

環境システムにおける都市基盤システム・物質循環研究

Environmental Systems Studies in the field of Urban Infrastructure and Material Metabolism

藤田 壮*, 村野昭人*

FUJITA Tsuyoshi, MURANO Akito

Abstract : For studies about the urban infrastructure and the material metabolism that the number of studies increases in recent years, the change of argument points and the topics reported in "Environmental Systems Studies" and future directivity are discussed.

By 1990, many studies had been already reported about waste disposal institution and risk analysis of the toxic substance represented by PCB. The focus of studies is the qualitative waste control rather than the quantitative waste control. In the 1990s, the study about an infrastructure increases under the tendency of the deployment to the environmental planning and space planning such as policy-making. The study about urban material metabolism also begins, and the studies that try to quantify the environmental impacts of urban infrastructures are announced. Especially, from 1995 the number of studies about life cycle assessment increased, and their topics have covered widely from preparing the calculation unit for LCA to preparing the logic for development into an urban policy.

Keywords ; Urban Infrastructure, Material Metabolism, Life Cycle Assessment

1. はじめに

本稿では「環境システム研究」における都市基盤システムについての論文と、近年その発表数が増加している物質循環についての研究論文についてその論点と主題の変化を述べるとともに、国内外の研究動向をふまえて、今後の方向性を論じることをめざす。第一に1980年末以降の「環境システム研究」について代謝研究をキーワードで検索してその研究の関心の推移を定量的に把握するとともに、研究の中心について概観する。さらに、80年代より環境システム研究の中心的なテーマの一つで廃棄物処分施設問題と90年代半ばより土木構造物から都市基盤施設および都市計画への展開が議論されたライフサイクルアセスメント研究について、主要な研究を紹介しつつ、研究の流れを報告する。

2. 環境システムにおける都市基盤・物質代謝研究の推移

(1) 1980年代の都市基盤・物質代謝研究

土木学会の環境問題小委員会が1987年12月に環境システム委員会に昇格して、1988年に開催された第1回環境システムシンポジウムのパネルディスカッションで末石¹⁾は環境システム研究への期待を論じるなかで、システムを「ある対象の要素相互を連繋させ、各要素が持つ機能特性より高位の目標を実現させる形式」

*大阪大学大学院工学研究科環境工学専攻 Dept. of Environmental Eng., Graduate School of Engineering, Osaka University

として定義して、環境システムもこのシステム一般の範疇にあるとし、環境基準がほぼ満たされている状況では「人間活動に対する外部条件」として理解するのではなく、「環境の恩恵の把握、環境要素間の定性的・定量的な相互作用の記述、各要素の機能を発揮させるほどよい redundancy の設計、ライフスタイルへの鋭敏な feedback 経路の計画などシステム本来の取り扱いをもとより」、「人間を中心に据えながらも動植物・微生物をも含んだ生物生態システムとしての、かつまた環境保全や創造に関する政治的経済的枠組みを持った『環境社会システム』」を環境システム研究の重点としてあげている。1988 年の環境システム研究には委員会の当面の中心課題の一つ「人間と環境との関係の様式化」の内容を大きく①「人間の環境に対する欲求を再吟味する」、②「都市環境の利用を秩序付ける」、③「新しいライフスタイルをつくりだす」、綿密かつソフトな技術のあり方を研究することと紹介している。

同年の環境システム研究では 30 編の研究論文のうち都市基盤・物質代謝についてはごみの分別排出についての研究が 2 編、棄物最終処分場管理についての研究が 1 編が報告されている。末石ら²⁾は多属性効用関数法を用いて、分別種類や搬出距離など都市生活者のごみ排出の代替的な施策要素についての効用を計量している。約 3000 件のアンケート調査に基づいて、分別種を増しても総効用を低下させない施策が存在することをあきらかにした。その上で地区毎のきめ細やかな収集システムの整備と排出者への適切な情報の提供システムの構築を都市の新しいインフラストラクチャーとしての循環型社会システムの部分的な例として提示している。松藤ら³⁾の研究では街の「ごみ箱」の設置位置、ごみの量等を調査した上で、廃棄物処理処分プロセスの「玄関」としての「ごみ箱」の適正なデザインと配置についての検討が重要であることを提案している。これらの排出者の生活システムからの研究に対して、青山ら⁴⁾は廃棄物の最終処分システムについて事業や法制度のシステムの適正化への課題を提示している。

