

鉄鋼のリサイクルシステム評価に関する研究

戸井 勇 人

# 鉄鋼のリサイクルシステム評価 に関する研究

戸井朗人

# 鉄鋼のリサイクルシステム評価に関する研究

## 目次

第1章 序論	1
1-1 地球温暖化問題と素材リサイクルの必要性	1
1-1-1 地球温暖化問題	1
1-1-2 鉄鋼業の二酸化炭素排出量とリサイクルの必要性	2
1-2 鉄のリサイクルの現状	4
1-2-1 電炉法による鉄のリサイクル	4
1-2-2 電炉法のエネルギー使用量と環境負荷	5
1-2-3 電炉鋼生産の推移と用途	5
1-3 リサイクルへの期待とその問題点	6
1-3-1 鉄鋼の再生利用のメリットとデメリット	6
1-3-2 環境負荷と素材の質の総合的評価の必要性	7
1-4 素材のリサイクルに関する研究の現況	7
1-4-1 リサイクルと環境負荷	7
(1) インベントリー法による環境負荷推計	7
(2) 産業連関表を用いた環境負荷の推計	9
(3) 鉄鋼業界の取り組み	11
1-4-2 リサイクルシステムの評価	12
(1) リサイクルによる消費エネルギー削減	12
(2) 不純物蓄積によるリサイクル性の変化	13
1-4-3 リサイクルによる不純物蓄積	14
(1) 不純物濃度の測定	14
(2) 不純物蓄積の影響	16
1-5 現時点までの成果と課題	17
1-6 本論文の目的と構成	18
1-6-1 目的	18
1-6-2 構成	18
参考文献	21

第2章 素材のリサイクルシステムのモデル化と解析	24
2-1 はじめに	24
2-2 素材の廃棄率が一定の場合のモデルとその解析	24
2-2-1 素材のリサイクルシステムのモデル化	24
2-2-2 素材のフロー及びストックの解析	25
2-2-3 素材中の不純物濃度の解析	28
2-2-4 素材リサイクルシステムの及ぼす環境負荷の解析	30
2-2-5 素材の使用期間と単位使用期間当たりの環境負荷	31
2-2-6 モデルの評価と問題点	33
2-3 社会における素材の使用期間を考慮したモデルとその解析	34
2-3-1 素材の廃棄過程のモデル化	34
(1) リサイクルシステム	34
(2) 素材の使用期間と廃棄率との関係	35
2-3-2 素材ストックの廃棄率推計式の導出	38
2-3-3 素材の平均寿命と廃棄率の関係	41
2-3-4 素材のフローとストックの解析	42
2-3-5 素材中の不純物濃度の解析	46
2-3-6 環境負荷の解析	47
2-4 むすび	48
参考文献	50
第3章 産業連関表を用いた製鉄プロセスの環境負荷分析	51
3-1 はじめに	51
3-2 産業連関表	51
3-2-1 産業連関表の概要	51
3-2-2 産業連関表の構成と考え方	52
3-2-3 環境負荷の推計	54
3-3 産業連関表を用いて環境評価を行う上での問題点	55
3-4 新たな投入係数表の作成	56

3-4-1	正方形の作成	56
3-4-2	鉄屑処理に関する投入	56
3-5	製品の流れに関する補正	59
3-6	二酸化炭素排出量の推計結果	62
3-6-1	直接投入されるエネルギーによる二酸化炭素排出量	62
3-6-2	他産業への波及効果も含めた総合的な二酸化炭素 排出量	64
3-6-3	二酸化炭素排出量の内訳	67
3-7	電炉への鉄投入の影響	67
3-8	鉄鋼投棄時の環境負荷	69
3-9	むすび	69
	Appendix 逆行列係数表	71
	参考文献	76
第4章	鉄鋼中の不純物蓄積の分析調査	77
4-1	はじめに	77
4-2	サンプルの採取及び分析方法	77
4-3	不純物蓄積の現状	78
4-3-1	分析結果	78
4-3-2	不純物濃度の分布	83
4-3-3	生産時期による不純物濃度の違い	88
4-3-4	他の研究との比較	89
4-4	不純物蓄積の許容レベル	90
4-5	シュレッダー処理工程における不純物混入	90
4-6	ヘビー屑処理工程における不純物混入	92
4-7	むすび	93
	参考文献	95
第5章	鉄鋼のリサイクルへのモデルの適用	96
5-1	はじめに	96

5-2	廃棄率が一定の場合のモデル	96
5-2-1	鉄鋼のストック及びフロー	96
5-2-2	リサイクル過程における鉄鋼への銅元素の蓄積	98
5-2-3	二酸化炭素排出量から見た環境負荷	101
5-3	素材の使用期間の分布を考慮したモデル	103
5-3-1	鉄鋼の廃棄率	103
5-3-2	電炉鋼ストックの割合と銅元素濃度	106
5-3-3	廃棄率等と素材の平均使用期間との関係	109
5-4	鉄鋼の質劣化の抑制と環境負荷の削減	111
5-4-1	分析に必要な式	111
5-4-2	鉄鋼への適用	113
5-4-3	パラメータを変化させた場合の分析結果	114
5-4-4	三つのパラメータを同時に変化させた場合	119
5-4-5	技術開発の進展により不純物混入率が変化した場合等の評価	124
5-4-6	社会的コストを最小とする二酸化炭素排出量削減のための方策に関する考察	128
5-5	むすび	129
5-5-1	素材の廃棄率を一定とするモデルの適用	129
5-5-2	素材の使用期間の分布を考慮したモデルの適用	130
	参考文献	131

第6章	素材ストックの増加率が低減していく場合の素材リサイクルシステムの解析と鉄鋼への適用	132
6-1	はじめに	132
6-2	社会における素材ストック量の推移	132
6-3	解析的モデルの導出	133
6-3-1	廃棄率及び再生素材の割合	133
6-3-2	再生素材中の不純物濃度	136
6-3-3	環境負荷	137

6-4	モデルの鉄鋼のリサイクルシステムへの適用	138
6-4-1	鉄鋼の使用期間及び廃棄率	138
6-4-2	電炉鋼割合及び銅元素濃度	140
6-4-3	環境負荷	143
6-5	むすび	145
	文献	147

第7章	総括	148
-----	----	-----

	記号一覧表	152
--	-------	-----

## 第1章 序論

### 1-1 地球温暖化問題と素材リサイクルの必要性

#### 1-1-1 地球温暖化問題

従来から、地球上における人々の産業活動及び生活の営みは、資源の採取や廃棄物の排出といった行為を通じて環境に負荷を与え、時として自然を傷つけてきた。近年、法的あるいは技術的取り組みの進展により、かつて見られたような局地的な公害や過度の環境破壊はその発生が減少してきている。しかしながら、増大し続ける人々の産業活動・社会活動は、地球の持つキャパシティーを脅かすほどの規模に達しつつあり、今後は、個々のプロセスごとでなく、産業あるいは社会の活動全体を見直し、人類が持続的に発展していくための新たな方策をみつけることが必要となってきた。具体的には、酸性雨、地表の砂漠化、オゾン層破壊、地球温暖化等がすでに問題となりつつあり、早急に適切な取り組みがなされない場合には、21世紀中にも人類全体の生活や産業活動に直接的かつ大きな影響を生じるようになるものと考えられている。

これら地球環境問題は、その重要性及び緊急性から、世界の国々が高いプライオリティーで取り組んでおり、また、国際的な取り組みも多くなされている。地球サミットが世界主要国の首脳参加を得て開催されているほか、個別問題についても、オゾン層破壊に関するモントリオール議定書採択(1987)、地球温暖化問題に関するハーグ宣言採択(1989)等多国間ベースの国際的な取り組みを促進する取り決めがなされている。さらに、標準化を通じて経営管理のあり方や製造プロセスの根本的かつ総合的な見直しを行い産業活動による環境への負荷を削減していくため、国際標準化機構の環境管理規格であるISO14000シリーズが1993年以降策定されてきており、さらにLCA手法の標準化等へその適用範囲の拡大が図られている<sup>1)2)</sup>。

地球環境問題の中において、最も深刻な影響が考えられ、かつ、早急な対応が必要なものの一つとして、地球温暖化問題が挙げられる。地球は生命活動等のもとなるエネルギーを太陽から受けている。太陽から地球に届いたエネルギーは再び宇宙に放出されるが、地球の大気中に存在する二酸化炭素等のガスは、この

地球から放出される長波放射のエネルギーの一部を吸収しており、これにより地球は比較的温暖に保たれてきた。しかしながら、産業革命以来、人類の経済活動の増大に伴い、大気中の二酸化炭素量は急激に増加してきている。現在の大気中の二酸化炭素量は、産業革命時に比べて約25%増加していると言われており<sup>3)</sup>、さらに現在もその急激な増加が続いている。このため、早急に適切な対策がとられない場合には、地球のエネルギーのバランスが変化し、地球全体の温暖化が急速に進んでいくものと予想されている。1995年に開催された気候変動に関する政府間パネル（IPCC）において採択された第2次評価報告書においては、中位シナリオとして、2100年に約2度の気温上昇、約50cmの海面上昇、極端な高温等の気象変動等が予測されている<sup>4)</sup>。このような気温の変動は、過去1万年の間に例を見ない極めて急激な変動であると考えられている。

このような急激な温度の上昇がもたらす影響を正確に予測することは不可能であるが、地球の平均温度の上昇及びこれによる地球規模の気候の変化は、植生の変化による森林破壊、水資源循環への影響、洪水や高潮等を引き起こし、産業や人々の生活に多大な影響を与える恐れがあるものと考えられている。

#### 1-1-2 鉄鋼業の二酸化炭素排出量とリサイクルの必要性

地球温暖化問題は、その原因が二酸化炭素等ほとんど全ての人間活動から排出されるものであり、これへの対応に当たっては産業及び社会活動全般の見直しが必要とされることとなる。中でも、産業界はその大きな部分を排出している。例えば日本については、表1-1に示すように、1990年において炭素換算で約3億2千万トンの二酸化炭素が排出されているが、そのうち産業部門からのものが約1億5千万トンで、全体の約半分を占めている<sup>5)</sup>。そのうち圧倒的なシェアを占めているのが製造業で産業全体の90%以上を排出しているが、中でも鉄鋼業が大きく約5千万トン、日本全体の15%に当たる二酸化炭素を排出している<sup>6)</sup>。これは、自動車の走行に伴う排気ガスの総量を上回っている。また、世界全体の二酸化炭素排出量は1987年において約52億トンと推計されており、我が国はそのうち4.7%を占めている。我が国以外では、米国、ロシア及び中国の三ヶ国で50%以上を占めているが<sup>7)</sup>、これらの国についても鉄鋼業からの排出量は相当程度あるものと考えられる。例えば、1990年における世界の粗鋼生産量

は約7.3億トンであり、粗鋼トン当たりの二酸化炭素排出量を0.5 t C/tとすると、鉄鋼業からの排出量は全体で約3.65億 t C/年となり、この年の世界の総排出量61.7億 t C/年の約5.9%を占めていることとなる<sup>8)</sup>。

今後地球温暖化問題に対応していくためには、鉄鋼に代表される素材について、生産プロセス等から排出される二酸化炭素量を相当程度削減していくことが極めて重要であると言えることができる。

表1-1 我が国における分野別二酸化炭素発生量(1990年度)

部門		二酸化炭素排出量	
		排出量(百万トンC)	割合(%)
産業部門		150.8	47.6
	農林水産業	9.4	3.0
	建設業	4.3	1.4
	鉱業	0.6	0.2
	製造業	136.5	43.1
	鉄鋼業	48.0	15.1
	窯業土石	22.9	7.2
	化学工業	16.1	5.1
	紙パルプ	10.3	3.2
民生部門		71.6	22.6
運輸部門		58.5	18.5
廃棄物部門		12.0	3.8
転換部門自家消費・ロス等		22.7	7.2
総計		316.9	100.0

注：電力起源の排出分は電力需要量によって比例配分してある。

出所：環境庁推計

地球温暖化問題に関しても、近年、国際的な取り組みが積極的に行われてきている。1992年にブラジルにおいて開催された国連開発環境会議において、参加国間で、気候系に対して危険な人為的影響を及ぼすことにならない水準で大気中の温室効果ガスの濃度を安定化させることを目的とする気候変動枠組み条約が締結された。我が国においても、平成2年に地球環境保全に関する関係閣僚会議

において地球温暖化防止行動計画が決定され、二酸化炭素排出量を2000年以降1990年レベルで安定化させることが目標として掲げられた。平成6年には環境基本計画が閣議決定され、長期的には「気候変動枠組み条約」の究極的な目標を達成し、中期的にはそのための国際的枠組み作りに貢献するとの基本方針が決定された<sup>9)</sup>。このような動きを受けて、我が国鉄鋼業界も鉄鋼連盟内に地球環境問題対策委員会を設置し、鉄鋼業における省エネルギーの推進、我が国の進んだ省エネ・環境保護技術の発展途上国への技術協力等を推進してきている<sup>10)</sup>。

我が国鉄鋼業は、石油ショック以降、省エネ対策として、連続铸造比率のアップ、工程の連続化、コークス乾式消火設備等による排エネルギー回収、操業改善などを実施してきた。この結果、粗鋼生産に係るエネルギー原単位は現在では石油ショック前と比べて20%程度低下しており、世界最高水準に達している<sup>11)</sup>。しかしながら、このことは省エネ設備投資がすでに一巡しており、従来の省エネ等の方法によるエネルギー使用抑制及びこれによる環境負荷の削減の余地が今後必ずしも大きくないことを示している。このような状況の中で、今後鉄鋼の生産に係る二酸化炭素排出等の環境負荷を削減し、地球温暖化問題に対応していくためには、鉄のリサイクルをより積極的に行うことが必要となっている。

## 1-2 鉄のリサイクルの現状

### 1-2-1 電炉法による鉄のリサイクル

鉄は、主に、鉄鉱石から高炉・転炉を用いた一貫製鉄法により生産されるほか、社会で使用後廃棄された鉄等がスクラップとして回収され、これから電炉法によっても生産されている。我が国においては、昭和30年代までは平炉法によっても相当量の粗鋼が生産されていたが、昭和39年に平炉と転炉による粗鋼生産量が逆転した後、昭和40年代半ばに転炉法への移行がほぼ完了し、これ以降はほとんどの鉄が一貫製鉄法及び電炉法によって生産されてきている。一貫製鉄法は主として鉄鉱石を原料とするほか、自家発生屑と若干の廃スクラップを使用している。電炉法は主として廃棄された鉄スクラップを原料としているが、鋼材の質を向上させるため通常4～6%程度の銹鉄が加えられてきている<sup>12)</sup>。

### 1-2-2 電炉法のエネルギー使用量と環境負荷

一貫製鉄法が鉄鉱石の還元等のプロセスを含むためエネルギー使用量が大きく、二酸化炭素排出量も大きいことに対し、電炉法は鉄スクラップを使用するため鉄鉱石の還元過程が必要なく、このためエネルギー使用量、二酸化炭素排出量ともに相当程度小さいと考えられる。一般には、一貫製鉄法と電炉法により単位量の粗鋼を生産するために必要なエネルギーの比は、3:1~4:1程度と言われている<sup>13)</sup>。電炉法において多く使用される電力の一部が水力や原子力等二酸化炭素をあまり排出しない方法によっても発電されていることを考えると、二酸化炭素排出量の差はさらに広がることも考えられる。

一方、電炉法は、社会から廃棄された鋼材を原料とするため、原料中に鋼材中に含まれていた他元素、あるいは、廃棄材の破砕・別過程で混入した不純物等が含まれる場合が多い。不純物の中には、アルミ、亜鉛等比較的簡単に除去できるもののほか、銅、すず等の技術的又は経済的に完全に除去することが困難な元素が含まれる場合も多く、結果として、電炉鋼の質は一貫製鉄法によるものに比べて低い。このため、その用途も現時点では限られたものとなっている。

### 1-2-3 電炉鋼生産の推移と用途

我が国における電炉鋼の生産は、昭和30年代以降全粗鋼生産の15~20%で推移してきたが、昭和50年代以降は一貫してその割合が増加してきており、近年では粗鋼生産量約1億トンのうち約30%又はそれ以上を占めている<sup>14)</sup>。鉄鋼のおおまかなフロー図を図1-1に示す。粗鋼の生産量から輸出量を引き輸入量を加えた粗鋼見掛消費量に対する比で見ると、電炉鋼の占める割合はさらに大きくなり40%近くとなる。欧米においては粗鋼全生産量に電炉鋼の占める割合は日本より高く、米国では近年約39%、EC平均では約33%となっているが、見掛消費量に対する電炉鋼の割合はそれぞれ約32%、37%と日本より低い水準となっている。すなわち、国内での使用に着目すると、日本は再生素材である電炉鋼の積極的な使用を行ってきているということが出来る。一貫製鉄法により生産された鉄鋼は、主に機械、システム類に使用されているのに対し、電炉鋼はその大部分が建設・土木関係で使用されている。

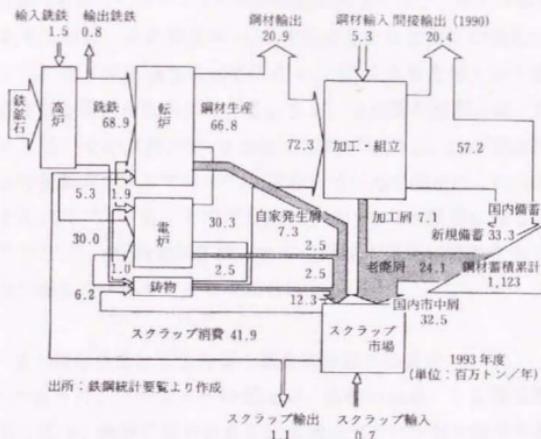


図 1-1 我が国における鉄鋼フローの概要

### 1-3 リサイクルへの期待とその問題点

#### 1-3-1 鉄鋼の再生利用のメリットとデメリット

電炉法により廃スクラップの再生利用を促進することは、粗鋼の生産に必要なエネルギーを削減するだけでなく、廃棄された鋼材の埋め立て等処分にかかるエネルギーを不用とすることにより、鉄鋼生産等による二酸化炭素排出量の削減に相当程度寄与するものと期待される。一方、リサイクルに当たっては廃棄された鋼材や機械類の中から鉄分だけを選別することが必要であり、廃材は必要に応じてシュレッダー等にかけて粉砕され、鉄が分離・分別されることとなる。このような回収・分離・分別過程において他種金属の部品や合金等からある程度の不純物の混入は事実上避けられず、このため、リサイクルを継続していくことにより鉄鋼中に不純物が蓄積していく恐れがあると言われている<sup>15) 16) 17)</sup>。

現時点で電炉法による製鋼上最も問題となっている不純物元素は、銅とすずである。これら元素は電炉による溶解及び精錬の過程では除去されずに鋼中に入り

込み、圧延等の過程でクラック発生等の問題を引き起こす。例えば銅については、普通鋼の熱間圧延時にその濃度が0.17%を越えると割れが発生し、濃度が高くなるにつれて割れ発生程度は大きくなり、0.28%を越えると割れ発生温度領域が広がるとの報告がなされている。また、普通鋼の熱間圧延に及ぼす影響については、その濃度が0.05%で割れが増加し、かつ割れ発生温度領域が広がるとの報告がなされている<sup>19)</sup>。現在すでに電炉鋼中のこれら元素の混入状況は、銅で0.2~0.5%、すずで0.02~0.04%程度に達しているとの報告がある<sup>19) 20) 21) 22)</sup>。不純物の蓄積はすでに鋼材の使用に問題を生じる可能性のあるレベルに達しつつあるものと考えられる。

### 1-3-2 環境負荷と素材の質の総合的評価の必要性

以上述べたように、リサイクルの促進は、鉄鋼の生産による環境負荷を削減する効果がある反面、鉄鋼の質の劣化を引き起こすという負の効果も有している。今後、社会が鉄鋼の使用から得ることのできる便益を確保しつつ、地球温暖化等の環境問題へ対応していくためには、鉄鋼が社会に与える効用をこれら正負の両面を考慮しつつ総合的に評価していかなければならない。具体的には、社会における鉄鋼のストック量の増加率やリサイクルの程度に応じて、環境負荷や素材の質が中長期的にどのように変化するかを定量的に評価することが不可欠となっている。このような総合的な評価が可能となることにより、環境負荷の削減と素材の質の劣化のトレードオフ関係が明確となり、社会の得る総合的な効用を踏まえたリサイクルの進め方を明確にすることができる。

## 1-4 素材のリサイクルに関する研究の現況

### 1-4-1 リサイクルと環境負荷

#### (1) インベントリー法による環境負荷推計

地球環境問題への意識が世界的に高まってきていること、また、LCA等の手法が広く知られるようになってきたことを背景として、LCA手法を用いて製品のリサイクルによる環境負荷低減の効果を定量的に評価する試みが多くなされている。例えば、現在までに、食品トレイ<sup>23)</sup>、紙製牛乳容器<sup>24)</sup>、アルミ缶<sup>25)</sup>、容

器・包材<sup>29)</sup>等を対象としてリサイクルによる環境負荷の削減効果の評価が行われてきている。近年、LCAの概念を素材そのものにも適用して、素材がそのライフサイクルにわたって環境に及ぼす負荷を定量的に評価しようとする試みが行われている。素材は範囲が広くまたプロセスも多様であるため、現時点では客観的で世界標準となりうるLCA手法確立のための問題点の整理やインベントリーデータの収集・蓄積が主として行われている<sup>27)28)29)</sup>。

例えば、エコマテリアル研究会は、環境負担性評価システム構築のための基礎調査研究において、素材の生産、製品化、使用、再生を含む総合的なプロセスを対象として、材料のライフサイクルでの環境負荷を評価するための手法の開発と、金属素材のインベントリーデータベースの作成を行っている。具体的には、自動車、家電製品等を対象に、主に積み上げ法で生産工程、リサイクル工程等におけるCO<sub>2</sub>排出量その他を算出し、使用される素材の違い等による製品のライフサイクルにわたるトータルな環境負荷の程度を比較している。この調査研究の一環として行われた金属素材インベントリーデータベースの作成においては、鉄鋼統計年報等のデータをもとにプロセスごとのエネルギー原単位を算出してそれに排出係数をかけることにより素材の生産に係る環境負荷量を算出している。ここでは、粗鋼の生産によるCO<sub>2</sub>排出量は0.84 t CO<sub>2</sub>/t (0.23 t C/t)と推計されている<sup>30)</sup>。

また、金属、樹脂等の各種素材を対象として、資源環境技術総合研究所で開発されたLCA用ソフトウェア(NIRE-LCA)を使用して、原料等の海外各国からの輸出後のLCIデータをもとに、ライフサイクルでのCO<sub>2</sub>及びSO<sub>2</sub>の排出量を求める研究が実施されている<sup>31)</sup>。鉄鋼については一貫製鉄法による製鋼について評価が行なわれており、ステンレス鋼板、めっき鋼板、冷延鋼板等のCO<sub>2</sub>及びSO<sub>2</sub>排出量が算定されている。この中で、電気メッキ鋼板の製造に係るCO<sub>2</sub>排出量は1.356 kg CO<sub>2</sub>/kg (0.37 t C/t)、冷延鋼板については1.288 kg CO<sub>2</sub>/kg (0.35 t C/t)と報告されている。

日本鉄鋼協会の基礎研究会「鉄鋼業における炭酸ガス抑制対策研究会」においては、2年間にわたり一貫製鉄法及び電炉法による製鋼のエネルギーフローと炭酸ガス発生量の評価が実施されている。この中で行われた一貫製鉄システムの評価では、日本の製鉄所の平均的なデータをもとに、コークス工程、高炉工程、加

工工程等の工程ごとのエネルギー収支を算定するとともに、各プロセスで用いられるエネルギー源の形態から炭素排出量を推計している。これによれば、一貫製鉄法での下工程までを含めた炭素排出量は、粗鋼換算で $0.594 \text{ t C/t}$ となっている<sup>30</sup>。

また、同研究中では、電炉法による炭素排出量についても、プロセスごとのエネルギー消費データをもとに推計している。電炉法による炭素排出量は、粗鋼生産工程までで粗鋼トン当たり $71.56 \text{ kg C}$ 、棒鋼への加工工程までを含めると $102.51 \text{ kg C}$ とされている。

米国においては、ヤングらが、鉄、アルミニウム等の主に自動車に使用される素材を対象として、積み上げ法により単位の素材生産に必要な全エネルギー消費量gross energy requirement (GER)、生産工程から排出される様々なガスの地球温暖化効果をCO<sub>2</sub>換算で表したglobal warming potential (GWP)及び生産工程から排出される廃棄物の重量の和であるsolid-waste burden (SWB)を算出し、このデータをもとに、自動車の素材の構成比を変化させた場合に、ライフサイクルでの環境負荷がどのように変化するかについて検討している<sup>31</sup>。この中において、一貫製鉄法と電炉法による粗鋼の生産過程から排出されるCO<sub>2</sub>その他のガスをGWPとして求めている。その結果によれば、一貫製鉄法、電炉法ともに $2 \text{ kg CO}_2/\text{kg}$  ( $0.55 \text{ t C/t}$ )と推計されているが、同時に、電炉法によるGWPの値は電炉の主要エネルギー源である電力がどのような方法で発電されているかにより大きく結果が違っていると報告されている。

## (2) 産業連関表を用いた環境負荷の推計

インベントリー法は、つながりの明確なフローを詳細に追っていくことにより総合的な環境負荷を推計しようという方法であるが、このほか、フローは多少粗くても系全体を広範に網羅することにより総合的な環境負荷を求めようとする方法がある。これが、産業連関表を用いた環境負荷の推計である。

この分野に早くから取り組んでいる吉岡らは、1985年産業連関表を用いて406行406列の投入表を作成するとともに、各産業部門におけるエネルギー原単位及びCO<sub>2</sub>排出量を求め、これらをもとに各産業部門における生産額100万円当たりのCO<sub>2</sub>排出量を誘発分までを含めて求めている<sup>34</sup>。推計に当たっ

て、海外から輸入される中間投入物の生産に係るCO<sub>2</sub>排出分は含んでいない。これによれば、誘発分を含む生産額100万円当たりのCO<sub>2</sub>排出量は、銑鉄・鉄屑が33,186kgCO<sub>2</sub>、フェロアロイが19,107kgCO<sub>2</sub>、粗鋼が20,736kgCO<sub>2</sub>、熱間圧延材が16,544kgCO<sub>2</sub>、鋼管が11,551kgCO<sub>2</sub>、冷間仕上げ材が12,370kgCO<sub>2</sub>、メッキ鋼材が9,418kgCO<sub>2</sub>と報告されている。85年産業連関表の物量表をもとにこれを製品トン当たり炭素重量に換算すると、銑鉄・鉄屑が0.29tC/t、フェロアロイが1.02tC/t、粗鋼が0.30tC/t、熱間圧延材が0.36tC/t、鋼管が0.39tC/t、冷間仕上げ材が0.37tC/t、メッキ鋼材が0.31tC/tとなる。

電力中央研究所は、1990年産業連関表をもとにやはり約400行400列の投入表を作成し、これをもとに誘発分までを含めた製品ごとのCO<sub>2</sub>排出量を推計している<sup>35)</sup>。推計に当たって、海外と国内の生産性等の格差の大きな天然資源等については我が国の産業連関表から推計せず、別途調査したこれら輸入材のエネルギー原単位及びCO<sub>2</sub>排出原単位を用いて総合的なCO<sub>2</sub>排出量の算定を行っている。これによれば、電炉法による粗鋼生産時のCO<sub>2</sub>排出量は0.71tCO<sub>2</sub>/t(0.19tC/t)、一貫製鉄法による粗鋼生産については1.41tCO<sub>2</sub>/t(0.38tC/t)と報告されている。

また、外岡らは、1990年産業連関表に基づく405行405列の投入表をもとに、素材ごとのCO<sub>2</sub>排出量を算定するとともに、プロセスごとの燃焼状態も考慮してNO<sub>x</sub>及びSO<sub>x</sub>排出量の推計を行った<sup>36)</sup>。推計に当たっては、輸入材に対して特別な扱いは行わず、海外においても我が国と同様な産業連関関係が存在しているものとして計算を行っている。CO<sub>2</sub>排出量の推計結果は、電炉法による粗鋼生産で約0.18tC/t、一貫製鉄法で0.35tC/tと報告されている。

一方、堂野前らは、産業連関表を用いて環境負荷の推計を行う場合の問題点を指摘している<sup>37)</sup>。産業連関表を用いた環境負荷の推計は近年多く行われているが、産業連関表は産業部門間の取引金額を表しているものであり、環境負荷の評価が正確であるためには部門間の取引金額が物量ベースの取引関係を正しく表すものとなっていなければならない。堂野前らは、鉄鋼を取り上げて産業連関表が物量

の流れをどの程度正しく表しているかについて検討を行っている。その結果、鉄鋼に関しては、産業部門の区分が粗いため中間製品の投入関係を正しく表していないこと、同種製品の取引先による価格の違い等が反映されていないこと等から、産業連関表上の金額表示は物量の取引関係をかならずしも正しく表していないことを明らかにしている。同時に、製品の実際のフローや物量データをもとに、投入量の修正や列の分割を行うことにより、このような問題にある程度対応して産業連関表の修正を行うことが可能であることを示している。

ここで紹介した各種調査研究に報告されている一貫製鉄法及び電炉法による製鋼からのCO<sub>2</sub>排出量推計値を表1-2にまとめて示す。

表1-2 鉄鋼生産の環境負荷推計値 (単位: t C/t)

文献番号	手法	一貫製鉄法	電炉法	その他	備考
30	積み上げ			0.23	粗鋼平均
31	積み上げ			0.35	冷延鋼板
32	積み上げ	0.594			下工程含む
32	積み上げ		0.072		
33	積み上げ	0.55	0.55		GWP (CO <sub>2</sub> 換算)
34	産業連関			0.30	粗鋼平均
34	産業連関			0.36	熱間圧延材
34	産業連関			0.37	冷間仕上げ材
35	産業連関	0.38	0.19		
36	産業連関	0.35	0.18		

### (3) 鉄鋼業界の取り組み

鉄鋼業界は鉄鋼連盟等を中心としてLCAに積極的に取り組んでいる。信頼性の高い世界標準データベースを構築することにより、製造プロセスをLCAの観点から見直すこと、ISOの基準に対応できる体制を整備すること等を目指して、国際鉄鋼協会(IISI)のプロジェクトとして、一般的に知られているLCA手法のフェーズ1であるゴールと目的の設定及びフェーズ2のインベントリー解析を同時に行っている。鉄鋼生産工程を20のモジュールに分割し、電炉プロセスも含めて、IISI参加国の緊密な連携のもとでインベントリーデータの収集

を行っている。1997年中に結果がまとめられることとなっている<sup>39)</sup>。

#### 1-4-2 リサイクルシステムの評価

##### (1) リサイクルによる消費エネルギー削減

原材料からの新たな素材の生産と廃棄された素材の再生を両方含むリサイクルシステムの総合的な評価は、現在までのところ、主にリサイクルによる消費エネルギーの削減効果を中心に検討が行われてきている。

鉄鋼業のエネルギー使用量及び環境負荷については、鉄鋼統計年報に粗鋼全体の平均的なエネルギー原単位が報告されている<sup>39)</sup>。粗鋼生産法ごとでは、一貫製鉄法の単位生産量当たりのエネルギー使用量については公表されており、電炉法のエネルギー使用量についても粗鋼全体のエネルギー原単位と一貫製鉄法のエネルギー使用量から推計がなされている<sup>40)</sup>。これによれば、電炉法による粗鋼生産エネルギーは、一貫製鉄法の約4分の1となっている。

リサイクルによる省エネの可能性をモデルに基づき評価する試みとしては、海外から輸入される原料から金属を生産するプロセスと国内で発生する金属屑を再生して金属を生産するプロセスを両方含むシステムをモデル化し、各プロセスで消費されるエネルギー量を各種統計から求めた上で、マテリアルバランスから再生材が多い場合と少ない場合のエネルギー消費量の比較を行っているものが報告されている<sup>41)</sup>。この中で、鉄鋼を対象として新たに生産されるものと再生材の比が、75:35の場合と60:50の場合の比較を行い、再生材の比率が大きい場合には約9%のエネルギー節約が可能であるとの結論を得ている。製品生産量を一定とした分析であり、かつ、再生材や不純物の蓄積については評価を行っていない。

松橋らは、産業連関表を用いることにより部門ごとの鉄鋼の投入量及び間接輸出货量を推計し、これをもとに、各部門に投入された鉄がその後ワイブル分布に従って廃棄されるものと仮定して、我が国の今後の老廃スクラップの発生量を推計した<sup>42)</sup>。また、我が国の転炉及び電炉のスクラップ処理可能量並びに鉄鋼製品の品質からみた鉄屑消費可能性についても分析を行い、発生した鉄屑の使用限界について分析を行っている。この結果、転炉に投入する原材料中のスクラップ比の上昇と電炉の容量の増大が行われた場合には、2005年において、粗鋼生産の平

均的なエネルギー原単位を現在の $0.42 \text{ toe/t}$ から最大で $0.32 \text{ toe/t}$ まで削減できる可能性があると結論づけている。

## (2) 不純物蓄積によるリサイクル性の変化

近年、リサイクルに際して不純物が問題となっていることから、不純物の濃度がリサイクルシステム全体にどのような影響を与えているかを分析しようとする試みが行われている。柴田らは、鉄鋼を不純物濃度により高品位材と低品位材に分け、高品位材と低品位材の両方を生産する一貫製鉄プロセス、低品位材のみを生産する電炉プロセス及びスクラップの質を向上させるアップグレードプロセスの三つのプロセスからなるシステムを対象として(図1-2参照)、マテリアルバランスからスクラップの使用割合や不純物蓄積の度合いによって各プロセスの生産量がどのように変化するかを検討を行っている<sup>43)</sup>。スクラップは基本的に低品位材向けに供給されるが、スクラップ供給量が低品位材への需要を上回る場合にはアップグレードプロセスを経て高品位材向けへ供給され、さらに、スクラップ品位が低品位材としてのレベルをも下回る場合には、一部がアップグレードプロセスへ回された後希釈用として電炉に加えられると仮定している。スクラップの品位は全使用原料中のスクラップの割合が一定値を越えるとその越えた割合に比例して低下すると仮定して、スクラップ使用量が増加した場合の各プロセスの生産量・処理量を推計している。また、システム全体のエネルギーバランスをもとに、再生プロセスにおける必要エネルギーが増大した場合に再生を行うことによりかえって消費エネルギーが増大してしまう可能性があることを示している。しかし、不純物蓄積や再生材蓄積のプロセスそのものについての分析は行っておらず、これらの値を外生的にあるいは簡単な仮定の下で与えた上で、マテリアルフロー及び消費エネルギー量の変化について分析を行っている。

柴田らはこれに次いで、アルミニウムの生産、再生及びスクラップのアップグレードの三つのプロセスにより構成される類似のシステムを対象として、スクラップの使用量が増加した場合の各プロセスの生産量の変化について分析を実施している<sup>44)</sup>。製品への需要及びスクラップの回収量は、スクラップ中の不純物濃度により決定されると考え、製品需要量及びスクラップ回収量と不純物濃度との間に一定の関数関係が成り立つとの仮定の下で、各プロセスの生産量、再生材利用の上限等を推計している。しかし、前報と同様に、不純物蓄積や再生材蓄

積のプロセスの分析は行われていない。

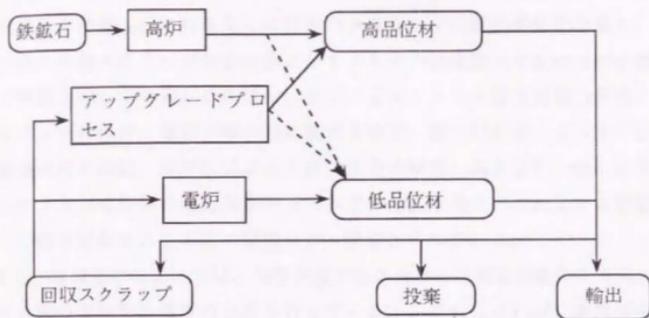


図 1-2 アップグレードプロセスを含むリサイクルシステムのモデル

また、アルミ合金を対象として、リサイクルの際の希釈の必要性まで含めての合金生産に係るライフサイクルでの環境負荷の評価が行われている<sup>45)</sup>。これによれば、新地金の生産時には添加元素によるCO<sub>2</sub>排出量の違いはほとんど見られないが、リサイクル時には添加元素の少ない方が希釈が不用であるため排出量が小さくなる。また、この研究中には、生産されたアルミ合金の強度も考慮に入れて、一定の強度を得るために必要な合金生産にかかる環境負荷の比較を行い、たとえ単位量当たりの環境負荷が低い場合でも、必要な強度を得るためには環境負荷がより増大する可能性があることが示されている。

#### 1-4-3 リサイクルによる不純物蓄積

##### (1) 不純物濃度の測定

新エネルギー・産業技術総合開発機構は、平成3年度から、(財)金属系材料研究開発センター(JRCM)、(財)地球環境産業技術研究機構(RITE)等に委託して、環境調和型金属系素材再生利用基盤技術の研究を実施している<sup>46)</sup>。現在までに、スクラップの将来動向調査、スクラップ再生・溶解技術の評価と探索、総合プロセス評価等の総合基礎調査研究を行うほか、固相処理及び熔融処理

によるトランプエレメント除去技術の研究を実施してきている。総合基礎調査研究においては、溶融実験を行って現在使用されている各種鋼材中の銅、すず等不純物濃度を計測し、これをもとに将来のスクラップの質の劣化を予測し、これに基づいて今後スクラップ中から銅及びすずをどの程度除去する技術が必要かについて目標を示している。このほか、トランプエレメント除去技術の研究として、スクラップの破碎・識別分離技術に関する研究、酸化反応法によるすず、銅、亜鉛除去技術の研究、攪拌浴による不純物除去の研究、高生産性・低エネルギー堅型スクラップ溶解炉の研究等を行ってきている。今後は、これまでの要素研究をもとに総合的なシステム化の研究を行う予定とされている。

また、本研究中においては、現在存在するスクラップ等を対象として銅、すず、クロム等の不純物の濃度の分析を行っている<sup>47)</sup>。これによれば、老廃屑中の銅元素濃度は、ヘビー屑中で約0.23%、自動車シュレッダー屑中でも約0.23%、また、すずの濃度は、ヘビー屑中で0.017%、自動車シュレッダー屑中で0.052%となっている。高炉鋼については、銅元素濃度は0.01~0.02%程度、すずは0.002%程度と報告されている。

