中国における E-waste 再生利用の総合評価

筑波大学生命環境科学研究科　　李　楊*
筑波大学生命環境科学研究科　　徐　峰
筑波大学生命環境科学研究科　　Helmut YABAR
筑波大学生命環境科学研究科　　水野谷　剛
筑波大学生命環境科学研究科　　氷鉋　揚四郎

1.　はじめに

2011 年 1 月 1 日より，中国版 WEEE 条例が施行された。これは個人経営の回収業者が厳格に管理されることを示すものである。また 2012 年 7 月 1 日から『廃棄電気電子製品処理基金徴収使用管理弁法』も正式に施行され，中国国内の家電製品などの製造業者と輸入販売業者は販売数量に応じた回収処理基金への拠出金の義務付が明確にされた。この 2 つの法規条例からも，中国における E-waste リサイクル問題が次第に重視されてきたのが分かる。しかし，回収方法や電気電子製品の使用者である消費者の義務など，多くの課題が残されている。以上の背景から，本研究では効果的な回収制度と考えられる拡大生産者責任制度とデポジット制度の導入に着目して，経済的インセンティブの視点から，中国における E-waste 回収処理システムを含んだ動的な社会経済環境モデルを構築した。このモデルを使用したシミュレーションによって，残されている課題を解決することが期待できる。

2.　社会経済環境モデル

2.1 モデルの概要

本研究で構築した社会経済モデルは，物質収支と価値循環を考慮した投入産出双対モデルを基本とし，E-waste 処理による再生金属を生産する新しい産業を加えるとともに，バージン金属と E-waste による再生金属の代替関係フロー，各部門からの二酸化炭素排出，そして環境賦課金の経済政策を新たに考慮した循環型社会経済モデルである。今回シミュレーションの期間は 2007 年-2020 年の 14 期を対象とした。モデル内には経済主体（図 1）として通常財の生産活動を行う 7 つの通常財部門，7 つの電気電子製品生産部門，8 つの金属生産部門，新たに設定する E-waste 処理による再生金属生産産業，さらに最終需要部門として家計と政府が存在する。バージン金属と再生金属の競合関係を表すため，E-waste 処理によって回収処理される再生金属は金属産業に対応し，鉄・銅・アルミなどの 8 種類，さらにその他廃棄物（処理残渣）に分けられる。

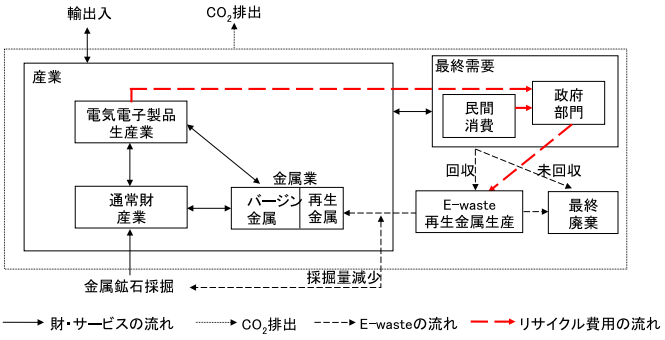

図 1：モデルにおける各経済主体間の関連図

環境政策は環境問題に対する政策手段である。大きく分けて直接規制，経済的手法，情報的手法の三つがある。金属資源枯渇が工業発展に伴い，グローバルであり，一時的なものではないという性質から，採掘量に直接規制することが適しているとは言えない。直接規制と並んでその役割が強調されてきたのが，経済的手法である。市場の力を積極的に活用する環境賦課金制度という経済的手法の導入の是非が，現在，活発に議論されている。

本研究では想定する環境賦課金に 2 種類がある。1 つは，EPR 制度の導入によって，電気電子製品メーカーに生産額あたりの従価税によって徴収するというリサイクル税である。もう 1 つは消費者にデポジット制度を導入することである。デポジット制度（図 2）とは，製品購入時に製品本来の価格に一定額を預り金（デポジット）として上乗せして販売し，使用後に使用済みの製品を所定の場所に返却すれば，購入時に徴収した預り金の一部（リファンド）を返却者に払い戻すという制度である。リファンド以外の金額は消費者負担のリサイクル料金として E-waste 処理による再生金属生産産業に使われる。この 2 種類の環境賦課金の総和は全て E-waste 処理による再生金属生産産業の運営に充てられることとした。

