

都市域と地球温暖化の相互影響と対策に関する総合的研究活動

RESEARCH ACTIVITIES ON INTERACTIVE IMPACTS BETWEEN GLOBAL WARMING AND URBAN ACTIVITIES AND COUNTERMEASURES

衛生工学委員会

松尾 友矩* 花木 啓祐**

Tomonori MATSUO, Keisuke HANAKI

ABSTRACT; A comprehensive research project on interactive impacts between global warming and urban activities and countermeasures is in progress. Research subtopics included are: analysis of carbon dioxide emission from urban activities and emission control; biological methane production in urban water environment; evaluation of nitrous oxide emission in biological nitrogen removal from wastewater, photo chemical production of tropospheric ozone from air pollutants; modelling of long-distance transportation of green house gas; impacts of and counter measures for sea level rise in coastal cities; impacts of global warming on urban infrastructures; impacts of global warming on hydrology in urban area. A developed simulator for material flow and heat recovery in urban area is introduced. Demand of energy for various purpose in various land use in each season in day or night is displayed. On the other hand, amount of sewage flow, which determines the available heat from sewage, is displayed along main sewer pipes.

KEY WORDS: global warming, urban activities, energy, heat recovery, simulation

1. はじめに

衛生工学委員会では1989年以来「地球規模環境問題研究小委員会」（1992年までは研究分科会）を設置して様々な活動を行ってきている。当初は関連分野の方々と協力してシンポジウムやワークショップの開催を中心に活動を進めていたが、地球環境委員会を始めとしてこの種の会合が活発に開催されるようになった現在、研究の推進に力を注ぎつつある。一方、小委員会の一部のメンバーと関連分野の研究者からなる研究チームで文部省の科学研究費（総合A）研究「都市活動に起因する温室効果ガス発生と都市域における地球温暖化の影響および対策」（代表：松尾友矩）が平成4年度から3年間の予定で行われている。そこで本小委員会においては、この研究グループの成果を核にし、その研究成果を題材にしてディスカッションを行うことによって、衛生工学分野での研究を推進させようと努めている。ここでは、この研究グループ研究の概要を紹介すると共に、都市の物質代謝のシミュレータについて進行中の成果を示したい。

2. 地球温暖化と都市活動

人口の多数が都市に居住し、近年東南アジア諸国で見られているような急速な都市化の形で今後の発展途上国の人口増加が起きると予測されている。都市は地球温暖化と人間の関わりが集約して現れる場である。都市と地球温暖化との関わりの特徴の第一は双方向にインパクトを与え合う点である。都市活動は温室効果ガスの排出という形で地球温暖化の原因となっている。この温室効果ガスの排出の中には都市の場で直接発生するもののみならず、都市から環境に排出された排水・廃棄物によるもの、都市活動を支える製品、食糧生産に伴う温室効果ガス発生、更に都市活動に直接・間接に関連する森林破壊も本来含まれる。

一方都市は地球温暖化の影響を受ける。しかし、その影響の受け方は、人為的な制御が行われない自然生態系などへの影響のように直接的な形よりはむしろ、間接的でしかも複雑なものが中心となろう。すなわち、温暖化を防止しなければならないという大きな制約の下に、基盤施設、都市の構造、都市活動、更

*; 東京大学工学部都市工学科 Department of Urban Engineering, The University of Tokyo, **; 東京大学先端科学技術研究センター Research Center for Advanced Science and Technology, The University of Tokyo

に生活様式を従来のものから改める必要が生じるのであり、これらが長期的には極めて重要な影響である。この影響を評価し対策を立てるには、都市あるいは都市活動が温暖化にどのような形で、どの程度寄与しているかをまず明らかにせねばならない。都市と温暖化の間にはこのような複雑な相互関係があるので、地球温暖化への都市活動の寄与、影響、対策を有機的に結びつけて考察を進めることが必要である。

3. 科学研究費研究テーマの概要

前に述べたように、都市の様々な活動が地球温暖化とつながりを持っているが、それらをすべて網羅的に扱うことは避け、ポイントを絞り8サブテーマに対して研究を行っている(図-1)。都市から発生する温室効果ガスとして二酸化炭素、メタン、一酸化二窒素および対流圏オゾンを考え、それらの発生と輸送を検討している。その一方で、都市基盤施設へのインパクト、海面上昇のインパクト、都市の水循環への影響を検討している。本研究では、都市からの温室効果ガスの発生といういわば都市から地球環境へのインパクトの面と、都市が受ける温暖化の影響と対策の面の両者について各専門家が分担して研究を進めている。それぞれの分担課題についての概要は次のようである。

