

地域ゼロエミッションをめざした産業ネットワーク設計支援ツールの開発

後藤尚弘*・迫田章義**

摘 要

地域ゼロエミッションを実現するには、資源の有効利用と環境負荷物質最小化のために地域における人間・産業活動の物質フローを最適化することが必要である。そのために、ある産業から発生した未利用物質を他の産業で有効利用する産業ネットワークの構築が欠かせない。しかしながら、従来の未利用物質ごとにネットワーク先を検索し、それらを地域全体に積み上げる手法は多大な労力がかかる。本研究では地域の全産業から発生する未利用物質の産業ネットワークを簡易に設計するツールを開発した。同ツールは、まず、統計資料からの地域の物質フローを推計する。さらに、その推計を用いて、各産業の未利用物質及び産出物質の特性を比較すること、各産業が未利用物質中の受入不可能な成分を考慮すること、各産業の受入可能な未利用物質の排出形態を考慮することにより産業ネットワークの候補を検索するものである。さらに、同ツールはネットワーク構築による未利用物質最終処分削減量を推計することができる。本研究において開発した手法による産業ネットワーク設計結果が、現状の再資源化を含んでいたことから、本手法が、ネットワーク先の産業を選び出すスクリーニングに適用できることが示された。さらに、本ツールを愛知県に適用することにより地域ゼロエミッションの可能性を示唆することができた。

キーワード: 地域ゼロエミッション、物質循環、産業ネットワーク

1. はじめに

地域ゼロエミッションとは資源・エネルギーの有効利用を高め、人間活動から排出される環境負荷を最小にすることである。地域ゼロエミッションを実現するためには、地域における人間・産業活動の物質フローを最適化することが重要であり、そのためには地域の物質フローの現状を把握することが第一歩となる。著者らは産業連関表から食品関連産業の物質収支を簡易に推計する手法を開発し¹⁾、同手法を愛知県の全産業に適用し、愛知県の物質収支を推計した²⁾。こうして推計された地域の物質フローを最適化しゼロエミッションを実現するために次に必要となることは、産業活動から排出された未利用物質を他の産業で有効利用する産業ネットワークを構築することである。

各産業からの未利用物を他産業で有効利用するという「産業ネットワーク」の事例はこれまでに多くある³⁾。これらの事例は個々の未利用物質ごとに構築されたものである。様々な地域で地域ゼロエミッションを実現するためには、その地域のすべての人間・産業活動を含めた物質フロー考慮して、地域全体にとって最適な物質フローを設計する取り組みが重要となる。その場合に、未利用物質ごと

に産業ネットワーク構築し、それを全産業について積み上げるのでは労力がかかる上に、全体を見渡しにくく、最適な地域の物質フローの理解と改善までには至らないであろう。すなわち、より簡易に地域の産業ネットワークを設計する手法とツールが望まれる。

本研究は以上のような要求に合う地域産業ネットワーク設計支援ツールを開発することを目的とした。本ツールの特徴は次に示す通りである。

公表されている産業連関表に基づいて産業ネットワークを設計するツールであるため、様々なレベルの地域(全国、県、市区町村)に適用可能である。

産業ネットワーク構築による地域からの未利用物質処分の削減量を推計することが可能である。

さらに、本研究では本ツールを適用するモデル地域として愛知県を選択し、同県内での産業ネットワークの具体例とエミッション削減効果について検討を行った。

2. 産業ネットワーク設計支援ツール

2.1 構成

産業ネットワーク設計は次の3つの作業で構成されている。

地域物質フローの推計

統計データ(産業連関表)を産業間の物質フロー、元

2000年 月 日受付、2000年 月 日受理

* 豊橋技術科学大学エコロジー工学系、〒441-8580 豊橋市天伯町雲雀ヶ丘1-1

** 東京大学生産技術研究所 〒106-8558 東京都港区六本木7-22-1

素フローに変換する。

産業ネットワークの設計

産業間の元素フローから各産業の未利用物の元素組成と各産業のアウトプットの元素組成を比較し、類似している場合はネットワークが構築されるとする。

ネットワーク構築による未利用物処分量の推計

未利用物有効利用による直接未利用物処分量の減少（直接削減） 未利用物代替によるバージン材使用減少に伴うバージン材生産産業からの未利用物発生量の減少（間接削減）を推計する。

以下に、それぞれの作業（手順）の詳細について述べる。

2.2 地域物質フローの推計

地域の物質フローの推計は、まず産業連関表に記載の産業間のキャッシュフローにインプット（投入原材料）およびアウトプット（産出製品）の各々の取引物質の適切な重量単価を設定することにより、物質フローに換算し、さらに各取引物質の元素組成を設定することにより、元素フローを推計した。また、ある産業のインプットとアウトプットの差を未利用物質と定義した。すなわち、ここではキャッシュフローを伴わない物質の流れは「廃棄」されたものと定義した。したがって、例えば無償で他産業へ供給されるものは「排出」と算出され、あるいはもともと取引の対象外であるような物質は「排出」されていても計上されないという問題を含んでいる。この問題に注意してこのツールは使われるべきであるが、この点については後に考察を加えている。

本研究では著者らが推計した愛知県における物質フロー²⁾を基に、各産業のアウトプットの元素組成を設定し、元素の物質フローを推計した。

各産業のインプットとアウトプットの元素組成の設定方法を以下に示す。

- 1) 全国の産業連関表⁴⁾の部門別品目別国内生産額表より各産業のアウトプット（産出製品）についてどのような物質として代表されうる物流であることを調べる。ここでの産業分類は基本分類に基づく。Table 1 に食品関連産業以外の産業についての代表物流物質を示す。
- 2) 各製品の元素組成と部門別品目別国内生産額表に記載されている生産数量から、各産業からのアウトプット中に含まれる平均元素組成を算出する。Table 2 に本研究で設定した統合小分類の各産業のアウトプットの元素組成を示す。
- 3) 部門別品目別国内生産額表にアウトプットの記載のない産業については、その産業へ投入される原材料中の元素組成を、その産業から産出される製品の元素組成とした。投入に含まれる炭素の中で、石炭・石油産業から投入される炭素は、各産業の

