

戦略的創造研究推進事業 CREST
研究領域「水の循環系モデリングと利用システム」
研究課題

「都市生態圏—大気圏—水圏における
水・エネルギー交換過程の解明」

研究終了報告書

研究期間 平成14年11月～平成20年3月

研究代表者：神田 学

(東京工業大学理工学研究科 准教授)

1 研究実施の概要

1-1 研究の目的と方法

アジア沿岸域には多くのメガシティが存在し、さらなる膨張が予測される。過密な都市生態圏が大気・水圏に及ぼす影響は、ヒートアイランド、集中豪雨、人工水循環系の肥大化・偏在化(水不足・都市型水害)、内湾域の淡水化・高温化など、各種環境問題で顕在化している。これら個々の現象については気象・水文・海洋の各分野で研究が進んでいるが、いつ・どこで・何故発生し、どう変化するかという定量的予測には至っていない。その最大のネックは、これらの現象の鍵を握る都市生態圏から大気圏・水圏へもたらされる水・エネルギー輸送の実態や物理的過程が十分に理解されていない点にある。実際、近年の大気圏および水圏(主に内湾)の流動解析においては精緻で最新の気象・海洋モデルが駆使されているが、都市生態圏は単なる1つの境界条件として極めて簡略的に取り扱われているのが現状である。このブレイクスルーには、大気・海洋・水文の各要素技術の高精度化や単なる異種モデルの統合ではなく、都市生態圏から大気圏・水圏へ、いつ、どのようにして、どれだけの水・エネルギーが輸送されているのかをきちんと解明し、都市域の水・エネルギー循環系を1つのフローとして捉え直すことが重要である(図 1.1.1)。

そこで本研究では、大気・海洋・水文・建築微気象の研究者が協力して、都市生態圏が大気圏・水圏へ及ぼす強制力(フォーシング)すなわち水・エネルギーフラックスを物理的に解明することを目指した。首都圏を対象とした定常・集中野外観測および準実スケールの都市モデル実験の2つが実体把握・解明のための大きな柱となった。前者では実際の都市(首都圏)から放出される水・エネルギーフラックスの時空間変動を詳細に計測した。後者は世界的にも前例のない大規模な野外実験であり、都市の幾何構造(建坪率や緑地率)と水・エネルギーフラックスの因果関係を解明した。以上の観測・実験により得られた成果をもとに、都市生態圏が大気圏・水圏へ及ぼす強制力(フォーシング)を都市構造・環境変数の関数としてモデル化した。この「都市生態圏強制力モデル」を既存の大気・海洋・水文モデルの境界部にリンクさせることにより、都市域の水・エネルギー循環系を1つのフローとして捉え直すことが可能となった。

本研究は、水・エネルギーさらには物質の循環を総合的に扱う「水循環科学」を発展させていく上で必要不可欠な境界領域分野の体系化に踏み込んだものと言える。今回は、水・エネルギーに特化したものであるが、将来的に環境の重要な構成要素である物質循環を考える際も、同様に都市によるフォーシングの概念が必要となるであろう。本研究は、そのベースとなる境界物理スキームを提供した。また、バンコク・マニラなどでは、急激な都市膨張が、隣接する大気圏・水圏に非常に緊急で深刻な環境インパクトを与えている。本研究の物理スキームは、これらアジアのメガシティにおいても、不十分な観測ネットワークをバックアップし、現況監視および都市成長に伴う将来変化を予測する強力な解析ツールとしての応用が期待される。

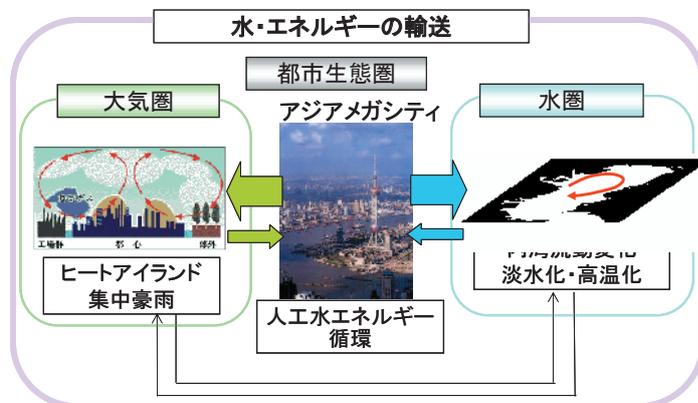


図 1.1.1 都市生態圏・大気圏・水圏における水・エネルギー循環の概念

1-2 首都圏における広域水・エネルギーフラックスの実態把握

都市圏の水・エネルギーフラックスの実態を詳細に把握するため、(a) 固定点における詳細な水・エネルギーフラックスの同時計測、(b) 各種リモートセンサーを駆使した大気・海洋環境モニタリング、および(c) 船舶・航空機など移動観測手段を用いた集中観測、を首都圏において行った。(a)は観測の中核を担うもので、久が原住宅街および東京湾の2地点において、1年間連続で詳細な水・エネルギーフラックスデータを得た。久が原タワーのソースエリアにおける下水流量などの水文計測も同期させた。また、都市植生のオアシス効果を見いだした。さらに、短期集中的に、久が原で多点同時フラックス計測を行い、点計測の空間分散の把握を行った。桜堤団地では、数ヶ月に渡ってフラックス・微気象の同期観測を行い、都市構成面の熱交換と境界層レベルでのフラックスの関係を解析した。(b)(c)では、降雨レーダ・レーザーレーダなどのリモートセンシングおよび航空機・船舶などを駆使して、人工的な水・エネルギー負荷の高い夏季・冬季に短期集中的に、集中豪雨・東京湾の流動状況のモニタリングを行った。また、首都圏大気―東京湾の接続境界として、1年間に渡って東京湾水温分布(14点)・時間変動(10分)の連続計測を行った。当初の計画の90%程度は実施された。

ここでの特筆すべき成果は以下の通りである。(1) 住宅街のエネルギー・水・CO₂収支が一年間に渡り取得され、同時期にドイツのグループによってバーゼルで取得された同様のフラックスデータと並んで、都市の水エネルギー収支の実態の理解を飛躍的に進め、かつ都市モデルの検証に資する貴重なデータベースとして利用され始めた。また、冬季静穏時の都市街区区内でのCO₂の高濃度集積、気温分布の季節変動性、都市植生のオアシス効果、などの新しい知見が得られた。(2) 東京湾は、外湾影響と同時に、首都圏からの熱流出の影響を受け、近年、表面温度が上昇傾向にある。さらに、一年に渡る東京湾でのフラックス観測データ・東京湾 SST の時空間分布のデータが取得され、気象モデル・海洋モデルでの同化シミュレーションを通じて、そのメカニズムが考察された。

1-3 準実スケールのモデル都市実験(COSMO)による水・エネルギーフラックスの解明

都市構造と水・エネルギー強制力の因果関係をシステムティックに把握するには、非一様性・不確定性の強い現地での観測に加え、よく制御されたモデル実験が必要不可欠である。そこで、屋外空間に準実スケールのモデル都市を作成し、自然気象条件下で都市幾何構造や植生配置を制御して水・エネルギーフラックス過程の詳細を把握した。具体的には日本工業大学敷地内のオープンスペース100m x 50m領域に立方体のコンクリート製建物模型(以下、ピンコロと呼ぶ)をいくつかのパターンで配置し、(a)都市幾何構造と水・エネルギーフラックスの因果関係、(b)都市植生の蒸散特性とオアシス効果の把握、(c)遮断蒸発量の把握、を行った。(a)はこの実験の中核を担うもので、都市模型上に形成される内部境界層内の水・エネルギーフラックスと同時に放射収支計測や水収支計測、さらには建物群内外の多点乱流計測が同期され、詳細な実験データが取得された。当初は、ピンコロの幾何構造の配列を順次変更する予定であったが、精度を追求するあまり、多点同時計測システムのキャリブレーションに大幅な時間を要したため、大ピンコロについては配置変更を行わず、建坪率25%の正規配列で全ての実験を行った。代わりに、配置変更が容易なスケールが1/10の小モデルを2セット、大ピンコロ模型の隣に設置し、システムティックに配置を変更した。この小モデルの導入が結果として幸いし、スケール相似則を検証しうる強力な直接証拠となった。(b)は、スケールモデル内にいくつかのパターンで屋上緑化用芝とポット植生を配置し、精密電子天秤などで個々の植生の水・熱収支を把握することを目的としていたが、これは先述した時間の関係で達成されなかった。それを補うため、ピンコロ導入前の平板上において、ポット植生の分散度を制御したシステムティックな蒸散実験を行い、オアシス効果の検証データを得た。(c)も当初計画には無かったが、都市水文において遮断蒸発の高精度なデータは貴重であるとの水文Gからの提案を踏まえ、追加された。当初案から、半分ほど変更を余儀なくされたため、達成度を定量化することは難しいが、モデル化に資する非常に貴重な成果が得られたと考える。

ここでの特筆すべき成果は以下の通りである。(1) 年間に渡るCOSMOのフラックスデータは、現

地(久が原・バーゼル)での年間フラックス観測データ, および短期集中で得られている世界の複数都市でのフラックスデータと総合的に比較検討され, 「都市」の水・エネルギー配分の一般的特徴が明らかになった. (2) COSMO のデータは現地の不確定要因を含まない理想ケースのデータとして都市モデルの検証に資する. (3) 大小のモデルからアルベド, 熱慣性, 流体力学的パラメータの相似則が詳細に検討された. とりわけ, 水・熱フラックスのモデル化に必須のスカラー粗度の半理論式が同定された. (4) 都市境界層において水・エネルギー輸送の 80%近くを担う, 乱流構造の階層性(大規模ストリーク・パケット構造・小渦)が明らかになった. (5) COSMO・室内実験・現地観測のデータを総括し, 乱流相似則に及ぼす外層乱れの影響を定量化した.

1-4 水・エネルギー循環素過程を考慮した「都市生態圏強制力モデル」の構築と応用

「都市生態圏強制力モデル」は, 大気圏・水圏の2つのモジュールからなる. 大気圏モジュールは, 都市幾何構造と環境変数を入力パラメータとし, 新たな乱流相似則に沿って大気圏への水・エネルギーフラックスを出力する. 計算負荷に併せて, 高精度モデル(LES-CITY), 標準モデル(AUSSM), 簡易モデル(SUMM)を構築した. 水圏モジュールは, 既存の分布物理型水循環モデル(WEP)をベースに都市の人口・世帯数や生産活動, 気象条件などの情報に基づいて水使用量やエネルギー消費量を算定して, 上下水道や排水路・河川といった人工的水循環に関わる社会基盤整備の状況に応じて, 公共用水域への水・熱輸送量を動的に予測しながら人工系水循環を解析できるようにした. 都市生態圏強制力モデルを用いた環境影響評価では, 上記強制力モデルを既存の気象モデル(WRF)および海洋モデル(POM)にリンクしてパラメータスタディーを行い強制力の影響を調べた.

当初計画の達成度は 80%程度である. 大気圏モジュールは, 観測・COSMO の結果を踏まえ, 極めて順調に3つのモデルが構築・検証された. 水圏モジュールは, 神田川流域に応用範囲を限定し, 現地観測で得られた下水処理場からの熱・水排出時系列データを入力として, 都市河川の水・エネルギーを良好に再現した. 都市の人口・世帯数や生産活動, 気象条件などの情報に基づいて水使用量やエネルギー消費量を算定し, 首都圏の人工排熱・水蒸気マップを各月別・1時間毎に作成した. 気象モデル・海洋モデルの影響評価は, 現地観測から得られたデータを同化して, 感度分析的に行ったが, 強制圏モデルを完全にカップリングして RUN させるには至らなかった.

ここでの, 特筆すべき成果は以下の通りである. (1) 高精度大気モジュール(LES-CITY)は, COSMO で得られた乱流組織構造の階層性を予言すると同時に, 実験・観測ではカバー出来ない, 広範な都市幾何構造の組み合わせについて, 各種パラメータの貴重なデータベースを提供した. (2) 簡易大気モジュール(SUMM)は, 久が原・バーゼル・COSMO, それぞれの1年間に渡るエネルギー収支を極めて良好に再現し, その有効性を実証した. (3) 東京湾の表面水温は時空間的にダイナミックに変化しており, その同化は, 大気環境と湾内流動の両者に顕著な影響を及ぼす.

1-5 今後の課題

本プロジェクト期間内で, 都市の水・熱循環の鍵を握る都市域の基本的物理過程の解明とそのモデル化は極めて良好に進んだ. しかしながら, これらの大気圏・水圏モジュール(強制力モデル)を既存の気象モデル・海洋モデルにオンラインで組みこみ, 同時並行的に解析するフルシミュレーションは達成できなかった. 今後の課題である. ただし, 当初計画にも明確に謳われているとおり, この連結する作業は, かなり直線的な作業であり, その結合に最大のネックとなっていた, 境界領域の解明という最重要課題は達成できたと考えている.

2 研究構想及び実施体制

2-1 研究構想

大気圏および水圏(主に内湾)の流動解析において都市生態圏は単なる1つの境界条件として簡略的に取り扱われてきた。しかしながら、研究実施の概要で述べたとおり、都市生態圏—大気圏—水圏における水・エネルギー循環系のフローの中で、都市生態圏が及ぼす水・エネルギー強制力(フォーシング)は、各種都市環境問題の定量的予測の鍵を握っている。単なる要素モデルの高精度化や異種モデルの統合化ではなく、境界学問領域である都市生態圏によるフォーシングのメカニズム解明とモデル化をめざし、これに正面から取り組んだ研究はきわめて少なく、この点を本提案の独創性・新規性として特筆できる。これを達成するため、研究チームは、気象・水文・海洋・建築・水文微気象、といった横断的学問分野の専門家で組織されている。とりわけ、観測・実験において、それぞれの分野で顕著な成果を上げておられる方に協力をお願いした。

2-2 実施体制

<大気グループ>

東京工業大学大学院理工学研究科国際開発工学専攻 (神田 学)

研究実施項目: 現地観測・スケール実験・モデル研究における大気関連の研究

- (a) 観測・スケール実験による大気圏への水・エネルギーフォーシングの解明
- (b) 都市生態圏から大気圏へのフォーシングモデルの構築
- (c) 都市生態圏強制力モデルと気象モデルをリンクしたシミュレーション研究

<沿岸海洋グループ>

東京工業大学大学院理工学研究科土木工学専攻 (八木 宏)

研究実施項目 現地観測とモデル研究のうち沿岸海洋関連の研究

- (a) 観測による都市が沿岸域に与えるフォーシングの実態解明
- (b) 都市生態圏強制力モデルと海洋モデルをリンクしたシミュレーション研究

<水文グループ>

福島大学共生システム理工学類環境システムマネジメント専攻 (木内 豪)

研究実施項目: 現地観測・スケール実験・モデル研究における水文関連の研究

- (a) 資料解析による都市の成長が沿岸海域の生態系環境に及ぼす影響評価
- (b) 観測・スケール実験における水文量計測とその解析
- (c) 都市生態圏から水圏へのフォーシングモデルの構築

<建築微気象グループ>

日本工業大学建築学科 (成田健一)

研究実施項目: 現地観測・スケール実験・モデル研究による建物スケールに焦点を当てた都市キャンपी内伝熱, 流力機構の解明

- (a) 観測による建物スケールの微気候が都市スケールに付与する熱的フォーシング効果の解明
- (b) スケール実験による都市キャンピー内伝熱, 流力機構のモデル化及び検証
- (c) メソスケールモデルへのリンクを前提とした都市キャンピーモデルの開発とそれに基づくシミュレーション研究

3 研究実施内容及び成果

3-1 研究課題全体の研究内容と成果

(1) 成果1：都市陸面過程の解明とその理論体系化

水文気象モデルにおける陸面過程として、都市陸面はその物理的理解とモデル化が最も遅れていた。その理由として、(1) 地球表面における都市の面積比率は小さく、ゆえに水・熱フラックスの全球への直接的影響を無視し得ること、(2) 都市の多様性（幾何形状・人間影響）および観測の困難さゆえに、その現象の把握と普遍化が困難であること、が挙げられる。しかし、都市スケールに目を向ければ、世界人口の半数は都市域に居住し、各種環境問題の顕在化を考えれば、都市陸面の解明と体系化は最優先課題であった。本プロジェクトでは大気G・建築微気象Gの連携のもと、風洞実験・野外観測など異なるスケール・手法で断片的に得られてきた既存のデータを含め、それらに欠けているスケールや測定項目の空白を埋める新規データを大幅に追加し、それらを包括的に整理・体系化した。とりわけ、屋外準実スケールモデル COSMO は、世界初の試みであり、統合化の鍵として大きく機能した。以下は、都市陸面過程に対して発せられてきた本質的な問いに対する、本プロジェクトで得られた答えを要約した。

