

東京における物質代謝のフローについて

Study on Mass, Water and Energy Balances as an Urban Ecosystem

守田 優^{*}), 田淵 勲^{*}), 佐藤祐介^{**})

Masaru MORITA, Isao TABUCHI, and Yusuke SATO

ABSTRACT: In this study, we carried out water, energy, and mass balance analyses as an urban ecosystem for the effective management of urban environmental system utilizing statistics, census, and researches concerning these balances directed by governmental organizations. These flows generally have two sorts of subflows: natural and manmade. We differentiated and compared these two subflows in water, energy balance analyses. For the mass flow, however, only manmade mass flow, physical distribution was investigated. The analyses showed the characteristics of Tokyo Metropolis from the viewpoint of the urban ecosystem; huge amount of energy and water is intensively consumed by the densely concentrated large population and the manmade flows overwhelming the natural ones have an important role in the Tokyo ecosystem.

KEYWORDS: Water Balance, Energy Balance, Mass Balance, Metabolism, Solid wastes

1. はじめに

現在、地球規模の環境問題が、国際政治や国際経済の舞台でも重要な課題になっている。一方、我が国の都市の環境問題も、公害、交通、都市災害、自然破壊、廃棄物、人間関係の希薄化などさまざまなものがあり、地球環境問題とともに深刻である。このような状況を踏まえると、都市においては自立的かつ安定的な生態系循環を取り戻し、良好な都市環境を形成することが求められている。そのためにはまず、都市における代謝の全体像を都市生態系の観点から明らかにし、またその内部構造について、より詳細に把握することが必要である。

本研究では、前年度の物質収支の研究¹⁾を引き続き拡大し、図-1の都市生態系概念図のように、都市を一つの生態系として捉え、物質・水・エネルギー収支を対象にその代謝の全体像について、調査・分析することを目的とした。また特にこれらの収支においては、インプット、アウトプットのみならず、スループット（内部構造）についてもより詳しく調査・分析することを試みた。更にそれらの結果から、今後の都市環境についての考察を行った。

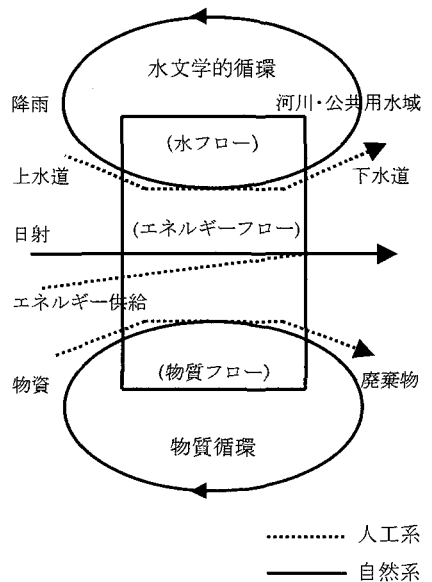


図-1 都市生態系概念図

* 芝浦工業大学工学部土木工学科 Department of Civil Engineering, Shibaura Institute of Technology

** (株)サンコー環境調査センター Sunkoh Environmental Research Center Co., Ltd.

2. 研究方法

本研究における対象地域は東京都区部とし、対象年は1994年（平成6年）とした。これは、東京都より東京都区部に限定したほうが、より都市の実像に近いと判断したためである。ただし、物質収支に関しては、本研究で用いた物流データが都道府県単位のものであるため、東京都全域についての調査となった。また、対象年は物質収支のベースとなる物流データの最新の調査年をもとに、1994年とした。ここでの物流データとは、（財）運輸経済研究センターによる「物流センサス」²⁾ のことであり、その他多くの統計資料を用いて計算を行った。図-2に大まかな計算の流れをフローチャートに示した。

2. 1 東京都の物質収支

物質収支では「物流センサス」の「純流動調査」を基本として計算を進めた。「純流動調査」とは物資そのものに着目し、出荷元から出荷先までの物資の動きを一区切りの流動量として捉えた調査である。