1989 年の環境システム研究では排出主体のライフスタイルに注目した研究としては浦辺⁵⁾によるディスプレイ導入についてのアンケート調査が報告されているにとどまる一方で、廃棄物処理施設についての研究が 2 編報告されている。瀬尾ら⁶⁾による研究では一般廃棄物処理施設建設における 54 事例を集めて、その紛争の原因と総店頭をその変遷に着目して解析を行い、住民と行政の合意形成の機会として運営協議方式が重要であり、その参加の範囲、構成メンバーの決定、運営を綿密に設計することにより合意形成が円滑に進むことを提示している。古市ら⁷⁾は産業廃棄物処理計画の立地選定に関する合意形成のプロセスを問題解決のフレームから明らかにし、そこでの多主体間での意見収束を合理的に行うための代替案選択支援システムを提案している。立地の評価要因として「地価の安さ」「収集運搬効率」「公害防止対策のしやすさ」「住民合意の得やすさ」などの評価要因間の重みを AHP 法によって明らかにする信頼性評価プログラムを提示している。

(2) 90 年代以降の環境システムの都市基盤・物質代謝研究

廃棄物処理についてのシステム研究を発展して瀬尾・古市ら⁸⁾は 1991 年に清掃工場を地域に融和型施設化を指向する計画フローを提示している。すなわち、都市機能を補完する付加施設の計画メニューを用意するとともに、景観上の配慮事項を明らかにして地域景観に配慮する計画と設計の要素を提示している。一方で高畑⁹⁾は産業廃棄物の最終処分場の閉鎖と埋め立て跡地の環境汚染の項目を示すとともに管理の課題をあげている。最終処分地計画のシステム化についての研究は 94 年の花嶋・萬ら¹⁰⁾による「最終処分場適地選定エキスパートシステムの開発に関する研究」がある。

92 年以降の廃棄物処理処分についての研究の数が少なくなっており、施設整備のプロセスが確定されるとともに、環境社会システムを議論する研究が理論やシステム化の提案から実践の段階に移行した経緯を推測することができる。90 年代の後半にいたって産業廃棄物の容量の限界が社会問題として顕在化するとともに、社会の物質循環を適正化する改善の施策として廃棄物問題を取り扱う研究が登場している。廃棄物問題を循環型社会を構築する部分システムと位置付ける 80 年代後半の議論から、施設整備と管理の問題領域の議論に移行して 90 年代末に再び物質循環の視点から議論する研究が増加していることは興味深い。

また、91 年の環境システム研究で盛岡ら¹¹⁾は有害廃棄物 PCB を 1 箇所に集約して処理貯蔵する施設を

取り上げ、リスクを内包する高度技術に係る施設のリスクコミュニケーションとリスクマネジメントについての研究を報告して、「段階的事業」「事故後の誠実な対応」「市民参加型監視」が重要であることを明らかにしている。廃棄物のリスク問題を取り扱うアプローチは、近年社会的な問題として関心が高い「環境ホルモン」研究への取り組みの原型として意義深い。

物質循環、都市基盤に関するキーワードとして「物質循環」・「マテリアルフローあるいは物質収支」・「都市基盤」・「最終処分場」、さらに、90年代に入って物質フローとストック量を循環を算定する技法として広く取り入れられた「ライフサイクル分析（LCA）」・「IO分析」について、91年から99年の環境システム研究の掲載研究論文からキーワードとして採用している論文を集計した結果を図1に示す。

環境システム研究の論文総数が増加している中で、LCAや産業連関分析を取り上げる研究が先行的に増加したあとで、94年以降、都市基盤を研究の課題として取り上げる研究が増加した。地球環境問題への注目が高まるとともに、地球制約化での社会の物質制御の必要性が高まるとともに、新たな都市基盤のシステム研究が増加する傾向を見ることができる。物質循環とマテリアルフローを環境システム研究として取り上げる傾向はさらに2年遅れて96年以降顕著になっており、大気・水質などの環境相の質的制約条件から、都市の活動がもたらす物質のフローとストックを定量的に取り扱う中で新しい都市の仕組みとその制御のソフトウェアについての環境社会システムの研究が一つ流れとなる傾向を見ることができる。