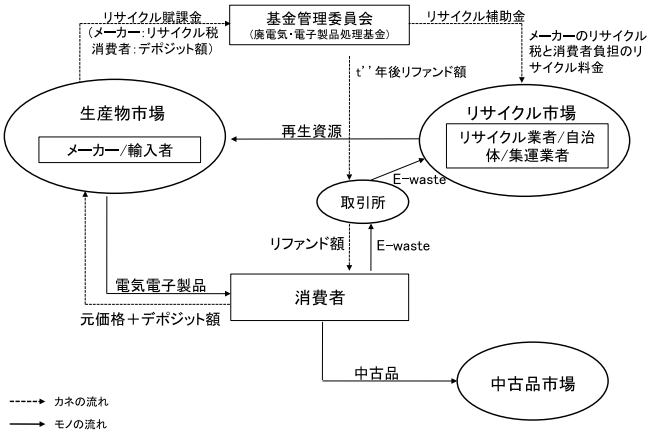

図 2：デポジット制度の概念図

以上のように二酸化炭素排出量および E-waste 最終廃棄量を制約条件とし，目的関数である GDP を最大化するための環境税と補助金の配分，E-waste の回収処理率，各産業の生産額を求めることができる。シミュレーションの実行には，米 LINDO　Systems 社の線形計画用ソフト LINGO を使用した。

2.2　主要なモデル式

シミュレーションで用いた数式等で使用した記号の意味を表 1 に示す。また数式においてバーがついたものは通常は内生変数であるが本モデルでは外生値として与えていることを強調したものである。チルダがついたものはもとのベクトルを対角行列化したものである。

表 1：記号の表現意味

記号	注釈	記号		注釈	記号	注釈
1	通常財	i	1=携帯	2=パソコン	k	品目（i）ごとの寿命期間
2	電子業		3=洗濯機	4=エアコン		1.携帯=2 年
3	バージン金属		5=テレビ	6=冷蔵庫		2.パソコン=3～5 年
4	E-waste		7=その他			3.洗濯機=11～14 年
m	金属総体	j	1=鉄	2=銅		4.エアコン=5～8 年
g	政府		3=アルミ	4=鉛		5.テレビ=8～12 年
内	内生変数		5=亜鉛	6=ニッケル		6.冷蔵庫=12～16 年
外	外生変数		7=錫	8=その他金属（レア）		7.その他=5～8 年
操	操作変数		9=処理残渣			

2.2.1 金属生産部門のフロー条件

ここでは金属を同じ種類の再生金属で代替が起きると仮定して，種類ごとの関係が成立するとしている。論文に述べた代替率は E-waste 処理由来の再生金属の量とバージン金属の生産量の比率である。即ち，再生金属が使用される時に節約されるバージン金属の割合を表す。金属総体の種類が列を形成しており，左側におけるそれぞれの種類に含まれるバージン金属と E-waste 処理産業による再生金属の総和が右側の金属需要を満たす。式 3・4 は元価値単位で金属の生産量を表している。生産額あたりの金属生産量が一致していると仮定する。

$$X_m(t) = X_3(t) + P_4^j(t) \cdot D_n^j \cdot X_4^j(t) \qquad (j = 1...8) \tag{3}$$

$$X_m(t) \geq A_{m1}X_1(t) + A_{m2}X_2(t) + A_{m3}X_3(t) + A_{m4}X_4(t) + \overline{E}_m - M_m(t) + \overline{TZ}_m \tag{4}$$

