

# 人間活動にかかわる物質収支の分析手法と資料の検討

## 茨城県恋瀬川流域を事例として

元 木 理 寿\*      新 井      正\*\*

### 1. はじめに

今日、人間活動にかかわる地域の物質収支は従来と比べて大きく変化し、部分的には人為的な収支が自然の収支の規模を上回る例さえ見られる。物質収支の主要な要素である水の場合、その経路の人工化や統合などに伴い、収支の規模や循環の構造に著しい変化が生じている。こうした傾向については大都市地域を中心に注目されてきたが(半谷, 1976; 新井, 1987)、中小都市、さらに広大な面積を占める農村地域においても現れている。性格を異にするさまざまな地域レベルの物質収支とその変化を解明することは、循環型社会の創造あるいは再構築に向けての課題の一つと考えられる。本報告は都市と農村を含めた流域を対象として、人間活動の変化を物質収支の側面から捉え、その基礎的な分析手法について基礎資料を示し検討することが目的である。

### 2. 物質収支の分析手法について

#### 1) LCAの視点

人間は自然環境から多くの物質を資源として採取し、利用し、再び自然環境へ廃棄物として排出している。この営みの大きさを量ることが人間が環境に及ぼす影響を知る第一歩である(森口, 1999)。さきに、半谷(1966)が社会地球化学を提唱し、水および物質収支から人間活動のあり方を論じた。従来の研究では、自然を対象にした物質収支を扱った研究は多いが、こういった視点からの研究は少ない。しかし、近年の環境問題の根元は大量生産・大量消費・大量廃棄型の社会経済活動そのものであるといわれ、製品などの物質収支を対象とした研究が増えてきている。ドイツのヴッパータール研究所が提案しているTMI (Total Material Input: 総物質投入) およびTMC (Total Material Consumption: 総物質消費) の考え方はその一例であり、ここでは原則として、自然環境と人間活動圏との境界をフロー計量の断面とし

て分析している(森口, 1997)。こうした研究の共通点はLCA (Life Cycle Assessment) に基づいている。LCAとは製品に関わる資源の採取から製造、使用、廃棄、輸送などすべての段階を通して、投入資源やエネルギーあるいは排出環境負荷およびそれらによる生態系への環境影響を定量的・客観的に評価する手法である。本研究ではLCAの視点を踏まえ、地域の物質収支を明らかにする。

#### 2) マテリアルフロー分析とインベントリ分析

マテリアルフロー分析とは、森口(1999)によれば、ある着目した系に投入される資源やエネルギーと、系から排出される製品、副産物、廃棄物、汚染物質などについて、その総量あるいはそこに含まれる特定の物質や元素の量、これらの収支バランスを、体系的・定量的に把握する手法であり、マテリアルフロー勘定あるいはマテリアルバランス(物質収支)分析と呼ばれることもある。また、マテリアルフローは物質循環(マテリアルサイクル)とも類義であるが、一般に物質循環という場合には、自然界での物質のフローの記述を本来の出発点として、これを必要に応じて人間活動を含む系に拡張している。それに対して、マテリアルフロー分析は人間の内部、ないし人間活動と自然環境との間での「モノ」のフローの記述に主眼がある。しかし、マテリアルフロー分析をより詳細に進めるためにはインベントリ分析の手法と原単位的手法を導入することが重要である。「インベントリ分析」とは、製品システムの「目的と調査範囲の設定」で定義されたシステム境界に含まれるおのおのの段階ごとに、目的に応じて選定された原材料、エネルギー、生産物、排出物、最終廃棄物などの入出力量を定量的に分析するものである。つまり、これは環境負荷を網羅的に把握するとともに、環境影響評価のための基礎データを蓄積するプロセス(投入量と排出量の目録作成)であり、LCAのもっとも基本となる部分である。