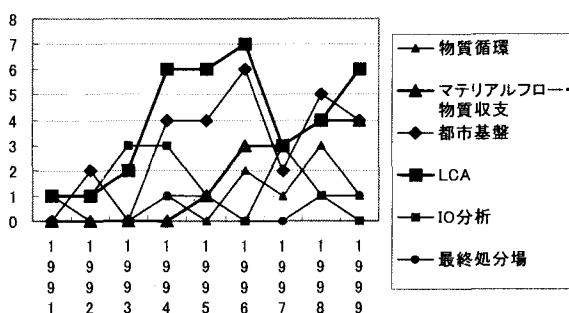


図1 環境システム研究におけるキーワード別論文数の推移

3. 環境システムにおける物質循環形成に向けての研究

90年代の半ばから循環型の社会システムに向けての具体的な基盤システム、政策制度システムを提案する研究が登場して、その定量的評価の技法として、産業資材や製品にともなう環境負荷や資源消費を、生産から運用さらには廃棄にわたるライフサイクルで算定するライフサイクルアセスメント（Life Cycle Assessment, LCA）研究が、94年より環境システムに多く報告されるようになった。91年には、すでに物質収支の観点ではなくエネルギー消費に焦点を当ててはいるが、井村・金川¹²⁾らによる研究で、都市活動での1次エネルギーの直接的消費と、活動を支える材とサービスに伴う間接的エネルギー消費の二つのカテゴリーのエネルギー消費に支えられている都市、内包化されたエネルギー消費量を算定することの重要性が提起されている。

94年以降に環境システムにおける物質循環形成に向けての研究では製品流通についてその製品連鎖でのLCAなどの技法を用いて評価を行うことによって生産から消費・廃棄段階まで視野に入れた社会システムを提案する研究と、土木・建築の建設構造物のライフサイクル評価のプロセスを構築するとともにその計画、政策システムへの展開を提起する研究に大別して、その主要な研究について概観する。

(1) 都市の物質代謝の研究

94年の和田ら¹³⁾によるLCAによるリサイクルフェイズの評価手法についての研究では、代替的なシナリオを評価する際の評価範囲の一致や、中間処理による減容化含む輸送プロセスの代替的計画シナリオ評価を内部するなどの手順を示した上で、食品用PSPトレイのリサイクル施策の環境負荷を算定している。指標製品を取り上げての研究は、情報家電の副産物回収システムについての盛岡・吉田・下田らによる研究（1997、

1998)^{14), 15)}, 花木らによる紙のリサイクルについての研究(花木ら(1998)¹⁶⁾)とプラスチック系の一般廃棄物について研究(花木ら(1998)¹⁷⁾), 内藤ら(1998)¹⁸⁾による食品系の有機廃棄物の再資源化効果の算定などがある。また松本・井村ら(1999)¹⁹⁾は主食を対象にして食生活の変化の環境影響を算定している。

マクロでの物質収支の算定と環境資源勘定を構築する研究も報告されており, 95年に井村・藤倉・谷川(1995)²⁰⁾は福岡県, 北九州市, 福岡市の建築についての物質収支の算定結果を報告している。守田ら(1997)²¹⁾は物流データによって東京との物質収支を算定しており, 98年には水・エネルギーを加えた都市の代謝フローの全体像を明らかにした²²⁾。国土スケールの研究としては, 森口(1997)²³⁾はマテリアルフロー分析を用いた国内物流を国際比較の視点で報告している。盛岡・吉田ら(1998)²⁴⁾は産業廃棄物の地域間の誘発構造を産業連関分析から明らかにした。また, 盛岡・増井(1997)²⁵⁾は廃棄物処理, リサイクル産業の将来形成を動学的一般均衡モデルを用いて分析している。

