用 IO [朝倉 1998]とリンクさせている。また長期にわたる高精度な予測が可能な人口統計²⁰をモデルの外生変数として与えることにより、中長期の予測に伴う不確実性に対処している。野村が用いた多部門一般均衡モデルも、競争輸入型モデル $(\mathbf{I} - (\mathbf{I} - \hat{\mathbf{M}})\mathbf{A})^{-1}$ 型を基礎としている。野村[野村 2007]の用いた分析モデルは類似研究の中でも最も緻密かつ完成度の高い予測モデルの一つである。しかし分析の基盤をなす IO の部門分類が既存の部門数に留まっているため、それより細かい部門や財を分析することは必ずしも容易ではない。

更に、次節で詳しく述べるハイブリッド LCI 法における IOA の多くも競争輸入型モデル $(\mathbf{I} - (\mathbf{I} - \hat{\mathbf{M}})\mathbf{A})^{-1}$ 型をベースとしている。例として内山ら[内山 1998]の理論を挙げることができる。内山は、1990 年代初頭から始まったハイブリッド法理論と IOA・LCA 研究を体系的に集大成した。そして世界初のハイブリッド法による LCA ソフトウェア“Quick LCA”を開発している[内山 1998]。内山らのハイブリッド法では製品の LCI において最も複雑で労力を要する製造部門に着目し、当該部門と間接影響を IOA により分析する。分析においては金額ではなく製品の素材構成をデータとして用いるため、金額ベース LCI 特有の経済価値の高低や変化により算定負荷が不安定になるという問題が生じにくい。使用・廃棄・リサイクル段階はプロセス法で分析するが、製品寿命や修理回数、エネルギー源やリサイクル回数を使用実態に合わせて設定・入力することにより、ライフサイクルに亘っての環境負荷が算定される。同ソフトウェアでは、エネルギー消費、環境負荷(SO_x, NO_x, CO₂)の他に、労働投入量も分析できる点が分析項目上の特筆すべき特徴となっている。LCA ソフトウェア“Quick LCA”における IOA 部分もまた、野村[野村 2007]のモデルと同様に部門分類が既存 IO の部門数に留まっている。そのため、データ欠損や間接影響の把握漏れが生じるプロセス法から IOA の置換が望ましいといった観点からすれば、まだ発展の余地が残されている。内山ら[内山 1998]、野村[野村 2007]の研究と比較しての本研究の特徴は、既存 IO の部門を分解することにより、製品レベルの分析までを可能にした点にある。

本論文では、第 3 章から第 5 章まで特定産業における LCI を行い、第 6 章では産業連関表の時間的遅延への対処および予測も視野に入れた分析法を構築する。よって本論文では一貫して、わが国のような輸入比率の高い市場経済において波及効果を求める際に適した競争輸入型モデル $(\mathbf{I} - (\mathbf{I} - \hat{\mathbf{M}})\mathbf{A})^{-1}$ 型を基礎モデルとして用い、エネルギー・

²⁰ 人口の予測精度は変数が少ないため非常に高い。人口を従属変数とした時、「出生」・「死亡」・「移動」という三つの独立変数により予測される。

環境負荷解析を行う。

2.3.8 非競争輸入型モデル: $L = (\mathbf{I} - \mathbf{A}^d)^{-1}$ 型

2.3.6, 2.3.7 はともに競争輸入型産業連関表から得られるモデルであるが, 本項で示すモデルは非競争輸入型産業連関表により得られるモデルである. 前述の (2.8)式について, 国産分に添え字 d , 輸入分に添え字 m を用いて表現した式を次に示す.

$$\text{国産分: } \mathbf{X} - \mathbf{A}^d \mathbf{X} = \mathbf{F}^d \quad (2.13)$$

$$\text{輸入分: } \mathbf{X} - \mathbf{A}^m \mathbf{X} = \mathbf{F}^m \quad (2.14)$$

ただし

$$\mathbf{A}^d + \mathbf{A}^m = \mathbf{A} \quad (2.15)$$

$$\mathbf{F}^d + \mathbf{F}^m = \mathbf{F} \quad (2.16)$$

上記の国産分の式から下記のモデル式が得られる.

$$\mathbf{X} = (\mathbf{I} - \mathbf{A}^d)^{-1} \mathbf{F}^d \quad (2.17)$$

上に示した非競争輸入型モデル $(\mathbf{I} - \mathbf{A}^d)^{-1}$ 型は, 最終需要 \mathbf{F} において国産と輸入を区別したという点で, 競争輸入型モデル $(\mathbf{I} - (\mathbf{I} - \widehat{\mathbf{M}})\mathbf{A})^{-1}$ 型に概念的に類似したモデルである. 二つのモデルの違いについてであるが, $(\mathbf{I} - (\mathbf{I} - \widehat{\mathbf{M}})\mathbf{A})^{-1}$ 型ではどの需要部門においても国産分と輸入分の割合が一定であるのに対し, $(\mathbf{I} - \mathbf{A}^d)^{-1}$ 型では実際の割合で分割されている点である.

非競争輸入型モデル $(\mathbf{I} - \mathbf{A}^d)^{-1}$ 型の特徴であるが, どの部門においても国産分と輸入分が実際の比率で分割されているため, 国産品投入係数 \mathbf{A}^d を用いて生産波及効果を把握でき, その表の年における経済構造を明確に分析することが可能である. 林ら[林 2007]は, 外国貿易がない閉鎖経済の仮定は, 現実の経済に即していないという問題意識に立ち, 非競争輸入型モデルを取り上げ, 競争輸入型モデルと比較しつつ, 外国貿易が存在する開放経済の分析について, 特に輸入に焦点をあててアプローチしている. しかし, 林らも指摘するように非競争輸入型モデル $(\mathbf{I} - \mathbf{A}^d)^{-1}$ 型における国産品投入係数 \mathbf{A}^d は必ずしも安定的ではない. 国産品と輸入品を分別することが困難な生産物が多数存在し, また生産において国産品を投入するか, 輸入品を投入するかは流動的である

ことが多いためである。本モデルは、表の発行年断面におけるマクロ的な経済分析には適するが、予測や特定産業の分析には適しているとは言い難い。

2.3.9 産業連関分析法による環境負荷分析

前述のモデルの適用例を見てもわかるように産業連関分析法(IOA)は、経済分析だけでなく、経済活動に伴う非貨幣的な諸量の分析にも応用可能であり、その例として CO₂ 排出量分析あるいはエネルギー消費量分析がある。環境分野における LCI もその中の一つである。IOA は、プロセス法とともに、LCI 手法の 2 本柱の一つとして位置づけられる。

前出の(2.4)式における X は、最終需要によって誘発される産出高であるが、これに 1 単位あたりの直接の環境負荷排出量、すなわち環境負荷の金額原単位を成分とする対角行列 $\hat{\epsilon}$ を乗ずれば、最終需要 F によって生じる環境負荷の総量 EV が求められる。(2.4)式と $\hat{\epsilon}$ を用いて EV は次式によって求められる。

$$EV = \hat{\epsilon}X = \hat{\epsilon}LF \quad (2.18)$$

EV は、最終需要 F を満たすために経済全体から究極的に発生する直接・間接の環境負荷である[Raa 1984]。2.3.7 で述べたとおり、ここで留意しなくてはならないことは、最終需要 F が負値または小さい部門の場合、(2.18)式で導出される環境負荷は負値となる場合がある点である。これは数学的には誤りではないが、現実的にはありえない²¹。(2.18) 式自体に問題はないが、分析する部門に負値の部門が出現した場合には、環境負荷の把握と比較が困難となる。この課題については本論文第 3 章と第 4 章にて、IOA の別モデルを適用する。

IOA は 1990 年代の初めに LCI に適用されるようになった。その後アメリカの CMU²²等によるさらに包括的な環境データを用いて、拡大され発展していった[Lave 1995]。LCI における IOA は産業連関表と産業に係る統計資料、環境負荷データを利用して、財の直接・間接の投入エネルギーや環境負荷をトップダウン式に求める方法である。プロセス法に比べて比較的少ない労力で環境負荷を求めることができるうえに、複雑に関連する全産業間の取引関係を網羅しているため、プロセス法では追いつけない他のプロセスや産業にまで遡る間接的な影響を把握することができる。これがこの方法の最大の長所である。前述したプロセス法においてデータ収集上どうしても評価漏れが発生するのに対し、IOA は、レオンチェフの逆行列によって上流工程における環境負荷を理論上はすべて網羅できるため評価もれがない。プロセス法においては下流工程における環境負荷まで詳細に調査する必要があり、また個々の分析者が設定するシステム境界の設定の仕方によって結果が異なる。IOA においては IO において一国の経済取引をすべて網羅しているため、プロセス法のように個々の分析者によるシステム境界の設定の仕方により結果が左右されるという問題は IOA を LCI の分析法として用いる

²¹ この現状は、「ボールを斜め上方に投げたとき、地面に落下するのは何秒後か？」という物理学の問題を数学的に二次方程式の解として求めたとき、その解が 2 個現れ負の解は現実にはあり得ないという現象に類似している。

²² カーネギーメロン大学：Carnegie Mellon University

以上、原則的にない[Hendrickson 1998][Lenzen 2000]。併せて環境負荷の推計に同じIOから得られた環境負荷原単位²³を用いることにより、上流工程の直接間接のエネルギー・環境負荷をもれなく評価できるだけでなく、基礎データおよび品質の共通化が図られ、製品間の比較を容易にする。すなわち2.2.2で述べた系列横断型LCIの展開にIOAは適した性質を備えている。前述した負の最終需要により負の環境負荷が出現した場合の対処法を構築すれば、IOAはより系列横断型LCIに適した手法となりうる。

LCIの範疇を越えて産業連関分析法はエネルギー・環境負荷分析に広く利用されている。R.A.Herendeenは、エネルギー関連部門の物量表示の連関表を作成し、産業連関表と組み合わせた分析モデルを構築している[Herendeen 2004]。日本では地球温暖化問題が地球規模の重要な環境問題であるという認識が広がった1980年代からLCI研究の蓄積が進んできた。代表的なものとしては国立環境研究所の「産業連関表による環境負荷原単位データブック(3EID)」[南齋 2006]、朝倉らによる「環境分析用産業連関表」[朝倉 2001][中野 2008a]などを挙げることができる。

2.3.10 産業連関分析の課題と本研究の特徴

本項でこれまで触れてきたことと併せつつ、IOAに存在する課題をまとめると以下のとおりである。

第1にIOAに主として使用される一国IOは国内で閉じている事である。輸入品を分析する場合は別途、海外の産業連関表が必要になる。輸入依存度の高い財を分析する場合は、この点に留意しなくてはならない。この問題については第7章で改めて触れる。

第2に、IOAによる環境負荷分析においては、最終需要 F が負値または小さい部門の場合、導出される環境負荷は負値となる場合があり、環境負荷の把握と比較が困難となる点である。この課題の解決のために本論文第3章と第4章にて、競争輸入型・輸入内生モデルを発展させた競争輸入型・輸入在庫内生モデルを提示する。

第3に、IOの部門数が限られていることである。Suh et al. は、プロセス法LCAと比較した際、IO-LCAの主な難点は“IO部門が限定されることによる詳細度の低さ”(the low level of detail)、“通貨単位の使用”(use of a monetary unit)、“製品終了フェイズの漏れ”(neglecting phases)および“データの鮮度”(data age)の4点に集約されるとしたが[Suh 2005][Suh 2007]、この問題はSuh et al. の指摘する“詳細度の低さ”に相当する。IOの部門数は多くて数百程度であり、部門がない財はそのままのIOでは分析できず、部門を細分化または新設しなくてはならない。新製品や新技術の多くは、既存のIOに部門がないために、部門を新設する必要がある。IOの部門数が限定されていることはLCIを実施する上で制約となる。この問題の解決のため、水本らはPV(Photo Voltaic)システムのライフサイクル分析を可能とするために既存のIOに太陽光発電部門を新設した[水本 2012]。それに対し、本論文ではIO部門の細分化により製品レベルまで分析することが特徴となっている。先の2.3.7で見たようにこれまでのエネルギー投入量やCO₂負荷の推計が、基本的にはIO分類で表象さ

²³ 1単位あたりの環境負荷物質の排出量を指す。

れる部門までにとどまっているのに対し、本論文第3章と第4章では、IOの部門別推計結果を、プロセス法と組み合わせて、個別農・水・畜産物について推計し 網羅的に生産物を比較することを可能にした。また第5章では既存のIO部門を分解することにより、鋳鍛造品をキュポラ産と誘導炉産のレベルまで特定し、それぞれのCO₂負荷推計を可能としている。

第4に、IOの発行年と分析年の時間的乖離の問題がある。この問題は前述したSuh et al.の指摘する“データの鮮度”の問題に相当する。IOデータには1～5年の時間的遅延があり、IOのデータはプロセス法により収集されるデータよりも古い場合が多い。このようなデータ制約は、IOを用いるLCIにおいて、社会における変化を迅速かつ簡易に分析に反映することを困難にする。“データの鮮度”への対処法の一つとして本論文第6章では変動因子係数法を提案する。

第5にIOにおいてはリサイクル部門が不十分であるということである。この問題は前述したSuh et al.の指摘する“製品終了フェイズの漏れ”と関連する。日本の産業連関表にはリサイクル段階に関連する部門は「再生資源回収・加工処理」の1部門があるのみである。リサイクルのプロセスは製品により大きく異なることから、別途プロセス法など他の方法により分析しなくてはならない。これらの課題を克服への試みが、プロセス法とIOAを組み合わせるハイブリッド法が考案される背景となっている。ハイブリッド法については、次節で改めて述べる。

2.4 ハイブリッド法

2.4.1 ハイブリッド法の理論と特徴

2.3においてプロセス法とIOAについて見たが、それぞれ長所短所がある。ハイブリッド法LCI(以下、ハイブリッド法)はプロセス法とIOAの長所を組み合わせることを意図した方法である。本研究におけるLCIではハイブリッド法を用いている。

ハイブリッド法の分類については、Pei et al.により次の3方法への分類が提起されている。すなわち、加法的ハイブリッド法(additive hybrid)、経済ーバランスハイブリッド法(economic-balance hybrid)、混合ーユニットハイブリッド法(mixed-unit hybrid)への3分類である[Pei 2010]。これらについては後述するがハイブリッド法の体系化と定式化の本格的開始はHeijungs et al.やSuh et al.からであり[Heijungs 2002][Suh 2005]、その後のハイブリッド法研究の基礎となっているため本研究ではその体系に従っている。Suhはハイブリッド法を区分的ハイブリッド分析、IO基盤ハイブリッド分析、統合ハイブリッド分析の3種類に体系化した。以下本節ではハイブリッド法についてSuh et al.による定式化と分類体系を紹介した後、本研究で採用する方法とそれぞれのハイブリッド法の特徴について述べる。

・Suh et al.によるハイブリッド LCI の定式化[Suh 2005]

(i)区分的ハイブリッド分析法(Tiered hybrid analysis)

$$M_{TH} = \tilde{B}\tilde{A}^{-1}\tilde{k} + B(I - A)^{-1}k$$

(ii) IO 基盤ハイブリッド分析法(IO-based hybrid analysis)

$$M_{IOH} = \tilde{B}\tilde{A}^{-1}\tilde{k} + B(I - A')^{-1}k'$$

(iii) 統合ハイブリッド分析法(Integrated hybrid analysis)

$$M_{IH} = B_{IH}A_{IH}^{-1} \begin{bmatrix} \tilde{B} & 0 \\ 0 & B \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \tilde{A} & Y \\ X & I - A \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \tilde{k} \\ 0 \end{bmatrix}$$

M: 直接/間接の環境介入マトリックス全体

\tilde{B} : プロセスベース部分の環境マトリックス

\tilde{A} : プロセスベース部分の技術マトリックス

\tilde{k} : プロセスベース部分の任意の最終需要ベクトル

B: IO ベース部分の環境マトリックス

A: IO ベース部分の技術マトリックス

k: IO ベース部分の任意の最終需要ベクトル

A': 拡張した IO ベース部分の技術マトリックス

k': 拡張した IO ベース部分の任意の最終需要ベクトル

X: LCA システムへの上流カットオフフロー

Y: IO システムの下流カットオフフロー

・Suh et al. によるハイブリッド LCI の分類体系[Suh 2005]

(i) 区分的ハイブリッド分析法(Tiered hybrid analysis)

区分的ハイブリッド分析法は、利用・廃棄段階、およびいくつかの重要な上流工程に関してはプロセス法の分析を利用し、残りは IOA により分析する。この方法は、IOA をプロセス法による LCI 結果に取り入れるだけで実行可能であり、ほぼ完全な LCI 結果を比較的速やかに得ることができる。しかしプロセス法と IOA の境界は、注意深く定める必要がある。また区分的ハイブリッド分析では LCI 推計値についてプロセス法と IOA のダブルカウンティング(Double counting)に留意しなくてはならない。原則的に、プロセス法の財の流れはすでに IO に含まれているため IO 部分からの除外が行われる。

(ii) IO 基盤ハイブリッド分析法(IO-based hybrid analysis)

IO ベースのハイブリッド法では、産業部門を分解して IO 表を作成する。環境介入マトリックスも分解する必要がある、これは分解工程の詳細なデータを用いて行う。消費前の段階までの LCI は、IOA 法を用いて算定する。利用と廃棄を含めた製品寿命の残りの段階に関する LCI は、区分的ハイブリッド分析法を適用する。

(iii) 統合ハイブリッド分析法(Integrated hybrid analysis)

統合ハイブリッド分析では、素材の流れの主要部分はプロセス法基盤で表わされている。そしてそれ以外の切捨て部分は IO システムにリンクされる。流れは、区分的ハイブリッド分析法が IOA→プロセス法へという方向なのに対し、統合ハイブリッド分析では IOA⇄プロセス法

いう双方向である。統合ハイブリッド分析は、完全なプロセス法に依拠しており、IO ベースの LCI をカットオフのみに利用している。

以上、3 方法について概観した。以下に 3 方法の LCI 適用上の特質について述べる。

区分的ハイブリッド分析法であるが、既存の研究の多くがこの手法に当てはまる。本論文でも基本的にこの方法を用いている。区分的ハイブリッド分析法は既存の IO をほぼそのまま利用できるため、Suh も指摘したようにほぼ完全な LCI 結果を比較的速やかに得ることができる。後述するダブルカウンティングの回避という課題がありながらもこの方法を本研究で用いる理由はここにある。区分的ハイブリッド分析実施の際に、障害となる IOA とプロセス法のダブルカウンティングの問題については 先行研究とともに後述する。区分的ハイブリッド分析法におけるプロセス法で推計する部分については、2.3.2、2.3.3 で指摘したようなプロセス法のもつ欠点がそのまま受け継がれる。

IO 基盤ハイブリッド分析は IO の分解が必要であるが、この分解の成否が LCI の結果を左右する。IO においてはたとえ一産業部門の拡張・細分化であっても他部門に二次的・三次的と連鎖的に波及していき、結果的には表全体が変化するため、分解を誤ると区分的ハイブリッド分析よりも大きな誤差発生に繋がりがかねない点に留意しなくてはならない。また、分解の根拠となる詳細な金額的データが必要になるため、そのデータ収集が鍵を握っているのはプロセス法と同様である。この方法でも使用・廃棄・リサイクル段階はプロセス法によるため、区分的ハイブリッド分析と同じく、プロセス法のもつ欠点がそのまま受け継がれる。

統合ハイブリッド分析は、理論上は最も正確に環境負荷を解析できる方法である。Suh 自身により、IOA と LCA を統合するための方法として、二つの計算構造を完全に統合するフレームワークが完成されている[Suh 2004]。統合ハイブリッド分析は、カットオフ部分のみを IO に接続するため、プロセス法によるデータ収集に成否がかかっている。3 種類のハイブリッド法を比較して、統合ハイブリッド分析は他のハイブリッド法よりも精度が高い結果が得られると Suh も分析しており、時間とコストに制約がない場合は手法選択上、迷う必要はないとしている[Suh 2005]。しかし時間とコストの制約が全くないということと、完全なプロセス法分析が行われる事はごく稀と考えられるため、ハイブリッド法を用いる場合、現実的には区分的ハイブリッド分析か IO 基盤ハイブリッド分析を選択することが多くなると推察される。

ハイブリッド法はプロセス法の長所である解析対象の環境負荷をプロセスごとに掘り下げて詳細に把握できるという利点を生かすことができる。また IOA を取り入れることで、プロセス法では追いきれない間接影響を原理的には全て把握できる。系列横断型 LCI 志向を志向するのであれば IO 法の利用は欠かすことができない。本研究の分析法としてハイブリッド法を用いる理由はここにある。

2.4.2 ダブルカウンティングの問題

ハイブリッド法の中で多用される区分的ハイブリッド分析法ではダブルカウンティング(Double counting)の回避処理が極めて重要になる。重複した負荷を適切に処理しない限り環境負荷を過大に評価することになるため、説得力のある LCI 結果は得られない。本論文の第 5

章でも、現地調査によるプロセス法推計による負荷と IOA 推計による負荷との重複回避を行う。区分的ハイブリッド分析法におけるダブルカウンティング回避について、主な先行研究を下記に挙げる。

Strømman et al. は区分的ハイブリッド分析法において不可避であるダブルカウンティング回避する方法を体系化している[Strømman 2009]。Strømman et al.によれば、プロセス法による鉄鋼投入の値に等しい鉄鋼製副産物を生成すると記述し IO 部門の重複を調整する副産物訂正法によってダブルカウンティングは回避できるが、詳細な LCI への適用には限界があるとして購入訂正法アルゴリズムを開発している。加圧容器を例にとした説明によれば、最終需要がプロセスツリー(生産樹)の頂点に置かれ、その最終需要が加圧容器の製造をノード a として要求する。ノード a の背後にはノード a と繋がる上流の b,c といったノードがあり、更に上流には b,c と繋がる,d,e,f,g というノードがある。これらのノード間を線分で結び、購入経路と見立てることにより、構造経路分析(Structural path-analysis)[Defourny1984]に基づくアルゴリズムを構築することが可能となる。構築されたアルゴリズムはダブルカウンティングの原因となる材料・エネルギー・その他の商品の経路に関する情報を識別し保存する。これは混合インベントリダブルカウンティング識別(Hybrid Inventory Double-Counting Identification(HIDCI))と呼ばれ、このアルゴリズム実行により LCI のダブルカウンティングが除去される仕組みとなっている。

Rowley et al. は、プロセス法とIOAをオーストラリアの水産業を対象として、比較・検討した[Rowley 2009]。そして両方法の欠点を補う手法として区分的ハイブリッド分析法を挙げている。Rowley et al.によれば、プロセスデータの物価を最終需要ベクトルの当該要素から除去し、IOA を実行することでダブルカウンティングを回避できるが、物価データが入手できないことも多く、必ずしも利用できないなどの問題点がある。そのため、「システム不完全要因」を推計し、プロセス分析と重複しているIOAの低次の環境負荷を削除することによるダブルカウンティング回避法を提案した。この回避法を用いた区分的ハイブリッド分析法を「Develop a hybrid LCA model」とし、シドニーの一般家庭、産業、商業施設に対する下水道サービスに当分析法を適用している。

2.4.3 海外におけるハイブリッド法の先行研究

2.4.1 では Suh et al.によるハイブリッド法の分類と定式化[Suh 2005]、併せて筆者によるレビューを行った。また2.4.2では区分的ハイブリッド法におけるダブルカウンティング回避を取り上げ、関連先行研究について述べた。本項では海外の先行研究について述べる。

ハイブリッド LCI を用いた研究として、Treloar et al.による道路建設プロジェクトの区分的ハイブリッド LCA がある[Treloar 2004]。同研究では LCA のデータ欠損問題や高いデータ費用の問題は、IO に基づくハイブリッド法を用いることで克服できるとした。Treloar et al.はオーストラリア統計局(ABS)の IO により IOA モデルを構築後、分析対象部門の最も重要な経路を抽出して、データを収集しプロセス法によりエネルギー投入量を推計した。それを IOA による推計と最後に統合している。

Heinonen et al. は都市における CO₂ 負荷の分析にあたり、CMU の EIO- LCA モデル[CMU

2008]を使用した区分的ハイブリッド分析を行っている[Heinonen 2011]. 上流段階でも上位にあるものの排出量については IOA を行い、直接排出と最も重要な上流段階についてはプロセス分析を行っている. プロセスデータはフィンランド消費者調査等を利用している. 分析の結果, 4 部門(住宅部門, ビル・建物部門, ビル維持管理部門および交通部門)が CO₂ 排出量において, 3分の2を占めていること, 人口密度の低い郊外の CO₂ 排出量が人口密集のダウンタウンより小さいという結果等, 区分的ハイブリッド分析により大都市圏における CO₂ 負荷構造が明らかにした.

Mattila et al. は, パルプ製紙工場を中心とする相互に関連する 5 つの産業設備を対象に, 区分的ハイブリッド LCI と影響評価を行っている[Mattila 2010]. 分析対象の環境負荷は栄養素, 重金属, 温暖化ガス, 懸濁物質, 窒素と硫酸化合物, ダイオキシンとフロン, 多環芳香族炭化水素, 殺虫剤等である. IOA では, フィンランドの環境的に拡張された IO による環境乗数を用いて共生のサプライチェーンからの排出を定量化した. プロセス LCA に描かれている原材料とエネルギーの流れは経済分野からの貨幣による購入に変換され, 対応する排出乗数を用いて加重されている. プロセス法 LCA で明らかにされた投入に加えて, IO を用いて, サービスやメンテナンスなど先に無視されたフローを含め分析している.

Crawford は IO 基盤ハイブリッド分析を評価することを主目的に, 7 例の LCI ケーススタディを行った[Crawford 2008]. ケーススタディの第 1, 第 2 はそれぞれ階数と構造が異なる「商業オフィスビル 2 棟」, 第 3 は「平屋造り一戸建て煉瓦住宅」, 第 4 は「競輪場」, 第 5 は「ソーラー給湯システム」, 第 6 は建物一体型の太陽光発電「BIPV システム」, 第 7 は「典型的な家庭用洗濯機」である. これらのケーススタディにおいて, プロセス法分析, IOA, プロセス法基盤のハイブリッド分析, IO 基盤ハイブリッド分析のそれぞれの推計値を比較している. 結果は, 住居用建物(ケーススタディ 3)以外, プロセス法およびそれらを用いたハイブリッド分析のエネルギー推計値は IOA または IOA を用いた推計値より低くなるという結果が得られた. Crawford はプロセス法分析結果について IOA を用いて計算した結果より一貫して低くなるという, Lenzen et al.の研究結果[Lenzen 2000]との一致を見出した. また IOA と IO 基盤ハイブリッド分析の推計値の差が小さいことも明らかにしている. この結果について Crawford は, プロセス法自体の不完全性とオーストラリアにおけるプロセスデータの不足によるものであると分析している.

Wiedmann et al. は, イギリスの風力発電設備を対象に, プロセス法分析および IO 基盤ハイブリッド分析と統合ハイブリッド分析の比較を行っている[Wiedmann 2011]それぞれの分析で推計された CO₂ 排出量においてハイブリッド法では鋼からの CO₂ 排出量がプロセス法の約 3 倍であるという結果が得られた. Wiedmann et al. は, プロセス法において, 上流工程が適切に評価されていないという理由の他に, 金額換算の誤差, 部門統合による誤差等, 様々な誤差による差異を考察している. 統合ハイブリッド分析と IO 基盤ハイブリッド分析との比較では, 統合ハイブリッド分析においては物量データを使用する優位性があり IO 基盤ハイブリッド分析においては分析の労力が少なく済むという点をメリットとして評価している.

Strømman et al. は Leontief の IOA モデルを基礎として, 欠落しているインベントリ項目を推

定し、インベントリの編集を部分的に形式化し、コスト構造の一貫した表現を可能にするハイブリッド法に基づいたアプローチを開発している [Strømman 2008]. 当アプローチにおいては、コスト並びに物の流れに関して一貫したフレームワークの構築により、LCA とライフサイクルコスト(LCC:Life cycle cost)分析とを統合した結果、価格と財の流れの双方を記述できるモデルとなっている。

Suh 以外にハイブリッド法の分類を行った Pei et al.の研究に触れる[Pei 2010]. Pei et al.は、ハイブリッド法を加法的ハイブリッド法(additive hybrid)、経済-バランスハイブリッド法(economic-balance hybrid)、混合-ユニットハイブリッド法(mixed-unit hybrid)の3方法に分類した。加法的ハイブリッド法は IO モデルの部門に対応し、材料データが入手できないプロセスに対して経済データを明らかにすることによりカバーする方法である。経済-バランスハイブリッド法は材料加工モデルで付加された価値を計算し、これを総価格から控除し、IOA による LCA を用いて残存する価値を推計する。混合-ユニットハイブリッド法は物理的な量と経済的な量の両方を含むマトリックスを作成して環境負荷を推計する方法である。Pei et al.は PV モジュール製造のハイブリッド LCA に際し、典型的な製造部門に IOA を用いて原価計算を行う経済-バランス法はアメリカにおいては、PV モジュール製造が大規模半導体部門に集中しているため典型的ではないと指摘した。混合-ユニットハイブリッド法はデータインテンシブ(大量データ収集の必要性)で、PV 製造のための推計は不確実性が高い可能性があるとして、最終的には、シリコン PV 製造に利用できる総費用の会計データに注目し、加法的ハイブリッド法により PV モジュール製造の LCA を行った[Pei 2010]. Pei らの研究に対して、Williams と Liqiu et al は、経済-バランスハイブリッド法を用いてデスクトップコンピュータとラップトップコンピュータの分析をそれぞれ行っている[Williams 2004][Liqiu 2011]. これらの例では材料とパーツのデータ収集を、コンピュータそのものを解体することにより直接収集している。その他のバルク材の抽出と製造、コンピュータ部品の製造と組立(半導体、プリント基板、LCD モジュール等)、コンピュータ自体の最終組立に関しては、業界報告書と文献からプロセスレベルのエネルギーと材料のデータを収集し、上記のプロセス法データを取得した上で、アディティブと残存価値と呼ばれる IO 修正を行っている。「アディティブ」という要素は製品毎の必要性に関する特定の経済的な価値を示し、残存価値は、コンピュータの利用できる経済的価値に基づいて、すべての残存する算入されていない部門の価値評価を示す。最終的な負荷はプロセス法の負荷とアディティブの負荷、残存価値の負荷を合算することにより求めている。

2.5 LCI 事例研究

本節では、分野別に LCI 事例を中心とした先行研究を挙げる。対象は本論文で主に取り上げる食の分野のうち農・水・畜産物分野、製造業の広く基盤となる金属・素材分野、および関連する運輸・サービス分野である。以下取り上げる対象分野では、ライフサイクルの各段階において環境負荷発生の鍵となる段階や分析に際しての留意点、適用される分析法の傾向な

どにそれぞれ特徴が見られる。

2.5.1 農産物・水産物・畜産物分野

農産物・水産物・畜産物分野における、環境負荷を LCI により定量化する研究は、2000 年代に入ってから多くなってきた。以下に先行研究を挙げる。

農・水・畜産物のエネルギー投入量を品目ごとに推計する試みとしては、既出の資源協会による研究報告がある。同協会では農産物(105 種類)、水産物(10 種類)・畜産物(8 種類)のエネルギー投入量を定量化した[資源協会 1992]。本論文の第 3 章でも農・水・畜産物の分析を行うが、エネルギー投入量のみではなく CO₂ 排出量も定量化している点が特徴である。

農作物の輸送プロセスにおける環境負荷を推計した研究には、根本による研究があり、野菜を対象に生鮮野菜消費におけるフードマイルを求めた[根本 2006]。さらに、農作物の生産および輸送プロセスまで考慮した研究には、吉川らや Christophel et al. によるものがある。吉川らは、野菜生産出荷安定法²⁴ [農林水産省 2011]に基づいて定められた指定野菜 14 種に対し、品目別に生産および輸送プロセスにおける CO₂ 排出量を、全国 9 地域において定量化した[吉川 2006]。Christophel et al. は、アメリカの平均的な家庭で消費される食料について、その温室効果ガス排出量を生産および輸送プロセスを考慮して定量化し、食料の地産地消によって、環境負荷の低減が可能であることを明らかにした [Christophel 2008]。

水産物の研究では、南らによるマグロ消費[南 2004]、渡邊らによるイカ類などの水産物[渡邊 2006]などがある。Ishikawa et al. は長距離イカ釣りのエネルギー消費量を定量化し、漁獲当たりの燃料消費量は、単位時間当たりの漁獲量によって規定されるとした [Ishikawa 1987]。

畜産物の研究においては、林による肉牛生産、[林 2000]、梁らによる豚肉生産[梁 2007]などの LCI を挙げるができる。中でも A.Ogino et al. は肉牛肥育について、影響評価を含む詳細な環境負荷分析を行った[Ogino 2004]。A.Ogino et al. は一頭の牛を機能単位と定義し、飼料、輸送、家畜管理、畜体、およびふん尿処理などをシステム境界内に含めて検討した結果、温暖化負荷では牛の消化器官からのメタン排出、酸性化と富栄養化負荷では、糞尿からのアンモニア排出が主要な原因であると推定した。更に輸入される飼料は殆どの環境負荷に大きく影響しており、肥育期間の短期化が環境負荷低減に繋がると分析している。

農・水・畜産物の LCI においては、生産プロセスを熟知した専門家集団による研究が多い。資源協会による研究報告はその代表例と言える。また農・水・畜産物の環境負荷を把握するための調査・フィールドワークに労力を割いている点もこれらの研究の特徴として挙げられる。すなわち従来の研究の大半はプロセス法に基づいており、特に上述の研究事例は全てプロセス法である。その他の特徴として農産物の場合は、生産地と消費地間の距離に注目し、生産プロセスの中でも輸送プロセスの CO₂・エネルギー負荷の定量化に力が入られている。水産物の場合も似た傾向があり、養殖以外の天然の水産物の場合、漁獲そのものよりも漁船および遠洋漁業の距離に係わる CO₂・エネルギー負荷の定量化が鍵となっている。畜産業にお

²⁴昭和 41 年 7 月 1 日法律第 103 号、最終改正：平成 23 年 8 月 30 日法律第 105 号

る食肉においても家畜飼料の輸入，すなわち海外からの運搬に係わる負荷が環境負荷の総計を押し上げているという例が多く，輸送距離が重要な位置を占めている。

2.5.2 金属・素材分野

製造業の広く基盤となる金属・素材に関する LCI は主として 1990 年代から行われてきた。鋳鍛鋼を含む金属の LCA は原田による研究を挙げることができる[原田 1999][原田 2001]。また，中小企業へのプロセス法 LCA 導入をテーマとした研究の中で，鋳物製品に関する LCA 実践事例がある[中野 2008b]。また Cullen et al. は，鉄鋼の製鉄から最終製品までを対象としてグローバルフローを作成している[Cullen2012]。安達らは銅地金生産に係る CO₂ 排出量について，採掘・選鉱プロセスを考慮した LCI を行っている[安達 2007]。

金属・素材分野の LCI は，研究例が農産物や運輸等，他分野に比べ比較的少なく，非鉄金属の分野は特にその傾向が顕著である。分析手法としてはプロセス法によるものが殆どであり，上で挙げた研究例は全てプロセス法である。前項で挙げた農産物等と同じく，素材・金属分野においても，プロセスデータの収集に労力を費やしている。既往研究の一つとして挙げた安達らの研究では，金属におけるインベントリデータにおいて，最上流地点である採掘・選鉱プロセスの把握が十分ではないとした。そして採掘・選鉱プロセスを詳細に調査し，銅のライフサイクル CO₂ を分析した結果，採掘・選鉱の占める割合は 50～70% であり，LCI 上，これらの段階が無視できないにも係わらず，調査の困難さからこれまでは十分に把握されてこなかったと指摘している。また同じく先行研究の一つとして挙げた中野らによる鋳物製品に関する LCA 実践事例は，鋳鉄製造に関する希少な研究例の一つである。当研究では，鋳鉄製造プロセスにおいて CO₂ 負荷の 50% 以上がコークスを熱源とした溶解炉「キューボラ」から排出されていると分析している。金属・素材の LCI を行う場合は，例えばキューボラなどのエネルギー技術の検討と併せての分析が必要であるが，この点も金属・素材分野における LCI 研究の特徴である。上述の中野らの研究は，中小企業への LCA 導入例の一つとして取り上げているため，キューボラのみ分析に留めているが，鋳鉄製造においては約 4 割が熱源として電磁誘導を使用した「誘導炉」によって生産されているため[産業研究所 2007]，誘導炉を含めた LCI が必須となる。

2.5.3 運輸・サービス関連分野

運輸部門は民生および産業部門と対比され，エネルギー投入量・CO₂ 排出量の定量化が多く行われてきた分野の一つである。サービスに関する LCA は商品としての物質の製造・輸送・廃棄等が存在しないため，定量化しにくい面があり，他分野に比べると実施例は少なかったが，2010 年前後から研究が進んで来ている。

運輸の LCI であるが，IOA を用いた研究としては塚本らによる運輸部門の環境負荷分析を挙げることができる[塚本2005]。また，稲村らは IOA により，東北自動車道と東北新幹線のライフサイクル CO₂ の比較研究を行っている[稲村2002]。稲村らの IOA はエネルギー取引を物理量単位，その他の取引を金銭単位で取り扱うハイブリッド産業連関法を採用している。その他古典的な研究としては Marheineke et al. による区分的ハイブリッド分析法を用いた貨物輸送活

動に関するケーススタディを挙げることができる[Marheineke1998]。また、2.5.1で取り上げた農産物・畜産物・水産物についての先行研究も輸送プロセスの分析に力を入れており、運輸の研究的側面を有している。特に根本の研究[根本2006]、吉川らの研究[吉川2006]、Christophel et al.の研究[Christophel 2008]はその傾向が強い。その他プロセス法ベースによる運輸部門の研究としては、筑井らによる都道府県間廃棄物移動モデルを用いたエネルギー消費量とCO₂排出量の推計[筑井2007]、柴原らによる高速旅客輸送機関に対するCO₂排出量から見た優位性評価などを挙げることができる[柴原2009]。