Xm(t)：金属総和の生産額，列ベクトル （内）

Dn：E-waste 回収による素材の販売額（単位：百万元/t），列ベクトル （外）

2.2.4E-waste 処理による再生金属生産産業のフロー条件

8 式は E-waste 排出量の推計式である。E-waste 排出量は製品使用寿命と消費量と関係がある。E-waste 品目ごとの廃棄率は表 2 に示す。

表 2：E-waste 品目ごとの廃棄率

年	品目	携帯	洗濯機	エアコン	テレビ	冷蔵庫	その他	パソコン			
	寿命期間 i（年）	2	11～14	5～8	8～12	12～16	5～8	平均寿命（年）	5 年	4 年	3 年
1991	16					25%					
1992	15					30%					
1993	14		10%			20%					
1994	13		35%			15%					
1995	12		40%		35%	10%					
1996	11		15%		25%						
1997	10				15%						
1998	9				15%						
1999	8			35%	10%		35%				
2000	7			40%			40%				
2001	6			15%			15%				
2002	5			10%			10%	3.5	5%	40%	55%
2003	4							3.35	0%	35%	65%
2004	3							3.3	0%	30%	70%
2005	2	100%						3.2	0%	20%	80%
2006	1							3.1	0%	10%	90%
2007	0							3	0%	0%	100%

$$S(t)\cdot\tilde{D}_e = P_2(t)\cdot\tilde{C}_2(t) \quad (5)$$

$$D_e = D_{eg} + \tau_c^r \quad (6)$$

$$\tau_c^r = F_{esri} + A_{esri} \quad (7)$$

$$EWT_c(t) = S(t')\times P_k + S(t)\times P_k \quad (8)$$

$$R_{c-ewaste}(t) = Ae\cdot{}^{t}EWT_c(t) \quad (9)$$

$$X_4(t) \le R_{c-ewaste}(t) \quad (10)$$

S(t)：品目ごとの電気電子製品の消費台数，行ベクトル （内）

De：品目ごとの新価格（単位：百万元/台），行ベクトル （外）

P2(t)：電気電子製品製造業の価格率，行ベクトル （内）

Deg：品目ごとの元価格（単位：百万元/台），行ベクトル （外）

τ_c^r：デポジット額（単位：百万元/台），行ベクトル （外）

Fesri：品目ごとのリファンド額（単位：百万元/台），行ベクトル （外）

Aesri：品目ごとの消費者負担のリサイクル料金（単位：百万元/台），行ベクトル （外）

S(t')：品目ごとの t'年前の消費台数，行ベクトル （内）

EWTc(t)：品目ごとの排出台数，行ベクトル （内）

Pk：品目ごとの排出率，スカラー （外）

Rc-ewaste(t)：素材別回収可能の金属量，列ベクトル （内）

Ae：品目ごとの 1 台あたりの内訳，行列 （外）

2.2.8E-waste 処理部門の価値バランス

$${}^{t}D_n\cdot\tilde{P}_4(t)\cdot\tilde{X}_4(t) + l\cdot RI(t) \le P_1(t)A_{14}\tilde{X}_4(t) + P_2(t)A_{24}\tilde{X}_4(t) + P_m(t)A_{m4}\tilde{X}_4(t) + D_w\cdot\tilde{X}_4(t) + Y_{h4}(t) + \delta_4\tilde{X}_4(t) + \tau_4\tilde{X}_4(t) \quad (13)$$

P4(t)：E-waste 処理による再生金属生産産業の価格率，行ベクトル （内）

Dw：最終廃棄物埋め立て 1 トンあたりの単価（単位：百万元/t），行ベクトル （外）

Dn：E-waste 回収による素材の販売額（単位：百万元/t），列ベクトル （外）

RI(t)：品目ごとの環境賦課金，スカラー （内）

2.2.9 環境賦課金

リサイクル税とデポジット額の総額は E-waste 処理による再生金属生産産業の運営費に充てられる。環境賦課金の総額は 9 種類の E-waste 内訳に自動的に配分する。

$$RI(t)=\tau_2^r\cdot P_2(t)X_2(t)+\tau_c^r\cdot {}^tS(t)-l\cdot {}^tF(t'') \quad (20)$$