\* 立正大学地球環境科学研究科環境システム学専攻博士後期課程

\*\* 立正大学地球環境科学部

### 3) 原単位

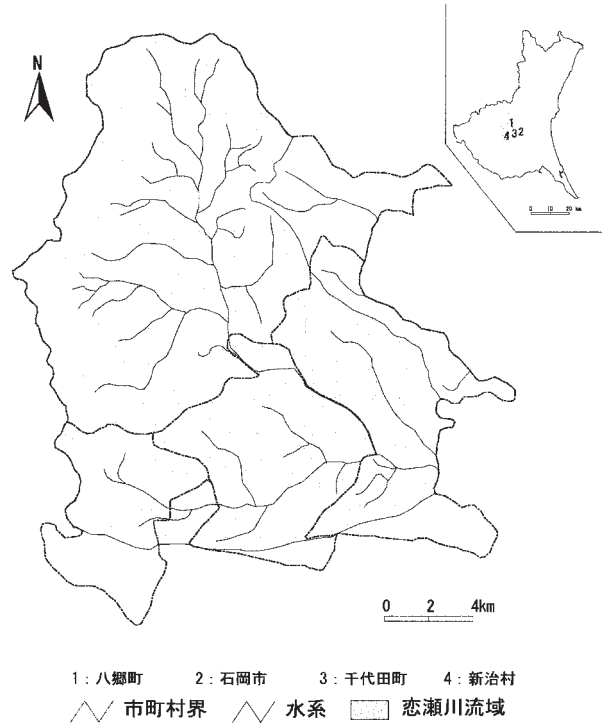
LCAの手法は、工学的・経済学的アプローチでは多用されている。この手法を地域に適用し、都市の空間構造を環境負荷のみならず、建設・運用コスト等の視点からも多面的に評価し、低負荷型の都市構造へと誘導するための手法を検討することも可能であろう(一ノ瀬, 1995)。そこで、人間活動と自然環境の間における物質の流れを定量的に把握する際や環境への影響評価などを行う際、重要な指標とされる「原単位」を用いることとした。一般的に、原単位とは工業製品の一定量を生産するのに必要な原料・動力・労働力などの基礎量である。LCAの視点からみた物質収支では、用いる原単位に大きく影響されるので、原単位の決め方が重要になる。原単位は製品や材料など公表されている値をそのまま用いることが可能な物質もあるが、その条件や範囲が不明な点が多いので、書き換えが困難で、かつ原単位の誤差やばらつきが大きい等の欠点もある(社団法人産業環境管理協会, 1998)。しかし、原単位を地域に適用する場合、地域全体を集約できる点や代表できる利点がある。

以上の方法により、空間に配慮して流域全体を一つの物質系の範囲とみなした場合、特定の物質を取り上げ、その経路、流れを追うことでその地域の物質収支の解明が可能となる。LCAについては従来製品や物質がその対象となっていたが、地域や流域を対象として人間活動に関わる物質収支について定量的に捉えていくことが本研究の特徴である。さらには、地理情報と原単位を組み合わせることで検討していく。しかし、統計資料は市町村単位で表わされているものがほとんどで、流域内部の詳細な物質収支の特徴を把握するには困難な点が多い。そこで、対象地域をメッシュ区分することで、それぞれの物質の分布、フロー、収支を明らかにすることにした。その際、選定した物質について投入と排出の原単位を作成して、インベントリ分析を行うこととした。

## 3. 茨城県恋瀬川流域の物質収支の検討

### 1) 研究対象地域

研究対象地域としては、茨城県中央部に位置する恋瀬川流域を選定した(第1図)。行政的には石岡市、八郷町、千代田町、新治村の1市2町1村からなる地域である。同流域は都市化の進行が遅く、農村を主とした地域である。



第1図 研究対象地域

### 2) 検討指標と研究手順

全ての物質に関して、その循環を網羅することは不可能である(安部・半谷, 1974)。そこで対象流域の物質収支を明らかにするため、まず大きく水収支と物質収支を区別した。そして、それについていくつかの代表的な物質を抽出した。すなわち、水収支としては上・下水道および農業用水の3項目、物質収支としては生活物質としての一般廃棄物と浄化槽の汚泥、および地域農産物である稲、梨、栗の5項目を選定した。なお、物質収支を明らかにするためにはこうした指標以外に化学変化を起こす物質やエネルギーについても扱う必要があるが、今回は除外した。検討指標とした以上の指標と対象地域との関係は以下のように説明できる。

#### 水収支

生活用水には、上水道として「取る」、「送る」、「使う」、下水道への「捨てる」という一連の行為がある(肥田, 1993)。よって、生活用水移動の指標は上水道と下水道(原, 1996)、および浄化槽とする。上水道の取水源は、地下水(74%)、霞ヶ浦用水(17%)、泉水(9%) (県中央水道用水供給事業による那珂川からの導水)からである。給水形態は、地下水のみ、地下水+泉水、地下水+霞ヶ浦用水となっている。取水された生活用水の36%が下水道を通じて霞ヶ浦に、8%が農業集落排水

を通して恋瀬川に排出される。残りの56%は、浄化槽から処理施設を経るがその大部分が未処理水となる。投入は専用水道を除いた上水道（公営・非公営簡易水道、飲料水供給施設を含む）とし、排出は下水道（公共下水道および農業集落配水）と浄化槽（単独および合併浄化槽）の収集量とした。本来、生活用水は都市用水として、工業用水とともに扱われることが多いが、ここでは工業用水を扱わないこととした。この理由として、この流域においては工業団地に公共下水道が敷設されておらず、各工場独自に処理をしているためである。よって、工業用水の循環は、循環経路から除外した。