サービス関連のLCIであるが、クリーニングのCO₂を定量化した山口らによる研究[山口2010]、伊坪らによる大規模展示会を対象としたライフサイクルCO₂評価[伊坪2012]などを挙げることができる。これらサービス部門のLCI研究はすべてプロセス法によるものである。

上述したとおり、運輸部門のLCI研究では、IOAまたはハイブリッド法を用いた研究が比較的進んでいる点が特徴である。理由としては、IOの部門に運輸部門が存在し、更に部門が鉄道旅客、鉄道貨物、バス、ハイヤー・タクシー、道路貨物輸送、外洋輸送、沿海・内水面旅客輸送、沿海・内水面貨物輸送、国際航空輸送等に細分化されていることが理由の一つと推察される。先行研究の一つとして挙げた塚本らの研究では、過去30年間に亘り、自動車、鉄道、船、航空機の4輸送機関の環境負荷を、IOAを用いて比較している。IOの他に用いた主な資料はエネルギーバランス表であり、ヒアリングやアンケート等の調査は行わず、統計資料のみでの分析を行っている。稲村らの研究も一部にヒアリング調査を用いているものの、基本的にIOおよび統計・文献等による分析である。

サービス部門のLCIでは基本的にプロセス法による研究に留まっている。IOにもサービス部門が存在し、細分化もされているが、IOから得られるデータは全国の平均値であるため、独自の濃いサービスほどIOAは適用されにくいと推察される。個別性の強い具体的なサービスのLCIではプロセス法が強みを持つ。なお、様々な財のLCIにおいてプロセス法分析を行った場合、評価漏れが発生し易い分野もサービス部門である。IOAまたはハイブリッド法を用いることの長所の一つは、関係するサービス部門の間接的な負荷を漏れなく評価できることである。本論文では一貫してハイブリッド法を用いることにより、サービス部門をはじめとする間接的な負荷を漏れなく包含できるように分析法を構築している。

運輸・サービス部門のLCI、特に運輸のLCIでは例えば鉄道や道路等のLCIと区別が統一されておらず、研究者の切り口によって分析されているのが実情である。本論文第4章では農産物の輸送に関する分析を行っているが、農産物の負荷の定量化において輸送は重要な位置を占める。よって輸送プロセスに焦点を当てている。

2.6 本章のまとめ

本章では、LCIの基礎概念と理論を俯瞰し、特にIOAとその課題を明らかにした。更にLCIの応用分析法であるハイブリッド法について既往研究に基づき分類しながら概観した。本研究が目指すLCIの方向性は系列横断型LCIであり、その展開においてIOAの理論は基礎として欠くことができない。しかしまたIOAによる環境負荷分析・LCIにも課題があるため、プロセス

法を取り入れたハイブリッド法が本論文における分析法として選択されることを本章で指摘した。2.4におけるハイブリッド法についての先行研究の精査・検討を通して示したとおり、区分的ハイブリッド分析法は既存のIOをそのまま利用でき、ほぼ完全なLCI結果を比較的速やかに得ることが可能である。本研究の対象分野の分析法は2.5における既往の事例研究で見たとおり殆どがプロセス法によるものであった。プロセス法単体の分析では現地調査によるデータ収集に労力を費やされるため、費用に対する効果、時間に対する効果がどうしても低くなる。本研究では区分的ハイブリッド分析法を採用し、データ収集負荷を緩和するとともに、間接影響も把握することを試みる。

なお2.3の中で指摘したIOAの分析上の課題への対応について、本論文の各章との関係は次の通りである。2.3.7, 2.3.9, 2.3.10で指摘した最終需要 F が負値または小さい部門における、環境負荷の把握・比較が困難化する場合がある問題(最終需要の問題)への解決策は、第3章と第4章において、競争輸入型・輸入内生モデルを発展させた競争輸入型・輸入在庫内生モデル展開により提示する。2.3.10で指摘した“IO部門が限定されることによる詳細度の低さ”(the low level of detail)の問題への解決策は、第3章・第4章・第5章において、プロセス法を導入して既存IO部門分類を製品レベルまで分解することにより対処する。2.3.10で指摘したIOの発行年と分析年の時間的乖離の問題、すなわち“データの鮮度”(data age)の問題への解決策は、第6章において、変動因子係数法を提案することによって提示する。以上の問題点と本論文の構成を整理したものを図2-1に示す。

上述の問題への対処を行い、本論文の以後の章では低炭素社会構築にあたっての知見を得るためにエネルギー消費量・CO₂排出量の定量化を行う。対象とする分野は農・水・畜産業・鉄鋼製造業である。2.5では事例研究を取り上げたが、農・水・畜産物の先行研究では輸送プロセス即ち運輸が一つの鍵を握っていることを指摘した。また金属・素材分野の先行研究では、製造業の基盤産業であるにもかかわらず鉄鋼製造に関する研究が比較的希薄であることと、エネルギー技術の分析、具体的にはキュポラの他に誘導炉を加えた分析が必要であることを指摘した。更に運輸・サービス部門の先行研究を見たが、現地調査によるプロセスデータの収集なしでIOと統計資料・文献から環境負荷を分析可能で、評価漏れの発生し易いサービス部門の負荷を推計できる分析手法を示した。

第1章 緒言
背景: 地球温暖化の主要因である高炭素社会, およびそれと表裏をなす高エネルギー社会の存在 目的: LCIによる生産活動に起因する環境負荷の解析に基づき, 低炭素社会構築に寄与していく工学的知見の提示
第2章 LCIの概要と先行研究
・系列横断型LCIの展開による高炭素・高エネルギー社会の精緻な定量化 ・IOAの分析上の問題点の抽出(最終需要, IO部門が限定されることによる低詳細度, データ鮮度) ・分析法(区分的ハイブリッド法)と分析対象財の選定(食品と工業中間財)
最終需要の問題への対処(競争輸入型・輸入在庫内生化学モデル展開) IO部門が限定されることによる低詳細度への対処(プロセス法導入による既存IO部門の分解)
第3章: 食品部門のエネルギー・環境負荷分析
・全国レベルでの農・水・畜産物70品目について品目別エネルギー投入量・CO ₂ 排出量定量化
第4章: 地域性を考慮した農作物の生産および輸送に伴うCO₂排出量評価
・地域レベルでの地産地消型生産の効果を把握するため, 茨城県の農作物の生産プロセスCO ₂ 排出量と, 同県を最終消費地として輸送まで含めたCO ₂ 排出量定量化
IO部門が限定されることによる低詳細度への対処(プロセス法導入による既存IO部門の分解) 中間財のCO ₂ 負荷の推計 (IOの上流・下流部門への二分割)
第5章: キュボラと誘導炉の経済性分析と環境LCA分析
・鑄鉄製造における誘導炉とキュボラの経済性と環境性の比較分析, 工業中間財における最終財・中間財のCO ₂ 負荷定量化
IOの発行年と分析年の時間的乖離, データの鮮度問題への対処(変動因子係数法の提案)
第6章: エネルギー分析における変動因子係数を用いたインベントリ分析の提案および検証
第7章: 結言

図 2-1 本論文の構成

参考文献

- [Carr 1934]Edward Hallett Carr. Karl Marx, a study in fanaticism. J.M. Dent & Sons , 315 p. 1934
- [Christophel 2008]Christophel.Weber and H.Scottmatthews. "Food-Miles and the Relative Climate Impacts of Food Choices in the United States."Environmental Science & Technology.42. 3508-3513, 2008
- [CMU 2008]Carnegie Mellon University . "Economic Input-Output Life Cycle Assessment (EIOLCA), US 2002 Industry Benchmark model ". Green Design Institute. <http://www.eiolca.net>, (accessed 2012-2-20).
- [Crawford 2008]Robert H, Crawford. "Validation of a hybrid life-cycle inventory analysis method." Journal of Environmental Management 88.3.496-506.2008
- [Cullen2012]Jonathan M. Cullen , Julian M. Allwood, Margarita D. Bambach . "Mapping the global flow of steel: From steelmaking to end-use goods." Environmental science & technology

46.24. 13048-13055. 2012

[Defourny 1984]Defourny J, Thorbecke E. " Structural path-analysis and multiplier decomposition within a social accounting matrix framework." *The Economic Journal* ;94 . 111–36.1984

[Fava 1991]James A. Fava. *A Technical Framework for Life-Cycle Assessment*. SETAC, 1991.

[Heinonen 2011]Jukka Heinonen, Seppo Junnila. "Metropolitan Carbon Management A Hybrid-LCA Approach". IPCBEE vol.6. Singapore, 2011 2nd International Conference on Environmental Science and Technology. IACSIT Press, p.V1-13-V1-17. 2011

[Herendeen 2004] Robert. A. Herendeen "Goods and Services: Energy Costs." *Encyclopedia of Energy* 3.33-41.2004

[Hendrickson1998] Chris Hendrickson , Arpad Horvath , Satish Joshi , and Lester Lave. "Peer reviewed: economic input–output models for environmental life-cycle assessment." *Environmental Science & Technology* 32.7. 184A-191A. 1998

[Heijungs 1994]Reinout.Heijungs, "A generic method for the identification of options for cleaner products." *Ecological Economics* 10.1. 69-81.1994

[Heijungs 1998]Reinout,Heijungs, and Frischknecht .Rolf. "A special view on the nature of the allocation problem." *The international journal of life cycle assessment* 3.6. 321-332.1998

[Heijungs2002]R. Heijungs, Sangwon Suh . *The Computational Structure of Life Cycle Assessment* . Springer, 256p. 2002

[Heijungs 2006] Reinout,Heijungs, and Sangwon Suh. "Reformulation of matrix-based LCI: from product balance to process balance." *Journal of Cleaner Production* 14.1 . 47-51.2006

[Heijungs 2010]Heijungs, Reinout. "Sensitivity coefficients for matrix-based LCA." *The International Journal of Life Cycle Assessment* 15.5. 511-520.2010

[Ishikawa 1987]Ishikawa, M., Sato, K., Akizawa, H., Sakai, Y., & Watanabe, H. "A case study of energy analysis of long distance squid angling." *Nippon Suisan Gakkaishi*, 53, 1525-1531. 1987

[Lave 1995]Lester.B. Lave."Using input-output analysis to estimate economy-wide discharges." *Environmental Science & Technology* 29.9. 420A-426A.1995

[Leontief 1936]W.Leontief, "Quantitative input and output relations in the economic systems of the United States." *The Review of Economics and Statistics* 18.3. 105-125.1936.

[Leontief 1937]W. Leontief, "Interrelation of prices, output, savings, and investment." *The Review of Economics and Statistics* 19.3.109-132.1937

[Leontief 1938] W. Leontief, "The significance of Marxian economics for present-day economic theory." *The American Economic Review* 28.1. 1-9.1938

[Lenzen 2000]Manfred Lenzen,"Errors in Conventional and Input-Output—based Life—Cycle Inventories." *Journal of Industrial Ecology* 4.4. 127-148.2000

- [Liqui 2011] Deng, Liqui, Callie W. Babbitt, and Eric D. Williams. "Economic-balance hybrid LCA extended with uncertainty analysis: case study of a laptop computer." *Journal of Cleaner Production* 19.11. 1198-1206.2011
- [Mattila 2010]Tuomas J Mattila, Pakarinen Suvi, and Sokka Laura. "Quantifying the Total Environmental Impacts of an Industrial Symbiosis-a Comparison of Process-, Hybrid and Input– Output Life Cycle Assessment." *Environmental science & technology* 44.11.4309-4314. 2010
- [Marheineke1998]T.Marheineke,R.Friedrich,W.Krewitt.
"Application of a hybridapproach to the life cycle inventory analysis of a freight transport task". Total Life Cycle Conference and Exposition. Austria. SAE Technical Paper Series 98.2201, p.2130-2137. 1998
- [Memorial 1994]Battelle Memorial and Mary Ann Curran. *Life-cycle Assessment: Inventory Guidelines and Principles* . CRC Press, 245p. 1994
- [Myung 2003]Gwak, Jong Myung, Mi-Ryang Kim, and Tak Hur. "Analysis of internally recurring unit processes in life cycle assessment." *Journal of Cleaner Production* 11.7. 787-795. 2003
- [Ogino 2004]A • Ogino,K Kaku,T.Osada,and K.Shimada."Environmental impacts of the Japanese beef-fattening systemwith different feeding lengths as evaluated by a life-cycle assessment method." *American Society of Animal Science*.82, 2115-2122.2004
- [Pei 2010] Zhai, Pei, and Eric D. Williams. "Dynamic hybrid life cycle assessment of energy and carbon of multicrystalline silicon photovoltaic systems." *Environmental science & technology* 44.20. 7950-7955.2010
- [Raa 1984]Thijs ten Raa, Debesh Chakraborty and J. Anthony Small."An alternative treatment of secondary products in input-output analysis." *The Review of Economics and Statistics* 88-97.1984
- [Raymond 2008]Tan, Raymond R., Alvin B. Culaba, and Kathleen B. Aviso. "A fuzzy linear programming extension of the general matrix-based life cycle model." *Journal of Cleaner Production* 16.13. 1358-1367. 2008
- [Rowley 2009]Hazel V. Rowley•Sven Lundie•Gregory M. Peters . " A hybrid life cycle assessment model for comparison with conventional methodologies in Australia." *The International Journal of Life Cycle Assessment* 14, 6, 508-516.2009
- [Strømman 2008] Hammer Strømman and Christian Solli. "Applying Leontief's price model to estimate missing elements in hybrid life cycle inventories." *Journal of Industrial Ecology* 12.1 . 26-33.2008
- [Strømman 2009] Anders Hammer Strømman, Glen P. Peters, Edgar G. Hertwich." Approaches to correct for double counting in tiered hybrid life cycle inventories." *Journal of Cleaner*

Production 17. 248–254.2009

[Suh 2004] Sangwon Suh "Functions, commodities and environmental impacts in an ecological–economic model." *Ecological Economics* 48.4. 451-467.2004

[Suh 2005] Sangwon Suh and Gjalt Huppes. "Methods for Life Cycle Inventory of a product". *Journal of Cleaner Production* 13.7, p.687-697. 2005

[Suh 2007] Sangwon Suh and Reinout Heijungs. "Power series expansion and structural analysis for life cycle assessment." *The International Journal of Life Cycle Assessment* 12.6. 381-390. 2007

[Treloar 2004] Graham J. Treloar; Peter E. D. Love; and Robert H. Crawford. "Hybrid life-cycle inventory for road construction and use." *Journal of Construction Engineering and Management* 130.1. 43-49.2004

[Wiedmann2011] Thomas O. Wiedmann , Sangwon Suh, Kuishuang Feng , Manfred Lenzen , Adolf Acquaye , Kate Scott , and John R. Barrett, Application of Hybrid Life Cycle Approaches to Emerging Energy Technologies - The Case of Wind Power in the UK, *Environmental science & technology* 45.13. 5900-5907.2011

[Williams2004] Eric ,Williams. "Energy intensity of computer manufacturing: Hybrid assessment combining process and economic input-output methods." *Environmental Science & Technology* 38.22 . 6166-6174. 2004

[Wooldridge 2010] Jeffrey M Wooldridge. *Econometric Analysis of Cross Section and Panel Data* . The MIT Press, 1096p. 2010

[朝倉 2001] 朝倉啓一郎, 早見均, 溝下雅子, 中村政男, 中野諭, 篠崎美貴, 鷺津明由, 吉岡完治. 環境分析用産業連関表. 慶應義塾大学出版会, 236p. 2001 年

[安達 2007] 安達毅, 茂木源人. "鉱山費用推定システムによる採掘・選鉱プロセスを考慮した銅地金生産の CO₂ 排出に関するインベントリ分析." *LCA 学会誌*, 2,3, 1-8, 2007 年

[有村 2011] 有村俊秀, 前田征児, 和田潤, 浦島邦子. "排出量取引を利用した二酸化炭素回収・貯留技術の促進について." *科学技術動向*. 120. 20-32, 2011 年

[伊坪 2007] 伊坪徳宏, 田原聖隆, 成田暢彦. *LCA 概論: LCA シリーズ 第 1 分冊*. 産業環境管理協会 , 305p. 2007 年

[伊坪 2010] 伊坪徳宏・井伊亮太・森元愛和・堀口健・安井基晃. "大規模展示会を対象としたライフサイクル CO₂ 評価." *日本 LCA 学会誌*, 8.2. 200-212. 2012 年

[稲村 2002] 稲村肇・Mongkut, PIANTANAKULCHAI・武山泰. "高速道路と新幹線のライフサイクル炭素排出量の比較研究." *運輸政策研究* 4.4. 11-22. 2002 年

[宇沢 1986] 宇沢弘文. *経済動学の理論*. 東京大学出版会, 298p. 1986 年

[内山 1998] 内山洋司, 西村一彦, 本藤祐樹. "産業連関表を利用した製品の LCA 手法: 簡易に計算できるソフトウェア"Quick LCA"の開発” *電力中央研究所経済社会研究所報告 Y97015*, 25p. 1998 年

[岡島 2009] 岡島敬一, 内山洋司. "リサイクル技術を考慮した太陽電池ライフサイクル評価."

- 日本 LCA 学会誌, 5(4), 521-528. 2009 年
- [岡島 2010]岡島敬一, 羽倉瑞季, 大関崇. "モジュール不具合を考慮した PV システム信頼性の検討." *Solar energy*, 36(5), 63-69.2010 年
- [大島 2010]大島寛司, 内山洋司. "加圧水型原子炉を組み合わせた閉サイクル型純酸素燃焼ガスタービン発電プラント." *エネルギー・資源*,31(4), 215. 2010 年
- [角鹿 2011]角鹿誠真, 内山洋司, 岡島敬一. "フィードバックフローを含む生産システムの環境負荷分析法",*エネルギー・資源*,32(4),245.2011 年
- [角鹿 2012]角鹿誠真, 内山洋司, 岡島敬一, 村田謙二. "マトリックス法を用いた製油所副生水素の環境負荷分析." *エネルギー・資源*,33(1),55.2012 年
- [黒田 1998]黒田昌裕, 野村浩二. 環境政策の一般均衡分析. 三田商学研究, 41.4,27-54. 1998 年
- [桑原 2009]桑原和夫, 山本博巳, 山地憲治. "省エネルギー対策住宅における省エネルギー・CO₂ 排出量削減効果の実例分析", *エネルギー・資源*.30.6 .378-372.2009 年
- [小谷 1986]小谷清. 不均衡理論: ワルラス均衡理論の動学的基礎. 東京大学出版会, 197p. 1987 年
- [佐務田 2011]佐無田啓, 内山洋司, 岡島敬一. "茨城県におけるバイオエネルギー生産と輸送の最適化分析." *エネルギー・資源*, 32(2). 114. 2011 年
- [柴原 2009]柴原尚希,加藤博和,林良嗣. "地域間高速旅客輸送機関の二酸化炭素排出からみた優位性評価手法." *日本 LCA 学会誌*, 5.1. 40-46.2009 年
- [下田 2009]下田 昭郎. "欧州における CCS 関連政策と技術開発の現状." *電力中央研究所研究報告(08062)*, 30p. 2009 年
- [産業研究所 2007] (財)産業研究所. "鋳物用原材料問題への対応に関する調査研究・同参考資料 高周波誘導炉操業の現状." 62pp.2007 年
- [資源協会 1992]資源協会. 家庭生活のライフサイクルエネルギー. あんほるめ, 405p. 1992 年
- [宍戸 2010]宍戸駿太郎. 環太平洋産業連関分析学会編. 産業連関分析ハンドブック. 426p. 2010 年
- [田村 2010]田村聡,内山洋司, 岡島敬一. "PV の普及による地域電力負荷および経済性の分析-つくば市におけるケーススタディ." *社会経済研究*,No.58, 15-25.2010 年
- [塚本 2005]塚本忠嗣, 内山洋司, 川島啓. "時系列産業連関表を用いた運輸部門の環境負荷分析." *エネルギーシステム・経済・環境コンファレンス講演論文集*.22. 523-526.2005 年
- [塚本 2008]塚本忠嗣, 小出文隆, 内山洋司, 湯浅雄一郎, 川島啓. "時系列産業連関表による各種電源のライフサイクル分析." *エネルギー・資源*.29(3).176.2008 年
- [筑井 2007]筑井麻紀子・中村圭佑. "輸送手段を考慮した都道府県間廃棄物移動モデルによるエネルギー消費量と CO₂ 排出量の推計." *日本 LCA 学会誌* 5.41.462-472.2007 年
- [中島 2004]中島謙一. LCA 手法におけるシステム境界の設定とリサイクルへの適用に関する研究. 筑波大学工学研究科博士論文, 105p. 2004 年

- [中野 2008a]中野 諭,早見均 ,鈴木 将之. 環境分析用産業連関表とその応用. 慶應義塾大学出版会, 217p. 2008 年
- [中野 2008b]中野勝行,平尾雅彦. "中小企業における設計プロセスへのLCA 導入."日本LCA学会誌.4.3. 237-243.2008 年
- [南齋 2006]南齋規介, 森口祐一, 東野達. "産業連関表による環境負荷原単位データブック (3EID)". 独立行政法人国立環境研究所.
<http://www-cger.nies.go.jp/publication/D031/D031.pdf>, (参照 2012-10-30).
- [根本 2006]根本志保子. "フードマイルズにみる生鮮野菜消費と環境負荷の変化." 生活経済学研究 22. 225-235.2006 年
- [日本太陽エネルギー学会 2008]日本太陽エネルギー学会編集委員会. "持続可能エネルギーとLCA." 日本太陽エネルギー学会編集委員会. 160p. 2008 年
- [農林水産省 2011]農林水産省. "野菜生産出荷安定法". 農林水産省.
http://www.maff.go.jp/j/seisan/ryutu/yasai/y_law/, (参照 2013-2-28).
- [野村 2007]野村浩二.多部門一般均衡モデルによる二酸化炭素排出量評価 - 第一約束期間の限界削減費用と 2030 年展望-.KEO Discussion Paper ,108,pp18.2007 年
- [林 2007]林英機,高橋 美保. "外国貿易を含む産業連関モデル." 新潟大学経済論集.82. 123-162. 2007 年
- [林 2000]林孝"肉牛生産の LCA と環境影響評価",農業環境研究叢書,第 12 号.100-115. 2000 年
- [原田 1999]原田幸明. "金属の LCA(Life Cycle Analysis/Assessment)." 伸銅技術研究会誌 38. 13-18.1999 年
- [原田 2001]原田幸明. " LCA(ライフサイクルアセスメント)の現状と鋳鍛鋼への適用について." 鋳鋼と鍛鋼 516. 35-53.2001 年
- [福原 2011]福原一朗,本藤祐樹. "グラフ理論に基づいた正則な係数行列の構築によるマトリックス法 LCI の一般化." 日本 LCA 学会誌 7.1. 59-71.2011 年
- [本藤 2000]本藤祐樹, 内山洋司, 森泉由恵. "ライフサイクル CO2 排出量による発電技術の評価--最新データによる再推計の前提条件の違いによる影響." 電力中央研究所報告, Y, 1-105. 2000 年
- [水本 2012]水本佑樹,内山洋司,岡島敬一. "産業連関表を用いた太陽光発電システムのライフサイクル分析." エネルギーシステム・経済・環境コンファレンス講演論文集. 31. 269-272. 2012 年
- [南 2004]南亘, 安井邦洋,中野勝行,金熙濬. "まぐろ消費に伴う大気汚染物質 LCI." 日本水産学会誌 70.4. 548-554. 2004 年
- [宮沢 2005]宮沢健一.産業連関分析入門. 日本経済新聞社,pp235. 2002 年
- [村田 2009]村田晃伸,李哲松."二酸化炭素排出制約下における中国の産業部門の省エネルギー技術導入に関するモデル分析."日本エネルギー学会誌, 87(11), 938-945. 2009 年

- [李 2009]李哲松, 村田晃伸, 近藤康彦, 内山洋司."中国における CBM 利用を取り入れた CCS の導入によるエネルギーシステム分析."エネルギー・資源,30(4), 238.2009 年
- [山口 2010]山口庸子, 清井えり子, 永山升三."クリーニングの CO₂ 排出量の算定." 日本 LCA 学会誌 6.3. 209-216.2010 年
- [山地 2007]山地憲治."バイオマス利活用のシステム評価."EICA,12(1), 5-9. 2007 年
- [湯浅 2005]湯浅雄一郎, 内山洋司, 川島啓."時系列産業連関表によるエネルギー・環境負荷分析." エネルギーシステム・経済・環境コンファレンス講演論文集. 21. 37-40.2005 年
- [吉川 2006]吉川直樹, 天野耕二, 島田幸司."野菜の生産・輸送過程における環境負荷に関する定量的評価, 環境システム研究論文集." p245-251. 2006 年
- [吉原 1960]吉原泰助."「経済表」の論理と構造: L'abbe Baudeau による「経済表」の体系的説明." 土地制度史学 2.3. 53-71. 1960 年
- [梁 2007]梁端録, 谷口郁, 川島洋人, 菊池英治, 相馬隆雄."肉豚生産に伴う地球温暖化ガス排出量の推定." 日本 LCA 学会誌 3.3.178-183.2007 年
- [盧 2006]盧偉哲, 泉聡志, 酒井信介."マトリックス法を用いた LCA 解析の一般化と汎用システムの開発." 日本 LCA 学会誌 2.3. 266-272.2006 年
- [渡邊 2006]渡邊一仁, 田原聖隆, 藤森康澄, 清水普, 三浦汀介."イカ漁業の LCI と環境負荷." 環境科学会誌 19.1. 15-24. 2006 年

第3章 食料品部門のエネルギー・環境負荷分析

本章では、産業連関表における食料品部門のエネルギー・環境負荷分析について農・水・畜産業に焦点をあてて分析する。3.1 では研究の背景と分析対象について述べる。

3.2では競争輸入型モデル $[I - (I - (\hat{Z} + \hat{M}))A]^{-1}$ 型を用いた食料品部門の分析方法について説明し、3.3 は食料品部門のデータ整備と食料品部門全体の分析結果について述べる。3.4 からは農・水・畜産業3部門について品目別にエネルギー・環境負荷を推計する。ここでは最初に農業部門の43品目について分析方法、費目別生産エネルギー原単位推計について述べ、エネルギー投入量・CO₂排出量を定量化し分析する。併せて(生産投入エネルギー)/(食品熱量)比の推計を行う。そして次に農業部門と同様に、水産部門24品目と畜産部門3品目について分析法・原単位推計について説明した後に、エネルギー投入量・CO₂排出量の定量化と分析、(生産投入エネルギー)/(食品熱量)比の推計を行う。3.5では本章の結論を述べる。

3.1 はじめに

わが国は京都議定書において、第1次約束期間(2008～2012年)に基準年(1990年)比で温室効果ガス排出量6%の削減を約束した。しかし2011年度断面で見ると基準年比で3.7%増加しており依然厳しい状況にある[環境省2013]。今後も、あらゆる産業、部門において対策を講じていく必要がある。その際、エネルギー・環境負荷の詳細な分析は必須であるが、そのためにはLCA手法が有効であり、多数の研究成果がある。LCAには産業連関分析法とプロセス法の2つが主に利用される。

食料品は家電製品等とは異なり使用段階を捨象可能な財であり、IOAの分析対象財として適する。また消費財として、全ての国民が消費する財である。この分野を除いて低炭素社会を構築するのは難しい。また食の分野は国民一人ひとりに身近な分野であるために、地球温暖化問題を広く啓蒙する点でも有効である。したがって本論文第3章では食料品を取り上げる。

食料品のエネルギー投入量を品目ごとに推計する試みとしては、代表的なものとして積み上げ法を主とした(社)資源協会による成果がある[資源協会1992]。本章ではこの成果を踏襲しつつ、産業連関表を活用し、CO₂排出量の推計も新たにつけ加え発展させる。すなわち、マクロの産業連関分析法とミクロの積み上げ法を組み合わせたハイブリッド法[Heijungs2002][Suh2005]により、エネルギー投入量やCO₂排出量を推計することを試みる。生産費調査等の詳細に費用を調査した統計資料と産業連関表を組み合わせることにより、産業連関表の部門に留まらずに、可能な限り個別食品まで推計する。具体的には農業部門・水産部門・畜産部門の70品目の食品のエネルギー投入量・CO₂排出

量を求め、(生産投入エネルギー)/(食品熱量)比を算出する。なお、本研究では環境負荷の対象を主要な温室効果ガスである CO₂ 排出量に絞っている。

3.2 食料品部門の分析方法

食料品ごとのエネルギー・環境負荷分析を行うにあたり、産業連関分析法を用いた部門別エネルギー・CO₂原単位データを整備することが前提として必要となる。本研究では、日本のような輸入比率の高い市場経済において生産波及効果を求める際に適した競争輸入型モデル $(\mathbf{I} - (\mathbf{I} - \hat{\mathbf{M}})\mathbf{A})^{-1}$ 型を基礎として用いる。本章で適用するモデルはこれを更に発展させた競争輸入型・輸入在庫内生モデル、即ち競争輸入型モデル $[\mathbf{I} - (\mathbf{I} - (\hat{\mathbf{Z}} + \hat{\mathbf{M}}))\mathbf{A}]^{-1}$ 型である。本論文第2章の2.3.7などで指摘したように、最終需要が負値または小さい部門の場合、導出される環境負荷は負値となる場合があり、環境負荷の把握と比較が困難となる。この問題を回避するために、輸入と在庫を生内化したIOAモデルを分析に適用する。分析モデル詳細については別途文献[塚本 2005]を参照されたい。

$$\sum_{j=1}^n a_{ij} X_j + F_i^d + E_i = X_i + M_i + Z_i \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (3.1)$$

a_{ij} : 投入係数

X_i : i 部門の国内生産額

F_i^d : 国内最終需要

E_i, M_i : 輸出, 輸入(負号)

Z_i : 在庫純増(正号, 純減は負号)

部門 i の需給バランス式から(3.2) 式を導き、これにより生産波及効果も含めた均衡算出高の列ベクトル \mathbf{X} が求まる。

$$\mathbf{X} = [\mathbf{I} - (\mathbf{I} - (\hat{\mathbf{Z}} + \hat{\mathbf{M}}))\mathbf{A}]^{-1} [(\mathbf{I} - (\hat{\mathbf{Z}} + \hat{\mathbf{M}}))\mathbf{F}^d + \mathbf{E}] \quad (3.2)$$

$\hat{\mathbf{Z}}, \hat{\mathbf{M}}$: 在庫係数 z_i , 輸入係数 m_i を主対角要素にとった対角行列

\mathbf{I} : 単位行列

$(\mathbf{I} - (\hat{\mathbf{Z}} + \hat{\mathbf{M}}))\mathbf{A}$: 輸入と在庫を除いた国産品のみの投入係数

$[\mathbf{I} - (\mathbf{I} - (\hat{\mathbf{Z}} + \hat{\mathbf{M}}))\mathbf{A}]^{-1}$: 輸入と在庫を内生化したレオンチェフの逆行列

各部門の直接エネルギー原単位列ベクトルを、直接エネルギー原単位を主対角要素とした対角行列 $\hat{\mathbf{e}}$ に変換して(3.2)式に乗ずると、(3.3)式によって各部門の直接間接のエネルギー消費量・排出量が推計される。

$$\mathbf{X} = \frac{\boldsymbol{\varepsilon}_i}{\mathbf{X}_i} [\mathbf{I} - (\mathbf{I} - (\hat{\mathbf{Z}} + \hat{\mathbf{M}}))\mathbf{A}]^{-1} [(\mathbf{I} - (\hat{\mathbf{Z}} + \hat{\mathbf{M}}))\mathbf{F}^d + \mathbf{E}] \quad (3.3)$$

$\boldsymbol{\varepsilon}_i$: 部門 i の直接エネルギー消費量

$\frac{\boldsymbol{\varepsilon}_i}{\mathbf{X}_i}$: 部門 i の直接エネルギー消費原単位

$\frac{\boldsymbol{\varepsilon}_i}{\mathbf{X}_i} [\mathbf{I} - (\mathbf{I} - (\hat{\mathbf{Z}} + \hat{\mathbf{M}}))\mathbf{A}]^{-1}$ の各成分の列和: 直接間接エネルギー消費原単位

$[(\mathbf{I} - (\hat{\mathbf{Z}} + \hat{\mathbf{M}}))\mathbf{F}^d + \mathbf{E}]$: 国産品に対する最終需要

3.3 食料品部門のデータ整備と分析結果

本研究では、エネルギーバランス表[資源エネ庁 2002]を用いて環境負荷分析用データを整備する。CO₂排出量については、消費した燃料種ごとに燃焼時のCO₂排出係数を乗じて推計するが、排出係数は国立環境研究所の「燃料報告書」[南齋 2003]にて公表されている値を採用する。

また産業連関表基本分類をもとに独自に部門統合を行い、分析に適した行 226 部門×列 226 部門の食料品分析用産業連関表を作成する。産業連関表には生産者価格表と購入者価格表の二種類が存在するが、部門別、取引別の流通マージン率の差異により生産波及効果を過大評価あるいは過小評価することを防ぐため、本研究では生産者価格表を用いる。

以上により整備されたデータを基に、食料品部門において直接間接にどれだけエネルギー投入・CO₂排出が行われているかを、最終需要あるいは家計消費の面から評価する。食料品部門のうち国内生産額に占める最終需要額の割合がおおよそ 50%を超える部門について、直接間接のエネルギー原単位および CO₂排出原単位を図 3-1(1)(2)に示す。

表 3-1 は、国産品に対する最終需要の中でも特に家計消費支出に着目し、この支出額に対してどれだけ直接間接にエネルギー消費・排出が誘発されているかを、国民一人あたりの値に換算してまとめたものである。直接間接の原単位に家計消費支出額を乗じて年間エネルギー消費量・CO₂排出量を推計した。

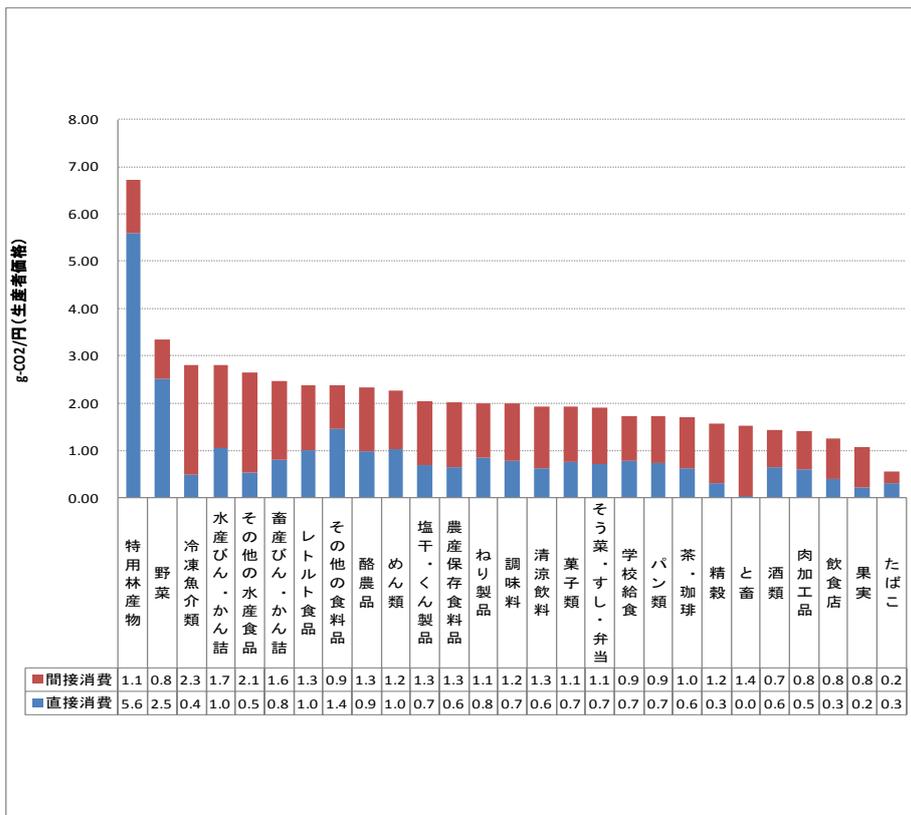
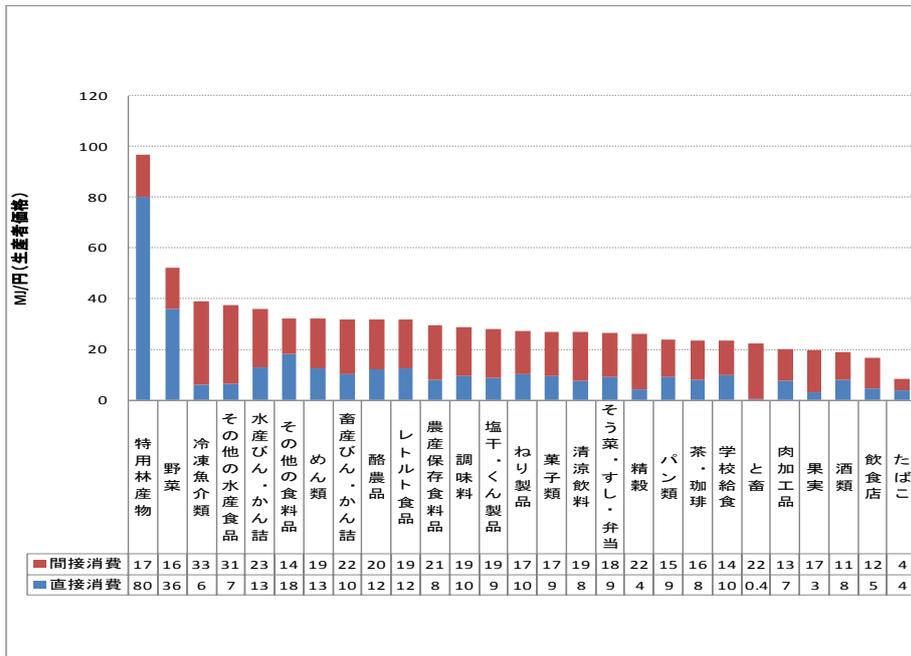


図 3-1(1)(2)食料品部門の直接間接原単位(エネルギー消費原単位・CO₂ 排出原単位)