アウトプットの原材料としてではなく、燃料として利用される炭素分であるから炭酸ガスとして排出されるとし、その炭素量を差し引いて原材料中の元素組成を決定した。但し、石炭・石油産業から化学産業、石炭・石油製品産業へ投入される炭素はアウトプットの原材料として使用されるものとした。

さらに、各産業へのインプット I とアウトプット O の差を未利用物質 W と定義した。また、インプットの元素組成 $e_{i,i}$ とアウトプットの元素組成 $e_{i,o}$ の差から未利用物の元素組成 $e_{i,w}$ を推計した。

$$W = I - O \quad (1)$$

$$e_{i,w} = (I \times e_{i,i} - O \times e_{i,o}) / W \quad (2)$$

2.3 産業ネットワークの設計

産業ネットワークの設計作業は Fig.1 に示すように3つのステップに分解されている。

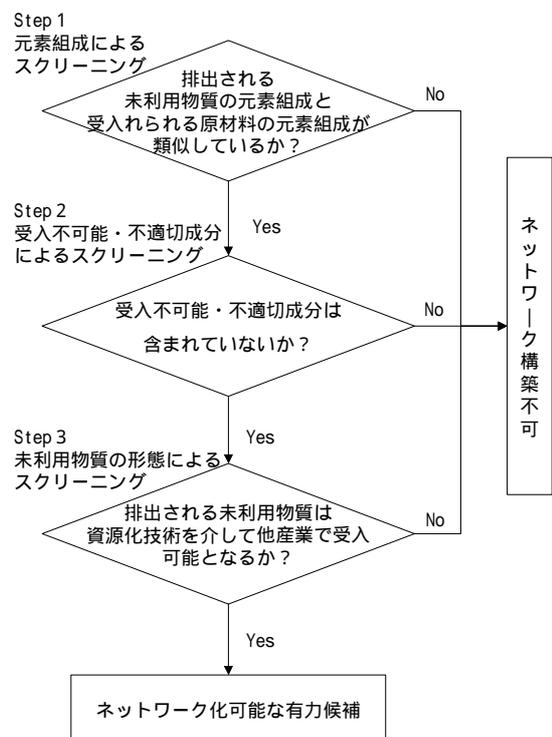


Fig.1 産業ネットワーク設計支援ツールの構成

元素組成の類似性によるスクリーニング（Step1）作成した物質フロー及び元素フローを用いて、各産業における未利用物質とインプット・アウトプットのデータを用いた産業ネットワークの設計を行った。Fig.2 に産業ネットワーク設計の Step 1 の概念を示す。A 産業の産業ネットワークを考慮する場合、A 産業から排出される未利用物質の元素組成と類似する他産業への投入原材料を検索し、仮に A 産業の未利用物質と B 産業のアウトプットの元素組成が類似している場合、A 産業の未利

Table 1 各産業のアウトプット（産出製品）の代表物流物質

産業	アウトプット（産出製品）	代表させる物質	文献
林業	すべての生産品	セルロース	
鉱業	鉄鉱石	Fe 70%	5)
	石灰石	CaCO ₃	
	けい石、けい砂	SiO ₂	
	ドロマイト	CaCO ₃ ・MgCO ₃	
	ろう石	パイロフィライト Al ₂ O ₃ ・4SiO ₂ ・H ₂ O	
	粘土	カオリナイト Al ₂ O ₃ ・2SiO ₂ ・2H ₂ O	
	長石	K ₂ O・Al ₂ O ₃ ・6SiO ₂ , Na ₂ O・Al ₂ O ₃ ・6SiO ₂ , CaO・Al ₂ O ₃ ・6SiO ₂	6)
	陶石	SiO ₂ , Al ₂ O ₃ ・2SiO ₂ ・2 H ₂ O	
	カオリン	Al ₂ O ₃ ・2SiO ₂ ・2 H ₂ O	
	滑石	MgSi ₄ O ₁₀ (OH) ₂	
	石油	C:84% O:1% H:12% N:1% S:2%	
	石炭	原料炭の組成を歴青炭の組成と同じと仮定	
	(原料炭)	C:85% O:7% H:6% N:2%	7)
	(無煙炭)	C:90% O:3% H:4% N:2% S:1%	
(亜炭)	C:65% O:28% H:5% N:1% S:1%		
繊維製品	綿・麻	セルロース	
	毛	ケラチン	
パルプ・紙・木製品	すべての製品	セルロース	
化学製品			8)
石油・石炭製品	石油製品	鉱業の石油の元素組成と同じと仮定	
	石炭製品	鉱業の石炭の元素組成と同じと仮定	
プラスチック製品	プラスチックフィルム・シート	ポリエチレン・ポリプロピレン・ポリ塩化ビニル・ポリ塩化ビニリデン	7)
	プラスチック板・管・棒	ポリ塩化ビニル・ポリメタクリル酸メチル	
	プラスチック発泡製品	ポリスチレン	
その他の窯業・土石製品	板ガラス・安全ガラス	ソーダ石灰ガラス (SiO ₂ : 74 % Al ₂ O ₃ : 1 % CaO, MgO : 9.5 % Na ₂ O , K ₂ O : 15.5 %)	9)
	セメント	C ₃ S(3CaO・SiO ₂) : 50% C ₂ S(2CaO・SiO ₂) : 25% C ₃ A(3CaO・Al ₂ O ₃) : 9% C ₄ AF(4CaO・Al ₂ O ₃ ・Fe ₂ O ₃) 9%	10)
鉄鋼・非鉄金属	鋼	Fe : 98% C : 2%	
	鋳鉄	Fe : 95.5% C : 3% Si : 1.5%	
	非鉄金属	銅 : Cu 100% 鉛 : Pb 100% 亜鉛 : Zn 100% はんだ : Pb38% アルミナ : Al ₂ O ₃ 100% 水酸化アルミ Al(OH) ₃ 100%	11)
電気機械	テレビ : 25kg/台、冷蔵庫 : 59kg/台、洗濯機 : 25kg/台、エアコン : 51kg/台 元素組成については 1993 年製の値を使用。		12)
自動車	自動車	1360 kg 級材料構成比の値を使用。	12)
その他の製造工業製品	タイヤ・チューブ	SBR・NBR・天然ゴム（ポリイソプレン）	