まず、品類品目別流動量において、物質を品類品目別（8品類 56品目）に分類し、東京都における着量・発量・都内流通量（都から都へ移動するもの）を「純流動調査」より求めた。これら求めた流動量、着量・発量から都内流通量を減じた値が、他府県からの流入量、他府県への流出量となる。しかし、ここでは、外国貿易による輸入・輸出が考慮されていないため、さらに東京都港湾局の「東京港港勢」のデータから東京都への輸入・輸出量を求め、「純流動調査」による着量と輸入量から総着量を、発量と輸出量から総発量を求めた。また、ここでは更に1994年から過去15年間（4回）の流動量の変化についても計算を行い、図-3のように東京都流動量の時系列変化グラフを示した。

次に、産業業種別流動量では、東京都総蓄積量の民生ストックと産業ストックの割合を求めるために、他資料から発産業（鉱業、製造業、卸売業、倉庫業）4種について求めた。計算方法は、鉱業については、「事業所統計調査報告」³⁾ から鉱業の種類と従業者数別の事業所数を求め、小品目ごとの1事業所当たりの出荷重量（原単位）²⁾ を乗じて全体の出荷重量を求め、製造業では、「東京都鉱工業指数年報」、「東京の工業」をもとに、各小品目ごとの出荷額と出荷額1万円当たりの重量（原単位）²⁾ を求め、これらを乗じて出荷重量を計算した。卸売業では、さらに「商業統計調査報告」から各産業業種細分類ごとの年間販売額と出荷額当たりの重量（原単位）²⁾ から出荷重量を算出し、倉庫業については、「倉庫統計季報」⁴⁾ を用いて直接出荷重量を求めた。これら求められた出荷重量を以下に説明する財の分類を用い、その比率から東京都総蓄積量の民生ストック、産業ストックを求めた。

次に、より流れを具体化させるために、物質を発・着産業業種別（発産業4種と着産業15種）に分け、

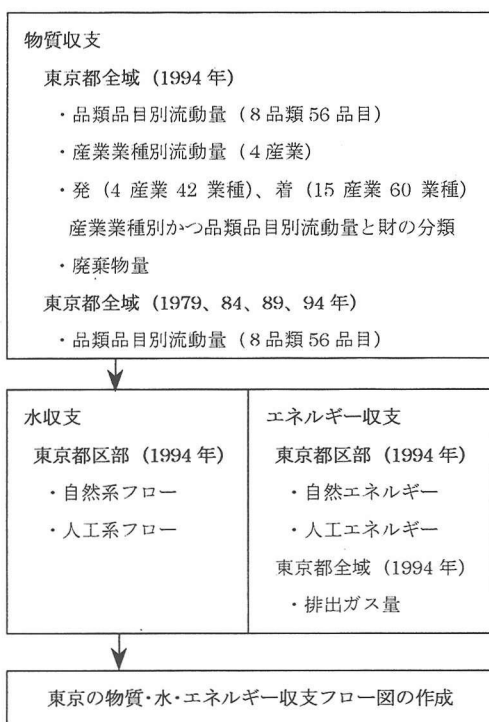


図-2 物質・水・エネルギー収支計算のフロー

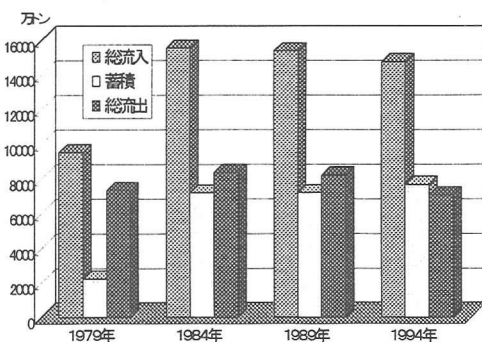


図-3 東京都流動量の変化グラフ

かつ品類品目別に区別し、更に財の分類を行った。ここで用いる「純流動調査」では、年間調査と3日間調査の2種類の方法で物資の流動量を調べている。前者は、8品類を対象としているが、後者では、更に56品目について、都内着量、都内発量、都内流通量を産業業種別に調査している。また、物の流出入に伴う変化、蓄積、消費等、すなわち物質収支のスループットを明らかにするため、各品目ごとにその財の分類（生産財・非耐久消費財・蓄積財）を行った。ここで財の分類は「東京都鉱工業指数年報」を参考に、図-4のように整理した。以上の計算方法については、守田ら¹¹⁾の論文に詳説しており、概略のみ以下に述べる。