表 3-1 国民一人あたりの年間エネルギー消費・CO₂排出量

		国民一人 あたりエネ ルギー消 費(MJ/ 年)	国民一人 あたり CO ₂ 排出 量(kg- CO ₂ /年)			国民一人 あたりエネ ルギー消 費(MJ/ 年)	国民一人 あたり CO ₂ 排出 量(kg- CO ₂ /年)
野菜	耕種農業	705.2	45.39	茶・コーヒー	食品工業	108.1	7.86
果実	耕種農業	94.2	5.09	肉加工品	食品工業	102.7	7.11
いも類	耕種農業	23.6	1.09	農産保存食品	食品工業	98.5	6.73
豆類	耕種農業	0.4	0.02	学校給食	食品工業	80.7	6.01
鶏卵	畜産	37.0	2.59	ねり製品	食品工業	77.9	5.66
その他畜産	畜産	0.7	0.04	飼料	食品工業	43.9	3.24
海面養殖業	漁業	107.1	7.47	レトルト食品	食品工業	41.8	3.14
海面漁業	漁業	78.3	5.53	水産びん・かん詰	食品工業	33.6	2.63
内水面漁業・養殖業	漁業	33.2	2.33	植物油脂	食品工業	29.4	2.15
清涼飲料	食品工業	630.3	45.39	冷凍調理食品	食品工業	28.8	2.18
そう菜・すし・弁当	食品工業	516.2	36.92	農産びん・かん詰	食品工業	17.4	1.32
菓子類	食品工業	497.1	35.63	砂糖	食品工業	16.5	1.24
酒類	食品工業	421.0	31.49	畜産びん・かん詰	食品工業	14.4	1.12
精穀	食品工業	394.6	23.78	有機質肥料(除別掲)	食品工業	9.9	0.73
冷凍魚介類	食品工業	309.6	22.29	製粉	食品工業	5.0	0.36
酪農品	食品工業	298.4	21.86	製氷	食品工業	4.5	0.35
その他の水産品	食品工業	232.6	16.41	ぶどう糖・水あめ・異性化糖	食品工業	2.4	0.18
パン類	食品工業	225.8	16.24	でん粉	食品工業	2.1	0.16
めん類	食品工業	205.8	14.58	動物油脂	食品工業	0.1	0.01
調味料	食品工業	203.8	14.03	特用林産物		113.6	7.90
その他の食料品	食品工業	200.6	14.92	農業サービス		31.6	2.09
たばこ	食品工業	194.4	12.88	飲食店		3043.5	226.26
と畜	食品工業	122.3	8.27	合計		9558	681.4
塩・干・くん製品	食品工業	119.5	8.77				

表 3-2 食料品部門の内訳と全産業内における割合

	エネルギー消費量(MJ/年)			CO ₂ 排出量(kg-CO ₂ /年)		
	国民一人 あたりエネ ルギー消 費(MJ/ 年)	食料品部 門内割合 (%)	全産業内 割合(%)	国民一人 あたりエネ ルギー消 費(MJ/ 年)	食料品部 門内割合 (%)	全産業内 割合(%)
耕種農業	832.2	8.6	1.05	51.6	7.6	1.84
畜産	37.7	0.4	0.05	2.6	0.4	0.09
漁業	218.65	2.3	0.28	15.3	2.2	0.55
食品工業	5289.5	55.3	6.72	375.6	55.1	13.38
林業(特用林産物)	113.6	1.2	0.14	7.9	1.2	0.28
農業サービス	31.6	0.3	0.04	2.1	0.3	0.07
飲食店	3043.5	31.8	3.87	226.3	33.2	8.06
合計	9558	100.0	12.2	681	100.0	24.3

家計消費支出額から評価した国民一人あたり年間の直接間接エネルギー消費量は合計で 78,655MJ/年である。そのうち食料品に対するエネルギー消費量は 9,558MJ/年と総消費量の 12.2%を占める。また、2000 年度のわが国のエネルギー消費において農林業・水産業合計で産業部門全体に占める割合は 6.05%であり、これに食料品(3.13%)

を加えれば 9.18%である。化学工業(29.3%)、鉄鋼(24.2%)など製造業と比較すれば低いものの、紙・パルプ(5.94%)、金属機械(5.85%)、建設(2.23%)、非鉄金属(1.95%)、繊維(1.66%)を超え、少なくはないといえる。次節では農業部門、水産業部門、畜産業部門について、個別の品目についてエネルギー投入量・CO₂排出量を推計し、比較する。

3.4 品目別のエネルギー・環境負荷分析

3.4.1 農業部門

3.4.1.1 分析方法(農業部門)

品目別のエネルギー・環境負荷は、基本的にその品目の生産コストに、エネルギー消費原単位、CO₂排出原単位を乗ずることによって求められる。生産費は農産物の場合は農林水産省大臣官房統計情報部(現：農林水産省統計部)が公表している『第 77 次農林水産統計表』[農林水産省 2003a]の平成 12(2000)年度の各作物の生産費をベースとした。

3.4.1.2 費目別生産プロセスエネルギー原単位の推計(農業部門)

生産費調査は単位面積あたりあるいは単位重量あたりの作物の生産に支出された金額を、その費目別に整理したものである²⁵。各費目へ 1 単位(金額)支出した際に直接間接的に消費するエネルギー量を生産プロセスエネルギー原単位と定義する。農産物 1 トンの生産にかかる直接間接のエネルギー投入量は、各費目へのトンあたり支出額に生産プロセスエネルギー原単位を乗じ、全ての費目について足し合わせたものである。

費目別の生産プロセスエネルギー原単位の推計は、3.3 の分析で得られた部門別の直接間接エネルギー原単位を用いて行う。直接間接エネルギー原単位は当該部門の単位金額あたりのエネルギー消費を間接波及によるものまで完全に網羅するものであり、今回の分析でも光熱動力費を除きこれを用いる。なお、食料品分析用産業連関表は生産者価格表示であるのに対し、農林水産省の生産費調査は購入額表示である。従って生産者価格の金額あたりエネルギー原単位をそのまま生産費調査の支出額に乗ずると、生産者価格と購入者価格の差額分にかかる投入エネルギー量を過大評価することになる。しかし今回の分析では差額分を流通にかかるエネルギー投入とみなし、生産者価格の金額あたりエネルギー原単位をそのまま用いる。光熱動力費の生産プロセスエネルギー原単位に関しては、購入額と生産者価格の差額により生じた誤差が、直接投入エネルギー量を大きく左右してしまうため、購入額ベースの金額あたりエネルギー原単位を別途推計する。生産費調査の費目分類は①種苗・苗木費②肥料費③農薬薬剤費④諸材料費⑤光熱動力費⑥農機具費²⁶⑦農用建物費⑧賃借料及び料金⑨土地改良及び水利費の 9 費目である。⑤光熱動力に対する支出を直接的なエネルギー投入とみなし、①～④、⑥～⑨の各費目に対する支出を間接的なエネルギー投入とみなす。

²⁵生産費調査の費目分類と産業連関表の分類の対応関係は第 4 章の表 4-2 を参照されたい。

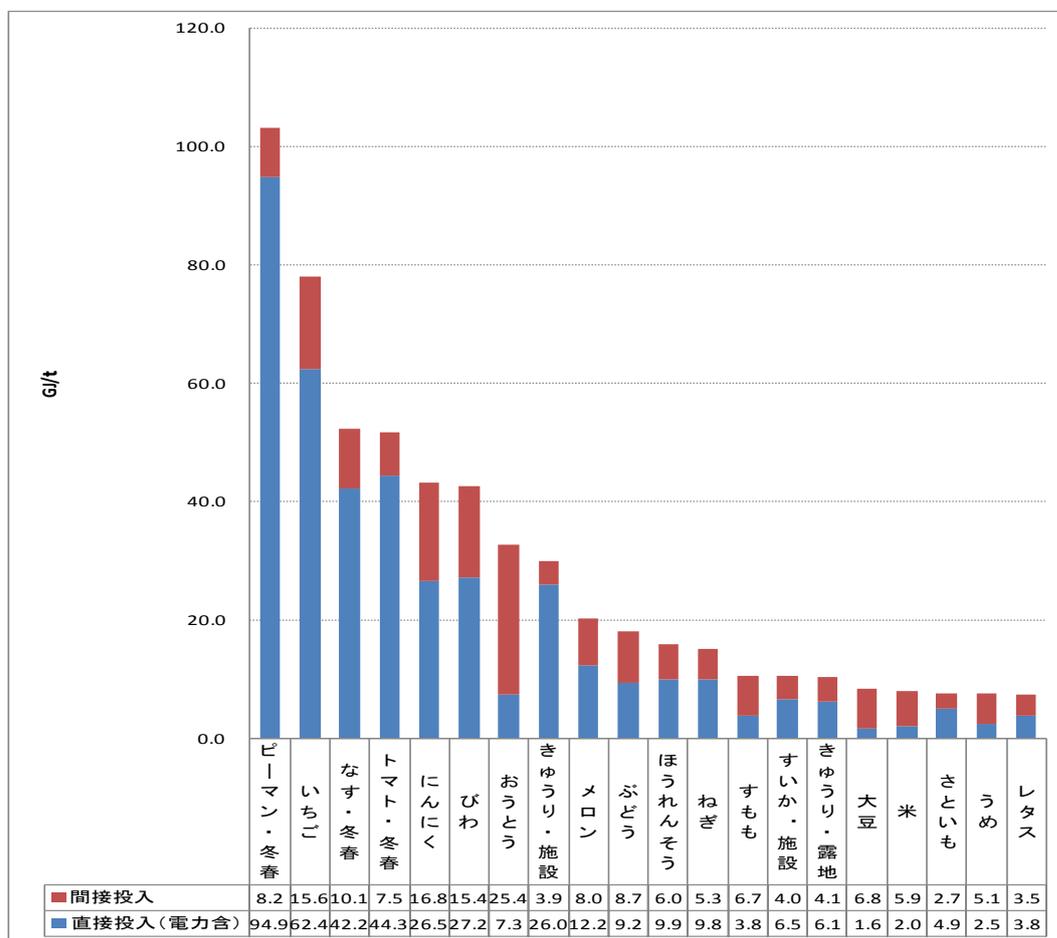
²⁶農機具費は産業連関表「自動車修理」「機械修理」部門への支出とみなし処理している。

生産プロセスエネルギー原単位の推計において、⑤光熱動力費については農業6部門の直接エネルギー消費量を、エネルギー部門への購入額ベースの総支出金額で除した値を光熱動力費の生産プロセスエネルギー原単位とした。エネルギー部門への総支出金額は、農業6部門の場合、産業連関表の「石油製品」「電力」「都市ガス」部門への支出額の和である。生産費調査の費目には上述の他に「雇用労賃」「支払小作料」「物件税及び公課諸負担」「負債利子」がある。これらの費目はいずれも投入エネルギー量としての評価が困難であり、加えてその投入量が極めて微細であると推測されることから分析対象から除外する。

3.4.1.3 分析結果(農業部門)

(1)エネルギー投入量・CO₂排出量

図3-2 および図3-3 は、先に述べた手法を用いて推計した、農産物の直接間接の生産投入エネルギー量およびCO₂排出量を、品目別に示したものである。



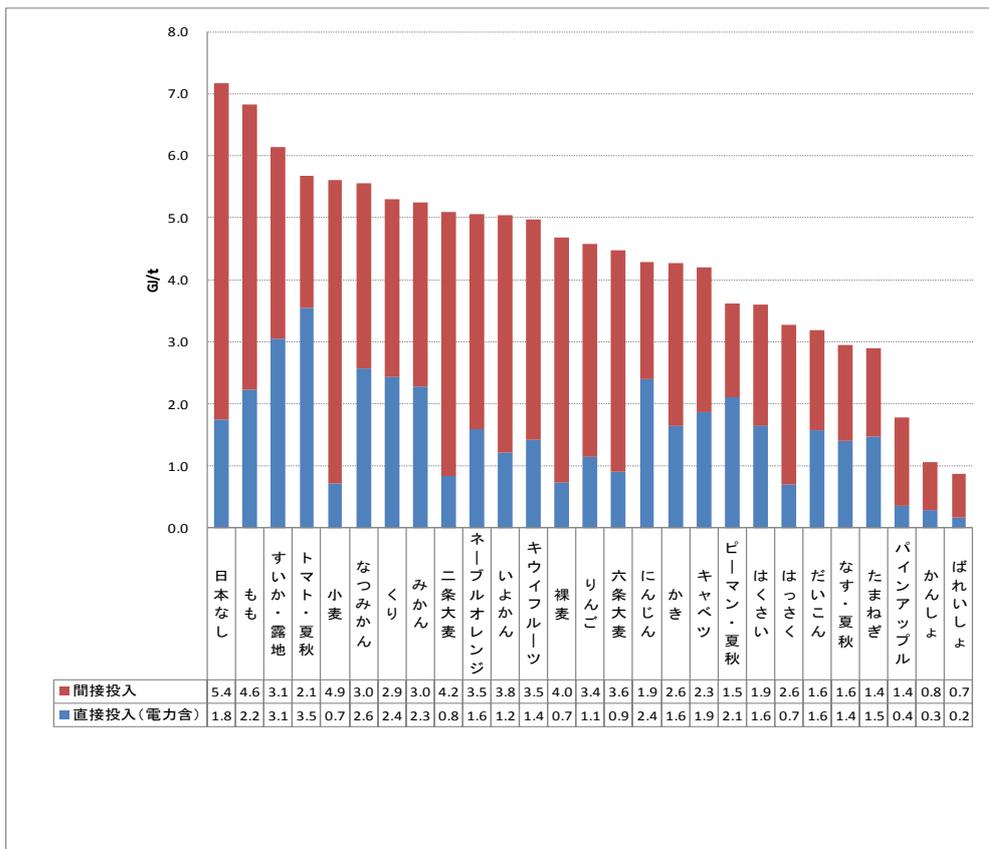
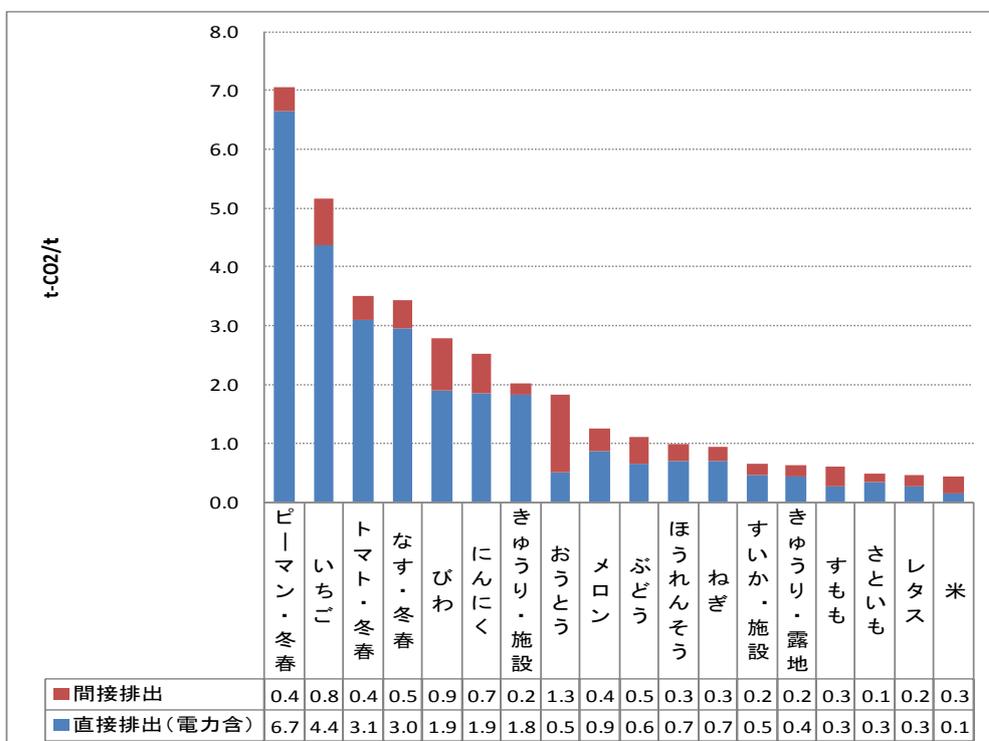


図 3-2(1)(2) 農産物の投入エネルギー量



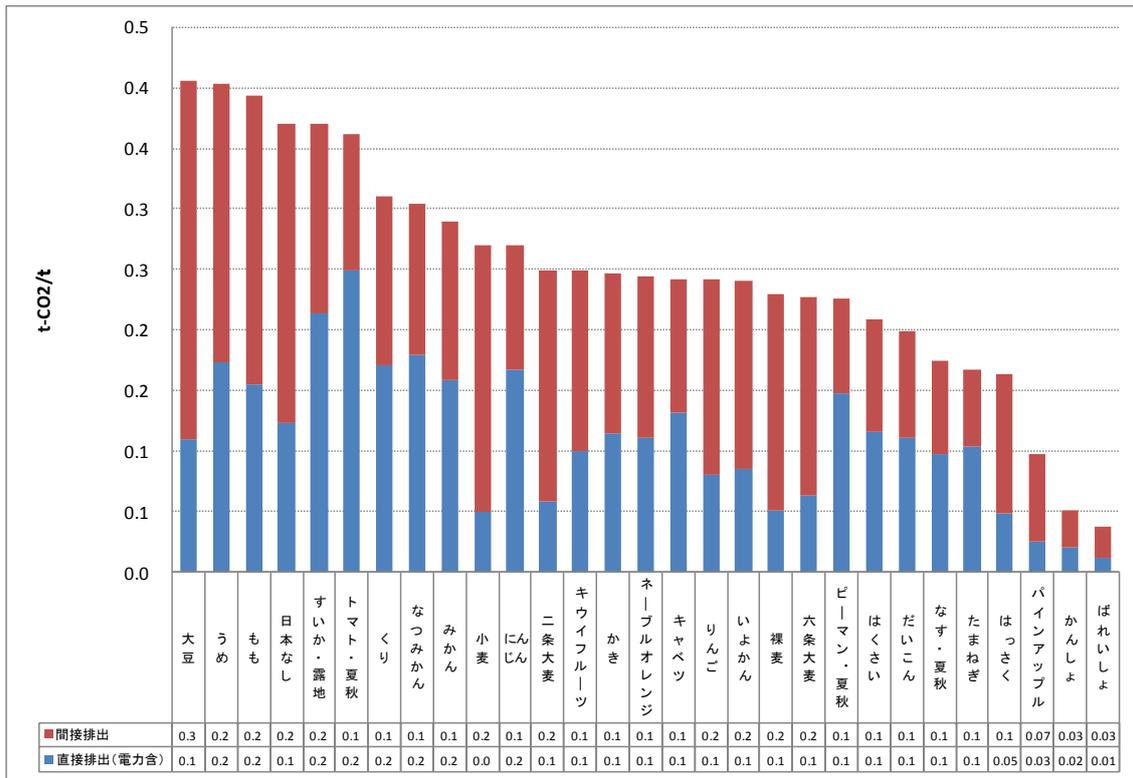


図 3-3(1)(2) 農産物の CO₂ 排出量

グラフでは総投入(排出)量を「直接」と「間接」で区別して表示した。「直接」エネルギー投入量・CO₂排出量は、生産費調査の費目のうち光熱動力にかかった費用に生産プロセスエネルギー原単位・CO₂排出原単位を乗じることで推計した。一方「間接」は、種苗費や農機具費、肥料費など光熱動力以外の支出費目にかかるエネルギー投入量・CO₂排出量の和である。光熱動力費以外の支出費目に対しては、当該製品の生産時には直接にエネルギーの投入は行われぬ。しかし種苗の育成や肥料の精製を行う上流工程がエネルギーを投入しているため、その分を「間接投入(排出)」として評価する。なお、CO₂排出量については、使用時にはCO₂を排出しない電力についても、発電時の排出を使用時の排出とみなすことで直接排出に含めた。

二つの図を比較してみると、エネルギー投入量の大きい品目ほどCO₂排出量も大きくなる傾向がはっきりと読み取れた。日本のエネルギー供給はその大半を化石燃料に依存しているため、投入エネルギー量がCO₂排出量ときわめて強い正の相関をもつことは当然のことである。

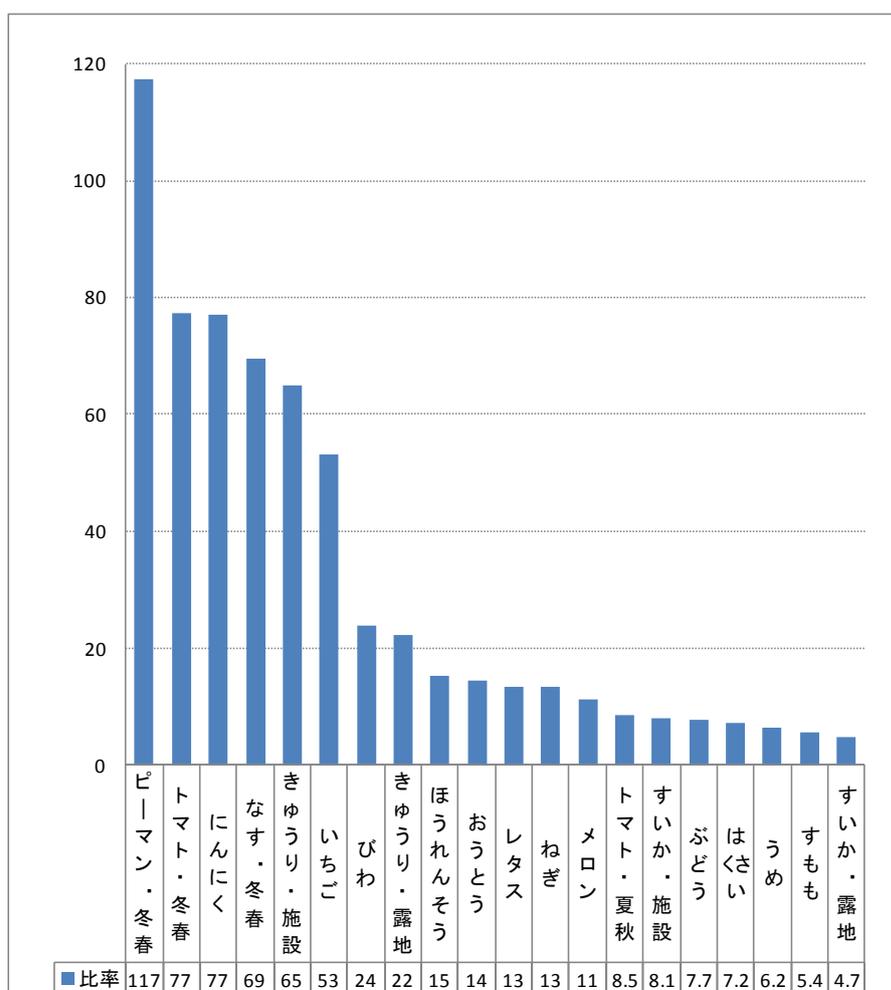
全体の傾向としては、いも類の投入エネルギー量・CO₂排出量がもっとも小さく、施設栽培の野菜の投入エネルギー量・CO₂排出量がもっとも大きい結果となった。また、投入エネルギー量・CO₂排出量が大きい品目は総投入(排出)量に占める直接投入(排出)の割合が大きい傾向にある。特に冬春ものおよび温室栽培の野菜について、投入エネルギー

ギー量がきわめて大きな値を示しているが、その内訳の殆どが直接、すなわち光熱動力のためのエネルギー投入であった。

総投入に占める直接投入の割合が小さい農産物は、穀類、いも類、おうとうなどであった。おうとうは、全農産物のうち、もっとも間接エネルギー投入および CO₂ 排出量の大きい品目である。生産費調査によると、おうとうの生産にかかる種苗・苗木費、肥料費、農薬薬剤費などの費用が他の品目と比べて群を抜いて大きく、これら上流工程におけるエネルギー投入量および CO₂ 排出量が総投入(排出)量を押し上げる結果となった。

(2)(生産投入エネルギー)/(食品熱量)比の推計

図 3-4 は、農産物ごとの直接間接の生産投入エネルギー量を、食品に含まれる(栄養価としての)熱量で除した値を示したものであり、食品熱量の何倍のエネルギーが生産時に投入されているかを示すものである。この値が小さい品目ほど、少ない投入エネルギーで多くの熱量を摂取できることになる。



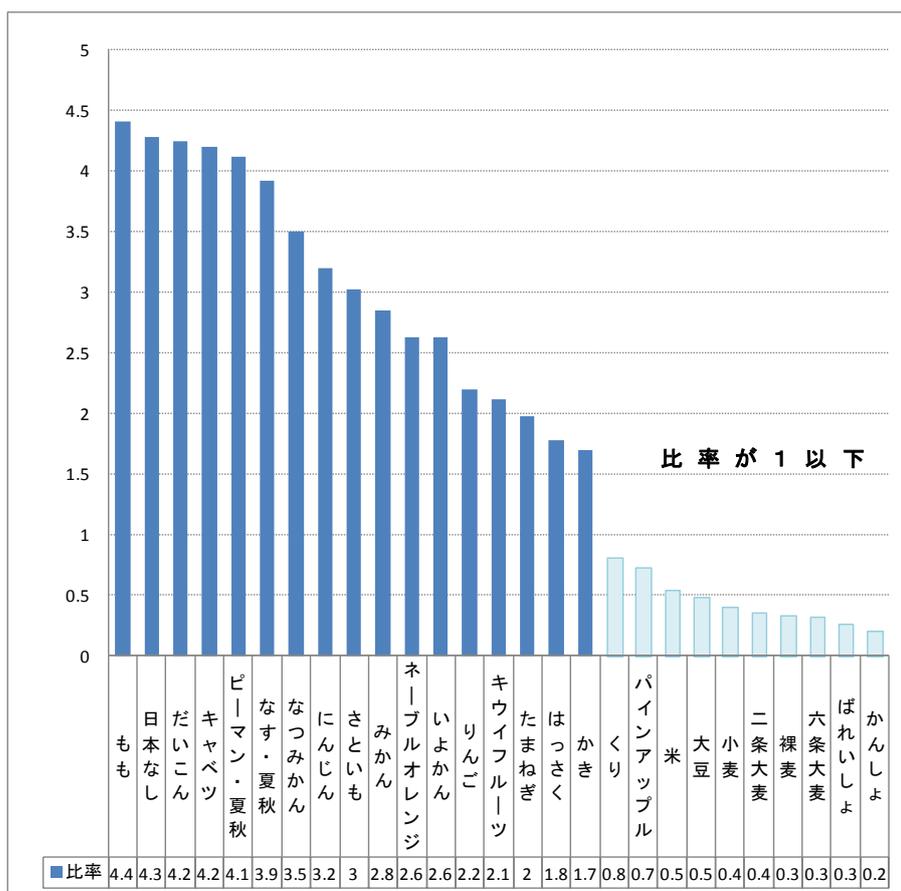


図 3-4 (1)(2)農産物の(生産投入エネルギー)/(食品熱量)比の推計

冬春もののピーマンは、食品熱量の約 117 倍ものエネルギーが、その生産時に投入されている。ピーマン、トマト、なすについては冬春ものと夏秋もので大きく値が異なった。きゅうり、すいかについては温室栽培と露地栽培で値に差がでた。同一品目については分母の食品熱量の値は変わらないため、この差は冬春ものおよび温室栽培のエネルギー投入量が、夏秋もの・露地栽培に比べて大きいことに起因したものである。

(生産投入エネルギー)/(食品熱量)比の全体の傾向をみると、いも類、穀類、果実、野菜の順に値が大きくなった。穀類、いも類、豆類は野菜、果実と比較して食品熱量の値が大きく、生産投入エネルギー量も少なかった。果実については、おうとうをはじめ品目によっては生産投入エネルギー量の大きいものもあった。しかし、全体的には野菜より生産投入エネルギー量が少なく、食品熱量も大きかった。この結果、全体の傾向として(生産投入エネルギー)/(食品熱量)比の値が野菜より小さくなった。

(生産投入エネルギー)/(食品熱量)比が 1 以下、すなわち食品熱量が生産投入エネルギーを上回った品目は、くり、パインアップル、米、大豆、麦類、いも類であった。かんしょ(0.21)ばれいしょ(0.27)といも類のエネルギー収支の良さが際立つ結果となった。

3.4.2 水産業部門

3.4.2.1 分析方法(水産業部門)

水産物の場合、農産物のように品目別の生産費を直接得ることができないため、漁船の規模(階層)別、漁法別の経営費データを組み合わせる品目別のエネルギー・環境負荷を導くという方法を取る。基本となるデータは農林水産省大臣官房統計情報部(現：農林水産省統計部)が公表している『平成 12 年度漁業経済調査報告(漁家の部・企業体の部)』[農林水産省 2003b] [農林水産省 2003c]である。なお、漁業方別、漁法別、魚種別のそれぞれの分類であるが、漁業法別の分類は漁船の規模等で 10 種類に分類される。漁法の分類は 46 種類であり、魚種の分類は 26 種類である。

3.4.2.2 費目別生産プロセスエネルギー原単位の推計(水産業部門)

生産費プロセスエネルギー原単位の推計は農業部門と同様である。生産費調査の費目分類と産業連関表の分類の対応は、基本的に資源協会[資源協会 1992]を踏襲する。産業連関表の一部門概念とそのままと一致するもの以外、例えば「諸施設費」などは、その内訳として挙げられた「非住宅建築」、「建設補修」、「その他の一般産業機械」の原単位を支出金額の比で加重平均した値を「諸施設費」の生産プロセスエネルギー原単位とする。生産プロセスエネルギー原単位は 19 費目²⁷について推計した。光熱動力費や「雇用労賃」「支払小作料」「物件税及び公課諸負担」「負債利子」についての扱いは農業部門と同様である。

3.4.2.3 分析結果(水産業部門)

(1)主要魚種のエネルギー投入量・CO₂排出量

図 3-5 および図 3-6 は、農産物と同様に推計した結果で、水産物の直接間接の生産投入エネルギー量および CO₂排出量を品目別に示したものである。

二つの図を比較してみると、農産物の場合と全く同様に、エネルギー投入量の大きい品目ほど CO₂排出量も大きくなる傾向が読み取れた。全体を見ると、さけ・ますの投入エネルギー量・CO₂排出量がもっとも小さく、あさり類の投入エネルギー量・CO₂排出量がもっとも大きい結果となった。魚類はかに、えびなどの甲殻類やたこ、いかななどの軟体動物、あさり、ほたてなどの貝類に比べてエネルギー・環境負荷が小さい傾向にある。養殖物ではぶりやたいなど魚のエネルギー投入量・CO₂排出量が比較的大きく、のり、わかめ・こんぶ、かきといった海藻や貝は小さかった。ぶりやたいはエネルギーの間接投入、CO₂の間接排出が大きい。これは生産費における「えさ代」の影響によるものであった。その一方で漁獲にかかる燃料費が小さいため、エネルギーの直接投入、の直接排出は小さくなった。同一の品目で比較すると、例えば養殖もののぶりは天然ものに比べて約 3 倍のエネルギー投入、約 3.5 倍の排出が行われていると推計された。

²⁷ ①漁船費、②諸施設費、③漁具費、④えさ代、⑤水代、⑥魚箱代、⑦種苗費、⑧塗染料費、⑨加工用資材費、⑩諸材料費、⑪自動車費、⑫賃貸料・料金販売手数料、⑬建物(減価償却費)、⑭自動車(減価償却費)、⑮漁船船体(減価償却費)、⑯漁船機関(減価償却費)、⑰電気機器、冷凍装置(減価償却費)、⑱その他の漁業用固定資産(いけす等)、⑲光熱動力費の 19 費目である。

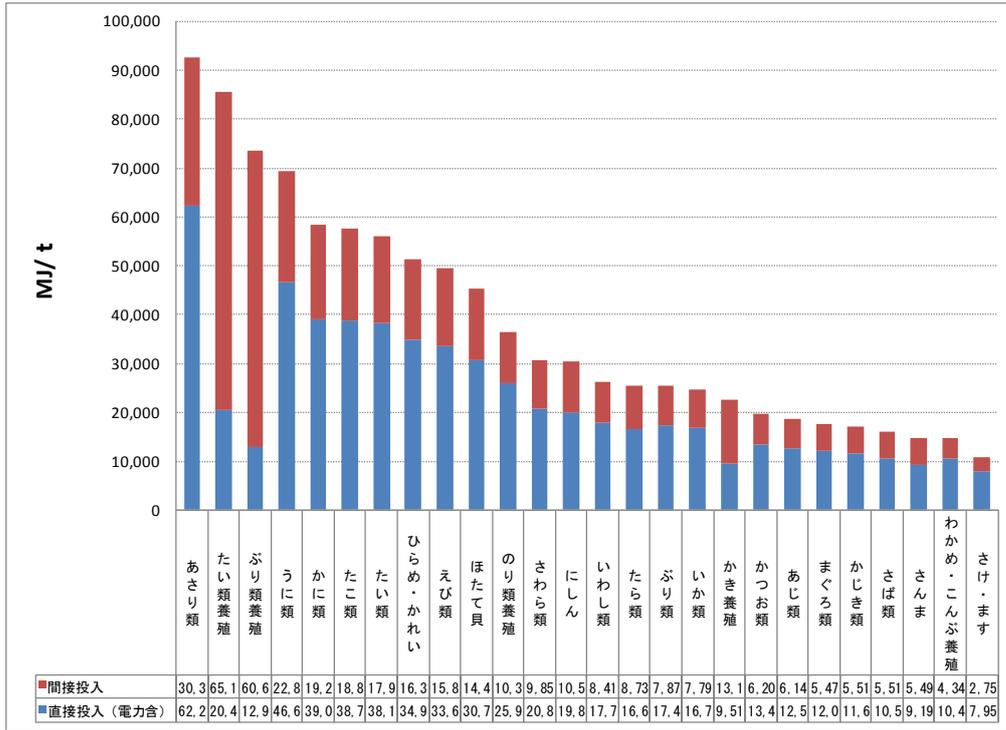


図 3-5 水産物の投入エネルギー量

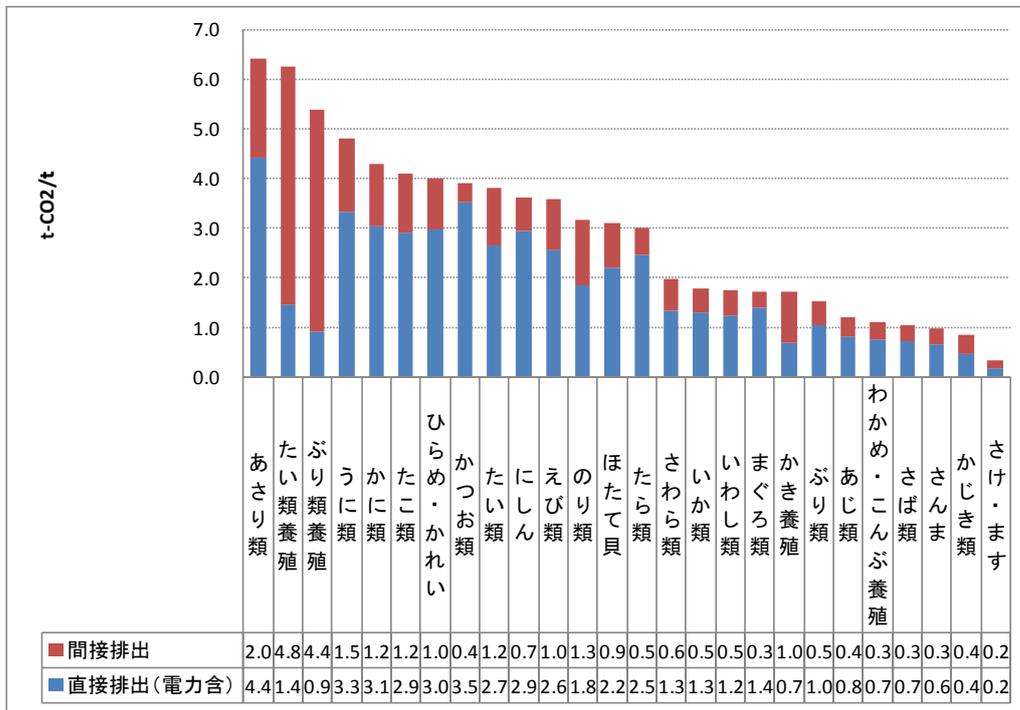


図 3-6 水産物の CO₂ 排出量

(2) (生産投入エネルギー)/(食品熱量)比の推計

図 3-7 に、水産物ごとの生産投入エネルギーと食品熱量比率を示す。食品熱量の何倍の

エネルギーが漁獲時に投入されているかを示すものである。この値が小さい品目ほど、少ない投入エネルギーで多くの熱量を摂取できる効率の良い食品と言える。

(生産投入エネルギー)/(食品熱量)比は、あさり類が737と際立って高くかに類、たこ類、うに類、えび類、ほたて貝と続き、これらは食品熱量の100倍以上のエネルギーが、その生産時に投入されている。比の値が低いものはさんま(11.3)、さけ・ます(13.9)、さば類(14.6)、ひらめ・かれい(21.7)、ぶり類(23.7)、まぐろ類(24.1)などであった。農産品のように(投入エネルギー)/(食品熱量)比が1以下、すなわち食品熱量が生産投入エネルギーを上回る品目は無かった。