上水道の取水量・給水量・有収水量（使用水量）はそれぞれの市町村のデータを利用した。下水道排水量は、上水道の有収水量に下水道普及率を乗じた値である。また、本地域では下水道の普及率が低く、その大部分が浄化槽を利用している。下水道を介せず、浄化槽から処理施設を経ている水は、未処理水とした。

農業用水は自然（流域内）から取水し、利用された後、流域に還元されることが多い。しかし、降雨や河川水だけでなく今日の恋瀬川流域では、農業用水においてもかんがい用水事業により流域外から2系統のかんがい用水を導入するようになってきている。霞ヶ浦導水事業の一環として、石岡市、千代田町、八郷町南部（「石岡台地土地改良区」管轄）では、霞ヶ浦よりかんがい用水を受水している。一方で、八郷町北部および新治村（「霞ヶ浦用水土地改良区」管轄）では、霞ヶ浦用水事業の一環として、霞ヶ浦より農業用水を受水している。

資料は、「石岡台地土地改良区」と「霞ヶ浦用水土地改良区」の農業用水揚水量の統計、計画調書概要書などを用いた。農業用水の場合、とくに水田については、水田内における水収支を考慮する必要があるため、農業用水事業（水源）からの取水量、流域内水田における正味消費水量、水田還元（排水）量を求めた。なお、灌漑用水の使用期間は4/21～8/31（かんがい期；133日間）に限定されているため、この期間を対象とした。さらに流域内の減水深を考慮し、農業用水全体の水収支を伊丹・末吉（1998）の方法によって推定した。

#### 物質収支

生活物質は、投入される物質として一般生活（消費）物質である食料や燃料があげられる。また、衣類、書籍なども地域に流入するが、それらの大部分は「購入」という行為において成り立っている。現在のところ重量ベースとしての資料は存在しないので、消費コストにより推

計せざるを得ない。そのため、重量を推定するに至っていない。一方、排出については、日常生活から出されるいわゆる「ごみ」の量を利用することが可能である。ごみに関する統計は、一般廃棄物量と屎・汚泥に関する浄化槽汚泥量を記載した「茨城の一般廃棄物」（茨城県、1998）を用いた。一般廃棄物量は収集量・中間処理（焼却）量・最終処分量・焼却残さ量とその流れを把握することができる。しかし、その中で焼却残さとして残る8%の物質は流域内で処理できないため、流域外（県外）の処理施設において処分される。

農産物は、地域で生産されるもの全てを抽出することは困難である。その収支をみても自然の中での産物であるために複雑である。そこで、土地利用と同様に恋瀬川流域の市町村において代表される農作物を抽出した。収穫量ベースの統計「茨城の農業」（茨城、1998）から、水稻（陸稲含む）、梨、栗の3品目について取り上げることとした。稲は、収穫過程で籾とわらに分けられ、籾が農産物に、わらが副産物となる。農副産物としてのわらの量は、茨城県農業研究所試験概要書を参考にして、「籾/わら」比の平均値である1:1の比率を利用して算出した。なお、梨や栗については、生産過程において葉や実が自然に落ちたり、人為的に実を落としたりするがその量は把握されていない。

## 2) 各種地理情報の整理

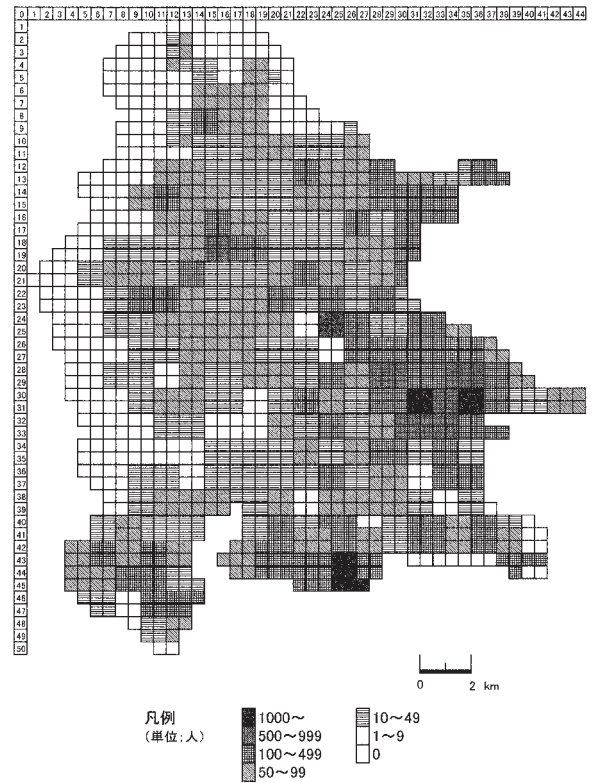
### 土地利用図の作成

流域内の地理情報としては、まず土地利用に着目する。すなわち、土地利用がある広さを持つ地域の特性を総合的に代表するものと考え、土地利用のメッシュマップを作成した。メッシュマップの利点として、分布密度と実数とがよい対応関係を示すこと、したがって物質の流れの定量把握がしやすいこと、データベース化しやすいこと、という点が上げられる。