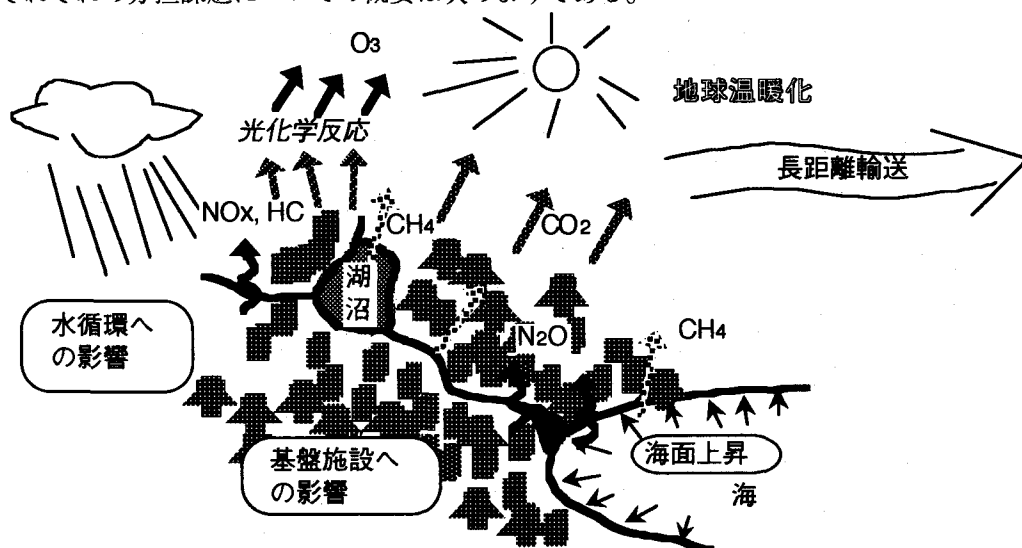


図-1. 都市と地球温暖化の相互影響と対策に関する共同研究

- (1) 都市活動に伴う二酸化炭素排出量解析と削減可能性(東京大学・松尾友矩)：エネルギー消費に伴って排出する二酸化炭素を都市単位で解析し、特に国際的比較を行っている。たとえば中国では、首都北京のエネルギー消費量は一人当たりでは東京都に匹敵すること、中国国内ではこの北京を始め、天津、上海ではこの一人当たりエネルギー消費量が大いだが、これらの都市では決してエネルギーが無駄に使われているのではなく、地域の総生産を高めるのに貢献していることがわかっている。このことは、発展途上国が発展を遂げる過程でエネルギー消費、すなわち二酸化炭素の排出の増加が避けがたいことを示している。
- (2) 都市水系における生物学的なメタン発生の解析(東北大学・野池達也)：有機物による汚濁を受けた都市水系の底泥が持つメタン(CH_4)生成能を伊豆沼を中心とした湖の調査とその底泥などを用いた実験によって評価している。メタン生成フラックスを求めることによって都市活動の結果起きるメタン生成量が評価できるが、直接測定は困難である。そこで、酢酸利用および水素利用メタン生成菌数を計測すると共に実験室におけるバッチ実験でメタン生成速度を求めるアプローチを取っている。微生物量当たりのメタン生成活性は底泥の深さによりかなり異なることがわかっている。
- (3) 排水由来の一酸化二窒素発生の計量(東京大学・花木啓祐)：わが国の排水処理で広く用いられつつある硝化・脱窒の過程で発生する一酸化二窒素(N_2O)を対象にし、発生が起きやすい条件を主として室内実験で検討している。その結果、脱窒と硝化のいずれのプロセスにおいても無視できない量の一酸化二窒素

が生成し得ることがわかってきた。脱室の場合には相対的に有機物源が不足する場合、pHが低い場合、負荷が高い場合に、硝化の場合には溶存酸素濃度が低い場合、有機物が共存している場合に一酸化二窒素が出やすいことがわかっている。実施設によってはこれらの条件に近い条件で運転しているものもある。