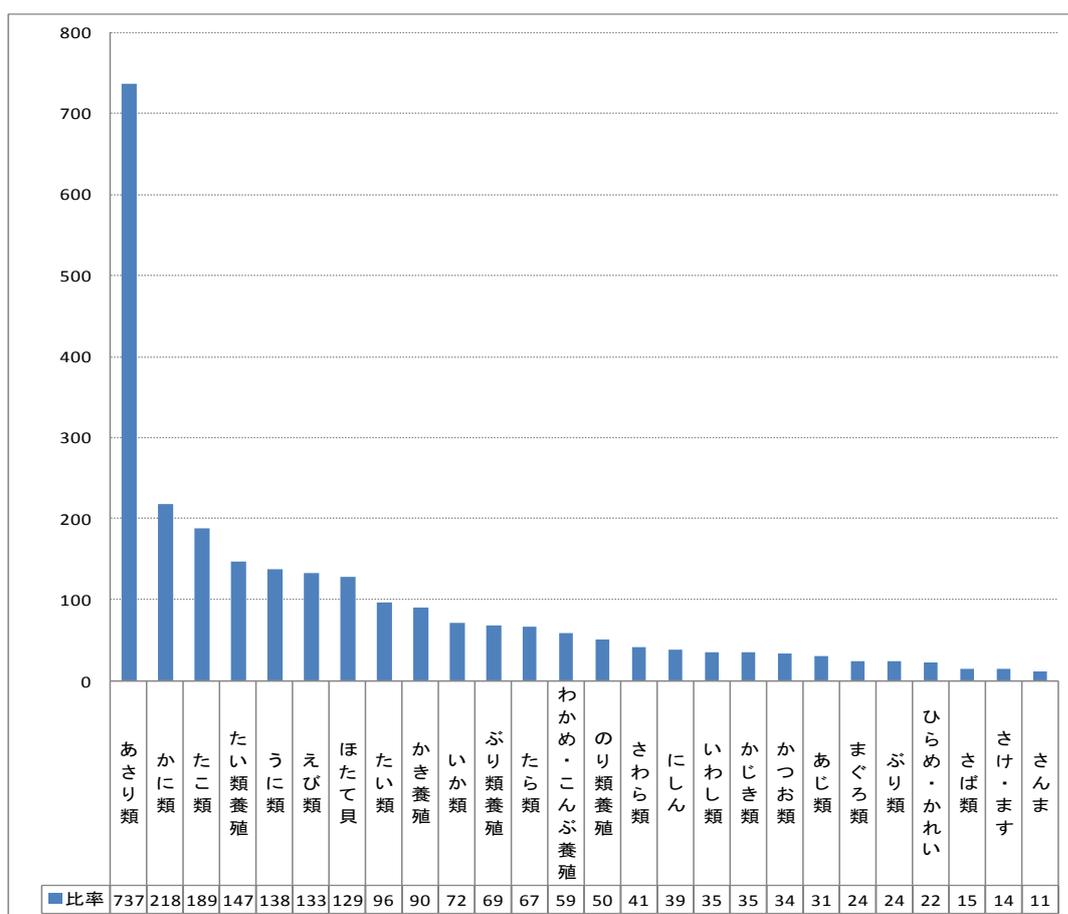


図 3-7 水産物の(生産投入エネルギー)/(食品熱量)比の推計

3.4.3 畜産業部門

3.4.3.1 分析方法(畜産業部門)

分析方法は基本的に農産物・水産物の場合と同じ手法を用いる。主要な畜産物は乳、肉、卵の3食品であるが、本研究では肉類に絞り分析を行う。肉は牛、豚、食鳥が中心であり、牛肉は海外からの輸入が盛んに行われているが、国内で産出される畜産物に投入される投入エネルギー量およびCO₂排出量を分析するという立場から、輸入物は除

外した。

生産費は農林水産省大臣官房統計情報部(現：農林水産省統計部)が公表している『畜産物生産費(平成 12 年度版)』[農林水産省 2001]をベースとする。なお、この『畜産物生産費』において、食鳥(ブロイラー)の調査は平成 6 年度を最後に行われておらず、他の統計資料でもデータは入手できなかった。そのため、平成 6 年度のデータを用いる。

なお、ここで畜産物の分析において留意すべき輸入飼料の問題について予め触れておく。2.5 で触れたように、畜産物の LCI において、輸入飼料が環境負荷・エネルギー消費負荷を押し上げているという先行研究がある[資源協会 1992][Ogino 2004]。輸入飼料の負荷を推計するためには、本来、海外の IO が別途必要になるが、本章では海外の IO までは使用していないため、その分推計される負荷を過小評価している可能性があると言える。この問題については第 7 章にてまた触れる。

3.4.3.2 費目別生産プロセスエネルギー原単位の推計(畜産業部門)

費目別の生産プロセスエネルギー原単位の推計は、基本的に農産物、水産物と同様に行う。本研究では、生産費調査の費目分類を、「種付料・もと畜費(ひな費)」「飼料費」「敷料費」「光熱動力費」「獣医師料・医薬品費」「賃借料及び料金」「繁殖めす畜償却費」「建物・構築物費」「大農具・小農具費」「と畜」の 10 費目に整理する。その上で産業連関表の畜産部門「肉鶏」,「豚」,「肉用牛」への投入金額を参照しながら、生産費調査の費目分類と産業連関表の一部門概念を当てはめ対応させる。畜産物の場合、畜産物それ自体の費用と、飼育する過程の費用を考える必要がある。飼育する過程の費用は一律に「農業サービス」としてすべての費目に織り込む。このようなプロセスで費目を整理していくと、例えば、「飼料費」は「飼料作物」「酪農」「飼料」「農薬」「農業サービス」といった内訳になる。この 5 部門の原単位を支出金額で過重平均して「飼料費」の原単位が算出される。「飼料費」の原単位は畜産 3 部門「肉鶏」,「豚」,「肉用牛」の支出比を反映するため各部門で異なった値となる。また、「種付料・もと畜費(ひな費)」「敷料費」「繁殖めす畜償却費」の各費目は産業連関表の一部門概念と直接対応するものがなく、広範な農業サービスに包含されるものとして一律に「農業サービス」を適用する。

3.4.3.3 分析結果(畜産業部門)

(1)エネルギー投入量・CO₂排出量

図 3-8, 図 3-9 は、前節で述べた手法を用いて推計した肉類の直接間接の生産投入エネルギー量および CO₂排出量を、品目別に示したものである。

二つの図を比較してみると、エネルギー投入量の大きい品目ほど CO₂ 排出量も大きくなる傾向がやはり読み取れ、農産物・水産物と同じ傾向が認められる。牛の投入エネルギー量・CO₂ 排出量がもっとも大きく、ブロイラー(食鳥)の投入エネルギー量・CO₂ 排出量がもっとも小さい。

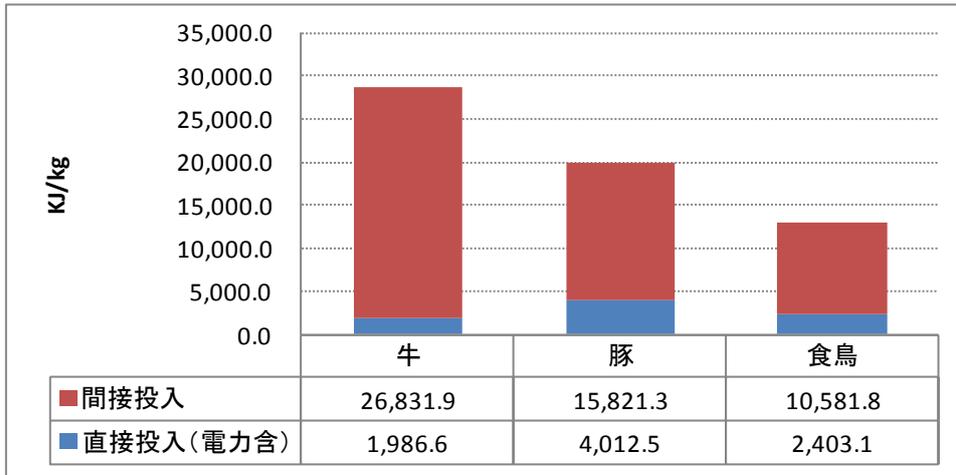


図 3-8 畜産物のエネルギー投入量

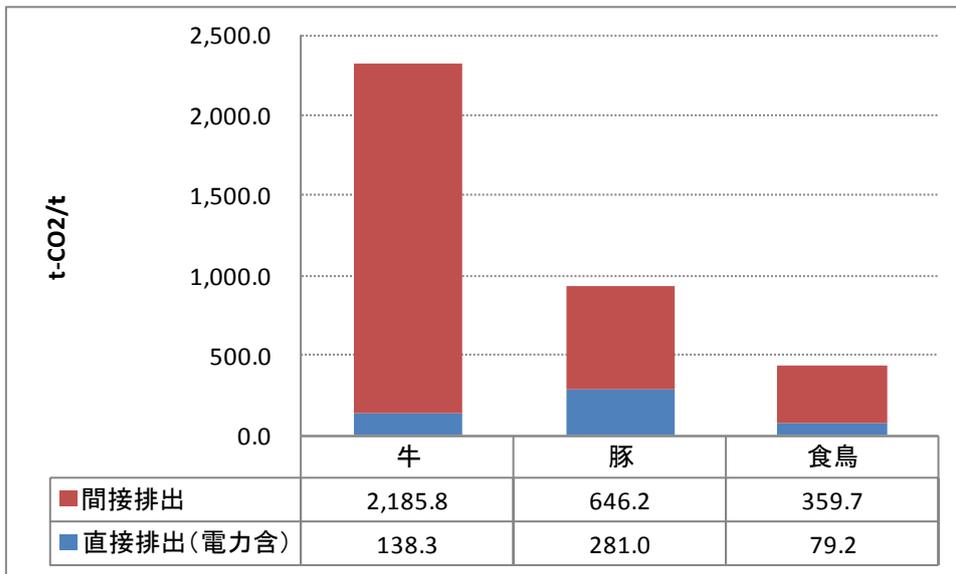


図 3-9 畜産物の CO₂ 排出量

(2)(生産投入エネルギー)/(食品熱量)の推計

図 3-10 は、肉類の(生産投入エネルギー)/(食品熱量)比を示したものである。肉類は農産物や水産物と比較して、(生産投入エネルギー)/(食品熱量)比が全般的に小さい値の範囲に収まっているが、食品としてもっている本来の熱量が大きいことに起因すると考えられる。

全体の傾向をみると、牛(20.5)、食鳥(17.4)、豚(15.6)の順になっており、それぞれにおいて大きな差はない。水産物と同じく、肉類でもやはり(生産投入エネルギー)/(食品熱量)比が 1 以下、すなわち食品熱量が生産投入エネルギーを上回る品目はなかった。

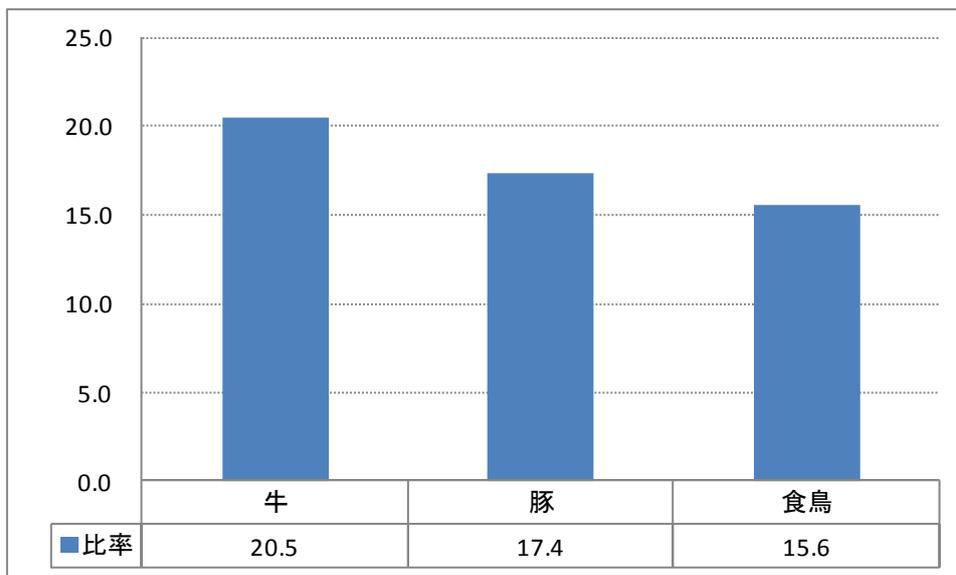


図 3-10 畜産物の(生産投入エネルギー)/(食品熱量)比の推計

3.5 本章のまとめ

本章では、農業部門と水産業部門、畜産部門の 70 品目について品目別エネルギー投入量・CO₂ 排出量を定量化した。2.3 で挙げた IOA の分析上の課題である“最終需要の問題”への対応として、競争輸入型モデル $[I - (Z + M)A]^{-1}$ 型を用いた。また“IO 部門が限定されることによる詳細度の低さ”(the low level of detail)の問題に対し、プロセス法を導入して既存 IO 部門を分解することにより個別農・水・畜産物レベルまでエネルギー投入量・CO₂ 排出量を把握した。分析の結果、食品のエネルギー投入量・CO₂ 排出量の比較からは生産活動に投入するエネルギー量が大きいほど、CO₂ 排出量が大きくなることが示された。また(生産投入エネルギー)/(食品熱量)比の分析からは、これらの食品を得るために殆どの場合、その食品熱量の数倍～数百倍のエネルギー投入が必要になるという結果が得られた。この結果より農業・水産業・畜産業がエネルギー集約的な形態で行われていると推察された。エネルギー投入量が大きい品目には、光熱費の負担の大きい温室栽培の野菜、多額の餌代を要する養殖品などが代表的な食品として挙げられる。LCI へのハイブリッド法の適用の観点からは、エネルギー・環境負荷を押し上げている光熱費や餌代などを焦点をあて、詳細にプロセス法により再分析することにより、ハイブリッド法全体としての精度が向上する。エネルギー・CO₂ 負荷削減の観点からは、温室栽培品や養殖品よりも旬の食品、自然に採取される食品を選択するのが好ましいと考えられる。地産地消型の生産システムは低炭素社会を構築していく上で重要であり、京都議定書第 1 次約束期間以降、それをいかに図っていくかが農業・水産業・畜産業分野

における政策課題の一つと考えられる。

日本の食料品産業は、温室栽培、養殖などを通して商品の高付加価値化を進めてきた。しかしそれが CO₂ 排出量の増大に繋がっていると推察される。そしてその背後にはわが国のエネルギー供給がその大半を化石燃料に依存しているという事情があることは否定できない。地球温暖化防止という命題と、食料生産のあり方について、どのように整合性を持たせていくかを探るために、食料品部門のエネルギー・環境負荷分析研究の一層の深化・発展が望まれる。

参考文献

- [Ogino 2004]A・Ogino,K Kaku,T.Osada,and K.Shimada."Environmental impacts of the Japanese beef-fattening systemwith different feeding lengths as evaluated by a life-cycle assessment method."American Society of Animal Science.82, 2115-2122.2004
- [Heijungs2002] R. Heijungs, Sangwon Suh . The Computational Structure of Life Cycle Assessment . Springer, 256p. 2002
- [Suh 2005] Sangwon Suh and Gjalt Huppes. "Methods for Life Cycle Inventory of a product". Journal of Cleaner Production13.7, p.687-697. 2005
- [環境省 2013]環境省. “2011 年度(平成 23 年度)の温室効果ガス排出量(確定値)について”. 発表資料. <http://www.env.go.jp/press/press.php?serial=16547>, (参照 2013-4-12).
- [資源エネ庁 2002] 資源エネルギー庁. 長官官房総合政策課編. 総合エネルギー統計(平成 13 年度版). 通商産業研究社, 469p. 2001 年
- [資源協会 1992]資源協会. 家庭生活のライフサイクルエネルギー. あんほるめ, 405p. 1992 年
- [塚本 2005] 塚本忠嗣・小出文隆・内山洋司・湯浅雄一郎・川島啓. "時系列産業連関表による各種電源のライフサイクル分析." エネルギーシステム・経済・環境コンファレンス講演論文集.23. 269-272. 2012 年
- [南齋 2003]南齋規介, 森口祐一, 東野達. “産業連関表による環境負荷原単位データブック(3EID)”. 独立行政法人国立環境研究所.
<http://www-cger.nies.go.jp/publication/D031/D031.pdf>, (参照 2012-10-30).
- [農林水産省 2003a]農林水産省. 大臣官房統計情報部編. 第 77 次農林水産省統計表〈平成 12 年~13 年〉. 農林統計協会, 851p. 2003 年
- [農林水産省 2003b]農林水産省. 大臣官房統計情報部編. 平成 12 年度漁業経済調査報告(漁家の部). 農林統計協会, 161p. 2003 年
- [農林水産省 2003c]農林水産省. 大臣官房統計情報部編. 平成 12 年度漁業経済調査報告(企業の部). 農林統計協会, 150p. 2003 年
- [農林水産省 2001] 農林水産省. 大臣官房統計情報部編.畜産物生産費(平成 12 年度版). 農林統計協会, 221p. 2002 年

第4章 地域性を考慮した農作物の生産および輸送に伴うCO₂排出量評価

本章では、地域レベルでの農作物の生産と、輸送に伴い発生するCO₂排出量について評価する。4.1では研究の背景について述べる。4.2では研究の手法について説明し、生産プロセス・輸送プロセスのCO₂排出量推計方法、生産・輸送に伴うCO₂排出量推計の方法についてそれぞれ説明する。4.3では生産プロセスのCO₂排出原単位とCO₂排出量、および輸送プロセスのCO₂排出量と生産・輸送に伴うCO₂排出量について推計結果を示す。4.4では本章の結論について述べる。

4.1 はじめに

前章では、全国レベルにおいて農業部門と水産業部門、畜産業部門の70品目について品目別エネルギー投入量・CO₂排出量を分析した結果、農業・水産業・畜産業がエネルギー集約的な形態で行われていることが示された。そしてエネルギー・CO₂負荷削減の観点からは、温室栽培品や養殖品よりも旬の食品、自然に採取される食品を選択する方が望ましく、地産地消型生産システムは低炭素社会構築上、重要であると考察した。

環境負荷低減の観点からみた農作物の地産地消は、フードマイレージの短縮化により、輸送時のCO₂排出量を低減できるという点で有効である。しかしながら、農作物供給におけるCO₂負荷は輸送のみでなく、生産方法の特徴にも密接に関連していると推察される。従ってライフサイクル全体から見たCO₂負荷分析が必要であるが、その手法確立までには未だに至っていない。また今後は国家レベルのマクロ的なCO₂削減施策に加え、各都道府県の特徴に応じた地域レベルのミクロ的な削減施策の構築・展開と、それに資する分析を行っていく必要がある。農作物の輸送プロセスにおける環境負荷を推計した研究としては、根本[根本 2006]、吉川ら[吉川 2006]やChristophel et al. [Christophel 2008]等による成果が例として挙げられる。しかしながら、地域レベルでの農業部門の低炭素化を進めていくためには、各都道府県の特徴を反映した分析が必要であるが、先行研究ではそこまでには至っていない。

以上より、本章の目的は、都道府県レベルにおける農作物の生産・輸送に伴うCO₂排出量を推計し、その生産特性と輸送特性を定量化すること、そして低炭素社会構築という視点から地産地消の効果を定量的に明らかにすることである。具体的には、多くの農作物の産地となっており、分析可能な作物が多く存在する茨城県をモデル県として採用した。そして県内で消費される農作物のCO₂排出量を、地産地消の場合と他県から輸送した場合について、生産および輸送プロセスを包含して推計し比較・分析した。なお、本研究における地産地消の定義であるが、茨城県内で生産された農作物を、茨城県内で

最大の卸売市場である水戸公設地方卸売市場で出荷することと定義する。

4.2 研究手法

4.2.1 生産プロセスの CO₂ 排出量推計方法

2.4で概観したように、生産プロセスの推計にはIOAとプロセス法(積み上げ法)を組み合わせたハイブリッド法を採用した。具体的には、各生産プロセスのインベントリデータと、IOAにより推計した、生産プロセスに対応する産業部門のCO₂排出原単位を用いることにより、農作物の重量当たりのCO₂排出量と価格当たりのCO₂排出量を推計している。

本研究で使用した統計資料は、エネルギーバランス表[資源エネ庁2002]、産業連関表[総務省2004]、産業連関表付帯表の物量表[総務省2004]、燃料報告書[南齋2003]である。更に農作物ごとのインベントリデータは農林水産省統計表[農林水産省2003a]から収集した。また、推計対象年は2000年とし、統計資料もすべて2000年または2000年度のデータを使用している。

4.2.1.1 部門別 CO₂ 排出原単位の推計方法

2000年産業連関表の基本分類は行517部門×列405部門であるが、本章の分析は農林業と関連産業の分析に主眼を置いていることと、4.2.1.2でのエネルギーバランス表の部門数との整合を取り易くするために、産業連関表を225×225部門に統合した。統合の詳細については別途文献[小田2008]を参照されたい。

IOAにより各部門の生産活動による波及効果を求める場合、日本のような輸入比率の高い市場経済においては、2.3.7で概観したように競争輸入型・輸入内生モデル、すなわち競争輸入型モデル $(\mathbf{I} - (\mathbf{I} - \hat{\mathbf{M}})\mathbf{A})^{-1}$ 型が一般的には適用される。本章では前章の方法を適用し、同一の競争輸入型モデル $[\mathbf{I} - (\mathbf{I} - (\hat{\mathbf{Z}} + \hat{\mathbf{M}}))\mathbf{A}]^{-1}$ 型を用いて、部門ごとの直接間接CO₂排出原単位を求める[小田2008]。当モデルの特徴は、一般のIOAに用いられる競争輸入型モデル $(\mathbf{I} - (\mathbf{I} - \hat{\mathbf{M}})\mathbf{A})^{-1}$ 型と比較して、在庫についても輸入と同様とみなし、在庫を生産化する点である。このモデル適用の理由は、通常競争輸入型モデル $(\mathbf{I} - (\mathbf{I} - \hat{\mathbf{M}})\mathbf{A})^{-1}$ 型では、部門によっては負の最終需要が誘発され、結果としてCO₂排出量も負値となるためである。現実には、在庫の取り崩しを行っても負のエネルギー消費が生じるというわけではない。従って、本モデルでは推計前年の在庫と、推計年の在庫からのCO₂排出量を等価とみなして評価を行っている。(4.1)式にその推計式を示す。

$$\mathbf{q}_i = \frac{C_i}{X_i} [\mathbf{I} - (\mathbf{I} - (\hat{\mathbf{Z}} + \hat{\mathbf{M}}))\mathbf{A}]^{-1} \cdot [(\mathbf{I} - (\hat{\mathbf{Z}} + \hat{\mathbf{M}}))\mathbf{F}^d + \mathbf{E}] \quad (4.1)$$

$\frac{C_i}{X_i} [\mathbf{I} - (\mathbf{I} - (\hat{\mathbf{Z}} + \hat{\mathbf{M}}))\mathbf{A}]^{-1}$ の各成分の列和:部門*i*の直接間接エネルギー消費原単位

$[(\mathbf{I} - (\hat{\mathbf{Z}} + \hat{\mathbf{M}}))\mathbf{F}^d + \mathbf{E}]$: 国産品に対する最終需要

q_i : 部門 i の直接間接 CO_2 排出量, c_i : 部門 i の直接 CO_2 排出量, X_i : 部門 i の国内生産額, $\hat{\mathbf{Z}}$: 在庫変動, $\hat{\mathbf{M}}$: 輸入を主対角要素とした対角行列, \mathbf{I} : 単位行列, \mathbf{A} : 投入係数行列, \mathbf{F}^d : 国内最終需要, \mathbf{E} : 輸出

直接 CO_2 排出量の推計方法は 4.2.1.2 に示す.

4.2.1.2 部門別直接 CO_2 排出量の推計方法

IOA を実施するためのエネルギー・環境負荷データとして、南齋らによる「産業連関表による環境負荷原単位データブック」[南齋 2003]があげられるが、本研究では前章の手法を踏襲し、エネルギーバランス表と産業連関表の付帯表である物量表を使用し、より簡易に CO_2 排出原単位を推計した。具体的には、エネルギーバランス表の部門毎のエネルギー消費データを、産業連関表の部門に配分し、各部門の直接エネルギー消費量を燃料種ごとに推計した。さらに、燃料報告書の燃料種別の排出係数を乗じて、各部門の直接 CO_2 排出量を推計した。

エネルギーバランス表では、大別してエネルギー転換部門、産業・民生部門、運輸部門別に、燃料種ごとのエネルギー消費量が記載されている。例えば、エネルギーバランス表の産業・民生部門内の「農林業」は、産業連関表の「米」「麦類」「いも類」など 23 部門の産業のエネルギー消費量に相当する。以下、エネルギーバランス表のエネルギー消費量を、産業連関表の各部門に配分する方法について述べる。

・産業部門の配分方法

農業、食品工業以外の産業部門については、産業連関表の国内生産額の比率に従い、各燃料の消費量を按分した。

・農林業・食品工業部門

農林業について前述の国内生産額比でエネルギー消費量を按分する方法では、農業部門間のエネルギー集約度の差が捨象され、詳細な農産品ごとのエネルギー・環境負荷分析を進めていく際に現実との乖離が大きくなる。例えば、単位産出額あたりのエネルギー消費量は、野菜部門と米部門では、実際には大きく異なる。そこで、本研究では、物量表のデータを用い、農林業全体のエネルギー消費量に占める各農業部門のエネルギー消費量比率を算出し、当比率によりエネルギーバランス表の「農林業」部門の値を配分した。食品工業についても同様の方法を適用した。配分方法について表 4-1 に示す。

表 4-1 農林業の直接エネルギー配分方法

エネルギーバランス表	1部門	農林業				
産業連関表	23部門	米	野菜	果実	…	特用林産物
エネルギー消費割合[%]	合計100	7.49	40.6	1.20	…	8.43
エネルギー消費量[PJ]	合計299.19	22.41	121.5	3.59	…	25.22

・エネルギー転換部門

エネルギー転換部門は、具体的には「電気事業者」「熱供給事業者」「都市ガス」「石油化学」等の部門を指す。転換時に原料となるエネルギー源の消費・減耗量，エネルギーの自家消費量，電力等の送配変電ロス等が負値で記載されており，転換部門により製造・生成されたエネルギー量が正值で記載されている。転換時に原料となるエネルギー源の消費・減耗量を転換部門のエネルギー消費として計上すれば，転換された二次エネルギーが最終消費される際に再びエネルギー消費として計上され，二重計上となる。よって，エネルギー転換部門のエネルギー消費量は，転換部門自家消費と送配変電ロスのみを配分した。

・揮発油・軽油の配分

軽油・揮発油に対しては，エネルギーバランス表においては，運輸部門の「旅客用」「貨物用」の2部門に一括して計上されており，どの産業でどれだけ消費されたかに関する情報が存在しない。そのため，産業連関表の物量表から生産部門，運輸部門，業務部門，家計消費部門の4部門間の消費比率を算出した。当比率を用いエネルギーバランス表の消費量を4部門に配分後，更に産業連関表の国内生産額の比率で消費量を配分した。

・運輸部門

エネルギーバランス表では，運輸部門は「旅客用」「貨物用」の2部門のみである。運輸部門に関してはその輸送機関ごとにある程度使用燃料を特定できるため，該当する燃料のみを配分する。例えば，産業連関表の「航空輸送」部門の使用燃料はジェット燃料のみとし，他部門における当該燃料の使用は存在しないため，100%航空輸送部門に帰属させた。船舶については「外洋輸送」「沿海・内水面輸送」「港湾輸送」部門の使用燃料をA重油，B重油，C重油，軽油と規定し，消費量は3部門間の国内生産額の比率により配分した。その他の輸送機関についても同様に推計した。

4.2.1.3 CO₂排出量の推計方法

農林水産省統計表の生産費調査[農林水産省2003a]に示されている生産費費目より，生産プロセスに相当すると考えられる7つの費目を選択した。その内訳は，種苗・苗木，肥料，農業薬剤，農機具，農用建物，賃借料・作業委託料，土地改良・水利費および光熱動力費のとおりである。なお，費目分類は上記以外に雇用労賃，支払い小作料，物件税及び公課諸負担，負債利子があるが，これらは産業連関表の部門との整合化が困難で

あり、CO₂排出量も微細であると推察されるため、分析対象から除外した。また、選択した7つのプロセスにおいて、光熱費を直接影響、それ以外を間接影響とみなして、以後の推計を行った。

生産プロセスのCO₂排出量は(4.2)式により推計可能である。また、(4.2)式に重量当たりの価格を乗じることにより、生産プロセスにおける価格当たりのCO₂排出量を推計することが可能である。

$$CO2p = \sum_{i=1}^k \frac{q_i \cdot c_i \cdot h}{w} \quad (4.2)$$

ここで、CO₂p：生産プロセスにおける重量当たり CO₂ 排出量(g-CO₂/kg)
 q_i ：プロセス i における直接間接 CO₂ 排出原単位(g-CO₂/円)
 c_i ：プロセス i における面積当たり投入費用(円/ha)
 h ：作付面積(ha)
 w ：収穫量(kg)であり、 c_i, h, w は都道府県別の生産費調査において、各農作物別に示されている。また、生産プロセスと産業連関表の部門対応を表 4-2 に示す。表 4-2 の生産プロセスの中で、光熱動力に対応する「費目別光熱動力原単位」とは、産業連関表部門の中で光熱動力として投入されると考えられ、「石油製品」「電力」「都市ガス」部門の投入金額に基づいて推計した。また、生産プロセスの原単位は、プロセスに相当する部門の原単位を生産額の比率で配分した後、合算して求めた。

表4-2 生産プロセスと産業連関表の部門対応

	生産プロセス	産業連関表部門
直接影響	光熱動力	費目別光熱動力原単位
	種苗・苗木	種苗
間接影響	肥料	有機質肥料(除別掲)
		化学肥料
	農業薬剤	農業
	諸材料	衣服
		紙製容器
		その他の窯業・土石製品
		その他の金属製品
	農機具	分類不明
		自動車修理
	農用建物	機械修理
		プラスチック製品
	賃借料および料金	建設補修
		農業サービス
		卸売
		小売
		金融
保険		
土地改良・水利費	物品賃貸業	
	賃自動車業	
	建設補修	

4.2.2 輸送プロセスのCO₂排出量推計方法

輸送プロセスにおけるシステム境界を、各都道府県の代表的卸売市場を1ヶ所選択し、同卸売市場から茨城県の水戸公設地方卸売市場までの輸送と定めた。推計には、物流センサス[国土交通省 2000]、国土交通白書[国土交通省 2002]、地理情報データ[NAVITIME 2009]の各データを使用した。推計対象年は2000年とし、データもすべて2000年または2000年度に統一した。

最初に、物流センサスの都道府県間流動量調査(農林業)を使用し、茨城県への輸送実績データのある都道府県において、各都道府県を出発点、茨城県を到着点として農作物の輸送分担率を推計した。輸送機関は鉄道、トラック(自家用、混載、営業用)、トレーラ、海運(フェリー、RORO船)であった。

次に、輸送プロセスのCO₂排出量を下記(4.3)式により推計した。(4.3)式により、輸送距離と輸送分担率を考慮したCO₂排出量が推計できる。

$$CO_2t = \sum_i \sum_j T_{ri} L_i c_j \quad (4.3)$$

ここで、 CO_2t ：生産地 i から消費地までの輸送プロセスにおける CO₂ 排出原単位(g-CO₂/kg)、 T_{ri} ：生産地 i から消費地までの輸送機関 j の輸送分担率(%), L_i ：生産地 i から消費地までの輸送距離(km)、 c_j ：輸送機関 j の CO₂ 排出原単位(g-CO₂/t・km)を示す。輸送機関別の CO₂ 排出原単位は国土交通白書の値を使用した。原単位は輸送機関別に、鉄道：21(g-CO₂/tkm)、トラック(自家用、混載)：372(g-CO₂/tkm)、貸切トラック：178(g-CO₂/tkm)、トレーラ：1180(g-CO₂/tkm)、海運：40(g-CO₂/tkm)のとおりである。また輸送距離については、都道府県ごとに道路輸送をした場合における最短距離について地理情報データを使用して推計し、輸送距離とした。

4.2.3 生産および輸送に伴うCO₂排出量の推計方法

4.2.2 までに推計した、農作物の生産プロセスおよび輸送プロセスのCO₂排出量を積算することにより、都道府県の特徴を反映した、茨城県で消費される農作物のCO₂排出量が推計される。4.2.1.3 で推計した農作物のうち、水戸公設地方卸売市場の年報[水戸市 2006]にデータが存在し、かつ比較対象県の多いレタス、ねぎの2品目について、生産および輸送に伴うCO₂排出量を推計し、地産地消の場合と他都道府県から輸送した場合について比較分析を行った。

4.3 推計結果

4.3.1 生産プロセスのCO₂排出原単位とCO₂排出量

農作物の生産プロセスにおける直接間接CO₂排出原単位を図4-1に示す。同図より、

原単位は米、野菜など作物の種類により異なる。さらに、各プロセス別の原単位を比較すると、全体の排出量に占める割合が大きい方は直接影響であることが分かる。特筆すべき作物は野菜であり、直接原単位が88.0(g-CO₂/円)、間接原単位が20.1(g-CO₂/円)と、直接影響が間接影響よりも4.4倍大きい。これは、野菜の温室栽培時に使用される重油や電力からの排出が寄与していると推察される。

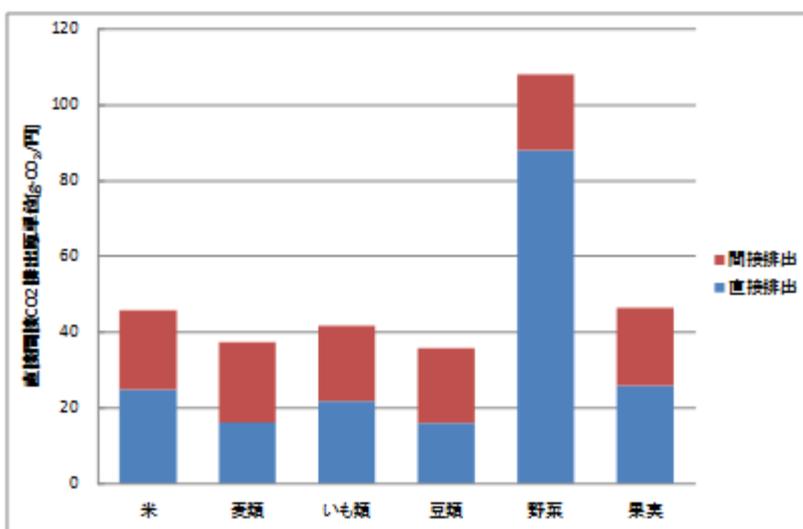


図4-1 農作物の直接間接CO₂排出原単位

図 4-2, 図 4-3 に茨城県で生産される農作物 8 種類の、生産プロセスにおける重量および価格当たりの CO₂ 排出量を示す。農作物価格は水戸公設地方卸売市場の年報に記された、出荷地別入荷状況および取扱高より算出した。また、グラフには各プロセス別に排出量を分けて示した。

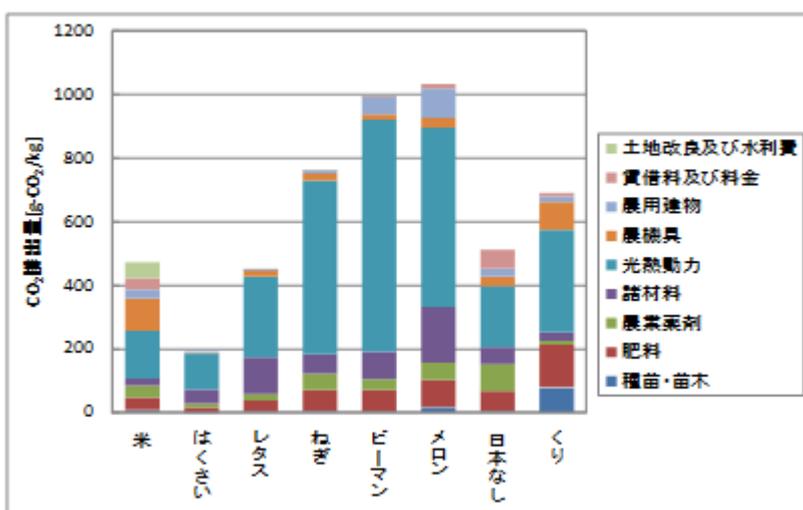


図 4-2 生産プロセスにおける CO₂ 排出量(重量当たり)

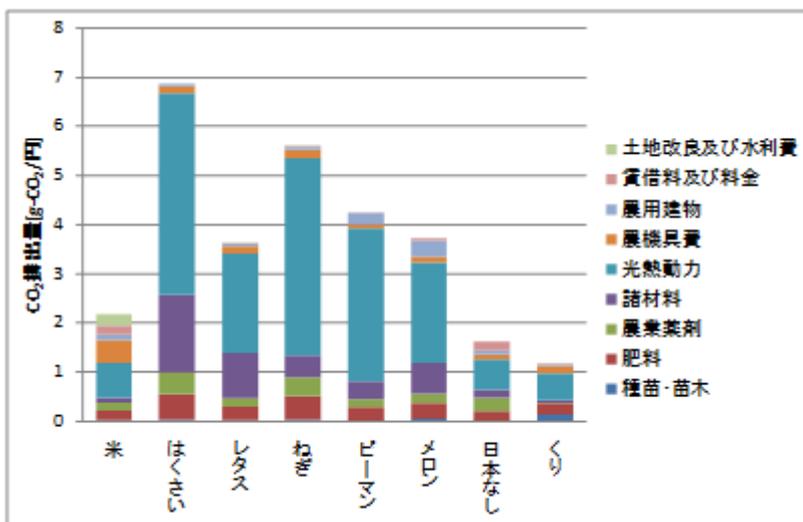


図 4-3 生産プロセスにおける CO₂ 排出量(価格当たり)