土地利用については、今日GISを用いた土地利用研究が盛んである。GISでは代表的なデータソースとして国土地院が整備する1/10細分区画土地利用データや細密数値地図情報10mメッシュが用いられる。しかし、利用できる地図データの年代が制限されていたり、必要とする地図データの範囲が限定されている場合も多い。そこで1/50000地形図を利用して流域内の土地利用図を作成した。土地利用図は、地形図上に500m×500mのメッシュ（流域全体：1,198個）を作成し、X軸、Y軸の番号により各セルに地域コードをつけた。次に、各セル毎に最大面積（60%以上占有）の土地利用を読みとつ



第2図 恋瀬川流域における土地利用図 (メッシュマップ)  
(5万分の1地形図より作成)



第3図 恋瀬川流域における人口分布

た (第2図)。

#### 人間活動情報に関するデータの整理

土地利用と同様に、人間活動に関わる情報を分類・整理する必要がある。社会・経済活動については、市町村等の各自治体毎に統計がまとめられている。流域で検討する場合、それらを比較検討し、同一基準として整理する必要がある。今回、用いた統計資料の一覧が第1表である。統計資料は1995年を基準として、1990年代のデータを使用した。

まず人口については、「茨城県の人口」(茨城県, 1997)と平成7年度国勢調査に関する地域メッシュ統計地図(総務庁, 1999)を参考にして、500mメッシュの基準にあわせた人口分布図(第3図)を作成した。次に、流域内の各市町村、事業所などが所有する上水道区域図・下水道区域図・農業用水受益地域図に、土地利用と同様に500m方格メッシュをかけ、それらの分布域を示し、相互に対比できるように調整した。

#### 3) 原単位の算出方法

指標とした生活用水、農業用水、生活物質、農作物の4つの項目については、石岡市、八郷町、千代田町、新治村毎に重量ベースの統計を参考にして、物質の投入お

よび排出の原単位を推計した(第2, 3表)。ここでいう原単位とは、土地利用と人間活動情報に関するデータの読み替えから、生活用水と生活物質は年間の1人当たりの、農業用水と農産物は1km<sup>2</sup>当たりについて算出した値である。生活用水と生活物質については、それぞれ投入と排出の原単位と人口数を勘案して出入力明細表を作成し、メッシュマップ化した。農業用水と農産物は、1km<sup>2</sup>当たりの値から、それらを利用する地域の分布についてメッシュマップとして表した。

生活用水の原単位は、投入量としては給水量を、排出量としては下水道への排水量とそれ以外への排水(未処理水)量を指標にした。農業用水の原単位は、投入量としては取水量の値を、排出量は水田正味消費水量と水田還元量の値を指標とした。生活物質の原単位は、投入量は未推計であるが、排出量の値は収集量を指標として代替した。農産物の原単位は、投入量として播種量、肥料量に関するデータはあるが、その適用に関しては問題点が多い。そこで、全国で用いられる平均的な原単位を指標とした。排出量は、収穫量(生産量)および農副産物量(水稻のみ)を指標とした。さらに、収穫量には出荷および自家消費と2つの経路があることから、それらの量についても求めた。