鉄鋼協会の鉄鋼リサイクル白書においては、過去のデータをもとにスクラップ中の不純物濃度について報告がなされている<sup>48)</sup>。1981年のデータでは、ヘビー屑中の銅元素濃度は0.13~0.24%、シュレッダー屑中では0.26%程度とされており、また、米独における分析として廃車シュレッダースクラップ中の銅元素濃度が0.16~0.23%であり、またすずの濃度が0.01~0.02%であるとの例が紹介されている。また、我が国の電炉メーカーの不純物の許容レベルについて、代表的な鋼種を対象として、銅で0.25~0.4%、すずで0.03~0.08%を上限として管理している例が紹介されている。さらに、1993年における電炉鋼製品の不純物分析の結果が紹介されているが、これによれば、形鋼で銅0.2~0.35%、すず0.01~0.02%、棒鋼で銅0.25~0.5%、すず0.015~0.025%となっている。

また、武内らは、シュレッダー処理により完全に銅部品を取り除くことができれば鉄スクラップの銅濃度は合金として含まれる0.06%程度となるはずであるが、実際には0.25%となると述べている<sup>13)</sup>。これによれば、シュレディングの過程で約0.2%の銅元素が機械的に混入することとなる。また、シュレック

ディング後、採算を度外視して手作業で銅を取り除いた場合でも、到達できる限界は0.08%であると報告されている。

私のUSINOR製鉄所の研究機関IRSIDのピラらは、私のスクラップの質について大規模な分析調査を行ってきている。ピラらは、1993年にスクラップのサンプリングと溶融分析を3,000回以上にわたって行い、銅元素等の不純物濃度を調査した<sup>49)</sup>。その結果によれば、仏基準で最も品質レベルの高いDI (demolition scrap) に属するスクラップで0.2~0.25%、シア工程を経たこれよりも質の劣るスクラップで0.5~0.6%の銅元素濃度が計測されている。また、DI及びシア材の両方について、今回の計測値を1987年時点での計測値と比較した場合、不純物濃度が2倍程度又はそれ以上になっているとの報告がなされている。

以上で紹介した各種調査研究に報告されているスクラップ中及び電炉鋼中の不純物濃度を表1-3にまとめて示す。ただし、私のヘビースクラップの分析結果については、日本の結果と直接比較しても意味がないため、表から除いてある。

表1-3 鋼材中等のトランプエレメント濃度 (単位:%)

文献番号	Cu	Sn	Cr	備考
47	0.23	0.052	0.123	自動車シュレッダー屑
47	0.234	0.017	0.13	ヘビー屑
48	0.13~0.24		0.02~0.1	ヘビー屑
48	0.25~0.26		0.03~0.05	シュレッダー屑
48	0.16~0.24	0.02	0.14~0.17	自動車シュレッダー屑(米)
48	0.23	0.01	0.28	自動車シュレッダー屑(独)
48	0.2~0.35	0.01~0.02		電炉鋼形鋼
48	0.25~0.5	0.015~0.025		電炉鋼棒鋼
48	0.003~0.02	0.001~0.003		高炉鋼

## (2) 不純物蓄積の影響

リサイクル等により金属材料中に混入した不純物が加工性にどのような影響を与えるのかを明らかにするため、鉄鋼、アルミニウム、ステンレス鋼等に銅、す

ず、クロム、ニッケル等の不純物が混入した場合の加工上の問題について分析が行われ、それぞれのエレメントについて限界的な濃度や具体的問題が明らかにされている。例えば銅では、普通鋼を熱間圧延する場合、鋼中の濃度が0.17%を越えると割れが発生し、濃度が高くなるにつれて割れ発生程度は大きくなり、0.28%を越えると割れ発生温度領域が900~1150℃に広がるとの報告がなされている。また、ずすが普通鋼の熱間圧延に及ぼす影響については、濃度が0.05%で割れが増加し、かつ割れ発生温度領域が900~1150℃に広がるとの報告がなされている<sup>18)</sup>。

#### 1-5 現時点までの成果と課題

素材の生産及びリサイクルによる環境負荷については、インベントリー法、産業連関法等を用いた様々な調査研究がされてきている。インベントリー法は、各研究ごとにデータの取り方やバウンダリーの設定が異なる場合が多く、現時点ではデータ間の比較を行うことが困難な状況にある。現在、国際鉄鋼協会等を中心にデータの精緻化や標準化が進められている。産業連関表についても、現在まで産業全体を広く対象とした環境負荷の推計は行われてきているが、鉄鋼については連関表上の金額が鋼材の物量の流れを必ずしも正確に表していないなど問題も多い。

モデルに基づくリサイクルシステム全体の評価についても、いくつかの試みが行われてきている。しかしながら、系の一部の分析や素材ストックが一定である定常状態など限られた状況下での試みに留まっている。社会全体について、経済成長等による素材への需要の増加を踏まえつつ、リサイクルによる環境負荷の削減と素材の質の劣化を総合的に分析できるモデルはまだ存在しない。

また、リサイクルの総合的評価に必要な不純物濃度の現状や再生時の不純物混入といった基本的データについても、現時点では網羅的なものは存在していない。

環境負荷の削減の程度と不純物の蓄積の双方を正しく評価し、今後のリサイクルのあるべき方向を明らかにしていくためには、環境負荷、不純物蓄積等を総合的に評価できる素材リサイクルシステムのモデルを構築するとともに、モデルの鉄鋼への適用に必要な鉄鋼生産時の環境負荷、再生素材中の不純物蓄積状況等の

基礎的データを得ることが必要となっている。

## 1-6 本論文の目的と構成

### 1-6-1 目的

本論文においては、鉄鋼等の素材の生産、社会への投入とそこでの使用、社会からの廃棄、再生等のすべてのプロセスを含む系（素材のリサイクルシステム）を対象として、このようなリサイクルシステムが環境に与える負荷と素材の質の劣化を総合的かつ定量的に評価することのできる手法を確立し、これにより今後社会が最大の効用を得つつリサイクルを促進していくための基本方針を示すことを目的とする。

### 1-6-2 構成

まず、第2章において、素材のリサイクルシステムを、素材の生産者、リサイクラー並びに社会の新たな素材（バージン材）及び再生素材のストックを構成要素とするモデルとして表した。社会における素材ストックの総量は経済規模の拡大等に伴い原則として一定割合で増加するものと設定した。まず、社会に存在する素材ストックから使用後に廃棄される素材の割合は一定であるとの仮定のもとに解析を行った。リサイクルシステムのマテリアルバランスに関する方程式を立て、これを解くことにより、全素材ストック中に占める再生素材の割合、再生材中の不純物濃度、大気中への二酸化炭素排出量等を定量的に表すことのできる式を求めた。

ついで、社会における素材の使用期間と廃棄率の関係をモデルに組み込むこととし、社会における素材の廃棄率は新たな素材であるか再生素材であるかによって使用期間に基づく一定の確率分布をしているものと考えた。このモデルに基づいて、素材の使用期間の分布とマテリアルバランスの関係式から、社会から廃棄される素材の割合を求めた。ついで、素材のフローとストック、不純物の蓄積、環境への負荷等について方程式をたて、その解析を行うことにより、全素材ストック中に占める再生素材の割合、再生素材中の不純物濃度、大気中へのCO<sub>2</sub>排出量等を定量的に表すことのできる式を求めた。

第3章においては、モデル式の鉄鋼への適用及び評価に当たって必要となる鉄鋼の生産時及び廃棄された鋼材の投棄時の環境負荷の程度を明らかにするため、各工程からのCO<sub>2</sub>排出量の推計を行った。各工程から直接排出されるCO<sub>2</sub>だけでなく、関連産業から排出されるものも含めて総合的な量を求めるため、産業連関表を用いて推計を行った。鉄鋼の生産工程及び再生処理工程からのCO<sub>2</sub>排出量の推計に当たっては、鉄鋼に関する各種統計中の物量データも考慮することにより、産業連関表上の取引金額のデータに必要な修正をほどこし、推計の精度を上げるように努めた。これにより、関連産業における誘発量も含めた総合的なCO<sub>2</sub>排出量を、一貫製鉄法及び電炉法による鉄鋼生産工程並びに鋼材の廃棄工程について得た。

第4章においては、第3章と同様にモデルの鉄鋼への適用に際して必要となる鉄鋼中への不純物蓄積の状況について分析調査を行った。全国のスクラップヤードから収集した廃材及びシュレッダー・スクラップを対象として、個々のスクラップの成分分析及スクラップの集合体の溶解実験を行った。ここで得られたデータを統計処理することにより、現時点における鋼材中の銅、すず等の濃度及び再生処理工程におけるこれら不純物混入に関する状況を明らかにした。

第5章においては、第3章及び第4章における調査研究において得られた環境負荷及び不純物蓄積に関するデータをもとに、第2章で求めた式を鉄鋼に適用し、鉄鋼のリサイクルについて、社会の鉄鋼ストックの増加率、廃棄された鋼材の回収率等の様々な値に対して、素材の質の劣化やCO<sub>2</sub>排出量が中長期的にどのように変化していくかの推計を行った。また、現在の我が国鉄鋼ストックに関して、廃棄率、電炉鋼割合、不純物である銅元素濃度等の推計を行った。さらに、社会における新たな素材及び再生素材の使用期間並びに廃棄された素材の回収率の変化が素材の廃棄率、素材の質の劣化及びCO<sub>2</sub>排出量にどのような影響を与えるかについても検討を行った。これらの結果をもとに、今後素材の質の劣化を抑えつつ排出されるCO<sub>2</sub>量を削減する方策について検討を行った。

第6章においては、鉄鋼ストックの増加率が今後低下していき、ストック量が一定値に漸近していく場合についてモデル化と解析並びにこれに基づく評価を行った。このモデルに基づき、鉄鋼ストックの増加率が低減していく場合についてストック中電炉鋼割合、電炉鋼中銅元素濃度、CO<sub>2</sub>排出量等の今後の動きを推計

するとともに、リサイクルの促進によるCO<sub>2</sub>に代表される環境負荷の削減と鉄鋼中への不純物蓄積の間のトレードオフ関係を明らかにした。

参考文献

- 1) 赤井誠：第2回エコバランス国際会議講演集、(1996)、18
- 2) 日本鉄鋼協会立地環境委員会：鉄鋼界、9(1995)、16
- 3) OECD：OECD環境白書(1991)、12
- 4) IPCC地球温暖化第2次レポート(1995)、IPCC(気候変動に関する政府間パネル編)、17
- 5) 宇沢弘文・國則守生編：地球温暖化の経済分析、東京大学出版会、東京、(1993)、198
- 6) 宇沢弘文：地球温暖化の経済学、岩波書店、東京、(1995)、78
- 7) 日本鉄鋼協会：大競争時代に向けた鉄鋼業の新たな挑戦、(1996)、82
- 8) 大野陽太郎：炭酸ガス抑制と製鉄プロセスの未来、日本鉄鋼協会、東京、(1993)、4
- 9) 平成8年版環境白書、環境庁編、6
- 10) 大関彰一郎：鉄鋼界、9(1995)、9
- 11) 岩淵勲：鉄鋼界、9(1995)、3
- 12) 坂田直起：第23回白石記念講座、日本鉄鋼協会編、東京、(1992)、19
- 13) 武内美継：鉄鋼界、2(1995)、2
- 14) 鉄鋼連盟鉄鋼統計委員会：鉄鋼統計要覧(1995)、8
- 15) 永井親久：鉄鋼界、11(1994)、23
- 16) 原田幸明：エネルギー・資源、17(1996)、165
- 17) 地球環境産業技術研究機構：温室効果ガス排出安定化技術に関する調査研究報告書、(1991)、34
- 18) 金属系材料研究開発センター：金属材料の限界特性に及ぼす不純物元素の影響に関する調査研究報告書、(1993)、4
- 19) 松岡滋樹：鉄鋼界、2(1995)、11
- 20) 鉄源協会冷鉄源供給問題特別部会：鉄鋼界、8(1993)、54
- 21) 日本鉄鋼協会：鉄鋼リサイクル白書、(1994)、62
- 22) 片山裕之・水上正義：まてりあ、35(1996)、1283

- 23) H. Motoyama, T. Suzuki and H. Suzuki: 第1回エコバランス国際会議講演集 (1994)、173
- 24) M. Ishikawa, H. Inose and M. Komatsu: 第1回エコバランス国際会議講演集 (1994)、205
- 25) T. Ito: 第1回エコバランス国際会議講演集 (1994)、217
- 26) 石川雅紀・梶野真弘・金森剛: 第11回エネルギーシステム・経済コンファレンス講演論文集 (1995)、55
- 27) 原田幸明: 第2回エコバランス国際会議講演集 (1996)、169
- 28) 原田幸明・井島清・八木見一: 材料とプロセス、10 (1997)、256
- 29) 井島清・原田幸明・八木見一: 材料とプロセス、10 (1997)、257
- 30) 未踏科学技術協会エコマテリアル研究会: 環境負担性評価システム構築のための基礎調査研究調査報告書 (別冊)、(1995)、67
- 31) エネルギー使用合理化手法国際調査小委員会: 環境管理、6 (1995)、72
- 32) 日本鉄鋼協会基礎研究会: 炭酸ガス抑制と製鉄プロセスの未来、(1993)、14
- 33) Steve B. Young and Willem H. Vanderburg: JOM、46 (1994)、No. 4、22
- 34) 吉岡完治、早見均、池田明由、菅幹雄: イノベーション&I-Oテクニク、3 (1993)、31
- 35) 電力中央研究所: 電力中央研究所報告、Y95013、(1996)、27
- 36) 外岡豊・本藤裕樹・内山洋司: エネルギー資源学会第16回研究発表会講演論文集、(1997)、169
- 37) 堂野前等・徳永庸夫: 第2回エコバランス国際会議講演集、(1996)、218
- 38) 高松信彦・柴田清・古川高司: 第2回エコバランス国際会議講演集、(1996)、68
- 39) 鉄鋼統計年報、通商産業省編、(毎年度発行)
- 40) 坂田直起: エネルギー資源、17 (1996)、364
- 41) 元田欽也: 精密工学会誌、58 (1992)、43

- 42) 松橋隆治・石谷久・古垣一成：エネルギー・資源、14 (1993)、568
- 43) 柴田清・早稲田嘉夫：材料とプロセス、9 (1996)、894
- 44) 柴田清・早稲田嘉夫：材料とプロセス、10 (1997)、267
- 45) 伊坪徳宏・山本良一：材料とプロセス、10 (1997)、265
- 46) 新エネルギー・産業技術総合開発機構：環境技術分科会第15回事業報告書 (1995)、23
- 47) 新製鋼技術研究推進室：JRCMニュース、100 (1995)、金属系材料研究開発センター、東京、10
- 48) 日本鉄鋼協会：鉄鋼リサイクル白書、(1994)、59
- 49) J.P. Birat et al : La Revue de Metallurgie-CIT, Avril 1995、477

## 第2章 素材のリサイクルシステムのモデル化と解析

### 2-1 はじめに

この章においては、素材の新規の投入と廃棄物の回収・再生利用を含むシステム（リサイクルシステム）をモデル化し、このようなシステムが環境にどのような負荷を与えているのか、素材の質がどのように劣化していくのか等を総合的に分析する。なお、鉄のリサイクルをイメージしてモデル構築を行っていくが、リサイクルされる他の素材にも適用できるような汎用的なモデルを構築することとする。

### 2-2 素材の廃棄率が一定の場合のモデルとその解析

#### 2-2-1 素材のリサイクルシステムのモデル化

図2-1のような素材のリサイクルシステムを考える。鉄を例にとると、リサイクルシステム中の素材メーカーは高炉メーカー、製品メーカーは鉄を利用して製品をつくる自動車、家電等の製造業者、素材ストックは自動車、家電、建造物等として社会に存在している鉄のストック、リサイクラーはスクラップ事業者及び電炉メーカーとなる

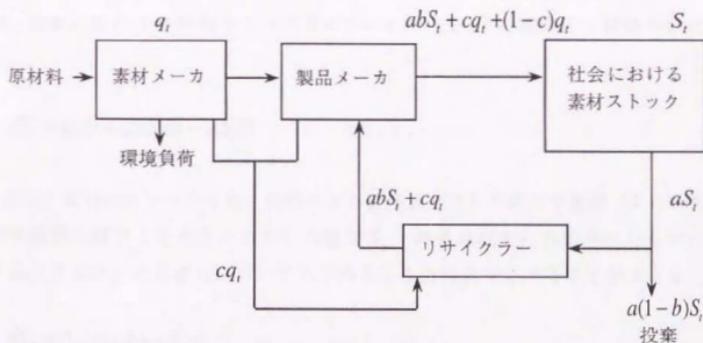


図2-1 リサイクルシステムのモデル

このシステムにおいては、 $t$ 時点において社会に $S_t$ の量の素材ストックが存在して様々な用途に使用されており、単位時間当たりはそのうち $a$ の割合に当たる量の素材が老朽化又は用途を終えて廃棄されていると考える。ここでは、素材の廃棄率 $a$ は、すべての素材について平均的に同一であり、かつ、時間的にも変化しないものとする。

廃棄された素材のうち $b$ の割合に当たるものが回収・再生過程を経て再生されて、社会に投入されて再びストックとなる。したがって、 $(1-b)$ に当たるものは再生されずに埋め立て地等に投棄される。また、このシステムにおいては、外部から供給される原材料から単位時間当たり $q_t$ の新たな素材が生産され社会へ供給される。ただし、新たな素材のうち一定割合 $c$ に当たるものは製品メーカーの加工工程等において加工くず等として排出され、再生過程に送られる。残りの $(1-c)$ に当たるものがそのまま製品になり社会へ供給される。

新たな素材は鉱石、石油等の原材料から生産され、その生産に際しては環境に対して大きな負荷がかかる。さらに、図中では省略してあるが、素材のリサイクル、廃棄物投棄等に際しても一定の負荷が環境にかかることとなる。

### 2-2-2 素材のフロー及びストックの解析

上記のようなシステムについて、それぞれの要素の動きを数式により表す。まず、社会における素材のストック $S_t$ については(2.1)式に示す関係が成立する。

$$dS_t = q_t dt + abS_t dt - aS_t dt \quad \dots (2.1)$$

次に、素材のストックうち、原材料から直接製造された新たな素材（すなわち、再生過程を経たことのないもの）の量を $S_m$ 、再生過程から供給されたものの量を $S_r$ とすると、それぞれについて以下のような方程式を立てることができる。

$$dS_m = (1-c)q_t dt - aS_m dt$$

$$dS_r = (abS_t + cq_t) dt - aS_r dt$$

$S_t$ に関する(2.1)式を微分方程式に書き直し、これを $S_t$ について解くと、以下の式を得る。

$$S_t = e^{-a(1-b)t} \left\{ \int q_t e^{a(1-b)t} dt + c_1 \right\} \dots (2.2)$$

同様に、 $S_{pt}$ 及び $S_{nt}$ についても以下のように解くことができる。

$$S_{pt} = e^{-at} \left\{ \int (1-c)q_t e^{at} dt + c_2 \right\} \dots (2.3)$$

$$S_{nt} = e^{-at} \left\{ \int (abS_t + cq_t) e^{at} dt + c_3 \right\} \dots (2.4)$$

今、社会における素材のストックが微少単位時間当たり $r$ の割合で増加すると考えると、 $S_t$ を以下のように書くことができる。

$$S_t = S_0 e^{rt} \dots (2.5)$$

$S_0$ :  $t=0$ 時点における素材ストックの量。

(2.2)式に(2.5)式を代入して、 $q_t$ について解くと、以下の式を得る。

$$q_t = S_0 (a+r-ab) e^{rt} \dots (2.6)$$

(2.6)式を(2.3)式に代入して解くと、 $S_{pt}$ について以下の式を得る。

$$S_{pt} = S_0 (1-c) \left( 1 - \frac{ab}{a+r} \right) e^{rt} + \left\{ S_{p0} - S_0 (1-c) \left( 1 - \frac{ab}{a+r} \right) \right\} e^{-at} \dots (2.7)$$

$S_{p0}$ :  $t=0$ 時点での新しい(リサイクルされたことのない)素材ストックの量。

$S_{nt}$ も(2.4)式から同様に求めることができる。

$$S_{\pi} = \frac{S_0 \{ab + c(a+r-ab)\}}{a+r} e^{\pi} + \left[ S_{r0} - \frac{S_0 \{ab + c(a+r-ab)\}}{a+r} \right] e^{-a\pi} \dots (2.8)$$

$S_{r0}$ :  $t=0$  時点での再生過程を経た素材ストックの量。

また、社会に存在する全素材ストック中の再生素材ストックの割合  $\frac{S_{\pi}}{S_t}$  は、次式のようになる。

$$\frac{S_{\pi}}{S_t} = \frac{ab + c(a+r-ab)}{a+r} + \left\{ \frac{S_{r0}}{S_0} - \frac{ab + c(a+r-ab)}{a+r} \right\} e^{-(a+r)t} \dots (2.9)$$

(2.5) ~ (2.9) 式より、 $a$ 、 $b$ 、 $c$  及び  $r$  の諸設定値に対応して、新たな素材の生産量  $q_t$ 、再生素材生産量  $abS_t + cq_t$ 、ストック中の新たな素材量  $S_{pt}$ 、再生素材量  $S_{\pi}$  及び素材ストック中の再生素材の割合  $\frac{S_{\pi}}{S_t}$  の時間変化を求めることができる。

なお、 $\frac{S_{\pi}}{S_t}$  は時間の経過とともに次の一定値に収束していく。

$$\left. \frac{S_{\pi}}{S_t} \right|_{\infty} = \frac{ab + c(a+r-ab)}{a+r} = \frac{ab}{a+r} + c \left( 1 - \frac{ab}{a+r} \right) \dots (2.10)$$

(2.10) 式最右辺の第1項は社会から廃棄された後再生された素材が社会に供給される全素材に占める割合を表しており、第2項は廃棄・再生過程を経ない(すなわち新たに生産される)素材のうち加工くず等として再生過程に送られるものの割合を表している。

また、フローについては、単位時間当たりの素材の生産量に占める再生素材の生産量の割合は(2.11)式のようになる。

$$\frac{abS_t + cq_t}{abS_t + cq_t + q_t} = \frac{ab + c(a+r-ab)}{a+r + c(a+r-ab)} \dots (2.11)$$

同式から分かるように、再生素材の生産割合は、時間にかかわらず一定となる。

### 2-2-3 素材中の不純物濃度の解析

素材の再生のための廃棄物の分別に際しては、通常、様々な素材が混在した状態となっており、その中から目的とする素材を分離・抽出することが必要となるが、他の素材を完全に除去することは技術的又は経済的に困難であり、結果として有害な不純物元素が混入した状態でリサイクルをせざるを得ない。例えば、鉄の再生過程においては、銅の混入が熱間圧延特性、冷延材の深絞り性の劣化等で重要な問題とされている。

ここでは、まず社会における素材ストック中に含まれる不純物元素の総量  $f_i$  を求める。簡単化のために、再生過程での不純物元素の混入に着目することにし、原材料から新たに生産される素材の不純物元素レベルをゼロと仮定する。素材の再生過程において、廃棄・回収された素材の単位量当たりさらに  $g$  の割合の不純物元素が付加されるとすると、素材ストック中の不純物元素の総量  $f_i$  について以下のような方程式を立てることができる。

$$df_i = gabS_i dt + abf_i dt - af_i dt \quad \dots (2.12)$$

(2.12) 式を微分方程式に書き直し、これを解くことにより以下の式を得る。

$$f_i = e^{-a(t-b)t} \left\{ \int gabS_i e^{a(t-b)t} dt + c_4 \right\} \quad \dots (2.13)$$

(2.5) 式をもとに (2.13) 式を書き換えると、社会における素材ストック中に含まれる不純物元素の総量は (2.14) 式のようになる。

$$f_i = \frac{S_0 gab}{a+r-ab} e^{rt} + \left( f_0 - \frac{S_0 gab}{a+r-ab} \right) e^{-a(1-b)t} \quad \dots (2.14)$$

$f_0$ :  $t=0$  時点における素材ストック中の不純物元素量。

また、単位量の素材ストック中の不純物元素量 (不純物濃度) は、 $f_i$  をストック量  $S_i$  で割ることにより、(2.15) 式のように表される。

$$\frac{f_t}{S_t} = \frac{gab}{a+r-ab} + \left( \frac{f_0}{S_0} - \frac{gab}{a+r-ab} \right) e^{-(a+r-ab)t} \quad \dots (2.15)$$

さらに、再生素材ストック中の不純物濃度は、(2.14)式を(2.8)式で割ることにより以下のようになる。

$$\frac{f_t}{S_n} = \frac{\frac{gab}{a+r-ab} + \left( \frac{f_0}{S_0} - \frac{gab}{a+r-ab} \right) e^{-(a+r-ab)t}}{\frac{ab+c(a+r-ab)}{a+r} + \left( \frac{S_{r0}}{S_0} - \frac{ab+c(a+r-ab)}{a+r} \right) e^{-(a+r)t}} \quad \dots (2.16)$$

以上の式より、全素材ストック中及び再生素材ストック中の不純物濃度の時間変化を求めることができる。また、(2.15)式及び(2.16)式から、全素材ストック中の不純物濃度及び再生素材ストック中の不純物濃度は、時間が経つにつれ、以下の値に収束することがわかる。

$$\frac{f_t}{S_t} \Big|_{\infty} = \frac{gab}{a+r-ab} \quad \dots (2.17)$$

$$\frac{f_t}{S_n} \Big|_{\infty} = \frac{gab(a+r)}{\{ab+c(a+r-ab)\}(a+r-ab)} \quad \dots (2.18)$$

(2.17)式は、充分時間が経過した後の全素材中の不純物濃度は、廃棄された素材の再生過程において付加される不純物量を新たに生産される素材量で割ったものと等しくなることを示している。また、新たな素材中の不純物レベルをゼロと仮定しているため、(2.18)式は(2.17)式を充分時間が経過した後の再生素材ストックの割合を表す(2.10)式で割ったものとなっている。

次に、フローについて検討する。再生素材の単位生産量当たりに含まれる不純物元素量は、廃棄・再生される素材ストックの単位量中に含まれる不純物元素量に再生過程で混入する不純物元素量を加えたものであり、したがって生産される

再生素材中の不純物濃度は以下ようになる。

$$\frac{abf_t}{abS_t + cq_t} + g \frac{abS_t}{abS_t + cq_t} = \frac{ab}{abS_t + cq_t} (f_t + gS_t)$$

$$= \frac{gab(a+r)}{\{ab+c(a+r-ab)\}(a+r-ab)} + \frac{ab}{ab+c(a+r-ab)} \left( \frac{f_0}{S_0} - \frac{gab}{a+r-ab} \right) e^{-(a+r-ab)t}$$

・・・ (2.19)

したがって、充分な時間が経過した後には、生産される再生素材中の不純物濃度は、再生素材のストック中の不純物濃度と同一となる。

#### 2-2-4 素材リサイクルシステムの及ぼす環境負荷の解析

ついで、このようなリサイクルシステムが環境に及ぼす負荷を定量的に評価する。システム中のそれぞれの過程で単位量の素材が環境に与える負荷を以下のように表す。

$p_1$  : 原材料から新たな素材を生産する過程

$p_2$  : 再生されずに投棄される過程

$p_3$  : 再生過程

例えば、 $p_1$  は、原材料から新たな素材を生産する際に排出される二酸化炭素量等と考えることができる。これらを用いて、システムが環境に与える累積負荷  $H_t$  に関する方程式を求めると、以下ようになる。

$$dH_t = p_1 q_t dt + p_2 a(1-b)S_t dt + p_3(abS_t + cq_t) dt \quad \dots (2.20)$$

両辺を積分することにより、 $H_t$  を以下のように求めることができる。

$$H_t = \int dH_t = \frac{S_0}{r} [p_1(a+r-ab) + p_2 a(1-b) + p_3(ab+c(a+r-ab))] (e^r - 1) + H_0$$

$$= \frac{S_0}{r} \{p_1(a+r) + p_2a + p_3c(a+r)\}(e^{\pi} - 1) - \frac{S_0}{r} ab\{p_1 + p_2 - (1-c)p_3\}(e^{\pi} - 1) + H_0$$

・・・ (2.21)

$H_0$ :  $t=0$  時点での累積環境負荷量。

(2.20) 式の第1項はリサイクルが行われない場合の環境負荷を、第2項はリサイクルによる環境負荷の低減分を表している。第2項と第1項の比を取ることにより、以下の式を得る。

$$\frac{ab\{p_1 + p_2 - p_3(1-c)\}}{p_1(a+r) + p_2a + p_3c(a+r)} \quad \dots (2.22)$$

(2.22) 式から、リサイクルによる累積環境負荷の低減割合は時間に関わらないこと、また、その値は回収率  $b$  に比例し、かつ、素材ストックの増加率  $r$  が低いほど大きくなることが分かる。

### 2-2-5 素材の使用期間と単位使用期間当たりの環境負荷

ついで、原材料から生産される新たな単位量の素材がそのライフサイクルにわたって生産・再生・投棄される過程で環境に及ぼす総合的な負荷を求める。 $t$  時点で新たな素材が製造されて社会に投入されることにより、社会の素材ストックが  $\Delta S_t$  だけ増加したとすると、当該増加分のその後の時間  $s$  に対する変化について以下の関係が成立する。

$$d\Delta S_s = ab\Delta S_s ds - a\Delta S_s ds \quad \text{ただし、} s=t \text{ の時 } \Delta S_s = \Delta S_t \text{。}$$

これを解くことにより、以下の解を得る。

$$\Delta S_s = \Delta S_t e^{a(1-b)(t-s)} \quad \dots (2.23)$$

$\Delta S_t$  の量の新たな素材がそのライフサイクルにわたって環境に与える負荷  $H_{\Delta S}$  は、当該素材が原材料から製造される過程で生じる負荷に、素材がリサイクルシステ

ムの中で廃棄・再生される過程で生じる負荷を加えたものであり、以下のようになる。

$$\begin{aligned}
 H_{\Delta S} &= p_1 \Delta S_i + p_3 c \Delta S_i + \int_0^{\infty} [p_2 a(1-b) \Delta S_i + p_3 ab \Delta S_i] ds \\
 &= \Delta S_i \left\{ p_1 + p_3 + \frac{b+c(1-b)}{1-b} p_3 \right\} \dots (2.24)
 \end{aligned}$$

(2.24) 式を  $\Delta S_i$  で割ることにより、リサイクルシステムにおいて原材料から生産される単位量の新たな素材がライフサイクルにわたって環境に与える負荷の総量を以下のように計算することができる。

$$\frac{H_{\Delta S}}{\Delta S_i} = p_1 + p_3 + \frac{b+c(1-b)}{1-b} p_3 \dots (2.25)$$

一方、リサイクルシステムにおいては、リサイクルにより繰り返し環境に負荷を与えることとなるため、リサイクルを促進すればするほど(2.25)式で計算される環境負荷量は大きくなる。そこで、リサイクルされる素材はされないものに比べてより長期間使用されることに着目し、使用期間を考慮した環境負荷を求めることとする。

(2.23) 式から、新たな素材の生産によるストックの増加分  $\Delta S_i$  と当該増加分が社会に存在し使用に供される時間との積の総和を以下のように求めることができる。

$$\int_0^{\infty} \Delta S_i ds = \Delta S_i \int_0^{\infty} e^{a(1-b)(t-s)} ds = \frac{\Delta S_i}{a(1-b)} \dots (2.26)$$

(2.26) 式を  $\Delta S_i$  で割ることにより、生産された新たな素材が社会において繰返し使用される累積期間の平均値  $\bar{T}$  を以下のように求めることができる。

$$\bar{T} = \frac{1}{a(1-b)} \dots (2.27)$$

以上より、(2.25) 式を(2.27) 式で割ることにより、リサイクルを含む全使用期間を通しての素材の単位量・単位使用期間当たりの環境負荷  $\bar{h}$  を以下のように求めることができる。

$$\bar{h} = a(1-b)(p_1 + p_2) + a[b+c(1-b)]p_3 \cdots (2.28)$$

リサイクルが行われる場合には、素材のライフサイクルの始めと終わりは必ずしも明確でなく、環境負荷を総合的に評価することは難しい。本式を用いることにより、リサイクルシステムにおける素材の環境負荷の評価をある程度定量的に行いうるものと考えられる。

### 2-2-6 モデルの評価と問題点

(1) 原材料から生産された新たな素材の供給を受けるとともに、社会から廃棄された素材の一定割合を再生利用するリサイクルシステムについて、新たな素材の投入量、再生素材割合、不純物濃度、環境負荷等を定量的に評価することのできるモデルを構築することができた。モデルの構築と解析に当たっては、社会にストックとして存在する素材のうち単位時間に廃棄されるものの割合  $a$  は、すべての素材について同一であり、かつ、時間的にも変化しないものと仮定してモデルの構築と解析を行った。我が国の鉄鋼ストックからの鉄スクラップ発生率を見ると、その値は1970年以降2.5～3%程度で安定的に推移してきており、一定の期間について素材の廃棄率に大きな変化がないと考えることは実際の観測値と比べて大きな矛盾はないものと考えられる。

(2) 一方、社会において素材を利用する観点から見れば、素材の利用者は保有する素材の一定割合を廃棄しようとしているわけではなく、素材により構成される製品の寿命が終了した時点で当該製品を廃棄すると考えるのが一般的である。この場合、素材の寿命は製品の用途ごとに異なっており、また、素材の廃棄は一定の確率分布に基づいて発生するものと考えられる。したがって、リサイクルシステムのモデルと解析をより精緻にしていくためには、社会における素材の使用期間と廃棄率の関係を考慮していくことが必要であると考えられる。また、このような点を考慮することにより、社会での素材の使用期間が変化したときに素材のリサイクルシステムがどのような影響を受けるのかを分析・評価することが可能となる。このような考えに基づいて、素材の社会における使用期間の分布も考慮することによりモデルの拡張と精緻化を行った。これについて次節で説明する。

## 2-3 社会における素材の使用期間を考慮したモデルとその解析

前節においては、素材が社会から廃棄される割合（廃棄率）はすべての素材について平均的に同一であるものとしてモデルを構築し、素材のフロー、ストック、不純物濃度、環境負荷等について解析を行った<sup>1)</sup>。しかし、実際には、原材料から新たに生産される素材と廃棄物から再生された素材とは質の違い等から用途が異なる場合が多く、結果としてそれぞれの社会におけるストックからの廃棄率も異なる場合が多い。

本節においては、リサイクルシステムを対象として、社会における素材の使用期間と廃棄率との関係が新たな素材と再生素材とでそれぞれ異なる確率分布に従うものと仮定し、素材の社会からの廃棄率及び廃棄量を推定する理論式を導出するとともに、この結果を用いて、前節で示したリサイクルシステムのモデルの拡張を行った<sup>2)</sup>。

### 2-3-1 素材の廃棄過程のモデル化

素材の廃棄率を推計するためには、過去から未来にわたる時間軸上の各時点においてどの程度の量の素材が社会に投入され、それがどれだけの期間社会において使用されて、その後どういう割合で廃棄されるのかを考えなければならない。

社会は素材の使用により効用を得ており、効用が得られなくなった場合（すなわち素材を用いた機械が故障した場合等）にはこれを廃棄する。本節においては、素材を用いた製品の使用期間と廃棄率の分布について一定の仮定を置き、リサイクルシステム及び素材の廃棄率についてそれぞれ以下のようなモデル化を行った。

#### (1) リサイクルシステム

まず最初に、前節と同様に図2-2のようなリサイクルシステムのモデルを考える。ただし、素材の廃棄率は社会における素材の使用期間の分布のあり方によって決定されると考え<sup>3)</sup>、また、モデルの簡単化のため、加工くず等の発生率（図2-1のモデル中のc）をゼロとした。本モデルをもとに素材全体の解析を行い、後で本モデルをさらに細かく分解して新たな素材と再生素材の廃棄率の違いをモデルに組み込むこととする。

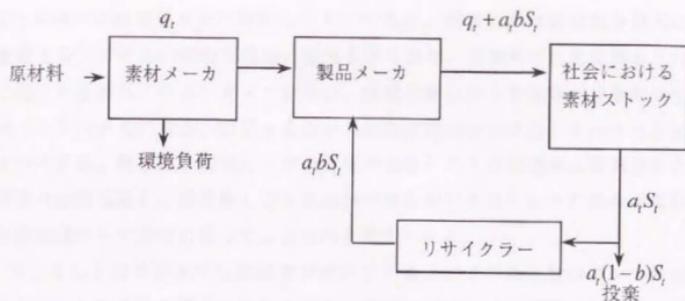


図 2-2 リサイクルシステムのモデル

本モデルにおいては、 $t$ 時点において社会に $S_t$ の素材が存在して使用されており、単位時間にそのうち $a_t$ の割合が老朽化等により廃棄されている。このシステムには、単位時間当たり $q_t$ の新たな素材が原材料から直接製造されて供給されている。さらに社会から廃棄されたもののうち $b$ の割合が回収・再生されて、製品メーカを通じて再び社会に供給される。 $(1-b)$ に相当するものは再生されずに埋め立て地等に投棄される。なお、回収率 $b$ は、廃棄率 $a_t$ と異なり社会における素材の使用期間等により決定されるものではなく、リサイクラーの段階等においてある程度意図的にコントロールすることが可能なものであると考えられることから、本モデルにおいても外生的に与えられるものとし、かつ時間に関わらず一定であるとする。

## (2) 素材の使用期間と廃棄率との関係

過去の1時点において社会に投入された素材は、一定の期間社会で使用された後廃棄されることとなるが、使用開始後の各時点において廃棄される素材の割合は、使用期間を変数とする一定の分布をするものと考えられる。鉄等の素材は、機械、装置、構造物等として社会に存在しており、その廃棄は素材の寿命そのものよりも、機械や構造物の全体としての寿命により決定されている。したがって、素材の使用期間は、故障その他の理由により機械等の廃棄が行われるまでの期間であると考えても差し支えないものと考えられる。故障等によるシステムの寿命を表す分布としてガンマ分布及びワイブル分布がある<sup>4)</sup>。

ガンマ分布は指数分布を一般化したものである。指数分布は偶発的な理由により故障するシステムの寿命予測等に使用されており、地震等の自然災害もこの分布に従うと言われている。ガンマ分布は、指数分布に従う故障等が複数回発生した時点でシステムの寿命が終了する場合の使用期間の分布を表していると考えることができる。例えば、機械に5回の故障が発生したらその機械は廃棄される、地震等の自然災害を3回経験したら建造物の寿命が尽きるといった場合の素材の使用期間はガンマ分布に従っているものと考えられる。