$$F(t'')=F_{esri}\cdot \tilde{EWT}_c(t) \quad (21)$$

RI(t)：リサイクル賦課金総額，スカラー （内）

τ_2^r：電気電子製品生産者の負担するリサイクル税率（%），スカラー （内）

τ_c^r：品目ごとのデポジット額（単位：百万元/台），行ベクトル （外）

F(t")：品目ごとの t"年後のリファンド額，行ベクトル （内）

Fesri：品目ごとのリファンド額（単位：百万元/台），行ベクトル （外）

EWTc(t)：品目ごとの排出台数，行ベクトル （内）

2.2.11 民間消費

民間消費部門の可処分所得は, 一般的には国民所得の合計から直接税を控除したものになるが, ここでは E-waste リサイクル料金が強制的に課せられるため，税金と同じ扱いとし，所得から控除することとした。コブ・ダグラス型の消費関数を仮定することにより，可処分所得のうちそれぞれの財に対するコストのシェアは一定となる。可処分所得から貯蓄を除いたものはすべて消費に充てられる。可処分所得に貯蓄率を乗じたものが民間貯蓄になる。

$$Y_d(t)=(1-\tau^d)\left\{l^tY_{h1}(t)+l^tY_{h2}(t)+l^tY_{h3}(t)+l^tY_{h4}(t)-A_{esri}\cdot {}^tS(t)\right\}+l\cdot {}^tF(t'') \quad (24)$$

$$P_1(t)\tilde{C}_1(t)=Y_d(t)\alpha_1 \quad (25)$$

$$P_2(t)\tilde{C}_2(t)=Y_d(t)\alpha_2 \quad (26)$$

$$S^p(t)=\beta Y_d(t) \quad (27)$$

$$l^t\alpha_1+l^t\alpha_2+\beta=1 \quad (28)$$

Yd(t)：可処分所得，スカラー （内）

τ^d：直税率，スカラー （外）

α_1：民間消費部門の通常財に対する費用シェア，行ベクトル（1*7） （外）

α_2：民間消費部門の電気電子製品製造業に対する費用シェア，行ベクトル（1*7） （外）

Sp(t)：民間貯蓄，スカラー （内）

β：貯蓄率，スカラー （外）

l：集計ベクトル，行ベクトル （外）

2.2.12 二酸化炭素の排出量制約

2009 年，中国政府は 2020 年までの二酸化炭素の排出削減をめぐる行動目標を発表し，GDP1 万元あたり（単位 GDP）の二酸化炭素排出量を 2005 年比で 40%から 45%削減すると発表した。またこの数値を拘束力をもった指標として，国民経済と社会発展の中・長期プランに組み込むとした。2005 年，中国の GDP は 19 万億元であり，二酸化炭素の排出量は約 58 億トンであった。単位 GDP の二酸化炭素排出量は 3.05405t-CO2/万元であると推計した。この値の 40%から 45%削減すると，単位 GDP の二酸化炭素排出量は 1.67973-1.83243t-CO2/万元の間である。しかし，この原単位が小さくなったとしても，二酸化炭素の総排出量が減少するとは限らない。本研究では各ケースに 2 種類の制約を設定した。一つの二酸化炭素制約は単位 GDP の二酸化炭素排出量は 1.67-1.83t-CO2/万元の間である。もう一つは 14 期の二酸化炭素排出量をシミュレーション基準年より 2 倍，1.5 倍少ないものと設定した。

$$GW(14)=W_{GHG}(14)/GDP(14) \quad (39)$$

$$\frac{W_{GHG}^{2005}}{GDP_{2005}}\times(1-45\%)\le GW(14)\le\frac{W_{GHG}^{2005}}{GDP_{2005}}\times(1-40\%) \quad (40)$$

GW(14)：2020 年（14 年目）単位 GDP あたり CO2 排出量，スカラー　　（内）
WGHG2005：2005 年中国における温室効果ガス総排出量，スカラー　　（外）
GDP2005：2005 年中国 GDP，スカラー　　（外）