用物質は、B 産業の製品（=C 産業の原材料）と代替可能であるとした。すなわち、B 産業から C 産業への物質フローに A 産業の未利用物質が代替可能であり、産業ネットワークが可能であるとした。

未利用物質 $e_{i,w}$ がアウトプット $e_{i,o}$ と類似するための

条件は、式(3)のように未利用物質の元素組成がアウトプットの元素組成の $1 \pm \varepsilon$ 以内であるとした。

$$e_{i,o} \times (1 - \varepsilon) \leq e_{i,w} \leq e_{i,o} \times (1 + \varepsilon) \quad (3)$$

また、いずれかの元素組成が類似していれば産業ネットワークが可能であるとした。

Table 2-2 各産業のアウトプット（産出製品）の元素組成一覧（その2）

統合小分類	C	N	O	H	Cl	S	Fe	Si	Ca	Al	Mg	Na	K	P	Cu	Pb	Zn
家具・装備品	44.4	-	49.4	6.2	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
パルプ	44.4	-	49.4	6.2	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
洋紙・和紙	44.4	-	49.4	6.2	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
その他の紙	44.4	-	49.4	6.2	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
紙製容器	44.4	-	49.4	6.2	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
その他の紙加工品	44.4	-	49.4	6.2	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
出版・印刷	44.4	-	49.4	6.2	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
化学肥料	4.9	56.4	18.5	11.3	-	0.9	-	-	5.4	-	-	-	-	2.5	-	-	-
ソーダ工業製品	1.0	-	17.8	1.2	56.4	-	-	-	0.1	-	-	23.5	-	-	-	-	-
その他の無機化学基礎製品	3.3	29.1	52.7	0.5	1.6	6.6	0.7	-	0.5	0.7	-	0.7	0.4	0.2	-	0.1	0.2
石油化学基礎製品	87.8	-	-	12.2	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
有機化学中間製品	52.8	2.3	18.5	5.8	20.5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
合成ゴム	86.8	0.9	-	9.1	3.2	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
その他の有機化学基礎製品	58.6	-	20.5	8.6	12.3	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
合成樹脂	52.5	4.3	17.9	6.9	16.1	0.07	-	-	0.1	-	-	0.2	-	0.03	-	-	-
化学繊維	51.1	3.0	19.4	7.1	18.5	0.3	0.01	-	0.1	0.01	-	0.1	-	-	-	-	-
医薬品	31.2	5.1	27.4	4.4	15.2	1.0	0.1	1.2	2.5	0.1	0.08	3.9	0.3	0.1	-	0.01	0.03
石鹼・界面活性剤・化粧品	40.0	4.3	29.9	5.6	11.5	0.4	0.04	0.4	0.1	0.1	0.02	0.8	0.1	0.01	-	-	0.01
塗料・印刷インキ	34.2	12.7	31.2	4.6	7.0	2.1	0.2	0.2	1.4	0.2	-	0.2	0.1	0.1	-	0.03	0.1
写真感光材料	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
農薬	32.0	5.5	26.8	4.7	17.8	0.3	0.03	0.3	0.3	0.2	0.02	1.04	0.04	-	-	-	-
その他の化学最終製品	36.2	8.3	23.8	5.6	13.8	0.4	0.04	0.1	0.7	0.04	-	0.98	0.03	0.1	-	-	0.03
石油製品	84.0	1.0	1.0	12.0	-	2.0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
石炭製品	83.1	1.9	9.1	5.8	-	0.2	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
プラスチック製品	65.0	-	5.1	8.7	21.2	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
タイヤ・チューブ	90.3	-	-	9.7	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
その他のゴム製品	44.9	4.7	21.9	6.7	5.3	0.81	0.08	0.28	1.64	0.1	0.02	0.09	0.06	0.02	-	0.01	0.03
革製履物	47.4	2.5	30.2	8.9	3.6	0.25	0.01	-	0.01	0.01	-	0.01	-	-	-	-	-
板ガラス・安全ガラス	-	-	46.3	-	-	-	-	34.6	4.0	0.5	2.4	4.6	7.8	-	-	-	-
ガラス繊維・同製品	-	-	46.3	-	-	-	-	34.6	4.0	0.5	2.4	4.6	7.8	-	-	-	-
その他のガラス製品	-	-	46.3	-	-	-	-	34.6	4.0	0.5	2.4	4.6	7.8	-	-	-	-
セメント	-	-	33.0	-	-	-	2.1	10.3	44.9	2.8	-	-	-	-	-	-	-
生コンクリート	-	-	33.0	-	-	-	2.1	10.3	44.9	2.8	-	-	-	-	-	-	-
セメント製品	-	-	33.0	-	-	-	2.1	10.3	44.9	2.8	-	-	-	-	-	-	-
陶磁器	11.5	0.1	47.8	0.3	0.2	0.06	-	4.7	33.9	0.2	0.3	0.1	-	-	-	-	0.01
その他の窯業・土石製品	23.6	0.4	34.2	2.3	0.3	0.31	0.03	3.3	23.2	0.1	0.2	-	-	-	-	-	0.02
銑鉄・粗鋼	2.0	-	-	-	-	-	98.0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
鉄屑	2.0	-	-	-	-	-	98.0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
熱間圧延鋼材	2.0	-	-	-	-	-	98.0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
鋼管	2.0	-	-	-	-	-	98.0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
冷延・めっき鋼材	2.0	-	-	-	-	-	98.0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
鋳鍛製品	3.0	-	-	-	-	-	95.5	15.0	-	-	-	-	-	-	-	-	-
その他の鉄鋼製品	2.0	-	-	-	-	-	98.0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
非鉄金属製錬・精製	-	-	-	-	-	-	-	-	-	48.7	-	-	-	-	20.4	6.5	14.4
非鉄金属屑	-	-	-	-	-	-	-	-	-	48.7	-	-	-	-	20.4	6.5	14.4