一方、もしも劣化が進行し故障率が増加する場合には寿命分布はガンマ分布に従わない。このような場合の寿命予測としてはワイブル分布が用いられる。ワイブル分布は、システムの寿命はそのシステムの中で最も弱い部分における1回の故障により決定されるとの考えのもとに、故障の発生が偶発的である場合だけでなく初期故障型である場合及び磨耗故障型である場合も含むように指数分布を拡張したものであると考えることができる。

ガンマ分布及びワイブル分布の確率密度関数は以下の式で与えられる。

$$\text{ガンマ分布: } p(x) = \frac{\lambda^\alpha}{\Gamma(\alpha)} x^{\alpha-1} e^{-\lambda x} \quad \text{ただし、} \Gamma(\alpha) = \int_0^\infty x^{\alpha-1} e^{-x} dx$$

$$\text{ワイブル分布: } f(x) = \frac{bx^{b-1}}{a^b} e^{-(x/a)^b}$$

ここで、 $x (> 0)$  は使用期間、 $a$  及び  $\lambda$  並びに  $a$  及び  $b$  はそれぞれガンマ分布及びワイブル分布のパラメータで、いずれも正の値を取る。

実際の製品の使用期間の分布の例として、鉄その他の素材で構成される代表的製品である自動車の廃棄率について見てみる。文献<sup>5)</sup>中のデータを用い、昭和49～56年に初年度登録された自動車の登録抹消されるまでの期間と台数から廃棄率を算出してこれを平均化して分布図を作成し、これをガンマ分布及びワイブル分布により近似した結果を図2-3及び図2-4に示す。自動車の廃棄率は使用期間8～9年をピークとした分布形を取っている。データの制約上使用期間12年までしか調査できなかったが、廃棄率の分布形は極大値に対して左右非対称の傾向を示している。どちらの分布を用いた場合でも、比較的良好な近似形が得ら

れるが、ワイブル分布は機械等の劣化を織り込んだものとなっているため、使用期間が15年程度で廃棄率が急速に小さくなる形となっている。

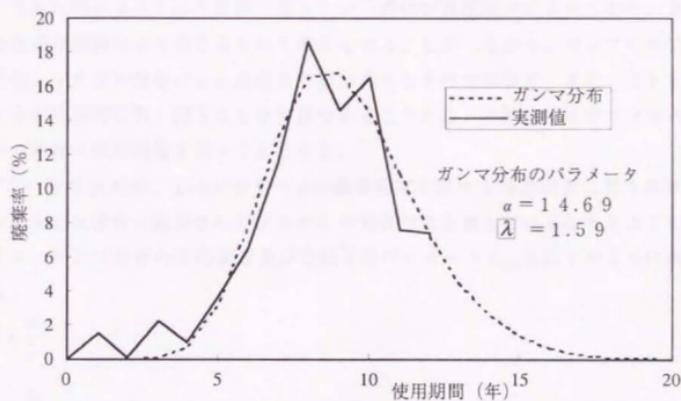


図2-3 自動車の廃棄率の分布とそのガンマ分布による近似

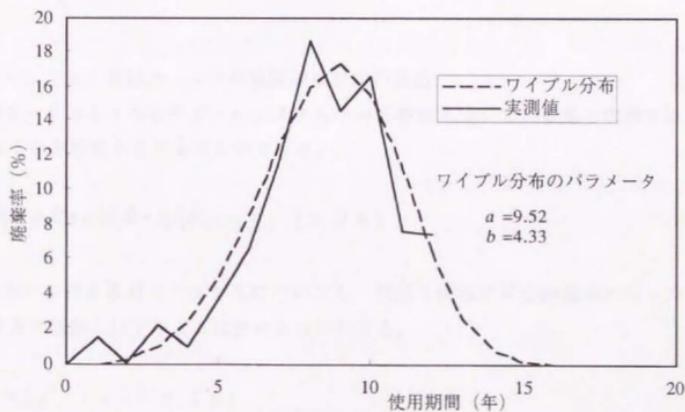


図2-4 自動車の廃棄率の分布とそのワイブル分布による近似

素材を用いた製品の寿命分布がどちらの分布に従うかは、その製品の寿命を決定する上で、偶発的な故障の複数回の発生という要因が支配的か時間とともに進行する劣化等による1回の故障の発生という要因が支配的かによっており、実際には製品の種類により異なるものと考えられる。しかしながら、ガンマ分布による近似とワイブル分布による近似との差は大きなものではなく、また、ガンマ分布の方が解析的に取り扱うことが容易であることから、本研究ではガンマ分布を用いて素材の使用期間を表すこととする。

ガンマ分布  $p(x)$  は、 $x=0$  において  $\lambda$  の確率密度を有する指数関数に従う故障が  $\alpha$  回発生した場合に廃棄されるシステムの寿命分布を表していると考えられることができる。ガンマ分布の平均値  $E$  及び分散  $V$  並びにモード  $x_{\max}$  は以下のように表される。

$$E = \frac{\alpha}{\lambda}$$

$$V = \frac{\alpha}{\lambda^2}$$

$$x_{\max} = \frac{\alpha - 1}{\lambda}$$

### 2-3-2 素材ストックの廃棄率推計式の導出

図2-2のようなリサイクルシステム中の各要素について、前節と同様に以下のような方程式を立てることができる。

$$dS_i = q_i dt + a_i b S_i dt - a_i S_i dt \quad \dots (2.29)$$

社会における素材ストック  $S_i$  についても、前節と同様に単位時間当たり  $t$  の一定割合で増加し以下のように表せるものとする。

$$S_i = S_0 e^{rt} \quad \dots (2.30)$$

$S_0$  :  $t=0$  における素材ストックの量。

(2.29) 及び (2.30) 式から、新たな素材の単位時間当たりの社会への投入量  $q_t$  及び再生素材の単位時間当たり投入量  $a_t b S_t$  を以下のように求めることができる。

$$q_t = S_0(a_t + r - a_t b)e^{rt} \quad \dots (2.31)$$

$$a_t b S_t = a_t b S_0 e^{rt} \quad \dots (2.32)$$

ついで、素材の使用期間の分布と廃棄率について検討する。まず、図2-5のように時間軸  $t$  とある時間  $t$  を起点として後ろ向きの時間軸  $s$  を考える。

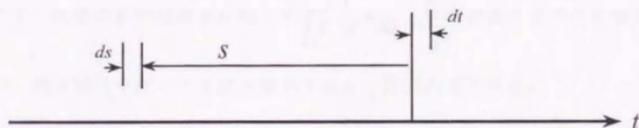


図2-5 時間軸の取り方

素材はそれぞれの用途毎に廃棄率の分布が異なり、本来ならそれぞれの用途毎に廃棄率が異なる分布に従うとして問題を解くことが必要であるが、ここでは簡単のため、素材の廃棄率の分布は新たな素材であるか再生素材であるかによって一意的に決定されるものとする。

新たな素材及び再生素材の社会での使用期間と廃棄率との関係がそれぞれ  $p_1(x)$  及び  $p_2(x)$  のガンマ分布に従うと考えると、先に求めた式を用いて以下の方程式を立てることができる。

$$S_t = \int_0^{\infty} [S_0(a_{t-s} + r - a_{t-s}b)e^{r(t-s)}\{1 - F_1(s)\} + S_0 a_{t-s} b e^{r(t-s)}\{1 - F_2(s)\}] ds$$

... (2.33)

$$\text{ただし } F_i(s) = \int_0^s p_i(x) dx \quad p_i(x) = \frac{\lambda_i^{\alpha_i}}{\Gamma(\alpha_i)} x^{\alpha_i-1} e^{-\lambda_i x} \quad i=1,2$$

廃棄率  $\alpha_i$  が時間によらず一定であり、 $a$  と書けるとすると (2.3.3) 式を以下のように書くことができる。

$$\begin{aligned} S_1 &= \int_0^{\infty} \left[ S_0(a_{1-t} + r - a_{1-t}b)e^{r(t-s)}(1 - F_1(s)) + S_0a_{1-t}be^{r(t-s)}(1 - F_2(s)) \right] ds \\ &= S_0e^{rt}(a + r - ab) \int_0^{\infty} [e^{-rs} - e^{-rs}F_1(s)] ds + S_0e^{rt}ab \int_0^{\infty} [e^{-rs} - e^{-rs}F_2(s)] ds \end{aligned}$$

ここで、任意の正の定数  $k$  に対して  $\int_0^{\infty} x^{\alpha-1} e^{-kx} dx = \frac{\Gamma(\alpha)}{k^\alpha}$  が成り立つことを考慮し

つつ、部分積分を用いて上式を変形すると、以下の式を得る。

$$r = (a + r - ab) \left\{ 1 - \left( \frac{\lambda_1}{\lambda_1 + r} \right)^{\alpha_1} \right\} + ab \left\{ 1 - \left( \frac{\lambda_2}{\lambda_2 + r} \right)^{\alpha_2} \right\}$$

以上より、新たな素材と再生素材を合わせた素材ストック全体の平均的廃棄率を以下のように求めることができる。

$$\alpha = \frac{r \left( \frac{\lambda_1}{r + \lambda_1} \right)^{\alpha_1}}{1 - (1-b) \left( \frac{\lambda_1}{r + \lambda_1} \right)^{\alpha_1} - b \left( \frac{\lambda_2}{r + \lambda_2} \right)^{\alpha_2}} \quad \dots (2.3.4)$$

ただし、ストック増加率  $r$  が 0 の場合は、(2.3.3) 式は以下ようになる。

$$S_0 = S_0a(1-b) \int_0^{\infty} [1 - F_1(s)] ds + S_0ab \int_0^{\infty} [1 - F_2(s)] ds$$

ここで部分積分を行うと、以下ようになる。

$$S_0 = S_0 a(1-b) \int_0^{\infty} sp_1(s) ds + S_0 ab \int_0^{\infty} sp_2(s) ds$$

$\int_0^{\infty} sp(s) ds$  はガンマ分布の期待値であるから、上式は以下のように書き直すことができる。

$$S_0 = S_0 a(1-b) \frac{\alpha_1}{\lambda_1} + S_0 ab \frac{\alpha_2}{\lambda_2}$$

以上より、素材ストック増加率  $r$  が 0 の場合の廃棄率を以下のように求めることができる。

$$a = \frac{1}{(1-b) \frac{\alpha_1}{\lambda_1} + b \frac{\alpha_2}{\lambda_2}} \quad \dots (2.35)$$

### 2-3-3 素材の平均寿命と廃棄率の関係

(2.34) 式から素材の平均寿命  $\alpha/\lambda$  と素材の廃棄率の関係を見ると、素材を使用する製品の寿命が長いほど、すなわち一般に  $a$  が大きくなり  $\lambda$  が小さくなるほど廃棄率は小さくなるのが分かる。しかしながら、 $a$  及び  $\lambda$  がともに大きくなりつつ平均寿命が長くなる場合並びに  $a$  及び  $\lambda$  がともに小さくなりつつ平均寿命が長くなる場合もあることから、素材の平均寿命と廃棄率との関係について詳細に検討を行うこととする。このため、素材の平均寿命  $E = \alpha/\lambda$  と廃棄率を表す式中の  $\left(\frac{\lambda}{r+\lambda}\right)^a$  の逆数である  $\left(1 + \frac{r}{\lambda}\right)^a$  の関係について調べる。

もしも、平均寿命  $E$  が長くなった場合に、 $\left(1 + \frac{r}{\lambda}\right)^a$  が必ず増大すれば、素材の平均寿命の長期化は必ず素材の廃棄率を低下させることとなる。このことを調べるために、この項を以下のように変形する。

$$\left(1 + \frac{r}{\lambda}\right)^a = \left\{ \left(1 + \frac{1}{\lambda/r}\right)^{\lambda/r} \right\}^{aE} \quad \dots (2.36)$$

右辺の大括弧の中は、 $r$ が一定の場合には素材の平均寿命  $E$ にかかわらず  $\lambda$ の変化に応じて1と自然対数の底  $e$ との間の値を取る。このことは、平均寿命が長くなった場合でも  $\lambda$ の値によってはこの項が小さくなること、すなわち、平均寿命が長くなった場合でも廃棄率が大きくなることがあり得ることを示している。しかしながら、本研究において対象とする素材の廃棄プロセスの解析においては、 $\lambda/r$ が後の章で述べるように4程度又はそれ以上となる場合が多く、このため大括弧の中の値に対する  $\lambda$ の値の影響は小さく、(2.3.6)式の値は多くの場合素材の平均寿命  $E$ により決定される。したがって、ほとんどの場合において素材の使用期間の長期化は廃棄率を低下させることとなる。この点については、後で第5章において、具体的なデータをもとに検討を行う。なお、 $\lambda/r$ が充分大きな場合には、(2.3.4)式は近似的に以下のような形に書き直すことができる。

$$a = \frac{r e^{rE_1}}{1 - (1-b)e^{rE_1} - b e^{rE_2}}$$

ここで、 $E_1$ 及び  $E_2$ は、それぞれ新たな素材及び再生素材の平均寿命を表す。

#### 2-3-4 素材のフローとストックの解析

ついで、素材のフローとストックを新たな素材と再生素材とに分けて詳細に見ることとする。図2-2に表したりサイクルシステムをより詳細に図2-6のように表す。

図2-6において  $S_{pr}$ 及び  $S_{rr}$ はそれぞれ新たな素材及び再生素材のストックを、 $a_{1r}$ 及び  $a_{2r}$ はそれぞれ新たな素材及び再生素材の廃棄率を表す。図2-6のシステムは図2-2のシステムを分割して表したものであり、したがって以下のような関係が恒等的に成り立つ。

$$S_{pr} + S_{rr} = S_r \quad \dots (2.3.7)$$

$$a_{1r} S_{pr} + a_{2r} S_{rr} = a S_r \quad \dots (2.3.8)$$

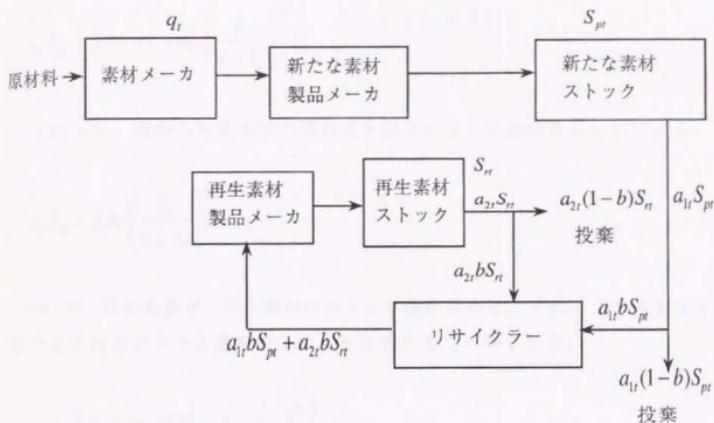


図 2-6 リサイクルシステムの詳細なモデル図

また、廃棄される素材の量について以下の式が成立する。

$$a_{11}S_{pt} = \int_0^{\infty} q_{1-t} p_1(s) ds \quad \dots (2.39)$$

$$a_{21}S_{rt} = \int_0^{\infty} (a_{1,t-s} b S_{p,t-s} + a_{2,t-s} b S_{r,t-s}) p_2(s) ds = \int_0^{\infty} b a S_{1-t} p_2(s) ds \quad \dots (2.40)$$

さらに、素材のフロー及びストックについて以下の関係が成り立つ。

$$S_{pt} = \int_0^{\infty} (q_{1-t} - a_{1,t-s} S_{p,t-s}) ds \quad \dots (2.41)$$

$$S_{rt} = \int_0^{\infty} (a b S_{1-t} - a_{2,t-s} S_{r,t-s}) ds \quad \dots (2.42)$$

まず、(2.31) 式を (2.39) 式に代入し整理することにより、新たな素材の廃棄量を以下のように求めることができる。

$$a_{1t}S_{pt} = S_0(a+r-ab)\left(\frac{\lambda_1}{r+\lambda_1}\right)^{\alpha_1} e^{rt} \quad \dots (2.43)$$

(2.40) 式から再生素材の廃棄量を以下のように求めることができる。

$$a_{2t}S_{rt} = S_0ba\left(\frac{\lambda_2}{r+\lambda_2}\right)^{\alpha_2} e^{rt} \quad \dots (2.44)$$

ついで、新たな素材と再生素材のストック量を求める。(2.41)式をもとに、新たな素材のストック量を以下のように求めることができる。

$$S_{pt} = \frac{S_0(a+r-ab)}{r} \left\{ 1 - \left( \frac{\lambda_1}{r+\lambda_1} \right)^{\alpha_1} \right\} e^{rt} \quad \dots (2.45)$$

同様に、(2.42)式をもとに、再生素材のストック量を以下のように求めることができる。

$$S_{rt} = \frac{S_0ab}{r} \left\{ 1 - \left( \frac{\lambda_2}{r+\lambda_2} \right)^{\alpha_2} \right\} e^{rt} \quad \dots (2.46)$$

以上より、社会に存在する全素材ストック中の再生素材ストックの割合は、以下のようになる。

$$\frac{S_{rt}}{S_t} = \frac{ab}{r} \left\{ 1 - \left( \frac{\lambda_2}{r+\lambda_2} \right)^{\alpha_2} \right\} \quad \dots (2.47)$$

なお、 $r < 0$  の場合、 $q_t = a_{1t}S_{pt}$  及び  $abS_t = a_{2t}S_{rt}$  となり (2.41) 及び (2.42) 式を条件とすることができないため、代わりに以下の式を条件として用いる。

$$S_{rt} = \int_0^{\infty} abS_{t-s} \{1 - F_2(s)\} ds \quad \dots (2.48)$$

これを解くことにより、以下の解を得る。

$$\frac{S_{r1}}{S_1} = \frac{b \frac{\alpha_2}{\lambda_2}}{(1-b) \frac{\alpha_1}{\lambda_1} + b \frac{\alpha_2}{\lambda_2}} \quad \dots (2.49)$$

(2.34) 式も考慮することにより、素材ストックが一定割合で増加する社会における再生素材ストックの割合は、一般に、新たな素材を使用した製品の寿命が長い場合には小さく、また、再生素材を使用した製品の寿命が長い場合には大きくなる事が分かる。

また、フローベースで見ると、単位時間に生産される全素材中の再生素材の割合は以下のように求めることができる。

$$\frac{abS_r}{q_1 + abS_1} = \frac{ab}{a+r} \quad \dots (2.50)$$

さらに、(2.43) ~ (2.46) 式から、新たな素材及び再生素材それぞれのストックからの廃棄率を以下のように求めることができる。

$$a_{1r} = \frac{r \left( \frac{\lambda_1}{\lambda_1 + r} \right)^{\alpha_1}}{1 - \left( \frac{\lambda_1}{\lambda_1 + r} \right)^{\alpha_1}} \quad \dots (2.51)$$

$$a_{2r} = \frac{r \left( \frac{\lambda_2}{\lambda_2 + r} \right)^{\alpha_2}}{1 - \left( \frac{\lambda_2}{\lambda_2 + r} \right)^{\alpha_2}} \quad \dots (2.52)$$

すなわち、新たな素材及び再生素材それぞれの廃棄率は、素材全体の廃棄率と

同様に時間に関わらず一定となる。

### 2-3-5 素材中の不純物濃度の解析

新たな素材中の不純物レベルをゼロと仮定し、再生過程において  $g$  の割合で不純物が混入するものと考え、再生素材中の不純物量  $f_t$  について以下の関係が成立する。

$$df_t = gabS_t dt + ba_{2t} f_t dt - a_{2t} f_t dt \quad \dots (2.53)$$

これを解くと以下の解を得る。

$$f_t = e^{-a_{2t}(t-b)t} \left\{ \int gabS_t e^{a_{2t}(t-b)t} dt + c_5 \right\}$$

前節の結果をもとに、無限の過去において発散しないことを考慮してこの式を解くことにより、以下の解を得る。

$$f_t = \frac{gabS_0}{a_{2t} + r - a_{2t}b} e^{rt} \quad \dots (2.54)$$

ただし、

$$a_{2t} = \frac{r \left( \frac{\lambda_2}{r + \lambda_2} \right)^{a_1}}{1 - \left( \frac{\lambda_2}{r + \lambda_2} \right)^{a_1}}$$

これを (2.46) 式で割ることにより、再生素材ストック中の不純物濃度は以下のようになる。(  $r$  が 0 の場合も含む。)

$$\frac{f_t}{S_{rt}} = \frac{g}{1 - b \left( \frac{\lambda_2}{r + \lambda_2} \right)^{a_1}} \quad \dots (2.55)$$

不純物濃度は一般に、再生素材の寿命が短いほど、不純物混入率が高いほど、また回収率が高いほど高くなる。

また、フローベースで見ると、生産される再生素材中の不純物濃度は以下のようになる。

$$\frac{gabS_i + a_{2i}bf_i}{abS_i} = \frac{g(a_{2i} + r)}{a_{2i} + r - a_{2i}b} = \frac{g}{1 - b \left( \frac{\lambda_2}{r + \lambda_2} \right)^{a_2}} \dots (2.56)$$

すなわち、再生素材ストック中の不純物濃度とフローの再生素材中の不純物濃度は同一であり、ともに時間に関わらず一定となっている。

### 2-3-6 環境負荷の解析

モデルのようなリサイクルシステムから微小単位時間当たりに排出される二酸化炭素量について、以下の式が成立する。

$$\begin{aligned} dH_t &= p_1 q_t dt + p_2 (1-b)(a_{1t} S_{pt} + a_{2t} S_{nt}) dt + p_3 b (a_{1t} S_{pt} + a_{2t} S_{nt}) dt \\ &= p_1 q_t dt + p_2 a (1-b) S_t dt + p_3 ab S_t dt \dots (2.57) \end{aligned}$$

ここで  $p_1$ 、 $p_2$  及び  $p_3$  は、前節と同様に、それぞれ、新たな素材の生産時、廃棄された素材の投棄時及び素材の再生時における素材単位重量当たりの二酸化炭素排出量である。

これを積分することにより、過去から現在にわたってリサイクルシステムが排出してきた二酸化炭素の総量を以下のように求めることができる。

$$H_t = \int_{-\infty}^t dH_t = \frac{S_0}{r} \{ p_1(a+r-ab) + p_2 a(1-b) + p_3 ab \} e^{rt} \dots (2.58)$$

この式と (2.34) 式を併せて考慮することにより、新たな素材及び再生素材の使用期間並びに回収率の変化が環境負荷の程度に与える影響を定量的に評価することができる。

## 2-4 むすび

(1) 本章においては、素材ストック量が一定の割合で増加する社会を対象として、まず第2節において素材の廃棄率はすべての素材について平均的に同一であり、かつ、外生的に与えられるものと仮定してリサイクルシステムのモデル化と解析を行った。このモデルにおいては、廃棄率を外生的に与えているため、過去の素材のフローのあり方に関係なく、現在値を境界条件として今後の動きを推計することが可能であり、廃棄率に大きな変化がないと考えられる場合に、再生素材割合、不純物濃度、環境負荷等の今後の動きを推計することが可能である。一方、このモデルによっては、素材の使用期間や回収率が変化した場合に素材の廃棄率がどのように変わり、リサイクルシステムにおける素材のフロー、ストック、不純物濃度等がどのように変化するか等について分析することはできない。

(2) 第3節においては、第2節で構築したモデルを拡張・精緻化し、素材ストックが一定の割合で増加する社会において、原材料から製造される新たな素材と再生素材の寿命が異なる確率分布に従う場合について、素材の使用期間、回収率等を考慮した素材の廃棄率を理論的に導出する手法を示すことができた。この廃棄率を用いて、リサイクルシステムにおける新たな素材及び再生素材のストック、フロー及び不純物蓄積並びに環境負荷を求める理論式を得ることができた。これにより、社会における素材の使用期間及び廃棄された素材の回収率が変化した場合の素材廃棄率、素材ストック及びフロー中の再生素材の割合、素材中不純物濃度並びに累積環境負荷を理論的に得ることが可能となった。

特に不純物濃度については、一般にリサイクルの促進が不純物の蓄積をもたらし、結果として時間の経過とともに再生素材中の不純物濃度が上昇していくと言われているが、今回のモデルに基づく解析の結果は、素材ストック量が一定割合で増加していく限り、リサイクルによる再生素材中の不純物濃度の上昇は生じないことを示している。

なお、第2節においては、素材ストック量等の変化を微分方程式で表し、外生的に与えた現在値を境界条件としてこれを解くことにより過去と将来の変化を推計した。これに対し、第3節では、素材の廃棄率が使用期間に基づく一定の確率分布を取るものとして解析を行うため、充分遠い過去を起点として一定の規則に

基づいて素材及び不純物の蓄積が行われ、その結果現在のストックが存在しているものとしてモデルの構築を行った。第3節で得られた再生素材ストック割合及び不純物濃度が第2節の結果と異なり時間によらない形となっているのは、このようなモデルの違いによるものである。

(3) 第3節で導出したモデル式は、現実の社会との関係においては、素材の回収率や使用期間が変化し、十分な長い期間が経過した後には素材の質や環境負荷がどのように変化していくかに関する定量的な指標を与えるものであり、今後社会全体として素材の質の劣化を抑えつつ環境負荷を削減するために、素材の社会における使用期間や廃棄された素材の回収率をどのようにしていくべきか等を検討する上で有効であると考えられる。以降の章においては、鉄鋼生産時及び廃棄材の投棄時における環境負荷並びに現時点での鉄屑中の銅、すず等の不純物蓄積状況に関するデータを求めるとともに、これらデータをもとに本章で導いたモデル式を鉄鋼業に適用し、鉄鋼中への不純物蓄積による質劣化を抑えつつ鉄鋼生産、再生等の過程からの環境負荷を削減する方法について検討を行うこととする。

参考文献

- 1) 戸井朗人・佐藤純一・片桐広貴：エネルギー資源、18（1997）、92
- 2) 戸井朗人・佐藤純一：エネルギー資源、18（1997）、271
- 3) 松橋隆治・石谷久・清水徹・古垣一成：エネルギー・資源学会第11回研究発表会講演論文集（1992）、289
- 4) J.G.ブライアン、G.P.ウォズワース：確率・統計の応用と理論、ブレイン図書出版、東京
- 5) 自動車検査登録協会：初年度登録年別自動車台数（毎年度発行）

### 第3章 産業連関表を用いた製鉄プロセスの環境負荷分析

#### 3-1 はじめに

電炉法は、鉄鉱石等の限りある天然資源の保存に役立つのみならず、鉄鉱石のコークスによる還元過程等を含まないことから生産工程からの環境負荷も一貫製鉄法に比べて大幅に小さいと一般にいわれている。近年、電炉法による鉄リサイクルへの期待が高まっているが、一貫製鉄法と電炉法の環境負荷については他産業への誘発効果も含めた総合的な観点からは必ずしも十分な分析・比較は行われていない。第1章で述べたように、産業連関表を用いて両粗鋼生産法の環境負荷の差について検討したものはあるが、産業連関表上の金額表示のデータが鋼材の物量的流れを必ずしも正確に表していないといった問題への対応は十分にされていない。本研究においては、産業連関表を用いるとともに鉄鋼関係の各種統計データを併せて考慮することにより、それぞれの粗鋼生産法の関連産業への波及効果も含めた総合的な環境負荷をCO<sub>2</sub>発生量として求める<sup>1)2)</sup>。

#### 3-2 産業連関表

##### 3-2-1 産業連関表の概要

産業連関表は、それぞれの産業部門間の財及びサービスの流れを取引金額で表したものである<sup>3)</sup>。産業連関表のひとつである投入係数表は、ある産業部門において単位額の生産増加を行う際に必要となる各産業部門から当該産業部門への直接的な投入を表している。また、投入係数表から求められる逆行列係数表は、ある産業部門に対する最終需要が単位額増加した場合に、産業部門間の取引関係を通じて産業全体に波及していく生産増加分の総和を表している。したがって、逆行列係数表からCO<sub>2</sub>を発生させるものとしてエネルギー関連部門に対応する係数を取り出し、これを金額から物量に変換することにより、単位量の製品生産に必要なエネルギーの量を求め、これから関連産業部門への波及効果も含めた総合的なCO<sub>2</sub>排出量を推計することが可能となる。

### 3-2-2 産業連関表の構成と考え方

一般に産業連関表と言われているものは投入表であり、図3-1のような構成となっている。ある産業部門に着目して、その部門に対応する列を縦に読んでいくと、その産業部門に対して各産業部門から投入される中間投入物の金額が記載されている。列の下部には当該産業部門においてつけ加えられる人件費等の付加価値が記載されており、列の総和をとることにより、中間投入額と付加価値を合わせた当該産業部門の総生産額が得られる。一方、ある産業部門に対応する行を横に読んでいくと、その産業部門から各産業部門に投入される中間投入物の金額が記載されている。右端には消費、輸出等の最終需要部門に投入されるものの額が記載されており、横の行の総和をとることにより、列の場合と同様にその産業部門の総生産額を得ることができる。

図3-1 産業連関表（投入表）の概要

需要側		産業部門		最終需要、輸入	計 (生産額)
		1、2、3、・・・		消費、 輸出等	
供給側					
産業部門	1、	費用 構成	販路構成 →		
	2、				
付加価値	3、		(中間投入)		
	・				
雇用者所得 営業余剰等					
計 (生産額)					

投入表から投入係数表が求められる。投入係数表は、各産業部門への中間生産物の投入というかたちで生産・技術的關係が表現されていることに着目したもので、各産業部門の原材料の投入を通じた相互の連関關係を表している。投入係数表は、投入表の各産業部門への投入金額をその産業部門の総生産額で割ることにより得られる。得られた投入係数は、「ある産業部門で単位額の生産を行うために各産業部門から投入することの必要な原材料等の額」を表している。

以上の関係を行列式で表すと以下のようになる。

$$\underbrace{\begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} & \cdots & a_{1n} \\ a_{21} & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ a_{n1} & \cdot & \cdot & a_{nn} \end{pmatrix}}_A \underbrace{\begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \cdot \\ x_n \end{pmatrix}}_X + \underbrace{\begin{pmatrix} f_1 \\ f_2 \\ \cdot \\ f_n \end{pmatrix}}_F = \underbrace{\begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \cdot \\ x_n \end{pmatrix}}_X \quad \cdots (3.1)$$

ここで、 $A$ は投入係数行列、 $X$ は生産額ベクトル、 $F$ は最終需要ベクトルを表す。 $a_{ij}$ は $i$ 産業部門から $j$ 産業部門への投入係数であり、 $x_i$ 及び $f_i$ はそれぞれの産業部門の生産額及び最終需要である。(3.1)式は、中間投入額と最終需要の合計が、それぞれの産業部門にとっての生産額となることを表している。

(3.1)式は、以下のように書き換えることができる。

$$\begin{aligned} AX + F &= X \\ X &= (I - A)^{-1}F \end{aligned}$$

すなわち、逆行列 $(I - A)^{-1}$ を得れば、最終需要額が単位額増加するために必要な生産額を求めることができる。

この逆行列の意味を考えてみる。ある需要 $F$ が発生したとき、この需要によって生じる波及効果は次々と各産業部門に広がっていき、この無限の波及による各産業部門の誘発生産額の総和は以下のようになる。

$$F + AF + A^2F + A^3F + \cdots = \sum_{n=0}^{\infty} A^n F = (I - A)^{-1}F$$

すなわち、投入係数表から逆行列係数表を求めることにより、ある産業部門において生産増加があった場合の各産業部門の誘発生産増までを含めた総合的な生産増加額を求めることができる。

なお、上式で導かれた逆行列係数表は、中間投入物中に占める輸入分の割合を考慮していない。別の言葉で言えば、日本と同じ産業部門の連関関係が海外にも存在しているとの前提のもとでの全世界を含む総合的な誘発生産額を求める式となっている。このほか、各産業部門への投入分から輸入分を差し引いた投入係数表を考え、これの逆行列を求める考え方もある。ある産業部門における生産増加

が国内産業へ与える経済的波及効果の分析等には輸入分を差し引いたものがよく用いられる。しかしながら、素材の生産による環境負荷を国内発生分だけに限定する理由がないこと、また、輸入分を差し引かない方が大きな値となり環境評価の観点からは安全側となると考えられることから、本研究においては上に示した  $(I-A)^{-1}$  型の逆行列係数表を用いることとする。

### 3-2-3 環境負荷の推計

逆行列係数表を用いることにより、素材の生産が単位額増加したときの波及効果までを含めた各産業部門の生産額の増加分を求めることができる。このうち、CO<sub>2</sub>排出源である石炭、原油、天然ガス等の生産額増加分をそれぞれの量当たり単価で割ることにより、素材の生産量が単位量増加した時に使用される各CO<sub>2</sub>排出源の増加量を誘発分まで含めて求めることができる。この増加量を適当な係数を用いて熱量に変換し、さらにCO<sub>2</sub>排出量に変換するとともに、素材の生産額も物量に換算することにより、単位量の素材生産による総合的なCO<sub>2</sub>排出量を得ることができる。

以上の方法により、素材生産に係る全CO<sub>2</sub>排出量を求めることができるが、本研究では、産業部門ごとの誘発発生量を求めるため、以下のような方法を用いた。

素材の生産が増加した時の各産業部門への  $n$  次の波及効果は、 $A^n F$  で表される。行列  $A^n$  の各要素を  $a_{ij}^n$  と表し、また、素材の生産を行う産業部門を  $m$  とすると、ある産業部門  $k$  について、素材の生産が単位額増加した時の  $n$  次波及による  $k$  産業部門における生産増加額は  $a_{km}^n$  となる。ここで、CO<sub>2</sub>排出源となる産業部門を  $l$  とすると、 $n$  次波及による生産増加に伴う  $k$  産業部門へのCO<sub>2</sub>排出源となるものの投入量は  $a_{lk} a_{km}^n$  となる。 $a_{lk}$  は  $l$  産業部門から  $k$  産業部門への投入係数である。これを以下のように  $n$  について無限次までの和を取ることで、誘発による分も含めての当該産業部門に投入されるCO<sub>2</sub>排出源の全体額を求めることができる。

$$\sum_{n=0}^{\infty} a_{lk} a_{km}^n = a_{lk} \sum_{n=0}^{\infty} a_{lm}^n = a_{lk} b_{lm}$$

ここで $b_{ij}$ は、逆行列係数表の係数を示す。

すなわち、逆行列係数表の素材生産部門に対応した列の各産業部門に対応した係数に、それぞれの産業部門へのCO<sub>2</sub>排出源の投入係数をかけることにより、産業部門ごとのCO<sub>2</sub>発生量を求めることができる。CO<sub>2</sub>排出源となるものは、石炭、原油、天然ガス、石油製品及び石炭製品である。ただし、このうち石油製品及び石炭製品については、これら産業部門に投入される原油及び石炭はそこで消費されずに原料として加工され、これら産業部門に投入される石油製品及び石炭製品のみが消費されるものと考えて取り扱った。また、電力部門からのCO<sub>2</sub>排出はこれを使用する産業部門ごとに振り分けず、電力部門として一括して示し、別途その内訳を示した。

### 3-3 産業連関表を用いて環境評価を行う上での問題点

産業連関表を用いた環境負荷推計にはいくつかの問題がある。まず、産業連関表は比較的大きな産業区分に基づいて作成されており、このため区分のあり方が製造プロセスごとの環境負荷の推計には適さない場合がある。現在公表されている最も詳細な区分に基づく産業連関表は基本分類であり、409列×525行により構成されている。このほか、基本分類を取りまとめたものとして、統合小分類(185×185)、統集中分類(103×103)、統合大分類(47×47)がある。本研究の対象である製鉄プロセスについては、最も詳細な基本分類においては転炉法と電炉法による粗鋼生産に対する投入係数が粗鋼(転炉)部門及び粗鋼(電気炉)部門(以下、粗鋼(電炉)部門と言う。)として区分して記載されているが、統集中分類では両者が銑鉄・粗鋼部門として統合されたかたちで記載されている。基本分類は正方形行列でないため逆行列係数表はこれに対応したかたちで掲載されておらず、産業連関表から直接両生産方法の比較を行うことはできない。このため、基本分類、統合大分類のデータ等をもとに粗鋼(転炉)部門と粗鋼(電炉)部門が区分された投入係数表を正方形行列となるように新たに作成し、これをもとに逆行列係数表を計算することが必要となる。

また、産業連関表は産業部門間の取引金額を表すものであるが、取引相手によって同種の製品でも価格が異なる場合等には金額が製品の流れを正しく表しておらず<sup>4)</sup>、結果として使用エネルギー量の計算に誤差が生じることとなる。また、統

計作成の区分上、異なる原材料から製造される類似の製品が同じ部門に分類され、このため実際には特定の原材料の流れがないにもかかわらずあたかも当該部門への投入が行われているように見える場合もある。これらについても、鉄鋼製品流通の実態や他の鉄鋼関係統計等のデータをもとに修正を行うことが必要となる。

### 3-4 新たな投入係数表の作成

#### 3-4-1 正方向列の作成

本研究では、1990年産業連関表を用いた。同表の統合大分類をベースとしつつ、基本分類中のデータをもとに、鉄鋼業の環境負荷分析に必要な鉄鋼及びエネルギー関連部門を詳細に分割して転炉法及び電炉法に対応した部門を設ける一方、鉄鋼業に関連の薄い産業部門を取りまとめることにより、28行28列の投入表を作成した。行及び列の統合に当たっては、単純に加算を行った。従って、例えば第 $m$ 部門から第 $n$ 部門まで及び第 $p$ 部門から第 $q$ 部門までを統合した場合には、新たに作成した投入表における $m \sim n$ 部門から $p \sim q$ 部門への投入額 $a_{mpq}$ は以下のように表せる。

$$a_{mpq} = \sum_{i=m}^n \sum_{j=p}^q a_{ij}$$

一般に、産業連関表上の産業区分を統合すると、産業区分ごとの連関関係が大きな区分のもとで平均化されてしまい、結果として、産業連関表に基づく波及効果分析の精度が低下する恐れがあるといわれている。本研究においては、この問題をなるべくさけるため、一貫製鉄法及び電炉法の環境負荷推計に特化した産業連関表を作成することとし、農林漁業、食料品、繊維製品、電子・通信機器等鉄鋼業の波及効果がほとんどない産業部門を統合する一方、鉱業、鉄鋼、電力・ガス等の鉄鋼業の波及効果の大きな産業に関連する部門は詳細な区分のままとした。新たに作成した投入表の産業区分を表3-1に示す。