本プロジェクトのデータの面目・新規性

風洞実験：既存の風洞実験のほとんどが建物配列一様で運動量に対するデータである。本プロジェクトでは、建物配列が一様でない場合（高さ分散、街路化）に、運動量だけでなくスカラーに対する膨大なデータセットを取得した。

現地観測データ：従来の短期集中観測に対して、久が原住宅街のタワーで初めて通年観測に成功した。水文過程の同期観測も実施した。久が原とバーゼルのデータは、世界的な都市陸面モデルの相互比較実験において検証データとして使用される予定である。

COSMO：世界初の包括的準実スケール実験である。スケール効果・熱収支メカニズム・相似則の議論を決着させた。

(a) 陸面パラメータの理論体系化

都市陸面の水文気象学的パラメータ（運動量粗度・スカラー粗度・湿潤度）の包括的解明とその汎用的モデル化に成功した。

a-1 運動量粗度

運動量粗度にスケール効果はみられない。従って、膨大な風洞実験データや既存の半理論式の適用が可能である。風洞実験と数値解析によって、建物の高さ分散影響、建物の街区化影響を考慮した運動量粗度のデータベースを生成した。

a-2 スカラー粗度

スカラー粗度にはスケール効果が存在する。従って、風洞実験データはそのままでは使用できない。ラフネスレイノルズ数による理論式と植生比率によるスカラー粗度の補正式を新たに提案した。風洞実験データベースについては、面別の相対値としてならば現地に適用可能であるが、バルクのスカラー粗度に対して上記理論式を使用する必要がある。

a-3 オアシス効果

植生比率が 30%以下の都市では顕著な蒸散のオアシス効果が生じる。最大で孤立木 1 本あたりの蒸発量は約 3 倍弱になる。オアシス効果の理論式を提案したほか、久が原・COSMO

の湿潤度 (β) や降雨中蒸発についても解析・モデル化を行った。

(b) 熱収支の理論体系化

都市の熱収支の一般的特徴を抽出し、そのモデル化に成功した。

b-1 熱収支の包括的解釈

驚くべきことに、入力放射量で正規化した熱収支は、表面幾何形状・緯度経度の違いに関わらず、世界の諸都市・COSMO でかなりの共通性・普遍性を有する。つまり、大気への熱・水フラックスという気象学的インパクトから見ると、建築微気象的なディテール（建築材料・幾何構造）は、2次的な重要性しか持たない。砂漠やコンクリート平板と比べて凸凹が存在する点が重要である。(1) 鉛直壁による昼間の膨大な蓄熱（熱伝導は線形過程のため、日向になった直後に蓄熱が急増するが、鉛直壁では時々刻々と日向面が推移するため日平均で同一素材の水平面に比べて蓄熱が非常に大きくなる）、(2) 鉛直壁からの夜間の放射冷却が抑制され、代わりに乱流による顕熱輸送によって一晩中大気を緩やかに加熱する（砂漠が夜冷えるのと対照的）。ちなみに、上記の蓄熱効果は、入力放射で正規化されているのでいわゆる短波の多重反射（アルベドの低下）とは別の効果である。

b-2 都市陸面モデルの構築と検証

グローバルスケールからメソスケールの水文気象モデルに広く使用できる汎用都市陸面モデルとして、SUMM を提案した。これは、本プロジェクトで得られた都市陸面の包括的知見（各種粗度パラメータ、放射・蓄熱過程・植生影響）がすべて考慮されていると同時に、ストリートキャニオンの3次元の多重放射過程に解析解を導入するなどして低計算負荷を実現している。SUMM は、久が原・バーゼル・COSMO の水・熱収支を通年にわたって極めて良好に再現した。建築微気象用の詳細なモデル（AUSSSM）およびパラメータ算定のための超細密モデル（LES-CITY）も構築した。

(c) 乱流相似則の理論体系化

水文気象学のみならず流体力学一般で重要なテーマである乱流相似則と乱流組織構造について、風洞実験から大気現象に至る普遍性を見だし、体系化を行った。

c-1 乱流統計量の普遍性

水文気象で金科玉条のモニン・オブコフ則（内部相似則）は、フラックスについては成立する。しかし水・熱の大気拡散において重要となる風速分散については、内部相似則だけでなく、大気境界層乱れ（外部スケール）による補正が必要である。

c-2 乱流組織構造の普遍性

運動量・熱・水輸送の80%以上を説明する乱流組織構造をCOMSOにおける観測により抽出した。この乱流組織構造は、建物スケールの数倍程度の縦渦の集合体（パケット構造）から数十倍に及ぶ大規模乱流構造（低速ストリーク）に至る階層性を有している。

(d) 人間活動の影響とモデル化

d-1 東京の人工排熱・水蒸気マップ

広域関東圏の詳細な人工排熱マップ（顕熱・潜熱別、各月平均値、時間別、1 km解像度）を作成した。このデータベースは各種公的機関で使用される予定である。

d-2 人工排熱の一般的算定手法に関する可能性

データベースの入手困難なアジアメガシティの各都市での人工排熱算定手法の可能性を検討した。冷房・暖房負荷については、都市陸面モデル SUMM の室内設定温度の熱収支的要請から簡易な見積もりが可能である。個人属性や生活スケジュールに基づく発展的手法についても検討した。

(e) 大気—微気象相互作用（都市デザインへの提言）

熱収支の包括的解釈で見たとおり、都市キャノピーの微気象が上空の大気へ及ぼす影響は限定的である。つまり、メソ水文気象学的には、建築要素の細部にあまりこだわる必要はない。その一方で、都市キャノピーの微気象そのものは、都市デザイン（幾何構造や都市材料）によって大きな影響を受けることが明らかになった。例えば、街路空間の最高気温の出現高度は、明確な季節性を有する（冬は屋根面・夏は道路面）。また、キャノピー空間の気流場・スカラー場は建物幾何構造や上空大気の影響を強く受け、大気安定時には高濃度の CO₂ が街路空間に集積することなども明らかになった。これらは、適切な都市デザインによってメソスケール気象へのインパクトはさほど期待できないものの、ローカルな人間空間の微気象には効果的であることを示唆している。

(2) 成果2：メソスケールにおける大気—陸面—海面相互作用の解明

グローバル水文気象においては、大気—陸面—海面相互作用が重要視され、活発な研究が行われている。一方、メソスケールの水文気象においては、大気的时间スケール（時間から日変化）と空間スケール（数10 km以下）に対して、海表面温度や沿岸流動の時間スケール（季節変化）と空間スケール（数百 km以上）が大きく異なるため、暗黙のうちに相互作用は重要でないと考えられてきた。本プロジェクトでは、東京と、それに隣接した半閉鎖性水域である東京湾を舞台に、大気—海洋相互作用の実態を解明し、その重要性を指摘したものである（図 3.1.1 の概念図参照）。このような視点からの研究は他都市では例がないため、成果1のような包括化は不可能だが、多くのアジアの沿岸立地のメガシティでも同様の実態が予想される。

(a) 河川水・東京湾の長期水温変動の実態把握

ヒートアイランドの観点から都市気温の上昇傾向とその要因分析については数多くの研究があるが、メガシティに隣接した河川・沿岸水温の長期変動特性とその要因分析を行った例は極めて少ない。

a-1 河川水・東京湾の最近30年間の水温変動

過去30年間で、主要な都市河川の水温と東京湾の水温が、冬期に上昇傾向・夏期に低下傾向にあることを示した。東京湾全体の平均水温の上昇は、東京の気温の上昇よりもやや緩い。そのため、東京湾は熱のシンクとしての役割を強めている。

a-2 気温・上下水道水温の最近40年間の水温変動

最近50年間で、水道水温はほぼ気温と同様の上昇傾向を示す一方で、下水道処理水はすべての季節において気温・水温を上回るペースで上昇傾向（平均5.5℃上昇）にある。上昇傾向は冬期ほど著しい。

(b) 都市下水温・河川水温の長期変動原因の解明

首都圏の下水温と河川水温が上昇傾向にある要因の原因解明とモデル化を行った。

b-1 人工排熱と下水道水温変動の因果関係と予測

都市における水とエネルギーの消費・排出量や気温・地中温度などの環境状態を入力条件として、a-2で述べた下水放流水温の長期変動を推定する熱収支モデルを提案した。モデルは、東京都区部下水処理場からの放流水温の長期上昇傾向をよく再現し、かつその主要因が家庭からの熱排出の急激な増加であることが判明した。

b-2 下水道網を通じた水・熱輸送の実態解明

都区部13カ所の下水処理場において水温の測定ネットワークを構築して下水処理水量と処理場流入水温、放流水温のデータ蓄積を図るとともに、上水データや水文・気象データも収集利用しながら、下水道網を通じた水・エネルギー輸送の実態解明を行い、年間の水・エネルギー輸送の全体像を整理した。その結果、下水道網は処理水量の2割に相当する地下水の侵出水として輸送すると同時に、土壌層と熱交換も行う。冬期は、家庭から下水を通じて排出される熱量と同等の熱量が侵出水によって暖かい土壌層から持ち込まれることが明らかとなった。

b-3 都市河川を通じた水・熱輸送の実態解明と予測

神田川流域をケーススタディエリアとして水温計測を行うとともに、水・エネルギー輸送の分布物理型モデルを構築・適用した。本モデルにより実測の河川流量・水温を良好に再現できることを確認した。さらに、神田川の河川水温形成要因を分析した。その結果、神田川では処理場からの放流水などの人工系水循環の影響を極めて強く受け、冬期(12月)には10℃~14℃の水温上昇が恒常的に発生していること、一方、夏期には、日射の他、河床への伝導熱、河川の幾何形状などに依存した放射、街路樹等による日射の遮蔽が水温形成に大きく関与していることや、地下水温・地温とも関係しており、水温形成過程はきわめて複雑であることがわかった。

(c) 東京湾水温の長期変動原因の解明

東京湾の水温変動は大気・陸面との相互作用の結果であるため、河川水温と異なってそのメカニズムは単純ではない。集中観測による風応力の重要性、数値計算による河川からの淡水フラックスの重要性、を示唆すると同時に、長期のデータに基づく熱収支解析によって東京湾が熱のシンクとしての機能を強めていることを指摘した。

c-1 東京湾周辺水域の長期的な熱収支変動の解明

東京湾の熱収支の変化を気象・水温データを基として解析した。その結果、東京湾水温より気温上昇の速度が速いため、東京湾は、熱のシンクとしての機能を強めていることがわかった。

c-2 東京湾への外海水進入挙動と水温環境

羽田沖における冬期の集中観測とシミュレーションにより、風応力(大気フォーシング)・淡水フラックス(陸水フォーシング)の重要性が指摘された。いずれも東京湾の流動を変化させることにより、湾の底部において外洋水を引き込み、それが湧昇することによって東京湾の水面温度を変化させる。風応力は、長期的な温度変動には寄与していないが、首都圏の風向変化に応じて、極めて短時間で湾内流動・水温場が応答するため、メソスケールの大気-海洋相互作用として重要である。淡水フラックスは近年増加傾向にあり、淡水フラックスの増加はより多くの外洋水を引き込むため、夏期は東京湾水温の低下(外洋水温が内湾水より低い)、冬期は東京湾水温の上昇(外洋水温が内湾水より高い)に寄与している可能性がある。

(d) 東京湾が首都圏大気に及ぼす影響

東京湾水温の時空間変動が、隣接する首都圏の大気にどのような影響を及ぼしているかを解析した。既存データだけでは難しいことから、東京湾において1年間に渡る熱収支観測・高時空間解像度の水温分布観測を実施し、それらをメソ気象モデルへ同化して、数値解析と併用することにより評価を行った。

d-1 東京湾水温・フラックスの単時間変動の実態把握

上記で指摘した東京圏における大気—陸面—海洋の相互作用の重要性を踏まえ、その体系化とモデル化のために、通年にわたる特別観測を東京湾において実施した。熱収支観測では、東京湾の熱収支の季節性が明らかとなった。東京湾表面温度は、風応力・湾内流動・日射強制力の影響で、明確な日内変動を示し、それに応じて水・熱フラックスも時間変化する。このような日内変化はメソスケール気象で無視できるものではなく、日単位の衛星観測表面温度を用いた場合とでは、潜熱フラックスで 100 W m^{-2} もの差が生じることが判明した。

d-2 集中豪雨影響への可能性

レーダー観測により首都圏の集中豪雨の発生メカニズムを解析した。練馬域の豪雨の発生には、異なる海風の収束・シアラインが重要である。とりわけ東京湾海風がシアラインの形成に関与していることから、今後、東京湾から持ち込まれる潜熱フラックスの影響などを詳しく分析することが必要となるであろう。

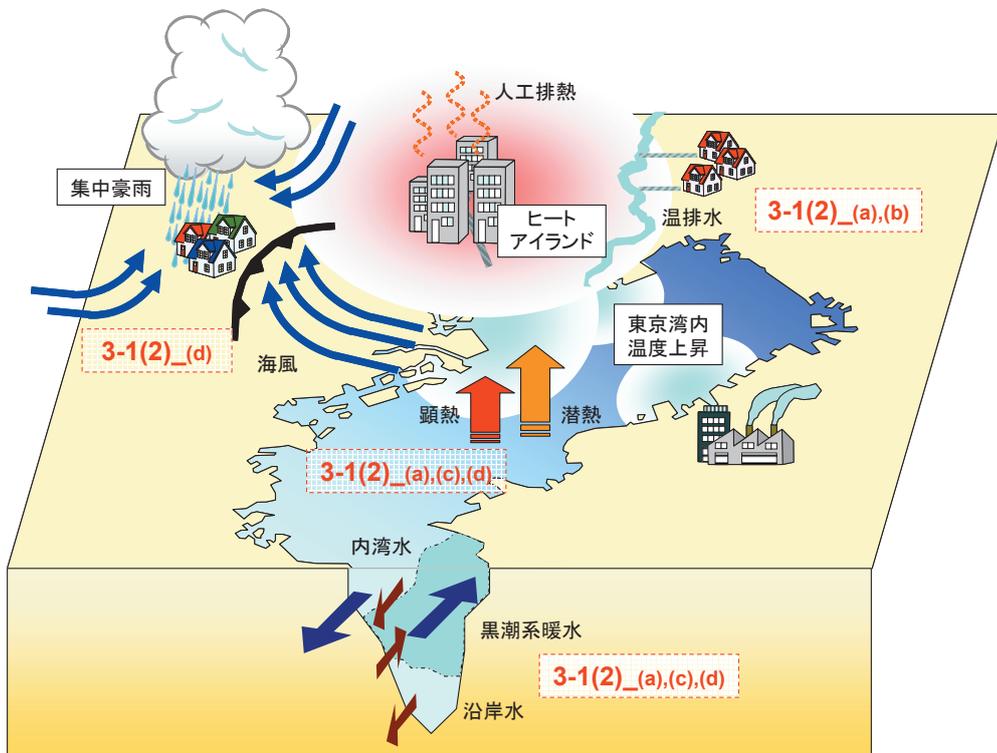


図 3.1.1 メソスケールにおける大気-陸面-海面相互作用概念図 (3-1 成果 2 に対応)

3-2 都市陸面過程および大気-海面相互作用の解明とその理論体系化（東京工業大学 植生大気グループ）

大気グループでは、都市表面と大気境界層スケールの水・エネルギー輸送の物理機構を解明し、それらの諸現象を理論体系化すること、および大気-海面相互作用の解明を目的として、現地観測・屋外スケールモデル実験・数値モデルを駆使しながら研究を実施した。

現地観測, 屋外実験設備, 数値解析ツール

上記の研究を遂行する上で必要となるツールとして、本プロジェクトで整備・構築された実験施設、および独自に開発された数値解析ツールについて概説する。

i) 長期フラックス観測タワー

東京の典型的低層住宅街に 30 m タワーによるフラックス・ステーション（通称：久が原タワー）を構築し、観測スタート時点から継続して熱・水・CO₂ フラックスおよび関連する水文気象量・乱流統計量の自動計測を行った（平成 19 年 3 月終了，図 3.2.1）。サイト周辺は平均高度 7.5 m の一様な住宅層が広がり、都市接地境界層内におけるモニン・オブコフ相似則や熱・水収支に関する貴重な知見が得られた。都市域での連続フラックス観測は世界に先駆けて行われたものである。年次進行で、水・熱・乱流の鉛直分布計測の追加，下水・水文流出観測とのカップリングと進化し、プロジェクト後半では海域フラックスとの比較のため継続して自動計測が行われた。