Table 2-3 各産業のアウトプット（産出製品）の元素組成一覧（その3）

統合小分類	C	N	O	H	Cl	S	Fe	Si	Ca	Al	Mg	Na	K	P	Cu	Pb	Zn
電線・ケーブル	8.9	0.4	4.6	1.2	1.2	0.1	3.4	1.3	0.2	42.3	0.1	0.2	0.3	-	17.7	5.6	12.5
その他の非鉄金属製品	9.6	0.2	6.2	1.1	0.03	0.1	0.5	0.6	4.0	42.1	0.03	-	-	-	17.6	5.6	12.5
建設用金属製品	5.1	0.2	3.7	0.4	0.05	0.09	86.8	1.3	2.2	0.05	0.02	-	-	-	0.01	-	0.01
建築用金属製品	11.8	0.1	15.9	1.1	0.06	0.2	58.6	1.9	10.0	0.06	0.1	0.07	0.1	-	0.01	-	-
暖厨房装置	6.1	0.1	7.0	0.5	0.1	0.07	80.2	1.9	2.9	0.3	0.1	0.2	0.3	-	0.09	0.03	0.06
その他の金属製品	9.0	0.2	4.2	0.9	0.09	0.2	81.2	0.7	2.3	0.68	0.03	0.04	0.05	-	0.26	0.08	0.2
原動機・ボイラ	11.8	0.2	5.1	1.3	0.2	0.2	72.8	5.2	3.1	0.03	0.03	-	-	-	-	-	0.03
運搬機械	6.6	0.2	3.9	0.7	0.1	0.1	83.0	3.5	1.3	0.03	0.1	0.2	0.31	-	-	-	-
冷凍機・温湿調整装置	14.2	0.3	14.5	1.5	0.4	0.2	53.0	7.26	7.6	0.1	0.2	0.3	0.4	-	0.01	-	0.02
その他の一般産業機械	13.9	0.3	15.1	1.4	0.2	0.2	55.9	3.0	10.0	0.08	0.09	-	-	-	0.01	-	0.02
鉱山・土木建設機械	10.9	0.2	3.0	1.2	0.1	0.2	78.5	4.4	1.3	0.03	0.04	0.06	0.1	-	-	-	0.01
化学機械	9.3	0.4	5.5	0.9	0.4	0.2	76.8	3.4	3.0	0.04	0.03	0.05	0.01	-	-	-	0.01
産業用口ポット	23.7	0.6	3.8	3.1	0.2	0.6	62.4	3.8	1.8	0.03	0.01	-	-	-	-	-	0.01
金属加工・工作機械	8.7	0.2	4.7	0.9	0.1	0.1	76.9	5.6	2.7	0.03	0.02	-	-	-	-	-	-
その他の特殊産業用機械	13.0	0.3	10.2	1.3	0.4	0.2	63.5	4.3	6.3	0.26	0.06	0.03	0.01	-	0.09	0.03	0.08
その他の一般機械器具及び部品	8.7	0.1	9.9	0.7	0.2	0.1	67.7	5.5	6.4	0.3	0.06	0.04	-	-	0.09	0.03	0.07
事務用機械	14.3	0.7	28.8	1.9	2.5	0.2	22.7	17.7	3.9	0.3	1.1	2.4	3.5	-	-	-	0.02
サービス用機械	15.2	0.4	18.3	1.9	0.6	0.2	49.1	9.1	2.1	0.1	0.5	0.9	1.5	-	0.01	-	0.02
民生用電気機械	21.0	0.78	18.1	2.7	1.7	0.3	37.8	6.3	4.5	2.4	0.4	0.8	1.3	-	1.0	0.3	0.7
電子計算機・同付属装置	33.7	0.97	24.2	4.3	5.0	0.4	15.6	4.3	10.0	0.1	0.2	0.8	0.4	-	0.01	-	0.03
通信機械	29.1	1.15	28.8	3.5	3.6	0.4	14.9	2.8	14.1	0.3	0.2	0.7	0.2	-	0.09	0.03	0.1
電子応用装置	18.9	0.77	36.9	2.3	0.9	0.4	5.0	16.3	11.4	0.4	1.1	2.2	3.3	-	0.06	0.02	0.05
電気計測器	30.2	0.6	23.5	3.7	1.1	0.5	20.2	5.1	13.2	0.7	0.2	0.3	0.3	-	0.2	0.08	0.2
半導体素子・集積回路	33.5	2.0	27.2	4.1	3.2	0.7	4.7	5.1	10.5	3.8	0.3	0.7	0.8	-	1.6	0.5	1.3
その他の電子・通信機器	3.5	0.1	44.4	0.4	0.1	0.1	0.9	30.0	6.6	0.9	2.1	4.0	6.7	-	0.2	0.06	0.1
重電機器	29.5	0.5	17.5	3.6	0.5	0.6	31.4	3.1	10.8	1.3	0.1	0.05	0.04	-	0.5	0.2	0.4
その他の電気機器	18.3	1.0	11.1	2.2	2.2	0.2	2.9	0.7	3.6	0.02	0.03	0.2	0.03	-	0.04	0.05	0.5
乗用自動車	6.4	0.18	2.4	0.9	1.5	-	73.9	0.9	0.1	4.8	-	0.1	0.2	-	2.3	-	-
その他の自動車	6.4	0.18	2.4	0.9	1.5	-	73.9	0.9	0.1	4.8	-	0.1	0.2	-	2.3	-	-
自動車部品・同付属品	6.4	0.18	2.4	0.9	1.5	-	73.9	0.9	0.1	4.8	-	0.1	0.2	-	2.3	-	-
船舶・同修理	16.0	0.57	12.3	2.0	0.8	0.2	63.1	2.1	2.4	0.17	0.1	0.1	0.17	-	0.06	0.02	0.1
鉄道車両・同修理	31.5	1.35	12.5	4.2	0.2	0.7	40.1	3.2	4.6	0.4	0.2	0.2	0.39	-	0.15	0.05	0.1
航空機・同修理	15.9	0.88	30.0	2.2	2.7	0.3	11.3	20.3	3.2	2.8	1.3	2.6	4.3	-	1.1	0.4	1.0
その他の輸送機械	10.5	0.28	2.9	1.1	0.5	0.1	79.6	2.9	0.7	0.9	0.04	0.1	0.1	-	0.4	-	0.03
光学機械	3.8	0.1	43.7	0.4	0.4	0.04	1.1	30.8	5.2	1.0	2.1	4.1	6.9	-	0.2	0.07	0.2
時計	10.3	0.2	35.0	1.4	0.8	0.1	15.2	23.3	3.4	0.4	1.6	3.1	5.2	-	0.04	0.01	0.04
その他の精密機械	14.4	0.4	27.5	1.58	0.7	0.2	26.4	10.9	10.3	2.1	0.7	1.3	2.1	-	0.8	0.3	0.6
玩具・運動用品	19.5	0.4	40.5	1.79	1.1	0.1	6.9	4.8	23.8	0.18	0.3	0.2	0.3	-	0.03	0.01	0.03
その他の製造工業製品	23.8	1.0	30.7	2.9	1.7	0.2	16.1	9.6	7.6	2.8	0.5	0.8	1.3	-	0.5	0.2	0.4
住宅建築	20.0	0.3	32.2	2.6	0.2	0.2	6.9	6.9	28.8	1.6	0.07	0.08	0.1	-	-	-	-
非住宅建築	17.4	0.4	30.2	2.2	0.2	0.27	7.0	8.0	32.1	1.8	0.09	0.1	0.2	-	-	-	-
建設補修	20.4	0.4	31.0	2.6	0.3	0.3	3.4	7.8	31.6	1.75	0.09	0.1	0.2	-	-	-	-
公共事業	43.1	1.0	20.4	5.5	0.6	0.7	2.3	4.7	20.4	1.2	-	-	-	-	-	-	-
その他の土木建設	51.5	1.2	18.0	6.7	0.7	0.9	2.1	3.3	14.7	0.79	0.01	-	-	-	-	-	-