#### 3-4-2 鉄屑処理に関する投入

また、基本分類には鉄屑部門が存在するものの、鉄屑部門への他産業部門からの投入を表す列が存在しない。これは、「鉄屑の需要が増えることにより鉄屑の

生産が増加する」という存在しない連関を断ち切る意味があると考えられるが、一方、廃棄され回収された鉄を再生利用可能なかたちにまで処理するためには相当量のエネルギーが投入されており、環境負荷の評価のためにはこれら鉄屑の処理に係る投入も考慮することが必要となる。そこで、本研究においては、各産業部門から鉄屑部門への投入のうちエネルギー消費に関連するものをシュレッダー処理コストに関するデータから推計して投入表中の鉄屑部門に対応する列に加えた。シュレッダー処理コストの平均的な構成は文献<sup>5)</sup>から得た。ヘビー屑等については平均的な処理コスト構成が明確に得られなかったことから、シュレッダー処理コストのうちダスト処理費を0、償却費を半分としたものをコスト構成として用いた。表3-2にここで用いたシュレッダー処理コスト及びヘビー屑等処理コストの構成を示す。我が国においては、近年鉄屑全体のうち11~12%程度がシュレッダー処理にかけられているが<sup>6)</sup>、この他プレス等の比較的エネルギー消費量が多いと考えられる処理の行われているものも4%程度あることから、ここでは鉄屑全体のうちシュレッダーによるものが20%、それ以外のヘビー屑等が80%と設定し、我が国のスクラップ総供給量をもとに鉄屑部門へのエネルギー消費に関連する産業部門からの投入額を推計した。具体的には、表3-2に示した鉄屑処理コストの構成項目ごとの金額を要素とする列ベクトルをそれぞれ $C_s$  (シュレッダー処理のコストベクトル) 及び $C_h$  (ヘビー屑等処理のコストベクトル) とすると、鉄屑処理への各項目の総投入額を要素とする列ベクトル $A_k$ を以下の式により推計した。

$$A_k = C_s x_s + C_h x_h$$

ここで、 $x_s$ 及び $x_h$ はシュレッダーにかけられる鉄屑及びそれ以外のヘビー屑等の量であり、1990年度の総鉄屑発生量49,165千トン<sup>7)</sup>のそれぞれ20%及び80%として、9,833千トン及び39,332千トンとした。結果を表3-3に示す。同表に示すように、それぞれの投入額を投入表中の鉄屑部門に対応する列の各産業部門に割り振った。

表3-1 作成した産業連関表の区分

鉱業	石炭	機械
	原油	その他の製造工業品
	天然ガス	建設
	その他鉱業	事業用電力
石油製品		自家発電
石炭製品		都市ガス
鉄鉄・粗鋼	鉄鉄	熱供給業
	粗鋼（転炉）	水道・廃棄物処理業
	粗鋼（電炉）	運輸
	フェアラロイ	商業・その他サービス業
	鉄屑	その他
鉄鋼製品	熱間圧延鋼材（転炉）	
	熱間圧延鋼材（電炉）	
	鋼管	
	冷間仕上げ鋼材	
	めっき鋼材	
	鋳鍛造品・その他鉄鋼製品	

表3-2 鉄屑処理コスト（単位：円/t）

コスト内訳	シュレッダー処理コスト	ヘビー屑等処理コスト
ダスト処理費	7,000	0
管理費	1,600	1,600
運搬費	4,500	4,500
修理・消耗品費	1,100	1,100
人件費	600	600
動力費	1,200	1,200
償却費	3,400	1,700
合計	19,400	10,700

表 3-3 鉄屑処理コストと産業連関表の対応関係 (単位:百万円)

費用内訳	産業連関表上の部門	総費用(投入額)
ダスト処理費	水道・廃棄物処理業	68,831
管理費	その他	78,664
運搬費	運輸	221,243
修理・消耗品費	その他	54,082
人件費	付加価値部門	29,499
動力費	事業用電力	58,998
償却費	機械	100,297

### 3-5 製品の流れに関する補正

産業連関表は各産業部門間の取引を金額で表している。しかしながら、環境負荷の評価のためには、産業部門間の製品の量的な流れを正しく捉えることが必要となる。製品が同一の価格で取引されている場合には取引金額は製品の量に比例することとなるが、実際には同一製品でも同一価格で取引されない場合も多い。修正を行わずに同一製品は同一価格で取引されているとの仮定のもとに単純に産業連関表から商品の流れを計算すると、物量ベースで見た場合に鋼材1トンを生産するのに粗鋼等が1トン未満しか投入されていないなど矛盾が生じる。これは、鉄鋼の取引価格が企業内で取引される場合と外部に販売する場合で異なっていることによるものと考えられる。また、原材料が異なっているにも関わらず同種の製品としてまとめられている場合には、電炉鋼が熱間圧延鋼材部門を通して冷間仕上げ鋼材部門に投入されているように見えるなど、実際の製品の流れと異なる結果が生じてしまう。このような問題に対応するため、本研究においては、以下のような修正を行った。

(1) 鉄鉄及び熱間圧延鋼材のような中間加工製品については、自社内の一貫製鉄プロセス中へ投入される場合と他企業へ販売される場合では価格が異なると考えられる。これに対処するため、総生産額から営業余剰を引きこれを鉄鋼年鑑<sup>7)</sup>から得られた生産量で割ることにより内部価格及び外部価格を推計し、これらの値をもとに投入金額が投入量と比例するようにこれら製品の投入表を修正した。具体的には、鉄鉄部門については粗鋼(転炉)部門へ投入されるものは内部価格、

粗鋼（電炉）部門へ投入されるものは外部価格で取引されているものとした。また、熱間圧延鋼材部門については、冷間仕上げ鋼材等の他の鋼材部門へ投入されているものは内部価格、鉄鋼以外の産業分野の部門に投入されているものは外部価格とした。

（2）冷間仕上げ鋼材部門及び鋼管部門は原料として主に熱間圧延鋼材部門の製品を使用している。投入表上、熱間圧延鋼材部門には粗鋼（転炉）及び粗鋼（電炉）部門からの投入があるが、実際には冷間仕上げ鋼材部門等には粗鋼（電炉）部門の製品が熱間圧延鋼材部門を経て投入されることはほとんどない。このため、産業連関表をそのまま用いた場合には、図3-2に示すように実際と異なる製品の流れがあるように見えるという問題が生じる。この問題に対処するため、以下の考え方にに基づき投入表中の熱間圧延鋼材部門を粗鋼（転炉）部門の製品を原料とする熱間圧延鋼材（転炉）部門と粗鋼（電炉）部門の製品を原料とする熱間圧延鋼材（電炉）部門に分割した。

- a) 非エネルギー部門については、生産比率で投入額をそれぞれの部門に分配する。
- b) 石炭製品部門からの投入は一貫製鉄の上工程で発生した副産物が使用されていると考え、熱間圧延鋼材（転炉）部門に分配する。
- c) 自家発電は電炉ではほとんど行われていないので、当該部門からの投入は熱間圧延鋼材（転炉）部門に分配する。
- d) 事業用電力部門からの投入については、一般業務使用分等として5%を熱間圧延鋼材（転炉）部門に分配し、残りを熱間圧延鋼材（電炉）部門に分配する。

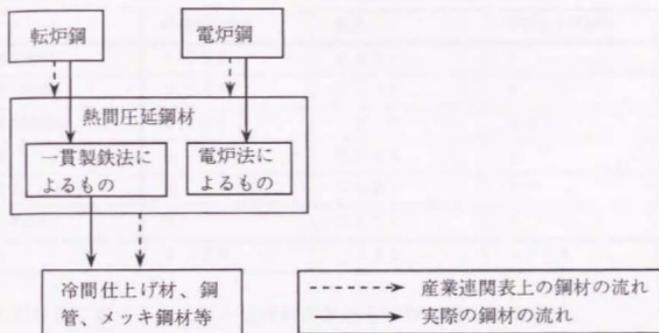


図 3 - 2 産業連関表上と実際の鋼材の流れ

以上の修正を行った上で産業連関表から推計した各鋼材生産時の粗鋼等投入量と修正を行う前の結果を表 3 - 4 及び表 3 - 5 に示す。修正を行うことにより、量ベースでの誤差が減少してきていることが分かる。

表 3 - 4 鋼材 1 トン生産に必要な投入量 (修正前) (単位: トン)

	熱間圧延鋼材	鋼管	冷間仕上げ鋼材
粗鋼 (転炉)	0.726	0.001	0
粗鋼 (電炉)	0.408	0.001	0
熱間圧延鋼材	0.004	0.577	0.549
鋼管	0	0.092	0
冷間仕上げ鋼材	0	0.003	0
メッキ鋼材	0	0.022	0
合計	1.138	0.695	0.549

表3-5 鋼材1トン生産に必要な投入量(修正後)(単位:トン)

	熱間圧延鋼材	鋼管	冷間仕上げ鋼材
粗鋼(転炉)	0.796	0.001	0
粗鋼(電炉)	0.356	0.001	0
熱間圧延鋼材	0.006	1.018	0.934
鋼管	0	0.088	0
冷間仕上げ鋼材	0	0.004	0
メッキ鋼材	0	0.024	0
合計	1.158	1.136	0.934

以上の修正に基づき作成した逆行列係数表を本章の後に添付する。

### 3-6 二酸化炭素排出量の推計結果

#### 3-6-1 直接投入されるエネルギーによる二酸化炭素排出量

まず、粗鋼生産工程において直接使用されるエネルギーにより発生するCO<sub>2</sub>量を産業連関表から推計した結果を図3-3に示す。この値は、粗鋼(転炉)及び粗鋼(電炉)部門へのエネルギー関連産業部門からの投入係数を、表3-6に示す係数等をもとにエネルギー量に変換しCO<sub>2</sub>排出量を算出したものである。併せて、鉄鋼統計年報<sup>9)</sup>の鉄鋼生産時のエネルギー原単位から求めた結果及び当研究室において積み上げ法により求めた結果<sup>10)</sup>を表3-7に示す。各データは比較的良く一致している。直接投入されるエネルギーによるCO<sub>2</sub>発生量については、一貫製鉄法と電炉法の比が10対1程度となっている。一般に一貫製鉄法と電炉法の消費エネルギーの比は4対1程度といわれている。CO<sub>2</sub>排出量の比がエネルギー使用量の比と較べて大きなものとなっているが、これは電炉で使用される主要エネルギーである電力に水力や原子力等のCO<sub>2</sub>排出量が小さな方式によるものが含まれていることによるものと考えられる。

表3-6 CO<sub>2</sub>排出量の推計に用いた係数等

粗鋼生産高 (1990年)		
一貫製鉄法	(千トン)	75.640
電炉法	(千トン)	34.698

エネルギー価格 (1990年)		
石炭	(円/t)	8,655
原油	(円/kl)	20,326
天然ガス	(円/t)	28,729

熱量換算値		
石炭	kcal/kg	7,600
原油	kcal/l	9,250
天然ガス	kcal/kg	13,000

二酸化炭素排出量換算係数		
石炭	kgC/10,000kcal	0.996
原油	kgC/10,000kcal	0.804
天然ガス	kgC/10,000kcal	0.574

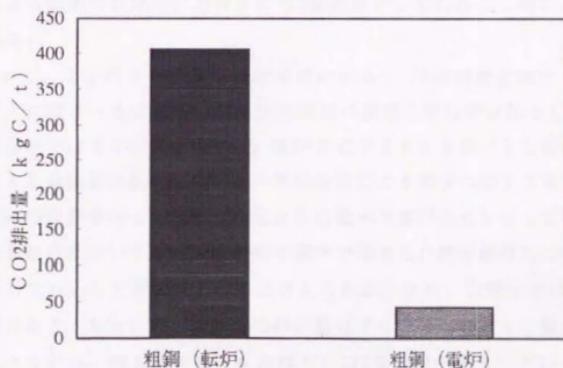


図3-3 粗鋼生産工程で直接使用されるエネルギーから発生するCO<sub>2</sub>量

表3-7 直接に使用されるエネルギー源によるCO<sub>2</sub>排出量 (kg C/t)

	一貫製鉄法	電炉法
鉄鋼統計年報	382	32
当研究室積み上げ	335	41
産業連関表	406	45

## 3-6-2 他産業への波及効果も含めた総合的な二酸化炭素排出量

前節までに示した修正を行った投入係数表から逆行列係数表を求め、このうち原油、石炭等のエネルギー関連産業部門に対応する係数から粗鋼生産により発生する総合的なCO<sub>2</sub>排出量を計算することができる。本研究では、逆行列係数表の各産業部門の係数に、各産業部門の総中間投入金額に占めるエネルギー関連部門からの投入金額の割合を乗じることにより、各産業部門ごとの鉄鋼業CO<sub>2</sub>排出への寄与度についても求めた。結果を図3-4に示す。一貫製鉄法による粗鋼生産による総合的なCO<sub>2</sub>排出量は458kg C/t、電炉法によるものは136kg C/tとなり、電炉法のCO<sub>2</sub>排出量は一貫製鉄法の約30%となっている。直接投入されるエネルギー源によるCO<sub>2</sub>排出量を比べた場合に比べて両者の差は小さくなっているが、これは電炉に投入される鉄鉄の生産時やシュレッター等による鉄屑の処理時におけるCO<sub>2</sub>排出量が含まれること等によるものと考えられる。

ついで、下工程までを含む鋼材生産に係るCO<sub>2</sub>排出量を推計した結果を鋼材種ごとに図3-5に示す。熱間圧延鋼材の製造に係る総合的なCO<sub>2</sub>発生量は、一貫製鉄では514kg C/t、電炉では218kg C/tと算出された。電炉法による排出量は転炉を用いた一貫製鉄法による場合の約42%であり、製鋼工程だけの比較を行った場合の約30%に比べて差が小さくなっている。これは、一貫製鉄法においてはコークス炉や高炉で発生した熱を回収して下工程において利用していること等によるものと考えられる。また、冷間仕上げ鋼材のCO<sub>2</sub>排出量は624kg C/t、鋼管の排出量は795kg C/tと算出された。当然のことながら、加工度の高いものほどCO<sub>2</sub>発生量が多いという結果となっている。

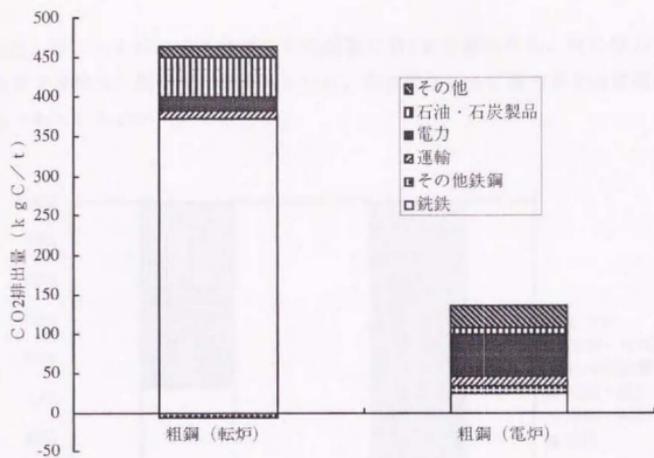


図 3-4 粗鋼生産によるCO<sub>2</sub>排出量

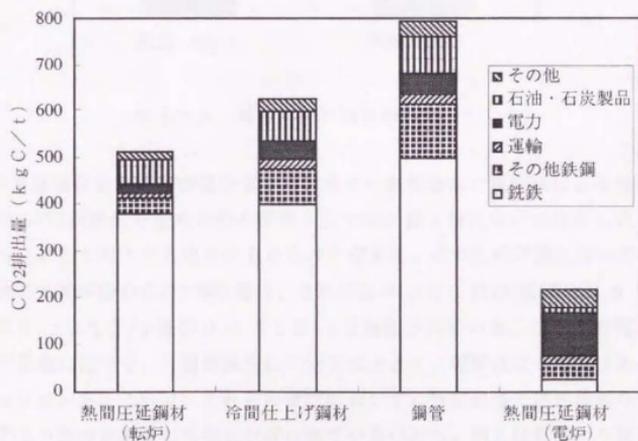


図 3-5 鉄鋼製品生産によるCO<sub>2</sub>排出量

また、図3-4に示す各産業ごとの誘発CO<sub>2</sub>発生量のうち、特に電力については直接使用分と間接使用分があるため、別途図3-6に電力がどの産業部門で使用されているかの内訳を示した。

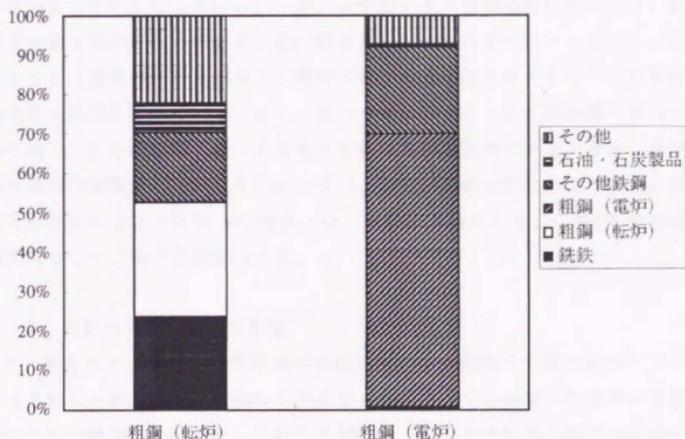


図3-6 電力の部門別使用割合

産業連関表を用いて誘発分までを含めて一貫製鉄法と電炉法による粗鋼生産工程のCO<sub>2</sub>排出量を求めた他の研究としては、第1章において紹介したように本藤らによるもの<sup>11)</sup>と外岡らによるもの<sup>12)</sup>がある。これらの研究においては、一貫製鉄法と電炉法のCO<sub>2</sub>排出量は、それぞれ0.38 t C/t及び0.19 t C/t並びに0.35 t C/t及び0.18 t C/tと報告されている。これらの値は、本研究の結果に比べて、一貫製鉄法については小さく、電炉法については大きなものとなっている。これは、これらの研究においては外部価格と内部価格の違いや鉄鋼製品の流れを考慮した補正が行われていないため、例えば高炉から電炉に投入される鉄鉄の量を過剰に見積もってしまうこと等によるものと考えられる。

### 3-6-3 二酸化炭素排出量の内訳

図3-4から分かるように、一貫製鉄法による粗鋼生産においては、誘発分も含めたCO<sub>2</sub>の総発生量のうち、8割近くが銑鉄の生産工程において発生している。ついで、石油・石炭製品が1割程度を占めている。電力は全体の5%程度とかなり小さなものとなっている。一方、電炉法による粗鋼生産においては、電力が最も大きな部分を占めており、その割合は全体の約38%となっている。図3-6をもとに発電の内訳を見ると、電炉工程で直接使用されるものが7割程度と相当大きな部分を占めている。また、図3-4に示すように、電炉鋼の質向上のために加えられる銑鉄の生産によるものも約18%を占めている。今後、鉄鋼への不純物の蓄積量が増加していくに伴い、鉄鋼の質向上のためより多くの銑鉄の投入が行われるようになった場合には、電炉法製鋼によるCO<sub>2</sub>発生量は相当程度増大していくものと考えられる。

### 3-7 電炉への銑鉄投入の影響

現在、鉄スクラップからの電炉鋼の生産に際しては銑鉄が平均で約5~7%程度投入されている。今後、鉄鋼のリサイクルが進むにつれ鋼等の不純物の蓄積が進むことが予想されているが、これら不純物の完全な除去は技術的又は経済的に困難であることから、電炉鋼の品質維持のため将来的により多くの銑鉄が電炉に投入されることも予想される。この場合、電炉鋼生産に係る総合的なCO<sub>2</sub>発生量は銑鉄投入の影響により相当増加するものと予想される。そこで、電炉プロセスへの銑鉄の投入量が今後増加した場合のCO<sub>2</sub>発生量の変化についてシミュレーションを行った。鉄鋼年鑑から得られる現時点での電炉への鉄屑及び銑鉄の投入量をもとに、投入量の比率の変化に合わせて投入係数表中の銑鉄部門及び鉄屑部門からの粗鋼（電炉）部門への投入係数を変化させ、前節までと同様の手法で関連産業への波及効果までを含むCO<sub>2</sub>排出量を算出した。なお、銑鉄部門及び鉄屑部門からの粗鋼（電炉）部門への投入係数を変化させた場合でも、他の産業部門間の連関関係の変化はないものと考えた。粗鋼ベース及び熱間圧延鋼材ベースで推計を行った結果を図3-7及び図3-8に示す。

粗鋼生産工程のみの比較では電炉への銑鉄投入割合が約75%となった時点で

一貫製鉄法と電炉法のCO<sub>2</sub>排出量は同一となるが、熱間圧延工程までを含めて比較した場合には、この割合は約66%まで低下する。

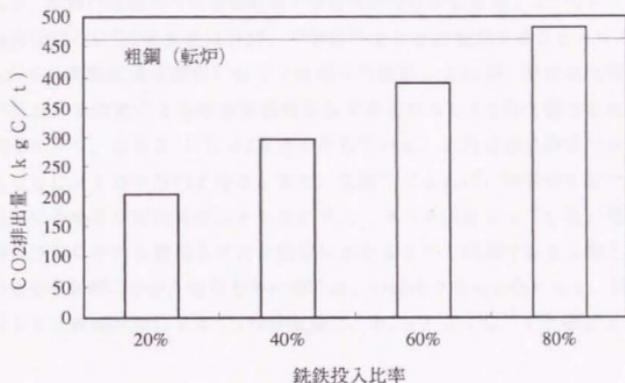


図3-7 銑鉄投入量が増加した場合のCO<sub>2</sub>発生量 (粗鋼ベース)

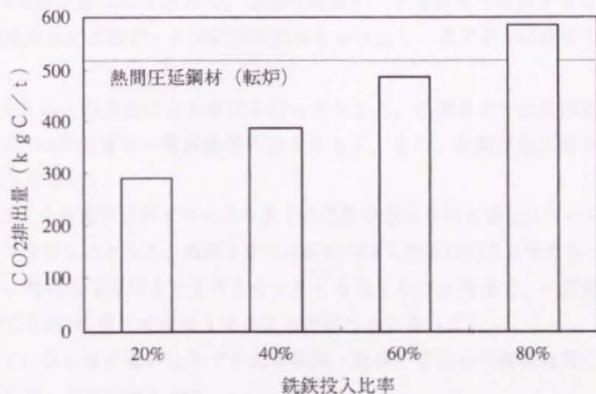


図3-8 銑鉄投入量が増加した場合のCO<sub>2</sub>発生量 (熱間圧延鋼材ベース)

### 3-8 鉄鋼投棄時の環境負荷

本研究で作成した産業連関表は、鉄鋼生産による波及効果分析に特化したものであり、鉄鋼の投棄等の廃棄物処理の環境負荷の推計には適していない。そこで、鉄鋼投棄時のCO<sub>2</sub>発生量は吉岡らの報告<sup>13)</sup>をもとに推計することとする。

昭和60年度産業連関表に基づく吉岡らの推計によれば、廃棄物処理（産業）部門における活動による他産業誘発分までを含めたCO<sub>2</sub>発生量は生産額100万円当たり9,803.5CO<sub>2</sub>kgとされている。これは炭素換算では、2,674kgC/100万円となる。また、文献<sup>14)</sup>によれば、同年度におけるダストの投棄にかかる平均的費用はトン当たり5,000円となっている。廃棄された鉄鋼の投棄にかかる費用もダスト処理にかかるものと同額であると考え、また、産業廃棄物処理にかかる費用も平均的にはこの程度であると考え、以上のデータをもとに鉄鋼投棄によるCO<sub>2</sub>排出量は、0.013tC/tと推計される。

### 3-9 むすび

(1) 産業連関表のデータをもとに、鉄屑処理に係る費用等不足するデータを補うことにより、他産業への波及効果まで含めて一貫製鉄法と電炉法の環境負荷をCO<sub>2</sub>排出量として求めた。実際の物量データも併せて考慮することにより、産業連関表の金額データが物量の流れをより正しく表すように修正することができた。

(2) 以上の方法により推計を行ったところ、粗鋼まででは電炉法による生産時のCO<sub>2</sub>排出量は一貫製鉄法の約30%に、また、熱間圧延工程まででは約42%となった。

(3) 今後電炉プロセスにより多くの銑鉄が投入される場合についてシミュレーションを行ったところ、粗鋼まででは銑鉄の投入割合が約75%となった時点で、また、熱間圧延工程までを考えると約66%となった時点で、一貫製鉄法と電炉法のCO<sub>2</sub>排出量の差はなくなることが明らかとなった。

(4) 第2章で導いたモデル式を鉄鋼へ適用するための環境負荷に関する設定値として、以下の値を得た。

一貫製鉄法による粗鋼生産時のCO<sub>2</sub>排出量  $p_1$ : 458kgC/t

廃棄された鉄鋼投棄時のCO<sub>2</sub>排出量  $p_2$ : 13 kg C / t

電炉法による粗鋼生産時の環境負荷  $p_3$ : 136 kg C / t

逆行列係数表(1)

		鉱業	石油	天然ガス	その他鉱業	石油製品	石炭製品
		石炭					
鉱業	石炭	1.0029208	0.0028151	0.0019487	0.0014077	0.0016716	0.5175063
	原油	0.0112445	1.0129489	0.0126138	0.0215671	0.5144553	0.0235294
	天然ガス	0.0028771	0.0024101	1.0036996	0.0016618	0.0015764	0.0032349
	その他鉱業	0.0035878	0.0041509	0.0027912	1.0041493	-0.0002205	0.0025594
	石油製品	0.0189462	0.0232178	0.0210289	0.0413470	1.0356781	0.0432415
鉄鉄・粗鋼	石炭製品	0.0026329	0.0040089	0.0017321	0.0017802	0.0022087	1.1312817
	鉄鉄	0.0063468	0.0073881	0.0015552	0.0015519	0.0039007	0.0037382
	粗鋼(転炉)	0.0107752	0.0125426	0.0025598	0.0025720	0.0066120	0.0063191
	粗鋼(電炉)	0.0003030	0.0003072	0.0003290	0.0002924	0.0002006	0.0003082
	フェアラロイ	0.0006895	0.0007754	0.0001845	0.0001814	0.0004125	0.0004051
鉄鋼製品	鉄屑	-0.0001112	-0.0001065	-0.0000110	-0.0000029	-0.0000526	-0.0000464
	熱間圧延鋼材(転炉)	0.0155217	0.0180692	0.0036776	0.0036978	0.0095243	0.0091001
	熱間圧延鋼材(電炉)	0.0004181	0.0004102	0.0004517	0.0004073	0.0002713	0.0004382
	鋼管	0.0043793	0.0009831	0.0011700	0.0006957	0.0006092	0.0025119
	冷間仕上鋼材	0.0013614	0.0010843	0.0011478	0.0010718	0.0006864	0.0010680
	めっき鋼材	0.0016875	0.0010796	0.0012586	0.0008102	0.0006680	0.0011455
	鑄造品・その他鉄鋼製品	0.0022028	0.0027441	0.0025217	0.0020449	0.0016792	0.0018313
機械	機械	0.0122566	0.0126710	0.0111439	0.0235905	0.0088419	0.0133675
	その他製造工業品	0.1409445	0.1698181	0.2067792	0.1069844	0.1034898	0.1049135
	建設	0.0146370	0.0102849	0.0105175	0.0142408	0.0077308	0.0201731
	事業用電力	0.0452685	0.0351523	0.0535048	0.0260896	0.0232085	0.0511116
	自家発電	0.0495443	0.0099472	0.0095857	-0.0023405	0.0071179	0.0261760
	都市ガス	0.0006116	0.0005493	0.0005989	0.0008428	0.0003972	0.0006946
	熱供給業	0.0002837	0.0013752	0.0004933	0.0002433	0.0007407	0.0002729
	水道・廃棄物処理業	0.0056682	0.0176110	0.0034561	0.0070134	0.0101716	0.0072399
	運輸	0.0963890	0.0542405	0.0543330	0.3265149	0.0511052	0.1648318
	商業・その他サービス業	0.2521090	0.2281377	0.2348709	0.2231138	0.1738556	0.2593053
	その他	0.0594038	0.0536307	0.0615310	0.0282728	0.0313277	0.0396623
	合計	1.7628794	1.6882470	1.7054736	1.8398016	1.9978682	2.4359209

逆行列係数表(2)

	鉄鉄・粗鋼				
	鉄鉄	粗鋼(転炉)	粗鋼(電炉)	フェロアロイ	鉄屑
石炭	0.1966911	0.1164391	0.0218456	0.0512556	0.0054903
原油	0.0203786	0.0180224	0.0202537	0.0273698	0.0244261
天然ガス	0.0036498	0.0045110	0.0092042	0.0151701	0.0046393
その他鉱業	0.2662062	0.1794649	0.0338231	0.1605334	0.0022245
石油製品	0.0363691	0.0305423	0.0288891	0.0360978	0.0432210
石炭製品	0.4017784	0.2349152	0.0364311	0.0773861	0.0027656
鉄鉄	1.0022372	0.5861083	0.0582412	0.0015715	0.0027605
粗鋼(転炉)	0.0037442	1.0033422	0.0031134	0.0026020	0.0042087
粗鋼(電炉)	0.0003258	0.0003858	1.0004834	0.0003206	0.0008903
フェロアロイ	0.0002540	0.0595995	0.0914227	1.0001858	0.0003473
鉄屑	-0.0016274	-0.0084935	0.1972504	0.0000015	1.0002462
熱間圧延鋼材(転炉)	0.0053879	0.0048069	0.0044624	0.0037407	0.0059893
熱間圧延鋼材(電炉)	0.0004632	0.0005198	0.0006181	0.0004518	0.0009524
鋼管	0.0014124	0.0013469	0.0011399	0.0009927	0.0007564
冷間仕上鋼材	0.0010241	0.0011122	0.0015489	0.0009555	0.0030480
めっき鋼材	0.0009495	0.0011045	0.0012611	0.0009203	0.0013292
鑄造品・その他鉄鋼製品	0.0019525	0.0022096	0.0052556	0.0020624	0.0159918
機械	0.0165787	0.0149873	0.0133754	0.0131458	0.0180549
その他製造工業品	0.1082166	0.1502626	0.1718370	0.1305593	0.0793118
建設	0.0208972	0.0214157	0.0249204	0.0184527	0.0511076
事業用電力	0.0573910	0.0704224	0.1450528	0.2316918	0.732954
自家発電	0.0201301	0.0239743	0.0045124	0.0140300	0.0010641
都市ガス	0.0007544	0.0009419	0.0011610	0.0006634	0.0008899
熱供給業	0.0002879	0.0003739	0.0004449	0.0004293	0.0004423
水道・廃棄物処理業	0.0081329	0.0057114	0.0800812	0.0090457	0.3735409
運輸	0.1982855	0.1583637	0.1267653	0.1248112	0.2913615
商業・その他サービス業	0.2695341	0.2650489	0.2771695	0.2477468	0.3161253
その他	0.0501646	0.0545851	0.0449057	0.0397543	0.0221838
合計	2.6915694	3.0020044	2.4054694	2.2119482	2.3466646

逆行列係数表(3)

	鉄鋼製品					
	熱間圧延鋼材(転炉)	熱間圧延鋼材(電炉)	鋼管	冷間仕上鋼材	めっき鋼材	鋳鍛造品・その他
石炭	0.0898035	0.0164611	0.0556837	0.0584563	0.0399811	0.0372987
原油	0.0141775	0.0241868	0.0136736	0.0155656	0.0162384	0.0142025
天然ガス	0.0033733	0.0110118	0.0037480	0.0042687	0.0036634	0.0033792
その他鉱業	0.1256066	0.0218055	0.0692790	0.0748805	0.0458838	0.0363371
石油製品	0.0242892	0.0358996	0.0231323	0.0260939	0.0281766	0.0244047
石灰製品	0.1824441	0.0257131	0.1129271	0.1180132	0.0805963	0.0758607
鉄鉄	0.4094130	0.0369759	0.2242106	0.2415419	0.1425749	0.1109448
粗鋼(転炉)	0.7008470	0.0026090	0.3837559	0.4134408	0.2439671	0.1604077
粗鋼(電炉)	0.0003280	0.6284596	0.0005768	0.0003594	0.0004957	0.0260156
フェロアロイ	0.0416379	0.0574671	0.0228361	0.0245788	0.0145313	0.0129153
鉄屑	-0.0072709	0.1214327	-0.0100305	-0.0102680	-0.0101494	0.0136875
熱間圧延鋼材(転炉)	1.0104337	0.0037420	0.5526128	0.5960668	0.3517241	0.2263640
熱間圧延鋼材(電炉)	0.0004699	1.0058450	0.0004280	0.0005186	0.0007100	0.0119814
鋼管	0.0010939	0.0009655	1.0962179	0.0010578	0.0014754	0.0015254
冷間仕上鋼材	0.0009207	0.0012445	0.0158863	1.0014358	0.5178066	0.1473652
めっき鋼材	0.0009036	0.0010386	0.0228874	0.0014909	1.0018938	0.0420975
鋳鍛造品・その他鉄鋼製品	0.0018484	0.0039005	0.0016187	0.0019024	0.0028033	1.0043031
機械	0.0128706	0.0130001	0.0116447	0.0125110	0.0139777	0.0149758
その他製造工業品	0.1208761	0.1392527	0.1035789	0.1323309	0.2188796	0.1398907
建設	0.0212837	0.0276766	0.0201532	0.0242157	0.0298775	0.0186130
事業用電力	0.0522104	0.1562359	0.0539165	0.0642770	0.0554754	0.0514219
自家発電	0.0246279	0.0032513	0.0162975	0.0178803	0.0147416	0.0077645
都市ガス	0.0008422	0.0050473	0.0017744	0.0022837	0.0041908	0.0019436
熱供給業	0.002986	0.0004437	0.0003203	0.0003182	0.0005060	0.0003340
水道・廃棄物処理業	0.0056191	0.0536849	0.0051447	0.0044339	0.0046863	0.0114012
運輸	0.1251737	0.1034024	0.1019812	0.1191049	0.1312586	0.1070331
商業・その他サービス業	0.2428804	0.2871106	0.2398014	0.2455101	0.2740666	0.2536579
その他	0.0464937	0.0441169	0.0465251	0.0481469	0.0563316	0.0449549
合計	3.2534958	2.8319808	3.1905816	3.2404156	3.2863639	2.6010812

逆行列係数表(4)

	機械	その他製造工業品	建設	事業用電力	自家発電	都市ガス	熱供給業
石炭	0.0045314	0.0045409	0.0030050	0.0261102	0.0004259	0.0694179	-0.0008166
原油	0.0103578	0.0188102	0.0118929	0.0708980	0.0081057	0.1083172	0.0277125
天然ガス	0.0018665	0.0026542	0.0014622	0.0630548	0.0004198	0.0017708	0.1485033
その他鉱業	0.0075336	0.0202593	0.0195727	0.0012208	0.0010125	0.0018206	0.0014232
石油製品	0.0186160	0.0351733	0.0222947	0.0595227	0.0158277	0.2172097	0.0540805
石炭製品	0.0079826	0.0071234	0.0050005	0.0139036	0.0004994	0.0790496	-0.0351651
鉄鉄	0.0131393	0.0102792	0.0084174	0.0012268	0.0006201	0.0020943	0.0009884
粗鋼(転炉)	0.0209641	0.0169563	0.0133994	0.0020386	0.0010065	0.0034721	0.0016157
粗鋼(電炉)	0.0046009	0.0018198	0.0081758	0.0002482	0.0002861	0.0005853	0.0003207
フェロアロイ	0.0017050	0.0011894	0.0015492	0.0001450	0.0000888	0.0002616	0.0001268
鉄屑	-0.0000824	-0.0001584	0.0011835	0.0000079	0.0000278	0.0000467	0.0000229
熱間圧延鋼材(転炉)	0.0300252	0.0243609	0.0192745	0.0029322	0.0014460	0.0049951	0.0023210
熱間圧延鋼材(電炉)	0.0061739	0.0024213	0.0128456	0.0003570	0.0004284	0.0008757	0.0004649
鋼管	0.0053374	0.0083376	0.0078108	0.0005883	0.0004289	0.0010851	0.0006191
冷間仕上鋼材	0.0200847	0.0073095	0.0053934	0.0005864	0.0005404	0.0009394	0.0006947
めっき鋼材	0.0070351	0.0089301	0.0057254	0.0005415	0.0004363	0.0008632	0.0006473
鋳造品・その他鉄鋼製品	0.0402435	0.0165302	0.0080591	0.0013586	0.0009945	0.0020579	0.0016352
機械	1.5248794	0.0214475	0.0457020	0.0094807	0.0095993	0.0143321	0.0104674
その他製造工業品	0.3085577	1.5737777	0.4415446	0.0716978	0.0490674	0.0954295	0.0879497
建設	0.0126352	0.0152113	1.0125683	0.0184242	0.0271356	0.0574709	0.0252269
事業用電力	0.0275816	0.0335210	0.0205162	1.0123383	0.0063126	0.0151888	0.0219768
自家発電	0.0018082	0.0042421	0.0016651	0.0028124	1.0003360	0.0051436	0.0021918
都市ガス	0.0014184	0.0022153	0.0015036	0.0004534	0.0004879	1.0006547	0.0092240
熱供給業	0.0006559	0.0027201	0.0008143	0.0002496	0.0001398	0.0003190	1.0002420
水道・廃棄物処理業	0.0068991	0.0089766	0.0067751	0.0088591	0.0048396	0.0149603	0.0104215
運輸	0.0659349	0.0949167	0.0902396	0.0478160	0.1418799	0.0828970	0.0450612
商業・その他サービス業	0.3138023	0.2923871	0.2699760	0.2353230	0.1718288	0.3212002	0.2504961
その他	0.0673795	0.2795938	0.1035254	0.0260970	0.0235226	0.0371192	0.0429495
合計	2.5316671	2.5155464	2.1498926	1.6782924	1.4677402	2.1395774	1.7114014

逆行列係数表(5)