(2) 都市構造物のライフサイクルアセスメント研究

井村らはライフサイクルアセスメントを消費財から資本財として各種構造物に適用することを提案し, 94年に産業連関統合表を利用して構造物の「誘発負荷」を算定する手順を示すとともに, 福岡市における環境負荷の誘発排出量を算定して, 建設部門では直接負荷よりも誘発負荷が大きいことを示した。(井村ら²⁶⁾) 井村らは95年の環境システム研究で下水道システムへのライフサイクルアセスメントの展開と(井村・楠田他²⁷⁾、一般廃棄物の処理システムへの展開を報告している²⁸⁾。特に前者では下水処理場の処理水量を大きくすることにより単位処理推量ごとの誘発環境負荷が小さくなることを試算から提示している。96年の井村・松本らによる研究では陸上, 海上, 航空にわたる交通システム全体の建設と維持補修について都市基盤のストックとしての環境負荷発生量を算定した²⁹⁾。さらに, 97年には地下鉄整備についてのライフサイクル環境負荷の算定を報告している³⁰⁾。花木・伊藤らは95年に具体的ニュータウン工事について建設工事段階, 運用段階のライフサイクルの炭酸ガスを算定する内包環境負荷の部材やライフサイクルステージへの帰属特性を明らかにした³¹⁾。96年の研究では同じニュータウンについて造成工事の広報, 歩道の舗装, 公園の仕様変更, 太陽利用施設や地域冷暖房システムの採用などによるライフサイクルの炭酸ガス削減効果を比較するとともに, 部分的な土地利用変更の効果についても定量的に把握することを報告した³²⁾。さらに, 97年にはニュータウンの構想, 計画段階での「概略」ライフサイクル炭酸ガスの算定を行う手順を論じている³³⁾。

また, 鶴巻らは94年には都市開発と都市基盤整備の構想段階から計画, 設計の各段階でのライフサイクルアセスメントの適用について提案するとともに³⁴⁾、96年の鶴巻・野池の研究では排水処理施設への展開を報告し³⁵⁾、97年には炭酸ガス発生とエネルギー消費以外の環境負荷項目の多元化を議論している³⁶⁾。

林・加藤らは95年の研究では自動車専用道路の建設についての複数の構造上の代替計画を設定して, 周辺環境への影響だけではなく周辺アメニティを資産価格の変化から推定することとあわせて, ライフサイクルアセスメントを用いて波及的な環境負荷としての炭酸ガス発生量を算定して計画の比較を試みた³⁷⁾。96年の研究では都市部の道路交差点改良事業, 山間部の道路改良工事などについての代替案のライフサイクル炭酸ガスを算定して, 建設費用や局地環境変化との間においてトレードオフの関係が存在することを指摘している³⁸⁾。中村・加藤ら(1998)は道路横断面構成の相違による炭酸ガスの違いを包括的に算定している³⁹⁾。

建設構造物の資材についての研究も進められており, 天野らはセメントコンクリートについての研究(天野ら(1996)⁴⁰⁾)及び舗装発生材のリサイクルのライフサイクル分析(天野ら(1998)⁴¹⁾)を報告している。

近年はライフサイクル分析の手法を取り入れつつ, 多元的な評価指標を設定しつつ, 計画シナリオの環境影響を定量化することによって都市環境計画への展開を試みる研究が報告されている。たとえば, 99年の井村・谷川らは都市サービスとマテリアルストックとフロー量の関係を算定しており⁴²⁾、藤田・盛岡らによる研究では都市計画の代替シナリオを体系的に設計することによってライフサイクル分析の都市政策の展開を提案している⁴³⁾。また井村・松本ら⁴⁴⁾や花木ら⁴⁵⁾は下水処理と廃棄物処理の統合的なシステム評価につい

て検討を行っている。

おわりに

1980年代から90年代にかけてのさまざまな論理の提示、部分システム的な実証研究に続く、物質代謝についての90年代後半以降の研究を通じて、圏域の物流や都市構造の環境負荷に与える影響を定量化するフレームがほぼ提示されたとはいえる。その中では、土木構造物単体について算定の原単位を整備する研究から、運用段階の算定への取り込み、施設単体から都市スケールへの評価対象の拡大、異なる代替的政策間の効果の比較、ライフサイクル評価を都市政策に転換する論理や、都市の物質代謝勘定体系の構築などへ踏み込んだ研究に至っている。幅広い都市基盤を視野に入れる総合的な都市政策システムの具体化へのガイドラインを提示する研究が展開されることが期待される。