(4) 大気汚染物質に起因する対流圏オゾン生成解明（北海道大学・太田幸夫）：都市から排出される窒素酸化物や揮発性有機化合物が光化学反応を受けて、温室効果を持つ対流圏オゾン(O₃)が生成する過程を表現する光化学モデルを構築している。経度・高度を変化させる2次元モデルによって北半球の中緯度帯の窒素酸化物、オゾン濃度をシミュレートした。偏西風の存在のため、発生源よりも東方においてオゾンが高くなる計算結果となっている。この減少は窒素酸化物の排出量が大い冬季に顕著であり、夏季にはさほど明確でない。今後は都市活動の変化によって窒素酸化物排出量が増減した際の効果を推定する。

(5) 温室効果ガスの長距離輸送モデル（豊橋技術科学大学・北田敏廣）：都市から排出された温室効果ガスの輸送のモデル化を行うとともに、温室効果ガスの濃度が局所的に高くなる都市域における放射収支を計算し、局所的な温暖化の起きる可能性を検討している。前者については、東アジアを対象地域にして準地球規模の濃度分布を推定するためのモデルを開発した。このモデルでは、単なる輸送だけではなく、汚染大気の化学反応をもモデルに組み込んだ。後者については、簡単な放射-対流モデルを基本としてモデルの構築を行い、その改良を行いつつある。

(6) 沿岸都市インフラストラクチャに対する海面上昇の影響と対応策（茨城大学・三村信男）：沿岸部都市における諸施設への海面上昇の影響をまず系統樹的に整理し、対策を検討した。わが国のような先進国の場合、海面上昇によって国土が失われることはないが、インフラストラクチャへのかなりの追加投資が必要になる。そのような社会経済システムへの影響評価の精度を上げるべく検討している。一方、自然海岸の場合には砂浜の浸食によって単なる海面上昇分以上の影響が現れる。茨城県の砂浜のケーススタディでは、1 m の海面上昇で90%の砂浜が浸食され、汀線が90 m も後退することが示された。

(7) 都市の基盤施設への地球温暖化の影響の整理と定量化（九州大学・楠田哲也）：温暖化によって影響が現れるインフラストラクチャの内、特に雨水排除を行う下水管への影響をハード、ソフト両面から検討している。ハード面では、温暖化によって降雨強度が変化した際の下水管の雨水排除能力を正しく評価するため、従来の水理計算法の改良を進めている。一方、雨水排除能力不足で起きる洪水のリスクに関連し、都市のリスクと便益の考え方を整理し、定量的な評価に向けて検討を行っている。これらハード、ソフト両面での検討は、温暖化に備えた下水管の更新の必要性、有用性を評価するために役立つであろう。

(8) 都市域における水循環への地球温暖化の影響評価（大阪大学・村岡浩爾）：水循環に対する地球温暖化の影響に関しては各方面で研究が行われているが、都市域の水循環は自然系とはかなり異なっているにもかかわらず、これまで検討されていなかった。ここでは、大阪と神戸を対象として詳細なデータを収集し整理することによって水収支・水循環を定量的に推定し、それに基づいて温暖化の影響を評価した。例えば大阪市の結果では、地下水位の上昇により下水道系と河道系の流動が著しく、このことから沿岸の地下水位が上昇すると大きな影響が都市の水循環に生じることが推定された。

4. 生活系都市代謝システムシミュレータ

ここでは、現在松尾らが開発、検討を行っている都市代謝シミュレーションのツールを紹介したい。

4-1. 都市の物質代謝

都市は、その成立のために、外部より電力やガスのエネルギー、人間生活に不可欠な水や食料、衣類や建設資材などの各種の物質を取り入れ、用済みとなった後では都市排熱、排ガス、下水、ゴミとして排出している。このような過程はちょうど生物体がある存在に必要な物質を体内に取り入れ、用済みとなった老廃物を体外に出す現象である「新陳代謝」にアナロジーさせて見る事が出来る。都市の活動を維持するための新陳代謝（以下においては代謝ということにする）は、産業系の代謝と生活系の代謝に大別され

る。都市活動の中に占める産業系と生活系の大きさの割合は、その都市の性格によって異なるが、ここでは大かたの都市に共通する生活系代謝にかかわる都市システムについて、そこに求められる身近な環境保全と地球環境問題とりわけ地球温暖化防止のために考えなければならない今後の問題点を整理していく。