まず、東京都における物資の着量については、年間調査の8品類を3日間調査の56品目のデータをもとに比例配分により年間56品目別入荷量を求め、輸入・都内流通量についても同様に計算をする。そして、着量において各品目に占める各業種の割合から、年間の着産業15種別かつ品類品目別の流入量、輸入量、都内流通量を求めた。

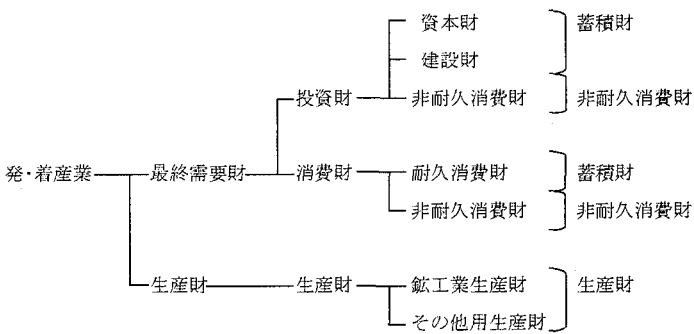


図-4 物資流動における財の分類

一方、東京都における物資の発量についても同様に、3日間調査から比例配分によって求めた年間56品目別発量をもとに、発産業4種が各品目に占める比率を考慮して年間の発産業業種別品目別の総発量を求めた。そして、年間56品目別の純流動の構成比から、総発量を都内への出荷、都外への出荷、海外への出荷の3つに配分した。

更に、図-4による財の分類については、前回の物質収支の研究¹¹⁾においても同様に分類を行なったが、今回は、投資財の中に非耐久消費財を設け、より細かく分類するよう試みた。

最後に廃棄物量については、東京都清掃局の「事業概要」、「産業廃棄物処理実態調査報告書」、「清掃局年報」、「東京都市町村清掃事業年報」から、産業廃棄物と一般廃棄物について求めた。

以上の結果を合わせて、東京都の物質収支フロー図を作成した。

2. 2 東京都区部の水収支

水については、水循環を構成している経路の要素について、東京都水道局の「事業年報」、「東京都統計年鑑」、「工業統計表～用地・用水編～」⁵⁾、多数の資料^{6) 7)}を用いて計算を行った。大別すると降雨から始まる地下浸透や蒸発散などの自然系フローと、家庭・事業所・工場を流れる人工系フローの2つからなり、以上を合わせて東京都区部の水収支フロー図を作成した。ただし、自然系フローの降水量は、1994年が渇水年であったため、区部平均年間降水量1500mmを用いて、修正して計算を行った。この自然系フローの計算については、東京都公害局の「水収支報告」⁸⁾を参考にした。

2. 3 東京都区部のエネルギー収支と排出ガス量

エネルギーについても水と同様に、自然系と人工系に分けて計算を行った。まず、自然系については、潜熱を水収支の蒸発散量と整合性をはかり、更に熱収支計算⁹⁾を考慮して算定した。一方、人工系エネルギーについては、既に東京都区部のエネルギー消費について検討している^{10) 11)}。具体的には、「東京都統計年鑑」、「ガス事業統計年報」¹²⁾から、電力・都市ガスの販売量を求め、それを熱量に変換してエネルギー供給量を求めた。燃料油に関しては、「エネルギー生産需給統計年報」¹³⁾から、販売量と発熱量原単位を取り出し、それらを掛け合わせて電力・都市ガスと同様にエネルギー供給量を求めた。LPガスについては、「LPガス資料年報」¹⁴⁾から、他のエネルギー源と同様に計算を行い、地域冷暖房については、対象とする年の値が得られないために前年の供給実績から、対象年の供給量を「東京都資源エネルギー対策関連事業

概要」¹⁵⁾から推計した。これら求めた東京都全域のエネルギー源別の供給量を、部門別（民生・産業・運輸）に分けて計算し、更に世帯数などの基礎指標および原単位から、東京都区部の値に変換した。こうして与えられたエネルギーを有効仕事と廃熱ロスに分配し¹⁶⁾、東京都区部のエネルギー収支フロー図を作成した。