	水道・廃棄物処理業	運輸	商業・その他サービス業	その他
石炭	0.0095300	0.0012726	0.0010161	0.0019916
原油	0.0167963	0.0534073	0.0114379	0.0163881
天然ガス	0.0006467	0.0015533	0.0010445	0.0011803
その他鉱業	0.0042258	0.0014637	0.0020460	0.0045427
石油製品	0.0332041	0.1057440	0.0217720	0.0316476
石炭製品	0.0039522	0.0013580	0.0011822	0.0031008
鉄鉄	0.0059516	0.0015224	0.0013219	0.0030449
粗鋼(転炉)	0.0088689	0.0025105	0.0021566	0.0049934
粗鋼(電炉)	0.0020620	0.0003457	0.0003644	0.0005155
フェロアロイ	0.0007568	0.0001829	0.0001639	0.0003492
鉄屑	0.0006793	-0.0000004	0.0000049	-0.0000191
熱間圧延鋼材(転炉)	0.0125827	0.0036079	0.0030963	0.0071706
熱間圧延鋼材(電炉)	0.0020704	0.0004860	0.0005070	0.0006581
鋼管	0.0012056	0.0006933	0.0008920	0.0019417
冷間仕上鋼材	0.0067798	0.0017383	0.0011654	0.0026576
めっき鋼材	0.0025866	0.0009797	0.0009710	0.0026657
鑄鍛造品・その他鉄鋼製品	0.0416357	0.0022715	0.0025701	0.0056318
機械	0.0116910	0.0369026	0.0336997	0.0264849
その他製造工業品	0.0919660	0.0966259	0.1385310	0.3118604
建設	0.1208229	0.0179311	0.0158995	0.0093837
事業用電力	0.0081497	0.0239138	0.0157280	0.0170404
自家発電	0.0011896	0.0016037	0.0006389	0.0011519
都市ガス	0.0005204	0.0020420	0.0014399	0.0011243
熱供給業	0.0008315	0.0003471	0.0003331	0.0005764
水道・廃棄物処理業	1.0249115	0.0090545	0.0077543	0.0068571
運輸	0.0394382	1.1484907	0.0558369	0.0763040
商業・その他サービス業	0.2074503	0.3406564	1.0612363	0.2238456
その他	0.0238681	0.0294478	0.0368359	1.1702121
合計	1.6843735	1.8861521	1.4196459	1.9333009

参考文献

- 1) 片桐広貴、佐藤純一、戸井朗人、中村達生：材料とプロセス、10（1997）、255
- 2) 戸井朗人、片桐広貴、中村達生、佐藤純一：鉄と鋼、83（1997）、677
- 3) 平成2年度産業連関表、総務庁他編
- 4) 堂野前等、徳永庸夫：第2回エコバランス国際会議講演集、（1996）、218
- 5) 日刊市況通信、1月1日号（1996）、日刊市況通信社、東京、58
- 6) 日本鉄源協会：鉄源年報（1995）、70
- 7) 坂田直起：第23回白石記念講座、日本鉄鋼協会編、東京、（1992）、19
- 8) 鉄鋼年鑑（平成5年度版）、鉄鋼新聞社編、東京、13
- 9) 鉄鋼統計年報（平成2年版）、通産省編、90
- 10) 中村芳美：東京大学卒業論文（1994）
- 11) 電力中央研究所：電力中央研究所報告、Y95013、（1996）、27
- 12) 外岡豊・本藤裕樹・内山洋司：エネルギー資源学会第16回研究発表会講演論文集、（1997）、169
- 13) 吉岡完治、早見均、池田明由、菅幹雄：イノベーション&I-Oテクニク、3（1993）、31
- 14) 日本鉄源協会：鉄スクラップ処理工程から発生する廃棄物（ダスト）の処理に関する調査報告、（1991）、11

## 第4章 鉄鋼中の不純物蓄積の分析調査

### 4-1 はじめに

鉄のリサイクルは、社会から廃棄された鉄を含む製品等から鉄屑だけを選別し、これを電炉で再溶解することにより実施されているが、鉄屑の分離・分別に当たって不純物を完全に除去することは技術的又は経済的に困難であり、結果として電炉鋼中への銅元素等の不純物蓄積が起きていると言われている。不純物の蓄積は再生利用の障害となりかねず、今後、鉄鋼のリサイクルを促進していくためには、これら不純物蓄積の状況を把握することが不可欠である。そこで、本研究においては、全国のスクラップヤードから各種鉄屑の採取を行ってその成分分析を行い、不純物蓄積の現在の状況を明らかにするとともに、再生処理過程における不純物の混入についても分析調査を行った<sup>1)</sup>。

### 4-2 サンプルの採取及び分析方法

まず、現存する鉄屑中の不純物の蓄積状況について調査するため、1996年9月から1997年2月にかけて全国の約20カ所の鉄屑処理工場、電炉メーカ工場等のスクラップヤードから鉄屑のサンプルの採取を行った。サンプルの採取は、主に電炉鋼から生産される異形棒鋼、形鋼等を主な対象として行った。採取に当たっては、形状や状態の異なるものが偏りなくサンプル中に含まれるように努めた。これら得られたサンプルの成分分析は、錆や塗料を研磨により除いた後、肉厚の薄いものについては全肉厚を通して、厚いものについては肉厚の半分程度までドリルにより穴をあけ切り粉を採取した上で、JISに基づく化学分析法により行った。主にCu及びSnを分析の対象としたが、Crについても相当量のサンプルで分析を行った。シュレッダー処理過程における不純物混入について分析するための鉄屑の溶解実験に際しては、15~20kgのシュレッダースクラップと10kgの成分が既知のピレットを合わせて高周波炉で溶解し、この中から取り出したサンプルに対して発光分光分析を行い、計算によりシュレッダースクラップ中の不純物の成分値を求めた。なお、これとは別に、電炉メーカの協力を得てヘビー屑15トンの溶解実験を行い、得られたサンプルの発光分光分析を行った。採取した鉄屑のサンプルを分析した結果、一般的に主に電炉鋼から生産されて

いると考えられる異形棒鋼や形鋼の中からも高炉鋼から生産されたと思われるものが一定量見つかった。これらについても分析データを得たが、今回はサンプルの数が限られており、我が国で発生する鉄屑全体に占める高炉鋼製品の割合を今回得られたデータから論じることはできない。したがって、今回は電炉鋼から生産されたと考えられる鉄屑のデータを中心として分析調査を行うこととする。

#### 4-3 不純物蓄積の現状

##### 4-3-1 分析結果

採取したサンプルの不純物成分の分析結果を鋼材種ごとに表4-2及び表4-3に示す。異形棒鋼、棒鋼及び形鋼については、電炉鋼と思われるもの及び高炉鋼と思われるもの両方を含めてすべての分析結果を示した。熱間圧延材については、採取したサンプルのうち大部分が高炉鋼から生産されたと思われるものであったため、電炉鋼と思われるものみの分析結果を示した。電炉鋼と思われるもののサンプルの総数は50である。

電炉鋼と高炉鋼の区別はサンプル中のCu濃度により行った。第1章で示したように、電炉鋼中のCu濃度は0.2~0.5%、高炉鋼中については0.02%程度又はそれ以下との報告がなされており、この値を参考として判別した。他に、昭和30年代まで比較的多く生産されていた平炉鋼については、昭和30年頃に生産された平炉鋼の成分分析結果として、Cu濃度0.15~0.2%程度、Sn濃度0.01~0.06%程度という値が報告されている<sup>2)</sup>。また、平炉鋼中のCu濃度を0.13~0.2%程度、Sn濃度を0.01~0.02%程度としている文献<sup>3)</sup>もある。今回採取したサンプルの中に、これらの分析値と比較して平炉法により生産されたのではないかと考えられるものも存在したが、電炉鋼との明確な区別が困難であり、また、平炉鋼も広い意味での再生素材と考えられることから、ここでは電炉鋼から生産されたと考えられるものと区別しなかった。電炉鋼と判定したものでCu濃度が最も低いものは0.11%、高炉鋼と判定したものでCu濃度が最も高いものは0.053%であった。高炉鋼と判定したものは、表4-2及び表4-3中の「形状」の欄にBと記してある。

生産された時期による鋼材中の不純物濃度の違いの検討のため、当該サンプル

が古いものか新しいものかを推測して表中に併せて示してある。サンプルごとに生産された時期を特定することが困難であったため、目視により古いものであるか新しいものであるかの推測を行った。不定形に曲がっているもの、あるいは赤く錆びているものを「古い」と、また、製造時の黒いスケールが残っており、かつ、曲がっていないものを「新しい」と判定した。図4-1及び図4-2に、「古い」及び「新しい」と判定した異形棒鋼のサンプルの例を示す。また、サンプルが得られた建築物の建造年月や鋼材に張られたラベル等から生産時期がある程度分かるものは、おおよその年(昭和)を表中に記した。なお、生産時期が推定されたもののうち最も新しいものは昭和60年頃のものであったが、これを含めて生産時期の推定できたすべてのサンプルを「古い」に分類した。

得られたデータから電炉鋼から生産されたと思われるサンプル全体について平均値を求めたところ、Cu濃度は0.297%、Sn濃度は0.031%、Cr濃度は0.158%と得られた。また、それぞれの濃度の分布の標準偏差は、0.081%、0.020%及び0.075%であった。さらに、標準偏差を平均値で割ることにより変動係数を求めると、Cu、Sn及びCrの濃度分布に関する変動係数は、それぞれ0.27、0.65及び0.48となり、特にSnの分布が大きくばらついていることが明らかとなった。以上の計算結果を、表4-1にまとめて示す。

表4-1 電炉鋼鉄屑サンプル中の不純物濃度

	Cu(%)	Sn(%)	Cr(%)
平均値	0.297	0.031	0.158
標準偏差	0.081	0.020	0.075
変動係数	0.273	0.645	0.475

表4-1 鉄屑成分分析結果(異形棒鋼)

No.	採取地	新旧	Cu (%)	Sn (%)	Cr (%)	形状
1	宮城県	古い	0.396	0.034	0.134	D 1 0
2	宮城県	古い	0.441	0.054	0.17	D 8
3	宮城県	古い	0.209	0.053	0.135	D 2 2
4	宮城県	新しい	0.301	0.034	0.176	D 1 0
5	宮城県	新しい	0.275	0.024	0.236	D 1 0
6	宮城県	新しい	0.233	0.027	0.09	D 2 5
7	栃木県	30年	0.37	0.039	0.16	D 1 3
8	栃木県	30年	0.346	0.115	0.146	D 2 5
9	茨城県	古い	0.314	0.018	0.207	D 1 3
10	千葉県	古い	0.264	0.02	0.149	D 1 3
11	千葉県	新しい	0.384	0.022		D 1 3
12	千葉県	新しい	0.248	0.022		D 1 3
13	千葉県	新しい	0.287	0.025		D 1 3
14	千葉県	新しい	0.394	0.022		D 2 5
15	千葉県	新しい	0.379	0.021		D 2 5
16	東京都	30年	0.281	0.022	0.225	D 1 3
17	東京都	新しい	0.193	0.034	0.238	D 1 3
18	東京都	新しい	0.262	0.023		D 2 5
19	神奈川県	新しい	0.337	0.021		D 1 0
20	神奈川県	古い	0.174	0.06		D 1 3
21	神奈川県	古い	0.202	0.014		D 1 3
22	神奈川県	古い	0.331	0.042		D 1 0
23	愛知県	古い	0.265	0.017	0.164	D 1 6
24	岐阜県	古い	0.286	0.033	0.159	D 1 0
25	岐阜県	古い	0.226	0.021		D 1 6
26	岐阜県	古い	0.216		0.179	D 1 6
27	岐阜県	古い	0.295			D 1 6
28	大阪府	古い	0.323	0.067	0.177	D 1 0
29	大阪府	古い	0.326	0.017	0.193	D 1 3
30	大阪府	古い	0.391	0.044	0.134	D 2 5
31	岡山県	古い	0.175	0.013	0.077	D 1 6
32	広島県	古い	0.462	0.022	0.292	D 2 5
33	千葉県	新しい	0.01	0.002	0.017	D 1 3 B
34	神奈川県	古い	0.01	0.003	0.03	D 1 0 B
35	大阪府	古い	0.008	0.002	0.032	D 8 B
36	大阪府	古い	0.005	0.001	0.02	D 13 B
37	岡山県	古い	0.012	0.003	0.019	D 8 B
38	広島県	古い	0.007	0.002	0.055	D 25 B

表4-2 鉄屑成分分析結果(異形棒鋼以外のもの)

棒鋼						
No.	採取地	新旧	Cu (%)	Sn (%)	Cr (%)	形状
39	栃木県	30年	0.182	0.043	0.023	8φ
40	千葉県	古い	0.153	0.013	0.078	7φ
41	神奈川県	古い	0.441	0.05		9φ
42	神奈川県	古い	0.243	0.045		12φ
43	神奈川県	新しい	0.305	0.02		13φ
44	愛知県	古い	0.274	0.025	0.134	13φ
45	宮城県	古い	0.024	0.002	0.01	12φ B
46	宮城県	古い	0.006	0.001		6×9 B
47	千葉県	30年	0.007	0.002	0.024	9φ B
48	千葉県	古い	0.005	0.001		9φ B
49	神奈川県	新しい	0.006	0.003		6φ B
50	岡山県	古い	0.01	0.002	0.019	18φ B
51	岡山県	古い	0.038	0.004	0.015	18φ B
52	広島県	古い	0.005	0.003	0.04	13×13 B
形鋼						
53	千葉県	古い	0.419	0.057		アングル
54	千葉県	60年	0.39	0.029	0.299	H形鋼
55	千葉県	古い	0.32	0.015	0.145	H形鋼
56	千葉県	古い	0.263	0.071	0.065	アングル
57	千葉県	古い	0.33	0.013	0.312	アングル
58	千葉県	古い	0.11	0.01	0.058	レール
59	神奈川県	古い	0.351	0.037		アングル
60	神奈川県	新しい	0.278	0.021		アングル
61	栃木県	50年	0.053	0.003	0.015	H形鋼 B
62	千葉県	60年	0.02	0	0.037	H形鋼 B
63	広島県	古い	0.008	0.001		アングルB
熱間圧延材						
64	千葉県	古い	0.21	0.014	0.022	厚板
65	神奈川県	新しい	0.31	0.011		厚板
66	広島県	古い	0.323	0.019		厚板
67	福岡県	新しい	0.361	0.019		厚板

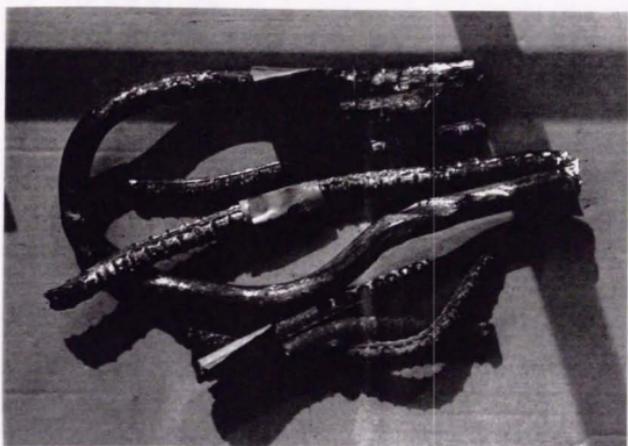


図 4-1 古いと判定したサンプルの例

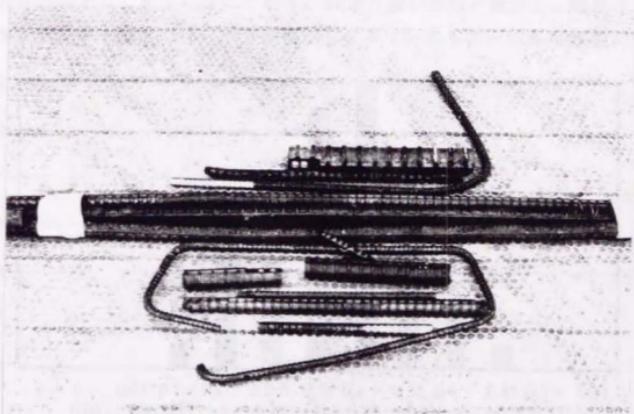


図 4-2 新しいと判定したサンプルの例

#### 4-3-2 不純物濃度の分布

濃度分布についてさらに詳細に検討するため、図4-3～図4-5にCu、Sn及びCrの濃度分布の分布形を示す。Cu及びCrの分布形が比較的きれいな山形を示しているのに対し、Snの分布は広くばらついており、かつなめらかな山形を示していない。この原因について検討を行うため、Snの濃度分布に関するデータを古いサンプルと新しいサンプルとで分け、それぞれの分布形を見た。図4-6及び図4-7に分布形を示す。

これらの図から明らかなように、新しいサンプル中のSnの濃度分布は極めて狭い範囲内に収まっている。一方、古いサンプル中のSnの分布は広い範囲に分散しており、かつ、濃度が高いサンプルも多い。これは、かつてはずメッキを施した缶が多く使用されており、これが電炉鋼生産時のSnの主な発生源となり、原材料である鉄屑中へのはずメッキ缶の投入量の差によって生産される鋼材中のSn濃度に大きなばらつきが生じたことによるものと考えられる。これに対し、現在ではメッキ銅板が主なSnの発生源であるが、これは薄メッキ化の進展により重量当たりのSn使用量も少なく、かつ、近年ではTin free steelの普及に伴いはずメッキ銅板の割合が低下してきていることから、Sn分の高い鉄屑が減少し、結果として新しいサンプル中で濃度のばらつきが減少してきているものと考えられる。

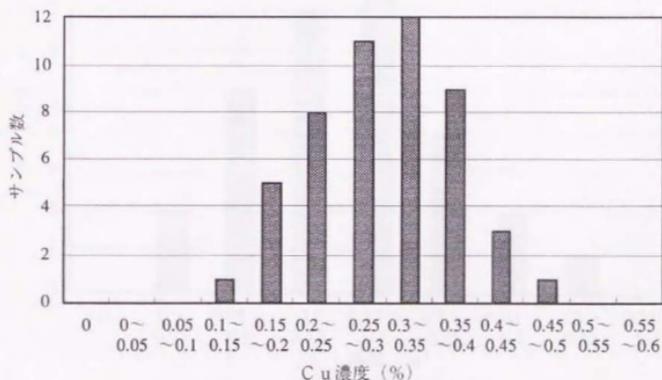


図4-3 Cu濃度の分布（電炉鋼全体）

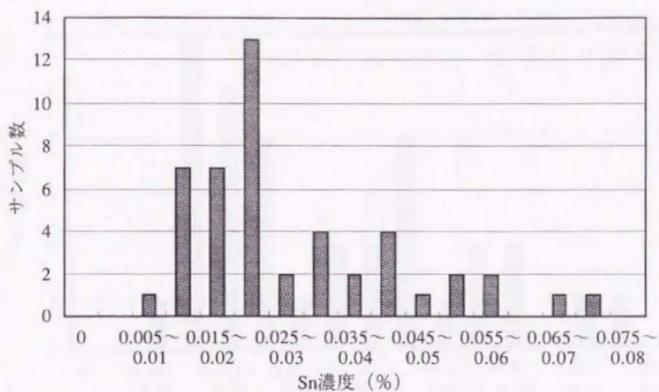


図4-4 Sn濃度の分布 (電炉鋼全体)

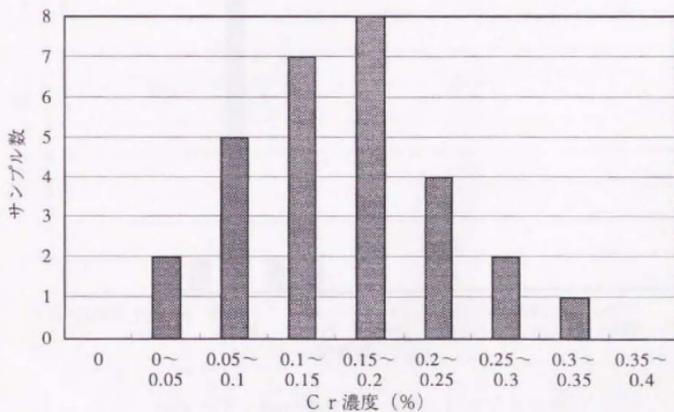


図4-5 Cr濃度の分布 (電炉鋼全体)

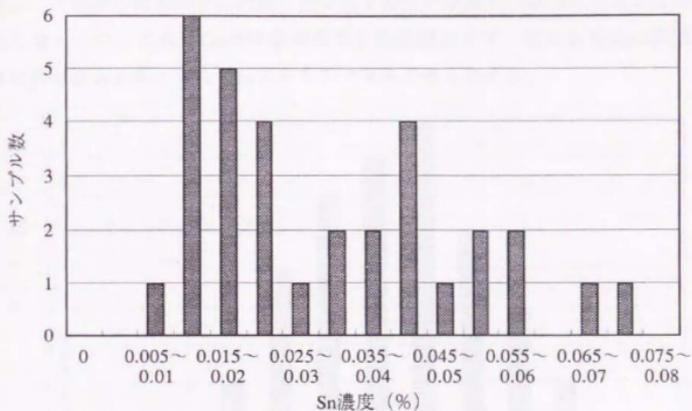


図 4-6 Snの濃度分布 (古いサンプル中)

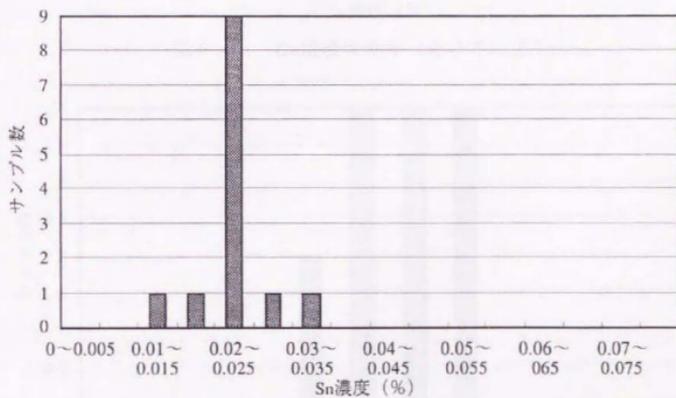


図 4-7 Snの濃度分布 (新しいサンプル中)

これに対し、Cuについては図4-8及び図4-9に示すように古いものと新しいものとで濃度のばらつきの程度に差があるものの分布形にSnほどの大きな差は見られなかった。これはCuが特定の製品を発生源とせず、様々な製品の鉄屑から平均的に混入してくることによるものと考えられる。

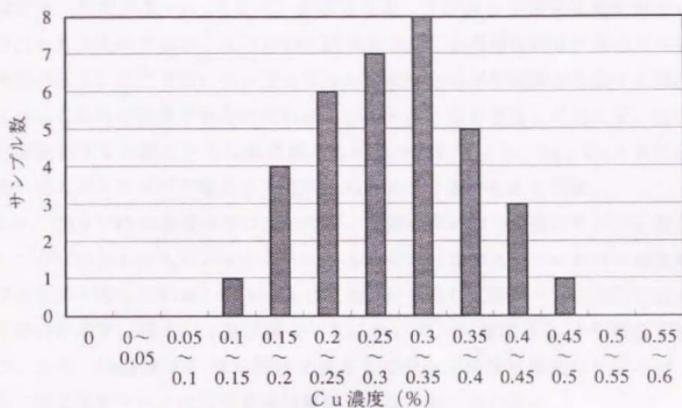


図4-8 Cu濃度の分布 (古いサンプル)

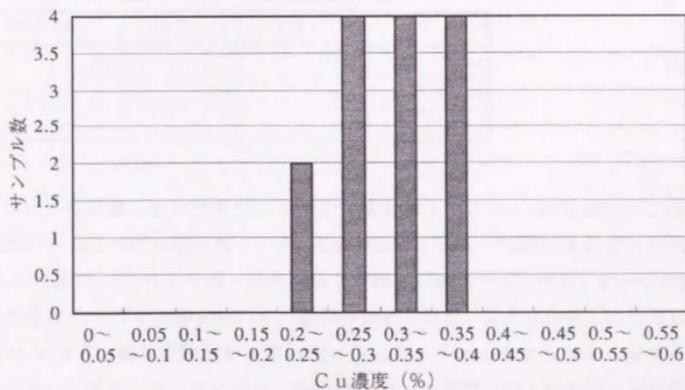


図4-9 Cu濃度の分布 (新しいサンプル)

また、古いサンプルと新しいサンプルとを分けて、Sn濃度とCu濃度の相関を取ったところ、古いサンプルについては両成分の濃度の間に弱い正の相関関係（相関係数0.276）が存在するのに対し、新しいサンプルについてはやや強い負の相関関係（相関係数-0.468）が存在した。すずメッキは通常高炉鋼材に対して行われるものであり、この点からは両者の間に負の相関関係が存在することが予想される。ここで古いサンプルについて弱い正の相関関係が存在する理由としては、これらが生産された時代にはシュレッダー等が普及しておらず、缶プレス材が他のプレス材とともに低級屑として用いられたこと、Sn、Cuともに濃度の高い輸入スクラップが原料として用いられたこと等が考えられる。

また、Cu及びCrの濃度分布についても、濃度の高い側で急速にサンプル数が減少して分布形がくずれているところがある。これは電炉メーカにおける濃度調整によるものと考えられる。表4-4に文献<sup>4)</sup>から得た電炉メーカにおける成分管理目標値を示す。図4-3及び図4-5において、Cu濃度は0.4%程度を境として、また、Cr濃度は0.2%程度を境としてサンプル数が急減しているが、これらの値は電炉メーカの成分管理目標値とほぼ一致している。

表4-4 電炉メーカの不純物元素管理例

不純物元素	A社	B社	C社
Cu (%)	0.35	0.4	0.4
Sn (%)	0.08	0.06	0.04
Cr (%)		0.2	0.3

さらに、電炉鋼と思われるサンプル全体を対象としてCu、Sn及びCrの3成分の濃度間の相互相関を取ったところ、Cu-Sn間及びCr-Sn間にそれぞれ相関係数0.20及び-0.09の弱い相関関係しか認められないのに対し、Cu-Cr間には相関係数0.57の比較的強い正の相関が認められた。これは前述したように、CuとCrが様々な製品の鉄屑から平均的に混入してくることからシュレッダー工程等において混在し易いのに対し、Snがすずメッキ缶等の特定の鉄屑を発生源としていることによるものと考えられる。

#### 4-3-3 生産時期による不純物濃度の違い

古いサンプルと新しいサンプルに分けて、Cu及びSnの濃度の平均値を求めたところ、古いサンプル中のCu濃度は0.294%、Sn濃度は0.035%、新しいサンプル中のCu濃度は0.303%、Sn濃度は0.023%であった。Cu濃度で見ると、新しいサンプルの濃度は古いものよりわずかに高くなっている。しかしながら、棒鋼及び熱間圧延材については、電炉メーカーから出荷後加工が加えられることがあるため、電炉メーカーはこれら鋼材の生産に当たり一般に不純物濃度の低い鉄屑を使用する傾向がある。このため分析の対象とする古いサンプル群と新しいサンプル群が棒鋼及び熱間圧延材をどれだけ含むかで結果が異なってくる恐れがある。そこで、電炉メーカーにおける成分調整が比較的少ないと考えられる異形棒鋼及び形鋼について不純物濃度の平均値を求めたところ、古いサンプル中のCu濃度は0.303%、Sn濃度は0.036%、新しいサンプル中のCu濃度は0.298%、Sn濃度は0.025%であった。このデータを見ると、Cu濃度は古いサンプル中のものが新しいものをわずかに上回っている。Sn濃度はこの場合も相当程度低下している。したがって、今回の調査分析ではリサイクルの実施による時間の推移に伴う電炉鋼中への不純物の蓄積を確認できなかった。ただし、筆者らの研究でも示したように<sup>9)</sup>、不純物濃度が一旦低下した後再び上昇過程にあることも考えられ、今回の結果から電炉鋼中への不純物蓄積が進んでいないと結論づけることはできない。このような点については、鉄屑の生産時期をより正確に把握した上でさらなる検討を行うことが必要と考えられる。なお、Sn濃度が明確な低下傾向を示しているのは、既に述べたようにメッキ時におけるすずの使用量が減少していることによるものであると考えられる。以上の結果をまとめて表4-5に示す。

表4-5 古いサンプルと新しいサンプル中の平均不純物濃度

		Cu(%)	Sn(%)
電炉鋼鉄屑全体	古いサンプル	0.294	0.035
	新しいサンプル	0.303	0.023
異形棒鋼及び形鋼	古いサンプル	0.303	0.036
	新しいサンプル	0.298	0.025

#### 4-3-4 他の研究との比較

スクラップ中の不純物蓄積状況については、現在までにはほかにいくつかの分析調査が実施され公表されているが<sup>(6)(7)(8)(9)</sup>、これら調査は、本研究のように個々の電炉鋼スクラップ中の不純物濃度を計測して生産時期による違いや濃度分布を調査することにより、再生材である電炉鋼中への不純物蓄積の履歴を明らかにしようとするものでなく、高炉鋼及び電炉鋼を含む様々なスクラップをまとめて溶解した場合に得られる溶解物中の不純物濃度の目安を得ることを目的としていると考えられるものが多い。このため、これらにおいてはプレス屑、ヘビー屑といったスクラップの形状に基づく区分ごとについての溶解分析の結果のみが報告されており、また、分析の対象としたサンプルの採取方法・時期やサンプル数、個々のサンプルの形態等に関する情報は公表されていない。なお、これら研究におけるヘビー屑中のCu濃度の分析値はその多くが0.1~0.27%程度の範囲にある。本研究の分析結果を示す表4-2及び表4-3から電炉鋼及び高炉鋼の両方を含むサンプルのCu濃度の単純平均を求めると、異形棒鋼については0.254%、棒鋼については0.121%、形鋼について0.231%となり、上記の他の研究の結果に近いレベルとなる。

なお、電炉メーカーにおいて生産された個々の電炉鋼製品中の不純物濃度については、昭和57~58年に実施された電炉鋼メーカーへのアンケート結果をもとに異形棒鋼中のCu濃度及びSn濃度の平均をそれぞれ0.28%及び0.03%としている報告<sup>10)</sup>があるほか、電炉鋼材の製品種毎の不純物濃度の範囲について表4-6に示すような報告がなされている<sup>9)</sup>。また、特定のメーカーの電炉鋼製品の成分分析例として、Cu濃度を0.25~0.29%としている報告がある<sup>11)</sup>。さらに、近年生産された電炉鋼中のCu濃度については、岩瀬<sup>12)</sup>が0.25%程度としている。これらの値は、本研究で得られた値と矛盾していない。ただし、これらのデータについても、分析を行ったサンプルの数がごく限られているか、あるいは、サンプルの形態、サンプル数、採取方法・時期等に関する情報が十分に明確になっていない。

表4-6 電炉鋼製品中の不純物濃度

		Cu(%)	Sn(%)
電炉鋼	形鋼	0.20~0.35	0.010~0.020
	棒鋼	0.25~0.50	0.015~0.025
	特殊鋼	0.08~0.13	0.004~0.011

#### 4-4 不純物蓄積の許容レベル

鋼材中のCu、Sn等の不純物量をどの程度許容できるかについては鋼材種等により異なるが、片山らは表4-7のような許容レベルの例を示している<sup>6)</sup>。これをもとに考えると、最近生産されたと考えられる電炉鋼中のCu及びSnの平均的濃度は棒鋼類としてはかろうじて許容限度レベルであるものの、形鋼としてはすでに許容限度を超えつつあり、何らかの対策が必要なレベルに達しているといえることができる。

表4-7 各種鋼材のCu及びSn許容レベルの例

鋼種	Cu (%)	Sn (%)
深絞り鋼板	0.06以下	0.01以下
熱延鋼板	0.10以下	0.02以下
形鋼	0.30以下	0.025以下
棒鋼	0.40以下	0.06以下

#### 4-5 シュレッダー処理工程における不純物混入

全国6カ所のシュレッダー処理場からシュレッダースクラップを入手し、シュレッダー処理工程における不純物混入の程度について分析調査を行った。廃家電、廃車、廃自動販売機等様々なものをシュレッダー処理したものを対象とした。まず、シュレッダー処理にかけられる前の製品に使用されている鉄鋼中の不純物量を調べるため、シュレッダースクラップ中の鉄片を取り出して8サンプルについて形鋼等と同様にドリリングにより切り粉を採取して分析を行った。これらサンプルのCu濃度の平均値は0.007%、Sn濃度の平均値は0.001%であった。不純物濃度は極めて低く、いずれも予想される通り高炉鋼製品であることが確認

された。ついで、シュレッダー処理工程における不純物混入について調べるため、処理後のシュレッダースクラップの山の中から15~20kgのスクラップをサンプルとして取り出し、これを高周波炉で溶解して分析した。まず、入念な手選別で銅の配線等をサンプルから除去し、残りのスクラップを溶解して不純物濃度を発光分光分析により計測した後、取り出した配線等の重量から手選別を行わなかった場合の不純物濃度を計算で求めた。結果を表4-8に示す。上段が溶解後の分析結果、下段が手選別を行わない場合の計算値である。下段に値が記されていないものは、配線等が見つからず、したがって手選別を行わなかったものである。平均値は手選別を行わない場合のものである。

全体の平均では、Cu濃度は0.096%であった。不純物が混入する前の鉄片の分析では、Cu濃度は0.007%程度であり、シュレッダー処理工程において機械的あるいは合金等から0.09%程度のCu元素の混入があったこととなる。同様に、Snについては0.015%程度の混入があったこととなる。ただし、今回調査を実施したシュレッダー処理場は、いずれも1000馬力以上の出力の設備を使用している。このような高馬力のシュレッダーはわが国の設備総数の半分以上<sup>13)</sup>であり、これよりも出力の低いシュレッダーで処理を行った場合には破砕能力の限界等からより多くの不純物混入が生じることも考えられる。

他の研究においては、シュレッダー屑の溶解実験で得られるCu濃度は0.23~0.25%程度と報告されているものが多い<sup>4)9)14)15)</sup>。スクラップの破砕・分離方法等の詳細が明らかでないため今回の結果との違いの理由は明確ではないが、ここで述べたようにシュレッダーの出力や廃材の前処理等の差が原因ではないかと考えられる。一方、廃材中に含まれるモーター等の部品の適切な取り扱いや高出力の設備の使用により、今回程度の不純物濃度を達成することは可能であると考えられる。

表4-8 シュレッダースクラップの溶解分析結果 (単位: %)

No.	入手場所	Cu	Sn	Cr	備考
1	東北	0.08	0.006	0.051	廃家電その他
2	北関東	0.09	0.048	0.176	廃家電その他
		0.17			
3	北関東	0.08	0.043	0.402	廃家電その他
		0.14			
4	北関東	0.05	0.007	0.032	廃車
5	南関東	0.05	0.007	0.05	廃車
		0.06			
6	南関東	0.07	0.006	0.155	廃家電その他
		0.08			
7	中部	0.08	0.035	0.753	廃家電その他
		0.14			
8	近畿	0.08	0.006	0.094	廃車
9	近畿	0.1	0.006	0.111	廃車
10	近畿	0.1	0.003	0.05	自販機
11	近畿	0.07	0.006	0.086	廃家電その他
12	中国	0.07	0.006	0.11	廃車
13	中国	0.08	0.027	0.119	廃家電その他
		0.11			
	平均	0.096	0.016	0.168	

#### 4-6 ヘビー屑処理工程における混入

ヘビー屑についても、その処理時における不純物の混入について調査を行うため溶解実験を行った。関東地方のスクラップヤードから、H1、HS1等に分類される良質のヘビー屑を採取して実験を行った。投入する多量の鉄屑の成分分析をすべて行うことは困難であるため、目視により高炉鋼と判別されるヘビー屑のみを原材料として、15トンずつ3回のチャージに分けて電炉での溶融を行い、これの成分分析を行った。結果を表4-9に示す。

表4-9 ヘビー屑溶解分析結果 (単位：%)

No.	Cu	Sn	Cr	Ni	Mn	Zn
1	0.11	0.006	0.133	0.12	0.89	0.001
2	0.09	0.006	0.192	0.15	0.79	0.002
3	0.07	0.005	0.153	0.16	0.85	0.001

Cu濃度は0.07～0.11%となっている。処理前の鉄屑中のCu濃度は明らかではないが、溶解サンプル中のSnの濃度が0.005～0.006%と極めて低い水準にあることから目視での判別通り大部分が高炉銅であったと考えられ、ヘビー屑の溶解工程で少なくとも0.05%程度又はそれ以上のCu元素が混入しているものと考えられる。また、Snについても処理工程で0.003%程度の混入が生じているものと考えられる。

ヘビー屑の場合は、シュレッダースクラップ等のような機械的あるいは合金からの不純物元素の混入が考えにくく、どのようなプロセスでCu、Sn等の混入が生じているかは今回の実験では明らかにすることはできなかった。ただし、実験に協力していただいたメカによると、この程度の不純物の混入が生じるのは一般的であるとのことであり、処理工程で不可避免的に少量の非鉄金属が混入してしまうのではないかと考えられる。

#### 4-7 むすび

(1) 全国のスクラップヤードから採取した鉄屑の成分分析を行ったところ、電炉鋼中のCu、Sn及びCrの濃度の平均値として、それぞれ0.297%、0.0311%及び0.158%を得た。Cu及びCrと比較してSnは濃度分布のばらつきが大きい。これはSnがメッキ缶等特定の製品を発生源としていたためであると考えられる。ただし、近年、電炉鋼中のSn濃度は極めて狭い範囲内に落ち着きつつある。

(2) 目視により生産時期が古いと考えられるサンプルと新しいと考えられるサンプルとを分け、それぞれのCu及びSnの濃度を比較したところ、Cu濃度は古いものと新しいものでほとんど差はなく、また、Sn濃度は相当程度低下してきていることが明らかとなった。

(3) シュレッダースクラップを用いて15~20kgずつの溶解実験を行ったところ、シュレッダー処理工程においてCuは0.09%程度、また、Snは0.015%程度混入したものと推定された。また、ヘビー屑を用いて15トンずつの溶解実験を行ったところ、ヘビー屑処理工程においてCuは0.05%程度又はそれ以上、Snは0.003%程度混入したものと考えられた。しかしながら、鉄屑処理設備の出力や鉄屑のもととなる製品の前処理方法により混入する不純物の割合が大幅に変化する可能性もあり、日本全体の平均的な再生処理過程における不純物混入割合を推定するには更なる調査が必要であるものと考えられる。