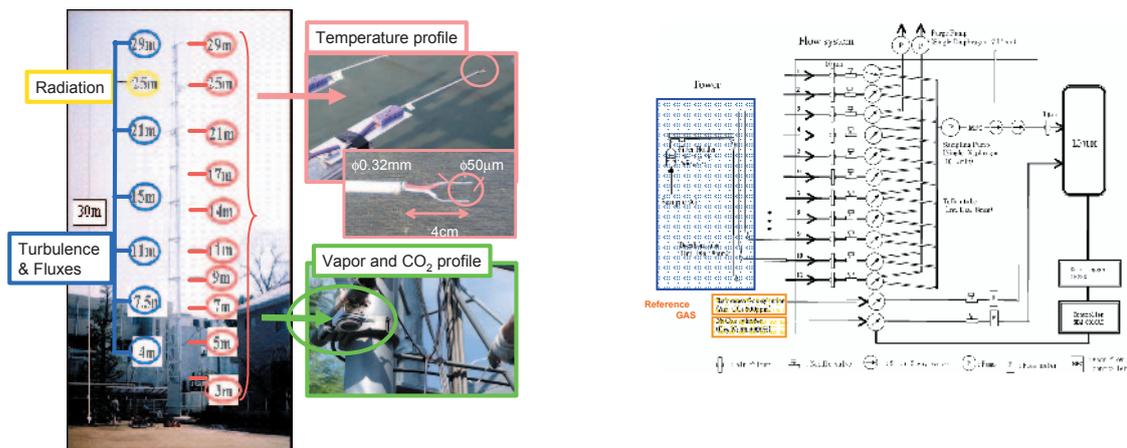


図 3.2.1 長期モニタリングを実施した住宅街の観測タワー（左）と水蒸気・CO₂ 計測システム（右）

ii) 屋外スケールモデル実験施設

埼玉県日本工業大学の敷地内に均質な領域を持つ大規模模型都市（1/5 モデル；図 3.2.2a）を作成した。100 x 50 m のコンクリート基盤上に一辺が 1.5 m の立方体コンクリート枡が整列に配置されている（建蔽率 0.25）。模型領域は極めて広く、十分な内部境界層の発達が見込まれる。建物と見立てたコンクリート枡は実スケールの 1/5 であり、熱慣性の相似性が概ね満たされる設計となっている。サイト内部には流入部，中心部，流出部に 3 本の鉄塔が設置されている。1/5 モデル脇に、構成素材，幾何構造が同様にスケールのみ大きく異なる小スケールモデルを作成した（1/50 モデル；図 3.2.2b）。モデルを構成するコンクリートブロックは一辺 15 cm の立方体であり，1/5 モデルの 1/10 に相当する。1/50 モデルには幾何構造を容易に変更できる利点がある。同様の気象条件下で異なるスケールの模型都市実験を行うことにより，幾何スケールの相違が観測結果に及ぼす影響を検討することができる。

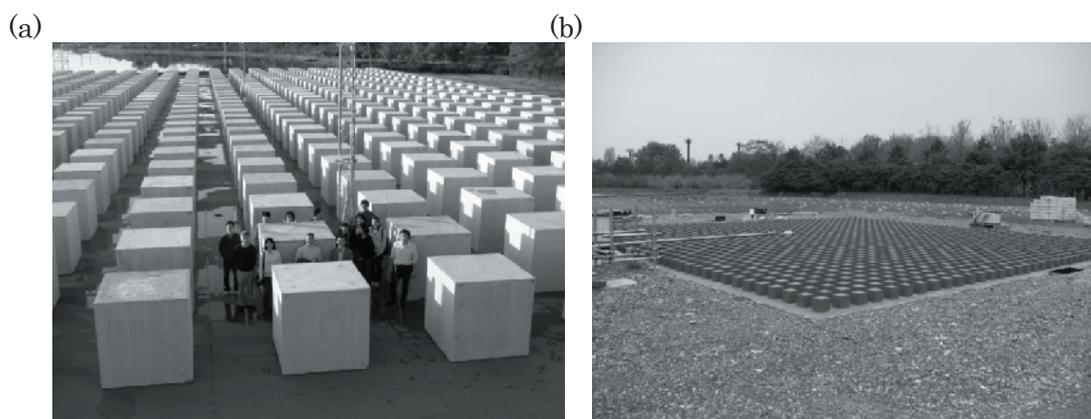


図 3.2.2 (a) 1/5 モデル, (b) 1/50 モデル

1/5 モデルには熱収支、表面温度、キャノピー内外の気温・乱流、水収支の測定を行う観測機器が設置され、包括的な気象観測が行われた。COSMO では制御されたサイトにおいて実都市では測定することが困難な緻密な観測が行える利点がある。その一つが貯熱量の直接測定である。図 3.2.3a に示す様に、単位領域表面に計 164 枚の薄型熱流板を設置し、貯熱量の直接測定を行った。貯熱量を直接測定することにより、完全に収支の閉じた質の高い熱収支データを取得することができる。また、超小型 (5 cm スパン, 50 Hz サンプルング) 超音波風速計 (図 3.2.3b) を用いキャノピー内外の詳細な乱流計測が行われた。

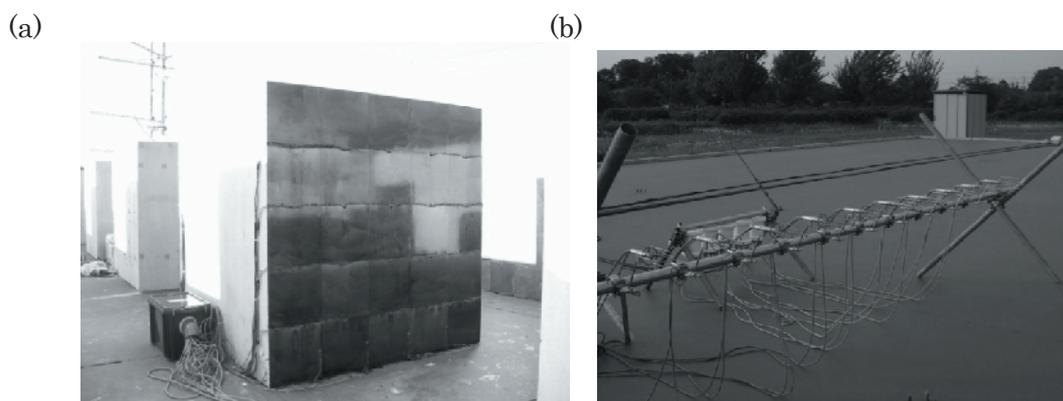


図 3.2.3 (a) 薄型熱流板を用いた貯熱量の直接測定, (b) 超小型超音波風速計を用いた乱流計測

iii) 3次元簡易都市キャノピーモデル(SUMM)

従来、気象モデルにおける都市部の底面条件には、都市の幾何構造(凸凹)を粗度として捉える「平板モデル」が用いられてきた。しかしながら、都市建物群落による起伏は上空大気に複雑な影響を及ぼしており、簡易的な平板モデルを用いて都市の起伏に起因する複雑な物理過程を適切に評価することは難しい。このため、都市が上空大気に及ぼす影響を適切に評価するためには、都市キャノピー層の物理過程をより詳細に再現する地表面スキームの構築が不可欠である。一方、建物周辺の物理過程を詳細に予測する所謂 CFD モデルは、現状では非常に大きな計算負荷を要するため、これを気象モデルへ直接適用することは現実的でない。以上の観点から、近年簡易的な都市キャノピーモデルの構築が行われているが、既存のモデルは都市の3次元構造を十分に表現するには至っていない。そこで、本論では都市幾何構造の3次元性を考慮した簡易都市キャノピーモデル SUMM (Simple Urban

canopy Model for Meso-scale simulation) を構築した (図 3.2.4). 3次元幾何構造を対象とした場合, 放射の取り扱い(日向, 日陰形成等)が2次元構造に比べて格段に複雑になる. このため, 3次元放射収支計算は通常非常に大きな計算負荷を要すが, 本モデルでは複雑な3次元放射過程を解析的に処理する手法を導入し, 計算負荷を大幅に削減した. 3次元放射過程を解析的に処理することにより, SUMM では2次元モデル同様, 極めて低計算負荷で構成面別(4鉛直壁面, 屋根面, 床面)の熱収支, 及び表面温度を予測することができる. 本プロジェクトでは, 乱流輸送効率(バルク輸送係数)を算定する際に用いる熱粗度のモデリング(成果 1a; Kanda et al., 2007, JAMC), COSMO より得られた熱収支データベースを用いた SUMM の検証(成果 1b; Kawai et al., 2007, IJC), SUMM の実都市への適用(成果 1b; Kawai et al., 2007, JAMC)などに用いられた.

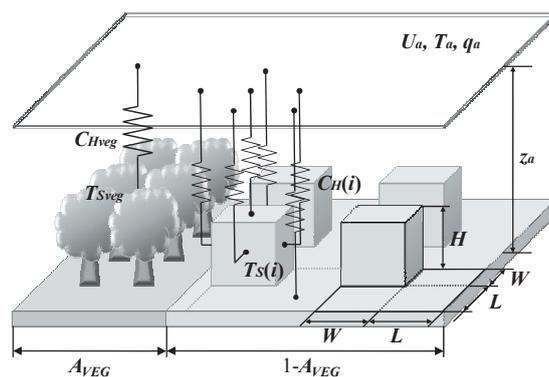


図 3.2.4 SUMM の概念図

iv) 都市境界層乱流解析ツール Large Eddy Simulation (LES-CITY)

上述のタワー観測やスケールモデル実験の補間研究ツールとして, 複雑な都市幾何形状に容易に適用可能な Large Eddy Simulation (LES-CITY)を開発した(図 3.2.5). このモデルの目的は, スケールモデルだけでは対応しきれない数多くのパラメータセットを高精度数値計算という安価な代替手段で実現することと, 都市域では現状で観測が極めて困難な乱流構造の解析を実際の都市幾何形状のもとで行うことである. LES-CITY は, 都市インフラの個体部と大気部を区別せずに同時に解くマスキング手法と, 圧力場のスペクトル解法, を併用しており, それにより計算効率を格段に向上させている.

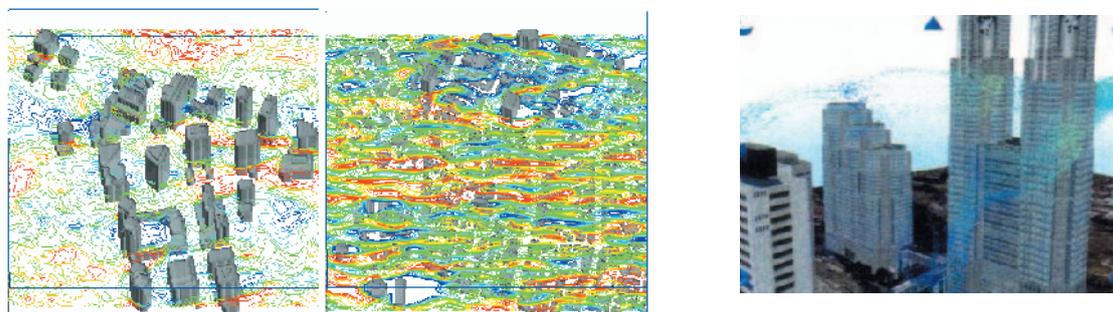


図 3.2.5 LES-CITY による計算例 (左図) 水平風速強度のカラーコンター, (中図) 都市上空の境界層中に発生する低速ストリークと呼ばれる筋上の乱流構造, (右図) キャド情報をマッピングした可視化サンプル.

(1) 研究実施内容及び成果

(1.1) 都市陸面過程の解明とその理論体系化

(a) 陸面パラメータの理論体系化

都市域の陸面パラメータには代表的なものとして放射特性（アルベド，射出率），空気力学的パラメータ（運動量粗度，熱粗度），地表面湿り度，熱物性値（熱伝導率，体積熱容量）がある．特に，運動量粗度，熱粗度は顕熱輸送効率と直接関連し熱収支のモデリングにおいて極めて重要な陸面パラメータである．また都市植生に対するオアシス効果はバルクの地表面湿り度を増加させ，地表面の顕熱・潜熱配分に大きく寄与する．大気グループでは，住宅街における現地タワー観測，および 1/5 モデル，1/50 モデルの異なる 2 つのスケールの屋外模型都市実験をもとに，これらの陸面パラメータについて検討し，その理論体系化を試みた．

a-1 運動量粗度

タワーを用いた都市上空の乱流フラックス観測データから，空気力学的手法を用いて運動量粗度を通年にわたって求めた．その値は平均建物高さの約 0.1 倍であり，風洞などの実験結果から半理論的に求めた形態学的手法で得られる値と同程度であった．またスケールモデル実験で得られた乱流データからも空気力学的手法により運動量粗度が求められる（図 3.2.6）．1/5 スケールモデルと 1/50 スケールモデルでは建物高さで無次元化した運動量粗度は同程度の大きさであり，スケール効果がないことがわかった．スケールモデルの場合は粗度に風向依存性が認められ，同一の建物配列でも道路沿いの風向時は粗度が小さくなり，風向がこれから逸れる場合は粗度が大きくなるという興味深い結果が得られた．しかし，後者の場合を，風向に対して建物配列が千鳥配列になることと等価であると読みかえれば，これも従来の半理論式の適用が可能といえる．以上より，運動量粗度にはスケール効果がなく，膨大な風洞実験データや既存の半理論式の適用が可能であることがわかった（Kanda et al., 2007, JAMC）．

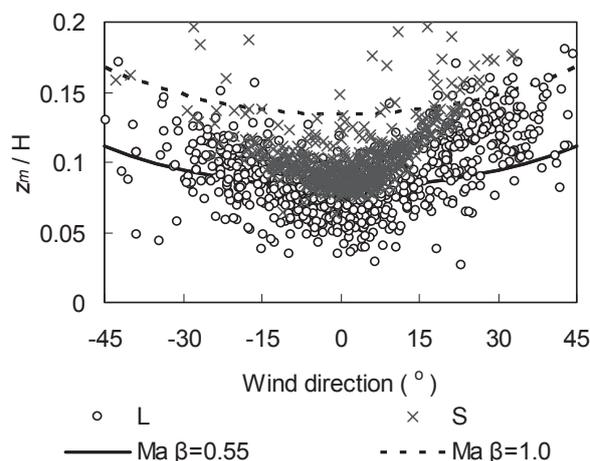


図 3.2.6 建物高さで無次元化した運動量粗度 $\overline{z_m} (= z_m / H)$ と風向の関係. ○ : 1/5 スケールモデル, x : 1/50 スケールモデル. 図中の線は Macdonald et al. (1998)による半理論式; 点線が千鳥配列の場合, 実線が整列配置の場合.

a-2 スカラー粗度

熱粗度は屋外における熱収支観測に基づいて算定する必要があり、既往の研究事例は少数に限られている。特に自然生態系に比べ都市域においてはスカラーの粗度に関する研究が非常に少ない。そこで久が原の住宅街で行った1年間のフラックス観測から、各種地表面パラメータ（運動量粗度・熱粗度・水蒸気粗度・蒸発効率）を算出した。熱粗度に対する運動量粗度の比であるスタントン数 κB^{-1} は平均で7となった。この値は植生や裸地などで報告されている値よりも大きく、また都市域で唯一報告されている軽工業地域の値よりは小さい。また κB^{-1} には季節依存性・時間依存性がみられた (Moriwaki and Kanda, 2006, JMSJ)。

COSMO では均質な領域、異なるスケールにおいて熱粗度を高精度で測定することが可能である。熱粗度についてさらに統一的な理解を得るため、住宅街における現地観測、および1/5モデル、1/50モデルの異なる2つのスケールの屋外模型都市実験において、スタントン数 (κB^{-1}) を調べ、陸面モデルへ適用を前提とした κB^{-1} のモデル化を行った。

図3.2.7はCOSMO、及び現地観測より得られた κB^{-1} の結果を表わしている。得られた結果を陸面モデルへ反映させるため、Brutsaert (1982)により提案されている粗度要素の大きな表面に対する κB^{-1} の理論式 (式3.2.1) を用いたモデリングを行った。

$$\kappa B^{-1} = a Re^{*0.25} - 2 \quad (3.2.1)$$

ここに、 Re^* はラフネスレイノルズ数である。 a は表面によって異なる実験定数であり、COSMOの結果より同定された値は1.29である。従来提案されている結果 (BS82) が現地観測の結果を過大評価しているのに対しCOSMOより同定した近似式 (COSMO reg) は大局的に現地観測の結果をフォローしている。一方、植生のある4都市 (KU, U1, U2, SU) の結果は植生の無いCOSMOの結果に対して一律やや小さな結果となっていることがわかった (Kanda et al., 2007, JAMC)。

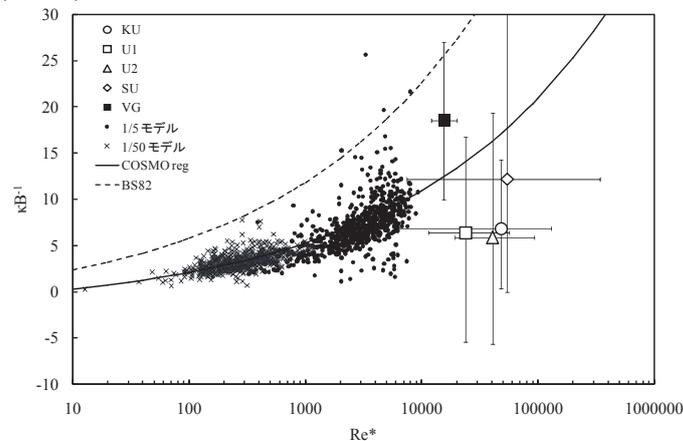


図 3.2.7 κB^{-1} と Re^* の関係 (KU は久が原(Moriwaki and Kanda, 2006, JMSJ), U1, U2 はバーゼル(スイス), SU は東京, VG はバンクーバー(カナダ)の結果を表わす)

a-3 オアシス効果

長期フラックス観測データから、夏季の日中において、単位面積あたりの庭木では正味放射量と同等かそれ以上の潜熱が放出されることが明らかになり、都市植生にはオアシス効果が働いている可能性が指摘された (Moriwaki and Kanda, 2004, JAM)。この仮説は建築微気象Gによるポット植生実験によって後に実証されることになった (3-3を参照)。

現地観測から得られたフラックスデータをもとに得られた都市域の蒸発効率 β は 0.02~0.3程度の値となった。 β は降雨後の経過日数とともに低減していき、降雨後7日以降もゼロにはならず0.02~0.1の間で変動する。またメソ気象モデルの適用を考慮し、 β の実験式

として以下の式を提案した (Moriwaki and Kanda, 2006, JMSJ).

$$\beta = 0.1 \times \exp(-0.5 DAP) + 0.035 \quad (3.2.2)$$

ここで, DAP は降雨後日数である.