参考文献

- 1) 末石富太郎：人間と環境が交流する様式について，環境システム研究，vol.16，第1回環境システムシンポジウムパネルディスカッション pp.7-9, 1988.
- 2) 末石富太郎，畔上統雄，花嶋温子：ごみの分別・排出に関する社会システムの研究，環境システム研究，vol.16，pp.100 - 105，1988.
- 3) 松藤康司，梶山喜一郎，立藤綾子：ごみ箱考～ごみ箱が「ごみ」になる時～，環境システム研究，vol.16，pp.106 - 111，1988.
- 4) 青山俊介，高畑恒志：廃棄物最終処分場管理の社会・環境システム面からの考察，環境システム研究，vol.16，pp.150 - 155，1988.
- 5) 浦辺真郎：デスポーザの導入に伴う排水，ごみの発生，処理などに与える影響と評価-アンケート調査に基づく意識調査結果を中心として-，環境システム研究，vol.17，pp.38 - 43，1989.
- 6) 瀬尾潔，高橋富男，古市徹：廃棄物処理施設建設における合意形成のための条件，環境システム研究，vol.17，pp.32 - 37，1989.
- 7) 古市徹，高松善一：廃棄物処理施設立地選定のための代替案選択支援システムの開発，環境システム研究，vol.17，pp.131 - 138，1989.
- 8) 瀬尾潔，古市徹，高橋富男，長谷川誠，紀伊隆志：地域融和をめざした廃棄物処理施設計画における景観への配慮，環境システム研究，vol.19，pp.143 - 148，1991.
- 9) 高畑恒志：廃棄物最終処分場管理の社会・環境システム面からの考察（Ⅱ）-最終処分場の閉鎖及び跡地管理に係る技術的・制度的課題について-，環境システム研究，vol.19，pp.149 - 155，1991.
- 10) 萬久光，島岡隆行，花嶋正孝，岡本敏之，古賀憲一：最終処分地適地選定エキスパートシステムの開発に関する研究-システムの考え方と構築方法-，環境システム研究，vol.22，pp.121 - 126，1994.
- 11) 盛岡通，寺下晃：PCB焼却に伴うリスク・マネージメントとリスク・コミュニケーションの解析，環境システム研究，vol.19，pp.155 - 160，1991.
- 12) 金川琢，二渡了，井村秀文：産業連関モデルによる都市のエネルギー・環境構造分析，環境システム研究，vol.19，pp.70 - 75，1991.
- 13) 和田安彦，三浦浩之，平田明寿：Life Cycle Assessment におけるリサイクルフェーズの評価手法に関する研究，環境システム研究，vol.22，pp.141 - 146，1994.
- 14) 盛岡通，吉田登，下田吉之：循環経済化に沿った情報家電の製品廃棄物の回収システムの枠組みに関する研究，環境システム研究，vol.25，pp.391 - 396，1997.
- 15) 盛岡通，吉田登，喜田昌，下田吉之，見市見：情報家電製品の回収システムの評価に関する研究，環境システム研究，vol.26，pp.533 - 542，1998.
- 16) 志水章夫，花木啓祐：紙のリサイクル市場と消費行動に関する分析，環境システム研究，vol.26，pp.95 - 102，1998.
- 17) 高倉秀太郎，花木啓祐：一般廃棄物系プラスチックのフロー解析と分別回収・リサイクルの可能性，環境システム研究，vol.26，pp.513 - 520，1998.
- 18) 楠部孝誠，津村和志，内藤正明：食品系有機廃棄物の再資源化による環境負荷削減効果，環境システム研究，vol.26，pp.311 - 316，1998.
- 19) 松本亨，大迫洋子，井村秀文：戦後日本の食生活変化と環境負荷：主食に関わるライフサイクルCO₂の評価，環境システム研究，vol.27，pp.89 - 96，1999.
- 20) 谷川寛樹，藤倉良，井村秀文：都市の物質収支と環境資源勘定に関する研究：建設用資材の投入と建設副産物，環