生活系都市代謝システムの主要な構成要素はエネルギーの系、水の系、物質（ゴミ）の系に大別される。エネルギーは多くの場合、使われた結果は排熱として環境中へ放出されるが、その一部が下水道、河川、地下鉄トンネル内などに集中的に排出されれば、それは回収再利用の対象となる。水の系にあっては上水道で入力され、下水道で集められ、処理された上で環境中へ排出される。物質の系にあっては、食料を含む各種の原材料、製品、建設資材等が都市に流入し、都市内を移動し、生活にとって不要になった物質はゴミとして排出される。ゴミは清掃事業者によって収集され、焼却され、埋め立てへと回されていく。都市を取りまくこのような、エネルギー、水、物質の流れを概念的に示せば 図-2 のように示される¹⁾。

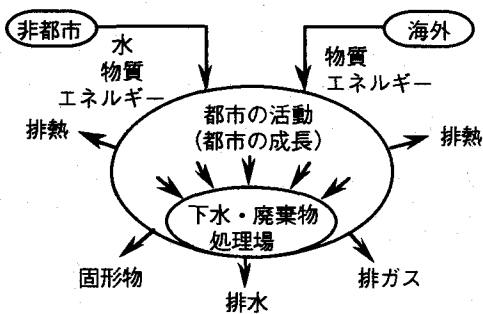


図-2 都市における物質・水・エネルギー代謝

このとき、周辺環境への排出負荷を最小にするような都市代謝システムを組むことが求められる訳である。この排出負荷を抑制するためには、都市内部での循環再利用の回路を整備することであるが、それには、エネルギーの系での回収再利用システムの整備、一層の省エネルギー化を進めて、二酸化炭素の排出を抑え、併せて水質汚染物質、大気汚染物質の排出を抑制することが必要となる。