一方, 植生の存在はスタントン数 (κB^{-1}) にも影響を及ぼす. a-2 で述べたように植生のある都市のスタントン数は植生の無い COSMO の結果に対して一律やや小さな結果となっている. この様な都市植生による影響を式 3.2.1 の実験定数 a に考慮すると,

$$\kappa B^{-1} = (1.29 - 1.09 \lambda_v^{0.32}) Re^{*0.25} - 2 \quad (3.2.3)$$

が得られる (図 3.2.8). 式 3.2.3 は様々な植生比率を有する都市に用いることができる κB^{-1} に対するモデル式であり, b-2 に示すように SUMM を含めた都市陸面モデルの精度を大きく向上させるものと期待される (Kawai et al., 2007, JAMC).

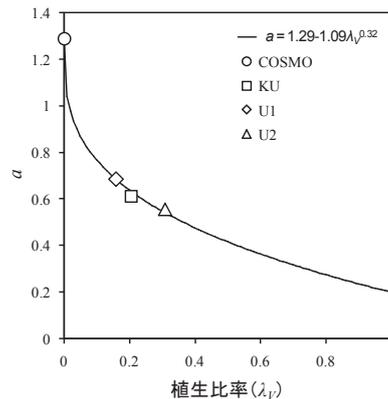


図 3.2.8 a と植生比率の関係 (KU は久が原(Moriwaki and Kanda, 2006, JMSJ), U1, U2 はバーゼル(スイス)の結果を表わす)

(b) 熱収支の理論体系化

b-1 熱収支の包括的解釈

都市-大気圏間のエネルギー交換過程 (熱収支) はヒートアイランド, 集中豪雨等に代表される都市独特の気象形成と密接に関連する重要な検討項目である. しかし, 密集した都市域における測定が難しいことから, これまで得られている熱収支データベースは少なく, このほとんどが短期間の集中観測から得られたものである.

長期フラックスタワー観測からは都市域における年・月・日単位での熱・水・CO₂のフラックス挙動を明らかにした. 特にフラックスの年間値を定量化したのは世界で初めてである (Moriwaki and Kand, 2004, JAM). ところで現地における観測データは空間代表性について十分な注意を払う必要がある. そこで久が原タワー周辺において, フラックスや各種水文気象量の空間分散を調べる目的で, 半年間の多点同時計測フラックスの観測を補足的に行った (Kanda et al., 2005, BLM). 具体的には久が原タワーを含む5カ所の既設・新設のタワーを利用して熱・運動量フラックスの比較を行った (図 3.2.9). その結果, (1) 運動量の空間分散は, 一樣な森林域で計測された値とほぼ同じ程度であった. 摩擦速度が大きくなるほど空間分差が小さくなる傾向があった. (2) 熱フラックスの空間分散は森林域の値に比べて有意に大きく, しかも摩擦速度よりも1日の時間帯に依存し, 朝・晩の加熱・冷却過程において空間分差が大きくなる傾向にあった.

一方, COSMO より得られた結果は現地観測の結果に含まれる様々な誤差 (エネルギーインバランス等), 解釈の難しい問題 (植生の季節変化, 人工排熱等) が含まれない. このため, 従来断片的に得られている現地観測の結果をまとめる際の基準となる.

図 3.2.10 にエネルギー分配の指標とされる正味放射量 (Q^*) に対する貯熱量 (ΔQ_s) の比を示す (Kawai and Kanda, 2007, JAMC). 図中には 1/5 モデルより通年で得られた結果 (COSMO), 5都市 (Ku04, BuU1, BuU2, Me93, V192), 9郊外 (C95, Mi95, T90, Sg94,

Vs92, S91, A94, A93, St02) の観測結果が示されている。各観測結果は大きくばらついてはいるが、全般に夏に比べて冬に $\Delta Q_s / Q^*$ が大きくなる傾向が見られる。このような季節性は均質な COSMO の結果にも表れている。



図 3.2.9 住宅街における多点同時フラックス観測網 (Kanda et al., 2006, BLM)

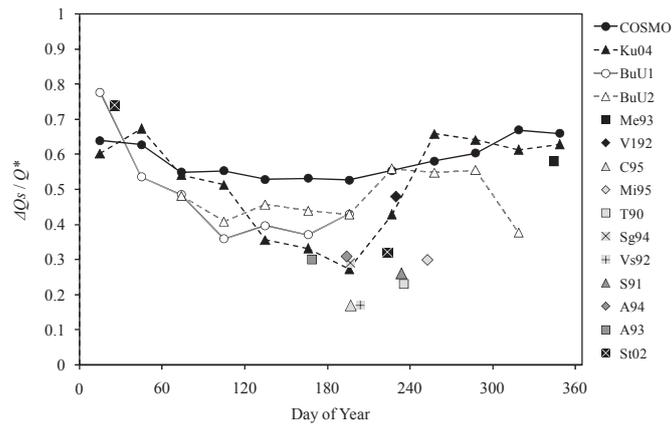


図 3.2.10 1/5 モデルおよび 1-4 の現地観測より得られた $\Delta Q_s / Q^*$ の比較 (Kawai and Kanda, 2007, JAMC)

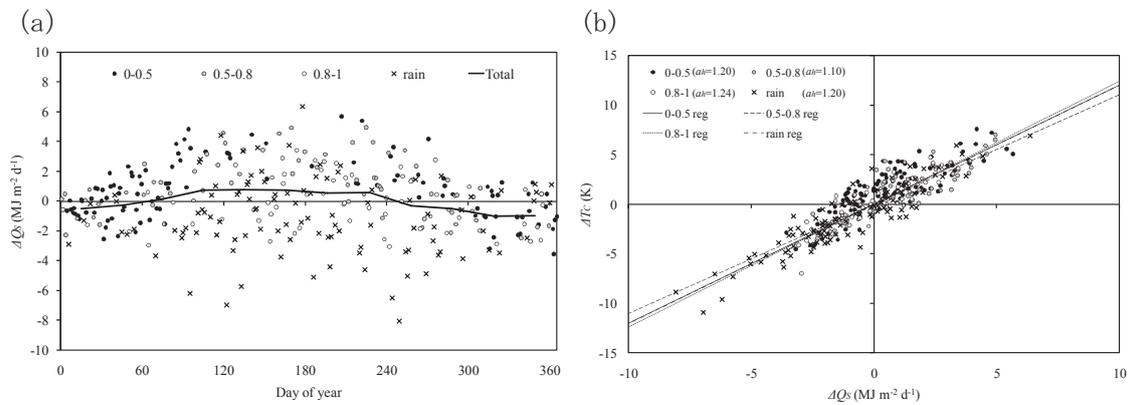


図 3.2.11 1/5 モデルより得られた (a) ΔQ_s の日積算値の年変化, (b) ΔQ_s の日積算値と ΔT_c の関係 (Kawai and Kanda, 2007, JAMC)

図 3.2.11 は 1/5 モデルより得られた (a) 貯熱量の日積算値の年変化, (b) 貯熱量の日積算値と表面温度の正味の日増加/低下 (ΔT_c) の関係を表わしている. 貯熱量の日積算値は日単位で閉じない熱的な履歴を表わしている. 図 3.2.11a より, 日単位で閉じない日々の熱的な履歴が都市では非常に大きいこと分かる. 全般に晴れの日に熱が蓄えられ, 雨により蓄えられた熱が持ち去れる結果が得られている. また図 3.2.11b より, 日単位で閉じない日々の熱的な履歴は表面温度の正味の日増加/低下と概ね線形に対応していることがわかった.

b-2 都市陸面モデルの構築と検証

気象モデルにおける都市域の底面境界条件には, 従来, 都市インフラを空気力学的な粗度として扱う簡易的な平板モデルが用いられてきた. この様な簡易的な取扱いでは放射の多重散乱, 表面積の増加に伴う熱慣性の増加等, 大きな粗度要素を持つ都市独特の物理過程を包括的に再現することが難しいとされている. 近年, 都市幾何構造を陽的に取り扱い, 熱収支を予測する都市キャノピーモデル (UCM) が構築されている. 本プロジェクトでは都市幾何構造の 3 次元性を考慮した簡易都市キャノピーモデル SUMM (Simple Urban canopy Model for Meso-scale simulation) を構築し (Kanda et al., 2005, BLM), 1) 乱流輸送効率 (バルク輸送係数) のパラメタリゼーションの検討 (Kanda et al., 2007, JAMC), 2) モデル検証 (Kawai et al., 2007, IJC; Kawai et al., 2007, JAMC) を行った.

a-3 に記した κB^{-1} に対するモデル式を用い, SUMM を 3 実都市 (久が原 (大田区; 2-1 節), Basel U1, U2 (スイス)) へ適用した結果を図 3.2.12 に示す. 熱収支, 表面温度共に SUMM のシミュレーション結果はサイトを問わず, 観測結果を良好に再現している. 極めて高精度, 低計算負荷の都市キャノピーモデルが構築されたといえる.

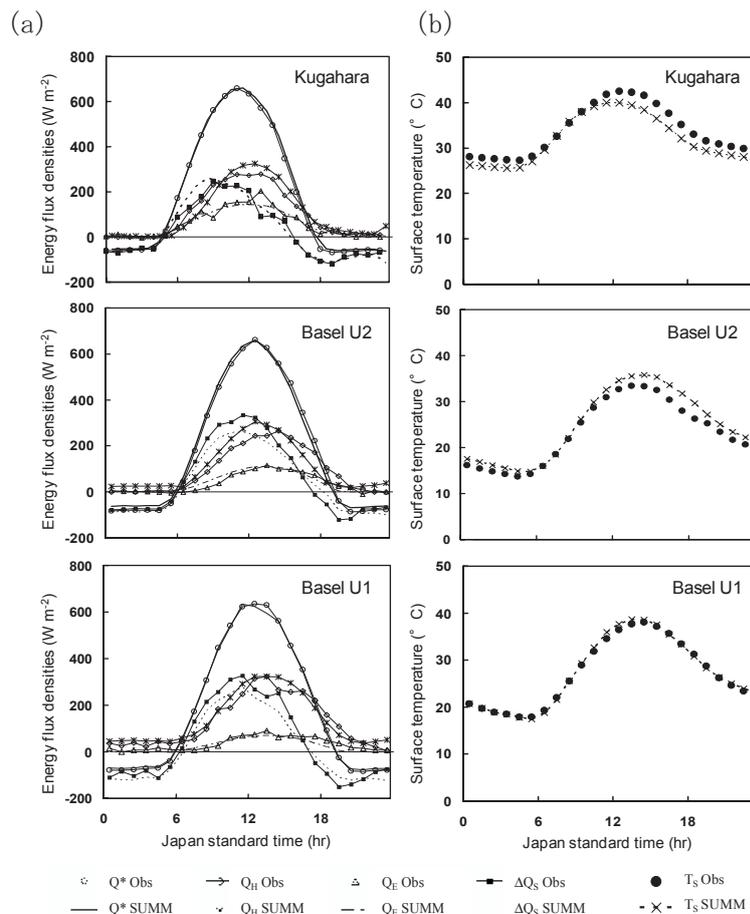


図 3.2.12 SUMM の実都市への適用結果 (a) 熱収支 (b) 表面温度

(c) 乱流相似則の理論体系化

c-1 乱流統計量の普遍性

都市幾何形状が作り出す大気乱流構造は都市内外での熱・水・物質輸送過程を直接的に決定するため、この把握は都市大気諸問題の解決に必須である。COSMOでの乱流計測により、凹凸地表面上での乱流変動の普遍的性質について、内部スケーリングによる相似性（例えばモニン・オブコフ相似則）について検討が行われた。その結果、運動量輸送に関連するアクティブな乱流変動は内部スケール則に従い、地表面上や外層の条件に依らず相似性が成り立つことを示した。しかし、都市内部の乱流拡散を決定付ける水平風速分散に関しては外部スケール変動の影響を考慮した補正を必要とすることを示した（Inagaki and Kanda, submitted, JFM）。久が原で行われたタワーによる現地観測データからは、モニン・オブコフ相似則の適合性が検討され、拡散係数の大きさは植生キャノピー上と平原上の境界層における係数の中間的な値をもつことがわかった（Moriwaki and Kanda, 2006, TAC）。また、熱・水・CO₂のスカラーの物理的相似性は維持されず、その原因として、スカラー発生源の不均一性が大きいこと、熱がアクティブなスカラー量であるのに対し水蒸気・CO₂が受動的なスカラー量であることが見出された（Moriwaki and Kanda, 2006, BLM）。

c-2 乱流組織構造の普遍性

また COSMO では乱流変動の水平分布計測を行い、都市のような凹凸地表面上かつ屋外の大気境界層下において、どのような乱流構造が発達しているのか検討を行った。観測手法として、16台の超音波温度風速計（Kaijo DA600, YOUNG MODEL81000 併用）を接地境界層内の同一高度、水平一列に配置し（図 3.2.13）、高周波で同期計測することで乱流変動の瞬間的な空間分布特性について検討を行った。風向が測器の並びに対して垂直であるとき、テイラーの凍結仮説を仮定することで、流れ方向と測器の並んでいるスパン方向の水平断面における乱流変動の空間分布を推定することができる。図 3.2.14 はある 1 分間の水平風速、鉛直風速、温度の時間変動成分の水平分布を描いたものである。この間の平均風速は 2.24 m s^{-1} 、平均風向は測器並びの垂直軸より 2 度傾いていた。つまりこれらの図は流れ方向に約 120m、スパン方向に 21 m の、高度 3 m における水平断面に相当する。またこのときの大気安定度はやや不安定であった。

まず水平風速変動及び、温度変動の水平分布を見ると（図 3.2.14 上、下）、低速かつ高温の領域が流れ方向に筋状になって生じていることが確認された（Inagaki and Kanda, in preparation）。このような構造は風洞実験等で観測される、平板乱流境界層の低速ストリークに似ているが、そのスケールは流れ方向約 100 m（約 60H）、スパン方向約 10 m（約 6H）と非常に大きい。また筋状では無いが、組織的だった高速かつ低温の領域も確認された。