- 境システム研究, vol.23, pp.274 - 278, 1995.
- 21) 守田優, 大川将也, 新行内彰夫: 物流データによる東京の物質収支に関する研究, 環境システム研究, vol.25, pp.403 - 408, 1997.
 - 22) 守田優, 田淵勲, 佐藤祐介: 東京における物質代謝のフローについて, 環境システム研究, vol.26, pp.377 - 382, 1998.
 - 23) 森口祐一: 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, vol.25, pp.557 - 568, 1997.
 - 24) 盛岡通, 吉田登, 庵原一水: 産業廃棄物の地域間相互誘発構造からみた処分量抑制と費用負担に関する研究, 環境システム研究, vol.26, pp.103 - 110, 1998.
 - 25) 盛岡通, 増井利彦: 動学的最適化モデルによる廃棄物処理・リサイクルのマクロ評価, 環境システム研究, vol.25, pp.261 - 268, 1997.
 - 26) 銭谷賢治, 井村秀文: 建設にともなう環境負荷の定量化に関する研究, 環境システム研究, vol.22, pp.147 - 153, 1994.
 - 27) 井村秀文, 銭谷賢治, 楠田哲也, 森下兼年, 池田秀昭: 下水道システムのライフサイクルアセスメントに関する研究: LCE を指標としたケーススタディ, 環境システム研究, vol.23, pp.142 - 149, 1995.
 - 28) 井村秀文, 中嶋芳紀, 森下兼年, 前田利家: 一般廃棄物処理システムのライフサイクルアセスメントに関する研究 - エネルギーを指標として -, 環境システム研究, vol.23, pp.261 - 267, 1995.
 - 29) 中嶋芳紀, 岩渕省, 松本亨, 井村秀文: LCA を考慮した社会資本整備による総合的環境評価に関する研究, 環境システム研究, vol.24, pp.435 - 441, 1996.
 - 30) 岩渕省, 四宮明宣, 中嶋芳紀, 松本亨, 井村秀文: 地下鉄整備のライフサイクル環境負荷に関する研究, 環境システム研究, vol.25, pp.209 - 216, 1997.
 - 31) 伊藤武美, 花木啓祐, 谷口幸幸, 有浦幸隆: ニュータウン建設にともなう二酸化炭素排出量に関する研究, 環境システム研究, vol.23, pp.190 - 197, 1995.
 - 32) 伊藤武美, 花木啓祐, 本多博: 二酸化炭素排出抑制技術・システムのニュータウン建設への適用, 環境システム研究, vol.24, pp.250 - 259, 1996.
 - 33) 伊藤武美, 花木啓祐, 本多博: ニュータウン建設における二酸化炭素排出量の概略推計方法の検討, 環境システム研究, vol.25, pp.379 - 384, 1997.
 - 34) 鶴巻峰夫, 植松幹夫, 根津浩一郎: ライフサイクルエネルギー評価の都市開発計画への適用とその課題, 環境システム研究, vol.22, pp.158 - 164, 1994.
 - 35) 鶴巻峰夫, 野池達也: ライフサイクルアセスメントを適用した排水処理の評価に関する研究, 環境システム研究, vol.24, pp.272 - 281, 1996.
 - 36) 鶴巻峰夫, 野池達也: LCA における多項目環境負荷量の定量化に関する研究, 環境システム研究, vol.25, pp.217 - 228, 1997.
 - 37) 林良嗣, 加藤博和, 中嶋義人, 京谷孝史: 地球環境インパクトと周辺アメニティを考慮した道路構造代替案の評価手法に関する研究, 環境システム研究, vol.23, pp.314 - 320, 1995.
 - 38) 加藤博和, 林良嗣, 登秀樹: 道路構造代替案の地球環境負荷に関するライフサイクル的評価手法, 環境システム研究, vol.24, pp.282 - 293, 1996.
 - 39) 中村英樹, 加藤博和, 丸田浩史, 二村達: 都市間高速道路の横断面構成の相違による CO2 排出量のライフサイクル評価, 環境システム研究, vol.26, pp.261 - 270, 1998.
 - 40) 天野耕二, 伊藤昌隆, 池田康太郎, 柳沢幸雄: セメント・コンクリートに関わる総資源消費について, 環境システム研究, vol.24, pp.425 - 429, 1996.
 - 41) 天野耕二, 村田真樹: マテリアルフロー分析を用いたセメント・コンクリート産業の環境負荷評価, 環境システム研究, vol.26, pp.391 - 396, 1998.
 - 42) 谷川寛樹, 松本亨, 井村秀文: 都市構造物に関連したマテリアルストックの推計・評価に関する研究, 環境システム研究, vol.27, pp.347 - 354, 1999.
 - 43) 藤田壮, 盛岡通, 村野昭人: 都市集積地区から派生するライフサイクル二酸化炭素の評価の都市マネージメントへの展開についての考察, 環境システム研究, vol.27, pp.355 - 364, 1999.
 - 44) 松本亨, 中川慎司, 井村秀文, 波多江香苗: 循環型社会構築をめざした都市生活排水・廃棄物処理システムの統合的評価の視点, 環境システム研究, vol.27, pp.153 - 164, 1999.
 - 45) 稲葉隆太, 花木啓祐: 下水汚泥と都市ごみのゼロエミッション指向型管理, 環境システム研究, vol.27, pp.365 - 374, 1999.