排出ガス量については、二酸化炭素などエネルギーとの関連が深いと判断して「東京都統計年鑑」、「東京都環境白書」をもとに計算、引用した。ただし、フロー図においては、物質収支の中に示した。

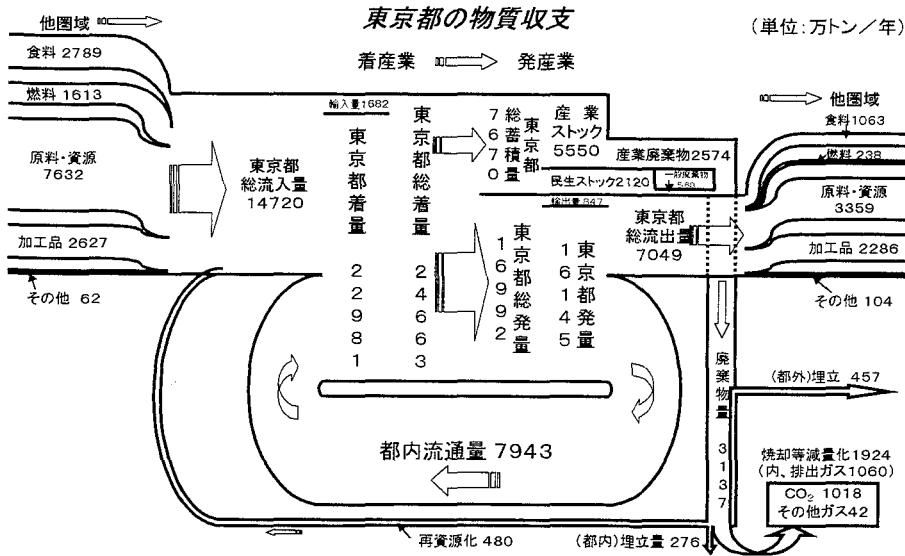
3. 物質・水・エネルギーフロー図の計算結果と考察

3. 1 物質収支

まず、図－3の東京都流動量の時系列変化グラフから、ここ15年の物質収支の変化がわかる。ここ10年間は流動量全体に大きな変化は見られない。しかし、徐々に流出量の割合が減少し、その分蓄積量が増加している。また特に、バブル経済期へ向かう1979年から1984年の伸びは顕著である。

これらを踏まえて、図－5に東京都物質収支フロー図を、図－6に東京都物質収支の内部構造図を作成した。図－5や次頁の図－7、8は流動量の大きさを線の幅によって表している。

図－5を見ると、東京都に到着する全ての物質のうちの約3割が東京都に蓄積している。残りの約7割は、東京都発量として、都内流通量、東京都圏外への流出という形で流動し、それぞれの割合は約5割ずつとなっている。また、深刻な都市問題と



図－5 東京都物質収支フロー図

なっている廃棄物は、蓄積量の約4割を占めており、再資源化されるのは約15%という状況でリサイクルがあまり進んでいないと言える。ただし、ここでいう再資源化されたものとは、ごみが出た時点で分別回収されたものや、最終処分される段階で有効利用できるもの全てを含めて考えている。処理については大部分を焼却処理しているが、圏外への埋め立てに頼る状況となっている。

次に図－6の物質収支の内部構造を見ると、東京都の総着量24,663万トンのうち、生産財が33%、非耐久消費財が30%、蓄積財が37%であり、蓄積財の占める割合が高い。特に蓄積財のなかでも、約65%が建設産業のものであり、砂利・砂・セメント・生コン等を主体とした建設資材である。この建設資材は、大量に流入し、蓄積され、都市基盤となる。東京都の総発量16,992万トンでは、生産財が32%、非耐久消費財が28%、蓄積財が40%である。図－6には書かれていないが蓄積財・生産財ともに、業種のなかでもっとも大きな割合を占めているのは窯業・土石製品製造業であり、着産業の兼ね合いからみると都内を流通する間に加工され、生産財から蓄積財に変化していることがわかる。非耐久消費財では、食料品製造業758万トン（16%）と農・畜・水産物卸売業729万トン（15%）が高い割合を示している。このことから、東京都は食料の大消費地であるとともに中継地であることがわかる。