第1表 使用した資料・統計一覧

	統計書名	作成部署
基礎資料	霞ヶ浦関連資料	茨城県霞ヶ浦対策課
	茨城県の人口	茨城県統計課
	茨城県統計年鑑	茨城県統計課
	いしおか統計	石岡市企画課
	統計やさと	八郷町商工観光課
	千代田町統計資料	千代田町企画課
	新治村統計資料	新治村企画課
生活用水	茨城県の上水道	茨城県水道課
	茨城の地下水	茨城県県水・土地計画課
	企業局の概要	茨城県企業局
	湖北水道事業のあらまし	湖北水道組合
	石岡市公共下水道の概要	石岡市下水道課
	茨城県の一般廃棄物	茨城県廃棄物対策課
農業用水	霞ヶ浦用水土地改良区資料	霞ヶ浦用水土地改良区
	石岡台地土地改良区資料	石岡台地土地改良区
	農業揚水量統計	石岡台地土地改良区
	計画調書概要	石岡台地土地改良区
	分水工別受益面積・給水量調書	石岡台地土地改良区
	分水工管理月報	石岡台地土地改良区
	支線別配水状況表	霞ヶ浦用水土地改良区
生活物質	茨城の一般廃棄物	茨城県統計課
	新治地方広域事務組合資料	新治地方広域事務組合
	湖北環境衛生組合資料	湖北環境衛生組合
農作物	茨城の農業	茨城県統計課
	茨城県農業の動き	茨城県農政企画課
	茨城の普通作物	茨城県農産課
	茨城の園芸	茨城県統計課
	茨城県農林水産部農産課資料	茨城県農林水産部

注) 統計は90年代のものを使用

## 4) 推定結果

## 生活用水

生活用水の原単位は、石岡市、千代田町、新治村ではそれぞれ投入量が $172\text{m}^3/\text{人}$ 、 $115\text{m}^3/\text{人}$ 、 $103\text{m}^3/\text{人}$ である。それらの市町村内で下水道が敷設されている地域では、投入された生活用水は、100%流域外(霞ヶ浦)へ排出される。下水道が未整備で、浄化槽に排水される地域では、投入量の40%程度は広域処理施設に集められてから排出されるが、残りの60%は未処理水として排出される。

八郷町では下水道普及率が0%(1995年度現在)であった。投入量の原単位は $72\text{m}^3/\text{人}$ である。それに対して、

その40%は下水道への排出とされるが、残りの60%は未処理水として排出される。生活用水の原単位に基づいたメッシュマップは、投入量を表した給水量の分布を示している(第4図)。排出については下水道排水量を第5図に、下水道以外への排水(未処理水)量を第6図に示した。

## 農業用水

農業用水の原単位は、「石岡台地土地改良区」によるかんがい用水を導入する石岡市、千代田町、八郷町の南部では、投入量が $1.79 \times 10^6\text{m}^3$ であり、水田正味消費水量として $0.78 \times 10^6\text{m}^3$ (対取水量44%)、水田還元量と

第2表 水収支に関する原単位 (1995年)

	水系					
	生活用水 (m <sup>3</sup> /人)			農業用水 (10 <sup>4</sup> m <sup>3</sup> /km <sup>2</sup> )		
	給水量	下水道への排水量	下水道以外の排水量	農業用水	水田正味消費水量	水田還元(排水)量
石岡市	172	172 <sup>1)</sup>	0	179 <sup>4)</sup>	78	101
		172 <sup>2)</sup>	0			
		69 <sup>3)</sup>	103			
八郷町	72	29 <sup>3)</sup>	43	179 <sup>4)</sup>	78	101
				825 <sup>5)</sup>	357	468
千代田町	115	115 <sup>1)</sup>	0	78 <sup>4)</sup>	78	101
		46 <sup>3)</sup>	69			
新治村	103	103 <sup>1)</sup>	0	825 <sup>5)</sup>	357	468
		41 <sup>3)</sup>	62			

注) 1). 下水道 2). 農業集落排水 3). 浄化槽 4). 石岡台地用水 5). 霞ヶ浦用水

第3表 物質収支に関する原単位 (1995年)

	物質 (モノ) 系														
	生活物質			農作物 (t/km <sup>2</sup> )											
	生活消費量 (t/人)	一般廃棄物収集量 (t/人)	浄化槽汚泥収集量 (m <sup>3</sup> /人)	種籾(播種)量	肥料投入量	稲収穫量	わら生産量	米出荷(流通)量	米自家消費量	栗生産量	栗出荷量	栗自家消費量	梨生産量	梨出荷量	梨自家消費量
石岡市	*	15	8	3	32	514	514	452	62	143	136	7	2,146	2,079	67
八郷町	*	6	9	3	32	480	480	422	58	153	145	8	2,304	2,240	64
千代田町	*	8	4	3	32	507	506	446	60	147	138	9	2,375	2,319	56
新治村	*	2	1	3	32	504	504	443	61	103	72	31	2,120	2,070	50

注) \* 未推計

して1.01 × 10<sup>6</sup> m<sup>3</sup> (対取水量56%) が排出される。一方、「霞ヶ浦用水土地改良区」によるかんがい用水を受ける八郷町北部と新治村においては、投入量が8.25 × 10<sup>6</sup> m<sup>3</sup> であり、排水量は水田正味消費水量が3.57 × 10<sup>6</sup> m<sup>3</sup> (対取水量43%)、水田還元量が4.68 × 10<sup>6</sup> m<sup>3</sup> (対取水量57%) である。農業用水の原単位に基づいたメッシュマップ (第7, 8, 9 図) は、農業用水受益地域の状況を表している。