以上のような方法で A 産業の未利用物質と産業ネットワーク構築可能な物質フローをすべて検索することにより、それらを A 産業の産業ネットワーク第 1 次候補とした (Step 1)。

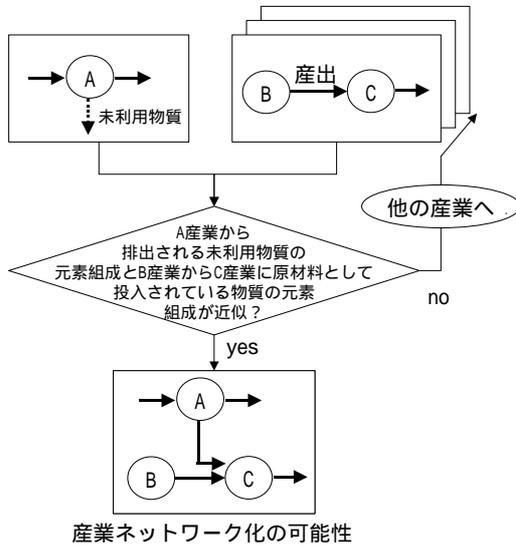


Fig.2 元素の類似性によるスクリーニングの概念

元素によるスクリーニングは未利用物質やアウトプットの元素以外の特性を考慮していないために、最も多くの産業ネットワーク候補を検索することができる。これらの第 1 次候補の中には不適切な組み合わせも多く含まれるため、以下に示すスクリーニング (Step2, Step3) をさらに加える。

受入不可能・不適切成分によるスクリーニング

未利用物質中に含まれる特定元素のために、ネットワークが結ばれない場合を想定する。本研究では農業、漁業、食品、飲料・飼料の各産業の原材料としては金属及び塩素、硫黄を受け入れることができない、繊維、衣服、木材の各産業は原材料として金属及びケイ素、カリウム、リンは受け入れることができないと仮定した。

未利用物質の排出形態によるスクリーニング

各産業から排出される未利用物質には汚泥、廃プラスチック等の様々な排出形態があり、このことはその未利用物質が他産業に受入可能かどうかの重要な判断材料である。すなわち、第 3 段階 (Step3) として、未利用物質の排出形態によって産業ネットワークのスクリーニングをすることが必要である。未利用物質の排出形態はいくつかの種類に分類される。それら各排出形態がマテリアルリサイクル (素材としての資源化)、ケミカルリサイクル (化学物質としての資源化) のいずれかのリサイクルが可能か仮定し、分類する。さらに、各産業がどのリサイクルが受入可能かを仮定することにより、各産業がどの産業からの未利用物質を受け入れることが可能かが決まる。

Table 3 に各産業から排出される未利用物質の排出形態¹²⁾及び各産業の受入可能な未利用物質の形態一覧を示す。各マス左上に各産業からの未利用物質の排出形態を、各マス右下に各産業が受入可能な未利用物質の排出形態を示す。まず、各マス左上より各産業から排出される未利用物質の排出形態を調べる。例えば、Table 3 より食品産業からの未利用物質の排出形態は 13 種類あることがわかる。次に、それらの排出形態ごとにマテリアル、ケミカルのいずれかのリサイクルが可能かを調べる。例えば食品産業から排出される、燃え殻は Table 3 最下段よりマテリアルリサイクルが可能であることがわかる。最後に、各産業がマテリアル、ケミカルのいずれかのリサイクルされた物質を受入可能か各マス右下より仮定する。燃え殻は化学、石油・石炭産業以外の産業で受入可能であることがわかる。

2.4 ネットワーク構築による未利用物質最終処分削減量の推計

ネットワーク構築後の最終処分削減は、未利用物質有効利用による最終処分量削減 (直接削減) と未利用物質の代替によるバージン原材料生産・供給業の生産規模縮小による未利用物質発生削減 (間接的削減) に 2 分して考えることができよう。廃棄物として最終処分される未利用物質の産業のネットワーク化による直接的・間接的削減の概念図を Fig.3 に示す。

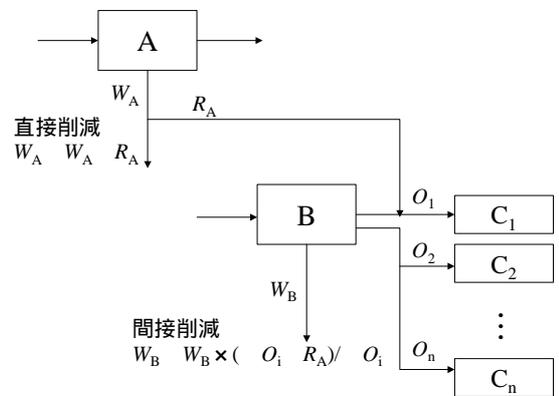


Fig.3 廃棄物として最終処分される未利用物質の産業のネットワーク化による直接的・間接的削減の概念図

直接削減

現状の物質フローでは A 産業からの未利用物質発生量を W_A 、B 産業から C_i 産業への製品出荷量を O_i とする。この B 産業から C_i 産業への製品フローが A 産業からの未利用物質に代替可能であるとすると、A 産業からの未利用物質削減可能量 R_A は次のように推計される。