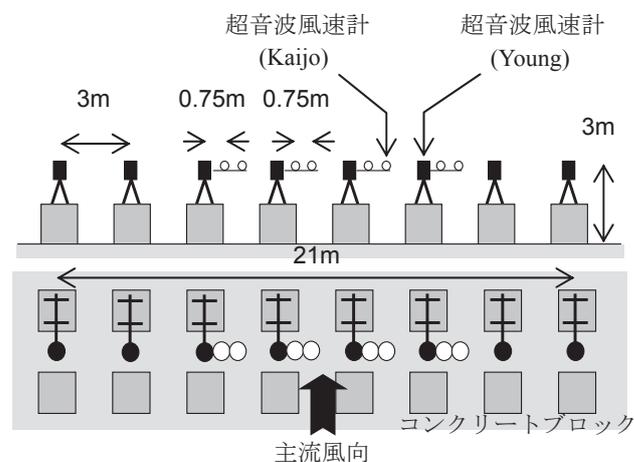


図 3.2.13 超音波風速計配置図

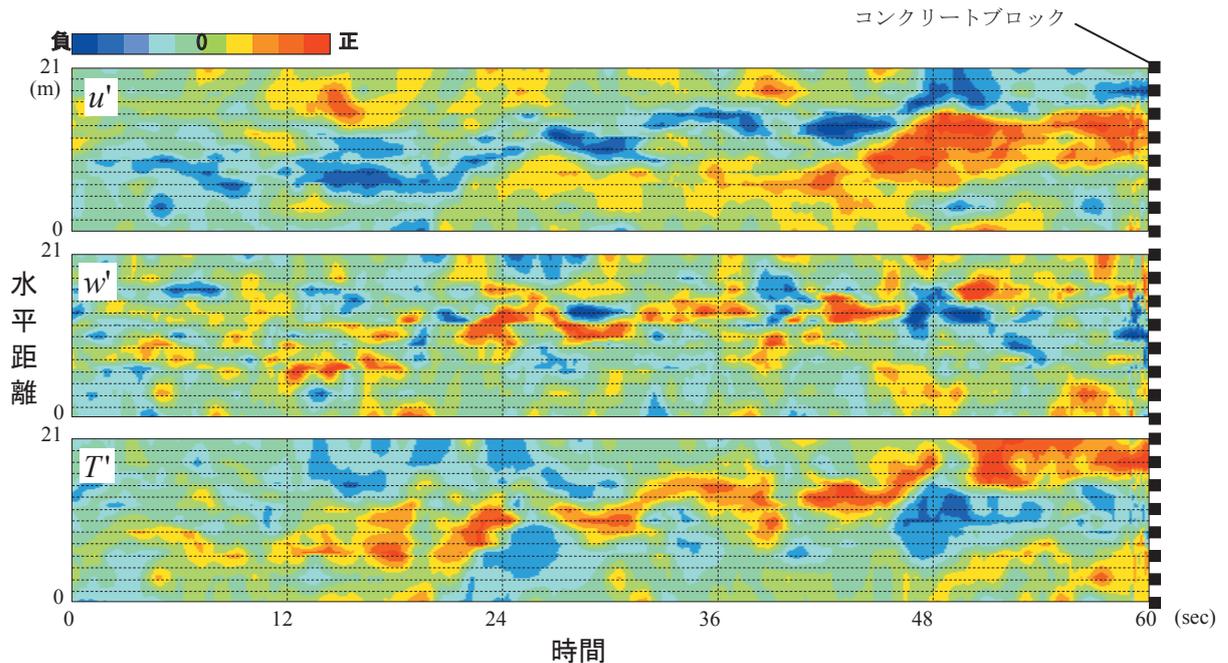


図 3.2.14 各種時間変動量の水平-時系列分布 (2005 年 8 月 4 日 16 時 32 分より 1 分間)
 平均風速 : 2.2 m s^{-1} , 高度 : 2H, コンター範囲 : $u' : -2 \sim 2 \text{ m s}^{-1}$, $w' : -1 \sim 1 \text{ m s}^{-1}$, $T' : -2 \sim 2 \text{ K}$

またそれぞれの構造に対応する鉛直風速の水平分布を見ると (図 3.2.14 中), 筋状の低速かつ高温領域では上昇流が生じており, 高速かつ低温領域では下降流が生じていることが確認できる. これらのデータは大気安定度がやや不安定な時に得られたデータであるため, 上昇流により地表面付近の低速かつ高温の空気塊が持ち上げられ, また下降流により上空の比較的高速かつ低温の空気塊が吹き降りてきたものと考えられる. これはつまり, このような建物スケールの数十倍もある乱流構造が運動量 (応力) や熱の鉛直輸送を直接的に担っていることを意味する.

これらの構造は実都市スケールに置き換えると上空約 15 m (典型的な家屋の大きさの 2 倍) の高度で発達していることに相当し, 上述のような強い熱・物質輸送能を持つことから, 我々の生活する大気環境場に大きな影響を与えている可能性が考えられる.

上述のスケールモデル実験の補間研究ツールとして複雑な都市幾何形状に容易に適用可能な Large Eddy Simulation (LES-CITY)を開発した. このモデルの目的は, スケールモデルだけでは対応しきれない数多くのパラメータセットを高精度数値計算という安価な代替手段で実現することと, 都市域では現状で観測が極めて困難な乱流構造の解析を実際の都市幾何形状のもとで行うことである. LES-CITY は, 都市インフラの個体部と大気部を区別せずに同時に解くマスキング手法と, 圧力場のスペクトル解法, を併用しており, それにより計算効率を格段に向上させている. LES-CITY により以下の結果が得られている. (1) スケールモデルだけ結果ではカバーしきれない様々な都市幾何構造のパラメータセットに対して, 中立を想定した完全発達乱流の計算を行い, 運動量フラックスに支配的な影響を持つ乱流組織構造の時空間構造を明らかにした (Kanda et al., 2004, BLM; Kanda, 2005, BLM). (2) パッシブスカラー輸送のオプションを使用し, 上記と同様のパラメトリックスタディーを行い, それらの結果を基に簡易キャノピーモデル (SUMM) に必要な構成面バルク輸送係数のデータセットを構築した. (3) 一定の熱フラックスを構成壁面別に与えたところ, 大気境界層における乱流フラックスに大きな差異が生じ, 今後の簡易モデルの改良に大きな示唆を与えた.

(d) 人間活動の影響とモデル化

d-1 東京の人工排熱・水蒸気マップ

人工被覆・都市のキャノピー構造とならんで人工排熱が都市特有の熱循環を形成し、都市気象へ大きく影響を及ぼしていることが知られている。また、近年になって人工排熱（顕熱および潜熱）の影響はヒートアイランド形成のみではなく、水蒸気動態への影響が指摘されている。例えば東京都心のオフィス街では冷房機器の冷却塔から人工排熱が水の蒸発潜熱として放出されている（神田ら、1997）。また藤部（2002）は東京都心における湿度の経年変化を解析し都心部が多湿傾向になる可能性を示唆した。この可能性は、近年多発する東京近郊における局地的豪雨への影響という面からも興味深い問題である。そこで大気グループでは、詳細なGISデータとエネルギー統計値と共に詳細な潜熱排出型冷房機器の割合を導入し、関東地方の時々刻々の人工顕熱・潜熱年間データベースを構築した（Moriwaki et al., 2007, WRR ; 図 3.2.15）。人工潜熱量は都心部のみに着目すれば、人工顕熱と同程度である、または局所的には人工顕熱を上回る地点もあることが明らかとなった。本研究により作成した広域関東圏の詳細な人工排熱マップ（顕熱・潜熱別、各月平均値、時間別、1 km解像度）は、今後、各種公的機関で使用してもらう予定になっている。

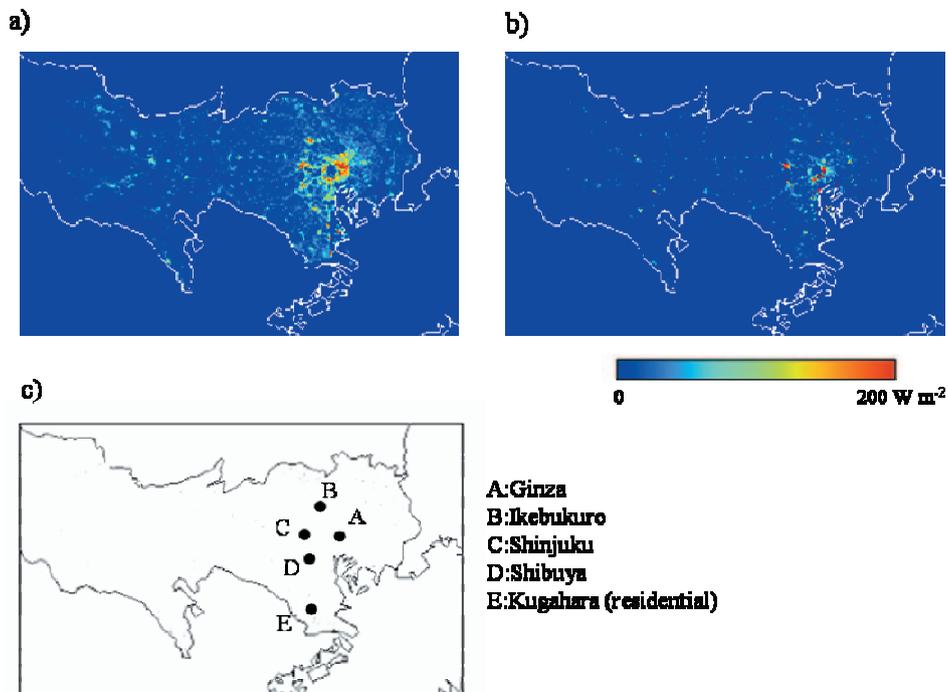


図 3.2.15 GIS データとエネルギー統計値から算出した人工排熱マップ（8月14時）
a)人工顕熱、b)人工潜熱、c)主要都市の位置

(e) 大気－微気象相互作用（都市デザインへの提言）

熱収支の包括的解釈で見たとおり、都市キャノピーの微気象が上空の大気へ及ぼす影響は限定的である。つまり、メソ水文気象学的には、建築要素の細部にあまりこだわる必要はない。その一方で、都市キャノピーの微気象そのものは、都市デザイン（幾何構造や都市材料）によって大きな影響を受けることが明らかになった。

(1) 久が原タワー観測によるキャノピー内の物理量プロファイル

久が原タワーによるフラックス観測は都市が大気へ与えるインパクトを調べるために行ったものであるが、キャノピー内外の水・熱・乱流の鉛直分布を計測することで、大気-微気象相互作用に関するデータも取得した。図 3.2.16 は夏季及び冬季の温位、CO₂、H₂O 分布を日中と夜間に分けて平均化してプロットしたものである。バックグラウンドの変化を無視するためタワー最高点 (28m) を基準に高度方向の変化を、サンプルの標準偏差とともに示している。

日中の温位の最大値は、夏季は地表付近に現れるが、冬季は屋根面付近に現れる。夏は太陽高度が高く日射がキャノピー内部まで差し込むが、冬は太陽高度が低いために屋根面などキャノピー上部のみが温められるためである。都市域の温位プロファイルは、都市キャノピーの 3 次元構造と太陽高度によって形成される複雑な日向・日陰分布に起因する (Kanda et al., 2005, BLM)。

CO₂に着目すると、夏季の日中はキャノピー内で下方ほど濃度が低い。フラックス計測によれば本地域は CO₂ の排出源であるが、この時期はキャノピー底部 (家屋の庭) に存在する植え込みや芝生が展葉し、また太陽高度が高くここに日射が差し込む状況であるため、光合成によってキャノピー底面付近は CO₂ の吸収源になっていると考えられる。冬季夜間には高濃度の CO₂ がキャノピー内部で一様化しており、これは、屋根面からの冷氣沈降が家屋の換気扇などから排出された高濃度 CO₂ をキャノピー内に堆積させるためであると考えられる (Moriwaki et al., 2006, AE)。以上のように、キャノピー空間の気流場・スカラー場は建物幾何構造や上空大気の影響を強く受けることが明らかになった。これらは、適切な都市デザインによってメソスケール気象へのインパクトはさほど期待できないものの、ローカルな人間空間の微気象には効果的であることを示唆している。

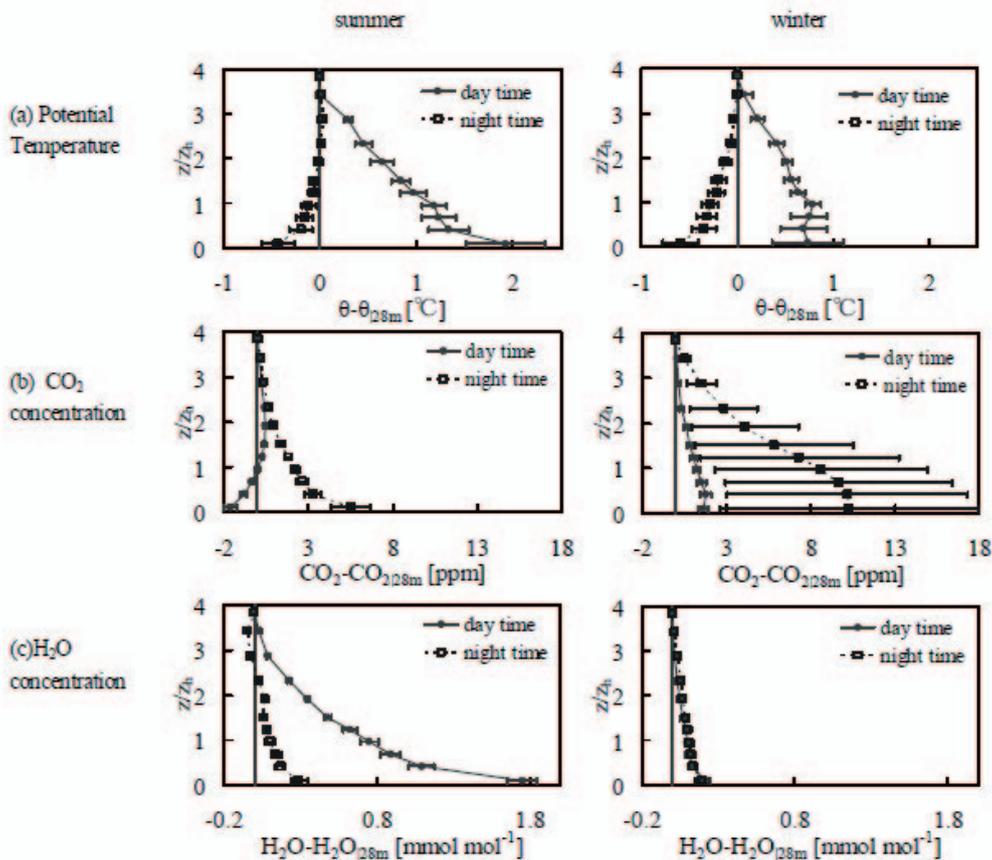


図 3.2.16 夏季及び冬季の(a) 温位, (b) CO₂, (c) H₂O のアンサンブル平均プロファイル

(2) 団地街路空間における気温場・気流場の現地観測

日本での大気汚染は1970年代に比べれば改善してきていると言えるが、ここ10年では光化学スモッグが再び頻繁に発生するようになった。その原因として、都市の温暖化（大気中でのオゾンの化学反応を促進していると考えられる）や工場や自動車から排出されるVOC（揮発性有機化合物）などがある。また、ディーゼル車の排ガスと花粉症との関係が指摘されるなど、歩行者空間（街路空間）における熱・物質輸送に係わる社会問題が顕著になってきている。そこで、このプロジェクトのテーマである「都市陸面過程」をミクロな視点から解明するため、街路空間における熱・物質輸送を実測により明らかにした。東京都武蔵野市の集合団地内において気温・風の計測を行った(Sugawara et al., 2006, Ogawa et al., 2006)。南北に並んだ建物間において通風管付き熱電対（40地点）および超音波風速計（13地点）を設置し、都市街路空間の鉛直断面内での分布を計測した（図3.2.17, 図3.2.18）。大気中での熱・物質の輸送や拡散を支配する微気象要素は温度成層と気流場である。以下、それぞれについて現地観測での結果を元に示してゆく。