東京都の物質収支系全体を通してみると、総着量 24,663 万トンから都内流通量 7,943 万トン減じた物質流入量 (input) 14,720 万トンのうち、廃棄物が 3,137 万トンであり、その割合は約 1 / 5 である。この割合が循環型社会達成の一つの指標となるものである。

3. 2 水収支

図-7の水収支フローを見ると、水収支では、自然フローよりも人工フローの方が大きいことが分かる。これは区部への人口集中による需要の高さからで、家庭・事業所で使用される生活用水が全体の約8割を占めていることから分かる。しかしこの家庭・事業所においてはほとんど再利用されずにそのまま下水道へと流れ出ており、工場における再利用率 (55%) と比べると小さな値である。自然フローの降雨は、55%程度が表面流出量として公共用水域に流出している。人工・自然フローはアウトプット (流出) においては合流するが、インプット・スループットにおいてはクロスオーバーすることなく、ほとんど隔離された経路で流れ出ており、有効利用されていない。

以上より、都市の水収支においては人工的な流れが自然の流れを上回っている。自然系では地下浸透を増加させ、水資源のストックを高めること。人工系ではスループットにおけるクロスオーバーによる有効利用を促進させることが課題となる。

3. 3 エネルギー収支

図-8は東京都区部のエネルギー収支フロー図を表したものである。エネルギー収支では、水収支とは逆に自然エネルギーのほうが人工エネルギーよりも大きい。しかし、自然エネルギーの日射量は全体量こそ多いが、広範囲に拡散されているため、燃料油やガス

のように濃縮したエネルギーとして得ることは難しい。区部では、人工系エネルギーは $36 \text{ (w/m}^2\text{)}$ あり、利用されて有効仕事 $18 \text{ (w/m}^2\text{)}$ 、廃熱ロス $18 \text{ (w/m}^2\text{)}$ となる。この有効仕事も最終的には熱となり、その合計は $36 \text{ (w/m}^2\text{)}$ である。これは、自然系における顕熱 $65 \text{ (w/m}^2\text{)}$ より小さい値であるが、図-7の区部平均ではなく、都心3区での人工エネルギーは $180 \text{ (w/m}^2\text{)}$ ほど¹⁰⁾ となり、自然エネルギーの日射量より多い。ここでのエネルギー収支は年間の平均値であるが、ヒートアイランドなど熱環境との関連については、昼間、夜間など時間変動を考慮して議論されるべきである¹⁷⁾。今後の方向として、民生部門における電力・都市ガス、運輸・産業部門における燃料油の需要が高いことから、ここでの抑制と、未だ割合の低い地域冷