1 削減可能量 R_A は B 産業から C_i 産業へのアウトプット O_i よりも少ない。

$$R_A \leq O_i \quad (4)$$

Table 3 各産業から排出される未利用物質の排出形態及び各産業の受入可能な未利用物質形態一覧

各産業から排出される未利用物質の形態  各産業の受入可能な未利用物質の形態	燃え殻	有機性汚泥	無機性汚泥	一般廃油	廃溶剤	固形油	油でい	廃酸	廃アルカリ	廃プラスチック	廃タイヤ	シュレッダーダスト	紙くず	木くず	繊維くず	動・植物性残さ	ゴムくず	金属くず	ガラス・陶磁器くず	鋳さい	コンクリート片	廃アスファルト	その他の建設廃材	ばいじん	家畜の糞尿
	農・畜産業	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
漁業	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
食料品	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
飲料・飼料	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
繊維	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
衣服	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
木材	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
家具	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
パルプ・紙	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
出版・印刷	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
化学	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
石油・石炭	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
プラスチック	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
ゴム	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
皮革	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
窯業・土石	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
鉄鋼	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
非鉄金属	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
金属	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
一般機器	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
電気機器	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
輸送機器	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
精密機器	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
その他製造業	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
建設業	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
電気・水道業	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
運輸業	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
卸・小売業	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
マテリアルサイクル																									
ケミカルサイクル																									

2 削減可能量 R_A は A 産業の未利用物質発生量 W_A よりも少ない。

3 必要な量以上の元素を C 産業は受け取ることがで (5)

きない。

$$R_A \times e_{i,W} \quad Q_i \times e_{i,O} \quad (6)$$

式(6)は次のように変形することができる。

$$R_A \quad Q_i \times r_i \quad (7)$$

ただし、 r_i はアウトプットと未利用物質の元素 i の組成比 $e_{i,W} / e_{i,O}$ を表している。

これが各元素について当てはまることから、産業ネットワーク構築による最大削減量 MR は以下のように表すことができる。

$$MR = Q_i \times r_m \quad (8)$$

ただし、 r_m はアウトプットと未利用物質の元素組成比 r_i の中で最大のものを示す。

$$r_m = \text{Min}[r_1, \dots, r_n] \quad (9)$$

ここで、A産業からの未利用物質を他産業で利用する場合、受入量の大きな1つの産業と産業ネットワークを構築する場合と、受入量の小さな複数の産業と産業ネットワークを構築するという2つの方法がある。しかしながら、産業ネットワークの受け入れ先が多ければ、その分別々の変換技術が必要となり、余計にエネルギーを必要とするので、本研究では産業ネットワークの構築先はなるべく少ない数の産業であると仮定する。

間接削減

現状のB産業からの未利用物質発生量を W_B とする。B産業から C_i 産業への物質フローを Q_i とすると、B産業の現状の生産量は O_i となる。A産業からの産業ネットワーク構築によって、B産業から C_i 産業へ移動する製品のうち、A産業からの未利用物質で R_A だけ代替すると、B産業から C_i 産業への物質移動は $Q_i - R_A$ となり、B産業の全生産は $O_i - R_A$ になる。生産規模と未利用物質発生量が比例関係にあると仮定すると、ネットワーク構築後のB産業からの未利用物質発生量 W_B' は

$$W_B' = W_B \times (O_i - R_A) / O_i \quad (10)$$

よって、このことによる間接的な削減量は

$$\begin{aligned} W_B &= W_B - W_B' \\ &= W_B \times R_A / O_i \end{aligned} \quad (11)$$

となる。

さらなる波及効果として、B産業の生産縮小によってB産業へ物質を投入していた産業群の生産縮小によるこれら産業群からの未利用物質削減が考えられる。しかしながら、本研究ではA、B産業間のネットワーク構築による効果を推計することを地域全体の未利用物質削減推計の第1歩とし、2次、3次の波及効果による間接削減は今後の課題としたい。

以上より、産業ネットワーク構築による未利用物質削減量 R_T は直接削減量と間接削減量の和であることから

$$R_T = R_A + W_B \times R_A / O_i \quad (12)$$

となる。

本研究はモデル地域として愛知県を選択し、本ツールと愛知県の産業連関表¹³⁾を用いて産業ネットワーク構築について検討を行った。

3.1 産業ネットワーク構築例

水産食料品産業の未利用物質の産業ネットワーク設計例をFig.4に示す。まず、水産食料品産業における物質収支(インプット、アウトプット、未利用物質)を推計する。次に、同産業の未利用物質と他産業のアウトプットの元素組成を比較し、両者が類似している場合にはネットワークが構築可能であると定義する。ここでは類似条件は±30%と仮定し、炭素と窒素の元素組成によるスクリーニングを行った。炭素と窒素に関してはどちらか一方が類似条件を満たせば、ネットワーク構築可能であるとした。例えば、穀類産業のアウトプットの元素組成は炭素、窒素とも水産食料品産業のそれとは類似しないためネットワーク構築不可であると考えられる。これに対して、いも・まめ類産業は炭素に関してのみ類似しているためネットワーク構築可能であるとした。

元素組成によるスクリーニングでは全184産業のうち、38産業がネットワーク候補として絞られた。次に、受入不可能・不適切成分によるスクリーニングを行った結果、38産業から36産業に絞られた。最後に、未利用物質の排出形態によるスクリーニングを行ったが、この場合は受入不可能・不適切成分によるスクリーニングと産業数は変わらなかった。

Fig.4によると、例えば水産食料品産業からの未利用物質の産業ネットワーク構築可能な産業の一つとして、飼料・有機質肥料産業が選択されていた。このことから、水産食料品産業と飼料・有機質肥料産業との間に産業ネットワーク構築可能であるといえる。(水産食料品産業がFig.2中のA産業に、飼料・有機質肥料産業が同B産業に相当する。)