2.2.13 目的関数

$$Max \qquad GDP(t)=V_1X_1(t)+V_2X_2(t)+V_3X_3(t)+V_4X_4(t) \tag{45}$$

$$\sum_{t=1}^{14}\left(\frac{1}{1+\rho}\right)^{t-1}GDP(t) \qquad (\rho=0.05) \tag{46}$$

ρ ：社会割引率，スカラー　　（外）
V：付加価値率　行ベクトル　　（外）

2.3 シミュレーションケースの設定

制約条件の下，目的関数 GDP を最大化するための電気電子製品メーカー負担の最適なリサイクル税率，電気電子製品消費量，E-waste 排出量，バージン金属と再生金属の代替関係，各産業の生産額を明らかにするため，シミュレーションは表 3 について実施した。

表 3：各シミュレーションで考慮したパラメータ

Case		E-waste	CO_2 制約 1.67-1.83	CO_2 制約 2.0	CO_2 制約 1.5	メーカー リサイクル税	消費者 デポジット額
Case0	Case0(0)		有				
	Case0(1)			有			
	Case0(2)				有		
Case1	Case1(0)	有	有			有	
	Case1(1)	有		有		有	
	Case1(2)	有			有	有	
Case2	Case2(0)	有	有			有	有
	Case2(1)	有		有		有	有
	Case2(2)	有			有	有	有

3.E-waste 処理による再生金属業と環境賦課金導入の影響

3.1 金属の代替効果および最適なリサイクル税率

8 つの E-waste 処理による再生金属の中で生産が起きたのはニッケル，錫，その他金属（レアメタル）のみであった。これらの E-waste 処理による再生金属には他の再生金属に対する経済的あるいは環境面での優位性があったためと考えられる。図 3 から 5 は二酸化炭素制約ごとの生産の起きた 3 つの再生金属の，バージン金属からの代替状況を示す。