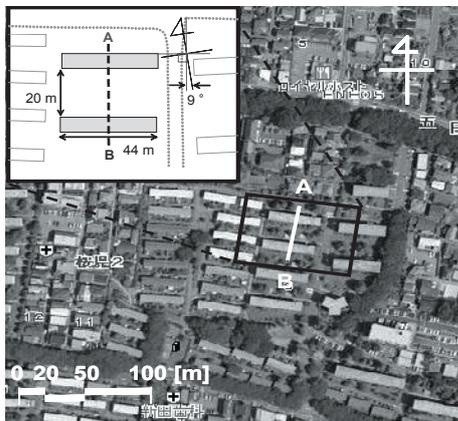


図 3.2.17 観測地点の航空写真

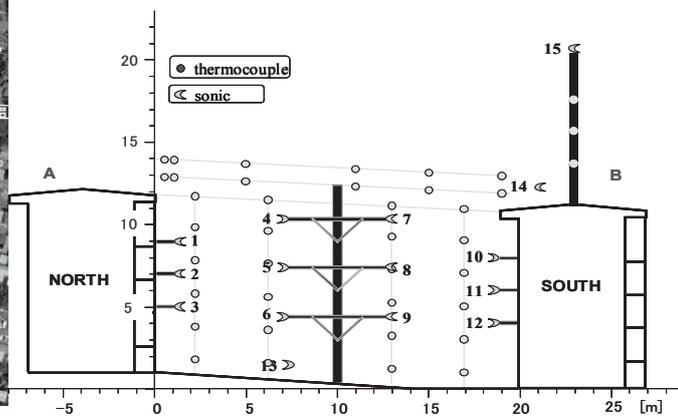


図 3.2.18 測器配置図. 左図の A-B に沿った断面図

街路空間における温度成層状態

ここでの温度成層に関する問題意識は、街区空間内での安定成層、すなわち下層ほど低温な状態がどの程度の強度・高度・時間帯で見られるかという点にある。このような安定成層中では大気拡散が抑制されるからである。図3.2.19はこの研究で計測された街区空間内の気温分布の一例である。図の右側が南、左が北にあたり、日中は日向日陰による南北方向の温度差が顕著である。一方で夜間は上下方向の気温差が顕著となる。

まず気温分布を大きくとらえるため、その鉛直分布について見てみる。図3.2.20は図3.2.19の気温分布を各時刻で南北方向に平均したものである。夜間は街路空間の下部に安定層が形成されており、建物高さの約6割まで達していることがわかる。一方で上下方向の気温差が最も大きく（大気が最も安定に）なるのは深夜ではなく夕方18時ごろである。これは日没前後に太陽高度が低く、建物壁面の上部のみが加熱されるためであると思われる。図3.2.20の鉛直分布で見れば日中の成層状態はほぼ中立か弱安定であるが、図3.2.19に示すように街路空間の南下に局所的な安定成層が形成されている。地上レベルで見ると南側と北側では最大で約2°Cの気温差が生じていた。図3.2.21はこの局所的な安定層（冷気塊）の中心位置と上空の風速との関係を示したものである。南風が強くなるほど冷気塊は南側に移動する。上空の風が街路内に入り込むことで、上空風とは反対向きの流れとなり、冷気塊は上空風の風上側へとする。これは自動車が通行する道路において、両側にある歩道のうちどちらか一方だけで大気汚染物質が高濃度になる現象(Weber et al., 2006)と対応している。街路空間内の成層状態は上空の風向に影響されることが本研究により明らかにされた。

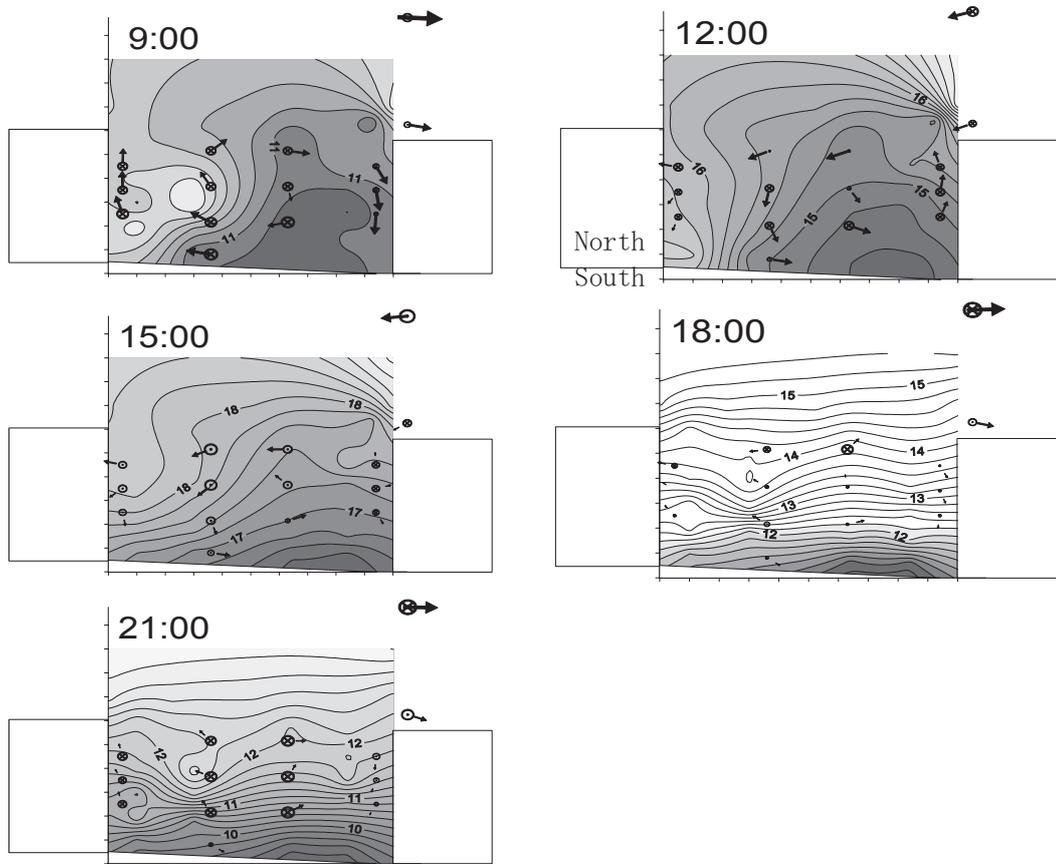


図3.2.19 気温と風の分布の一例. 2004年11月23日の日変化. 左右の四角が建物で紙面右側が南, 左が北. 実線は0.2℃間隔の等温線, 矢印が風を表し, 矢印の根元にある丸の大きさと紙面直交方向(東西方向)の風速をあらわす.

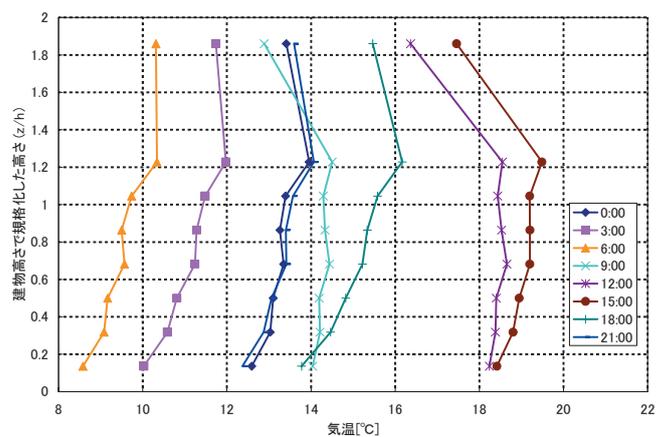


図 3.2.20 晴天日 15 日間について平均した気温鉛直分布.

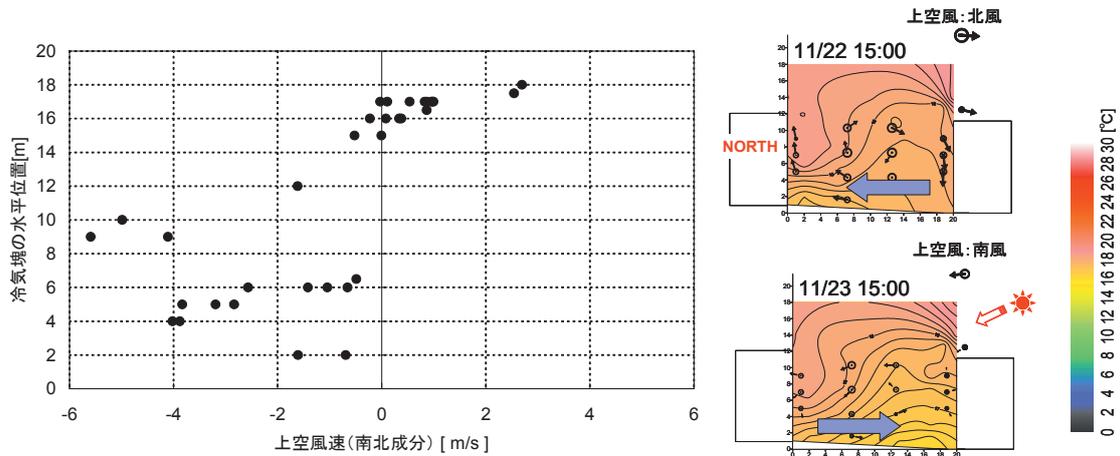


図 3.2.21 上空の風速と冷気塊の位置との関係. 上空風速は南北成分をとり南風がプラス. 冷気塊の水平位置は街路北端からの水平距離. 右図は上空風向が異なる気

街路空間における気流場

熱・物質は気流（平均流）に乗って輸送され、より細かい気流（乱流）によって拡散される。平均流についてみれば、図 3.2.19 に示すように街路空間にはそれ全体を占めるような渦が形成されている。Kim and Baik (2001)の数値シミュレーションによれば、もし渦が上下に2つ並んだ状態になると下層の大気汚染物質が上空へ輸送されなくなり下層に溜まる。本研究での計測では少なくとも、ほぼ定常状態とみなせる 10 分平均値の時間スケールでは複数の渦がみられることはなかった。

この渦の渦度（渦の強さ）と上空風速との関係をみたものが図 3.2.22 である。渦が強くなるほど、街路内での乱流拡散は大きくなると考えられる。図でプロットがほぼ直線状に並んでいることから分かるように、渦度を支配する第1のパラメータは上空風速である。プロットは建物上空での大気安定度で分類してあり、安定時には渦度が小さくなっていることがわかる。また、渦が形成される最小風速（図の x 切片）も安定時には大きくなっていた。これは、安定時には不安定な時よりも上空の気流が街路空間内に入り込みやすいことを示している。安定度も渦度を支配することが明らかとなった。

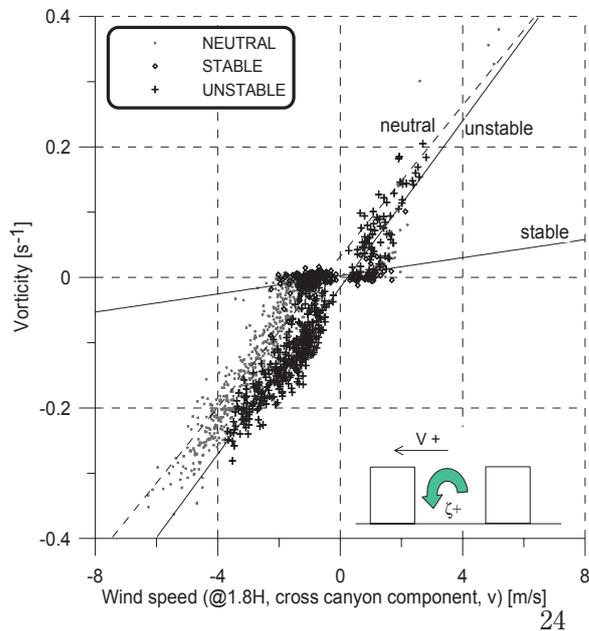


図 3.2.22 渦度と上空風速（キャニオンに直交する南北成分風速）との関係. プロットは大気安定度で分けてある. 直線はプロットに対する近似直線.

このように街路空間の断面図では渦が見られるが、3次元で見るとどのような気流場になっているのだろうか？図3.2.23は風速の3次元成分（ u は道路に平行な成分、 v は道路に直交する成分、 w は鉛直方向の成分）について示したものである。上空の風向が街路に直交する場合と平行の場合について示してある。上空風が街路と平行な場合は、街路内でも道路に平行な成分（ u ）が一番大きい、上空風が街路と直交する場合でも u は v 、 w とほぼ同じ大きさである。すなわち、街路内では図3で見られた渦と同時に道路方向の流れも存在しており、3次元的に見た気流場はいわばスパイラル形状となっている（図3.2.24）。

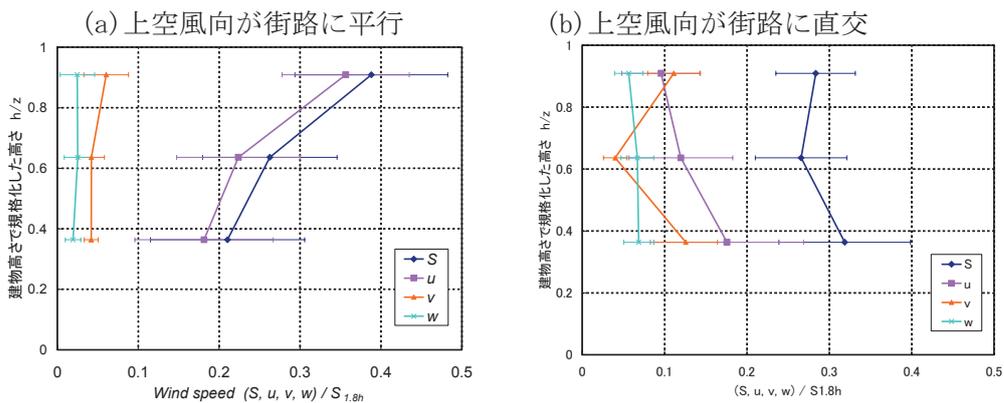


図 3.2.23 街路空間での3次元風速成分の鉛直プロファイル。 u は街路（道路）に平行な成分、 v は街路に直交する成分、 w は鉛直成分、 s はスカラー風速。いずれも上空のスカラー風速で規格化してある。縦軸は建物高さで規格化した高さ。

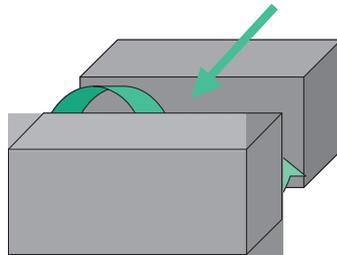


図 3.2.24 街路空間の3次元気流場の模式図。上空の風向が街路に直交する場合。

本研究と同様のテーマの研究では、風洞実験が数多く行われている。風洞実験は、相似則等を考慮して現実都市を模擬しているものの、日射による温度分布や現実大気における大規模な乱れを再現していない。本研究で行った野外での実測は実際の微気象の姿を示したものである。一方、野外数少ない野外実測の先行研究として Nakamura and Oke(1988)、清田・成田(1996)、Elimasson et al.(2006)があげられる。本研究では既往研究よりもはるかに多い観測点を設け（Elimasson らの測定約2倍）、より詳細な空間分布を計測している。

(1.2) メソスケールにおける大気－陸面－海面相互作用の解明

(d) 東京湾が首都圏大気に及ぼす影響

東京湾水温の時空間変動が、隣接する首都圏の大気にどのような影響を及ぼしているかを解析した。既存データだけでは難しいことから、東京湾において1年間に渡る熱収支観測・高時空間解像度の水温分布観測を実施し、それらをメソ気象モデルへ同化して、数値解析と併用することにより評価を行った。

d-1 東京湾水温・フラックスの単時間変動の実態把握

首都圏で顕在化しているヒートアイランド現象などの都市大気環境問題に対し、AMeDASなどのルーチン観測データ解析や大気－陸面相互作用に着目したタワーフラックス観測の実施などによって急速にその物理現象の理解が進みつつあるが、一方で都市圏に隣接した水圏（内湾・沿岸部）が周辺大気にもたらす環境影響については詳細に議論されてこなかった。これは、地上の気象観測網と比較して、湾上における観測データの不足が挙げられる。そこで、東京湾海上にある既存の潮位計測用タワーに大気環境観測機器（風速計・水蒸気／二酸化炭素濃度計・放射計）を設置し（図 3.2.25）、2004年12月から2005年11月の一年間に渡りフラックス現地観測を実施した。ここで得られた結果を上述の久が原フラックス観測結果と比較することで、東京湾と都市大気との結びつきを評価した。

図 3.2.26 に、東京湾および久が原で得られた各種フラックスの季節変化（12時台平均値）を示す。なお、フラックスは上向きを正とする。

顕熱（図 3.2.26a）は、都市では日中、年間を通して正であるが、東京湾では都市と比較して小さく、夏には負となっている。このことから、東京湾は夏季の日中、熱のシンクとしての役割を果たしていると言える。日中都市域で生成された暖かい空気塊が、海陸風循環により東京湾海上に流入し、顕熱の放出を抑制していると考えられる。

潜熱（図 3.2.26b）は、東京湾上では常に正であり、明らかに水蒸気のソースとなっている。その大きさは冬に大きく、夏に小さくなる傾向が見られる。都市域の乾燥空気が湿った東京湾海上に流れ込み、潜熱の放出を促していると考えられる。