各プロセスにおける排出量の割合を見ることを目的に、図4-4に、農作物ごとに生産プロセス全体に対する各プロセスのCO₂排出割合を示す。

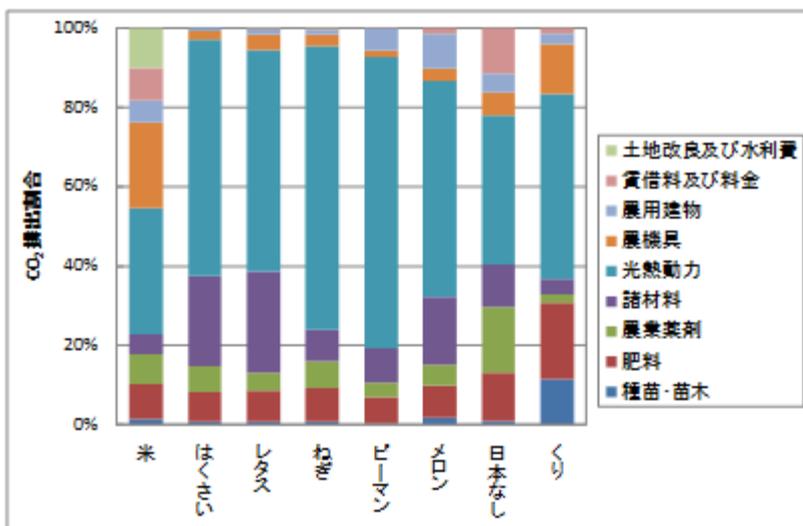


図4-4 生産プロセスにおけるCO₂排出割合

図 4-2, 図 4-3 から、各品目によって CO₂ 排出量は相当異なる。また、重量当たり、価格当たりによっても排出量の品目の順位は異なる。米はどちらの場合においても共通して排出量が少ない。水田からは二酸化窒素(NO₂), メタン(CH₄)などの温室効果ガスが排出されているが、本研究で対象とした CO₂ 排出量についてのみ着目すると、米は環境負荷の少ない作物であることが示された。

図4-4から、全体の排出量に対する各プロセスの排出割合は品目による相違が大きい。

例えば、米部門では光熱動力の占める割合が他品目に比べて小さく、農機具、土地改良及び水利費の占める割合が大きくなっている。それに対し、はくさい、レタスなど、温室による栽培が盛んな作物は、エネルギー投入の中で光熱動力が占める割合が高いため、生産プロセスの直接影響の比率が高くなっている。

4.3.2 輸送プロセスにおける CO₂ 排出量

図 4-5 に、各都道府県から茨城県への農作物の輸送分担率を示す。また、図 4-6 に、各都道府県から茨城県までにおける、農作物の輸送プロセスの CO₂ 排出量を示す。

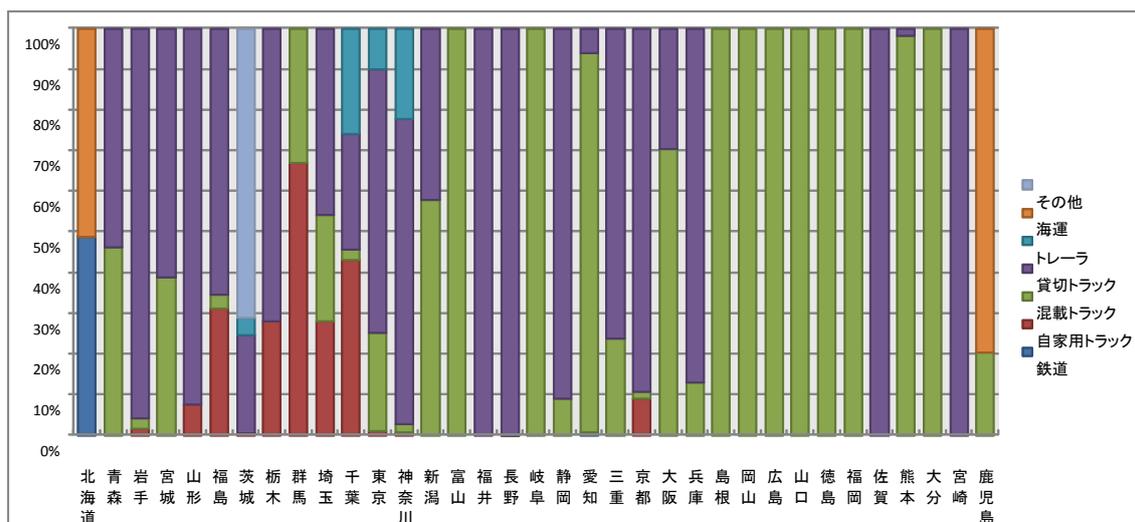


図 4-5 各都道府県から茨城県への輸送分担率(農林業)

図 4-5 では、輸送分担の各比率は都道府県によって相違が大きいことが示されている。例えば、北海道における輸送分担率は、鉄道が 48.7%、海運が 51.2%と、99.9%を鉄道、海運輸送が占めており、トラック輸送の割合は微少である。それに対し関東地方の都県はトラック輸送が大半を占めており、中でも埼玉、千葉など、茨城県周辺の県においては自家用トラックの割合が高くなっていることが分かる。

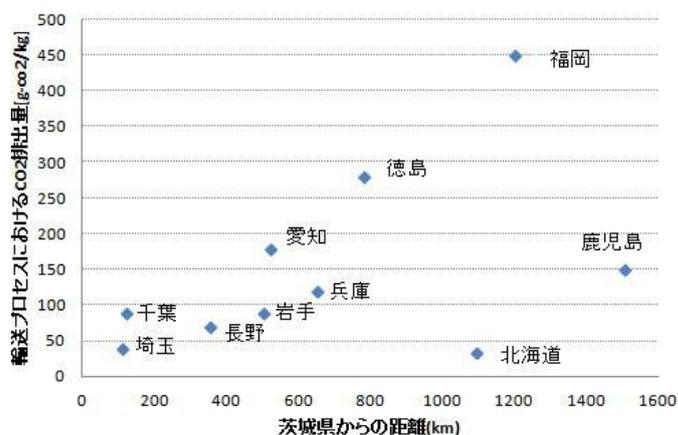


図 4-6 茨城県までの輸送プロセスにおける CO₂ 排出量

図4-6より、茨城県からの距離が長い県ほど多くのCO₂を排出する傾向が読み取れるが、距離と排出量の関係は比例関係にあるとは言えず、輸送のCO₂排出量は輸送手段にも依存していることが分かる。例えば、北海道では輸送原単位の小さい鉄道と海運輸送が殆どであるため、茨城県までのCO₂排出量は茨城近隣の県よりも小さい。また、茨城県に隣接する千葉県は輸送距離こそ短いものの、輸送原単位の大きいトレーラ、自家用トラックの割合が大きいため、排出量は埼玉県の2倍以上となっている。

4.3.3 生産および輸送に伴うCO₂排出量

図4-7、図4-8に、レタスとねぎ2品目それぞれにおける、各都道府県での生産および茨城県までの輸送に伴うCO₂排出量を推計した結果を示す。グラフには茨城県への出荷量の多い都道府県を左から降順に並べてある。なお、本研究では消費地である茨城県までの輸送距離を、水戸公設地方卸売市場までの距離と仮定、推計しているため、生産地が茨城県の場合には輸送距離は0kmである。

図4-7より、レタスの生産および輸送に伴うCO₂排出量は、茨城県で生産した場合に最小となり、地産地消の優位性が示される結果となった。全体の傾向をみると、輸送距離が長い県ほど多くのCO₂を排出している傾向が認められる。しかしながら、香川県、兵庫県においては、排出量全体に占める割合の中で、輸送よりも光熱動力からの排出量が多いなど、都道府県ごとに生産の特徴も出現する結果が認められた。

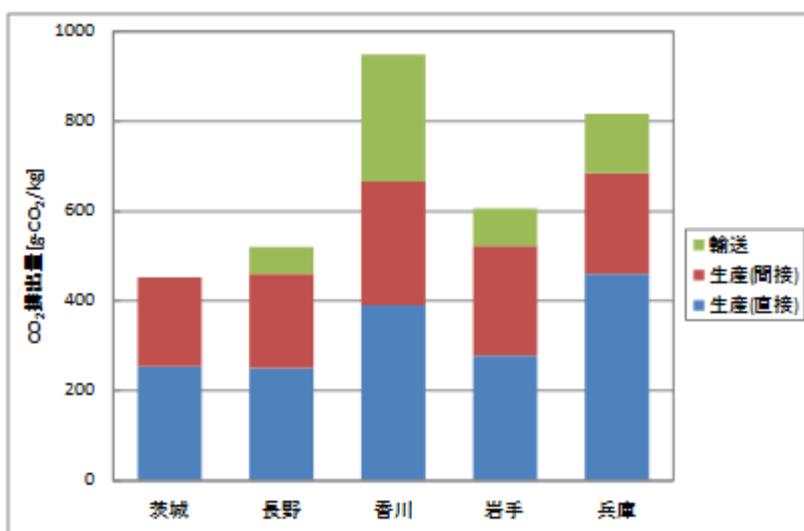


図4-7 レタスの各都道府県での生産と茨城県への輸送に伴うCO₂排出量

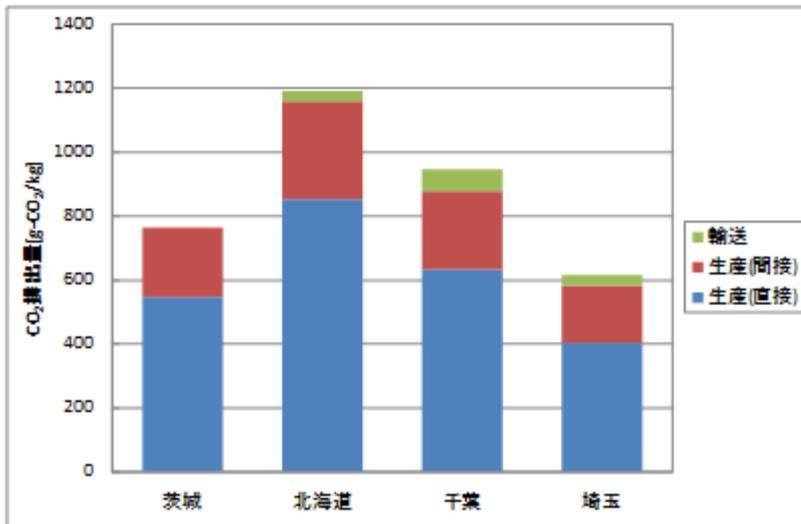


図 4-8 ねぎの各都道府県での生産と茨城県への輸送に伴う CO₂ 排出量

図 4-8 によると、ねぎの生産および輸送に伴う CO₂ 排出量は、埼玉県で生産した場合が最少であり、茨城県で地産地消を行った場合より優位となった。これは埼玉県における生産プロセスが、茨城県よりも低炭素化が進んでいることに起因していると考えられる。この結果から、地産地消は輸送に伴う CO₂ 排出量を削減することが可能であるが、全体の排出量を抑制するためには、全体の排出量に占める割合の大きい温室栽培の省エネルギー化を進めるなど、生産プロセスそのものの低炭素化が必要になる。

4.4 本章のまとめ

本章では、2.3 で挙げた IOA の分析上の課題である“最終需要の問題”への対応として、競争輸入型モデル $[I - (Z + M)A]^{-1}$ 型を用いた。また“IO 部門が限定されることによる詳細度の低さ” (the low level of detail) の問題に対し、プロセス法を導入して既存 IO 部門を分解することにより茨城県をモデル県として、地域の個別農産物レベルまで生産プロセスにおける CO₂ 排出量を推計した。また同県を最終消費地として、輸送プロセスまで包含した農作物の CO₂ 総排出量を推計し、他都道府県から輸送した場合の総排出量との比較分析を実施した。その結果より、以下の 3 点が明らかとなった。

- ・生産プロセスにおける CO₂ 排出量は品目別に異なり、露地栽培と温室栽培における光熱動力費の相違が全体の排出量の差異に大きく影響する。
- ・輸送プロセスにおける CO₂ 排出量は距離のみではなく、輸送手段にも依存する。
- ・生産および輸送プロセスを考慮すると、露地栽培、温室栽培による CO₂ 排出量の相違により、生産プロセスからの排出量が輸送プロセスからの排出量よりも大きくなる場合

がある。

以上のことから、CO₂ 負荷低減の視座からは、農作物別に、地産地消と他都道府県からの輸送を組み合わせ、食糧供給プロセス全体からの低炭素化を構築していくことが必要である。

また第3章と同様に、ハイブリッド法の技法上の観点からは、エネルギー・環境負荷を押し上げている要因に焦点をあて、詳細にデータ収集を行いプロセス法により再分析し、LCIにフィードバックすることにより、ハイブリッド法全体としての精度が向上する。

今後の発展としては、都道府県ごとに生産プロセス原単位を推計し、より地域の特性を反映した CO₂ 排出量の推計、農作物のライフサイクル全体から見た CO₂ 排出量の推計、海外からの輸入作物との比較分析、時期を考慮した CO₂ 排出量の推計や生産地別のシナリオを設定し、都道府県別、品目別に CO₂ 排出量の少ない供給方法の分析を行っていくことなどが考えられる。

参考文献

[Christophel 2008]Christophel.Weber and H.Scottmatthews. "Food-Miles and the Relative Climate Impacts of Food Choices in the United States.

"Environmental Science & Technology.42. 3508-3513. 2008 年

[NAVITIME 2009]ナビタイムジャパン. " NAVITIME ナビゲーション総合サイト(車ルート検索) "NAVITIME ナビゲーション総合サイトホームページ.

<http://www.navitime.co.jp/>(参照 2009-12-1)

[小田 2008]小田秀充, 内山洋司. "産業連関表を用いた食料品部門のエネルギー・環境負荷分析." 産業連関.16.2. 27-41. 2008 年

[国土交通省 2000]国土交通省. "平成 12 年度都道府県間流動量(代表輸送機関・品類別)ー重量ー" 国土交通省ホームページ.

<http://www.mlit.go.jp/seisakutokatsu/census/syukei1.html>. (参照 2012-11-1).

[国土交通省 2002]国土交通省. "平成 14 年度交通白書" 国土交通省ホームページ.

<http://www.mlit.go.jp/hakusyo/mlit/h14/H14/index.html>>, (参照 2012-1-12)

[資源エネ庁 2002]資源エネルギー庁. 長官官房総合政策課編. 総合エネルギー統計(平成 13 年度版). 通商産業研究社, 469p. 2001 年

[総務省 2004]総務省. "平成 12 年(2000 年)産業連関表・物量表". 政府統計の総合窓口.<http://www.e-stat.go.jp/SG1/estat/List.do?bid=000000750003&cycode=0>, (参照 2013-4-1).

[南齋 2003]南齋規介, 森口祐一, 東野達. "産業連関表による環境負荷原単位データブック (3EID)". 独立行政法人国立環境研究所.

<http://www-cger.nies.go.jp/publication/D031/D031.pdf>, (参照 2012-10-30).

[根本 2006]根本志保子. "フードマイルズにみる生鮮野菜消費と環境負荷の変化." 生活経済学研究 22. 225-235.2006 年

[農林水産省 2003a]農林水産省. 大臣官房統計情報部編. 第 77 次農林水産省統計表<平成 12 年~13 年>. 農林統計協会, 851p. 2003 年

[水戸市 2006]水戸市公設地方卸売市場. 市場年報.

<http://www.mito-ichiba.jp/nenpou/main/index.htm>.(参照2008-12-1)

[吉川 2006]吉川直樹, 天野耕二, 島田幸司. "野菜の生産・輸送過程における環境負荷に関する定量的評価, 環境システム研究論文集." p245-251. 2006 年

第5章 キュポラと誘導炉の経済性分析と環境 LCA 分析

本章では、鑄鉄製造におけるキュポラと誘導炉の経済性と環境性の分析について述べる。5.1 で研究の背景と目的について述べる。5.2 にて研究方法として、分析範囲を示した後、経済性分析について、分析前提、経済性の比較法、キュポラと誘導炉のコスト分岐点算定法について説明する。続いて環境性分析について、ハイブリッド法、中間財のCO₂負荷推計法、環境負荷分析用データ整備について説明する。5.3 では経済性と環境性の分析結果について述べる。環境性分析結果では設備製造時・運用時におけるCO₂発生量、および鑄鍛造品最終財・中間財についてのCO₂負荷と間接影響の分析結果について示す。5.4 にて本章の結論を述べる。

5.1 はじめに

鑄鉄製造業は鉄スクラップや自社戻り材を主な原材料とする代表的なリサイクル産業の一つである。また自動車、工作機械など、基幹産業への部材の供給産業として重要な位置を占めている。キュポラで代表される鑄鉄製造業はものづくりの基盤産業であるが、原材料の不足や高騰による経営難、後継者不足など、抱えている問題も少なくない。最近では、職場環境の改善や温暖化抑制の視点から誘導炉がキュポラに代わって注目されている。誘導炉は電気の電磁誘導による自己発熱作用により、加熱を行う溶解炉であるが、我が国においては1970年代に低周波誘導炉が多数設置され、1980年代にはそれに替わって高周波誘導炉が普及し、現在に至っている[産業研究所 2007]。キュポラの熱源であるコークスに比較して、電気料金は価格変動幅が小さいために、キュポラを誘導炉(電磁加熱)に置き換えていくことは、経営におけるエネルギーコストの安定といった面でプラスとなると考えられる。また、温室効果ガスであるCO₂排出量削減を通して地球温暖化防止に寄与していくことも期待できる。

本論文2.5では金属・素材分野の先行研究を見たが、鑄鉄製造業が製造業の基盤産業であるにもかかわらず研究が比較的少ないことと、エネルギー技術の分析が必要であることを示した。具体的にはキュポラの他に誘導炉を加えた分析が必要であることを指摘した。これまでに鑄鉄製造業のキュポラ・誘導炉という2種類の溶解炉に注目し、経済性・環境性の両面を同時に分析した研究はなかった。そこで本章では鑄鉄製造業における溶解炉に焦点をあて、誘導炉とキュポラを比較検証した。まず、キュポラと誘導炉の経済性の比較を行い、次いでCO₂負荷を定量化した。CO₂負荷の推計では、分析法としてハイブリッド法を用い、把握し切ることが難しい間接影響も合わせて分析した。また中間財としての鑄鍛造品のCO₂負荷を推計した。

5.2 研究手法

5.2.1 範囲

図 1 に本研究の範囲を示す。本研究では鋳鍛造品が製造されるまでを分析範囲とする。本研究は「揺り籠から出口まで」[Heijungs2002]の分析である。

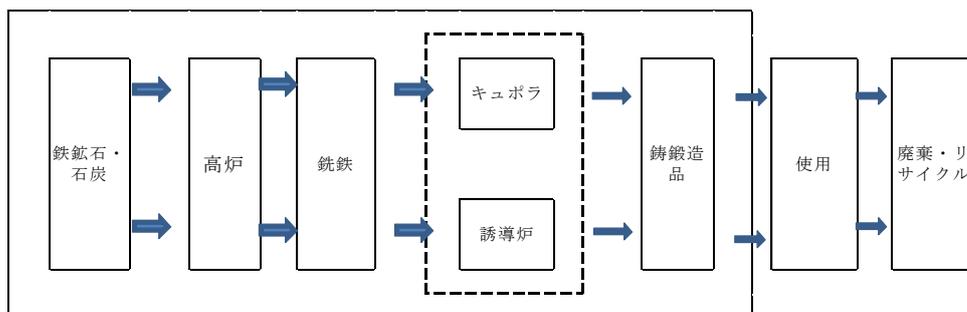


図 5-1 分析範囲

5.2.2 分析方法

経済性・環境性の分析に当たり、現地調査と、その後のヒアリング調査でデータを収集した。経済性分析については、誘導炉とキュボラについて、積算コストを比較した。また資本コスト化を行い、コークス単価やコークス比が変化した場合について分析した。環境性についてはCO₂を対象として分析を行った。以下に方法の詳細を示す。

5.2.2.1 経済性分析

(1)分析の前提設定

ヒアリング調査で得られたデータや情報および文献調査[産業研究所 2007]を踏まえて設定した分析の前提を表 5-1 に示す。

表 5-1 分析の前提(金額は 2008 年価格)

	キュボラ	誘導炉
炉種	2t キュボラ(2 基)相互溶解(2t/h)	1t/600kW 高周波炉(2 炉 2 電源)同時溶解
出湯量	4480t/年	4480t/年
電力費	契約電力 250kW(高压電力 A)	契約電力 1400kW(高压電力)
電力契約	力率 99%, 補機電力 200kW, 力率割引 0.86	力率 99%, 補機電力 200kW, 力率割引 0.86
炉材費用	280 万円/年	540 万円/年
操業時間	1 日 8 時間, 年間 280 日操業(8h/日, 280 日/年)夜間運転無	1 日 8 時間, 年間 280 日操業(8h/日, 280 日/年)夜間運転無
年間操炉費	16,128,000 円 (人員 3 名, 時間単価 2,400 円)	16,128,000 円 (人員 3 名, 時間単価 2,400 円)
耐用年数	12 年間	12 年間

(2) 資本コスト化による経済性比較

経済性の比較は最初に構成費用を積算して設備費であるイニシャルコストを求めたのちに、資本コスト化を行い比較する。将来の時点で発生する費用や便益は、現時点で発生するものに比べ価値が小さいため、割引率 3%として現在価値 NPV に換算する。

$$NPV = \sum_{t=1}^n TC_t / (1+r)^t - TC \quad (5.1)$$

(5.1)式において、 r は割引率、 n は耐用年数、 TC は初期投資計である。 TC_t は t 期における総費用を表し、各年における固定費と可変費の和である。固定費は設備費に年経費率を乗じ資本化した資本コストによって算出できる。また、可変費は操炉費、修繕費、コークス費、電力費から成っている。以上より TC_t は下記式で求めることができる。

$$TC_t = CC \cdot a + OC_t + MC_t + COK_t + EC_t \quad (5.2)$$

CC:設備費(イニシャルコスト), a :年経費率, OC_t :操炉費, MC_t :修繕費, COK_t :コークス費, EC_t :電力費

経済試算に用いた設備の耐用年数 n は 12 年とし、固定費の算出に必要となる年経費率は、減価償却費 8.3%、金利 3%、固定資産税率 1.4%の合計で 12.7%とした。固定資産税率において保険代、諸費は除いた。可変費(OC_t , MC_t , COK_t , EC_t)に関しては、操炉費および修繕費のエスカレーション率を 2%、コークス費、電力費の物価上昇率を 0%として算定した。

(3) キュポラと誘導炉のコスト分岐点の試算

現在価値換算後、キュポラと誘導炉の経済性を分析するために、2つの溶解炉のコスト分岐点を試算する。即ち2つの溶解炉の総コストが等しくなる時のキュポラのコークス単価 X (円/kg)をコークス比別に算定する。以下に X の導出モデルについて詳細を示す。

総コストでキュポラと誘導炉が等しくなる場合、キュポラの総コストを CuT 、誘導炉の総コストを InT とすれば下記(5.3)式が成立する。

$$0 = InT - CuT \quad (5.3)$$

またキュポラに関して、固定費を $CuCC$ 、可変費を CuV 、可変費のうち操炉費を $CuOct$ 、修繕費を $CuMct$ 、電気代を $CuECt$ 、コークス費を $CuCOt$ とすれば、下記式が成立する。

$$CuT = CuCC + CuV \quad (5.4)$$

$$CuV = CuOct + CuMct + CuEct + CuCot \quad (5.5)$$

以上より耐用年数 n 年の場合、キュボラの 1 年間のコークス費 $CuCOtA$ は次式から求められる。

$$CuCOtA(\text{円}) = \{InT - (CuCC + CuOct + CuMct + CuEct)\} / n \quad (5.6)$$

一方で、年間出湯量 Pt 、溶解トン当たり Qkg のコークス投入すなわちコークス比 0.1Q% のキュボラの年間コークス消費量 $CuCOtB$ は次式で求められる。

$$CuCOtB(kg) = \{(Q \cdot 0.001 \cdot P) / (1 - (Q \cdot 0.001))\} \cdot 1000 \quad (5.7)$$

従って(5.3)式を満たすキュボラと誘導炉の総コストの等しくなるコークス価格 X は次式で求めることができる。

$$X(\text{円/kg}) = CuCOtA(\text{円}) / CuCOtB(kg) \quad (5.8)$$

5.2.2.2 環境性分析

次に環境性分析であるが、 CO_2 を対象として分析を行った。本研究で用いる手法について以下に詳細を示す。

(1)ハイブリッド法

LCAのLCIには大別してプロセス法と産業連関分析法の2種類があり、更にこれらを組み合わせたハイブリッド法がある。本研究ではハイブリッド法を採用した。ハイブリッド法はプロセス法と産業連関分析法の長所を組み合わせることを意図した方法である。以前より使用されている[本藤2000]が、近年になって研究の蓄積が進んでいる手法の一つである[Pei 2010] [溝口2010] [Liqui 2011]。以下、ハイブリッド法について、その基礎を成すプロセス法、産業連関分析法と合わせて概説する。

最初にプロセス法(積み上げ法)についてであるが、最も一般的な方法である。この方法はひとつひとつのプロセスや素材に対してその環境影響をボトムアップ式に積算しながら行う基礎的手法である。製造時の要素 l 、利用時の要素 m 、廃棄・リサイクル時の要素 n からなる製品のプロセス法による環境負荷の総和 EP は、(5.9)式のように個々の要素の物理量に環境負荷原単位を乗じて求められる。

$$EP = \sum_i^l mp_i \cdot em_i + \sum_j^m mc_j \cdot ec_j + \sum_k^n mr_k \cdot er_k \quad (5.9)$$

mp_i :製造時における i 要素の物理量, em_i :製造時における i 要素の環境負荷原単位, mc_j :
 利用時における j 要素の物理量, ec_j :利用時における j 要素の環境負荷原単位, mr_k :廃棄・
 リサイクル時における k 要素の物理量, er_k :廃棄・リサイクル時における k 要素の環境
 負荷原単位

一方の産業連関分析法は、産業連関表と産業に係る統計資料、環境負荷データを利用
 して、財の直接・間接の投入エネルギーや環境負荷をトップダウン式に求める方法であ
 る。プロセス法に比べて比較的少ない労力で環境負荷を求めることができるうえに、複
 雑に関連する全産業間の取引関係を網羅しているため、プロセス法では追い切れない他
 のプロセスや産業にまで遡る間接的な影響を把握することができる。これがこの方法の
 最大の長所である。

競争輸入型モデルを用いた産業連関分析法による環境負荷 EIO の導出を以下に示す。

産業連関表における部門 i で直接排出された CO_2 排出量を C_i^d 、生産額を X_i とすれば部

門 i の生産額当たりの CO_2 排出量は $C_i = C_i^d / X_i$ であり、レオンチェフの逆行列の各要素
 を B_{ij} 、部門 j の最終需要を F_j とすれば競争輸入型モデルにおける直接・間接的な CO_2 排
 出量 EIO は(5.10)式により求められる。

$$EIO = \sum_{i=1}^n C_i B_{ij} F_j \quad (5.10)$$

ハイブリッド法は(5.9)式と(5.10)式を用いて次のように示すことができる。

製造時の要素 s 、利用時の要素 t 、廃棄・リサイクル時の要素 v とし、部門 i で生産される
 製品についての環境負荷 E_1 を(5.9) 式によりプロセス法により求めると、

$$E_1 = \sum_o^s mp_o \cdot ep_o + \sum_p^t mc_p \cdot ec_p + \sum_g^v mr_g \cdot er_g \quad (5.11)$$

mp_o :製造時における o 要素の物理量, ep_o : 製造時における o 要素の環境負荷原単位,
 mc_p :利用時における p 要素の物理量, ec_p : 利用時における p 要素の環境負荷原単位, mr_g :
 廃棄・リサイクル時における g 要素の物理量, er_g :廃棄・リサイクル時における g 要素
 の環境負荷原単位

ハイブリッド法によって求められる環境負荷 E_2 は、(5.10) 式と(5.11)式において重複し

ている製造時の環境負荷を除くことにより，下記の(5.12)式で表すことができる。

$$E_2 = \left(\sum_{i=1}^n C_i B_{ij} F_j - \sum_o^s m p_o \cdot e p_o \right) + \left(\sum_p^t m c_p \cdot e c_p + \sum_g^v m r_g \cdot e r_g \right) \quad (5.12)$$

(5.12)式で算定される環境負荷は，収集できたプロセス法の詳細なデータに基づく環境負荷を反映し，かつ産業連関分析法によって把握した間接影響による環境負荷を包含したものである。ハイブリッド法による分析の枠組みを図5-2に示す。

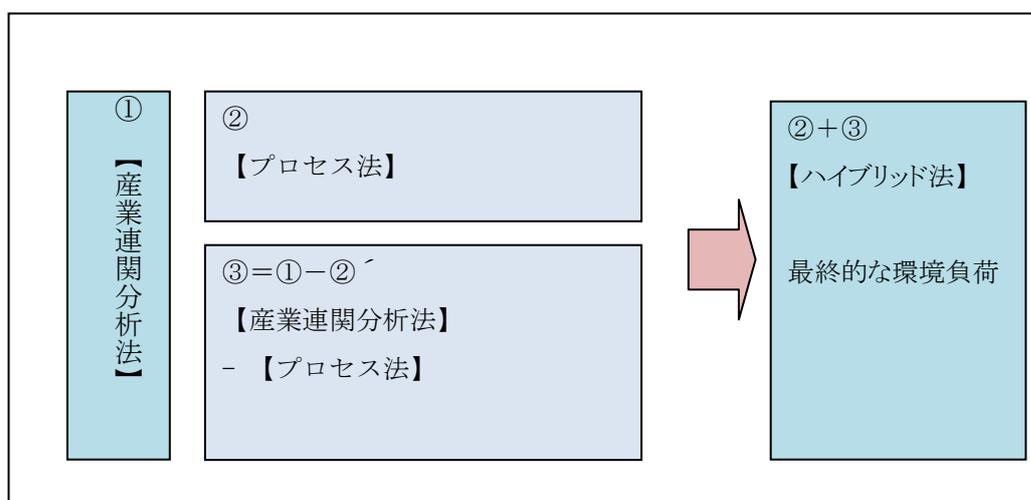


図 5-2 ハイブリッド法による分析の枠組み

(2)中間財としての CO₂ 負荷の推計方法

上記(1)の方法で求めることができる値は，最終財としての環境負荷である。溶解炉から生産される鋳鍛造品は中間財であり，二次加工段階の「自動車部品・同付属品部門」や「その他の一般機械器具及び部品部門」等で多くが最終消費され，最終財としての環境負荷は中間財の時点と比べ大きくなる。中間財としての環境負荷を求めるためには，いわゆる下流部分の環境負荷を除外する必要がある。そこで本研究では産業連関表を鋳鍛造品部門から見た上流部門と下流部門に分割し，下流部門の負荷を別途求め，これを鋳鍛造品全体の負荷から除外することで中間財としての負荷を推計した。

日本を鋳鍛造品部門における上流産業部門と下流産業部門から成る A,B の二つの地域に分け，部門 a から部門 c までが鋳鍛造品の上流部門，部門 d から部門 e までが鋳鍛造品の下流部門とすれば，図 5-3 のような二つの産業連関表となる。この A,B の二地域からなる産業連関表として組み立て，これから求められる下流部分(B 地域)の負荷を鋳鍛造品全体の負荷から除外した分を中間財としての鋳鍛造品の環境負荷と見なす。

地域A (上流)						
中間需要A						最終需要A
部門a	部門b	部門c	部門d	部門e		
部門a				0	0	
部門b				0	0	
部門c				0	0	
部門d	0	0	0	0	0	0
部門e	0	0	0	0	0	0

地域B (下流)						
中間需要B						最終需要B
部門a	部門b	部門c	部門d	部門e		
部門a	0	0	0			
部門b	0	0	0			
部門c	0	0	0			
部門d						
部門e						

図 5-3 産業連関表の二地域への分割

地域間競争輸入型のモデル式は下記で表すことができる。

$$X = (I - (T \cdot A - M \cdot T \cdot A))^{-1} \cdot (T \cdot F - M \cdot T \cdot F + E) \quad (5.13)$$

X : 国内生産高, I : 単位行列, T : 地域間交易係数行列, A : 投入係数行列, M : 輸入係数行列, F : 各部門の国内最終需要行列 E : 各部門の輸出額を要素とした列ベクトル

産業連関表 B 地域における部門 i で直接排出された CO_2 排出量を CB'_i , 生産額を X_{bi} とすれば部門 i の生産額当たりの CO_2 排出量は $Cb_i = CB'_i / X_{bi}$ であり, レオンチェフの逆行列の各要素を BB_{ij} , 部門の最終需要を FB_j とすれば競争輸入型モデルにおける直接・間接的な CO_2 排出量 EIO_b は(5.14)式により求められる。

$$EIO = \sum_{i=1}^n Cb_i BB_{ij} FB_j \quad (5.14)$$

そして中間財としての鑄鍛造品の環境負荷を E_3 とすれば, E_3 は前出の(12)式で求められた E_2 から上記の EIO_b を除いたものであり, 下記(5.15)式で求められる。

$$E_3 = \left(\sum_{i=1}^n C_i B_{ij} F_j - \sum_{o=1}^s mp_o \cdot ep_o - \sum_{i=1}^n Cb_i BB_{ij} FB_j \right) \quad (5.15)$$

(3)環境負荷分析用データの整備

本研究における分析データについてであるが、塚本ら[塚本 2005]と同様に、資源エネルギー庁のエネルギーバランス表[資源エネ庁 2012]を用いて環境負荷分析用データを整備した。産業連関表[総務省 2012]は生産者価格表を使い、エネルギーバランス表とともに現時点で最新の 2005 年度版を用いた。CO₂ 排出量については、消費した燃料種ごとに燃焼時の CO₂ 排出係数を乗じて推計するが、排出係数は国立環境研究所の「燃料報告書」[南齋 2006]にて公表されている値を採用した。

5.3 結果

5.3.1 経済性の分析結果

5.2.2.1(1)の前提に従い、キュポラのコークス比を 15%とし、コークス単価 70 円/kg のケースについて 12 年間のライフサイクルコストを誘導炉と比較した結果を表 5-2 に示す。

表 5-2 ライフサイクルコスト比較

ライフサイクルコスト (12年)		キュポラ①	誘導炉②	①-②
①	イニシャルコスト(円)	24,000,000	38,000,000	-14,000,000
②	ランニングコスト(円) /年	78,539,368	71,999,400	6,539,968
③	12年分ランニングコスト(円)	942,472,419	863,992,800	78,479,619
①+③	ライフサイクルコスト(円/12年)	966,472,419	901,992,800	64,479,619
初年度コスト		キュポラ①	誘導炉②	①-②
初期投資	設備費(円)	24,000,000	38,000,000	-14,000,000
運転①	電力費(円)	4,270,192	50,471,400	-46,201,208
運転②	コークス費(円)	55,341,176	0	55,341,176
運転③	炉材費(円)	2,800,000	5,400,000	-2,600,000
運転④	操炉費(円)	16,128,000	16,128,000	0
①+②+③+④	ランニングコスト(円) /年	78,539,368	71,999,400	6,539,968

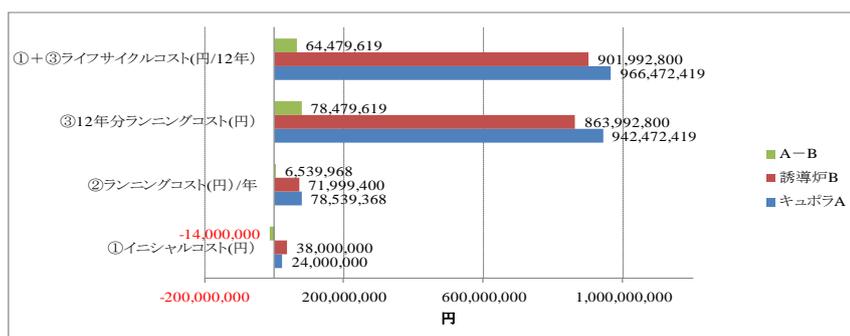


図 5-4 ライフサイクルコスト比較

年間出湯量 4480t/年の溶解炉の場合、イニシャルコストはキュポラ 2400 万円、誘導炉 3800 万円であり、1400 万円の差がある。イニシャルコストでは、キュポラが優位であるが、ランニングコストでは年間で約 650 万円誘導炉が優位である。耐用年間全体を通して見ると、ランニングコストの占める割合が大きいため、ライフサイクルコスト全体では誘導炉が優位である。

5.3.1.1 資本コスト化によるキュポラと誘導炉の経済性の比較

5.2.2.1(2)により，資本コスト化を行い，更にコークス単価が変動した場合の経済性を比較した結果を示す．図 5-4 がコークス比 15%，図 5-5 がコークス比 12% のケースで，それぞれ，コークス単価をキログラム当たり 40 円，70 円，80 円で総コストを出して比較した．コークス比が 12% の場合，コークス単価が 70 円/kg でもキュポラが経済的に優位になる．コークス単価が 80 円/kg になると誘導炉優位である．

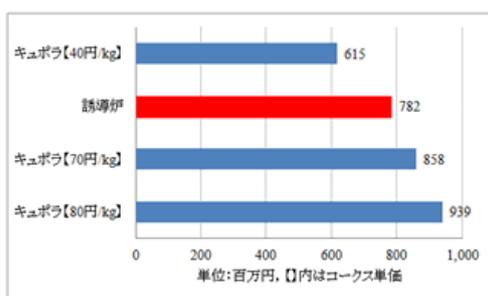


図 5-5 コークス単価変動による経済性比較(コークス比 15%)

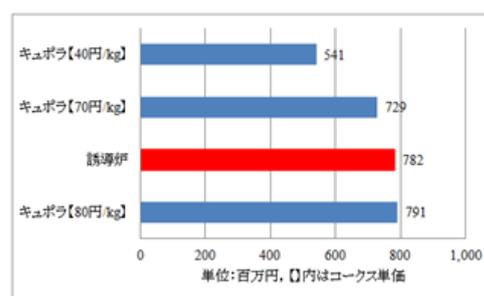


図 5-6 コークス単価変動による経済性比較(コークス比 12%)

5.3.1.2 キュポラと誘導炉のコスト分岐点

キュポラと誘導炉のコスト分岐点について 5.2.2.1(3)のモデルを用いて試算した結果を表 5-3 に示す．

表 5-3 キュポラと誘導炉のコスト分岐点

コークス比	12%	15%	18%
コスト分岐点(円/kg)	75.8	58.6	47.1

キュポラの経済性はコークスによって影響を受けている．今回の試算では，コークス比 12% の場合はコークス費 75.8 円/kg，同 15% の場合は 58.6 円/kg，18% の場合は 47.1 円/kg で誘導炉とキュポラの経済性は同等となる．コークス単価がこれらを上回った時は，誘導炉が経済性で優位である．

5.3.2 環境性の分析結果

次にもう一つの分析項目である環境性の分析結果について詳細を示す．LCIデータの収集調査では，プロセス全体のデータ収集は困難であったが設備，運用を中心にプロセス法に必要なデータを収集した．

5.3.2.1 設備製造時と運用時の CO₂ 発生量の推計

最初に設備の CO₂ 排出量であるが，ヒアリング調査により得られたキュポラ・誘導炉

の素材構成に関わるデータに 5.2.2.2 (1)の(5.9)式のとおり, 環境負荷原単位[JEMAI 2002] 乗じてそれぞれの CO₂ 発生量を求めた. 次に設備運用の CO₂ 排出量であるが, キュポラと誘導炉の運転に関わる 1 年間の CO₂ 発生量をそれぞれ CUPe, INDe とすれば次の (5.16) 式と(5.17)式によって求められる.

$$CUPe = SU(Cr \cdot Ce + Cd \cdot Ee) \quad (5.16)$$

$$INDe = SU \cdot Id \cdot Ee \quad (5.17)$$

SU : 出湯量(t/年), Cr : コークス比(%), Ce: コークスの CO₂ 排出原単位(t-CO₂/t), Cd: キュポラの電力生産原単位(kWh/t), Id: 誘導炉の電力生産原単位(kWh/t), Ee 電気の CO₂ 排出原単位(t-CO₂/kWh)

キュポラと誘導炉について 1 年間および 12 年間運転した際の CO₂ 発生量をコークス比別に求めたものを表 5-4 に示す. なお CO₂ 排出原単位は 12 年間変化しないと仮定した.