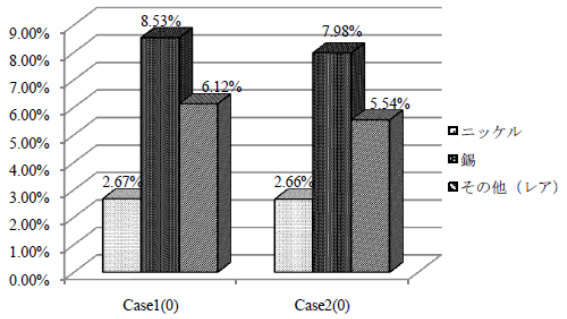

図 3：CO21.67-1.83t-CO2/万元の間を設定したときの金属代替状況

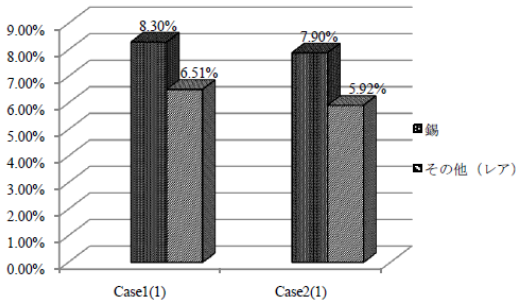

図 4：CO22 倍以内を設定したときの金属代替状況

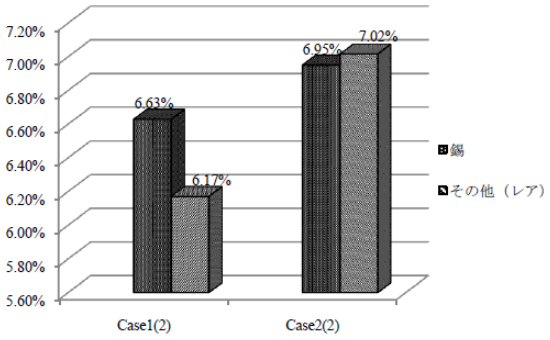

図 5：CO21.5 倍以内を設定したときの金属代替状況

錫とその他（レアメタル）については明確な代替が見られた。ニッケルは二酸化炭素排出量が 1 期目の 1.5 倍より少ないという制約の場合，バージン金属との代替関係が起きたが，制約が厳しくなるにつれて，代替関係が起きない。他の E-waste 処理による回収された 6 種類の金属量は対応するバージン金属の生産量と比べ，割合が少ない。また，処理コストや再生金属の販売額などの面においても効率がよくなくて代替関係が起きない。さらに，二酸化炭素排出量の制約が厳しくなって，生産量が低減していることから，排出量制約により二酸化炭素の排出原単位の小さな産業が有利になるような産業構造の変化が起きたものと考えられる。再生ニッケル，再生錫，再生その他金属（レアメタル）の二酸化炭素排出量もバージン金属生産時の排出量が少なくて，代替が起きたという結果が得られた。

図 5 に示し，二酸化炭素排出量の制約が厳しくなるにつれに，その他金属（レアメタル）の代替率は Case1（リサイクル税のみ導入した）より顕著である。デポジット制度の導入に従って，電気電子製品の消費量も廃棄量も下がったが，環境賦課金の総和が上がって，二酸化炭素排出量の厳格な制約のもとで，二酸化炭素の排出原単位の小さな再生金属，特に価値高いレアメタルが多く代替するという結果が得られた。Case1 と Case2 の最適なリサイクル税率において，二酸化炭素排出量の制約によって，求めたリサイクル税率も違う。Case1 における 3 つの二酸化炭素排出量制約のもとで求めたリサイクル税率はそれぞれ 1.21%，1.13%，1.19%である。Case2 において，デポジット制度の導入で消費者を一部分の E-waste リサイクル費用に負担させたために，電気電子製品メーカー負担のリサイクル税が下がった。3 つの二酸化炭素排出量制約のもとで求めたリサイクル税率はそれぞれ 0.86%, 0.77%, 0.72%である。

文　献

1) 氷鉋揚四郎（1995）環境質プログラミングモデルによる環境付加価値税の導出.地域学研究, 26（1）,181-187.
2) 水野谷剛・氷鉋揚四郎（1999）日本における大気汚染物質削減と最適税政策.日本地域学会第 36 回年次大会論稿集， 375-382.
3) Hongxin Li, & Boying Fu. (2004). General equilibrium analysis and application pattern inquiry to environmentaltaxation. *China Population, Resources and Environment*, 3, 21-24.
4) 内田晋・氷鉋揚四郎（2006）廃棄物のエネルギー利用促進政策の評価．地域学研究, 36(1), 21-35.
5) Jinhui Li, & Xuefeng Wen. (2006). *E-waste treatment technology*. China Environmental Science Press. (Chapter1). pp.30-45 (Chinese).
6) 吉田文和･吉田晴代（2008）中国の循環経済:再生金属産業と家電リサイクルを中心に．環境経済･政策研究, 1(2), 14-25.
7) Min Niu, Liangliang He, & Jie Jiang. (2008). Study on the shortage and reconstruction of Chinese ecological taxsystem. *Journal of Sustainable Development*, 1 (2), 86-90. [Online] Available: http://www.ccsenet.org/journal/index.php/jsd/article/view/1343 (accessed October 21, 2008)
8) China National Bureau of Statistic. (2009). *Input-Output Table of China 2007*. Beijing, China: China StatisticsPress.
9) China Nonferrous Metals industry Association. (2009). *The Yearbook of Nonferrous Metal Industry of China2009*. (Chapter “Statistics of Nonferrous Metals Industry”). pp.626-636 (Chinese).
10) China Metallurgical Industry Press. (2009). *The Yearbook of Steel Industry of China 2009*. (Chapter 4).pp.391-405, (Chinese).
11) 内田晋・氷鉋揚四郎（2010）習熟－環境評価サイクルを考慮した住宅用太陽光発電の普及促進政策の総合評価．地域学研究, 40(2), 277-292.
12) 寺園淳（2010）循環資源の越境移動の実態と中古家電・金属スクラップの事例にみる適正管理方策．新世代法政策学研究, 9, 77-104.
13) 李秀徹（2010）東アジアの環境賦課金制度，昭和堂.