#### 生活物質

生活物質排出の原単位は、一般廃棄物収集量が石岡市 15t/人、八郷町 6t/人、千代田町 8t/人、新治村 2t/人である。浄化槽の汚泥収集量は石岡市 8 m<sup>3</sup>/人、八郷町 9 m<sup>3</sup>/人、千代田町 4 m<sup>3</sup>/人、新治村 1 m<sup>3</sup>/人である。それらを基に生活物資の排出量分布を示した図が、一般廃棄物量についてのメッシュマップ (第10図) と浄化槽汚泥量のメッシュマップ (第11図) である。人

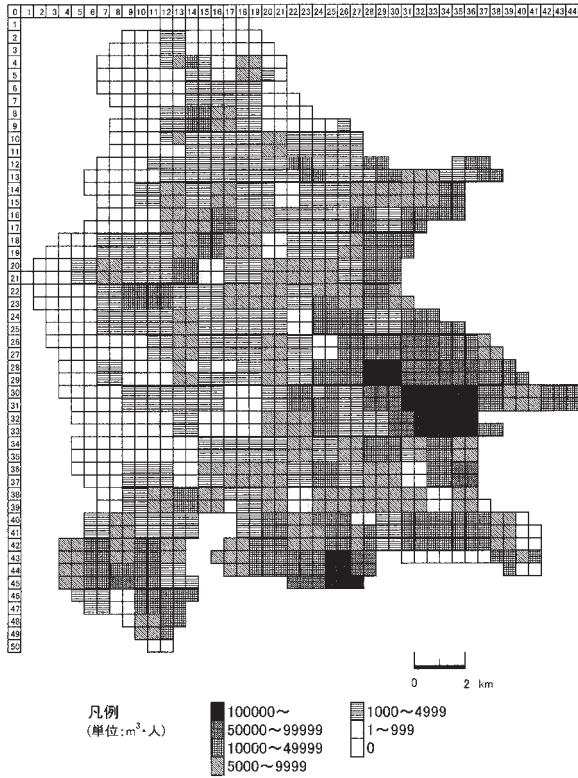
口密度の低い地域においても浄化槽の設置状況の高い地域ではその量が多い。

#### 農産物

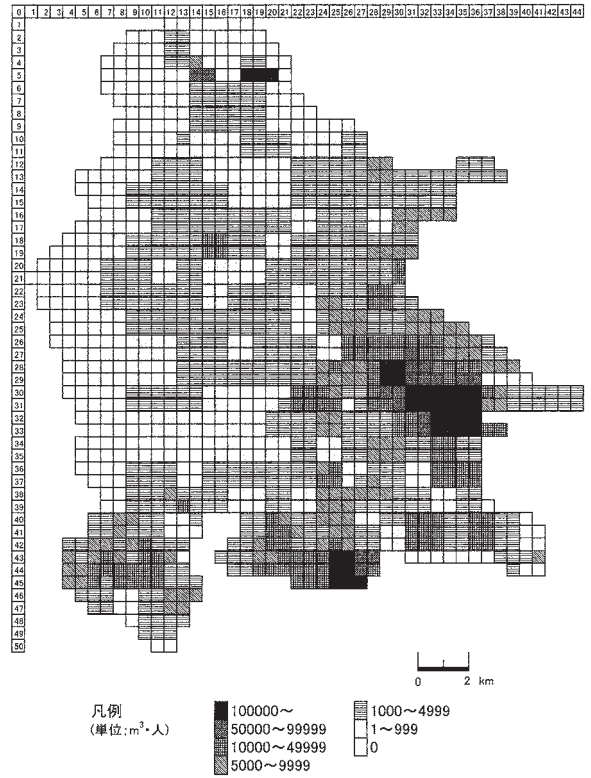
稲の排出原単位は、生産物である稲収穫量としては石岡市 514t/km<sup>2</sup>、八郷町 480t/km<sup>2</sup>、千代田町 507t/km<sup>2</sup>、新治村 504t/km<sup>2</sup> である。一方、農副産物としてのわらの量は、収穫量とそれぞれ同量の値である。収穫された稲の88%は、出荷(流通)量として排出されるために地域内には残らない。各市町村ともに自家消費量として排出される残りの12%が地域に残る。同様に、栗や梨をみても生産量の大部分は出荷されるために地域に残る量はほとんどない。