CO₂フラックス（図 3.2.26c）は、都市では人為起源のCO₂放出により常に正となっているが、東京湾ではバラツキが大きく、明確には結論づけられない。しかしながら、特に冬季と夏季では負のフラックスとなる傾向が見られる。この結果も上記と同様、移流や海陸風循環により、都市の高濃度CO₂が東京湾海上に運ばれ、東京湾で吸収されていると考えられる。

東京湾における乱流フラックスの挙動は、夏季の海陸風循環や冬季の移流といった、半閉鎖性水域である東京湾特有の風の場合に依存しており、それに伴い都市域の影響を強く受けていることが示唆された（Oda et al., in preparation）。

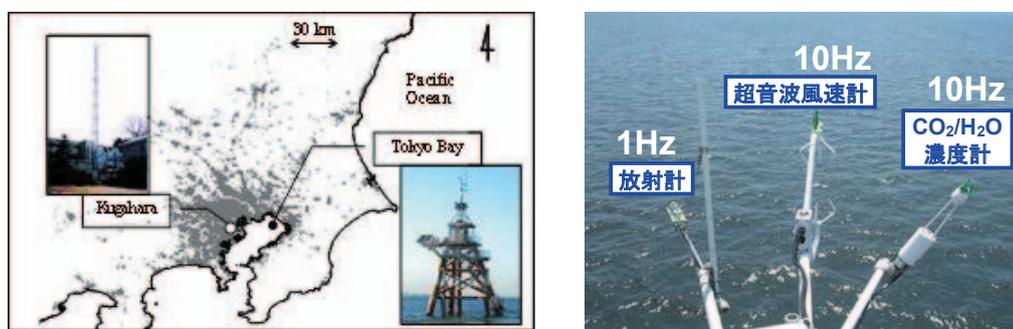


図 3.2.25 観測場所および観測機器

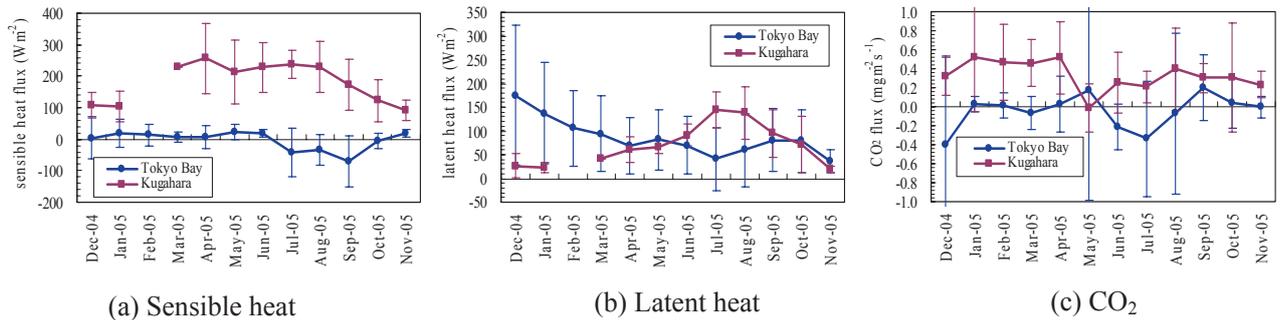


図 3.2.26 東京湾と住宅街におけるフラックス季節変化の比較
 (a) 顕熱フラックス, (b) 潜熱フラックス, (c) CO₂ フラックス

前述したように、東京湾は隣接する首都圏に対し、海陸風循環という形で相互に影響を及ぼしていると考えられる。しかしながら、その駆動力となる海表面温度については、現業数値予報モデルによる計算において衛星観測から得られる水温を導入し、日変化がほぼ一定と仮定されるなど、時間スケールの短い変化量についての詳細な理解はされてこなかった。そこで、東京湾内湾全域にわたる海表面温度の直接測定を実施し、ここで得られた結果をメソ気象モデル WRF (the Weather Research and Forecasting Model) に導入することで、東京湾が都市大気に及ぼす影響を検討した。

都市キャノピーモデルを考慮し、人工排熱効果を導入して検討したところ、夏期の結果においては、人工排熱効果、東京湾水温変化の効果の順で影響力が大きいことが示唆された (図 3.2.27)。

また、外洋の海表面温度から東京湾での観測値に置き換えることによって、東京湾海上における顕熱が、冬季は大幅に減少し (図 3.2.28)、夏季も東京湾海表面温度変化に対応した変動傾向を示すことが確認された。

以上の結果より、沿岸域において大気-海面相互作用を見積もる際には、現実に即した海表面温度をモデルに導入する必要がある、これに加えて人工排熱・都市キャノピーモデルを考慮することによって、今後より高精度の都市気象予測を行える可能性が示唆された。

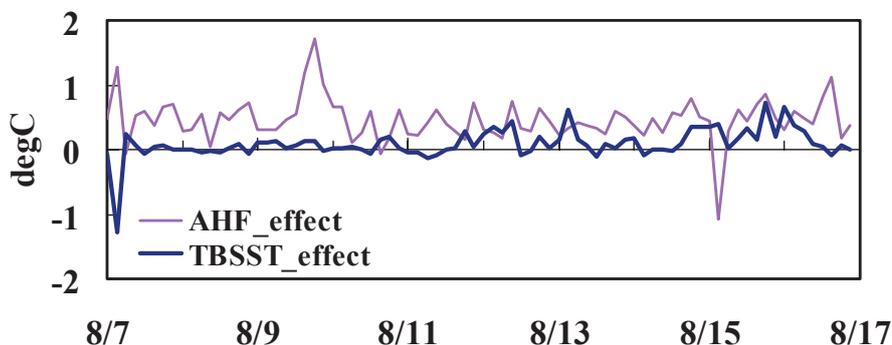


図 3.2.27 東京における人工排熱効果と東京湾水温変化の効果 (気温変化)。
 人工排熱を付加することで約 0.5°Cの温度上昇、衛星観測客観解析 SST (一定値) から東京湾 SST の観測値に置き換えることで約 0.1°Cの温度上昇が見られた。

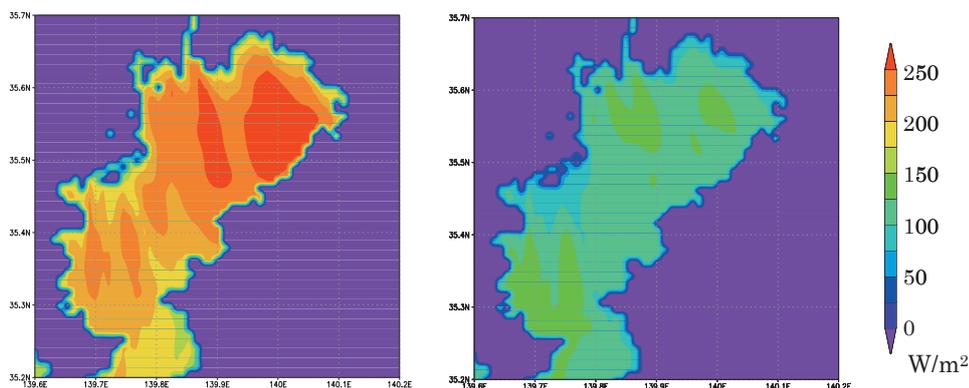


図 3.2.28 2006 年 12 月 18 日 18 時における顕熱分布. 左図は衛星観測客観解析 SST を一定値として計算した場合, 右図は東京湾での海表面温度観測値を導入した場合. 観測値を考慮した方が明らかに顕熱フラックスが抑制されている.

d-2 集中豪雨影響への可能性

i) はじめに

夏季静穏時に関東平野, 特に東京都心周辺で発生, 発達する積乱雲 (熱雷) はしばしば短時間強雨を伴い, 防災面からもその発生, 発達過程の解明は重要視されている. また気候学的にも降水量の変動, 大都市における強雨の増加も議論されており, 東京周辺における降水の増加も指摘されている. 一般に, 夏季晴天時に発生する積乱雲 (雷雲) は日射による加熱が原因となるため, 熱雷と呼ばれる. 熱雷は, 山岳域では谷風循環などによる強制上昇により発生し, 関東では西部から北部の山岳域において頻発する. これに対して, 平野部では一様加熱あるいは相模湾, 鹿島灘からの海風循環 (部分差加熱) などのメソスケールの条件が効いている. しかしながら, 積乱雲発生に関して, 都市上空における混合層の発達から積雲対流まで地上~境界層内の気流構造と関連付けて観測することは重要でありながらもこれまでなされていない. 世界の大都市の中で, 東京は相対的に低緯度に位置し, 夏季の高い気温, 多量の水蒸気量を背景に活発な対流活動が観測される場所であり, ヒートアイランドと積雲対流との定量的な議論を行うためにも適した場所といえる.

ii) 観測の概要

観測は主として横須賀 (防大) と都内で展開した. 横須賀の走水に位置する防衛大学校において, X バンド・ドップラーレーダ, ドップラーソーダ (音波レーダ), ウェザーステーション (自動地上気象観測装置), ビデオカメラ等を用いた観測を行った. 各測器は校舎屋上 (標高 100m) に設置されており, ドップラーレーダ (波長 3cm) は半径 64km のレンジ内を多仰角 (0.5°~20.5°) の水平スキャン (PPI: Plan Position Indicator) と 180°の鉛直スキャン (RHI: Range Height Indicator) により 10 分間隔で連続観測を行った. モノスタティック型ドップラーソーダ (Kaijo AR410N) は 900W のパワーで送信し, 30 秒間隔でデータを取得した. ウェザーステーションは各気象要素を 5 秒間隔でサンプリングした. ビデオは固定カメラとハンディカメラを用い, 固定カメラは 1 秒間隔のコマ取りを行った. 横須賀で 7 月から 9 月まで夏季に連続観測を行い, データを蓄積した.

都内における観測は, 2004 年に複数のドップラーソーダとウェザーステーションを用いた観測を実施した. ドップラーソーダは, 海風の進入経路に対応するよう, 新宿 (新宿御苑), 練馬 (区役所屋上), 朝霞 (埼玉県) に設置し 7 月 23 日から 8 月 12 日までの間, 観測を行った. またドップラーソーダを所有する, 既存の 3 観測点で同期して観測を行った

(江東区越中島, 厚木, 松戸). ドップラーソーダはモノスタティック型とフェーズドアレイ型を用い, 30 秒毎のデータ (瞬間値) または 1 分平均値として収録した. 2005 年は新宿でドップラーソーダ観測を実施した (図 3.2.29).

解析ではアメダスデータ (気象庁) 以外に, 東京都が独自に設置した地上観測データ (METROS) を使用した. これは, 都内 20 箇所のビル屋上で気温, 湿度, 気圧, 風向風速, 雨量を測定するもの (METROS20) と, 106 校の小学校内における百葉箱で気温と湿度を測定するもの (METROS100) であり, いずれも 10 分毎のデータが得られている.

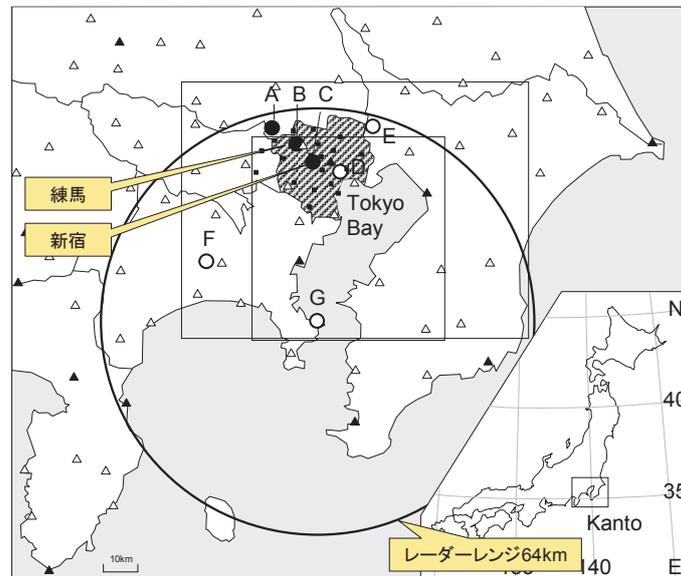


図 3.2.29 観測域. 図中, ●はソーダ設置地点, ○は既存のソーダ地点, ▲は気象官署, △はアメダス地点, ■は METROS 地点を表す.

iii) 東京都心周辺における積乱雲の発生特性

防大ドップラーレーダで観測できる, 神奈川県, 東京都, 千葉県南部を含む領域で積乱雲の発生過程を調べた. 本研究では, 7 月と 8 月 2 ヶ月間を解析期間とし, 地上天気図で夏型, 都心 (アメダス・大手町) において 12 時の気温が 30°C 以上, 平均風速が 5m/s 未満の日を解析日と定義した. この夏型の日には 2004 年 29 日, 2005 年 29 日, 2006 年 18 日あり (2007 年は解析中), このうちの 50 日を解析日とした. 解析日の中で, レーダーレンジ内で積乱雲エコーが発生したのは計 15 日あった. 積乱雲のエコーに関して, 積乱雲発生時のエコーを「ファーストレーダエコー (積乱雲の芽: 以後, ファーストエコー)」と呼び, 次のように定義した. すなわち, 28 dBZ 以上のエコー強度を有する対流性エコーを「積乱雲エコー」とし, この積乱雲エコーをさかのぼり最初に出現したエコーを「ファーストエコー」とした. 図 3.2.30 は 3 夏季間の解析日の中で発生した約 100 個のファーストエコーの発生頻度を, 10 km × 10km の領域における 1 日あたりの発生密度で表したものである. 図から, 丹沢山系でファーストエコーの発生頻度は高く, 同時に東京都や千葉県の平野部でも発生が認められる. 特に, 東京北西部で頻度の高い領域が存在し, その値は 0.1 個/日を越えた. 一方で, 房総半島での発生頻度は少ない. これは, 夏季静穏時に房総半島の山地では積雲の発生が頻繁に認められるものの積乱雲エコーにまで発達する数が少ないためである. また, 東京湾から湾岸域でのファーストエコーの発生は認められなかった. ファーストエコーの発生時刻は, 12:00 から 17:00 までの午後に集中した. 丹沢山系と東京におけるファーストの発生高度 (地上高) と積乱雲エコーの最大発達高度を比較すると, 平均発生高度は 1.5 km (丹沢), 2.5 km (東京), 平均到達高度 3 km (丹沢), 5 km (東京) と両者で大き

な違いが見られた。これは、丹沢山系では斜面の強制上昇により対流雲が発生するため、発生高度は低く、多くの積乱雲が形成されるもののそれほど発達しないことを示している。これに対して東京で発生するファーストエコーは相対的に発生高度が高く、一度発生すると発達しやすいことを意味している。東京におけるファーストエコーの高発生頻度は単に一樣加熱では説明がつかず、他の要因が存在することが考えられる。

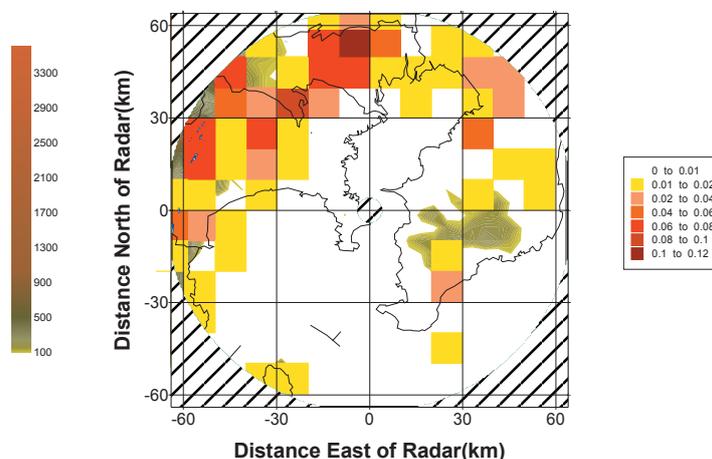


図 3.2.30 ファーストエコー発生密度分布

iv) 2004年8月10日に都心で孤立して発生した積乱雲の構造

当日、関東平野は快晴であったが東京都心だけで局地的な短時間強雨が観測された（図 3.2.31）。関東の山岳域では午前中から活発な対流活動がみられ対流性エコーが認められた。一方、関東平野部では積雲の発生は確認されたが、午前中はノーエコーであった。11時過ぎから23区北部で、積雲／積乱雲の発生が確認され、レーダーエコーは、11:59JST (JST: Japan Standard Time, 日本標準時間) に高度 3 km～4 km で初めて観測された（ファーストエコー）。図 3.2.32 は 12:00JST における高度 4 km の CAPPI 画像であり、孤立した 3 個の積乱雲エコーが北から、戸田（埼玉）、赤羽、練馬あたりで発生した。この積乱雲のうち南側のエコーは 12:00JST 以降、その東側でエコーが成長し、ほぼ同じ場所で発達を続けた。レーダーエコーは 12:40～12:50JST に最盛期を迎え、エコー頂は 10 km を超えた。ビデオ画像からも、同じ場所で積乱雲が沸き続け、雲頂部分が東に流される様子が認められた。