本ツールでは、各産業ネットワークによって代替される物質の具体名までは特定できないが、このネットワークは、水産食料品産業からの未利用物質である動植物性残さが飼料・有機質肥料産業からのアウトプットの一つである飼料等と代替されることと表していること解釈でき、これらは現状におけるリサイクルとして行われている事例である。本手法を用いた産業ネットワーク設計結果は、現状の再資源化技術によって考えられるネットワークが含まれていたことから、手法の妥当性が検証されたといえる。よって、これらの手法が、産業ネットワークを選び出すためのスクリーニング手法の1つとして、利用できる可能性が示された。

さらに、水産食料品産業からの未利用物質は有機化学中間製品とネットワーク可能であるとの結果が得られた。これは水産食料品産業からの未利用物質中の化学物質、例えば脂肪酸が代替されると予想される。これは現

状では実用化されていないが高温高压水反応を用いて水産加工未利用物質から脂肪酸を回収する技術が該当する¹⁴⁾。よって、本手法によって現状の技術だけでなく、将来の技術による物質フローもネットワーク候補として選択できる可能性が示された。

上記した水産食料品産業 有機質肥料産業や水産食料品産業 有機化学中間製品産業のネットワークを構築するためには適用可能な再資源化技術を選択しなければならない。そのためには、排出産業の未利用物質の種類と受入産業の受入可能な製品を想定し、それらを結ぶ再資源化技術を選択する必要がある。

また、本ツールに示した産業ネットワーク構築のためのスクリーニングは各産業から発生する未利用物質をあまり変化させずに元素組成を変化させずに他の産業へ持ってきた場合に産業ネットワークが構築できるかどうかを検討するものである。しかしながら、未利用物質を何らかの再資源化技術によって変換する場合には、含水量の変化等から未利用物質の組成が変化する場合もある。よって、こうした物質の組成を変化させる再資源化技術が介在した場合のネットワーク設計が必要であり、そのためには再資源化技術に関するデータベースを取り込むかが今後の現実的なネットワーク設計のための課題となる。

3.2 最終処分量削減量の推計

本ツールによって選ばれた水産食料品産業のネットワーク候補の産業からの物質フローのうち、最終処分削減量の大きな物質フローを Table 4 に示す。Table 4 中の未利用物質発生産業が Fig.2 中の A 産業、原材料生産産業が同 B 産業、原材料受入産業が同 C 産業にそれぞれ該当する。Table 4 によると水産食料品産業から発生する未利用物質はその他の食料品 学校教育への物質フローと代替するのが最終処分量を最も減少させることがわかる。本ツールでは具体的な代替されるべき物質名まで特定することは困難であるが、この未利用物質代替の物質フローは動植物残渣の有効利用であると考えられる。

3.3 愛知県における地域ゼロエミッションの可能性

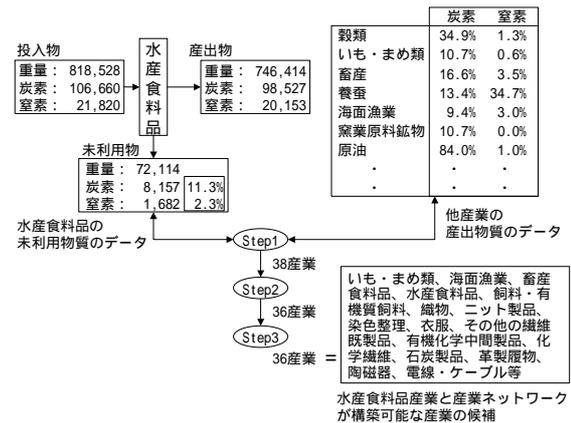
本手法を愛知県全産業に適用した場合の最終処分削減量の大きなネットワークを Table 5 に示す。ネットワークの構築条件として、対象元素を全元素及び類似条件を 30% として行った。Table 5 中の未利用物質発生産業が Fig.2 中の A 産業、原材料生産産業が同 B 産業、原材料受入産業が同 C 産業にそれぞれ該当する。Table 5 によると最終処分削減量が最も大きい産業ネットワークは畜産業からの未利用物質を飼料・有機質肥料 畜産へ

の物質フローと代替することである。飼料・有機質肥料 畜産は飼料の物質フローと考えられる一方、畜産業からの未利用物質は家畜糞尿である。よって、畜産業からの未利用物質を飼料・有機質肥料 畜産の物質フローへ代替することは現在の技術では困難であると考えられる。

有機質肥料産業は家畜糞尿を無償で受け入れて有機質肥料を生産している場合が多い。よって、Table 5 にはないが畜産業からの未利用物質を飼料・有機質肥料産業 穀類産業、野菜産業の物質フローに代替すると最終処分量を大幅に削減できる可能性が高い。このように、本ツールは無償で取引される物質フローについては注意が必要である。飼料・有機質肥料産業の未利用物質は動植物性残渣を含んでいることから、この未利用物質を飼料・有機質肥料 畜産及び穀類 精穀・製粉の物質フローと代替する産業ネットワークは可能性があると考えられる。

金属材料系の未利用物質を発生させる熱間圧延鋼材産業やその他の鉄鋼製品は鉄鋼産業内で未利用物質を再利用することが最終処分量を減少させる。これに対して鋳鍛製品の未利用物質は自動車部品等産業へ再利用されるのが効果的であることが示された。また、その他の土木建設産業の未利用物質はその他の窯業・土石産業内の物質フローに代替するのが効果的である。いずれの産業ネットワークも未利用物質の種類より妥当であると考えられる。

以上より、有機系未利用物質は有機系で、金属系未利用物質は金属系産業に、無機系未利用物質は無機系産業と産業ネットワークを構築するのが最も効率よく最終



処分量を削減できることが定量的に示唆された。

Fig. 4 水産食料品産業の未利用物質の産業ネットワーク設計

Table 4 産業ネットワーク構築による水産食料品産業からの未利用物質最終処分削減量の推計 (単位: t)

未利用物質 発生業種 (A)*	ネットワーク構築先物質フロー		最終処分 削減量	直接 削減量	間接 削減量
	原材料生産産業 (B)*	原材料受入れ産業 (C)*			
水産食料品	その他の食料品	学校教育	88,062	38,338	49,724
	と畜	飲食店	71,664	43,158	28,506
	海面漁業	水産食料品	62,505	62,493	12
	いも・豆類	砂糖・油脂・調味料類	62,494	62,493	1
	いも・豆類	その他の食料品	62,494	62,493	1