#### 4. おわりに

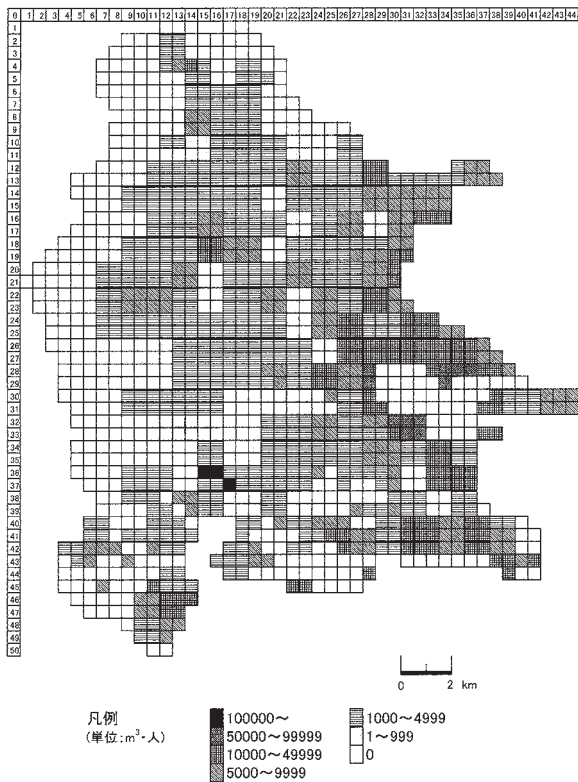
人間活動にかかわる物質収支を LCA の視点にたつて



第4図 恋瀬川流域における給水量 (1995年)



第5図 恋瀬川流域における下水道排水量 (1995年)



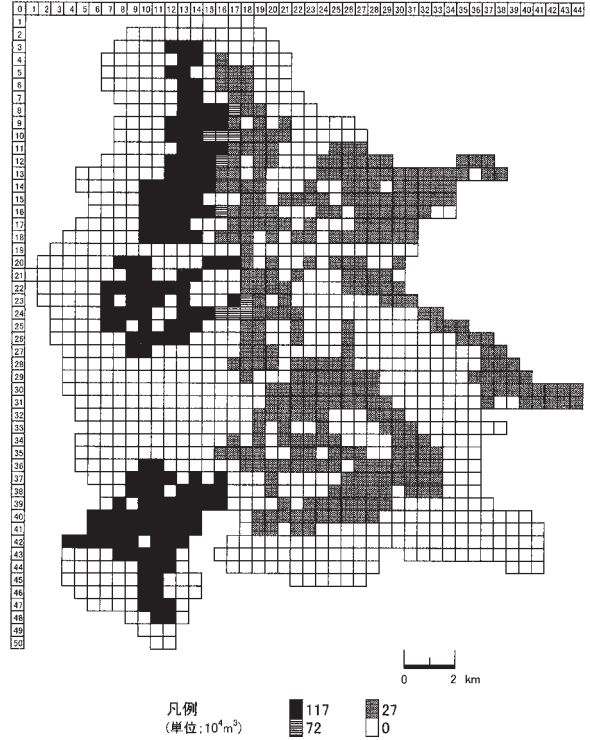
第6図 恋瀬川流域における下水道以外への排水量 (1995年)



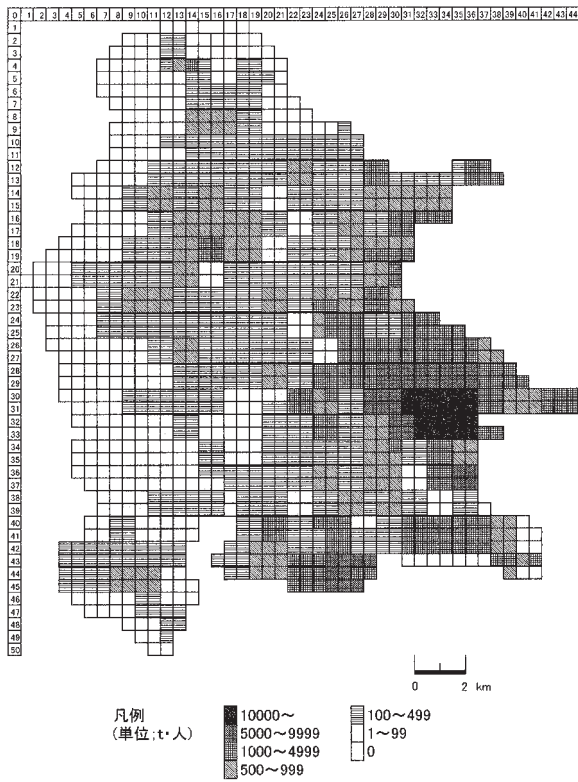
第7図 恋瀬川流域における農業用水取水量 (1995年)