4-2. 生活系都市代謝システムシミュレーションモデルの構造

このような都市代謝システムを総合的に評価していくためのシミュレーションモデルの一例として 図-3 のような構造のモデルを提案してみたい。

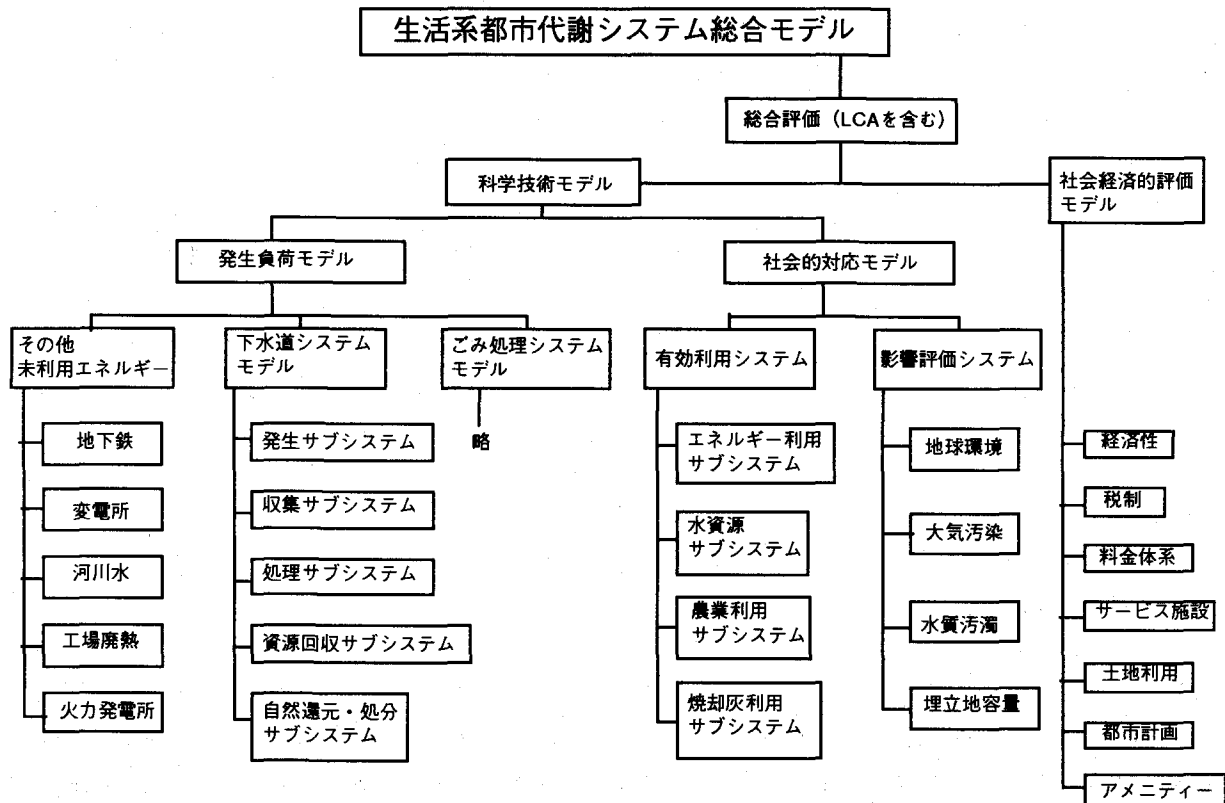


図-3. 都市における物質・水・エネルギー代謝

このモデルの概要は、①水は下水として、エネルギーは廃熱として、物質はごみとして排出されたところからを考え、環境への発生負荷として考えること。②発生負荷は社会的対応の中で再利用へ回されたり、最終排出先での環境への影響を評価される。③またそれらの科学技術的対応は社会経済的評価と併せて、最終的にそれらのライフサイクルアセスメント（LCA）からの評価を受けて総合評価が下される。という構造として示される。

本シミュレーションモデルのうち、下水道システムモデルの内の発生サブシステム、収集サブシステム、とエネルギー利用現況サブシステムの原型を示すと次のようになる。

（1）下水道システム「発生サブシステム」の構成

基本構成：下水道システム「発生サブシステム」においては、発生下水量、下水の持つ熱エネルギー、下水中の有機物、を発生負荷パラメーターとして選ぶ。下水量は、水資源としての再利用及び下水の熱エネルギー量の評価に用いる。有機物量は下水処理過程で回収可能なエネルギー物質として評価する。また、N、P等の肥料成分については、必要に応じて有機物量に係数を掛けて求める。

対象区域：東京都23区内

基本データ：①東京都都市計画局作成・昭和56年度及び61年度東京都土地利用現況調査（区部の25mポイントデータ（建物用途分類・約20種、建物の有無、建物階数、を記録））を用いて計算された250m×250mメッシュ毎の建物用途別延床面積、②人口、世帯数に関する国勢調査データを250m×250mのメッシュデータとしたものを使うことができる。

原単位の定め方：建物用途に従い、床面積当たりの日平均下水量を想定（必要であれば時間変動を入れることも可能である。）

（2）下水道システム「収集サブシステム」の構成

基本構成：東京都下水道局による下水道幹線管路図を500m×500mメッシュで読み取り、幹線の結合点の座標を与えて、管路システムを求める。1つの500m×500mメッシュにかかわる管路へそのメッシュの発生下水量等が流入するものとする。

基本データ：東京都下水道局による東京23区下水道管路網図、ポンプ所、処理場位置を示す基本地図

積算発生負荷量の算出：各幹線結合点、ポンプ所、処理場における下水量、熱エネルギー量、有機物量を算出することができる。回收利用可能な熱エネルギー量はヒートポンプの熱効率係数を掛けて求める。

（3）「エネルギー利用現況サブシステム」

基本構成：東京23区をフィールドに都市構造とエネルギー消費との関係を明らかにするため、東京都都市計画局作成・昭和56年度及び61年度東京都土地利用現況調査（区部）の25mポイントデータ（建物用途分類・約20種、建物の有無、建物階数）を用いて計算された250mメッシュ毎の建物用途別延べ床面積（下水発生負荷算出の基本データと同じ）、東京都区部における部門別燃料種別エネルギー消費量⁽²⁾、業種別用途別熱負荷設計基準値・季節変化及び日変化（（株）大阪ガス、1991、及び日本地域冷暖房協会、1992）等の資料をもとに、建物用途別単位延べ床面積当たりエネルギー消費量を算出し、土地利用情報を用いて、東京23区におけるエネルギー消費量分布の季節変化・日変化のデータセットを作成した。暖房・冷房・給湯については、ほとんどの業種について基準値や変動特性に関する情報がこれらの資料で与えられている。その他の用途（機器等）に関しては、文献(2)の値（全用途の合計）から、前述の3大用途の基準値を積み上げて推計した値を差し引いた残差を当て、適当な変動パターンを設定した。製造業部門については用途を分けず、交通部門は自動車（ガソリン税）と鉄道（電力）に分類した。