表 5-4 運用時の CO₂ 発生量

キュポラ						
コークス			電力量	1年間 CO2排出量	12年間 CO2排出量	
出湯量	コークス比	使用量				
t/年	%	t	kWh	t-CO2	t-CO2	
4,480	12	538	98,551	1,784	21,402	
4,480	15	672	98,551	2,220	26,644	
4,480	18	806	98,551	2,657	31,884	

誘導炉						
コークス			電力量	1年間 CO2排出量	12年間 CO2排出量	
出湯量	コークス比	使用量				
t/年	%	t	kWh	t-CO2	t-CO2	
4,480	-	-	2,553,372	945	11,337	

電気のCO2排出原単位:0.37kg-CO2/kWh, 誘導炉の電力生産原単位 : 570 kWh/t、
 コークスのCO2排出原単位: 3.25kg-CO2-t/t, キュポラの電力生産原単位: 22 kWh/t
 ※環境省「平成14年度温室効果ガス排出量算定方法検討会」
 および電気事業連合会「電気事業における環境行動計画」(2007)より

以上によりプロセス法によって算出された CO₂ 排出量をコークス比別に設備, 運用トータルで比較したものが図 5-6 である. 設備, 運用ともにキュポラの CO₂ 排出量は誘導炉より多い. 耐用年数 12 年間で比較すると比較すると, 同一規模の炉において, 誘導炉はコークス比 12%のキュポラに対し, 47%, 同 15%のキュポラに対し 57.3%, 同 18%のキュポラに対し 64.3%の CO₂ 削減効果がある.

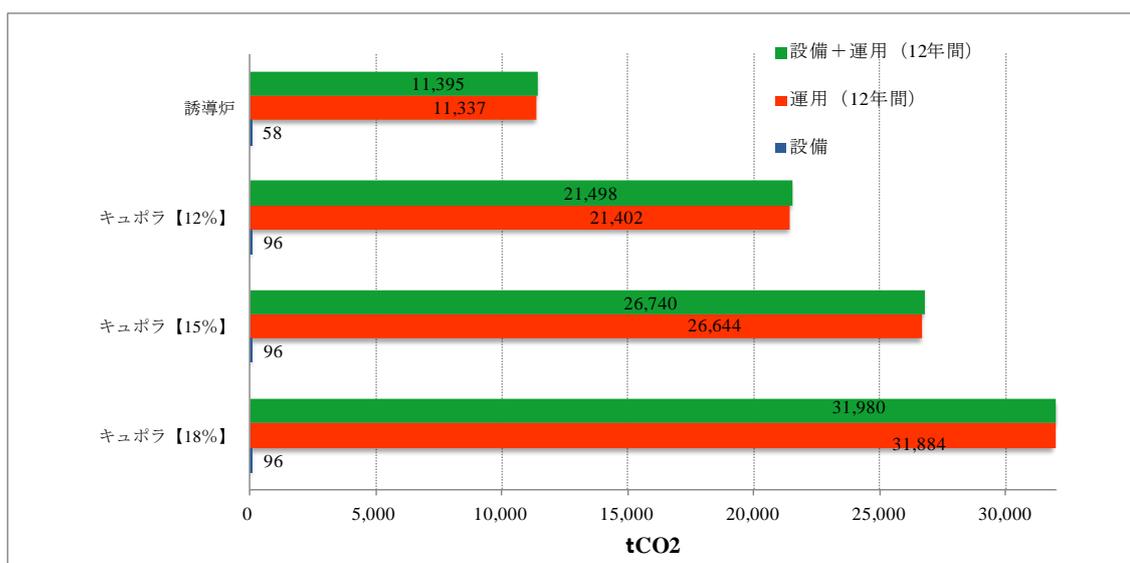


図 5-7 キュボラのコークス比変化による CO₂ 排出量の比較(12 年間:設備+運用)

5.3.2.2 鋳鍛造品の CO₂ 負荷と間接影響の推計(最終財)

プロセス法によって推計できる負荷を把握したのち、5.2.2.2(3)で整備された環境負荷分析用データを使用し、5.2.2.2 (1)の(5.10)式を用い産業連関分析法により鋳鍛造品部門の最終財としての CO₂ 排出量を推計する。最初に行うのはプロセス法で既に求めた負荷の除外である。ダブルカウンティングを回避するためキュボラはプロセス法で推計された 9 項目、誘導炉は 11 項目の環境負荷を除外した²⁸。

また産業連関表の鋳鉄造品には、5 品目が分類されているが、キュボラ・誘導炉で生産されるのは鋳鉄管、鋳鉄品の 2 品目である。この 2 品目の鋳鉄造品における割合を付表である物量表から推計し、プロセス法で推計した分を除いた負荷の 75%とした。さらにキュボラと誘導炉の生産の割合は 6:4[産業研究所 2007]であることからこの比によりキュボラと誘導炉の負荷を配する。以上により得た値はプロセス法で推計されていない間接影響による環境負荷である。結果を表 5-5 に示す。

表 5-5 鋳鍛造品の CO₂ 負荷と間接影響(最終財)

最終財	鋳鍛造品の CO ₂ 排出量 (tCO ₂ /年)	出湯量 (t)	CO ₂ 排出量 (間接影響分) (tCO ₂ /年)	12年間分CO ₂ 排出量 (間接影響分) (tCO ₂)
キュボラ	4,953,038	4,480	3616.8	43401.2
誘導炉	3,300,994	4,480	3615.6	43387.7

5.3.2.3 鋳鍛造品の CO₂ 負荷と間接影響の推計(中間財)

表 5-6 に鋳鍛造品の中間財としての CO₂ 負荷と、間接影響を推計した結果を示す。5.2.2.2(2)の手法を用いて下流分を除いた以外、推計方法は最終財の場合と同じである。

²⁸ ダブルカウンティング回避処理に当たっては、約 10 名の専門家によるエキスパートジャッジにより重複負荷を特定し除外した。

中間財としての鑄鍛造品の CO₂ 負荷は、最終財としてのそれに比べ、100 分の 1 未満であり極めて小さい。加工品としての鑄鍛造品の CO₂ がいかに二次三次と続く他の加工部門の最終消費から発生しているかがこの結果より推察できる。間接影響分は 1 年間で見ると設備からの CO₂ 発生量よりも小さい。

表 5-6 鑄鍛造品の CO₂ 負荷と間接影響(中間財)

中間財	鑄鍛造品のCO2排出量 (tCO2/年)	出湯量 (t)	CO2排出量(間接影響分) (tCO2/年)	12年間分CO2排出量(間接影響分) (tCO2)
キュポラ	34,657	4,480	25.3	304
誘導炉	22,073	4,480	24.2	290

図 5-7 に、鑄鉄製造プロセスに関わる設備・運転・間接影響のすべてを含む CO₂ 発生量を示した。プロセス法とのダブルカウンティングおよび鑄鍛造品部門の下流分を除いた最終的な CO₂ 推計結果である。

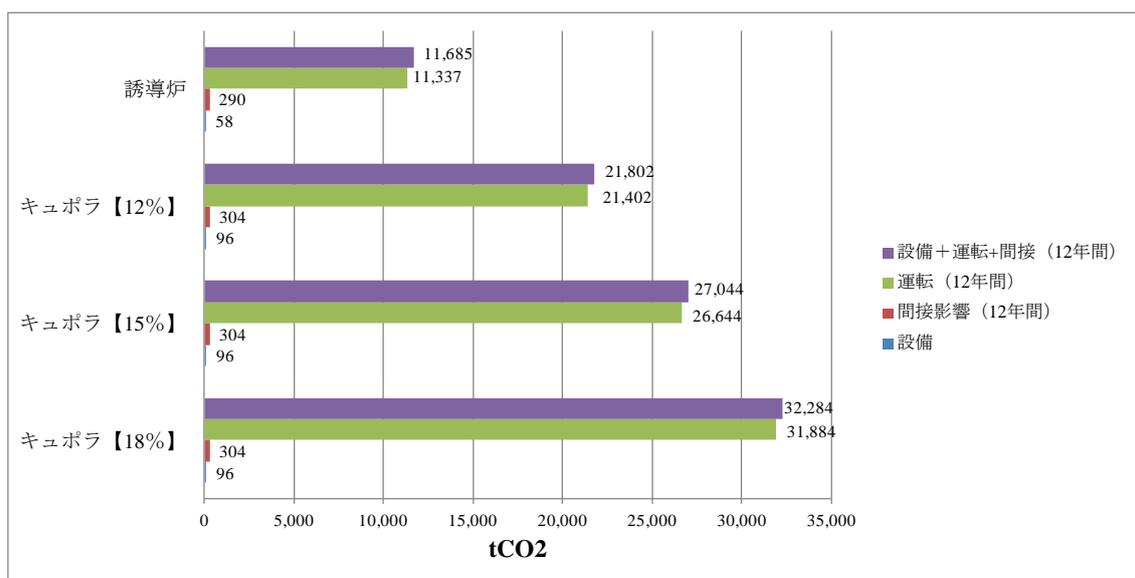


図 5-8 キュポラのコークス比変化による CO₂ 排出量の比較(12 年間:設備+運転+間接)

5.4 本章のまとめ

本章では溶解炉である誘導炉とキュポラについて経済性と環境性の比較を行った。最初に経済性についてであるが、イニシャルコストでキュポラと誘導炉で差が大きいものの、耐用年間全体を通して見ると、ランニングコストの占める割合が大きかった。具体的には耐用年数 12 年のうち、イニシャルコストの占める割合はキュポラで約 2%、誘導炉で約 4%、ランニングコストの占める割合はキュポラで約 98%、誘導炉で約 96%と推計された。ライフサイクルコスト全体では誘導炉が優位である。耐用年数 12 年間でみ

ると、重要な位置を占めるのはランニングコストである。キュボラの経済性はコークス比とコークス費の影響を受けており、コークスの単価が高騰または変動幅が小さい状況で推移している現状[財務省 2012]では、誘導炉のキュボラに対する経営安定面を含む経済性の優位性は高まっている。

次に環境性(CO₂ 負荷)であるが、2.3 で挙げた IOA の分析上の課題である“IO 部門が限定されることによる詳細度の低さ”(the low level of detail)の問題に対し、プロセス法を導入したハイブリッド法を用い、既存 IO 部門を分解することにより鋳鍛造品の CO₂ 排出量をキュボラ産・誘導炉産のレベルで定量化した。そして最終財と中間財の財パターン別に CO₂ 排出量を把握した。その結果、CO₂ 負荷では誘導炉の明確なキュボラに対する優位性が確認された。把握し切ることが難しい間接影響まで推計可能なハイブリッド法を適用して分析した結果、設備および運用、間接影響に至るまで、誘導炉の CO₂ 負荷はキュボラに比べて小さかった。本分析ではキュボラの集塵装置を含めていないが、これを含めて分析すると、誘導炉との差はさらに拡大すると推定できる。CO₂ 負荷について、設備起源は大きな差はなく、差異は運転の部分によるところが大きい。そしてそれは熱源の違いに起因することは明らかである。

鋳鉄製造業の安定経営と CO₂ 削減の観点からは、旧式炉であるキュボラを誘導炉へ転換していくことが望ましい。キュボラと誘導炉のイニシャルコストの差が誘導炉への転換拡大の阻害要因と推察されることから、誘導炉の環境の優位性(外部経済)を市場メカニズムに織り込む制度の普及・拡大が今後の課題である。また鋳鍛造品の中間財負荷の推計からは、二次三次と続く他の加工部門の最終消費から多くの CO₂ が発生していることが推察された。これは低炭素社会を構築していくためには、特定部門のみの対策で終わることなく、製品のサプライチェーン全体を俯瞰した対策が必要であることが改めて示されたとも言える。

上記に加えて、中間財と最終財という財パターン別に分析を行うことは、LCI 上、またハイブリッド法の適用上、重要な技術的ポイントと思われる。例えば自動車等を見ても明らかのように、工業製品は中間財の集合体である。このような財の場合、中間財すなわち上流部分の分析に力点を置かなければならない。具体的にはプロセス法の適用による上流部分の詳細な分析を行うことにより、プロセス法と IOA を組み合わせるハイブリッド法全体の精度が向上する。

以上について、第 3 章、第 4 章のまとめ部分でも触れたハイブリッド法による LCI の精度向上に関する知見を総合すると次のようになる。LCI 開始にあたり、各産業を網羅する IO を用いた IOA を行うことにより、ライフサイクル分析上、重要度の高い部門を特定し、その部門についてプロセス法データ収集をより詳細に行い、ハイブリッド法分析にフィードバックすることにより、LCI としての精度が向上する。このようなハイブリッド法による LCI の実施は、間接影響把握と合わせてハイブリッド法の長所を拡大させ、その一層の普及を促すと考えられる。

参考文献

[Heijungs2002] R. Heijungs, Sangwon Suh . The Computational Structure of Life Cycle

Assessment . Springer, 256p.2002

[JEMAI 2002] 産業環境管理協会編. エコリーフ LCI 共通原単位 020524 版. 1 - 11. 2002 年

[Liqui 2011] Deng, Liqui, Callie W. Babbitt, and Eric D. Williams. "Economic-balance hybrid LCA extended with uncertainty analysis: case study of a laptop computer." Journal of Cleaner Production 19.11. 1198-1206. 2011

[Pei 2010] Zhai, Pei, and Eric D. Williams. "Dynamic hybrid life cycle assessment of energy and carbon of multicrystalline silicon photovoltaic systems." Environmental science & technology 44.20. 7950-7955.2010 年

[財務省 2012] 財務省. "貿易統計".<http://www.customs.go.jp/toukei/info/index.htm> (参照 2012-5-20).

[産業研究所 2007] (財)産業研究所 (2007) "鋳物用原材料問題への対応に関する調査研究・同参考資料 高周波誘導炉操業の現状." 62pp. 2007 年

[資源エネ庁 2012] 経済産業省資源エネルギー庁. "エネルギーバランス表". 総合エネルギー統計. <http://www.enecho.meti.go.jp/info/statistics/jukyu/result-2.htm>, (参照 2012-3-1).

[総務省 2012] 総務省. "平成 12 年(2000 年)産業連関表". 政府統計の総合窓口. <http://www.e-stat.go.jp/SG1/estat/List.do?bid=000001019588&cycode=0>, (参照 2013-4-1).

[塚本 2005] 塚本忠嗣・小出文隆・内山洋司・湯浅雄一郎・川島啓. "時系列産業連関表による各種電源のライフサイクル分析." エネルギーシステム・経済・環境コンファレンス講演論文集.23. 269-272. 2012 年

[南齋 2006]南齋規介, 森口祐一, 東野達. "産業連関表による環境負荷原単位データブック(3EID)." 独立行政法人国立環境研究所. <http://www-cger.nies.go.jp/publication/D031/D031.pdf>, (参照 2012-10-30).

[本藤 2000] 本藤祐樹, 内山洋司, 森泉由恵. "ライフサイクル CO₂ 排出量による発電技術の評価--最新データによる再推計の前提条件の違いによる影響." 電力中央研究所報告, 研究報告. Y . 1-105. 2000 年

[溝口 2010] 溝口勝哉, 内山洋司, 岡島敬一, 小田秀充. "地域性を考慮した農作物の生産および輸送に伴う CO₂ 排出量評価." 日本 LCA 学会誌,6.3. 217-223.2010 年

第6章 エネルギー分析における変動因子係数を用いた インベントリ分析の提案および検証

本章では、エネルギー分析における変動因子係数を用いたインベントリ分析の提案および検証について述べる。6.1 で研究の背景と目的について述べる。6.2 にて関連手法および本研究の意義を示す。6.3 にて変動因子係数法の基本的考え方を提示し、提案法を定式化する。そして提案法の実装方法と変動因子の反映方法について示す。6.4 にて延長表・簡易表との比較を通して提案法を検証する。2005 年の IO 基本表・同年度のエネルギーバランス表から得られた直接間接のエネルギー消費原単位を確定値と定義し、提案法・延長表・簡易表それぞれから得られた同原単位との相対誤差率を求め、全体の傾向、直接エネルギー消費原単位予測時における傾向、各方法の順位の組み合わせにおける傾向、相対誤差率の傾向について分析と評価を行う。6.5 ではケーススタディとして鋳鍛造品部門を対象に本章で提案した変動因子係数法の有効性を確認する。6.6 にて本章の結論を述べる。

6.1 はじめに

日本における産業連関表は約 400 部門からなる基本表(以下、基本表)が作成されている。基本表の作成は、日本では 10 府省庁の共同で行われるが基礎統計の整備から始まり、各産業に対する事業所調査の実施、行部門と列部門の整合調整など時間を要するプロセスを経て発行される。改訂の頻度は日本の場合、基本的に 5 年に一度であり、2013 年 12 月現在で入手できる最新の基本表は 2005 年版である。次の改訂版は変則的に 2011 年版で、2015 年度第一四半期に確報が公表予定である[総務省 2012]。基本表の他に、延長産業連関表(以下、延長表)・簡易延長産業連関表(以下、簡易表)も発行されている。簡易表の対象年と公表年の時間差は約 1~2 年程度、延長表の対象年と公表年の時間差は約 2~3 年程度である。表 6-1, 6-2, 6-3 に各産業連関表の公表年を示す。

LCI に IOA を用いる場合の課題のひとつとして、基本表は頻繁には改訂されないため、分析時点で古いでデータを使用せざるを得ないという問題を挙げることができる。本論文のこれまでの各章の分析では IO 基本表データを用いたが、IO の公表年と分析年(研究年)との間には時間的な乖離が存在した。具体的には第 3 章、第 4 章、第 5 章において使用した IO と分析年には、それぞれ約 7 年、約 8 年、約 6 年の乖離があった。分析実施時点において、使用できる基本表が第 3 章・第 4 章では 2000 年版、第 5 章では 2005 年版であったためである。この問題について Suh et al. は IOA の短所として取り上げているが[Suh 2005]、本論文において筆者は、本質的にこの問題は IOTs(IOTs: Official Input-Output Tables) [Suh 2007]の問題として認識している。Suh et al.はプロセス法 LCA と比較した際、IO-LCA の主な難点は“IO

部門が限定されることによる詳細度の低さ”(the low level of detail), “通貨単位の使用”(use of a monetary unit), “製品終了フェイズの漏れ”(neglecting phases)および“データの鮮度”(data age)の4点に集約されるとし, IO データには1~5年の時間的遅延があると指摘している[Suh 2005] [Suh 2007]. IO のデータはプロセス法により収集されるデータよりも古い場合が多い. このようなデータ制約は, IO を用いる LCI において, 社会における変化を迅速かつ簡易に分析に反映することを困難にする. 本論文のこれまでの各章の分析においてもこの問題への具体的対処法は扱わなかった. 更に社会経済情勢の変化が年々速まっている現状を踏まえ, 表の時間的遅延と分析の精度をある程度両立させ, 当該年で分析できる新手法が求められている. IO においてはたとえ一産業部門の変動であっても他部門に二次的三次的と連鎖的に波及していき, 結果的には表全体が変化する. そのため, 2011年3月に発生した東日本大震災のような突発的な災害や, 金融政策の転換によるマネーサプライの急増, 市場における株価や資源価格の急騰・暴落等が発生した場合, その事象を反映した基本表が発行されるまでの間, その事象発生前の IO を分析の基礎として良いのかという疑問が呈示されることが考えられる. この種の疑問に対して応えていくためには, それらの変化を迅速に反映し, 発行済の基本表を超えて補間的あるいは補外的に推計していく手法が開発される事が望ましい. よって本論文では, この問題の解決の一助とするために, 本章にて変動因子係数法を提案する. なお, IOA においては, データの時間的遅延の他に, 部門統合による分析精度への影響の問題がある. 本論文では時間的遅延問題に焦点を絞っているが, この問題については6.4にて改めて触れる.

表 6-1 産業連関表(基本表)の発行年

表名	発行年
平成 17 年(2005 年)産業連関表	平成 21 年(2009 年)3 月
平成 12 年(2000 年)産業連関表	平成 16 年(2004 年)6 月
平成 7 年(1995 年)産業連関表	平成 11 年(1999 年)5 月
平成 2 年(1990 年)産業連関表	平成 6 年(1994 年)3 月
昭和 60 年(1985 年)産業連関表	平成元年(1989 年)3 月
昭和 55 年(1980 年)産業連関表	昭和 59 年(1984 年)2 月
昭和 50 年(1975 年)産業連関表	昭和 54 年(1979 年)1 月
昭和 45 年(1970 年)産業連関表	昭和 49 年(1974 年)1 月
昭和 40 年(1965 年)産業連関表	昭和 44 年(1969 年)1 月
昭和 35 年(1960 年)産業連関表	昭和 39 年(1964 年)5 月

表 6-2 延長産業連関表(延長表)の発行年

表名	発行年
平成 22 年(2010 年)延長産業連関表	平成 25 年(2013 年) 3 月
平成 21 年(2009 年)延長産業連関表	平成 24 年(2012 年) 3 月
平成 20 年(2008 年)延長産業連関表	平成 23 年(2011 年) 3 月
平成 19 年(2007 年)延長産業連関表	平成 21 年(2009 年) 12 月
平成 18 年(2006 年)延長産業連関表	平成 21 年(2009 年) 3 月
平成 17 年(2005 年)延長産業連関表	平成 20 年(2008 年) 10 月
平成 16 年(2004 年)延長産業連関表	平成 20 年(2008 年) 6 月

表 6-3 簡易延長産業連関表(簡易表)の発行年

表名	発行年
平成 23 年(2011 年)簡易延長産業連関表	平成 25 年(2013 年) 3 月
平成 22 年(2010 年)簡易延長産業連関表	平成 24 年(2012 年) 3 月
平成 21 年(2009 年)簡易延長産業連関表	平成 23 年(2011 年) 3 月
平成 20 年(2008 年)簡易延長産業連関表	平成 21 年(2009 年) 12 月
平成 19 年(2007 年)簡易延長産業連関表	平成 21 年(2009 年) 3 月
平成 18 年(2006 年)簡易延長産業連関表	平成 20 年(2008 年) 2 月
平成 17 年(2005 年)簡易延長産業連関表	平成 18 年(2006 年) 12 月
平成 16 年(2004 年)簡易延長産業連関表	平成 17 年(2005 年) 11 月
平成 15 年(2003 年)簡易延長産業連関表	平成 17 年(2005 年) 1 月

本論文2.3で述べた通り、野村 [野村 2007] [野村 2012]は将来の電源構成の変化を踏まえた分析モデル構築や推計を行っている。また伴 [伴 2011] は、ボトムアップ型技術選択等を取り入れた応用一般均衡モデルを中核として、環境・エネルギー分野について詳細な分析が可能な計量経済モデル、そして産業連関モデルの3つを組み合わせ、環境政策と経済の関係を統合的に分析・評価するモデルを構築した。そして野村と同様に電源構成変化を複数のシナリオに分類し、シナリオ毎に2030年までのCO₂排出量予測と産業構造の変化やGDP等の分析を行っている。類似の分析は国立環境研究所、地球環境産業技術研究機構によっても行われており[経済産業省 2013]、全て独自の計量モデルを用いて、中長期の経済指標やCO₂排出量を予測している。しかし、これらの研究はマクロ的な分析であり、ミクロ的な製品レベルでの将来における環境負荷やLCIについての検討までは未だ行われていない。

以上より本章では、日常の中で突然発生し得る自然災害や市場情勢の急変等が発生した場合、その影響を迅速に反映し、更には基本表・延長表・簡易表のない年についても

補外的かつ簡易に推計できる LCI 法のひとつを開発するために、その一次的な方法論提案とその検証を行うことを目的とする。本論文でいう補外とは、最新の IO の対象年以降の時点（未来を含む）でのエネルギー・環境負荷分析を行うことを意味する。ここで強調しておきたいことは、本章における提案法においては、先述した先行研究のような中長期的における緻密な予測を一定の調査・準備時間をかけて行うことを目的としていないことである。本章における提案法は、分析時点で入手可能な発行済 IO とエネルギーバランス表²⁹のみを用いて迅速に LCI 結果を得る方法の提案を目的とする。IO がいない年の LCI を行うには、データ収集に重きを置くプロセス法 LCI を採用する方法、独自に産業統計収集や事業所調査等を行い、負荷分析用データを収集し、そこから新しい分析表を作成する方法の主として 2 方法が考えられる。前者は後者に比べデータ収集の時間と労力は少なく済むが、分析対象財は限定される。後者は分析できる財は飛躍的に広がるが前者とは比較にならない程の時間とコスト負担が発生する。上記 2 方法はいずれも本論文が一貫して目指す費用(時間)対効果に優れる系列横断型 LCI とは別方向の手法と考えられる。本章で提案する方法は基本的にデータ収集がエネルギーバランス表であり、迅速かつ簡易に LCI 結果が得られ、IO を分析の柱とする系列横断型 LCI の方向性にも合致する。ここに本提案法の意義を見出すことができる。

本章では発行済みの基本表・延長表・簡易表のいずれかを用い、LCI 法のひとつとして変動因子係数を仮定した IOA により補外的手法による LCI 法を提案する。提案法により直接・間接のエネルギー消費原単位を推計し、その結果から相対誤差率を用いて手法の精度を確認する。また基本表、延長表、簡易表を用いた推計結果との比較を行い、提案法の有効性を確認する。その上でケーススタディとして鋳鍛造品を例に、本提案法により IO のない 2012 年度の直接・間接のエネルギー消費量・同原単位を定量化する。

6.2 関連手法および本研究の意義

6.1 で述べた基本表の時間的遅延に対処するために、基本表が発行された後の年について作成される IO と、IOA を時間的に発展させる関連研究の概要について以下に記す。

6.2.1 補完的 IO

6.2.1.1 簡易表

基本表が発行された後、次の基本表が発行されるまでの間を補うために、簡易表と延長表の 2 種類の補完的な IO が発行されている。簡易表は、30 程度の動態統計調査を基礎推計資料として収集する。国内生産額、輸出入額、国内総供給額、国内最終需要額の各推計、再生資源・加工処理部門の推計と投入額の推計を経てバランス調整などを行い作成される[経済産業省 2012a]。発行される表の部門数は 80 であり、簡略化して作成・

²⁹ 例えば解析対象年が 2012 年の場合は、2005 年基本表、2010 年延長表、2011 年簡易表を基礎とし、エネルギーバランス表は 2010 年度、2011 年度を用いる。

発行されるため統計としての精度より速報性を重視した統計である。簡易表の対象年と発行年の時間差は約1～2年程度である[経済産業省 2012b]。

6.2.1.2 延長表

延長表においては、国内生産額、輸出入額等の各推計から始まり、バランス調整などを経て作成されるプロセスは簡易表と同様である。簡易表との主要な違いはデータ収集について可能な限り基本表に準じている点である[経済産業省 2012c]。動態統計調査に加え、構造統計調査を基礎推計資料として収集するため、基礎推計資料は50を越えており、簡易表よりも基本表に近い精度を持つ統計が作成される。延長表の対象年と発行年の時間差は約2～3年程度である[経済産業省 2012b]。

6.2.2 時系列IO

前項の補完的 IO は基本表が発行された後、将来年について分析するための IO である。それに対し時系列 IO は、過去年を総合的に比較分析するための手法である。IO は基本的な枠組みに変更はないが、基本的に5年に一度改訂され、その都度部門概念や部門の範囲が変更される。それに起因する異時点間での比較困難性の問題を IO の時系列化にあたっては解決しなくてはならない。代表的な時系列 IO としては、慶應義塾大学の KDB(Keio Economic Observatory Data Base)[黒田 1997]、内閣府経済社会総合研究所の JIP(Japan Industrial Productivity Database)[深尾 2003]、川島らによる TSIO(Time Series Input - Output Tables, 以下 TSIO) [川島 2005]などがあげられる。ここでは比較的最近年である 2000 年までの 30 年間(1970 年～2000 年)を扱っており、部門分類もエネルギーデータベースとの対応を図り、基本分類構造をほぼ残した 155 部門構成の TSIO を川島ら[川島 2005]の引用に基づいて取り上げる。

TSIO は基本的に接続産業連関表(以下、接続表)と延長表を用いて作成される。接続表とは最新年次の基本表が作成された後に、過去 2 時点の産業連関表までを対象に、部門概念、定義、推計方法を最新年次の基本表と同一にして比較可能な形式にしたものである[総務省 2012]。TSIO では接続表の対象年次を「ベンチマーク年」、延長表の対象年次を「中間年」と呼ぶ。TSIO は大きく分けて三段階の推計プロセスを経る。最初に、ベンチマーク年の産業連関表を推計し、次いで、中間年の産業連関表を推計する。延長表の中間年の中間取引額に関しては直近の前後のベンチマーク年の投入構造を反映させる重み付け RAS 法³⁰[Stone 1962]によって推計する。TSIO による過去年の時系列分析の例として、塚本ら[塚本 2008]による過去 30 年間に亘る各種電源のエネルギー・環境負荷分析などをあげることができる。

6.2.3 本研究の提案法の位置付け

以上、補完的IOについて概観した。また本論文2.3および6.1, 6.2において関連する先行研究・手法について俯瞰した。いずれも時間的遅延や過去の時系列比較に対処する有効な資

³⁰ RAS 法とは将来の投入係数の予測方法である。過去二時点における投入係数表の変化率が以後も継続するという仮定の上に成立する。

料であり精緻な分析法である。しかし、誰でもアクセス可能なデータベースであるIOを分析の柱として、発行済IO(基本表・延長表・簡易表)の年を越え、表や情報が欠如している年のエネルギー・環境負荷のLCIを実施することは困難である。そのような問題に対処した将来予測を含むLCI法を提案するところに本提案法の意義を見出すことができる。

6.3.変動因子係数法

ここでは本論文の骨子である変動因子係数法について述べる。

6.3.1 基本的な考え方

6.1で改めて述べたように、IOの発行年と解析対象年には時間的遅延の問題がある。その時間的遅延の間に、天災や市場情勢の急変によりIOの需給構造に急激な変化が生じる可能性がある。本論文ではその変化の原因となった事象を変動因子、そしてその変化の度合いを比率として数値化したものを変動因子係数と呼ぶ。この方法は発行済のIOを基礎として、解析対象年のエネルギー・環境負荷を推計しようとする方法である。IOには中間需要計以外にも最終需要計、付加価値部門計等の部門があるが、この提案法ではIOにおいて各産業の取引関係を表す中核的部分[宮沢 2005]である内生部門(中間需要部門)を変化させることにより、エネルギー・環境負荷を推計するための1方法である。なお、最終需要部門や付加価値部門を変化させる方法も考えられるが、本研究では情報が集約されている内生部門のみを変化させる簡易的手法を用いる。

6.3.2 提案法における入出力仕様

IOの総部門数をNとする。使用される変数のうち、以下に示すものはIOから得られる入力である。

$\mathbf{X}=(x_1, \dots, x_N)^t$: 国内生産額ベクトル

\mathbf{G} : 国内最終需要ベクトル

\mathbf{E} : 輸出額ベクトル

\mathbf{S} : 内生(中間需要)部門行列

使用される変数のうち、以下に示すものはエネルギーバランス表等を通して得られる入力である。

$\mathbf{Eg}=(e_1, \dots, e_N)^t$: 直接エネルギー消費量ベクトル

なお、当該部門の生産過程にて投入される電力、ガス、燃料、熱をそれぞれエネルギー「J」に換算して積算したものを直接エネルギー消費量と定義する。

以下の変数は、変動因子係数法による出力である。

\mathbf{E}_F : 直接・間接エネルギー消費負荷原単位を主成分とする対角行列

\mathbf{E}_N : 直接・間接エネルギー消費量ベクトル

以下の変数は、変動因子係数法におけるパラメータである。

q_i : 部門*i*の変動因子係数(具体的な定め方は6.4で記す)

なお、 \mathbf{I} は単位行列、 $\hat{\mathbf{M}}$ は輸入係数行列である。 $\hat{\boldsymbol{\alpha}}$ は $\boldsymbol{\alpha}$ の対角行列を表す。また、本論文に出現する行列はすべて $N \times N$ の正方行列、ベクトルはすべて要素数 N の列ベクトルである。

6.3.3 変動因子係数法モデルの導出

本論文で用いるIOAの競争輸入型モデル $(\mathbf{I} - (\mathbf{I} - \hat{\mathbf{M}})\mathbf{A})^{-1}$ 型は(6.1)式によって表される。

$$\mathbf{X} = \mathbf{L}(\mathbf{A}) \cdot \mathbf{F} \quad (6.1)$$

$\mathbf{L}(\mathbf{A}) = \{\mathbf{I} - (\mathbf{I} - \hat{\mathbf{M}}) \cdot \mathbf{A}\}^{-1}$: レオンチェフの逆行列

$\mathbf{F} = \{\mathbf{I} - (\mathbf{I} - \hat{\mathbf{M}}) \cdot \mathbf{G} + \mathbf{E}\}$: 最終需要ベクトル

ここでのレオンチェフの逆行列 $\mathbf{L}(\mathbf{A})$ は、投入係数行列 \mathbf{A} の関数として表している。

次に直接・間接のエネルギー原単位・エネルギー消費量推計式について以下に記す。直接エネルギー原単位ベクトルを $\boldsymbol{\varepsilon}$ とすれば、部門 i の直接エネルギー原単位 ε_i は、部門 i の直接エネルギー消費量 e_i と国内生産額 x_i を用いて次式で表される。

$$\varepsilon_i = \frac{e_i}{x_i} \quad (6.2)$$

直接エネルギー原単位を対角成分とした対角行列ベクトル $\hat{\boldsymbol{\varepsilon}}$ にレオンチェフの逆行列を乗じることにより、直接・間接のエネルギー原単位が得られる[宍戸 2010]。よって、 \mathbf{E}_F は次式で表される。

$$\mathbf{E}_F = \hat{\boldsymbol{\varepsilon}} \cdot \mathbf{L}(\mathbf{A}) \quad (6.3)$$

(6.3)式と \mathbf{F} を用いて、直接・間接のエネルギー消費負荷ベクトル \mathbf{E}_N は次式で表される[宍戸 2010]。

$$\mathbf{E}_N = \hat{\boldsymbol{\varepsilon}} \cdot \mathbf{L}(\mathbf{A}) \cdot \mathbf{F} \quad (6.4)$$

以上を踏まえ、部門 i に対して変動因子係数 q_i が加味された場合のエネルギー消費量は次のように計算される。ここで q_i を要素として持つ変動因子係数行列 \mathbf{Q} を以下のように定義する。

$$Q = \begin{bmatrix} q_1 & \dots & \dots & 0 \\ \vdots & \ddots & & \vdots \\ \vdots & & q_i & \vdots \\ 0 & \dots & \dots & q_n \end{bmatrix} \quad (6.5)$$

投入係数行列 A は，投入係数の定義[宍戸 2010]より， X の要素を成分とする対角行列の逆行列 \hat{X}^{-1} と内生部門行列 S を用いて次式で表される．

$$A = S \cdot \hat{X}^{-1} \quad (6.6)$$

変動因子係数 q_i の振る舞いを反映させるために，次のような考え方で競争輸入型モデル $(I - (I - \hat{M})A)^{-1}$ 型に織り込む．レオンチェフの逆行列 $L(A)$ の中における投入係数行列 A を QA に置き換えることにより，変動因子係数を含むレオンチェフの逆行列 $L(QA)$ は次式により表現される．

$$L(QA) = \{ I - (I - \hat{M}) \cdot QA \}^{-1} \quad (6.7)$$

(6.1)式においても， A を QA に置き換えても方程式は近似的に成立すると仮定する．すなわち，

$$X = L(QA) \cdot F \quad (6.8)$$

上記(6.8)式が成立すると仮定する³¹．

以上から，変動因子係数モデルにおける直接・間接のエネルギー消費原単位対角行列 E_F ，直接間接のエネルギー消費量ベクトル E_N は， $\hat{\varepsilon}$ を用いて，次式のように求められる [宍戸 2010]．

$$E_F = \hat{\varepsilon} \cdot L(QA) \quad (6.9)$$

$$E_N = \hat{\varepsilon} \cdot L(QA) \cdot F \quad (6.10)$$

$L(QA) = \{ I - (I - \hat{M}) \cdot QA \}^{-1}$: 変動因子係数を含むレオンチェフの逆行列

6.3.4 実装方法と変動因子の反映方法

以上の提案法の導出に基づく LCI システムへの実装方法について述べる．導出過程においては，結局 A を QA に置き換えた．このことは既存の LCI 計算プロセスにおいて A