参考文献

- <sup>1)</sup> 戸井 朗人、佐藤 純一、加根魯 和宏：材料とプロセス、10 (1997)、995
- <sup>2)</sup> 大竹 正：製鉄研究、223 (1978)、49
- <sup>3)</sup> 最近における平炉製鋼法の進歩、日本鉄鋼協会編、東京、(1955)、395
- <sup>4)</sup> 伊藤 秀夫：表面技術、48 (1997)、6
- <sup>5)</sup> 戸井 朗人、佐藤 純一、片桐 広貴：エネルギー・資源、18 (1997)、92
- <sup>6)</sup> 片山 裕之、水上 義正：まてりあ、35 (1996)、1285
- <sup>7)</sup> 鉄鋼リサイクル白書、日本鉄鋼協会編、東京、(1994)、59
- <sup>8)</sup> 松岡 滋樹：鉄鋼界、2 (1995)、11
- <sup>9)</sup> 金属系素材研究開発センター新製鋼技術研究推進室：JRCMニュース、100 (1995)、10
- <sup>10)</sup> 日本鉄鋼連盟、普通鋼電炉工業会：電炉鉄筋棒鋼の研究、(1987)、2
- <sup>11)</sup> 藤井資也：第27回、28回白石記念講座、日本鉄鋼協会編、東京、(1994)、89
- <sup>12)</sup> 岩瀬 正則：電気製鋼、66 (1995)、20
- <sup>13)</sup> 鉄スクラップ加工処理工程から発生する廃棄物の処理に関する調査報告書、日本鉄源協会編、(1991)、9
- <sup>14)</sup> 坂田直起：第23回白石記念講座、日本鉄鋼協会編、(1992)、24
- <sup>15)</sup> 根岸秀光：材料とプロセス、6 (1993)、968

## 第5章 鉄鋼のリサイクルへのモデルの適用

### 5-1 はじめに

本章では、第3章及び第4章で得た環境負荷及び不純物蓄積に関するデータ並びに既存の統計資料等のデータをもとに、第2章で導いたモデル式を鉄鋼のリサイクルシステムへ適用する。鉄鋼の場合には、そのプロセスの特徴から言って、高炉鋼を新たな素材、電炉鋼を再生素材と考えることができる。

### 5-2 廃棄率が一定の場合のモデル

本節では、2-2で導出した社会の素材ストックからの廃棄率が一定の場合のモデル式を鉄鋼に適用する。

#### 5-2-1 鉄鋼のストック及びフロー

(1) モデル式の適用に当たり、鉄鋼のリサイクルシステムに関するパラメータは以下のように設定した。

a) 社会における今後の鉄鋼ストックの増加率は、1991～93年の平均値を取り、 $r=3.5\%$ とした。我が国の鉄鋼ストックの量は1993年において約10.6億トンと推計されており<sup>1)</sup>、その後の増加を考え1995年( $t=0$ )において11億トンと設定した。

b) 1965年から94年までの我が国粗鋼生産量のうち高炉鋼(平炉鋼を含む。)は約75%を、電炉鋼は約25%を占めている<sup>2)</sup>。このうち電炉鋼は、主に同じ期間に生産された高炉鋼並びに1964年以前に先産された高炉鋼及び電炉鋼のうち廃棄されたものから生産されたものと考えられる。電炉鋼約25%のうち1964年以前に生産された鉄鋼を原料とするものがどの程度あるのか定かではないが、ここでは5%と考え、残りの20%は同じ期間に生産された高炉鋼が廃棄されたものと考え、1965年以降の30年間に生産された高炉鋼のうち現在残っているものは約55%となる。一方、電炉鋼は大部分現在も残っていると考えると、現在の鉄鋼ストック中の電炉鋼は、約30%、すなわち約3.3億トンと推計される。

c) 我が国における鉄鋼のスクラップ発生率(廃棄された鋼材のうち回収され

たもの)は鉄鋼ストックの約2.7%で推移してきている<sup>3)</sup>。一方、老廃くずの回収率は、鉄を使用する代表的製品に対する業界団体の調査では84.6%となっている<sup>4)</sup>が、調査の範囲外で回収率の低いものもあると考えられ、実際にはこの値より低いものと考えられる。以上より、ここでは回収率  $b=80\%$ 、社会からの素材の廃棄率  $a=3.5\%$  とする。また、加工くず発生率は、1993年度のデータ<sup>5)</sup> (鋼材国内出荷量7230万トン、加工くず発生量710万トン) から、10%と設定する。

(2) 以上の設定値の下で(2.9)式を用いて算出した鉄鋼のストック全体に占める電炉鋼の割合の時間変化を図5-1に示す。(2.10)式から鉄鋼ストック中に占める電炉鋼の割合は46%に収束していくことが分かる。

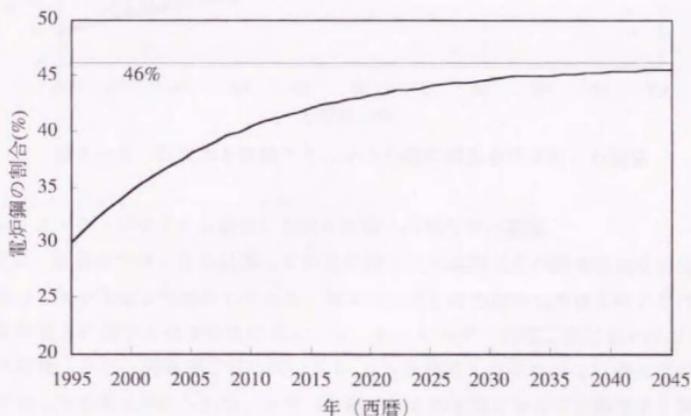


図5-1 鉄鋼ストック中の電炉鋼の割合の推移

また、(2.11)式から単位時間に生産される全粗鋼に占める電炉鋼の割合は一定で約4.3%と算出される。我が国の国内向け粗鋼生産量に占める電炉鋼の生産割合は近年4.1~4.2%程度となっており、推計値とほぼ一致する。次に、回収率が変化した場合の鉄鋼ストック中の電炉鋼割合の収束値の変化を、種々のストック増加率  $r$  の値に対して(2.10)式により計算した結果を図5-2に示

す。ストック増加率が低下すると、回収率上昇に伴う電炉鋼ストック割合の収束値の増大がより急激になることが分かる。

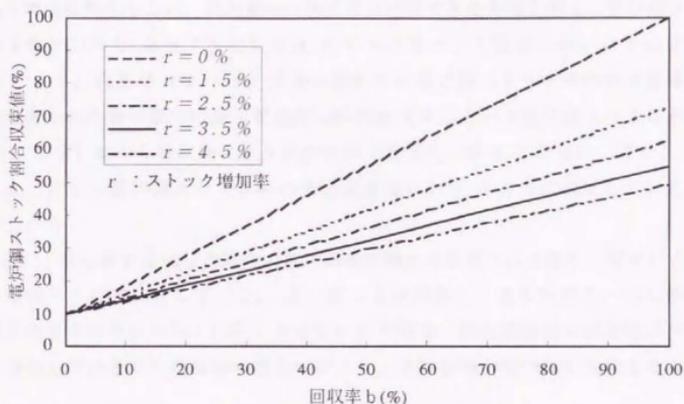


図5-2 回収率と鉄鋼ストック中の電炉鋼割合収束値との関係

### 5-2-2 リサイクル過程における鉄鋼への銅元素の蓄積

次に、鉄鋼のリサイクルに際しての電炉鋼中の不純物元素の濃度増加を銅元素に着目しモデルにより推計してみる。第4章に示した鉄屑再生処理工程における不純物混入に関する調査分析においては、シュレッダー処理工程において0.09%程度、ヘビー屑処理工程において0.05%程度又はそれ以上の銅元素の混入が生じたものと考えられた。一方、生産される再生素材中の不純物濃度を推計する式である(2.1.9)式をもとに、最近生産されたと考えられる電炉鋼中の銅元素濃度が約0.3%であることから、前述のパラメータを用いて銅元素の混入率 $g$ を求めると、 $g$ は0.25%と推計される。第4章でも述べたように、今回の調査において実験的に得た不純物混入率は、比較的好条件下で破碎・分離が行われたと考えられるものが中心であり、全国平均の混入率とは値が異なっている可能性が高いことから、以降の推計においては、銅元素の平均的混入率 $g$ としては推計式により得られた0.25%をベースとしつつ、これより高いケース及

が低いケースについても検討を行うこととする。また、現時点での鉄鋼ストック中の銅元素蓄積量については、鉄屑（電炉鋼）のサンプルに対して行われた銅元素濃度の測定値0.297%及び高炉鋼中の銅元素濃度の測定値0.01%程度という調査結果をもとに、高炉鋼中の銅元素は無視できるものと考え、電炉鋼ストック3億トンの0.297%として0.0098億トンと仮定した。以上に基づき(2.16)式及び(2.19)式から推計した電炉鋼ストック中の銅元素濃度及び生産される電炉鋼中の銅元素濃度の時間変化を図5-3及び図5-4に示す。(2.17)式から全鉄鋼ストック中の銅元素濃度は約0.17%に、また、(2.18)式から電炉鋼ストック中の銅元素濃度は約0.36%に収束していくことが分かる。

次に、回収率が変化した場合の電炉鋼中の銅元素濃度の収束値を、種々のストック増加率 $r$ の値に対して(2.18)式により計算した結果を図5-5に示す。回収率を今後80%以上に向上させていった場合、銅元素濃度の収束値は一層急激に増加していき、その増加の割合はストック増加率が低いほど大きくなっている。

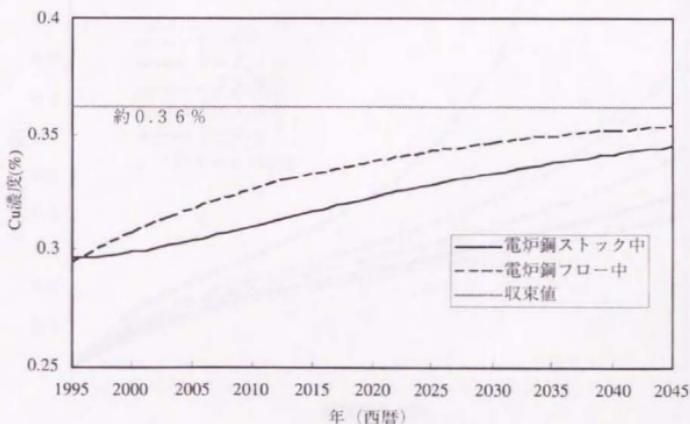


図5-3 電炉鋼のストック中及びフロー中のCu濃度の推移 ( $g=0.25\%$ )

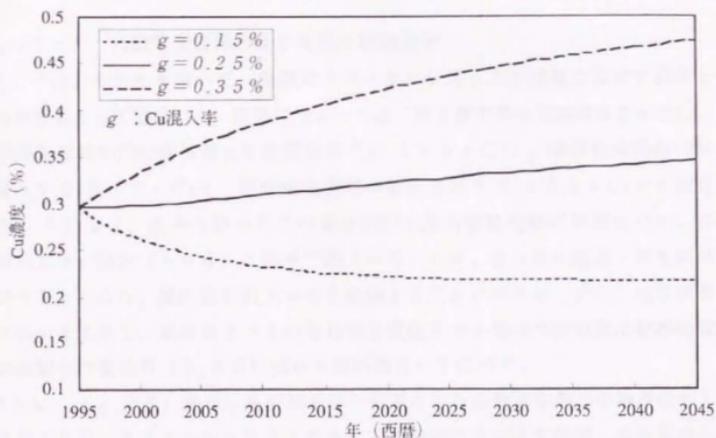


図5-4 電炉鋼ストック中のCu濃度の推移 ( $g$ を変化させた場合)

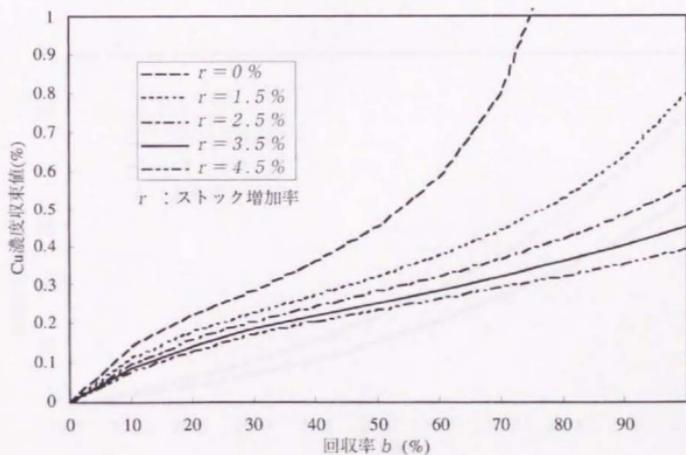


図5-5 回収率と電炉鋼中の銅元素濃度収束値との関係 ( $g = 0.25\%$ )

### 5-2-3 二酸化炭素排出量から見た環境負荷

ここでは、モデルを用いて、鉄鋼のリサイクルシステムが環境に及ぼす負荷をCO<sub>2</sub>発生量として推計した。推計に当たっては、第3章で得られた結果をもとに、高炉鋼生産時のCO<sub>2</sub>排出量 $p_1$ を炭素換算で0.458 t C/t、鉄鋼投棄過程の排出量 $p_2$ を0.013 t C/t、電炉鋼生産時の排出量 $p_3$ を0.136 t C/tと設定した。(2.21)式から求めたこの場合のCO<sub>2</sub>排出量累積値の時間変化を、再生利用しない場合( $b=0$ )と併せて図5-6に示す。80%の回収・再生利用を行うことにより、排出量の約29%を削減することができる。また、回収率を80%のままとし、素材ストックの増加率を変化させた場合のCO<sub>2</sub>排出量累積値の削減割合の変化を(2.22)式から求め図5-7に示す。

さらに、(2.27)式から高炉鋼の再生利用を含む全使用期間の平均値は約14.3年となり、リサイクルシステムにおける高炉鋼の単位使用期間・単位量当たりのCO<sub>2</sub>排出量 $\bar{h}$ は(2.28)式から約7.2 kgC/t・年となる。これに対し、廃棄鋼回収率が90%に上昇した場合には、約6.0 kgC/t・年となる。

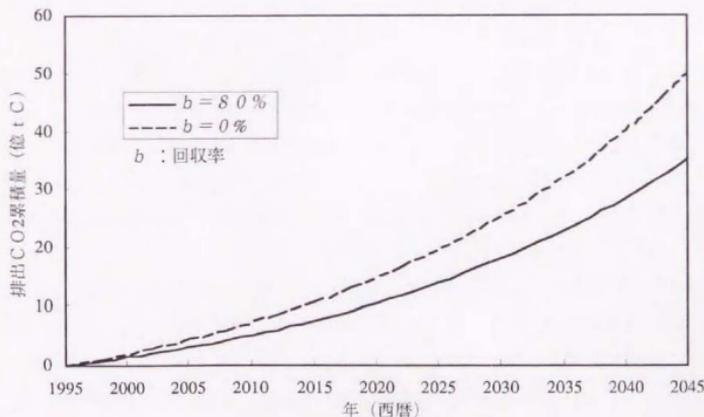


図5-6 今後排出されるCO<sub>2</sub>の累積量

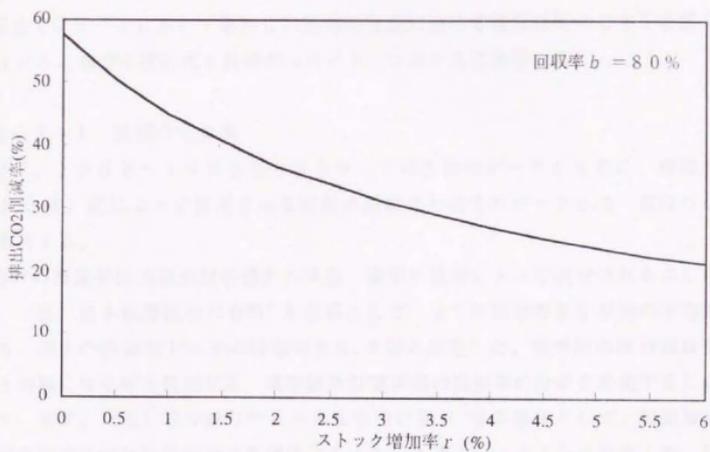


図5-7 鉄鋼ストック増加率とリサイクルによるCO<sub>2</sub>削減率との関係

### 5-3 素材の使用期間の分布を考慮したモデル

本節では2-3において導出した素材の社会における使用期間の分布を考慮したモデルに基づく推計式を鉄鋼のリサイクルシステムに適用する。

#### 5-3-1 鉄鋼の廃棄率

まず、1968～1993年のスクラップ発生量のデータをもとに、理論式(2.34)式によって算出される鉄鋼の廃棄率と過去のデータとの一致について検討する。

素材の廃棄率は当該素材の過去の生産・蓄積の履歴によって決定されることから、(社)日本鉄源協会の資料<sup>1)</sup>を参考として、93年以前の25年間の平均を取り、過去の鉄鋼ストックの増加率を5.7%と設定した。廃棄材の回収率は前節と同様に80%と仮定する。高炉鋼及び電炉鋼の廃棄率の分布を決定するに当たり、まず、(社)日本鉄リサイクル工業会の資料<sup>4)</sup>等を参考として、用途毎の鉄鋼の廃棄までの使用期間の最頻値(モード)を表5-1のように設定した。電炉鋼は主として建築・土木関係に、高炉鋼は主として機械・システム関係に使用されている。これをもとに用途毎の鉄鋼使用量を考慮して加重平均を求めると、高炉鋼の使用期間のモードとして12.7年、電炉鋼の使用期間のモードとして26.9年が得られた。

ついで高炉鋼について、その用途の中心は機械類であることから、使用期間の分布の変動係数を2-3においてガンマ分布により近似した自動車の場合の0.26と同じであると仮定し、ガンマ分布のパラメータとモード等の関係から、高炉鋼について $\alpha_1 = 14.68$ 及び $\lambda_1 = 1.08$ と算出した。電炉鋼については、その用途の中心は建築・土木であるが、建築物等に関する存在期間の分布データを手でできなかったため、ここでは、廃棄率の累積値の9番目の10分位数がモードの2倍(54年)であると仮定し、 $\alpha_2 = 5$ 及び $\lambda_2 = 0.149$ と算出した。

以上で求めたパラメータを用いてガンマ分布により近似した高炉鋼及び電炉鋼それぞれの廃棄率の分布形を示すと図5-8の通りとなる。高炉鋼は比較的短い期間に集中的に、電炉鋼は長期間にわたり分散して廃棄される形となっている。

表5-1 鉄鋼の用途毎投入量と使用期間

	用途	構成比	使用期間 $t \rightarrow t'$ (年)
電炉鋼	建築	21%	25
	土木	8%	35
	その他建設用	6%	30
	その他	3%	12
高炉鋼	建築・土木	11%	25
	産業機械用	8%	10
	電気機械用	5%	14
	家庭用・業務機器用	2%	12
	船舶用	4%	12
	自動車用	22%	9
	鉄道車両用等	1%	20
	容器用	3%	1
	その他	5%	12
	計		100%

注：構成比は94年度の鉄鋼連盟データをもとに推計

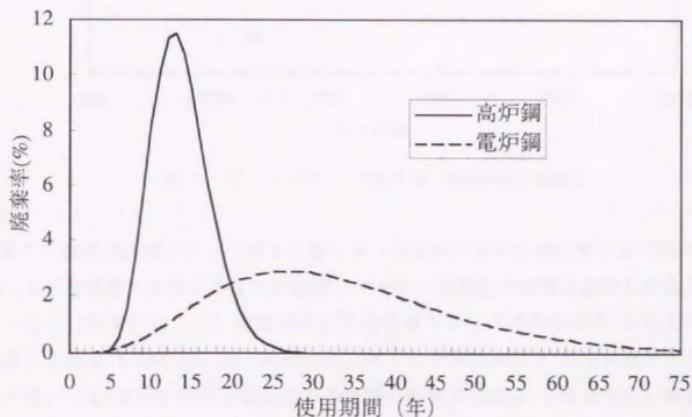


図5-8 ガンマ分布により表した高炉鋼及び電炉鋼の廃棄率

以上のような廃棄率の分布をもとに(2.34)式により鉄鋼ストック全体の廃棄率及びスクラップ発生率(廃棄率に回収率をかけたもの。)を算定すると、それぞれ約3.6%及び2.9%となる。スクラップ発生率の計算値を実績値と比較した結果を図5-9に掲げる。同図において、推計値は過去のデータに比較的近い値を示している。なお、最近実績値が推計値よりやや小さくなっているが、その原因としては鉄鋼を使用する製品の寿命が近年伸びてきていること等が考えられる。

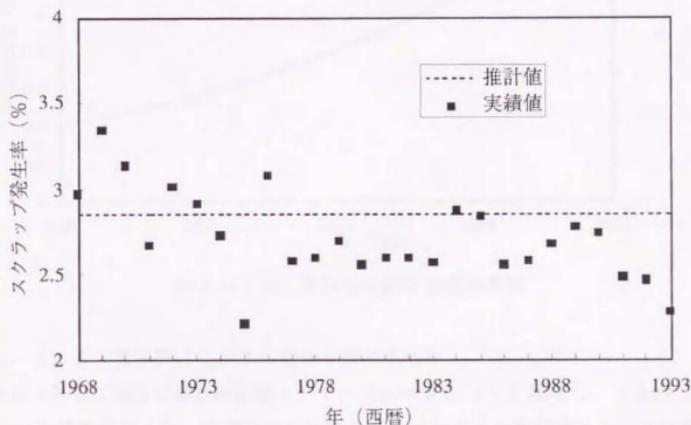


図5-9 スクラップ発生率(推計値と実績)

また、現在の鉄鋼ストックを11億トン、今後のストック増加率を3.5%と仮定して、廃棄率と鉄鋼ストックとの積、すなわち廃棄量の推移を推計した値を図5-10に示す。ここで、廃棄率としては鉄鋼ストック増加率が5.7%として計算した約3.6%を用いた。実際には、ストック増加率が3.5%に低下した場合には、(2.34)式から推計される鉄鋼の廃棄率は約3.7%となり、長期的にはこの値に近づいていくものと考えられるが、廃棄率は過去の生産・蓄積の履歴により決定されること及びストック増加率が変化しても廃棄率の推計値に大き

な差がないことから、ここでは廃棄率を約3.6%として推計してある。1995年において約40百万トンの鉄鋼廃棄量は、2005年には約57百万トンに、2015年には約81百万トンへと増加するものと推計される。

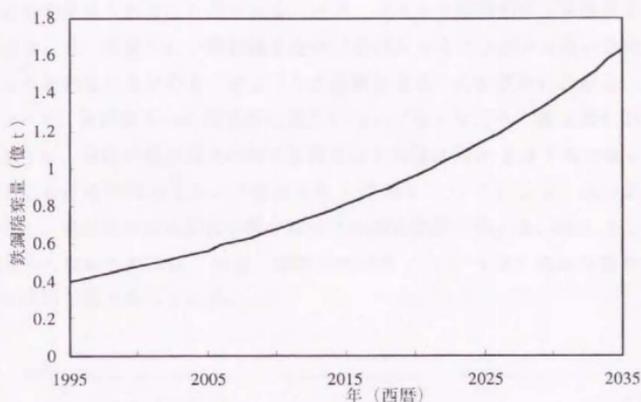


図5-10 今後の鉄鋼廃棄量の推移

### 5-3-2 電炉鋼ストックの割合と銅元素濃度

前節と同様に過去の我が国鉄鋼ストック増加率を5.7%と設定し、(2.47)式により試算を行うと、我が国の全鉄鋼ストックに占める電炉鋼ストックの割合は約41%と推計される。また、異なるストック増加率と回収率に対応する全鉄鋼ストック中の電炉鋼ストック割合の計算値を図5-11に示す。回収率の増加が鉄鋼全体の廃棄率を低下させるため、電炉鋼ストック割合の増加は回収率の増加に比例していない。また、フローについて、単位時間に生産される全粗鋼に占める電炉鋼の割合は、近年の我が国鉄鋼ストックの増加率3.5%を用いて(2.50)式により推計すると約41%となる。我が国の国内向け粗鋼生産量に占める電炉鋼の生産割合は近年41~42%程度となっており、推計値とはほぼ一致する。

異なるストック増加率と回収率に対応したフローベースでの全鉄鋼生産量中の

電炉鋼割合を(2.50)式により算定し図5-12に示した。今後、社会が供給される粗鋼のうちどの程度の割合まで電炉鋼を許容するかは明らかではないが、現在レベルよりやや多い50%程度と仮定すると、現状をやや下回る3%のストック増加率であれば、90%以上にまで回収率を上げたとしても生産された電炉鋼を社会が受け入れることができる。一方、ストック増加率が1%程度まで低下した場合には、生産された電炉鋼を社会が受け入れることができないため、回収率を60%程度にまで引き下げるが必要となることが図から分かる。

ついで、電炉鋼中への銅元素の混入について推計を行う。第4章において示したように、現在の電炉鋼中の銅元素濃度の平均値は約0.297%となっている。過去における平均的ストック増加率を5.7%として(2.55)式により計算を行うと、過去における鉄屑の再生過程での銅元素混入率 $g$ は、約0.25%であったものと推計される。これは、前節において、(2.19)式から推計したものとほぼ同じ値となっている。

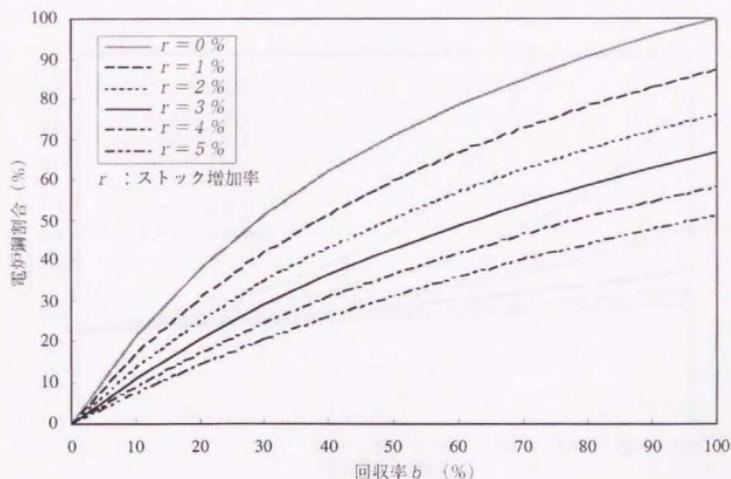


図5-11 回収率、ストック増加率と鉄鋼ストック中電炉鋼割合の関係

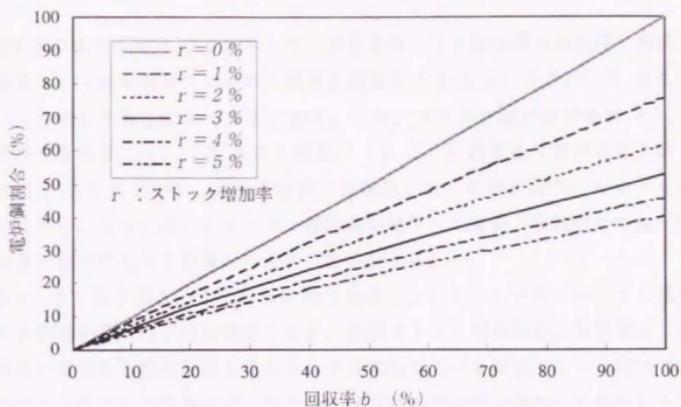


図 5-12 回収率、ストック増加率と鉄鋼の全生産量に占める電炉鋼割合の関係

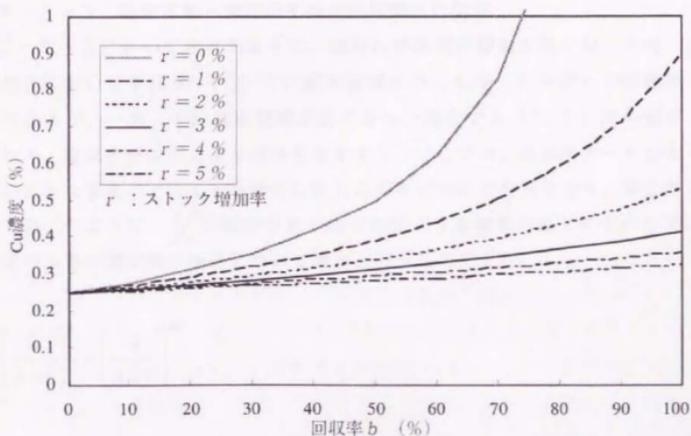


図 5-13 回収率、ストック増加率と電炉鋼ストック中及びフロー中の銅元素濃度の関係

銅元素の混入率を0.25%として、異なるストック増加率と回収率に対応する電炉鋼ストック中及びフロー中の銅元素濃度を(2.55)式及び(2.56)式により算定した値を図5-13に示す。今後、ストック増加率が現状の3.5%で推移する場合には、(2.55)式及び(2.56)式により算出される銅元素濃度約0.35%となり、銅元素濃度は長期的にはこの値に近づいていくものと考えられる。また、図からストック増加率が低下した場合、回収率の増加が銅元素濃度に極めて大きな影響を与えることが分かる。

図5-12及び図5-13をあわせて見ることにより、フローベースの電炉鋼割合及び電炉鋼中の不純物濃度ともに、鉄鋼ストック増加率が2%程度を下回ると急激に増加する傾向を示しており、今後社会における鉄鋼ストック増加率がこの程度まで低下した場合には、社会が生産される電炉鋼を量的にも質的にも受け入れることができず回収率を向上させることが困難となり、場合によっては回収率を引き下げることが必要となる恐れがある。

### 5-3-3 廃棄率等と素材の平均使用期間との関係

2-3-3において述べたように、素材の平均使用期間が長くなった時、多くの場合において下に示す(5.1)式の値は小さくなり、したがって廃棄率は小さくなるが、一方、平均使用期間が長くなった場合でも(5.1)式の値が大きくなり、廃棄率が大きくなる場合も存在する。ここでは、具体的データをもとにこのような事象がどのような場合に生じるのかについて分析を行う。第2章において述べたように、 $\lambda/r$ の値が小さい方がこのような事象は生じやすいので、 $\lambda$ の値の小さい電炉鋼の場合について検討を行うこととする。

$$\left(\frac{\lambda}{\lambda+r}\right)^{\alpha} = \left(\frac{\lambda}{\lambda+r}\right)^{\lambda E} \dots (5.1)$$

ストック増加率  $r$  を現状レベルである3.5%で一定として、(5.1)式により算定される値が現状の電炉鋼平均使用期間とガンマ分布のパラメータ  $\lambda$  を組み

合わせた場合と同じになる $\lambda_2$ と $E_2$ の組み合わせを求めると、図5-14に示すグラフのようになる。

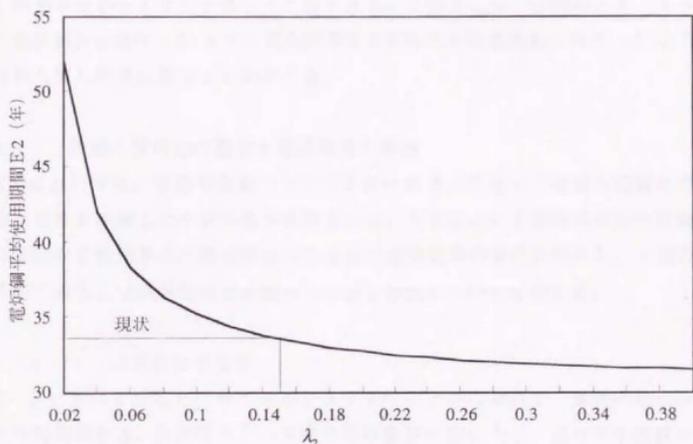


図5-14 (5.1)式の値が現状と等しくなる電炉鋼平均使用期間 $E_2$ と $\lambda_2$ の組み合わせ。

同图中的のグラフの右上の領域は(5.1)式の値が現状より小さくなる組み合わせであり、また、左下の領域はこの値が現状より大きくなる組み合わせとなっている。したがって、 $\lambda_2$ と $E_2$ の値が変化して(5.1)式の値が大きくなるのは両者の値の組み合わせを表す点がグラフの左下の領域に移動した場合であり、現状からの変化を考えると、電炉鋼の平均使用期間 $E_2$ の長期化に対して $\lambda_2$ が相当程度減少するに限られる。 $\lambda_2$ は電炉鋼の使用期間の平均値の分散に対する比率を表しており、この値の低下は使用期間の平均値に対して分散が相対的に増加していることを示している。例えば、図5-14において、電炉鋼の平均使用期間 $E_2$ が現状に比べて1年間長くなった場合に(5.1)式の値が現状より大きくなるためには、 $\lambda_2$ は現状の0.149から約0.115又はそれ以下へと20%以上減

少することが必要となる。実際には、素材の使用期間の平均値がわずかに変化した場合にその分散がこのように大幅に変化することは考え難く、したがって、ほとんどの場合において素材の平均使用期間の長期化は(5.1)式の値を小さくし、廃棄率を小さくすると言うことができる。このことは、全素材ストック中の再生素材割合を表す(2.47)式及び再生素材中の不純物濃度を表す(2.55)式に関しても同様に言うことができる。

#### 5-4 鉄鋼の質劣化の抑制と環境負荷の削減

本節においては、前節で鉄鋼のリサイクルへの適用を行った素材の廃棄までの期間の分布を考慮したモデル及び式をもとに、社会における素材の寿命や廃棄素材の回収率を変化させた場合の素材の質及び環境負荷の変化を分析し、一定の素材の質を確保しつつ環境負荷を減らしていく方策について検討する。

##### 5-4-1 分析に必要な式

2-3において示したリサイクルシステムのモデルにおいて、素材の社会からの平均的廃棄率 $a$ 、全素材ストック中の再生素材の割合 $S_n/S_t$ 及び再生素材中の不純物濃度 $f_n/S_n$ は、以下の式によって表すことができる。

$$a = \frac{r \left( \frac{\lambda_1}{r + \lambda_1} \right)^{\alpha_1}}{1 - (1-b) \left( \frac{\lambda_1}{r + \lambda_1} \right)^{\alpha_1} - b \left( \frac{\lambda_2}{r + \lambda_2} \right)^{\alpha_2}} \quad \dots (2.34) \quad (r \neq 0 \text{ の場合})$$

$$a = \frac{1}{(1-b) \frac{\alpha_1}{\lambda_1} + b \frac{\alpha_2}{\lambda_2}} \quad \dots (2.35) \quad (r = 0 \text{ の場合})$$

$$\frac{S_n}{S_t} = \frac{ab}{r} \left\{ 1 - \left( \frac{\lambda_2}{r + \lambda_2} \right)^{\alpha_2} \right\} \quad \dots (2.47) \quad (r \neq 0 \text{ の場合})$$

$$\frac{S_r}{S_i} = \frac{b \frac{\alpha_2}{\lambda_2}}{(1-b) \frac{\alpha_1}{\lambda_1} + b \frac{\alpha_2}{\lambda_2}} \quad \dots (2.49) \quad (r=0 \text{ の場合})$$

$$\frac{f_i}{S_r} = \frac{g}{1-b \left( \frac{\lambda_2}{r+\lambda_2} \right)^{\alpha_1}} \quad \dots (2.55)$$

ここで、素材の寿命が変化した場合の分析を行うに当たって、使用期間が異なる場合でも新たな素材及び再生素材の廃棄率の分布の形は相似であり、従って変動係数は変化しないものとする。この時、新たな素材及び再生素材の平均使用期間をそれぞれ  $E_1$  及び  $E_2$ 、変動係数を  $x_1$  及び  $x_2$  とすると、上記の (2.34) ~ (2.55) 式は以下のように書き換えることができる。

$$a = \frac{r \left( \frac{1}{rE_1 x_1^2 + 1} \right)^{Y_{s_i}}}{1 - (1-b) \left( \frac{1}{rE_1 x_1^2 + 1} \right)^{Y_{s_i}} - b \left( \frac{1}{rE_2 x_2^2 + 1} \right)^{Y_{s_i}}} \quad \dots (5.2) \quad (r \neq 0 \text{ の場合})$$

$$a = \frac{1}{(1-b)E_1 + bE_2} \quad \dots (5.3) \quad (r=0 \text{ の場合})$$

$$\frac{S_r}{S_i} = \frac{ab}{r} \left\{ 1 - \left( \frac{1}{rE_2 x_2^2 + 1} \right)^{Y_{s_i}} \right\} \quad \dots (5.4) \quad (r \neq 0 \text{ の場合})$$

$$\frac{S_r}{S_i} = \frac{bE_2}{(1-b)E_1 + bE_2} \quad \dots (5.5) \quad (r=0 \text{ の場合})$$

$$\frac{f_i}{S_r} = \frac{g}{1-b \left( \frac{1}{rE_2 x_2^2 + 1} \right)^{Y_{s_i}}} \quad \dots (5.6)$$

ただし、
$$x_i = \frac{\sqrt{V_i}}{E_i} = \alpha_i^{-1/2} \quad (i=1,2) \quad \text{ここで } V \text{ は分散を表す。}$$

また環境負荷の指標としてCO<sub>2</sub>をとると、図2-2のようなりサイクルシステムから排出されるCO<sub>2</sub>の過去から  $t$  時点までの累積量は以下ようになる。

$$H_t = \int_{-\infty}^t dH_t = \frac{S_0}{r} \left\{ p_1(a+r-ab) + p_2a(1-b) + p_3ab \right\} e^{rt} \quad \dots (2.58)$$

以上の式をもとに、回収率及び素材の使用期間が異なる社会における環境負荷や素材の質的劣化を定量的に評価することが可能となる。

#### 5-4-2 鉄鋼への適用

前節までと同様に、鉄鋼について現在 ( $t=0$ ) の鉄鋼ストック量を約11億トン、今後の年間当たりのストック増加率  $r$  を3.5%、使用後廃棄された鉄の回収率を80%と設定する。再生過程における平均的な銅元素混入率を0.25%と仮定する。また、高炉鋼及び電炉鋼の社会での使用期間の分布に関する変動係数は、前節と同様にそれぞれ0.261及び0.447とする。さらに各プロセスからのCO<sub>2</sub>排出量についても、前節までと同様に  $p_1$  を0.458 tC/t、 $p_2$  を0.013 tC/t、 $p_3$  を0.136 tC/tと設定した。