東京都物質収支の内部構造

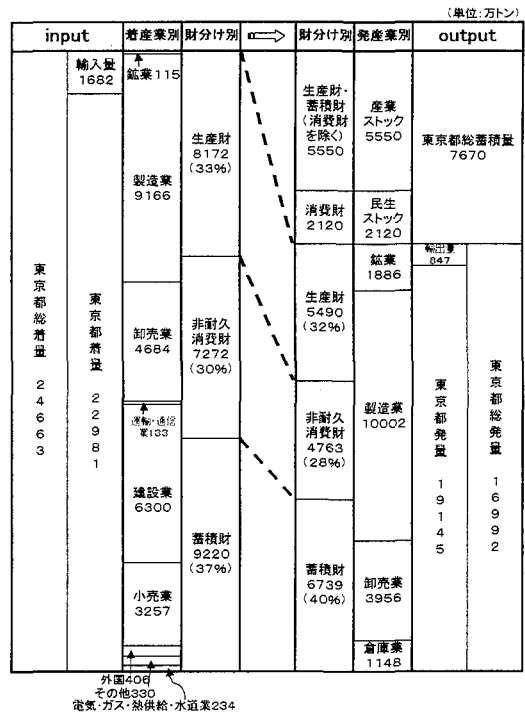


図-6 東京都物質収支の内部構造

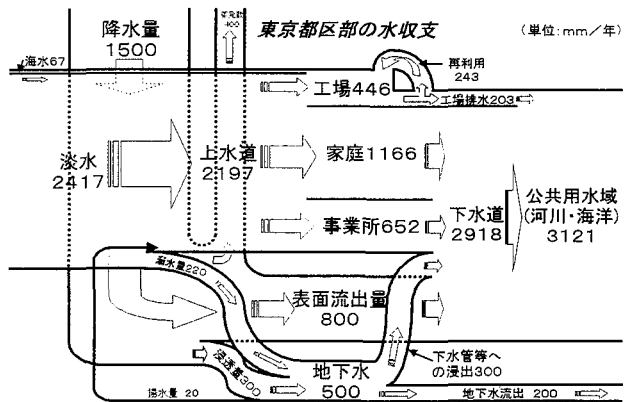


図-7 東京都区部水収支フロー図

暖房 $0.4 \text{ (w/m}^2\text{)}$ 等の有効利用が必要だと思われる。

まとめ

本研究では、東京の都市の全体像とその内部構造について明らかにすることを試みた。東京は、大量の流入・流出があり、特に物質においては産業廃棄物、水・エネルギーでは民生部門における排水・排熱が大きなウェイトを占めている。今後の都市環境を考える上では、この廃棄物、排水、排熱のより有効な利用と抑制が必要だと思われる。

今後は更に、データ量と計算方法の改良を重ねながら精度を高め、他の都市や過去の状況についても比較をしながら都市についての全体像を明らかにしていくつもりである。

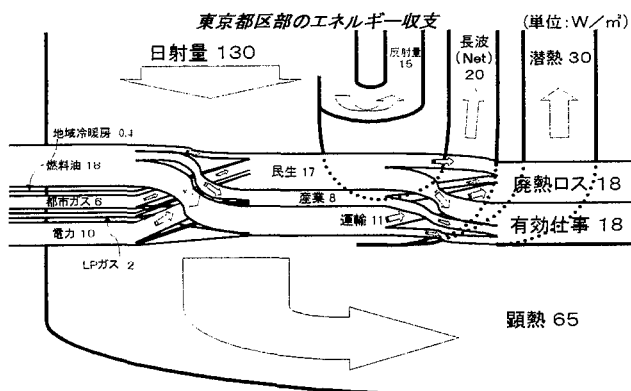


図-8 東京都区部エネルギー収支フロー図

謝辞

本研究を進めるにあたり、多くの方々の指導と協力を得た。特に、(株)日通総合研究所の山口裕之氏と(財)運輸経済研究センター、東京都庁の方々にはここに謝意を表します。

引用文献

- 1) 守田 優, 大川将也, 新行内彰夫 (1997): 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, pp403-408
- 2) (財)運輸経済研究センター (1997): 第6回 物流センサス
- 3) 東京都: 事業所統計調査報告, 平成3年
- 4) 東京都: 倉庫統計季報, 1993年第4四半期号~1994年第4四半期号
- 5) 大蔵省印刷局: 工業統計表 用地・用水編, 平成6年
- 6) 東京都水道局: 工業用水道管理統計年報, 平成5年、平成6年
- 7) 東京都環境保全局: 都内の地下水用水の実態, 平成6年
- 8) 東京都公害局: 地下水調査報告書, 昭和55年
- 9) 守田 優, 滝 敏行 (1994) 都市の温暖化に関する環境熱力学的考察, 水工学論文集, 第38巻, pp369-374
- 10) 守田 優, 竹内友昭 (1992): 東京の人工熱排出構造とその時間変動について, 環境システム研究, Vol.20, pp287-293
- 11) 守田 優 (1996): 都市人工熱源の熱環境負荷原単位について, 環境システム研究, Vol.24, pp593-600
- 12) 資源エネルギー庁ガス事業課: ガス事業統計年報, 平成6年
- 13) 通商産業大臣官房調査統計部: エネルギー生産需給統計年報 (石油・石炭・コークス), 平成6年
- 14) (株)石油化学新聞社 (1996): LPガス資料年報
- 15) 東京都生活文化局: 東京都資源エネルギー対策関連事業概要, 平成6年度
- 16) 平田 賢 (1994): 省エネルギー論, オーム社, pp37
- 17) 守田 優 (1996): 都市域における夜間の熱環境容量と熱帯夜の形成についての考察, 環境システム研究, Vol.24, pp574-579