³¹ A を QA に置き換えた結果が近似的に産業構造の変化を反映している，との仮説を立てる．その検証は次節にて行う．

を求めた後、 Q との積を計算し、それを新たな A として以後の計算に戻ればよい。すなわち本提案法の実装は極めて容易である。

次に提案法における変動因子の反映方法について述べる。ここで導出した投入係数への変動因子の反映方法は、費用構成(IO の縦方向)の変動を考慮した $Q \cdot A$ 型であるが、販路構成(IO の横方向)の変動を考慮した $A \cdot Q$ 型もある。更には、費用と販路の両者を考慮した $Q \cdot A \cdot Q$ 型も考えられ、主として3類型が存在する。その中で $Q \cdot A \cdot Q$ 型は $Q \cdot A$ または $A \cdot Q$ 型を試みた後に実施すべきステップとして考えたため、今回は適用していない。本論文では、 $Q \cdot A$ 型を第1に適用することを試みている。 $Q \cdot A$ 型と $A \cdot Q$ 型は、変動させる産業連関表の内生部門の構造から結果に大差はないと推察し、本論文では恣意性なしに $Q \cdot A$ 型を用いた。 $A \cdot Q$ 型と $Q \cdot A \cdot Q$ 型に関する検証は今後の課題である。

6.4 変動因子係数法の検証

ここでは 6.3 で示した変動因子係数法の計算手順に基づき、評価・検証を行い本提案法の有効性を検討する。

6.4.1 検証の手順と方法

検証の一部で使用する簡易表の部門数が80であり、後に推計する鋳鍛造品の直接・間接のエネルギー消費量・同原単位推計に不可欠な部門を残し、更に産業連関表部門の統合分類における大・中・小分類に基づき恣意性のないように部門を選び統合を行い、本検証の部門数を44、すなわち6.3.2における $N=44$ とした。部門統合の方法については別途文献[井出2003]を参照されたい。ホームページで一般公開されている産業連関表の部門数は、公開年および表の種類(基本表・延長表・簡易表)によって異なることが多いため、統合部門数を特定数に固定することは必ずしも容易ではない。部門の一覧については付録Aに掲載した。1.にて触れた通り、IOAにおいては部門統合数が分析結果へ影響する[宍戸 2010] [Wiedmann2011] ため、44部門統合以外の検証も必要であり、今後別途研究を重ねていかななくてはならない。本論文の検証やケーススタディはあくまで提案法構築のための第一歩であることに留意されたい。検証のための推計の手順は次のとおりである。

- (1)解析対象年において、IOと同年度のエネルギーバランス表(例えば2005年IOに関しては2005年度エネルギーバランス表)をリンクさせた負荷分析用データベースを構築し、直接エネルギー消費量から直接エネルギー消費原単位を(6.2)式から得る。
- (2) 下記 (6.11) 式より変動因子係数を求める。
- (3) エネルギー消費原単位および直接間接のエネルギー消費量を (6.9)式・(6.10)式により推計する。

負荷分析用データベース構築の詳細については別途文献[塚本 2005][溝口 2010]を参照されたい。

変動因子係数 q_i の計算式は次のとおりである。以下部門 i について、既知のIOの年を a 年、 b 年、解析対象年を c 年とする($a < b < c$)。 a 年の中間需要が $m_{a,i}$ 、 b 年の中間需要が $m_{b,i}$ の時、 b 年に対する c 年の変動因子係数 q_i は次式による線型補外により計算する。

$$q_i = \frac{(m_{b,i} - m_{a,i})(c - b)}{m_{b,i}(b - a)} \quad (6.11)$$

q_i の計算については、ここで示した線型補外以外による推計も考えられる。本論文の範囲では、比較データの整合性(延長表は2004年および2005年のデータしか存在しない)を考慮して簡易な方法を採用した。ここで注意しなくてはならない事は(6.11)式の線型補外によるIOAのみでは「産業構造の突発的な変化が発生した場合、その影響を迅速に反映する」にあたり完全とは言えず、プロセス法データとの併用が求められることである。例えば電源構成に劇的な変化があった場合、発行済IOより新しい別統計を参考に、IOの該当部門の比率を推計・変化させることによって、突発的な変化のより確実な反映が可能となる。

評価・検証の対象年区間は2000年から2005年である。この間、基本表は、2000年版および2005年版が発行されている。そして2000年の基本表に対して本論文で提案する変動因子係数法を適用し、2005年の直接・間接のエネルギー消費原単位を推計する。

この際、2005年は基本表が存在するため、当該年の直接・間接のエネルギー消費原単位の確定値が得られる。よって提案法の推計精度の検討が可能である。なお、最も信頼性の高い基本表より計算される値を推計値の対義語として本論文では確定値という用語を用いる。

なお、本提案法では3表(基本表・延長表・簡易表)を用いるが、正解と見なせる最新の確定値は2005年基本表のみとの大前提から提案法の検証を行う。確定値が存在する2005年を評価する場合、発行済みIOとして、2000年の基本表、2003年の延長表、2004年の簡易表が考えられる。それに忠実に対応した検証としては、年の異なる3表に対して本提案をそれぞれ適用することで2005年の値を推計し、確定値と比較する方法がある。しかし、延長表・簡易表は基本表を基礎として作成された表であるため、延長表・簡易表を用いた予測値は「基本表→(推計その1)→延長表・簡易表→(推計その2)→提案法予測値」というプロセスにより2つの推計を経る。その為、確定値と提案法予測値との乖離の原因が2つの推計のどちらに拠るものなのか、またどちらがどの程度影響したのかを判別することは必ずしも容易ではない。よって本論文では、提案法の検証の出発点として、次の3検証により提案法を相対的に比較評価することを試みた。

- ①提案法：2000年基本表→提案法推計→2005年基本表 K との乖離検証
- ②延長表：2004年延長表→2004年の延長表を用いた提案法推計→2005年基本表 K との乖離検証
- ③簡易表：2000年～2004年簡易表→2000年～2004年の簡易表を用いた提案法による

推計→2005 年基本表 K との乖離検証

なお上記における「K」は、6.4.2 で述べる比較のための確定値である。

しかし、この3検証が完全と言う訳ではない。前述した検証アプローチは本論文では次の検証課題として位置付け、上記の①~③の検証方法を今回は採用する。

また本論文では2005年基本表により得られた値を確定値として使用するが、1年分の表だけを基準とした検証のみではなく、複数年の表による検証(例えば1995年, 2000年, 2005年)が行われることが本来望ましい。本論文ではまずは執筆時点(2013年12月)での最新基本表を基準として提案法を一通り評価する方針で検証を行う。

6.4.2 結果と評価

6.4.2.1 誤差の計算方法

以後の評価では、相対誤差率という考え方を主として用いる。ここではその定義を示す。具体的評価方法についてであるが、推計される2005年値を確定値と比較し、確定値からどの程度乖離しているかを観測する。具体的には確定値との相対誤差率を求め、その値が小さいほど、精度が高いと見なす。相対誤差率を E_R とし、推計値を Z とすれば、 E_R は確定値 K を用いて次式で求められる。

$$E_R = \frac{Z-K}{K} \cdot 100(\%) \quad (6.12)$$

次に、推計における誤差の平均の扱いについて予め下記に記す。誤差算出においては正と負の値が出現するが、本論文ではその平均値を求める際に、誤差の絶対値の平均をもって平均誤差と表現する。すなわち誤差系列 $\{x_i | 1 \leq i \leq n\}$ の平均誤差 \bar{x} は次式によって表される。

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |x_i| \quad (6.13)$$

6.4.2.2 全体の傾向

最初に全体の傾向について評価・検証する。2000年の基本表に基づいて、変動因子係数法を適用し、延長表、簡易表、変動因子係数法それぞれに基づき、2001年から2005年までの直接・間接のエネルギー消費原単位を推計する。併せて延長表、簡易表のうち発行済みの年を対象として直接・間接のエネルギー消費原単位を推計した結果と比較する。

次に以上の方法により、横軸を年、縦軸を直接・間接のエネルギー消費原単位とし、基本表を含んだ4つの方法について計算した結果のグラフを図6-1に示す。なお、基本表については2000年と2005年の値を線分で結んでいる。更に、2000年値は予測値で

はなく、2000年の基本表、簡易表と同年度版のエネルギーバランス表を用いた推計値である。

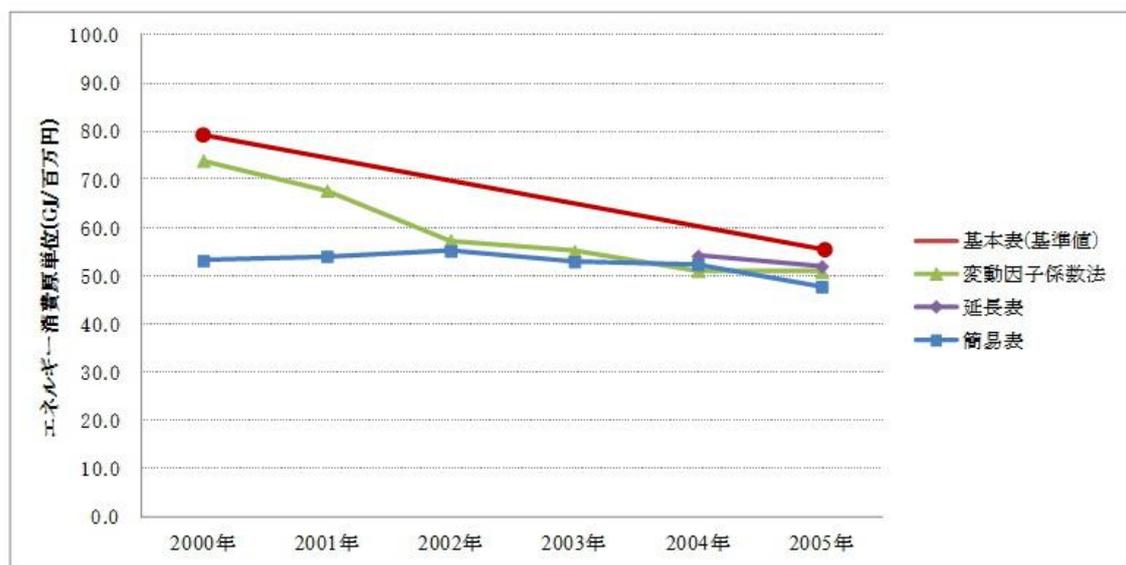


図6-1 各IOおよび変動因子係数法を用いたエネルギー消費原単位推計値の比較(44部門平均値)

上述の2005年度44部門平均値について、6.4.1で定めた確定値Kと3方法の値について(6.12)式により相対誤差率を求め比較を行った。相対誤差率を昇順で示すと、延長表31.5%、変動因子係数法38.3%、簡易表47.1%の順となった。予測値と真値(確定値K)の間には当然ながら乖離が観測された。この結果から見る限り、変動因子係数法の精度は、延長表と簡易表の間に位置する。なお、44部門平均値の他に個別部門における傾向については、6.4.2.5において観測する。

6.4.2.3 直接エネルギー消費量予測時における傾向

直接・間接のエネルギー消費量・同原単位をIOAにより推計するにあたり、分析目的年度のエネルギーバランス表がない場合も存在する。その場合は直接エネルギー消費量を過去のデータに基づき予測しその値で代替することが必要になる。例えば、次章の鋳鍛造品を対象としたケーススタディでは2010年延長表、2011年簡易表を用いて2012年までの直接・間接のエネルギー消費量の推計を行うが、本稿執筆時点(2013年12月)現在でホームページ[資源エネルギー2012]で入手可能なエネルギーバランス表の確報は2011年度が最新である。計算方法を次に示す。

部門*i*について、既知のエネルギーバランス表の年度を*a*年度、*b*年度、評価対象年度を*c*年度とする($a < b < c$)。 *a*年度の直接エネルギー消費量が $e_{a,i}$ 、*b*年度の直接エネルギー消費量が $e_{b,i}$ の時、*b*年度に対する*c*年度の直接エネルギー消費量 $e_{c,i}$ は次式による線型補外により計算する。

$$e_{c,i} = \frac{(e_{b,i} - e_{a,i})(c-b)}{(b-a)} \quad (6.14)$$

$e_{c,i}$ の計算については、ここで示した線型補外以外による推計も考えられる。本論文の範囲では、比較データの整合性を考慮して簡易な方法を採用した。

2005年を推計するにあたり、最新のエネルギーバランス表が2004年度版の場合は、1年の線型補外により2005年の直接エネルギー消費量を求める(1年予測)、同様に最新のエネルギーバランス表が2003年度版の場合は2年の線型補外により2005年度直接エネルギー消費量を求める(2年予測)。以上により直接・間接のエネルギー原単位を推計し、確定値との相対誤差率を求めた結果を図2に示す。

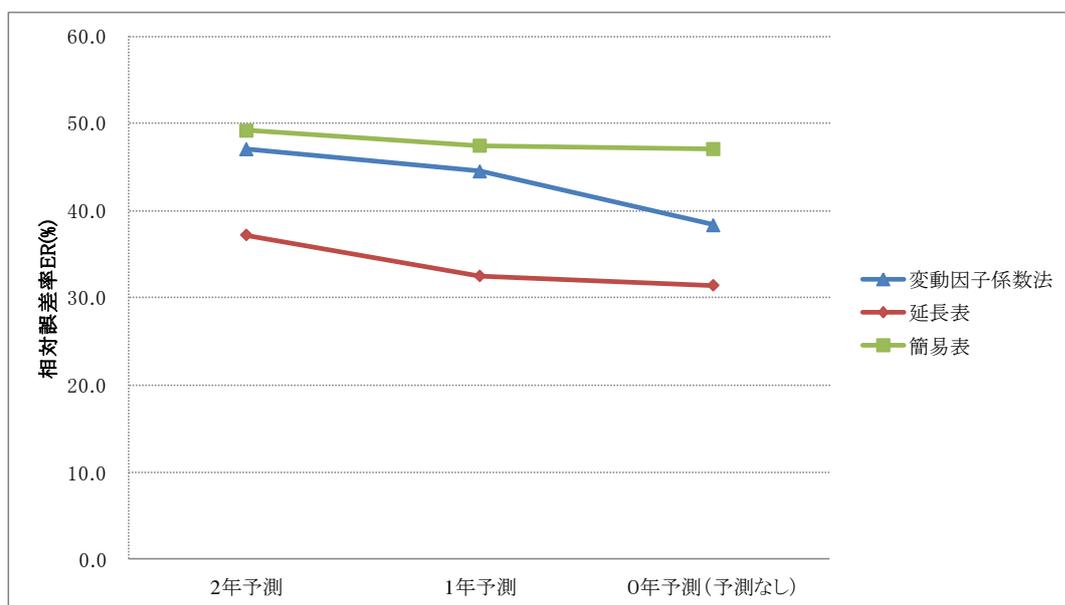


図6-2 直接エネルギー消費量の予測年数に対する相対誤差率の推移

同図において、横軸は予測年度、縦軸は相対誤差率である。図6-2により相対誤差率を比較すると、データ予測期間が長くなるほど誤差が大きくなることが分かる。そしてすべてのケースで延長表の誤差が一番小さく簡易表が一番大きい。変動因子係数法はやや簡易表寄りではあるが、それでも簡易表よりは誤差が小さい。この結果を見る限り、必要年度のエネルギーバランス表が欠如している場合でも、変動因子係数法が少なくとも2年の予測には耐えうることを示している。

6.4.2.4 各方法の順位の組み合わせにおける傾向

ここでは各方法の順位の組み合わせにおける傾向について検証する。3方法の順位の順列、すなわち6通りである。表1(a), (b), (c)にこの6通りの内訳と、更に延長表、変動因子係数法、

簡易表がそれぞれ第1位となる3パターンに集約したものを示す。なお表中の①～⑥の延、変、簡はそれぞれ延長表、変動因子係数法、簡易表を示す。同表において、(a)は直接エネルギー消費量の0年予測(予測なし)、(b)は1年予測、(c)は2年予測である。

表6-1 3方法の順位の組み合わせにおける内訳

(a) 0年予測時

0年予測	①	②	③	④	⑤	⑥	計
順位パターン	延>簡>変	延>変>簡	簡>延>変	簡>変>延	変>延>簡	変>簡>延	
件数	9	7	4	7	6	11	44
%	20.5	15.9	9.1	15.9	13.6	25.0	100
順位パターン	延長表1位		簡易表1位		変動因子係数法1位		
件数	16		11		17		44
%	36.4		25.0		38.6		100

(b) 1年予測時

1年予測	①	②	③	④	⑤	⑥	計
順位パターン	延>簡>変	延>変>簡	簡>延>変	簡>変>延	変>延>簡	変>簡>延	
件数	14	2	10	2	7	9	44
%	31.8	4.5	22.7	4.5	15.9	20.5	100
順位パターン	延長表1位		簡易表1位		変動因子係数法1位		
件数	16		12		16		44
%	36.4		27.3		36.4		100

(c) 2年予測時

2年予測	①	②	③	④	⑤	⑥	計
順位パターン	延>簡>変	延>変>簡	簡>延>変	簡>変>延	変>延>簡	変>簡>延	
件数	13	4	10	1	6	10	44
%	29.5	9.1	22.7	2.3	13.6	22.7	100
順位パターン	延長表1位		簡易表1位		変動因子係数法1位		
件数	17		11		16		44
%	38.6		25.0		36.4		100

表1(a), (b), (c)において延長表、変動因子係数法、簡易表がそれぞれ第1位となる部門数と割合を見る。直接エネルギー消費量0年予測時では変動因子係数法が1位になっている。簡易表は他の2方法とは明らかな差が確認された。しかし簡易表が1位となる割合は決して少なくはない。次に1年予測時では、変動因子係数法と延長表が同率1位となった。簡易表はここでも他2方法との差が明確に確認されたが、簡易表が1位となる割合はと0年予測時に比べわずかに拡大している。最後に2年予測時では、延長表が1位となったが、簡易表はこの場合も他2方法と比較すると明確な差が確認されたが、割合は少なくはない。

以上、各方法の順位の組み合わせにおける傾向の内訳について見たが、予測年数による特段の傾向差は確認できず、延長表と変動因子係数法は一貫してほぼ同順位であり、簡易表は他2方法に対して差があることが確認された。6.4.2.3で得られた結果と合わせて考えると、変動因子係数法は延長表には劣るが簡易表より精度が高い傾向が認められる。

6.4.2.5 相対誤差率の傾向

ここでは相対誤差率の傾向について、各方法別に更に検証する。各方法別に、44の各部門について直接・間接のエネルギー消費原単位の相対誤差率を計算し、それを昇順に並べたものを図6-3(a), (b), (c)に示す。同図において、(a)は延長表、(b)は簡易表、(c)は変動因子係数法である。

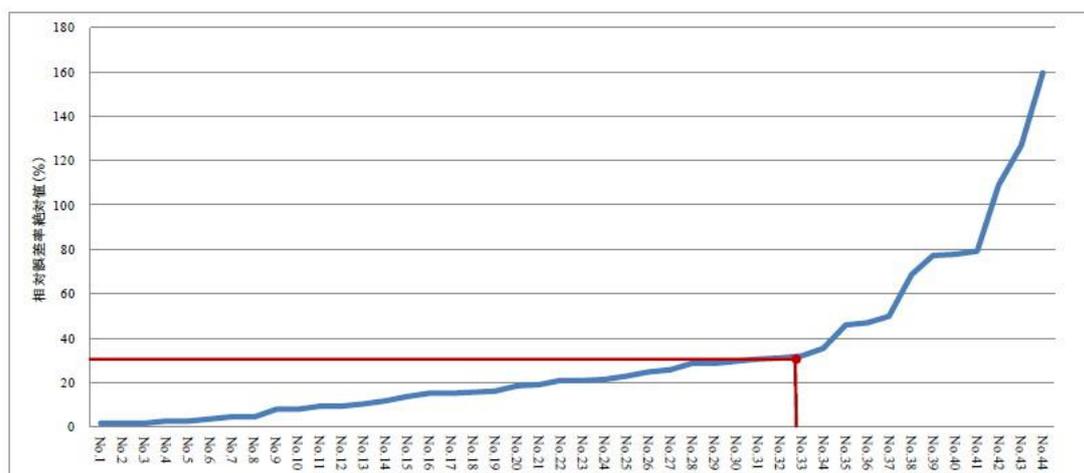
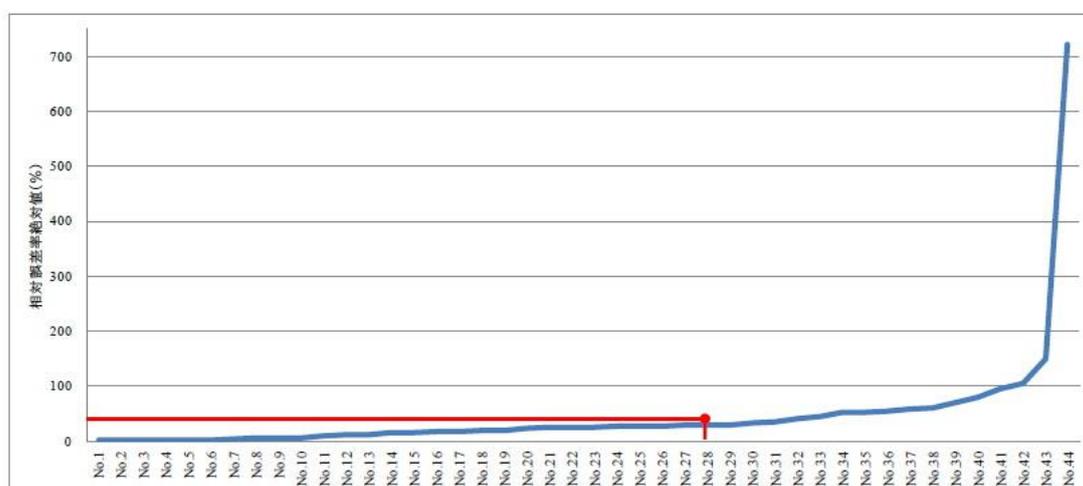
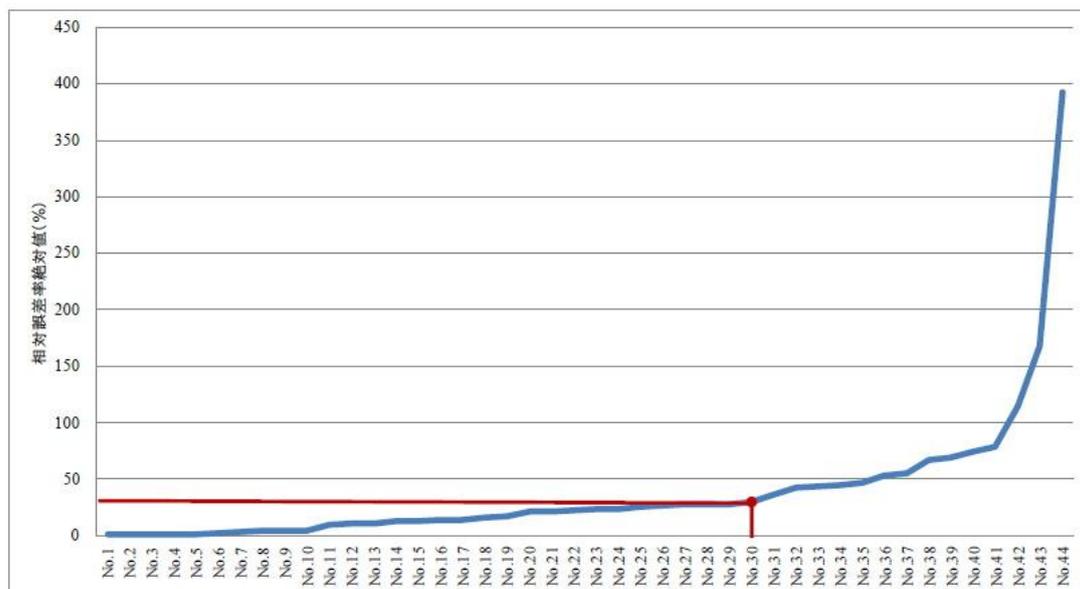


図 6-3 昇順ソートされた 44 部門における直接・間接エネルギー消費原単位の相対誤差率 (a)(延長表)



(b) 簡易表



(c) 変動因子係数法

これらの図より、相対誤差率における良否の基準を仮に 30%とすると、44 部門の中で相対誤差率が 30%未満に収まる部門は延長表で 33 部門(33/44=75.0%)、変動因子係数法で同 30 部門(30/44=68.2%)、簡易表で同 28 部門(28/44=63.6%)であった。変動因子係数法はやや簡易表よりであるが、延長表と簡易表の間に位置する。

各方法における相対誤差率の傾向であるが、一定の産業が高くなる傾向が見られた。

産業別の傾向の分析は今後の課題である。参考として付録 B に各方法における相対誤差率の上位と下位 5 産業について示した。

6.5 鋳鍛造品部門におけるケーススタディ

鋳鍛造品部門を例としたケーススタディを通して、本研究で提案した変動因子係数法を適用し、基本表・延長表・簡易表を用いる提案法の有効性を確認する。なお、このケーススタディは、本論文の提案法の検証ではなく、提案法がどのように活用されるかの一例を示すことを目的に行うものである。

なお、このケーススタディは、本論文の提案法の検証ではなく、提案法がどのように活用されるかの一例を示すことを目的に行うものである。本ケーススタディにおいては、基本表、延長表、簡易表の3種類のIOをベースとして提案法と組み合わせが考えられる。しかしながら、解析対照年である2011年に対して至近の基本表は2005年、すなわち6年前の表であるため使用しないこととした。次に延長表と簡易表であるが、6.4の検証では、延長表の方の精度が全体としては高いという結果が出ているが、至近の2010年延長表には東日本大震災(2011.3.11)の影響が包含されていない。よって震災の影響が包含されている2011年簡易表も本ケーススタディではベースとして使用する。筆者らは別掲論文[小田2013]において溶解炉別に鋳鍛造品に

関するCO₂負荷のLCIを行っている。そこで鑄鍛造品に関するエネルギー消費量推計に対して本論文で提案する変動因子係数法を適用した結果を示すことを試みる。本章の6.4では基本表をベースに提案法により解析を実施したが、本ケーススタディでは提案法のベースが延長表および簡易表であることに留意されたい。エネルギーバランス表は2011年度版を用いて1年または2年の線型補外により求めた。

6.5.1 変動因子係数法を用いた直接・間接エネルギー消費量・同原単位の推計

IOAによる直接・間接のエネルギー消費量推計の手順は6.4.1で既に示した(1)~(3)のとおりである。ベースとして使用するIOは本年11月現在で最新の2010年延長表、2011年簡易表であり、エネルギーバランス表も既に発行済の2010年度エネルギーバランス表、2011年度エネルギーバランス表をベースとする。なお解析対象年は2010年・2011年およびIO・エネルギーバランス表の確報未発行の2012年の3ヶ年とする。対象財は鑄鍛造品(最終財)である。この3年間に発生した突発的変動としては、東日本大震災(2011.3.11)が第一に考えられる。2011年簡易表にはその影響が包含されているが、2010年延長表には包含されていない。延長表ベースの推計について今回はプロセス法データにより電力部門等を変化させず、同条件で比較することを試みる。本論文のこれまでの各章の分析においては、IOAとプロセス法を組み合わせたハイブリッド法を用いてきたが、ここでは提案法構築の第一歩として変動因子係数法を用いたIOAを単独で適用するケーススタディを展開した。ハイブリッド法の併用は次の課題である。

なお、推計に必要な最終需要 F の求め方について予め記す。発行済の2010年延長表、2011年簡易表を基礎とし、6.4.1の(6.11)式による変動因子係数を求めてIOを2年分(延長表)または1年分(簡易表)線型補外することにより最終需要 F を求め、その F を用いて6.3.3の(6.4)式により直接・間接のエネルギー消費負荷ベクトルを導出する。

6.5.2 変動因子係数法を用いた直接・間接エネルギー消費量・同原単位の推計結果

図6-4(a), (b)に鑄鍛造品の直接・間接のエネルギー消費量と同原単位の推計結果について示す。

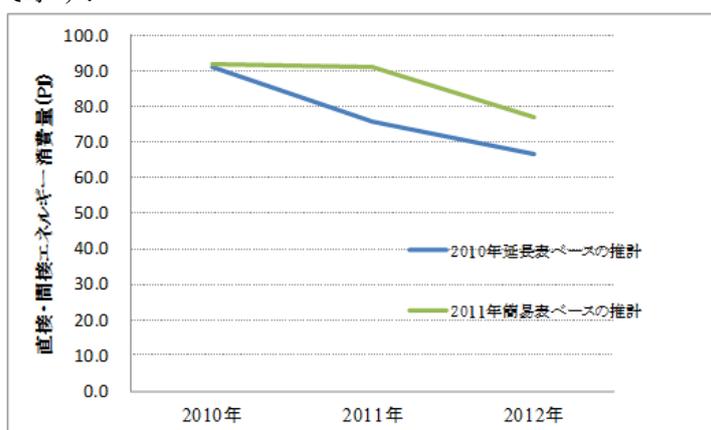
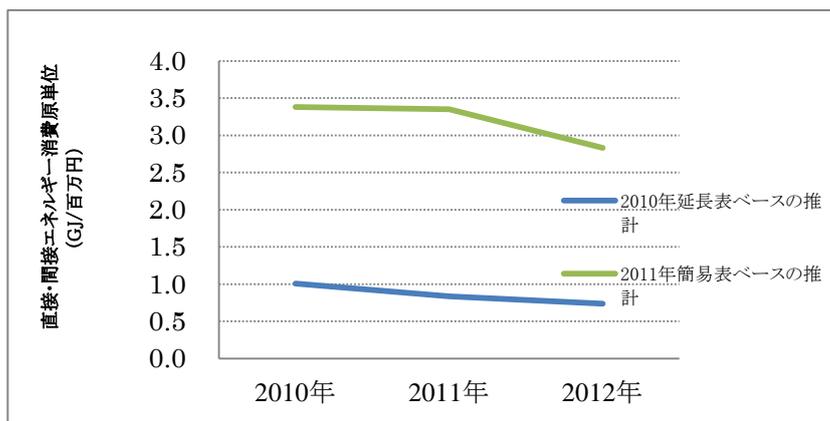


図 6-4 鑄鍛造品の直接・間接のエネルギー消費量・同原単位推計結果(a)エネルギー消費量



(b)エネルギー消費原単位

図6-4を見ると、直接・間接のエネルギー消費量、同原単位ともに2010年延長表ベースの方が、推計値が低くなる傾向が見られる。また、エネルギー消費量・原単位両方とも低下傾向にあることが読み取れる。特に簡易表ベースの推計値において、2010年から2011年はなだらかな低下の軌跡を描いているのに対し、2011年から2012年にかけての下降が目立つ。2011年簡易表には東日本大震災(2011.3.11)の影響が年を通して反映されているため、その影響が現れた可能性も考えられる。

6.6 本章のまとめ

本章では、2.3で指摘したIOの発行年と分析年の時間的乖離の問題、すなわち“データの鮮度”(data age)の問題への解決策の1手法を提示した。具体的には基本表および延長表、簡易表がまだ発行されていない年における、産業構造の突発的変化が発生した場合、その影響を迅速に反映し、かつ簡易に推計できるLCI法を、変動因子係数によるIOA推計モデルとその検証を通して提案した。本論文で示した評価・検証・分析から得られた主な知見は以下のとおりである。

2005年の基本表・同年度のエネルギーバランス表を通して得られた直接・間接のエネルギー消費原単位を確定値とし、変動因子係数法、延長表、簡易表の3方法による2005年推計値とを比較した結果、確定値との相対誤差率は昇順に延長表、変動因子係数法、簡易表となり、変動因子係数法の相対誤差率は延長表と簡易表の間に位置した。

また、直接・間接のエネルギー消費量・同原単位を推計する際、エネルギーバランス表がない場合を想定し、1年間および2年間の線型的補外を用いた3方法による推計値を確定値Kと比較した結果、変動因子係数法の精度は延長表未満、簡易表以上であり、予測時にも使用可能と判断できた。44部門におけるエネルギー消費原単位の相対誤差率 E_R が30%未満に収まる部門数の割合でも延長表、変動因子係数法、簡易表の順であった。

以上から、本研究の範囲では変動因子係数を用いたエネルギー消費負荷の補外的推計は一定の誤差を内包しつつも、迅速簡易に変化を反映するインベントリ分析の1手法となり得る可能性が示された。

本論文で展開した検証は2005年のみの限られたものであるために、今後は基本表が発行される都度、本方法を検証しデータを蓄積していくことが望ましい。また、鋳鍛造品以外のケーススタディおよびエネルギー消費負荷だけではなく、CO₂等の別の環境負荷推計における検証を重ねていくことも課題である。なお、本論文ではエネルギーバランス表に基づく直接・間接のエネルギー消費量・同原単位を推計したが、本論文で提案した変動因子係数法のフレームワークそのまま、CO₂排出量・同原単位の推計も可能である。

従来、分析の需要があるにもかかわらず、IOが発行されていないために分析が行われてこなかった例もある。本論文で提案した変動因子係数法は、この問題を解決するための1方法である。本方法は、データ入手に起因して発生する時間的遅延無しに使用でき、予測にも活用できる可能性が示唆された。また、本提案法はLCIシステムへの実装も極めて容易に行うことができ、シンプルであるが故にIOAを用いる多くのLCIと結合が可能である。今後の課題としては投入係数への変動因子の反映方法の別アプローチ(A・Q型, Q・A・Q型)による検証をはじめ、部門統合数の変更、2005年以外の基本表を確定値とした相対誤差率の観測の蓄積、暦年単位のIOと年度単位のエネルギーバランス表の整合化等が挙げられる。また、IOは原則として5年毎に改訂を行い、その都度部門概念や部門の範囲を変更されているため、時系列的な比較を行うためには、厳密にはそれぞれの表の部門概念の整合化を図らなくてはならない。6.2.2 で触れたが、時系列分析を行うにあたり川島ら[川島 2005]は、異時点間での分析が可能なTSIOを構築している。TSIOの方法論を用いて部門概念を特定年に統一することにより、変動因子係数法はより精緻な検証の上に構築されることになる。今後多くの検証を積み重ねていけば、6.4で見られた相対誤差率の産業別の大小、すなわち、線型的に変化する産業と非線型的に変化する産業グループの傾向も明らかになっていくであろう。最後に今後多くの検証の蓄積を経て本方法をはじめ産業連関表の時間的遅延によるデータ制約に対処する手法が確立されれば、6.1で例示したような大きな変動が発生した際、複雑に連関する社会全体の間接影響まで漏れなく把握できるというIOAの長所が最大限に活かされ、LCI手法の一層の発展や普及が期待できると推察される。

参考文献

[Stone 1962]Richard Stone. A Computable Model of Economic Growth. Pt.1.Programme for Growth.Chapman and Hall,104p.1962

[Suh 2005]S. Suh, G. Huppel. Methods for life cycle inventory of a product. Journal of Cleaner Production, 13,687-697.2005

- [Suh 2007]S. Suh, S.Nakamura. Five Years in the Area of Input-Output and Hybrid LCA.The International Journal of Life Cycle Assessment, 12,351- 352.2007
- [Wiedmann2011] Thomas O. Wiedmann , Sangwon Suh, Kuishuang Feng , Manfred Lenzen , Adolf Acquaye , Kate Scott , and John R. Barrett,Application of Hybrid Life Cycle Approaches to Emerging Energy Technologies - The Case of Wind Power in the UK,Environmental science & technology 45.13. 5900-5907.2011
- [井出 2003] 井出眞弘. Excel による産業連関分析入門.産能大学出版部, 190pp. 2003年
- [小田 2013]小田秀充・岡島敬一・内山洋司.キュポラと誘導炉の経済性分析と環境LCA分析. 環境科学会誌, 26 , 1, 22-31. 2013年
- [川島 2005]川島啓・内山洋司. 時系列産業連関表を用いたわが国の CO₂ 排出量の推移に関する構造分解分析(SDA). エネルギー・資源, 26, 3, 204-210. 2005年
- [黒田 1997]黒田昌裕,新保一成,野村浩二,小林信行.KEO データベース-産出および資本・労働投入の測定-.Keio Economic Observatory Monograph Series No.8,pp376.1997年
- [経済産業省 2013]経済産業省.“経済影響分析について(中間報告)”.審議会情報.
<http://www.enecho.meti.go.jp/info/committee/kihonmondai/21th/21-1-1.pdf>
(参照 2013-4-11)
- [経済産業省 2012a]経済産業省.“簡易延長産業連関表の作成方法の概要”.
http://www.meti.go.jp/statistics/tyo/kanieio/result/result_11/pdf/h2eio0914j.pdf
(参照 2013-4-30)
- [経済産業省 2012b]経済産業省.“簡易延長産業連関表”.集計結果又は推計結果.
<http://www.meti.go.jp/statistics/tyo/kanieio/result-2.html> (参照 2013-4-30)
- [経済産業省 2012c]経済産業省.“延長産業連関表の作成方法の概要”.
http://www.meti.go.jp/statistics/tyo/entyoio/result/result_13/pdf/h2eio0915j.pdf
(参照 2013-4-30)
- [資源エネ庁 2012] 経済産業省資源エネルギー庁.“エネルギーバランス表”. 総合エネルギー統計. <http://www.enecho.meti.go.jp/info/statistics/jukyu/result-2.htm>,
(参照 2012-3-1).
- [宍戸 2010]宍戸駿太郎監修・環太平洋産業連関分析学会編.産業連関分析ハンドブック. 東洋経済新報社, pp426.2010年
- [総務省 2012]総務省.“産業連関表”.政府統計の総合窓口.
<http://www.stat.go.jp/data/io/index.htm> (参照 2013-2-1)
- [塚本 2005] 塚本忠嗣・小出文隆・内山洋司・湯浅雄一郎・川島啓."時系列産業連関表による各種電源のライフサイクル分析." エネルギーシステム・経済・環境コンファレンス講演論文集.23. 269-272. 2012年

- [塚本 2008]塚本忠嗣, 小出文隆, 内山洋司, 湯浅雄一郎, 川島啓. "時系列産業連関表による各種電源のライフサイクル分析. エネルギー・資源.29(3).176.2008 年
- [野村 2007]野村浩二.多部門一般均衡モデルによる二酸化炭素排出量評価 - 第一約束期間の限界削減費用と 2030 年展望-.KEO Discussion Paper ,108,pp18.2007 年
- [野村 2012]野村浩二.2030 年における電源構成と CO₂ 制約—多部門一般均衡モデルによる経済評価.
http://www.kojin.org/papers/Energy_co2_20120509.pdf(参照 2013-1-11)
- [伴 2011]伴金美. "経済モデルによる環境政策の影響評価."環境研究, 161, 135-140.2011 年
- [深尾 2003]深尾京司,宮川努,河井啓希他. "産業別生産性と経済成長--1970-98 年."経済分析.170.1-446,2003 年
- [溝口 2010]溝口勝哉・内山洋司・岡島敬一・小田秀充. 地域性を考慮した農作物の生産および輸送に伴う CO₂排出量評価. 日本LCA学会誌 Vol.6 No.3, 217-223. 2010年
- [宮沢 2005]宮沢健一. 産業連関分析入門. 日本経済新聞社, pp235.2002 年