以上の設定値をベースとし、高炉鋼の平均使用期間  $E_1$ 、電炉鋼の平均使用期間  $E_2$  及び回収率  $b$  をパラメータとして変化させた場合のCO<sub>2</sub>累積排出量、全鉄鋼ストック中の電炉鋼割合及び電炉鋼中銅元素濃度の変化を見る。ただし、(2.58)式から算定されるCO<sub>2</sub>累積排出量  $H_t$  は時間とともに変化するため、パラメータを変化させた場合と現状のままの場合との比  $H_t/H_p$  を取り、CO<sub>2</sub>排出量の削減率を指標として用いることとする。なお、ストック増加率  $r$  が0の場合(2.58)式は発散するが、(2.57)式から  $r$  が0の場合の任意の期間  $T$  におけるCO<sub>2</sub>累積排出量を  $\{(p_1+p_2)a(1-b)+p_3ab\}S_0T$  と求めることができる。 $r$  が0の場合にはこの式を用いて  $r$  が0でない場合と同様にCO<sub>2</sub>排出量の比を取ることにする。

### 5-4-3 パラメータを変化させた場合の分析結果

まず他のパラメータを現状のままに固定し、高炉鋼の平均使用期間  $E_1$  を変化した場合のそれぞれの項目の変化を (5.2) 式、(5.4) 式、(5.6) 式及び (2.58) 式により計算した結果を図 5-15 に示す。

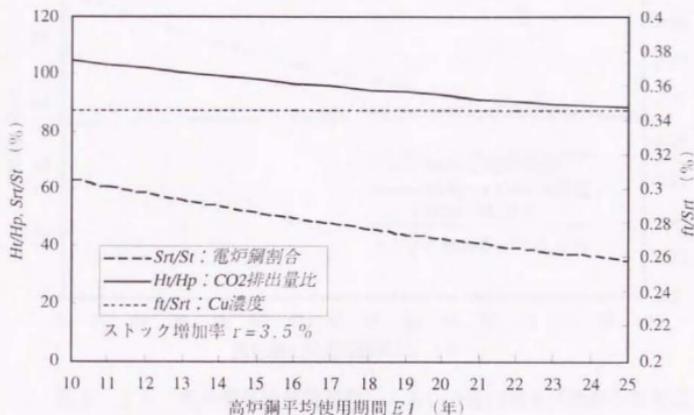


図 5-15 高炉鋼平均使用期間による  $CO_2$  排出量及び鉄鋼の質的变化

平均使用期間が長くなるにしたがい  $CO_2$  排出量比が低下していくとともに、ストック中の電炉鋼の割合も低下してきている。一方、高炉鋼の使用期間の長期化は電炉鋼中の銅元素濃度には影響を与えない。したがって、高炉鋼の使用期間の長期化は、素材の質の劣化を引き起こすことなく環境負荷を減少させる方向に働くこととなる。

ついで電炉鋼の平均使用期間  $E_2$  のみを変化させた場合のそれぞれの項目の変化を図 5-16 に示す。電炉鋼の使用期間が長い場合、 $CO_2$  排出量は削減されるものの、使用期間の伸び率に対する削減の割合は高炉鋼の場合より低くなっている。また素材の質の観点については、電炉鋼の長期間の使用は全鉄鋼ストック中の電炉鋼の割合をわずかに増加させるものの、電炉鋼中の銅元素濃度を相当程度引き

下げる効果を有している。

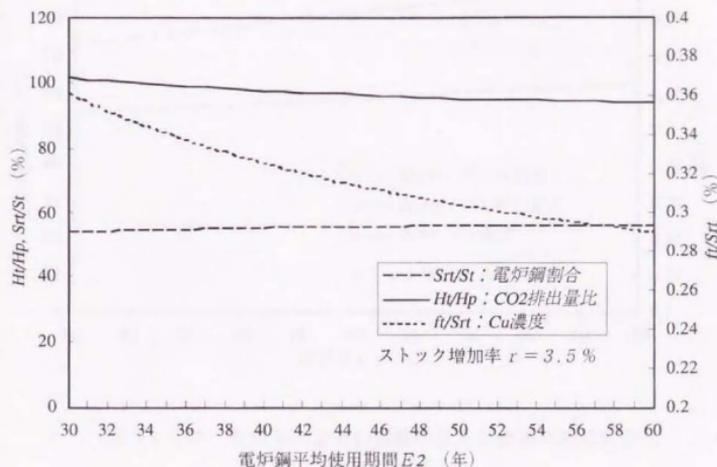


図 5-16 電炉鋼平均使用期間によるCO2排出量及び鉄鋼の質的变化

また、回収率  $b$  を変化させた場合について図 5-17 に示す。回収率が高い場合には、CO2 排出量比が小さくなっている一方、素材の質の観点からは、鉄鋼ストック中の電炉鋼の割合、電炉鋼中の銅元素濃度ともに高いものとなってしまふ。さらに、鉄鋼ストック増加率  $r$  が 2% 及び 0% と相対的に低い水準にあるケースについて同様の計算を行い、回収率並びに高炉鋼及び電炉鋼の平均使用期間が変化した場合の全鉄鋼ストック中電炉鋼割合、電炉鋼中銅元素濃度及びCO2排出量比の値を推計した。結果を図 5-18 ~ 図 5-23 に示す。

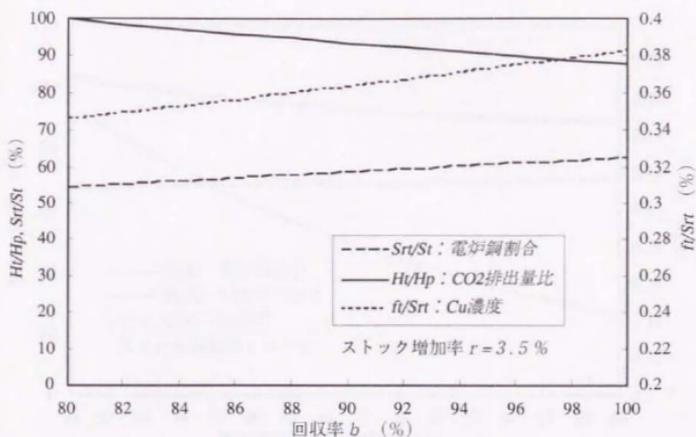


図5-17 回収率によるCO<sub>2</sub>排出量及び鉄鋼の質的变化

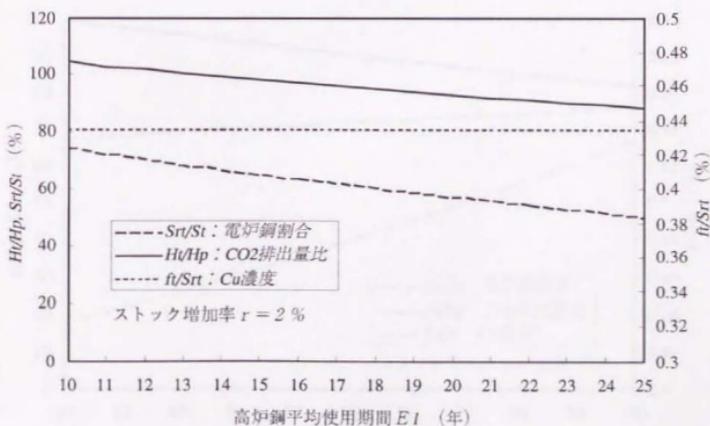


図5-18 高炉鋼使用平均期間によるCO<sub>2</sub>排出量及び鉄鋼の質的变化

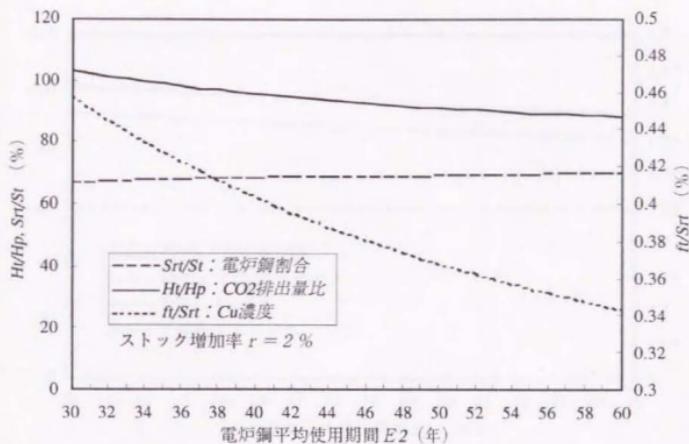


図5-19 電炉鋼使用平均期間によるCO2排出量及び鉄鋼の質的变化

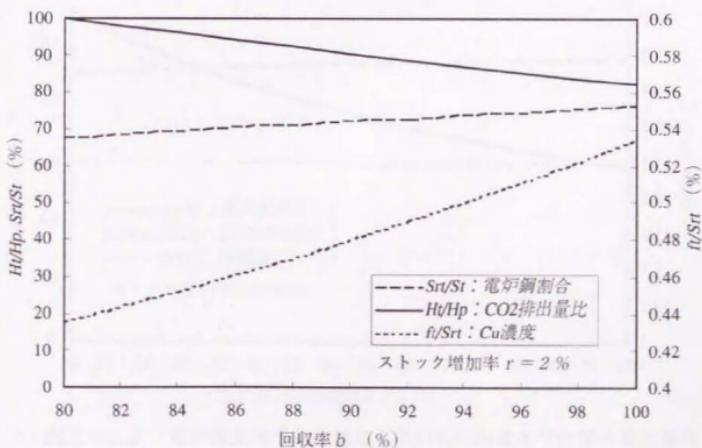


図5-20 回収率によるCO2排出量及び鉄鋼の質的变化

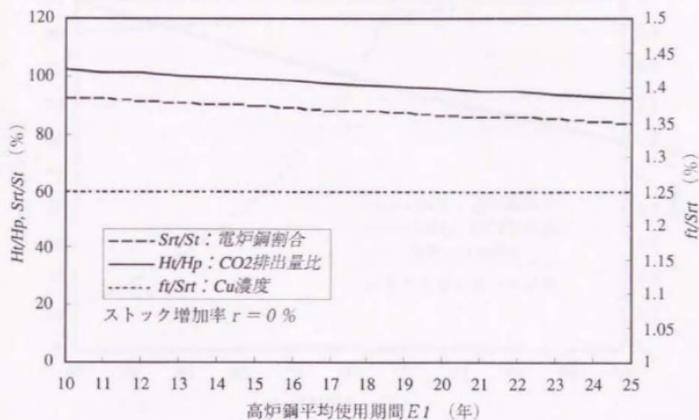


図 5-21 高炉鋼使用平均期間によるCO2排出量及び鉄鋼の質的变化

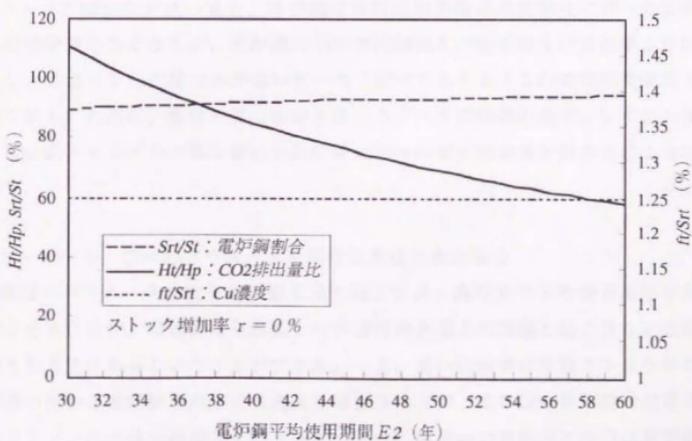


図 5-22 電炉鋼使用平均期間によるCO2排出量及び鉄鋼の質的变化

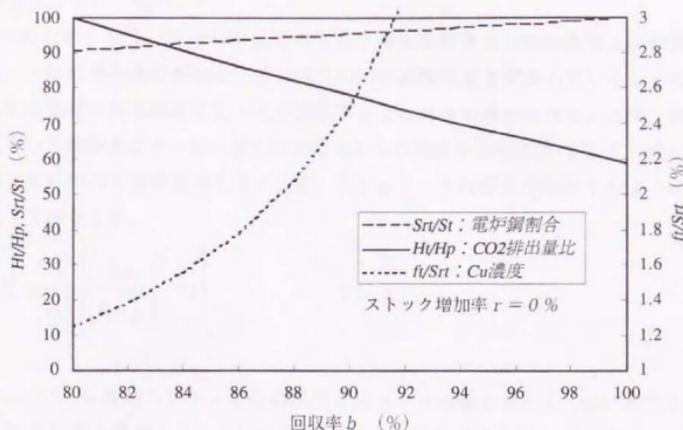


図5-2-3 回収率によるCO2排出量及び鉄鋼の質的变化

ストック増加率が低い場合、高炉鋼の平均使用期間  $E_1$  の長期化に伴うCO2排出量削減率は小さくなるが、電炉鋼の平均使用期間  $E_2$  の長期化及び回収率  $b$  の増加についてはストック増加率が高いケースに較べてより大きなCO2排出量削減が達成される。ただし、素材の質の面からは、ストック増加率の低下はいずれの場合も全鉄鋼ストック中の電炉鋼割合及び電炉鋼中の銅元素濃度を引き上げる方向に働く。

#### 5-4-4 三つのパラメータを同時に変化させた場合

個別のパラメータの変化の影響を見た場合には、高炉鋼の平均使用期間を長期化させることが、環境負荷を削減しつつ素材の利用上の問題も起こさない比較的優れた方法であるということが出来る。一方、高い回収率は鉄鋼ストック中の電炉鋼の割合と電炉鋼中の銅元素濃度を増加させるが、高炉鋼の長期間の使用は鉄鋼ストック中の電炉鋼割合を低下させ、また、電炉鋼の長期間の使用は電炉鋼中の銅元素濃度を低下させる。したがって、これらを組み合わせることにより、素材の質的劣化を防ぎつつより効果的に環境負荷を削減することが考えられ、この

可能性について検討する。

このため、今までに求めた式をもとに、再生素材中の不純物濃度及び全素材ストック中の再生素材割合を一定に保ちつつCO2排出量を削減していくことを可能とする素材の使用期間 $E_1$ 及び $E_2$ と回収率 $b$ との関係を求めてみる。まず、再生素材中の不純物濃度を一定に保つための $E_2$ と $b$ の関係を求める。(5.6)式から、再生素材中の不純物濃度を $\theta$ (一定)とすると、この時の $E_2$ を以下のように求めることができる。

$$E_2 = \frac{1}{rx_2^2} \left\{ \left( \frac{b\theta}{\theta - g} \right)^{x_2^2} - 1 \right\} \quad \dots (5.7)$$

ついで、全素材ストック中の再生素材ストックの割合を $\phi$ (一定)とすると、(5.7)式も考慮することにより、(5.2)式及び(5.4)式からこの時の $E_1$ を以下のように求めることができる。

$$E_1 = \frac{1}{rx_1^2} \left[ \left\{ \frac{g - \theta(1-b)(1-\phi)}{\phi g} \right\}^{x_1^2} - 1 \right] \quad \dots (5.8)$$

(5.7)式及び(5.8)式は、不純物濃度及び再生素材割合を一定に維持するためには、 $b$ を増加させていった場合、 $E_1$ 及び $E_2$ を長くしていくことが必要であることを示している。逆に言えば、回収率 $b$ を増加させていくとともに、 $E_1$ 及び $E_2$ を(5.7)式及び(5.8)式から算出される値となるよう長期化していくことにより、素材の質的劣化を防ぎつつ環境負荷を削減していくことが可能となる。この時、リサイクルシステムからのCO2排出量の累積値は、 $\theta$ 及び $\phi$ を用いて以下のように表すことができる。

$$H_1 = S_0 \left[ \frac{\phi}{b - 1 + \frac{g}{\theta}} \{ p_1 + p_2 - b(p_1 + p_2 - p_3) \} + p_1 \right] e^n \quad \dots (5.9)$$

現状と  $b$  を変化させた時の (5.9) 式の値の比をとることにより、素材の質的劣化を防ぎつつ回収率を増加させた場合のCO<sub>2</sub>排出量削減率を得ることができる。

なお、ストック増加率  $r$  が 0 の場合には、(5.6) 式から、不純物濃度に関する  $E_2$  への制約はない。また、(5.5) 式から、以下の式が得られる。

$$E_1 = \frac{b(1-\varphi)}{\varphi(1-b)} E_2 \quad \dots (5.10)$$

この場合、 $E_2$  の値を変化させなくても、回収率の増加とともに  $E_1$  の値を (5.10) 式に基づき長期化していくことにより、素材の質的劣化を伴うことなく環境負荷の削減を行うことができる。また、この時のCO<sub>2</sub>累積排出量は、以下の式により与えられる。

$$H_t = \frac{\varphi S_0 T}{b E_2} \{ p_1 + p_2 - (p_1 + p_2 - p_3) b \} \quad \dots (5.11)$$

鉄鋼に関し、ストック増加率  $r$  が 3.5% の場合について、回収率  $b$  を現状の 80% から順次増加させた場合に銅元素濃度及び電炉鋼割合を現状レベルに保つための  $E_1$  及び  $E_2$  を (5.7) 式及び (5.8) 式により算出した結果を図 5-24 に、また、これら三つのパラメータの組み合わせに対応する電炉鋼中銅元素濃度、鉄鋼ストック中電炉鋼割合及び二酸化炭素排出量削減率を図 5-25 に示す。さらに、ストック増加率  $r$  が 2% の場合について同様の計算を行った結果を図 5-26 及び図 5-27 に示す。

これら図から分かるように、三つのパラメータを同時に変化させることにより、回収率が上昇しても鉄鋼ストック中の電炉鋼割合や電炉鋼中銅元素濃度が一定の水準に留まっている一方、CO<sub>2</sub>排出量は回収率だけを変化させた場合に比べてより大きな割合で減少していつている。

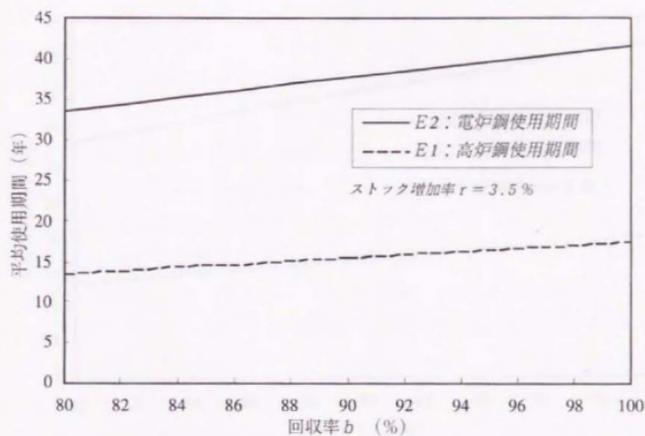


図 5-24 回収率増加に伴う高炉鋼及び電炉鋼平均使用期間の変化

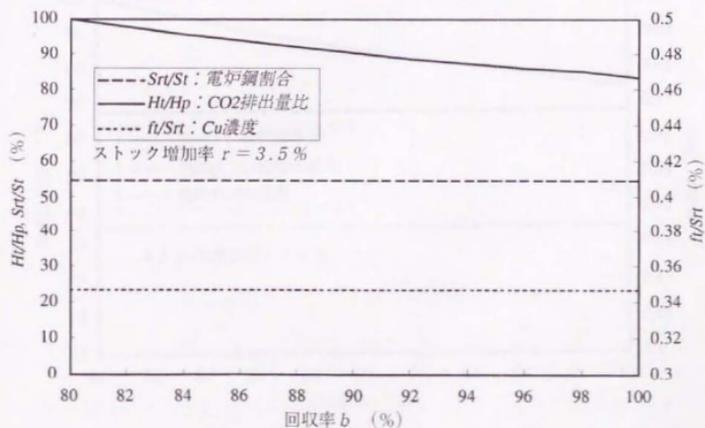


図 5-25 高炉鋼平均使用期間、電炉鋼平均使用期間及び回収率を同時に変化させた場合のCO<sub>2</sub>排出量及び素材の質的变化

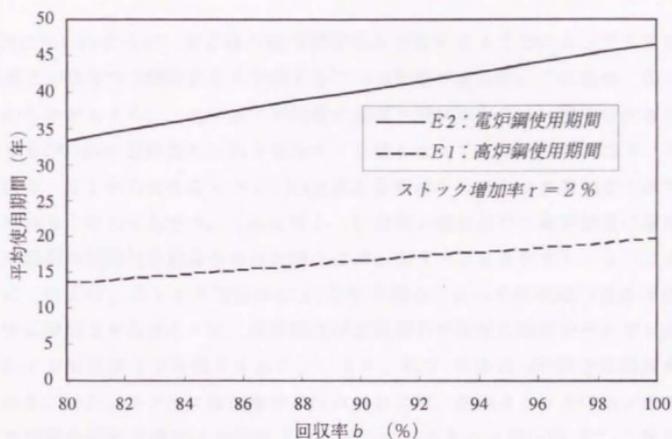


図 5-26 回収率増加に伴う高炉鋼及び電炉鋼平均使用期間の変化

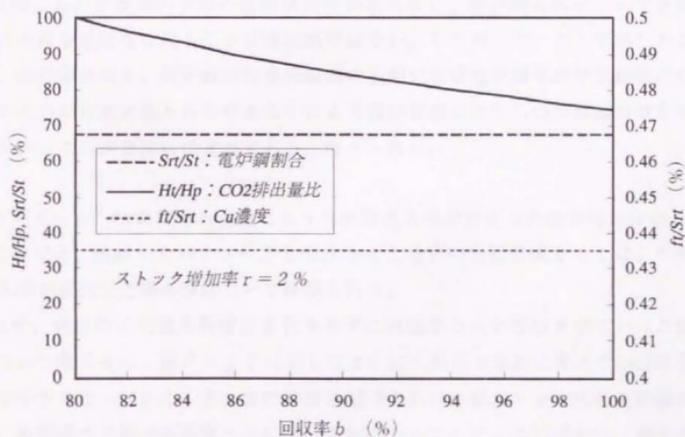


図 5-27 高炉鋼平均使用期間、電炉鋼平均使用期間及び回収率を同時に変化させた場合の $CO_2$ 排出量及び素材の質的变化

既に示したように、高炉鋼の使用期間のみを長くすることによっても素材の質的劣化を防ぎつつ環境負荷を削減することは可能であるが、この場合、図5-15から分かるように、高炉鋼の平均使用期間を現状から30%程度増加させた場合でもCO<sub>2</sub>排出量削減率は約5%の小さな値となっている。また、図5-18及び図5-21から分かるように、CO<sub>2</sub>排出量削減率はストック増加率の低下とともに小さくなってしまふ。これに対し、回収率の増加並びに高炉鋼及び電炉鋼の使用期間の長期化を組み合わせた場合には、図5-24及び図5-25に示すように、例えば、ストック増加率が3.5%の場合において回収率を80%から90%に増加させるとともに、高炉鋼及び電炉鋼の平均使用期間をそれぞれ現状から約15%及び13%長くすることにより、約9.5%のCO<sub>2</sub>排出量削減が達成される。また、ストック増加率が2%の場合には、鉄鋼ストック中電炉鋼割合及び電炉鋼中銅元素濃度はやや高くなるものの、ストック増加率が3.5%の場合に比べてより大きなCO<sub>2</sub>排出量の削減が達成されている。

社会における鉄鋼の実際の使用状況等を考えると、高炉鋼のみについて使用期間の大幅な長期化を図ることは現実的ではない。したがって、ここで示したように、回収率の向上、高炉鋼平均使用期間の長期化及び電炉鋼平均使用期間の長期化の三つの方法を組み合わせることにより質的問題に対応しつつ環境負荷を削減していくことが実際には適当であると考えられる。

#### 5-4-5 技術開発の進展により不純物混入率が変化した場合等の評価

ここでは、前述したパラメータを変化させた場合の分析結果をもとに、不純物混入率が変化した場合等について評価を行う。

まず、素材の平均使用期間を変化させずに回収率のみを増加させていった場合について考えると、図5-17に示したように、回収率増加に伴ってCO<sub>2</sub>排出量比が小さくなっていく一方、素材の質の観点からは鉄鋼ストック中の電炉鋼の割合、電炉鋼中の銅元素濃度ともに高いものとなっていく。この図から、銅元素混入率 $g$ が変化しないものとする、現状程度の80%の回収率であれば電炉鋼中銅元素濃度は約0.35%となり、社会における電炉鋼中銅元素濃度の許容限度が例えば0.3%程度の場合には回収率を引き下げることが必要となることが分

かる。ここで、廃棄物の破碎・分離・回収技術、電炉プロセスにおける精錬技術等の進展により再生過程における銅元素混入率が低下した場合についてモデルに基づく評価を行ってみる。銅元素混入率が現状の半分以下の0.1%に低下した場合について、図5-17と同様に回収率を増加させて推計を行った結果を図5-28に示す。この場合、回収率を100%まで高めた場合でも電炉鋼中銅元素濃度は0.15%程度の低い水準に留まり、社会における使用上の観点から電炉鋼中銅元素濃度を例えば0.2%以下に抑えることが必要となった場合でも、素材の質的問題が回収率向上の制約要因とはならない。

また、三つのパラメータを同時に変化させた場合の環境負荷と素材の質的变化を示した図5-25に関しても、銅元素混入率が0.1%に低下した場合について同様の推計を行った。結果を図5-29に示す。電炉鋼中銅元素濃度は銅元素混入率の低下に比例して低い値で一定となっている。

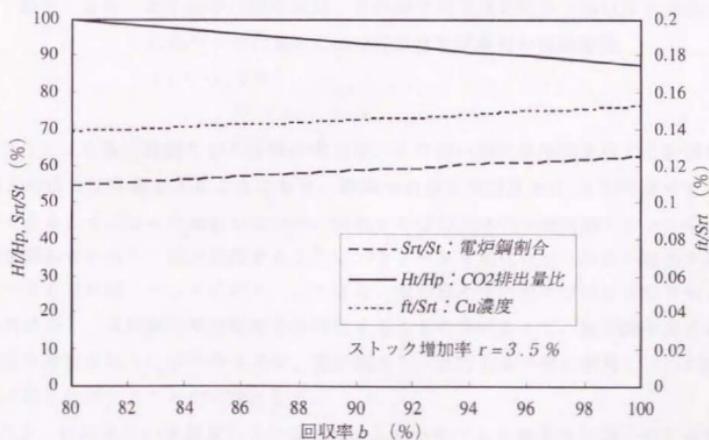


図5-28 回収率によるCO2排出量及び鉄鋼の質的变化 ( $g = 0.1\%$ )

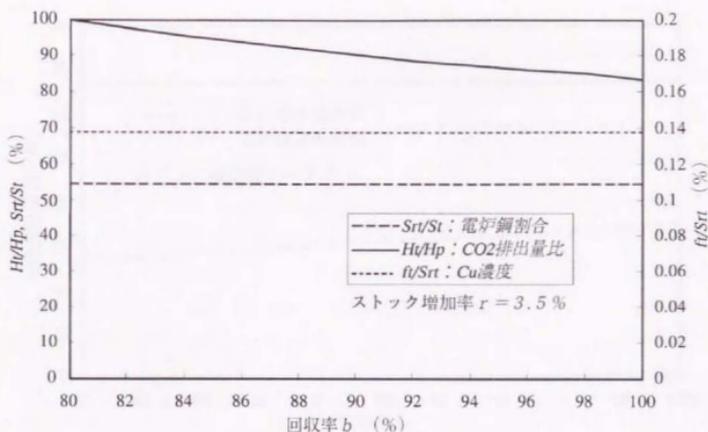


図5-29 高炉鋼平均使用期間、電炉鋼平均使用期間及び回収率を同時に変化させた場合のCO<sub>2</sub>排出量及び素材の質的变化  
( $g = 0.1\%$ )

さらに、今後の鉄鋼の加工技術の向上等により高い銅元素濃度を有する鉄鋼の加工が容易に実施できるようになり、鉄鋼中の銅元素濃度を0.4%程度まで許容できるようになった場合について、回収率を増加させつつ全鉄鋼ストック中の電炉鋼割合のみを一定に維持するようにパラメータを変化させた場合の結果を図5-30及び図5-31に示す。この場合、電炉鋼の平均使用期間を変化させる必要はなく、高炉鋼の使用期間を長期化することのみによって、電炉鋼中銅元素濃度を許容限度内に留めたままで、電炉鋼ストック割合を一定に維持しつつCO<sub>2</sub>排出量を削減することが可能となる。

以上、技術開発の進展等により銅元素混入率が低下した場合及び銅元素を含む鉄鋼の加工技術が向上した場合についてモデルに基づく評価を行ったが、銅元素以外の不純物についても同様の手法により評価を行うことが可能である。

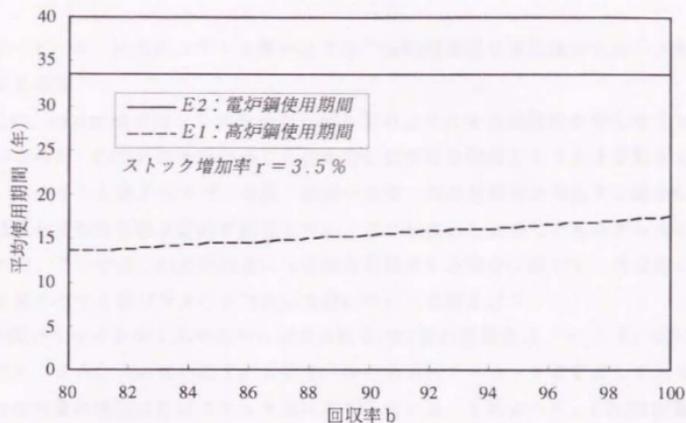


図 5-30 回収率増加に伴う高炉鋼及び電炉鋼平均使用期間の変化

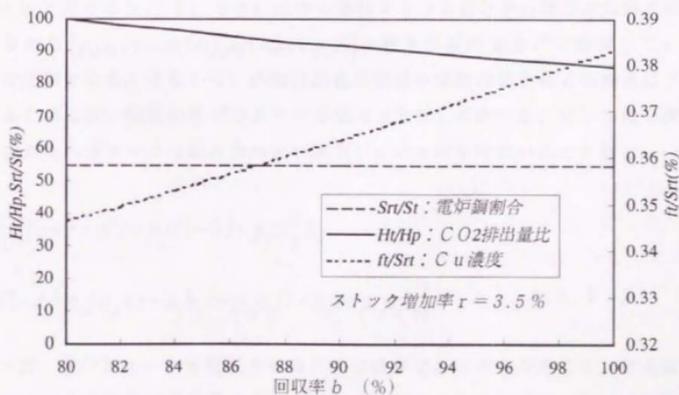


図 5-31 高炉鋼平均使用期間と回収率を同時に変化させた場合の  $CO_2$  排出量及び素材の質的变化

#### 5-4-6 社会的コストを最小とする二酸化炭素排出量削減のための方策に関する考察

近年、CO<sub>2</sub>削減に関して具体的な目標を定めようとする国際的な努力が行われているほか、CO<sub>2</sub>の排出量に応じて排出者に炭素税を賦課しようとする動きもある。このような動きの中で、今後、鉄鋼の生産、再生過程等で発生する総合的なCO<sub>2</sub>量を具体的な目標を定めて削減していくことを求められることも考えられる。そこで、ここでは、CO<sub>2</sub>排出量の一定割合を削減する場合に関して、社会的コストを最小とする各パラメータの決定方法について考察を行う。

鉄鋼のリサイクルシステムから排出されるCO<sub>2</sub>量の累積値は(2.58)式により与えられる。この式中の $S_0 e^{rt}$ は社会における素材のストック量を表しており、CO<sub>2</sub>排出量累積値は素材ストック量に比例している。したがって、CO<sub>2</sub>排出量を削減する方法としては、素材ストック量を削減していくこと、すなわち社会での素材の使用自体を取りやめるという方法も一方策となる。しかしながら、ここでは経済規模の拡大等に伴う素材への需要には基本的に応えていくということを前提として考えると、(2.58)式中の素材ストック量とその伸び率以外の部分、すなわち $\{p_1(a+r-ab)+p_2a(1-b)+p_3ab\}$ の値を所要の割合だけ削減していくことが必要となる。すなわち、CO<sub>2</sub>排出量累積値を現状の値から $d$ の割合ほど削減するためには、現状の各パラメータを添字 $p$ を付して表すと、以下の式を満足する新たなパラメータの組み合わせを実現しなければならないこととなる。

$$\{p_1(a+r-ab)+p_2a(1-b)+p_3ab\} \leq (1-d) \{p_{1p}(a_p+r-a_p b_p)+p_{2p}a_p(1-b_p)+p_{3p}a_p b_p\} \quad \dots (5.12)$$

一方、各パラメータを変化させるためには一定のコストが生じる。例えば、各プロセスからのCO<sub>2</sub>排出量 $p_1$ 、 $p_2$ 及び $p_3$ を削減するためには、新たに公害防止設備等を設置するためのコストが必要となる。また、回収率 $b$ を向上させるためには、逆有償となっている廃棄物の回収を促進するための補助金等が必要となると考えられ、さらに、機械、建材等の使用期間 $E_1$ 及び $E_2$ を長期化するためにも、

税制上の優遇措置等の政府から見たコストが生じるものと考えられる。今後、実証的研究を通じてこれらのコストを定量的に評価することが可能となれば、(5.12)式の制約の下で、年間当たりが発生するこれらコストの総和を最小とするパラメータの組み合わせを求めることにより、総合的なコストを最小とする最適なサイクルのあり方を検討することが可能となるものと考えられる。なお、回収率 $m$ を増加させたり素材の使用期間 $E_1$ 及び $E_2$ を長期化した場合には、再生素材中の不純物濃度が上昇すること等による「質の悪い素材を使用しなければならない」という社会的コストが発生することが考えられるが、前節で示した様に回収率並びに新たな素材及び再生素材の使用期間を適切に組み合わせることにより、このような社会的コストを0とすることが可能となる。

#### 5-5 むすび

素材ストックが一定割合で増加する社会を対象として、原材料から生産された新たな素材の供給を受けるほか、社会から廃棄される素材の一部が再生利用されるリサイクルシステムをモデル化することにより導いた各種推計式を鉄鋼のリサイクルシステムに適用することにより、以下の結果を得た。

##### 5-5-1 素材の廃棄率を一定とするモデルの適用

(1) 社会からの鉄鋼の廃棄率、鉄鋼ストック増加率、廃棄された鉄鋼の回収率、再生過程における銅元素の混入率等が現状のままであれば、わが国の全鉄鋼ストック中に占める電炉鋼の割合は約4.6%に、電炉鋼ストック中の銅元素濃度は長期的に約0.36%に収束していくものと推計された。また、異なるストック増加率及び回収率の組み合わせに対する電炉鋼割合収束値及び銅元素濃度収束値を明らかにした。

(2) 廃棄された鉄鋼のうち現状程度の80%を回収して電炉鋼として再生利用することにより、鉄鋼のリサイクルシステムから排出されるCO<sub>2</sub>の累積量を約2.9%削減することが可能であると推計された。また、80%の再生利用が行われる場合について、異なる鉄鋼ストック増加率に対応するCO<sub>2</sub>削減率の値を明らかにした。

#### 5-5-2 素材の使用期間の分布を考慮したモデルの適用

(1) 得られた素材全体の廃棄率を推計する理論式を実際の鉄鋼関連のデータに適用し、スクラップ発生率に関する過去のデータと比較したところ、本理論式による推計値は過去のデータの値とほぼ満足すべき一致をみた。

(2) 本モデルを鉄鋼のリサイクルシステムに適用したところ、わが国の全鉄鋼ストックに占める電炉鋼ストックの割合は約41%、鉄鋼の再生過程における銅元素の混入率は約0.25%であるものと推計された。銅元素混入率が現状程度で素材ストック増加率が3.5%に低下した場合には、電炉鋼ストック中銅元素濃度は長期的には約0.35%に近づいていくものと推計される。また、様々なストック増加率と回収率の値に対応する鉄鋼ストック及びフロー中の電炉鋼割合及び銅元素濃度の値を明らかにした。

(3) 素材の回収率及び使用期間を変化させた場合のCO<sub>2</sub>排出量削減の効果と素材の質的劣化の間のトレードオフ関係を定量的に明確化することができた。これをもとに、回収率の向上、素材使用期間の長期化といったそれぞれの対応策のメリットとデメリットを明確にすることができた。

(4) 単独の方法としては、新たな素材の使用期間を長期化することが素材の質の低下を引き起こさずに環境負荷を削減できる優れた方法である。一方、高い回収率並びに新たな素材及び再生素材のより長期間の使用を組み合わせることにより、素材の質の問題に対応しつつより大きな環境負荷の削減を達成することが可能であり、実際にはこの方法をとることが適当であると考えられる。

(5) 技術開発の進展により再生過程における銅元素混入率が低下した場合等について評価を行った。また、CO<sub>2</sub>排出量について一定の制約が課された場合について、社会的コストを最小としつつリサイクルシステムからの総合的なCO<sub>2</sub>排出量を削減していくための方策について考察を行った。

参考文献

- <sup>1)</sup> 日本鉄源協会：鉄源年報（1995）、114
- <sup>2)</sup> 鉄鋼連盟鉄鋼統計委員会：鉄鋼統計要覧（毎年発行）
- <sup>3)</sup> 金属系材料研究開発センター新製鋼技術研究推進室：JRCMニュース、100号（1995）、10
- <sup>4)</sup> 日本鉄リサイクル工業会：鉄リサイクル事業のマニュアルブック、（1992）、62
- <sup>5)</sup> 武内美継：鉄鋼界、2（1995）、2

## 第6章 素材ストックの増加率が低減していく場合の素材リサイクルシステムの解析とその鉄鋼への適用

### 6-1 はじめに

第2章においては、社会の素材ストックが一定の割合で増加していく場合について、素材の新規の投入と廃棄された素材の再生利用を含みリサイクルシステムを対象として、環境負荷及び素材の質的劣化に関する解析のモデルを構築し、これをもとに第5章で鉄鋼のリサイクルシステムの総合的評価を行った。

しかしながら、鉄をはじめとする基幹素材においては、今後長期的にストックの伸び率が相当程度低下していくことも予想されており、これが素材の質的劣化や環境負荷の程度に様々な影響を及ぼすことが予想される。そこで、本章においては、これまでに構築したモデルをストック増加率が低下していく場合に対して拡張するとともに、モデルを鉄鋼へ適用し電炉鋼の質的劣化と環境負荷の評価を行った<sup>1)</sup>。