基本データ：建物用途別熱負荷の時間変動は、1月の暖房負荷、8月の冷房負荷の調査例を基に与えた。業務系では昼間に需要のピークを持つのに対し、宵の口にはピークを持つのが家庭における需要の特徴である。暖房は、午前中の需要が高いのに対し、冷房は昼間の需要がほぼフラットに近い。また、1年を通じ毎時の対一日の比は不変とした。

4-3. 下水道システム・シミュレーション モデル No.1 の概要

下水道システム・シミュレーション モデル No.1 の機能は 250m×250m メッシュでの消費エネルギー計算、下水幹線結合点（事実上は任意のメッシュにおいて計算可能である）での下水量の計算、そのメッシュおよび周辺のメッシュでの必要再利用水量の計算、下水幹線結合点での未利用エネルギー（下水熱エネルギー）量の計算、その地点での利用可能なエネルギー量の計算（主として暖（冷）房用への利用を考えて、供給可能なメッシュを決定する）、を行うものである。なお、本シミュレーションモデルはワークステーション（富士通 S-4 / LX）において稼働するものとなっている。

4-4. 下水道システム・シミュレーションモデルの出力

(1) 東京23区における現状におけるエネルギー消費密度分布の表示

東京23区におけるエネルギー消費密度分布のを必要に応じてきめの細かさで示すことができる。図-4に示すような5種類の要因の任意の組み合わせ（例えば、住宅×電気×暖房×冬×夜）、あるいは包括的な組み合わせ（例えば、全エネルギー消費×冬×夜など）に対してエネルギー消費を表示する。いずれも1メッシュは 250m の目の細かさで示す。一般に、昼には業務機能の集積している都心において消費量が大きく、ピーク値は郊外の50倍近くに達する。また燃料油のみを取り上げても同様の分布傾向が伺える。一方、夜には、都心と郊外との格差は、3倍以内におさまり、全域的に低いレベルに落ち着く。

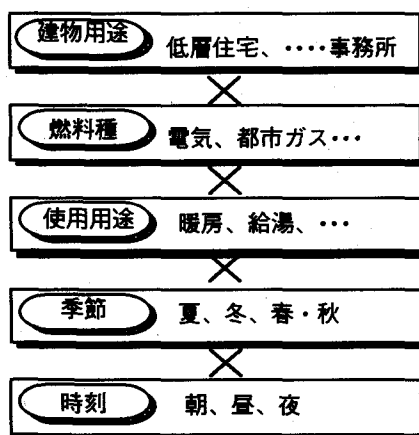


図-4. エネルギー消費算出時のパラメータの組み合わせ

(2) 東京23区における下水道集水区域区分図に下水道幹線連結図を重ねた表示

本シミュレータでは下水を熱源と考えている。下水の場合は、下水処理場に向けて流下していくと共に流量が増加し、取り出せる熱量も増加する。500m×500mメッシュで表わした下水道幹線による集水地域区分と下水道幹線連結図を重ねた図面を基礎情報として表示し、下水管の結合点における下水量を算出・表示することができる。これによって、回収可能熱量が示されるので、これと、前項のエネルギー消費密度分布マップの適切なもの（例えば、オフィスの暖房用に熱を供給する場合を考えるのであればそれに限った分布）を比較することによって下水熱の有効利用の適地とその寄与を知ることができる。

なお、本シミュレーションモデルの開発に際しては、東京都下水道局、富士通 エフ・アイ・ビー社の協力を得ている。また、本モデルの原型となったエネルギー現況サブシステムの開発は環境庁地球環境研究特別推進費によっている。

参考文献

- (1) 松尾友矩「生活系都市代謝システムの未来」, 日本生気象学会誌, Vol. 29, 77-81 (1992)
- (2) 平松直人, 花木啓祐, 松尾友矩「エネルギー消費の大都市間比較」 土木学会環境システム研究, Vol.20, 252-261 (1992) .