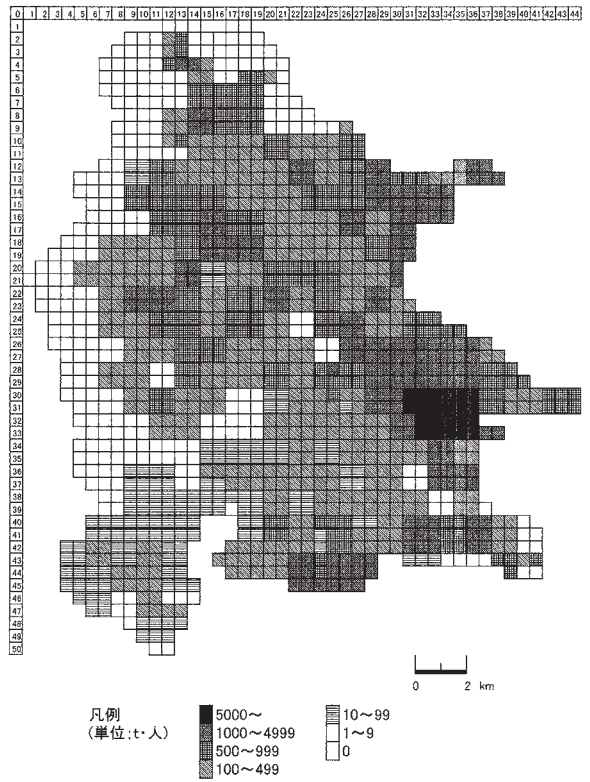
第8図 恋瀬川流域における農業用水消費量 (1995年)



第9図 恋瀬川流域における農業用水還元 (排水) 量 (1995年)



第10図 恋瀬川流域における一般廃棄物量 (1995年)



第11図 恋瀬川流域における浄化槽汚泥量 (1995年)



分析する新しい手法について提案した。また、その可能性を検討するため、茨城県恋瀬川流域において、人為的な物質収支に関する指標を選定し、それぞれの原単位を推定するとともに、メッシュマップ化を試みた。その結果、生活用水および農業用水については、本報告で展開した物質収支の手法の有効性があることがわかった。しかし、物質収支の投入量と排出量の分布を表すにとどまった。今後は生活物質や農作物の未推計、不確定な部分を埋めていくとともに、推計で不整合がみられた点について調整を行っていく必要がある。今日、水環境や廃棄物に関する原単位作成の事例が発表されつつあるが、大気関連のデータに比べてまだ事例が少ない(森口, 2000)。選定した物質の原単位についても精度の検証は今後の課題である。

#### 参考文献

- 新井 正 (1987)：都市の水収支と地表水。新井 正・新藤静夫・市川 新・吉越昭久：『都市の水文環境』，共立出版，1-108。
- 安部喜也・半谷高久 (1974)：都市における物質代謝。中野尊正・沼田 真・半谷高久・安部喜也：『都市生態学 (生態学講座28)』，95-126。
- 伊丹光則・末吉 修 (1998)：農業用水の流域水循環に果たす役割の定量的評価。農業土木学会誌，66巻12号，7-12。
- 一ノ瀬俊明 (1995)：細密地理情報にもとづく都市のエネルギー消費と都市熱環境の解析。東京大学博士論文。
- 茨城県 (1998)：『茨城県の一般廃棄物処理』。茨城県生活環境部廃棄物対策課。
- 茨城県 (1998)：『茨城の農業』。茨城県企画部統計課。
- 社団法人産業管理協会 (1988)：『LCA 実務入門』。丸善株式会社，p.194。
- 原美登里 (1996)：神奈川県における上下水道の変遷に関する資料とその考察。立正大学大学院年報，13号，135-150。
- 半谷高久 (1966)：『社会地球化学』。紀伊国屋書店，p.202。
- 半谷高久 (1976)：都市物質系の物質代謝。半谷高久・松田雄孝：『都市環境入門』，東海大学出版会，115-141。
- 肥田 登 (1993)：上下水道の展開と地域環境。「近代化による環境変化の地理情報システム」文部省科学研究費重点領域研究平成4年度総合報告書 (I)，167-172。
- 森口祐一 (1997)：マテリアルフロー分析からみた人間活動と環境負荷。環境システム研究，25号，557-568。
- 森口祐一 (1999)：マテリアルフローからみた人間活動と環境変化。和田英太郎・安成哲三編『水・物質循環の変化』，岩波書店，299-325。
- 森口祐一 (2000)：インベントリ分析のための環境負荷原単位。水環境学会誌，23巻2号，68-72。