* A、B、CはFig.2に対応

Table 5 産業ネットワーク構築による愛知県全産業からの未利用物質最終処分削減量の推計 (単位: t)

未利用物質 発生業種 (A)*	ネットワーク構築先物質フロー		最終処分 削減量	直接 削減量	波及 削減量
	製品生産産業 (B)*	製品受入れ産業 (C)*			
畜産	飼料・有機質肥料	畜産	2,915,064	2,299,531	615,533
飼料・有機質肥料	飼料・有機質肥料	畜産	973,651	973,651	0
	穀類	精穀・製粉	719,075	719,059	16
熱間圧延鋼材	鉄くず	銑鉄・粗鋼	1,522,913	1,031,121	491,793
	鉄くず	鑄鍛製品	1,375,936	931,606	444,330
その他の鉄鋼製品	鉄くず	銑鉄・粗鋼	977,142	661,595	315,548
	鉄くず	鑄鍛製品	977,142	661,595	315,548
鑄鍛製品	自動車部品・同付属品	乗用自動車	750,485	735,756	14,729
	自動車部品・同付属品	自動車部品・同付属品	750,484	735,755	14,729
その他の土木建設	その他の窯業・土石製品	その他の窯業・土石製品	1,006,267	1,001,804	4,463

* A、B、CはFig.2に対応

3. 結論

産業連関表等の統計データを用いて産業から排出される未利用物質を他の産業で有効利用する産業ネットワークを設計するための支援ツールを開発し、適用例として本ツールを愛知県に適用した。

本ツールを用いた産業ネットワーク設計を試みたところ、現状と比較して妥当な結果を導出できたことから、ネットワーク候補の産業を抽出するための「1次スクリーニング」として利用できる可能性が示唆された。また、本ツールにより産業ネットワーク構築による未利用物質最終処分量の削減量を推計することができた。さらに、都道府県や市町村における産業連関表を用いた物質フロー解析と地域ゼロエミッション化のシナリオを検討するツールのプロトタイプとなることが期待される。

今後の研究として、本ツールを様々な地域に適用することにより、地域毎のゼロエミッションシナリオを検討提言すると共に、推算値の精度・信頼性の向上のために重量単位原単位、元素含有率原単位の再検討・修正案を同時に行う必要もあろう。

謝辞

本研究の一部は文部省科学技術研究費特定領域研究(A)(1)「ゼロエミッションを目指した地域物質循環の解析」の援助を受けた。

記号

- W : 未利用物質量
- I : インプット
- O : アウトプット
- $e_{i,W}$: 未利用物質における元素 i の組成
- $e_{i,I}$: インプットにおける元素 i の組成
- $e_{i,O}$: アウトプットにおける元素 i の組成
- ε : 類似条件
- R_A : A産業からの未利用物質の削減可能量
- W_A : A産業からの未利用物質量
- O_i : B産業からC_i産業への物質フロー
- MR : 最大未利用物質削減可能量
- r_m : アウトプットと未利用物質の元素組成比の中で最大のもの
- r_i : アウトプットと未利用物質の元素 i の組成比
- W_0 : 現状のB産業からの未利用物質発生量
- W_0' : ネットワーク構築後のB産業からの未利用物質発生量

W_6 : 間接削減量
 R_T : 総未利用物質削減量

文 献

- 1) Goto N. and A. Sakoda (2000) Estimation of Unutilized Material Emissions Using Input-Output Table, *J. Industrial Ecology*, Submitted
- 2) 後藤尚弘、内藤ゆかり、胡洪営、藤江幸一 (2000) 環境科学会誌、submitted
- 3) 例えば クリーン・ジャパン・センター (1998) 再資源化技術開発事例集 (リサイクル事例集 - その2 -)
- 4) 総務庁 (1994) 平成2年 (1990年) 産業連関表 - 計数編(1) -、財団法人 全国統計協会連合会
- 5) 三本木貢治(編) (1972) 鉄鋼工学講座2 鉄鋼精錬の技術、朝倉書店
- 6) 無機科学ハンドブック編集委員会(編) (1965) 無機科学ハンドブック、技報堂出版株式会社
- 7) 園田昇・亀岡弘(編) (1980) 有機工業化学、化学同人
- 8) 安井至・川副博司 (1985) 材料テクノロジー14 高機能性ガラス、東京大学出版会
- 9) 日本コンクリート工学協会(編) (1976) コンクリート便覧
- 10) 長倉三郎・井口洋夫・江沢洋・岩村秀・佐藤文隆・久保亮五(編) (1998) 理化学辞典第5版 岩波書店
- 11) 柿本幸司・白井義人・尾川博昭・泊正雄・加藤安彦 (1999) シュレッダーダストの性状調査 - 鉛の溶出防止 -、廃棄物学会誌、10(3), 228-240
- 12) 愛知県環境部 (1991) 愛知県産業廃棄物実態調査報告書
- 13) 愛知県企画部 (1995) 平成2年 (1990年) あいちの産業連関表、愛知県統計協会
- 14) 大門裕之、澤原雄揮、藤江幸一 (2000) 水産加工廃棄物から有用成分を得る資源化技術の開発、ケミカルエンジニアリング、45(1), 14-19

Study on a tool to design industrial network for regional Zero-Emission

Naohiro GOTO* and Akiyoshi SAKODA**

(*Toyohashi University of Technology, Department of Ecological Engineering,
Tempaku-cho, Toyohashi, Aichi, Japan

**Institute of Industrial Science, University of Tokyo)

Abstract

To establish material recycle society oriented for zero emission, it is important to optimize regional material cycle, to make efficiency of resource consumption rise and to minimize environmental load. To construct industrial network, that waste generated from an industry is used the other industries, is needed. In this study we develop a tool to design the industrial network. The tool consists of estimation regional elemental flow design the industrial network using elemental composition of waste. This tool can also estimate waste reduction by the network. From results, this tool can select existed recycle as industrial network candidates. We apply this tool to Aichi prefecture and estimate possibility of waste reduction by industrial network.

Key Words: zero emission、material balance、Input Output table、Food related industry