### 6-2 社会における素材ストック量の推移

社会における素材ストック量は、経済が発展するにつれて増加していくが、その増加には限度があることも考えられる。鉄を例にとると、我が国における社会の鉄鋼ストックは、1960年代及び70年代前半においては年率8~13%程度で増加していたが、70年代半ばからは増加率が低下し、3~5%程度の増加率で推移してきている。また、米国においては、近年、一人当たり鉄鋼蓄積量が13トンを超えた辺りでその増加率が低下してきている<sup>2)</sup>。そこで、本研究においては、素材ストックの単位時間当たりの増加量が今後指数的に減少していく素材ストック量は長期的にある値に漸近するものとして、 $t$ 時点におけるストック $S_t$ を以下のような式で表すことができるものと仮定する。

$$S_t = S - R e^{-\beta t} \dots (6.1)$$

ここで、 $S$ は素材ストック量の収束値、 $R$ は収束値と初期値の差、 $\beta$ は単位時間当たり増加量の減衰率である。

ついで、上式を我が国の鉄鋼ストック量の推移に対して適用してみる。データは入手できた1965~93年のもの<sup>3)</sup>を用いた。最小二乗法を用いて鉄鋼スタッ

夕量の推移を(6.1)式により近似した。ここで、我が国の鉄鋼ストックは一人当たり鉄鋼ストックがほぼ一定に達しつつある米国と将来的には同程度となるものと考え、 $S$ を16億トンと設定した。また、データの起点である1965年における(6.1)式の値と実績値が一致するよう設定した。以上により算出した結果を実績値と併せて図6-1に示す。 $\beta$ は0.028、1995年を $t=0$ と設定したところ $R$ は約6.1億トンと算定された。

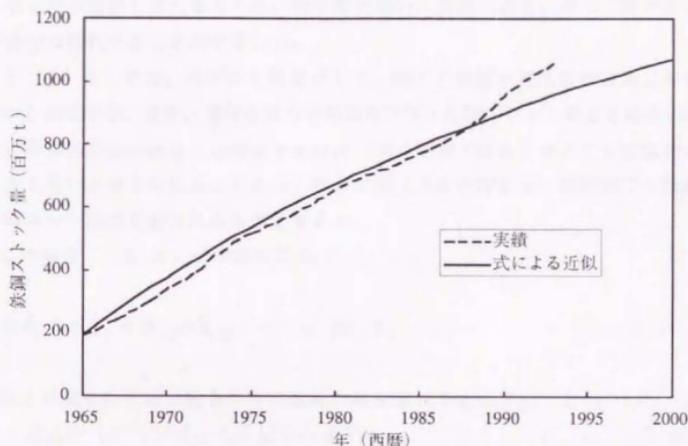


図6-1 わが国における鉄鋼ストック蓄積の推移と式による近似

### 6-3 解析的モデルの導出

#### 6-3-1 廃棄率及び再生素材の割合

図2-2に示すリサイクルシステムの物質収支を考える。社会における素材ストック $S_t$ のバランスについて(6.2)式が得られる。

$$\frac{dS_t}{dt} + a_t S_t = q_t + a_t b S_t \quad \dots (6.2)$$

ついで、素材の社会での使用期間について考える。社会に投入された素材の使

用期間は新たな素材か再生素材かによるほか、用途・製品によっても異なる。このため、2-3においては、新たな素材と再生素材はそれぞれ異なる確率分布に従って廃棄されるものと仮定し、無限の過去から現在に至るフロー及びストックの蓄積に関して方程式を立てこれを解くことにより解析を行った。一方、本章における分析では、素材ストックの増加率が低下して素材ストック量は一定値に漸近していき、その推移は(6.1)式で表せるものとして解析を行うこととしている。この場合、この式から分かるように無限の過去においてはこの値が負の値を取りかつ発散してしまうため、第2章で用いた無限の過去に遡って積分をとる手法では解析することができない。

そこで、ここでは、モデルを単純化して、新たな素材と再生素材は同じ寿命を持つと仮定する。また、素材全体の平均的なフロー及びストック考える場合には、ある平均的期間が経過した時点で素材は一律に廃棄されると考えても近似的に差し支えないと考えられることから、社会に投入された素材は一定期間  $T$  が経過した時点で一律に廃棄されるものとする。

この場合、(6.3)式が成り立つ。

$$a_t S_t = q_{t-T} + a_{t-T} b S_{t-T} \quad \dots (6.3)$$

以上の式をもとに、社会からの素材の廃棄率  $a_t$  を求める。(6.1)式、(6.2)式及び(6.3)式から、以下の式を得る。

$$S(a_{t-T} - a_t) + (a_t + \beta e^{\beta T} - a_{t-T} e^{\beta T}) Re^{-\beta} = 0$$

ここで  $a_t$  が時間に関わらない定数であると仮定すると、廃棄率(以下単に  $a$  と書く。)を以下のように求めることができる。

$$a = \frac{\beta}{1 - e^{-\beta T}} \quad \dots (6.4)$$

(6.4)式から分かるように、素材の廃棄率は、素材の使用期間  $T$  が長いほど小さくなる。

この  $a$  を用いて、単位時間に社会に投入される新たな素材の量  $q_t$  及び再生素材の量  $abS_t$  をそれぞれ以下のように求めることができる。

$$q_t = a(1-b)S - a(e^{-\beta t} - b)Re^{-\beta t} \quad \dots (6.5)$$

$$abS_t = ab(S - Re^{-\beta t}) \quad \dots (6.6)$$

ついで、素材ストック中の再生素材ストックの量  $S_{rt}$  について次式が成立する。

$$\frac{dS_{rt}}{dt} = abS_t - aS_{rt}$$

(6.6) 式と併せてこれを解くことにより、再生素材ストック量を以下のように求めることができる。

$$S_{rt} = Sb - (Sb - S_{r0} - bRe^{\beta t})e^{-at} - bRe^{\beta t}e^{-\beta t} \quad \dots (6.7)$$

ここで、 $S_{r0}$  は、 $t=0$  における再生素材ストックの量。

(6.7) 式を (6.1) 式で割ることにより、素材ストック中の再生素材ストックの割合を算出することができる。十分な時間が経過した後は、全素材ストックに占める再生素材ストックの割合は  $b$  に収束していく。これは、第2章に示した素材ストックの量が一定割合で増加していく場合における素材の使用期間の分布を考慮したモデルにおいてストック増加率  $r$  を 0 とした時の再生素材割合を表す (2.49) 式において、新たな素材と再生素材の寿命が同一であるとした場合と同様の結果である。

次に、フローベースでみた素材の全生産量に占める再生素材の割合を求めると、次式が得られる。

$$\frac{abS_t}{q_t + abS_t} = \frac{b(S - Re^{-\beta t})}{S - Re^{-\beta t}e^{-\beta t}} \quad \dots (6.8)$$

(6.8) 式においても、時間が充分経過した後は、全生産量に占める再生素材の割合はストックの場合と同様に  $b$  に収束していく。

### 6-3-2 再生素材中の不純物濃度

まず社会における素材ストックに含まれる不純物元素の総量  $f_t$  を求める。再生過程において、廃棄・回収された素材の単位量あたりに  $g$  の割合の不純物元素が付加されるとすると、不純物のバランスから素材ストック中の不純物元素の総量  $f_t$  について以下のような式を立てることができる。

$$\frac{df_t}{dt} = gabS_t + abf_t - af_t$$

これに (6.1) 式を代入して解くことにより、全素材中の不純物量を以下のよう求めることができる。

$$f_t = \frac{Sgb}{1-b} - \frac{Rgb}{e^{-\beta t} - b} e^{-\beta t} + \left( f_0 - \frac{Sgb}{1-b} + \frac{Rgb}{e^{-\beta t} - b} \right) e^{-a(1-b)t} \quad \dots (6.9)$$

ここで、 $f_0$  は  $t=0$  時点での不純物量。

(6.9) 式を (6.1) 式及び (6.7) 式で割ることにより、全素材ストック中及び再生素材ストック中の不純物濃度をそれぞれ得ることが出来る。時間が経つにつれ、全素材ストック中及び再生素材ストック中の不純物濃度は以下の値に収束していく。

$$\left. \frac{f_t}{S_t} \right|_{\infty} = \frac{gb}{1-b} \quad \dots (6.10)$$

$$\left. \frac{f_t}{S_{rt}} \right|_{\infty} = \frac{g}{1-b} \quad \dots (6.11)$$

(6.11) 式は、素材ストックが一定割合で増加していく場合における再生素材中の不純物濃度を表す式 (2.55) 式において、ストック増加率  $r$  を 0 とおいた場合と同一の結果となっている。

また、フローベースで見ると、生産される再生素材中の不純物濃度は以下の式により求めることができる。

$$\frac{gabS_t + abf_t}{abS_t} \dots (6.12)$$

(6.1) 式及び (6.9) 式から、(6.12) 式も十分な時間が経過した後は (6.11) 式と同様の値に収束していくことが分かる。

### 6-3-3 環境負荷

次に、このようなリサイクルシステムが環境に及ぼす負荷を定量的に評価する。システム中のそれぞれの過程での単位量の素材処理から発生するCO<sub>2</sub>量を第2章と同様に以下のように表す。

- $p_1$  : 新たな素材を生産する過程
- $p_2$  : 再生されずに投棄される過程
- $p_3$  : 再生過程

第2章においては、大気中に排出されるCO<sub>2</sub>量のみに着目し、このうち海面等に吸収されていく分については考慮しなかった。しかしながら、素材ストック量が一定値に漸近していく場合には、素材の生産等により単位時間に排出されるCO<sub>2</sub>量も限界を有すると考えられ、海面等によるCO<sub>2</sub>吸収も考慮することにより大気中に存在するCO<sub>2</sub>量の均衡値を求めることができるものと考えられる。そこで、大気中に排出されたCO<sub>2</sub>のうち海洋面への吸収等により減少していく量は大気中のCO<sub>2</sub>量に比例すると考え<sup>4)</sup>、その割合を $\mu$ とする。これらを用いて、リサイクルシステムからの排出による大気中のCO<sub>2</sub>量  $E_t$  の微小単位時間当たりの増加分を、以下のように表すことができる。

$$dE_t = p_1 q_t dt + p_2 a(1-b)S_t dt + p_3 abS_t dt - \mu E_t dt$$

本式に (6.1) 式及び (6.5) 式を代入して解くことにより、リサイクルシステムからの排出による大気中のCO<sub>2</sub>量を以下のように求めることが出来る。

$$E_t = \frac{aS\{p_1 + p_2 - b(p_1 + p_2 - p_3)\}}{\mu} (1 - e^{-\mu t}) + \frac{R\{(a - \beta)p_1 + ap_2 - ab(p_1 + p_2 - p_3)\}}{\beta - \mu} (e^{-\beta t} - e^{-\mu t}) + E_0 e^{-\mu t} \quad \dots (6.13)$$

$E_0$  は  $t=0$  時点におけるリサイクルシステムから排出されたCO<sub>2</sub>量。

$E_t$  は、時間の経過とともに以下の値に収束していく。(  $\beta = \mu$  の場合も同様に以下の値に収束する。 )

$$E_{t \rightarrow \infty} = \frac{aS\{p_1 + p_2 - b(p_1 + p_2 - p_3)\}}{\mu} \quad \dots (6.14)$$

すなわち、素材ストックがその単位時間当たり増加量を指数的に減少させながら一定値に漸近していく状態にある社会において素材のリサイクルを行った場合、リサイクルシステムから排出される大気中CO<sub>2</sub>量は(6.14)式で表される値に収束していく。そして、その値は廃棄率に比例して増加し、回収率に比例して減少する。

#### 6-4 モデルの鉄鋼のリサイクルシステムへの適用

##### 6-4-1 鉄鋼の使用期間及び廃棄率

前節までに導出したモデル式を鉄鋼のリサイクルシステムに適用する。前章と同様に高炉鋼を新たな素材、電炉鋼を再生素材とみなす。まず、社会における鉄鋼の平均的使用期間を求める。第5章の表5-1に示す鉄鋼の用途ごとの投入量と使用期間をもとに使用期間をガンマ分布により近似したところ、高炉鋼の平均使用期間は13.6年、電炉鋼の平均使用期間は33.6年と推計された。これらの加重平均を取り、鉄鋼全体の平均使用期間  $T$  を21年と設定する。このとき、(6.4)式から、鉄鋼の廃棄率は約6.3%と推計される。回収率  $b$  を80%と設定すると、鉄スクラップの発生率(すなわち廃棄率  $a$  と回収率  $b$  の積)の推計

値は約5.0%となり、我が国における近年の平均的スクラップ発生率2.7%を相当上回っている。これは、1970年以前に一定水準の割合で増加してきているストックを増加率が指数的に減衰する関数により近似したためと考えられる。すなわち、鉄鋼ストック  $S_t$  が一定の割合  $r$  で増加し  $S_t = S_0 e^{rt}$  と表されるとすると、(6.2) 及び (6.3) 式から算定される廃棄率  $a$  は  $\frac{r}{e^{rt}-1}$  となり、平均使用期間  $T$  が21年の場合には廃棄率は2.6%、スクラップ発生率は2.1%とより小さな値となる。現在観測されるスクラップ発生率は、上に示した二つの推計値の間に存在している。

しかしながら、今後鉄鋼ストックの増加率が減衰し一定値に漸近していく場合には、廃棄率は増加率が減衰するモデルに基づく推計値に近づいていくものと予想される。本研究においては、将来へ向けての長期的分析に重点を置いているため、廃棄率としてはストックの増加率が減衰していく場合の推計値を用いて試算を行うこととする。鉄鋼の使用期間  $T$  が変化した場合の廃棄率の変化を(6.4)式により計算した結果を図6-2に示す。

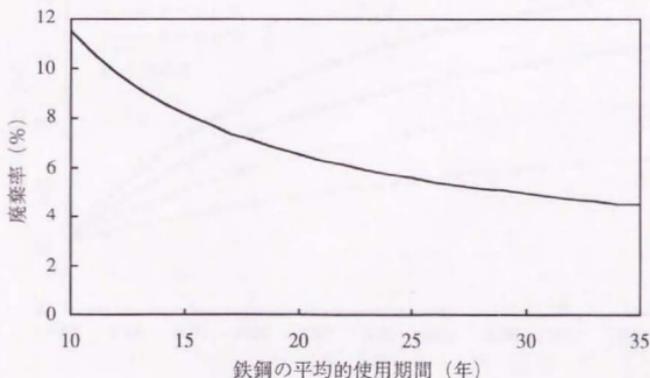


図6-2 鉄鋼の社会における使用期間とその廃棄率の関係

### 6-4-2 電炉鋼割合及び銅元素濃度

モデル式を用いて今後の推計を行うには、初期値として、現在（1995年において $t=0$ ）における再生素材ストックの割合と鉄鋼ストック中の不純物量が必要となる。鉄鋼ストック中の電炉鋼ストックの割合については、5-3における結果をもとに約41%であると考え、 $S_{r0}$ を $t=0$ 時点のストック量推計値の41%として約4.1億トンと設定した。電炉鋼中の銅元素濃度は第4章で得た値をもとに0.297%と設定し、銅元素量を約122万トンと設定する。また、再生過程における平均的な銅元素混入率 $g$ を0.25%と仮定する。

以上の諸設定値をもとに、全鉄鋼ストックに占める電炉鋼ストックの割合の変化を様々な回収率 $b$ の値について（6.1）式及び（6.7）式により計算した結果を図6-3に示す。

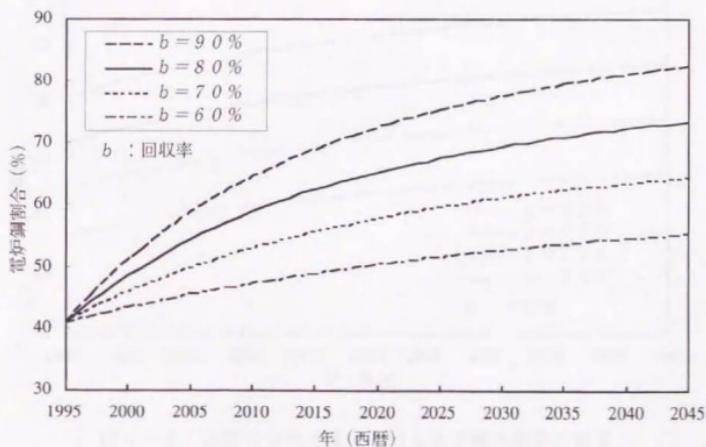


図6-3 全鉄鋼ストックに占める電炉鋼の割合の推移

ついで、フローについて、各時点で社会に投入される全鉄鋼量に占める電炉鋼の割合の推移を(6.8)式に基づき図6-4に示す。現状の回収率80%の場合、フローベースでの電炉鋼の割合の推計値は現時点( $t=0$ )で約63%となっている。我が国の国内向け粗鋼生産に占める電炉鋼の割合は近年41~42%程度であり<sup>5)</sup>、推計値は実際の値より相当高くなっているが、これは廃棄率として実測値よりも大きな推計値を使用しているためであると考えられる。

さらに、電炉鋼ストック中及びフロー中の銅元素濃度の推移を様々な回収率 $b$ について推計した結果を図6-5及び図6-6に示す。ストック中及びフロー中ともに、回収率が高いほど回収率を上昇させた時の銅元素濃度の増加分が大きくなる事が分かる。

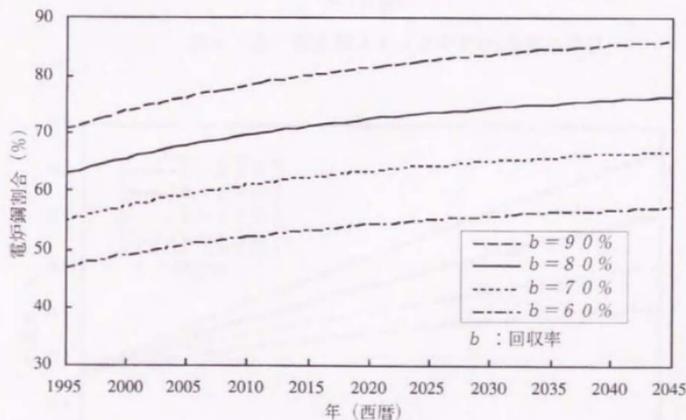


図6-4 鉄鋼の全生産量に占める電炉鋼の割合の推移

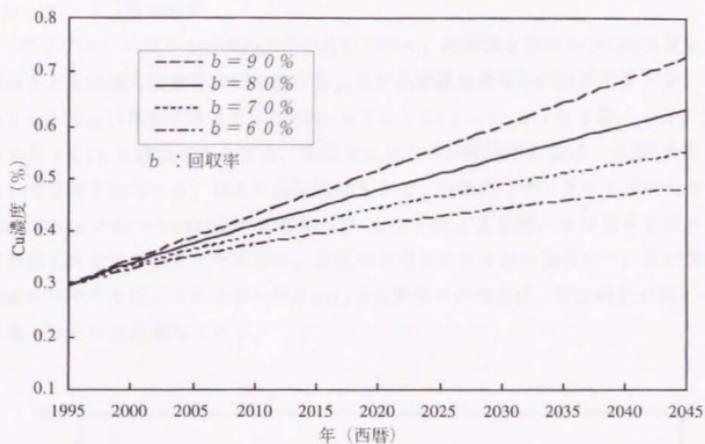


図 6-5 電炉鋼ストック中のCu濃度の推移

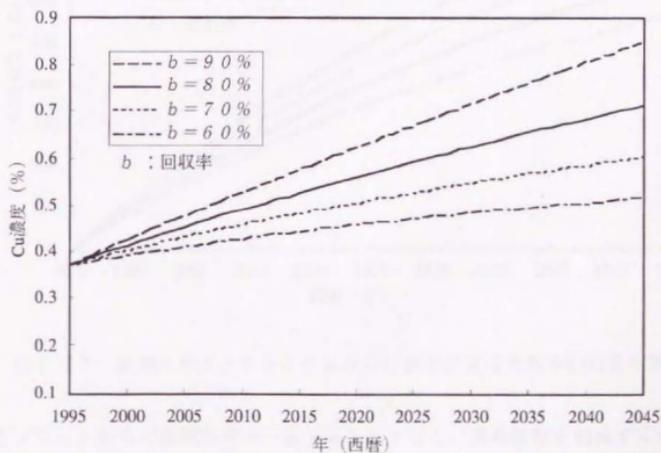


図 6-6 電炉鋼フロー中のCu濃度の推移

### 6-4-3 環境負荷

リサイクルシステムからのCO<sub>2</sub>排出量について、高炉鋼生産時のCO<sub>2</sub>排出量  $p_1$ 、廃棄された鉄鋼の投棄時のCO<sub>2</sub>排出量  $p_2$ 及び電炉鋼生産時のCO<sub>2</sub>排出量  $p_3$ を、前節までと同様に炭素換算でそれぞれ0.458 t C/t、0.013 t C/t及び0.136 t C/tと設定する。また、海洋等によるCO<sub>2</sub>吸収割合  $\mu$ は、文献<sup>4)</sup>を参考として2%と設定する。以上の設定値のもとで、鉄鋼のリサイクルシステムから排出される大気中のCO<sub>2</sub>量の推移を(6.13)式により様々な回収率  $b$  に対して計算した結果を図6-7に示す。回収率が現状の80%の場合には、我が国の鉄鋼のリサイクルシステムからの排出による大気中CO<sub>2</sub>量は、炭素換算で約1.02億トンCへと収束していく。

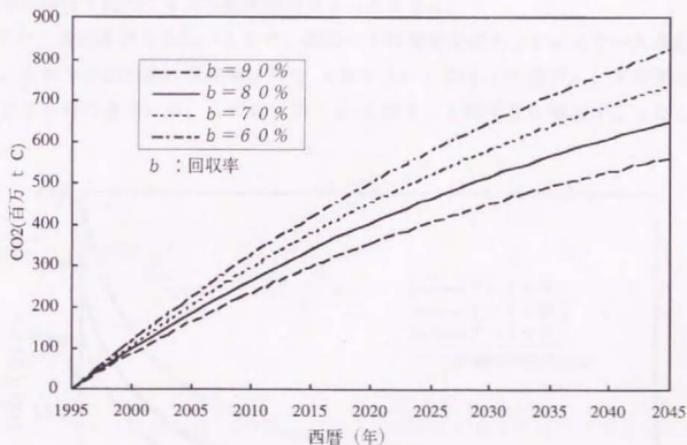


図6-7 鉄鋼リサイクルシステムからの排出による大気中CO<sub>2</sub>量の推移

各プロセスからの環境負荷が一定であるとする、環境負荷を削減するためには回収率を向上させることが必要となる。しかしながら、回収率の向上は、結果として社会に投入される鉄鋼の質の劣化を招く。そこで、(6.14)式から得

られるCO<sub>2</sub>量の収束値と(6.10)式から算出される鉄鋼ストック中の銅元素濃度の収束値の関係を回収率 $b$ をパラメータとして求めると図6-8のようになる。この図は、銅元素濃度とCO<sub>2</sub>量で表される環境負荷とのトレードオフ関係を表している。また、図中には、(6.4)式も考慮することにより、社会における鉄鋼の平均使用期間が現在より5年間長い場合及び5年間短い場合における銅元素濃度とCO<sub>2</sub>量とのトレードオフ関係も併せて示してある。

社会における鉄鋼の平均使用期間が21年の場合、現状の80%程度の回収率は環境負荷を比較的強く抑えるものとなっているが、再生過程の銅元素混入率が今後とも現状レベルであるとすると鉄鋼ストック中の銅元素濃度は1%程度の相当高い値に収束していくこととなる。一方、銅元素濃度を将来的に0.3%程度に抑えようとすると、大気中のCO<sub>2</sub>量収束値は約14.5億トンへと現状程度の回収率の場合と比べて42%程度増加することとなる。

また、回収率が80%のままで、鉄鋼の平均使用期間が26年となった場合には、大気中のCO<sub>2</sub>量の収束値は約8.8億トンへと約14%低下し、平均使用期間が16年の場合には、この値は約12.6億トンと約23%増加することとなる。

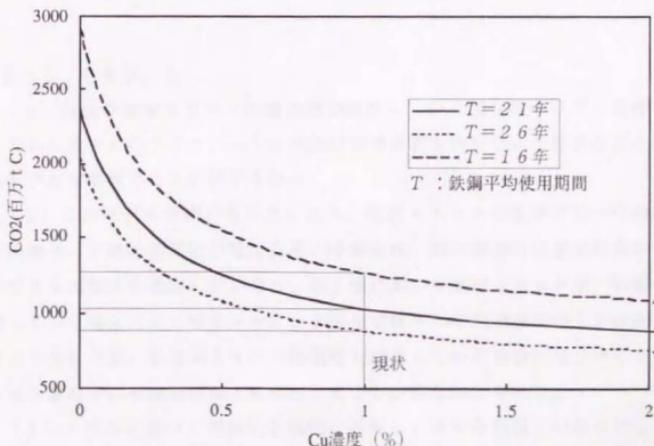


図6-8 電炉鋼中Cu濃度と大気中CO<sub>2</sub>量とのトレードオフ関係

社会は、廃棄物からの素材の分別技術や再生素材の利用技術の進展を踏まえながら、良質の材料から得られる便益と環境負荷による不利益を両方勘案して、最適な点を選び、それに対応した回収率及び鉄鋼の使用期間を決定することが必要となる。

なお、第5章の最後において、社会的コストを最小とするCO<sub>2</sub>削減のための方策に関する考察を行ったが、社会における素材ストックの増加率が低減していく場合についても、更なる実証的研究が行われ各パラメータ変化に伴うコストが定量的に評価されれば、(6.14)式を一定の許容限度 $E_{max}$ 以下とする以下の式を満たすパラメータの組み合わせを評価することにより、社会的なコストを最小とする最適なりサイクルシステムのあり方を検討することが可能となるものと考えられる。

$$\frac{\beta S \{ p_1 + p_2 - b(p_1 + p_2 - p_3) \}}{\mu(1 - e^{-\beta T})} \leq E_{max} \dots (6.15)$$

#### 6-5 むすび

(1) 社会の素材ストックの増加率が減衰していく場合について、素材のリサイクルシステムのフロー、ストック及び環境負荷を解析的に分析することのできるモデルを構築することができた。

(2) このモデルを用いることにより、素材ストック中及びフロー中の再生素材の割合、不純物濃度及び環境負荷の時間変化、収束値等を定量的に求めることのできる理論式を導出した。なお、第2章において素材ストックが一定割合で増加していく場合にはリサイクルによる再生素材中の不純物濃度の上昇は生じないことを示したが、素材ストックの増加率が減衰していく場合にはリサイクルによる再生素材中の不純物濃度上昇が生じることが明らかとなった。

(3) モデルに基づく理論式を鉄鋼に適用し、様々な回収率の値に対して全鉄鋼ストック中の電炉鋼割合、電炉鋼中銅元素濃度、環境負荷等の今後の推移を推

計した。

(4) 回収率の向上による鉄鋼のリサイクルシステムからの大気中CO<sub>2</sub>量の削減と鉄鋼の質の劣化とのトレードオフ関係を定量的に示し、かつ、鉄鋼の使用期間が変化した場合のトレードオフ関係の変化についても明らかにすることができた。

参考文献

- <sup>1)</sup> 戸井 朗人、佐藤 純一：鉄と鋼、83（1997）、407
- <sup>2)</sup> 鉄源協会：鉄源年報（1995）、118
- <sup>3)</sup> 鉄源協会：鉄源年報（1995）、114
- <sup>4)</sup> 宇沢弘文：地球温暖化の経済学、岩波書店、東京、（1995）、138
- <sup>5)</sup> 鉄鋼連盟鉄鋼統計委員会：鉄鋼統計要覧（1995）、8

本論文においては、近年、地球温暖化問題への早急な対応が求められている中で、現在生産に際して相当量の二酸化炭素を大気中に排出している鉄鋼をはじめとする素材について、その生産者のみならず、再生事業者及び利用者を含む社会全体として素材のリサイクルと有効利用を促進していくことが強く求められていることを踏まえ、素材の社会におけるストック量、その質、素材の生産やリサイクルに際しての環境負荷の程度等を総合的に評価することのできるモデルを構築し、これをもとにリサイクルの促進が素材の質や環境負荷の程度に与える影響を分析し、素材の質の劣化を抑えつつ環境負荷を削減していく方策を示したものである。

現在、鉄鋼業をはじめとする素材産業に関して、リサイクル時における鉄等の素材への不純物混入等の問題に対処することを目的として再生過程における不純物の効率的除去のための低温破砕法、液相処理法等の研究が行われているほか、不純物が一定量混入した鋼材を活用するための方策についても研究が行われている。また、機械や建造物の耐久性及び信頼性の向上等による長寿命化の研究も実施されつつある。

また、政策レベルにおいても、機械類や建造物の長寿命化のための技術面あるいは資金面での支援策、あるいは、廃棄物の回収促進のためのデポジット制の導入等の検討が行われてきている。さらに、急速な発展を遂げてきた東南アジア等の各国毎の鋼材への需要の質・量面での違いに着目して、鉄屑及び鋼材の輸出入を通じて国際的レベルでの鉄の有効利用を図ろうとする案も検討されている。

今後、具体的に、いかなる手段・手法が用いられるかは、その時々々の経済状況、技術の進展等により決定されるものであるが、本論文で示したモデルとこれに基づく手法は、リサイクルのあり方に基づく今後の状況の総合的予測と評価、環境負荷削減と生活水準の維持・向上の両立のために求められる技術水準の明確化、社会的対応のあり方と目標の設定等に有効であるものと考えられる。

第1章においては、鉄鋼業からの二酸化炭素排出量が国内においてもまた世界的に見ても相当な割合を占めており、地球温暖化問題等への対処の観点から鉄鋼

の生産及び利用に関して早急な対策が求められていることを概説するとともに、鉄鋼の生産等に係る環境負荷の程度、リサイクルによる環境負荷削減、鉄鋼中への不純物蓄積状況等に関して現在までに行われてきた研究をまとめ、これとの関係において本論文の目的と構成を述べている。

我が国鉄鋼業は、従来から省エネルギー化の積極的な推進により粗鋼生産時のエネルギー原単位を大幅に削減してきており、二酸化炭素排出量も国際的には低い水準にある。しかしながら、これは従来型の省エネの推進による環境負荷削減の余地が必ずしも大きくないことを示しており、地球環境問題への対応が一層緊急かつ重要な課題となっている中で、今後はリサイクルの促進等鉄鋼の生産、使用及び再生すべてを含む総合的な見直しが必要となってきた。

一方、鉄鋼等の素材の生産や再生利用に関しては、個々のプロセスやリサイクルシステムの一部についての環境面からの調査研究は多く実施されてきているが、素材の生産等が及ぼす環境負荷のみならず不純物の蓄積による素材の質の劣化等をも考慮した総合的なリサイクルシステムの評価手法ははまだ提示されていない。

以上を受けて、本論文の目的と構成を概説して、その位置付けを明確にした。

第2章においては、素材ストックが一定割合で増加していく社会を対象として、リサイクルシステムのモデル化と解析を行った。まず、社会からの素材の廃棄率は新たな素材であるか再生素材であるかによらず平均的に同一であり、かつ時間的にも変化しないものとしてモデルの構築と解析を行った。ついで、素材の社会における使用期間の分布も考慮することにより、モデルの精緻化と拡張を行った。まず、新たな素材と再生素材はそれぞれ一意的に決定されるパラメータを有するガンマ分布関数に従って廃棄されるものと仮定し、素材の全体の平均的な廃棄率を求める理論式を導出した。ついで、この結果を用いて、素材ストック中及びフロー中の再生素材の割合及び不純物濃度を求める式を導出した。これにより、素材の使用期間及び回収率が素材の廃棄率、再生素材割合、不純物濃度にどのような影響を与えるかを定量的に評価することが可能となった。

第3章においては、高炉鋼及び電炉鋼の生産に係る二酸化炭素排出量を、他産業への誘発分までを含めて総合的に求めた。推計には産業連関表を用い、鉄鋼の

生産増に伴う原油、石炭等のエネルギー関連部門の生産額増加から二酸化炭素排出量を求めた。推計に当たっては、他の統計資料を用いて、取引部門による価格差及び製品の流れを考慮して産業連関表の補正を行った。これにより、電炉鋼生産に係る二酸化炭素発生量は、粗鋼生産工程までで高炉鋼の約30%、熱間圧延工程までで約42%であると推計された。

また、高炉鋼生産、電炉鋼生産及び廃材の投棄に係る誘発分までを含めた総合的な二酸化炭素排出量として、それぞれ炭素換算で458 kg C/t、136 kg C/t及び13 kg C/tの値を得た。

第4章においては、全国のスクラップヤードから採取した鉄屑中の不純物濃度の分析調査を行うとともに、鉄屑の再生処理過程における不純物混入についても調査を行った。採取した電炉鋼の鉄屑中の銅元素濃度の平均値は約0.3%、すなわち元素濃度は0.03%であり、鉄鋼製品の加工上問題を生じる可能性のあるレベルに達しつつあることが分かった。濃度分布を見ると、他の元素に比べてわずかの濃度分布のばらつきが大きかった。しかしながら、最近生産されたと考えられるサンプル中のわずかな濃度は極めて狭い範囲内に入った。また、古いと考えられる鉄屑中と新しいと考えられる鉄屑中の銅元素濃度にほとんど差はなかった。

シュレッダー処理工程及びヘビー屑等処理工程における不純物混入についても、サンプルを採取して溶解実験及び分析を行った。しかしながら、今回の実験においては、再生処理が比較的好条件下で行われたものと考えられ、我が国における再生処理過程における平均的な不純物混入率の値を得るには更なる分析調査が必要であると考えられる。

第5章においては、第2章で導出したモデル式を鉄鋼のリサイクルシステムに適用した。まず、素材の廃棄率が素材によらず、かつ時間的にも一定である場合のモデルを適用し、全鉄鋼ストック中の電炉鋼割合、電炉鋼中銅元素濃度、鉄鋼リサイクルシステムからの環境負荷の今後の推移を推計した。

ついで、社会における素材の使用期間の分布を考慮したモデルを適用したところ、現在、全鉄鋼ストック中の電炉鋼割合は約41%となっているものと推計された。また、再生過程における銅元素の混入率は、両方のモデルにおいて約0.

25%と推計された。さらに、異なる鉄鋼ストック増加率及び廃棄材の回収率に対応する鉄鋼ストック及びフロー中の電炉鋼割合及び電炉鋼中銅元素濃度を明らかにした。

最後に、社会における素材の使用期間及び回収率が電炉鋼割合、電炉鋼中銅元素濃度及び環境負荷に与える影響を定量的に評価し、それぞれの方法のメリットとデメリットを明らかにするとともに、回収率の向上にあわせて新たな素材及び再生素材の社会での平均使用期間を長期化することにより、素材の質の劣化を抑えつつ環境負荷を削減していくことが可能であることを示した。また、この結果をもとに、社会的コストを最小としつつリサイクルシステムからの総合的な二酸化炭素排出量を削減していくための方策について考察を行った。

第6章においては、素材ストックの増加率が低下していき、素材ストック量が一定値に漸近していく場合について素材リサイクルシステムの解析とその結果の鉄鋼への適用を行い、全鉄鋼ストック中の電炉鋼割合及び電炉鋼中銅元素濃度の今後の推移を推計した。また、海洋等の二酸化炭素吸収も考慮した上で、鉄鋼リサイクルシステムから排出された大気中の二酸化炭素量の今後の推移を推計した。さらに、素材の回収率が変化した場合の電炉鋼中の銅元素濃度収束値と大気中の二酸化炭素量収束値とのトレードオフ関係を定量的に明らかにした。

第7章においては、以上を総括した。

以上

本論文で用いた記号一覧

- $a_1$ : 素材の廃棄率  
 $a$ : 素材の廃棄率 (一定の場合)  
 $a_{1r}$ : 新たな素材の廃棄率  
 $a_{2r}$ : 再生素材の廃棄率  
 $b$ : 素材の回収率  
 $c$ : 加工屑発生割合  
 $f_i$ : 不純物量  
 $g$ : 不純物混入率  
 $p_1$ : 素材生産時のCO<sub>2</sub>排出量  
 $p_2$ : 素材投棄時のCO<sub>2</sub>排出量  
 $p_3$ : 素材再生時のCO<sub>2</sub>排出量  
 $q_i$ : 新たな素材の投入量  
 $r$ : 素材ストック増加率  
 $S_i$ : 素材ストック量  
 $S_{pr}$ : 新たな素材のストック量  
 $S_{rr}$ : 再生素材のストック量  
 $\bar{T}$ : リサイクルされる素材の平均累積使用期間  
 $\bar{h}$ : 単位使用期間・単位量当たりのCO<sub>2</sub>排出量  
 $H_i$ : 過去からの累積CO<sub>2</sub>排出量  
 $H_p$ : 現状の場合の過去からの累積CO<sub>2</sub>排出量  
 $T$ : 素材の平均使用期間  
 $x_i$ : 使用期間分布の変動係数  
 $E_1$ : 新たな素材の平均使用期間  
 $E_2$ : 再生素材の平均使用期間  
 $S$ : 素材ストック量の収束値  
 $R$ : 素材ストック量の収束値と初期値の差  
 $E_i$ : リサイクルシステムからの排出による大気中CO<sub>2</sub>量
- $\alpha$  及び  $\lambda$ : ガンマ分布のパラメータ  
 $\vartheta$ : 再生素材中不純物濃度 (一定値)  
 $\varphi$ : ストック中再生素材割合 (一定値)  
 $\beta$ : 素材ストック増加率の減衰率  
 $\mu$ : 海面等によるCO<sub>2</sub>吸収割合

## 謝辞

本研究を進めるに当たって終始にわたり御指導と御教示をいただきました東京大学工学部金属工学科佐藤純一教授に深く感謝の意を表します。

この論文をまとめるに当たっては、東京大学工学部金属工学科 梅田高照教授、生産技術研究所 山本良一教授、前田正史教授、工学部金属工学科 森田一樹助教授並びに同地球システム工学科 石谷久教授に御懇切な議論と助言をいただきました。ここに心からお礼申し上げます。

本研究を実施し、論文にまとめるにあたり、東京大学工学部中村達生氏（現三菱総合研究所）、同大学院生片桐広貴氏（現 日本総合研究所）及び日本鋼管テクノサービス（株）加根魯和宏氏の多大な協力がありました。

また、データの収集等に当たり、日本鉄鋼連盟、日本鉄鋼協会、日本鉄源協会、日本鉄リサイクル工業会、（株）中田屋等の御協力を得ました。

本研究の遂行及び論文の作成にご指導及びご支援をいただいた皆様方にここに心から感謝の意を表します。

戸井 朗人







# Kodak Color Control Patches

Blue Cyan Green Yellow Red Magenta White 3/Color Black

## Kodak Gray Scale

A 1 2 3 4 5 6 M 8 9 10 11 12 13 14 15 B 17 18 19



© Kodak, 2007 TM, Kodak