第7章 結言

本章では、結言として本研究の成果をまとめる。7.1 では本論文の結論を述べ、7.2 では問題点と今後の課題について示す。7.3 で今後の展望を述べる。

7.1 本論文の結論

本節は、産業連関分析法を基礎として行った日本の環境負荷解析について、本論文の結論をまとめたものである。

第1章では、本論文の背景と研究目的・意義について述べた。社会的背景として人類の生存に関わる地球環境問題における、温暖化問題を取り上げた。IPCC 第4次報告書によって地球温暖化の人為性が科学的にほぼ証明され、人類の社会経済システムや一人ひとりのライフスタイルが問い直されていることを指摘した。また日本が置かれている高炭素社会、高エネルギー社会の現状を示し、京都議定書第一約束期間以降に対する処方箋を用意しなくてはならないが、その際、エネルギー消費量の LCI は必須であると指摘した。

学術的背景として、温暖化防止対策再構築の処方箋を用意するにあたっては、確固たる学術的基盤の上に立たなければならない。その上では LCA の方法論、なかでも中核的な位置を占める LCI の方法論に立脚する必要があると述べ、LCA と LCI の手法・対象について概観した。そして本論文の目的を LCI の方法論を用いた生産活動に起因する環境負荷の具体的解析に基づき CO₂ 排出量・エネルギー投入量を削減し、低炭素社会構築に寄与していくことを前提とした工学的知見を見出すことと定めた。

本研究における方法論においては、LCI 法の中でも IOA を深化・発展させることを目的とし、使用段階を捨象可能な食料品と工業中間財を分析対象財とした。また農・水・畜産物と鑄鍛造品は産業としての裾野が広い部門であると同時に、エネルギー多消費型・CO₂ 多排出型の財である。これらの特質は、漏れなく生産波及効果を把握できる IOA に適するとともに、本研究で目指す低炭素社会構築のための知見を得るための分析対象として相応しいと判断し選定した。

第2章では、LCI の基礎概念と理論を俯瞰し、IOA と LCI の応用分析法であるハイブリッド法について先行研究に基づき分類しながら概観した。そして IOA の分析上の課題として最終需要 F が負値または小さい部門における、環境負荷の把握・比較が困難化する場合がある問題、いわゆる“最終需要の問題”、“IO 部門が限定されることによる詳細度の低さ” (the low level of detail) の問題、IO の発行年と分析年の時間的乖離の問題、すなわち“データの鮮度” (data age) の問題などを抽出した。本研究が目指す LCI の方向性は系列横断型 LCI であり、その展開において IOA の理論は基礎として欠くことができないが、IOA にもまた課題があるため、プロセス法を取り入れたハイブリッド法が本論文における分析法として選択されることを明らかにした。ハイブリッド法についての先行研究の精査・検討を通して、区分的ハイ

ブリッド分析法は既存の IO をそのまま利用でき、ほぼ完全な LCI 結果を比較的速やかに得ることが可能であることを指摘した。本研究の対象分野の分析法は既往の事例研究で見たとおり殆どがプロセス法によるものであったが、プロセス法単体の分析では現地調査によるデータ収集に労力を費やされるため、費用に対する効果、時間に対する効果がどうしても低くなる。本研究では区分的ハイブリッド分析法を採用し、データ収集負荷を緩和するとともに、原理上、間接影響の完全な把握をも意図することを示した。

第3章以降にて低炭素社会構築にあたっての知見を得るためにエネルギー投入量・CO₂排出量の定量化を行うにあたり、対象とする分野は農業・水産業・畜産業・鉄鋼製造業であると述べた。農・水・畜産物の先行研究の検討では、輸送プロセスが一つの鍵を握っていることを指摘した。また金属・素材分野の先行研究の検討では、製造業の基盤産業であるにもかかわらず鉄鋼製造に関する研究が比較的希薄であることと、エネルギー技術の分析、具体的にはキュボラの他に誘導炉を加えた分析が必要であることを指摘した。更に運輸・サービス部門の先行研究の検討では、現地調査によるプロセスデータの収集なしで IO と統計資料・文献から環境負荷を分析可能で、評価漏れの発生し易いサービス部門の負荷を推計できる分析手法を示した。本論文の分析で用いる手法は区分的ハイブリッド法であるが、当方法にも最終需要の問題と時間的遅延の問題が克服すべき課題として残されていることを指摘した。

第3章では、全国レベルでの農業部門と水産業部門、畜産部門の70品目について品目別エネルギー投入量・排出量を定量化した。分析にあたり IOA の分析上の課題である“最終需要の問題”への対応として、競争輸入型モデル $[I - (Z + M)A]^{-1}$ 型を用いた。また

“IO 部門が限定されることによる詳細度の低さ” (the low level of detail) の問題に対し、プロセス法を導入して既存 IO 部門を分解することにより個別農・水・畜産物レベルまでエネルギー投入量・CO₂排出量を把握した。

分析の結果、生産活動に投入するエネルギー量が大きいほど、CO₂ 排出量が大きくなることを明らかにした。また(生産投入エネルギー)/(食品熱量)比の分析からは、これらの食品を得るために殆どの食品でその食品熱量の数倍～数百倍のエネルギー投入が必要になるという結果が得られた。この結果より農業・水産業・畜産業がエネルギー集約的な形態で行われていることが示唆された。エネルギー投入量が大きい品目には、光熱費の負担の大きい温室栽培の野菜、多額の餌代を要する養殖品などが代表的な食品として挙げられ、エネルギー・CO₂ 負荷削減の観点からは、温室栽培品や養殖品よりも旬の食品、自然に採取される食品を選択するのが好ましいと分析した。地産地消型の生産システムは低炭素社会を構築していく上で重要であり、京都議定書第1次約束期間の後、それをいかに図っていくかが農業・水産業・畜産分野における政策課題の一つであると考察した。日本の食料品産業は、温室栽培、養殖などを通して商品の高付加価値化を進めてきた結果、それがCO₂排出量の増大に繋がっていると推察した。そしてその背後には日本のエネルギー供給がその大半を化石燃料に依存しているという事情があると指摘した。また LCI へのハイブリッド法の適用の観点からは、エネ

ルギー・環境負荷を押し上げている光熱費や餌代などを焦点をあて、詳細にプロセス法により再分析することにより、ハイブリッド法全体としての精度が向上するということが確認された。

第4章では、地域レベルでの地産地消型生産システムの効果を定量的に把握することを目的に、都道府県における農作物の生産および輸送に伴うCO₂排出量を推計し、その生産特性と輸送特性を定量的に示すために、モデル県として採用した茨城県で生産される農作物の生産プロセスCO₂排出量と、茨城県を最終消費地として輸送プロセスまで含めた農作物のCO₂排出量を推計、定量化した。更に他都道府県から輸送した場合の排出量との比較を行った。分析に当たってはIOAの分析上の課題である“最終需要の問題”への対応として、競争輸入型モデル $[I - (Z + M)A]^{-1}$ 型を用いた。また“IO部門が限定されることによる詳細度の低さ”(the low level of detail)の問題に対し、プロセス法を導入して既存IO部門を分解することにより、地域の個別農産物レベルまでCO₂排出量を推計した。その結果、次の3点が明らかとなった。(1)生産プロセスにおけるCO₂排出量は品目別に異なり、露地栽培と温室栽培における光熱動力費の相違が総排出量に差異に大きく影響を与える、(2)輸送プロセスにおけるCO₂排出量は距離のみではなく、輸送手段にも依存する、(3)生産および輸送プロセスを考慮すると、露地栽培、温室栽培によるCO₂排出量の相違により、生産プロセスからの排出量が輸送プロセスからの排出量よりも大きくなる場合がある。以上の3点を総合して、輸送プロセスを最小化できる地産地消はCO₂排出量削減にとって有効であることが示された。加えて農産物の生産方法(温室栽培等)が農業の低炭素化において鍵を握っていることが明らかとなった。環境負荷低減の視点からは、農作物別に、地産地消と他都道府県からの輸送を組み合わせ、食糧供給のプロセス全体からの低炭素化を構築していくことが重要であるとの結論を得た。そして第3章と同様に、ハイブリッド法の技法上、エネルギー・環境負荷を押し上げている要因に焦点をあて、詳細にプロセス法により再分析し、LCIにフィードバックすることにより、ハイブリッド法全体としての精度が向上するということが確認された。

第5章では、溶解炉である誘導炉とキュポラについて経済性と環境性の比較を行った。最初に経済性についてであるが、イニシャルコストでキュポラと誘導炉で差が大きいものの、耐用年間全体を通して見ると、ランニングコストの占める割合が大きかった。具体的には耐用年数12年のうち、イニシャルコストの占める割合はキュポラで約2%、誘導炉で約4%、ランニングコストの占める割合はキュポラで約98%、誘導炉で約96%と推計された。ライフサイクルコスト全体では誘導炉が優位であった。耐用年数12年間でみると、重要な位置を占めるのはランニングコストであった。キュポラの経済性はコークス比とコークス費の影響を受けており、コークスの単価が高騰または変動幅が小さくない状況で推移している現状では、誘導炉のキュポラに対する経営安定面を含む経済性の優位性は高まっていると分析した。次にCO₂負荷について、IOAの分析上の課題である“IO部門が限定されることによる詳細度の低さ”(the low

level of detail)の問題に対し、プロセス法を導入したハイブリッド法を用い、既存 IO 部門を分解することにより鋳鍛造品の CO₂ 排出量をキュボラ産・誘導炉産のレベルで定量化した。また最終財と中間財の財パターン別に CO₂ 排出量を把握した。そして把握し切ることが困難な間接影響まで推計可能であるハイブリッド法を適用して分析した結果、設備および運用、間接影響に至るまで、誘導炉の CO₂ 負荷はキュボラに比べて小さいことが確認された。CO₂ 負荷の差異は、設備起源に大差はなく、差異は運転の部分によるところが大きい、それは熱源の違いに起因することは明白であった。鋳鉄製造業の安定経営と CO₂ 削減の観点からは、旧式炉であるキュボラを誘導炉へ転換していくことが望ましく、キュボラと誘導炉のイニシャルコストの差が誘導炉への転換拡大の阻害要因と推察されることから、誘導炉の環境の優位性(外部経済)を市場メカニズムに織り込む制度の普及・拡大が今後の課題として考えられた。また鋳鍛造品の中間財負荷の推計からは、二次三次と続く他の加工部門の最終消費から多くの CO₂ が発生していることが見られたことから、低炭素社会を構築していくために、特定部門のみの対策で終わることなく、製品のサプライチェーン全体を俯瞰した対策が必要であることが改めて確認された。

上記に加えて、中間財と最終財という財パターン別に分析を行うことは、LCI 上、またハイブリッド法の適用上、重要な技術的ポイントと思われると考察した。プロセス法の適用による上流部分(中間財)の詳細な分析の実施は、プロセス法と IOA を組み合わせるハイブリッド法の精度向上に資する。

以上について、第3章、第4章でも得られたハイブリッド法による LCI の精度向上に関する知見を総合して次のように示した。LCI 実施にあたり、各産業を網羅する IO を用いた IOA を行うことにより、ライフサイクル分析上、重要度の高い部門を特定し、その部門についてプロセス法データ収集をより詳細に行い、ハイブリッド法分析にフィードバックすることにより、LCI としての精度が向上する。このようなハイブリッド法による LCI の実施は、間接影響把握と合わせてハイブリッド法の長所を拡大させ、一層の普及を促すと考えられる。

第6章では、~~本章では~~、2.3で指摘したIOの発行年と分析年の時間的乖離の問題への解決策の1手法を提示した。具体的にはIOを用いるLCIに関し、避けて通ることのできない課題として残されていた“データの鮮度”(data age)の問題に理論的に対処するためのアプローチを行った。具体的には基本表がまだ発行されていない年度における、産業構造の突発的変化が発生した場合、その影響を迅速に反映し、かつ簡易に推計できるLCI法を構築するための第一歩として、変動因子係数によるIOA推計モデルの構築とその検証を行った。それらの評価・分析から以下の結果が確認された。2005年の基本表・同年度のエネルギーバランス表を通して得られた直接・間接のエネルギー消費原単位を確定値とし、変動因子係数法、延長表、簡易表の3方法による2005年度推計値とを比較した結果、確定値との相対誤差率は小さい順に延長表、変動因子係数法、簡易表の順となり、変動因子係数法の相対誤差率は延長表と簡易表の間に位置した。また、直接・間接のエネルギー消費量・同原単位を推計する際、エネルギーバランス表がない場合を想定し、1年間および2年間の線型

補外を用いた3方法による推計値を確定値Kと比較した結果、変動因子係数法の精度は延長表未満、簡易表以上であり、予測時にも使用可能と判断できた。44部門におけるエネルギー消費原単位の相対誤差率 E_R が30%以内に収まる部門数の割合でも延長表、変動因子係数法、簡易表の順であった。以上から、本論文での検討の範囲では変動因子係数を用いたエネルギー消費原単位の補外的推計は一定の誤差を内包しつつも、迅速簡易に変化を反映するLCIの1手法となり得るとの結果を得た。また本方法は、データ入手に起因して発生する時間的遅延無しに使用でき、予測にも活用できる可能性が示された。当提案法は既存のLCIシステムへの実装も極めて容易に行うことができ、シンプルであるが故に多くのハイブリッドLCIと結合が可能である。今後多くの検証を経て本方法をはじめとする産業連関表の時間的遅延によるデータ制約に対処する手法を確立することによって、産業構造の突発的変化が発生した際にも、複雑に関連する社会全体の間接影響まで漏れなく把握できるというIOAの長所が最大限に活かされる。更にその長所を活かしつつ、社会経済の変化が年々速まる中において、当該年度での分析が可能となる。更に検証の蓄積は、産業別の相対誤差率の大小から、線型的に変化する傾向のある群と非線型的に変化する傾向のある群に産業を分類することが可能となるであろうと述べた。当該年度での分析法の確立はIOAを基礎としたエネルギー・環境負荷解析のためのLCIに対し一層の発展をもたらす、LCIにおけるIOAの普及の一端を担うことができるとの結論を得た。

本論文の結論は次の通りである。先行研究および本論文で展開した第3章、第4章、第5章との結果を照らし合わせれば、地球温暖化の進行を防止し、低炭素社会を実現していくためには、これまで2世紀に亘り継続し定着した化石燃料への依存体質から脱却しなくてはならない。広大な面積、膨大な人口を有する新興工業国を中心に生産・経済活動が地球規模で拡大するに伴い、物流も指数的に増大していくのは必然であるが、運輸・輸送に関わる環境負荷は無視できない重みを持つ。運輸・輸送部門の低炭素化のための対策は早急に講じる必要がある。また、物流システムの低炭素化とともに、あらゆる産業や生産活動の血液とも言え、サプライチェーン全体に影響する電力の供給源である電源部門の低炭素化が図られない限り、低炭素社会構築に向けての施策の効果は相殺され限定的なものに留らざるを得ない。電源の低炭素化は喫緊の課題である。なお、本論文で採用したハイブリッド法は各章においてLCI法として有効に機能した。本手法は環境負荷解析のための有力な分析法であることが示された。

7.2 問題点と今後の課題

7.2.1 限定的な分析範囲

第3章と第5章では「農業・水産業・畜産業」の食品および「鉄鋼製造業」の鉄鋼製品のエネルギー・CO₂ 負荷の定量化を行ったが、分析はそれぞれ全体の一部に留まっているという問題がある。

食品においては 70 品目からさらに分析品目数を増やし、次いで飲料や加工品までを含めた定量化を行うことにより、食料品部門としてのエネルギー・CO₂ 負荷の定量化が完結する。特に畜産部門では家畜の飼料の輸入比率が高いため、負荷を過小評価している可能性がある。別途補足的に海外の IO 等を用いた分析やプロセス法分析等による分析拡大が課題である。鋳鍛造品については「揺り籠から使用まで」の分析から、「揺り籠から墓場まで」、すなわち使用段階以降から廃棄・リサイクル段階まで拡張した負荷定量化が必要であり、それにより、CO₂ 負荷の全体像が明らかになる。また特に誘導炉については東日本大震災以降の電源構成の劇的変化が CO₂ 負荷に影響を与えている可能性があるため、その検証が今後の課題である。

7.2.2 単一モデルによる解析の限界

第 4 章では、地域レベルでの地産地消型生産システムの効果を定量的に分析したが、農産物分野に絞っているため、主として以下の分析の拡張が考えられる。都道府県ごとの生産プロセス原単位推計、より地域の特性を反映した CO₂ 排出量の推計、農作物のライフサイクル全体から見た CO₂ 排出量の推計、海外からの輸入作物との比較、都道府県別、品目ごとに CO₂ 排出量の少ない供給手段の分析などが挙げられる。

更に第 4 章ではモデル県として茨城県を採用したが、この 1 県だけの分析例で地産地消型生産システムの評価を一概に普遍化することには問題がある。茨城県は農業県であるが大消費地すなわち首都圏に隣接し、交通インフラの整備された県である。例えば宮崎県のような首都圏・近畿圏から遠く離れ、交通網も発展途上にある県をモデル県として設定して分析した場合、また別の傾向が見られると推測される。よって、分析対象自治体をその地理的条件等により複数のグループに分類し、第 4 章と同様の分析を行い、共通点と相違点を分析することによって地産地消型生産システムのより一般的な評価が可能となるが、そのような研究はまた行われていない。例えば分析対象の産物を米として統一し、上述のような複数モデルケースの分析を行えば、より詳細に地産地消型システムの効果を評価できると推察されるため、今後の研究の課題のひとつとして付け加えておきたい。

7.2.3 分析・対象境界の乖離

第 5 章の鋳鍛造品の間接負荷の推計からは、二次三次と続く他の加工部門の最終消費から多くの CO₂ が発生している状況が見られた。CO₂ 削減対策において特定部門のみの対策で終わることなく、製品のサプライチェーン全体を俯瞰した政策に資する知見を与えていかなければならない。サプライチェーンの地理的範囲の中には海外も当然含まれるためその把握漏れがないように考慮しなくてはならない。具体的には海外の影響を包含した LCI データの構築、使用が望まれるが、日本の場合、まだその整備は必ずしも十分ではなかった[安達 2007]。LCI データにおいて海外の影響が正確に反映されていない場合、推計される環境負荷に現実との乖離が生じる。第 5 章においてハイブリッド法により鋳鍛造品製造におけるキュボラと誘導炉の CO₂ 負荷比較を行ったが、ヨークスを例に以下に検討する。

キュボラの熱源であるヨークスは中国等から輸入される[産業研究所 2007]が、使用したコー

クスの LCI データが資源産出国における採鉱等の負荷まで包含しているかまでは確認できなかった。海外における負荷を網羅していない場合、7.2.1 で取り上げた家畜の輸入飼料のケースと同様に負荷を過小評価し、現実の負荷と推計環境負荷に乖離が生じている可能性がある。このような問題への対処には、7.2.1 で述べた国際 IO が貢献すると考えられる。

システム境界をはじめとして LCI データの不完全性または流動性等に起因する不確実性は、場合によっては LCI の結果自体を左右しかねない。例えばキューポラと誘導炉の比較においては、熱源の違いが CO₂ 負荷に影響を与えたと分析された。キューポラの熱源はコークスであり、誘導炉は電磁過熱である。ところが溶解のための熱エネルギーへの変換過程はキューポラが 1 回(化学エネルギー→①燃焼→熱エネルギー)なのに対し、誘導炉は 4 回(化学エネルギー→①燃焼→熱エネルギー→②ボイラー→力学エネルギー→③タービン・発電機→電気エネルギー→④電磁誘導→熱エネルギー)というキューポラに比較して複雑なステップを踏む。にもかかわらずキューポラに比べて誘導炉の CO₂ 負荷が低く推計されているのは電力の CO₂ 排出原単位(LCI データ)がコークスの CO₂ 排出原単位より低いためである。しかし 2011 年の東日本大震災以降、電力の約 8 割が火力発電で生産されており(2011 年度末のデータによる [FEPC2012b])、適用すべき LCI データに変化が生じている。

このような事態・現象は本論文全体に言えることであるが、本論文のまとめの時期に東日本大震災は発生した。本論文の条件は東日本大震災以前の条件を想定している。しかしながら上述のように東日本大震災以後は社会的情勢等の変化により、LCI データが大きく変容している可能性がある。これは今後の LCI について、再考する転機となる得るものである。

7.2.4 変動因子係数法検証の緻密化

第 6 章では、IOTs を用いる LCI に関し、“データの鮮度”(data age)の問題に理論的に対処するための変動因子係数法の構築を行ったが、その検証を更に重ねることにより、方法論の一層の精緻化を行うことが可能となる。精緻化の第 1 として、IOTs(IOTs: Official Input-Output Tables)の部門概念の整合化の問題がある。IOTs は基本的な枠組みに変更は無いが、原則として 5 年毎に改訂を行い、その都度部門概念や部門の範囲を変更されているため、時系列的な比較を行うためには、厳密にはそれぞれの表の部門概念の整合化を図らなくてはならない。時系列分析を行うにあたり川島ら[川島 2005]は、異時点間での分析が可能な時系列産業連関表(Time Series Input-Output table : TSIO)を構築している。TSIO の方法論を用いて異時点間での部門概念を特定年度に統一することにより、変動因子係数法はより精緻な検証の上に構築されることになる。

また第 6 章における補外的推計は、延長表にデータ欠損(未発行年)があったために、エネルギー消費負荷について、2 時点間の線型補外を用いているが、2 時点間による線型補外による推計では限界がある。すなわち推計の元になる時点数を n とすると、 $n \geq 3$ として、 n 元の連立方程式を解くことによって得られる $(n-1)$ 次方程式による非線型補外を用いることも考えられる。以上、2011 年度の基本表が発行された時点において、上述の事項を始めとした精緻化を加えた検証を行うことによって、変動因子係数法の実証基盤をより強固にしていく必要

がある。

7.3 展望

本節では、本研究の 7.1 で示した結論および 7.2 で指摘した問題点等に立脚し、今後の展望について示す。

7.3.1 データベース整備とソフトウェア開発

本論文が目指した IOA を基礎とした系列横断型 LCI の展開にとって、IO は共通の分析データとして存在しているが、ハイブリッド法のプロセス法部分に対するデータベースは共通化されておらず、また誰でも無料でアクセスし、自由に利用できるデータベースも数少なく、特に物量ベースのデータベースはその傾向が顕著である。LCI におけるデータベースは分析者自身の分析目的に沿い、それぞれ自由にデータベースを選択し解析すれば良いとの考え方も多く、それも理にかなっている。しかし、系列横断型 LCI の展開という目的を実現するためには、ある程度共通して基本となるデータベースが必要になる。

CO₂とエネルギー双方の物量型 LCI データを整備し、ゼロコストで自由に利用できるデータベースが構築され、一般公開されれば、LCI のより一層の普及が可能になる。LCI の一層の普及はその実践者をより増加させ、LCI の透明性を高めるとともに、ライフサイクル思考(Life Cycle Thinking) [本藤 2008a] [本藤 2008b]に基づき行動する人たちを増加させることに繋がり、デマンドサイドにおける地球温暖化防止施策を推進させる素地を作ることにもなる。

データベースの整備とともに、その整備されたデータベースを装填し、発展してきた LCI 理論を具現した環境負荷分析用ソフトウェアの開発が今後望まれる。ソフトウェアの開発と提供は、データベースそのものの提供と同等か、それ以上に、LCI の実践者・分析者の増加を促すと推察される。第 2 章で見たとおり、1990 年代以降、LCI 理論は進化を続けてきた。特に 2.4 で見た LCI の応用分析法であるハイブリッド分析法理論は著しい発展を遂げた。ハイブリッド法の分析上の有効性は、本論文における環境負荷解析を通して明らかになった。しかし、内山らが開発した“Quick LCA” [内山 1998]以降、ハイブリッド法による LCA ソフトウェアは開発されておらず、依然プロセス法、特に積み上げ法ベースの LCA ソフトウェアが主として用いられている。ハイブリッド法ソフトウェアは IO を中心的なデータベースとして搭載しているために、1～5 年の頻度で改訂あるいは簡易更新される IO に対応してそれを取り込むことにより、定期的なアップデートが原理的に可能である。さらにその応用として、各国の IO データや国際 IO を取り込むことにより、世界レベルで使用可能となり普及させていくことが可能と推察される。新ソフトウェアの開発においてはハイブリッド法ベースのソフトウェアを開発すべきと考える。

7.3.2 国際産業連関表の整備・地理的拡張

国際産業連関表(国際 IO)の構築が徐々に進みつつあるが、経済のグローバル化が以前にも増して急速に進んでいる現状を踏まえ、今後はより力を入れて国際 IO を一層広く拡張していく必要がある。個々の国における IO は国内で閉じられ、活用も国内の分析に留まっているケースが多い。分析する財にもよるが、輸入が増えれば増える程、IOA による環境負荷分析

は困難になり、プロセス法やハイブリッド法のプロセス法部分におけるデータ収集負荷が増大する。一国 IO は国内で閉じているが国際産業連関表(以下国際 IO)の構築が進みつつあり、それを使用した分析も考えられる。国際間の IO の構築は部門の整合化、データ品質の均一化、データ収集年度の統一化など必ずしも容易ではなく、一国 IO よりも部門数は粗い。しかし日本・中国国際 IO、日本・韓国国際 IO、日本・インドネシア国際 IO など整備が進められている[JETRO2013][宍戸 2010]。以上のような国際 IO があるが、比較的入手し易い国際 IO は二国間 IO が多く、至近の複数国による国際 IO はアセアン国際 IO、BRICS 国際 IO がある。アジア国際 IO もあり、櫻井らは 24 部門のアジア国際 IO を用いて、1985 年・1990 年・1995 年の貿易構造の変化や相互依存関係を分析している[櫻井 2002]。既存の二国間 IO や多国間 IO を更に地理的に拡張し、部門数も増加させた精度の高い IO が必要であり、それを環境負荷分析に適用していくことが考えられる。

例えば既に構築された国際 IO をベースに OECD³²全加盟国の最新型多国間 IO の構築が望まれる。今後、順次国際 IO を地理的に拡張・構築していくことにより、それぞれの国単独の IO と合わせて活用することにより、国外要因の制約のない IOA やハイブリッド法分析が世界レベルで可能となる。国際 IO と一国 IO の両方を使用した環境負荷分析の更なる深化が望まれる。

7.3.3 変動因子係数法の可汎性の拡大

IOTs の時間的遅延による LCI の制約に対する理論的な一処方箋を提示した第 6 章では、エネルギー消費負荷を例に取り上げたが、その他の環境負荷、例えば酸性化、オゾン層破壊、富栄養化といった環境負荷も対象として取り上げ分析することにより、本論文で提案した変動因子係数法は更に精査され、実用性と可汎性を増すことになる。特に温暖化負荷については最も重要な地球環境問題であるとの認識のもと、CO₂ 分析は欠かすことはできない。分析対象負荷の拡大と併せ、十分な検証サンプル数を蓄積した上で、各部門に対する相対誤差率の高低について、統計学的分析により明らかにしていくことが今後重要になる。

7.3.4 化石燃料への依存体質からの脱却

第 3 章の分析で明らかになった通り、食品のエネルギー投入量・CO₂ 排出量の比較から生産活動に投入するエネルギー量が大きいほど、CO₂ 排出量が大きくなり、食品を得るために殆どの場合でその食品熱量の数倍～数百倍のエネルギー投入が必要になる。また温室栽培、養殖などによる高付加価値化がそれらの状況に拍車をかけている現状にある。地産地消型の生産システムの拡大が上記の問題に対する有効な処方箋の一つとなり得るが、背後にある日本の化石燃料依存体質に注目した一層の分析が望まれる。

化石燃料への依存体質からの脱却は、主として 2 方面を対象としたアプローチに大別できる。すなわち「運輸部門」と「電源部門」における低炭素化である。運輸部門においては輸送手段の低炭素化、具体的には車両、船舶、航空機等の燃料の低炭素化が焦点となる。「電源部

³² 経済協力開発機構：Organisation for Economic Co-operation and Development [略] OECD

門]では CO₂ 排出量の少ない発電技術へのシフトおよび排出される CO₂ の回収・固定化が鍵となる。注目すべき技術の一つはバイオマスである。植物などの生物体(バイオマス)は有機物で構成されているため、燃料として利用可能で、これらの燃料を使って電気や熱を作ることができる。植物の持つ有機物は、太陽エネルギーが形を変えたものであるため無尽蔵であり、太陽光や風力と比較して自然エネルギーの中では必要に応じてエネルギー量を調整しやすい。エネルギー密度の低さから、化石燃料や原子力を代替する中心的な基幹電源となるには今後課題が残されているものの、サトウキビや大麦、トウモロコシなどの植物資源から作られるバイオエタノールは自動車の燃料としても使用可能であり脱化石燃料化の有望な手段の一つになり得る資源である[内山 2006]。東日本大震災以降、化石燃料依存は一層強まっているが、逆にこの現状に対する危機感を契機として、本論文で示したような問題意識に立脚した分析を積み重ねることにより、化石燃料依存体質からの脱却という困難な施策に対する知見を粘り強く与え続けていく必要がある。

参考文献

- [FEPC2012b]電気事業連合会(FEPC). “その他リリース情報”. 電気事業連合会(FEPC). http://www.fepc.or.jp/about_us/pr/sonota/1217266_1511.html, (参照 2012-12-1).
- [JETRO2013]日本貿易振興機構(JETRO). “統計資料: 産業連関表”. 日本貿易振興機構(JETRO)アジア研究センター. <http://www.ide.go.jp/Japanese/Publish/Books/Tokei/material.html>, (参照 2013-1-10).
- [安達 2007]安達毅, 茂木源人."鉱山費用推定システムによる採掘・選鉱プロセスを考慮した銅地金生産の CO₂ 排出に関するインベントリ分析."LCA 学会誌,2,3, 1-8,2007 年
- [内山 1998]内山洋司, 西村一彦, 本藤祐樹."産業連関表を利用した製品の LCA 手法: 簡易に計算できるソフトウェア"Quick LCA"の開発” 電力中央研究所経済社会研究所報告 Y97015, 25p.1998 年
- [内山 2006]内山洋司. エネルギー工学と社会 改訂新版. 放送大学教育振興会, 518p.2006 年
- [川島 2005]川島啓・内山洋司. 時系列産業連関表を用いたわが国の CO₂ 排出量の推移に関する構造分解分析(SDA). エネルギー・資源, 26, 3, 204-210. 2005 年
- [櫻井 2002]櫻井紀久,森由恵."日,米,アジア経済の相互依存関係について".電力経済研究.47, 59-72.2002 年
- [産業研究所 2007] (財)産業研究所. "鋳物用原材料問題への対応に関する調査研究・同参考資料 高周波誘導炉操業の現状."(2007) 62pp.2007 年
- [宍戸 2010]宍戸駿太郎. 環太平洋産業連関分析学会編. 産業連関分析ハンドブック. 426p.2010 年

[本藤 2008a] 本藤祐樹,平山世志衣,中島光太,山田 俊介,福原一郎"環境教育におけるライフサイクル思考の利用: 持続可能な消費にむけたミッシング・リンクの可視化と再生." 日本LCA 学会誌 4.3. 279-291.2008 年

[本藤 2008b] 本藤祐樹. " LCA における産業連関表の応用" .産業連関,16.2. 5-15. 2008 年

付録

付録 A. 産業連関表の 44 部門

農林水産業	精密機械
鉱業	その他の製造工業製品
食料品	再生資源回収・加工処理
繊維	印刷・製版・製本
パルプ・紙	プラスチック製品
化学	ゴム製品
石油製品	建設業
石炭製品	事業用原子力発電
ガラス・ガラス製品	事業用火力発電
セメント・セメント製品	水力・その他の事業用発電
陶磁器	自家発電
その他の窯業・土石製品	ガス・熱供給
銑鉄・粗鋼	水道・廃棄物処理
鋼材	卸売・小売業
鋳鍛造品	金融・保険業
その他の鉄鋼製品	不動産業
非鉄金属製錬・精製	運輸業
非鉄金属加工製品	情報通信業
金属製品	サービス業
一般機械	政府系サービス業
電気機械	公務
輸送用機械	その他

付録 B. 相対誤差率の上位と下位 5 部門

上位 5 部門

延長表	ER(%)	変動因子係数法	ER(%)	簡易表	ER(%)
情報通信業	159.7	再生資源回収・加工処理	392.4	再生資源回収・加工処理	731.2
再生資源回収・加工処理	126.8	情報通信業	167.6	情報通信業	148.6
石炭製品	109.0	化学	114.3	石炭製品	104.0
その他の鉄鋼製品	77.7	精密機械	78.0	非鉄金属製錬・精製	94.7
化学	77.4	石油製品	74.2	化学	78.2

下位 5 部門

延長表	ER(%)	変動因子係数法	ER(%)	簡易表	ER(%)
食料品	1.4	金融・保険業	0.6	食料品	0.5
金融・保険業	1.5	食料品	0.7	建設業	0.8
農林水産業	1.7	不動産業	0.8	パルプ・紙	1.5
水道・廃棄物処理	2.4	建設業	1.01	金融・保険業	1.6
建設業	2.6	パルプ・紙	1.04	水道・廃棄物処理	2.4

研究業績一覧

I. 査読付き論文

- [1] 小田秀充, 内山洋司. "産業連関表を用いた食料品部門のエネルギー・環境負荷分析". 産業連関,16.2,2008, 27-41.
- [2] 溝口勝哉・内山洋司・岡島敬一・小田秀充 . "地域性を考慮した農作物の生産および輸送に伴うCO₂排出量評価".日本LCA学会誌, 6 .3,2010,217-223.
- [3] 小田秀充・岡島敬一・内山洋司."キューボラと誘導炉の経済性分析と環境LCA分析". 環境科学会誌,26 .1,2013, 22-31.
- [4] 小田秀充・岡島敬一・内山洋司." エネルギー分析における変動因子係数を用いたインベントリ分析の提案および検証".環境科学会誌[掲載決定].

II. 国際会議

- [1] Hidemitsu ODA, Keiichi OKAJIMA and Yohji UCHIYAMA. "Economic and Environmental Effects of Induction Melting Furnace Analyzed by the LCA Method." The Eighth International Conference on EcoBalance. Tokyo, JAPAN, Dec, 2008

III. 解説・総説

- [1]小田秀充・岡島敬一・内山洋司."誘導炉導入による環境性・経済性分析について～ライフサイクルから見た評価～".エレクトロヒート No.162,2008,35-40.

IV. 学会発表

- [1] 小田秀充・岡島敬一・内山洋司." 誘導炉導入によるライフサイクルから見た環境性と経済性の評価".第 27 回エネルギー・資源学会発表会, 大阪,Jun,2008
- [2] 溝口勝哉・小田秀充・内山洋司." 地域性を考慮した農作物の生産プロセスにおけるエネルギー・環境負荷分析".第 25 回エネルギーシステム・経済コンファレンス, 東京,Jan.2009

謝辞

本学位論文を作成するにあたり、指導教官である筑波大学大学院システム情報工学研究科の内山洋司教授には、財団法人日本生産性本部出向時の1999年にお会いして以来、私の尊敬する学者であり環境・エネルギー研究を中心に長きに渡りご指導を賜りました。この場を借りて厚く御礼申し上げます。同システム情報工学研究科の岡島敬一准教授には研究室ゼミを通じて多くのご助言を頂きました。心より感謝の意を表します。また金野秀敏教授には、数学史等についてご指導をいただきました。深く感謝致します。構造エネルギー工学専攻の庄司学准教授には、RA業務等を通じて信頼性工学関連の貴重なご示唆をいただきました。改めて感謝致します。

歴代のリスク工学専攻長である糸井川栄一教授(元専攻長)および岡本栄司教授(前専攻長)、そして宮本定明教授(初代専攻長・現専攻長)には、決して諦めない心と力強い励ましを頂きました。この場を借りて深く感謝いたします。

私の在籍した内山研究室の方々にも多大なご支援をいただきました。特に佐藤善暁氏と溝口勝哉氏は私にとって研究上の親(内山教授)を同じくする血肉を分けた兄弟と言える存在であり、二人の存在なくして本研究はなく、改めて深く感謝いたします。

また、有限責任中間法人日本エレクトロヒートセンター内(当時)の岩瀬修事務局長、柳田啓一郎技術部長、服部和俊技術部部長および東京電力株式会社の花形将司法人営業部長らに多くの情報提供と指導をいただきました。特に富士電機サーモシステムズ株式会社の林静男社長には工場を見学することで分析に必要となる実際のデータを頂き、かつ多くの有益な助言をいただきました。ここに記して感謝の意を表します。

社団法人産業環境管理協会の須田茂理事(当時)、CFPチーム長の小関康雄博士、同協会委員等を歴任された阪元勇輝博士にはLCI実務をご指導いただきました。同協会では石谷久東京大学名誉教授、国立環境研究所の森口祐一博士をはじめとする委員の方々には各審議会等を通して、理論や研究上の鋭い示唆を頂き、深く感謝いたします。

茅陽一東京大学名誉教授および東北電力株式会社の幕田圭一元社長、仁志武雄元副社長をはじめ、鈴木敏夫氏、白根澤克行氏、伊藤晴夫氏、宇部文雄氏、原田広哉氏、松岡陽子氏、佐藤五郎氏の各氏は、信念の源であり続けて下さいました。改めて深くここに感謝いたします。

両親亡き後、長きにわたり亡父の従兄弟である生平幸立氏と私の従兄弟である小田秀之氏には、数少ない親戚として励ましを頂きました。ここに記して心より感謝いたします。

最後に岩手の墓に眠る両親に感謝いたします。

2014年1月