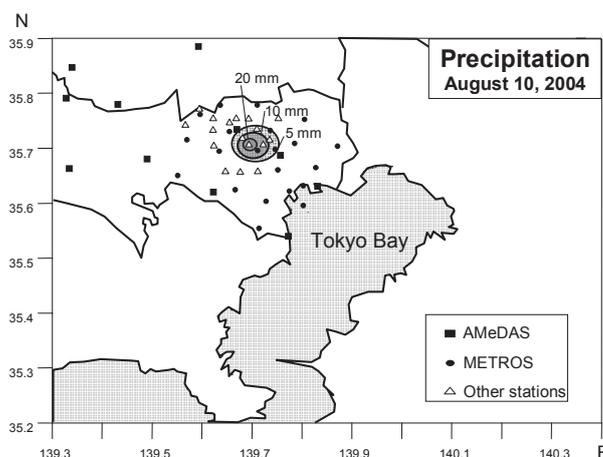


図 3.2.31 2004年8月10日の降水分布

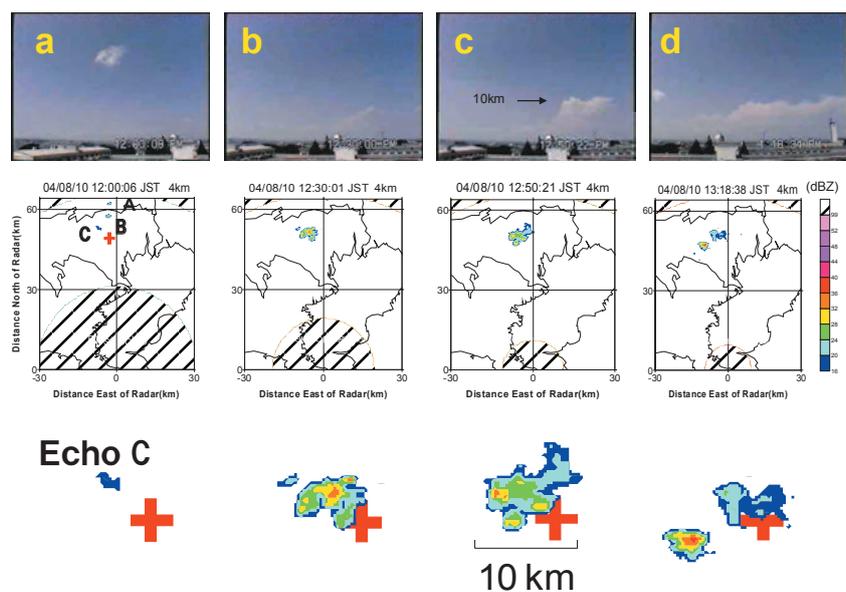


図 3.2.32 2004 年 8 月 10 日の積乱雲発生過程. ビデオ画像 (上), 高度 4 km の CAPPI レーダー画像 (中), エコー拡大図 (下). A~C はファーストエコーを, +新宿の位置を示す.

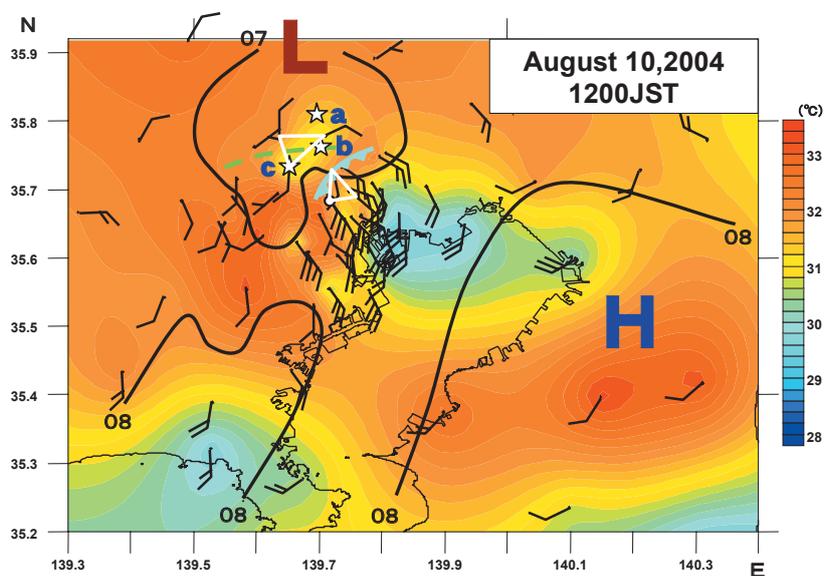


図 3.2.33 2004 年 8 月 10 日 12 時の温度, 気圧, 風の間

図 3.2.33 はアメダス及び METROS のデータを用いて解析した, 積乱雲発生時である 12 時の気圧場, 温度場, 風の間である. 東京 23 区北部から埼玉県南部に 1007 hPa の低圧部が解析され, 低気圧性の風系も確認される. この低圧部は 11 時からの 1 時間で約 1 hPa の気圧降下を示し気温の上昇 ($1^{\circ}\text{C} / 1 \text{ hour}$) に対応して広がった. 一方南部の三浦半島, 房総半島は相対的に高圧部になっていた. 当日一般風は弱く日の出以降 3 m/s 未満の海風が東京湾沿岸部で観測された. 東京では 09 時以降海風の進入が認められ, 3 m/s 以上の南東風

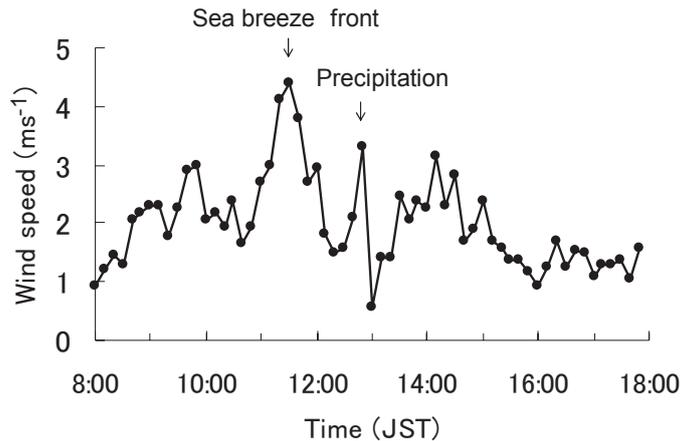


図 3.2.34 新宿における高度 30 m のソーダ風速の時系列

を海風とみなすと、海風の先端（海風前線，図中の前線）は 09:00JST には上野に達し、その後 12:00JST には新宿から池袋にまで達していた。

新宿御苑に設置したドップラーソーダで観測した高度 30 m における水平風速（10 分平均値）の時間変化をみると、11:00JST から 11:30JST にかけて風速の増加がみられ 4.5 m/s のピークを記録した（図 3.2.34）。これは海風前線の通過に時間的に対応し、高度 100 m 以下の下層で 5 m/s 前後のピークが観測された。その後の 13:00JST 前のピークは、降水に伴う下降流の地上発散であった。図 3.2.35 に示した鉛直流をみると、08 JST から下層 100 m～150 m に上昇流が間歇的に観測された。上昇流は、高度 200 m より下層で、地上に近い方が相対的に強いという傾向があり、これは、地表面の加熱を反映した結果と考えられる。上昇流速は 0.5～1.0 m/s であったが、11:00JST 以降は 1.0 m/s を超えるピークを有する上昇流が存在し、海風前線における上昇流の形成、強化と考えられる。13 JST 以降は、降水を伴う下降流が全層で卓越した。

この日の地上風系をまとめると、東京湾から進入した海風の海風前線は北西方向に平均 3 km/h という遅い進行速度で移動し、以降はほとんど同じ場所で停滞した。これとは別に水平スケール 30 km 程度の低気部に伴う風のシアラインが東京と埼玉の境に 11:30～12:00JST の間に形成された。積乱雲のファーストエコーはこのシアライン周辺で発生した。その後発達したエコーセルは停滞した海風前線に位置的に対応していた。すなわち、風のシアラインが積乱雲発生のトリガーとなり、海風前線が積乱雲の発達に寄与していたことが示唆される（図 3.2.36）。

v) 積乱雲発生時の環境場

夏季静穏時における関東平野、特に都内における地上気象場の特徴を明らかにするために、アメダス、METROS 等地上稠密データを用いて解析した。2004 年の解析日 18 日間（降水日、無降水日を含む）の平均場をみると、東京北部に約 1 hPa 程度の低圧部が認められた（図 3.2.37）。すなわち、練馬から成増付近の地上高温域で形成される低圧部は熱的な原因で形成されるものであり、積雲対流等に伴う気圧擾乱でないことがわかった。また、平均場では都内において南風が卓越した。解析日のうち低圧部に伴い風のシアラインが形成された日を抽出すると、シアライン形成日は相対的に、高温で気圧が低く、かつ弱風であったことがわかった。すなわち、晴天日でも東京湾や相模湾からの大規模な海風が卓越し、風速が 5 m/s を越えるような場合には、低圧部における風のシア（収束）は認められなかった。

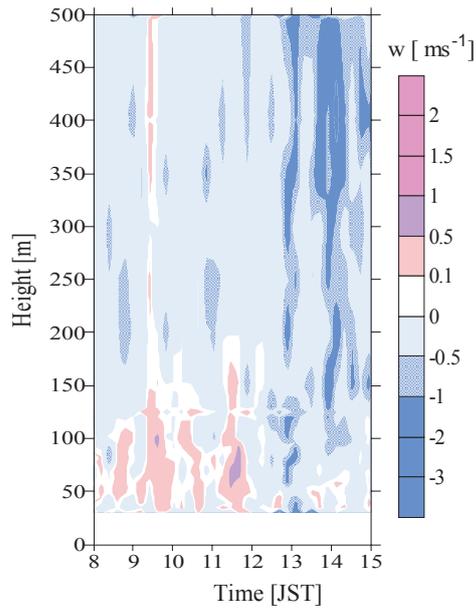


図 3.2.35 ソーダ鉛直流のタイムハイトセクション

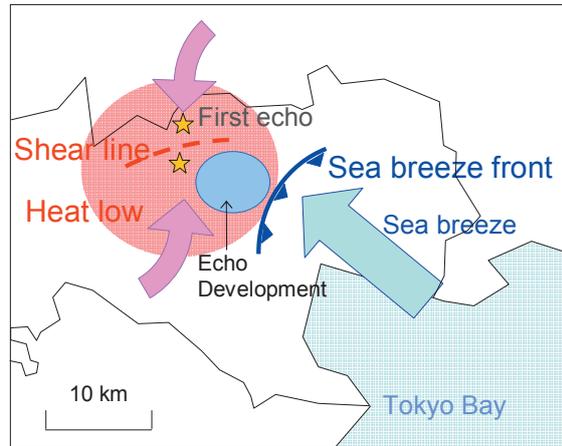


図 3.2.36 夏季静穏時都内における積乱雲発生時の模式図 (2004.8.10)

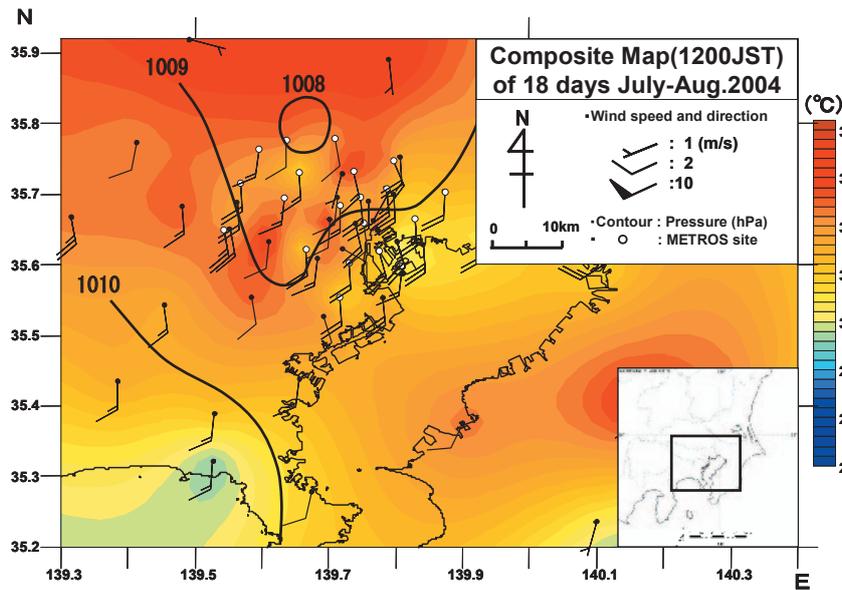


図 3.2.37 2004 年夏季解析日 18 日間の平均場 (12 時)

vi) まとめ

夏季静穏時に東京都心で発生する積乱雲の構造を、Xバンド・ドップラーレーダ、ドップラーソーダ、ウェザーステーション、ビデオカメラ等を用いた観測を行った。観測結果から、積乱雲の発生特性、積乱雲形成メカニズム、積乱雲発生時の下層環境場について以下の知見を得た。

- (1) 積乱雲ファーストエコーの発生頻度は、東京北西部に頻度の高い領域が存在し、そ

の値は 0.1 個／日を越えた。丹沢山系と東京におけるファーストの発生高度と最大発達高度を比較すると、両者とも都内のエコーが 1 km 以上高かった。これは、丹沢山系では斜面の強制上昇により対流雲が発生するのに対して、都内での積乱雲は下層収束により発生し、発生高度が高く、一度発生すると発達しやすいことが示唆された。

- (2) 東京都心で孤立して積乱雲が発生した事例を解析した結果、東京北部に形成された熱的な低圧部に伴う風のシアラインがファーストエコーのトリガーとなり、海風前線が積乱雲の発達に寄与していたこと。
- (3) 地上稠密データを用いた解析から、夏季静穏時には常に東京北部で熱的な低圧部が形成され、条件により風のシアライン顕在化することが明らかにされた。

(2) 研究成果の今後期待される効果

大気グループでは、都市表面と大気境界層スケールの水・エネルギー輸送の物理機構を説明し、それらの諸現象を理論体系化すること、および大気-海面相互作用の解明を目的として、現地観測・屋外スケールモデル実験・数値モデルを駆使して研究を実施した。それぞれの研究成果の今後の展開と期待される効果は以下のとおりである。

(2.1) 都市陸面過程の解明とその理論体系化

(a) 陸面パラメータ（運動量・スカラー粗度、オアシス効果）の解明と理論体系化

実験・観測ではカバー出来ない広範な都市幾何構造の組み合わせについて、高精度大気モデル(LES-CITY)を用いて、各種パラメータのデータベースを提供する予定である。

(b) 熱収支の包括的解釈と理論体系化（陸面モデルの構築と検証）

久が原のフラックス観測は、1年間に渡る詳細な熱収支の連続データが得られたことにより、インターネットにてデータを公開するに至った。また世界的な都市気象モデルの相互比較実験の検証データの一つとして使用されることが内定しており、この本プロジェクトで実施した一連の都市フラックス観測によって得られた知見は、都市域における長期間の連続データの第一歩として今後の都市気候研究に大きく資するものと考えられる。

また本プロジェクトで開発した簡易都市キャノピーモデル(SUMM)は、都市モデルの国際比較プロジェクトに参加することになり、今後その有効性が詳細に検討されることになっている。

(c) 都市境界層における乱流相似則および乱流構造の体系化

都市境界層における乱流相似則および乱流構造に関する研究をさらに発展させるために、準実スケールモデル(COSMO)を用いて、トレーサーを用いた拡散実験や PIV による流れ解析を追加していく予定である。また異なる建物配列についても実験・データ解析を行い、屋外都市モデル実験データベースを構築する予定である。そして、出来るだけ早い段階で世界へ公開し、都市キャノピーモデルの検証データとして提供する予定である。

(d) 人間活動の影響とモデル化

詳細なGISデータとエネルギー統計値と共に詳細な潜熱排出型冷房機器の割合を導入して構築した、関東地方の時々刻々の人工顕熱・潜熱年間データベースは公開することにし、広域関東圏の詳細な人工排熱マップ（顕熱・潜熱別、各月平均値、時間別、1 km解像度）を各種公的機関で使用してもらう予定になっており、すでに気象庁の数値予報モデルに採用されている。

(e) 大気－微気象相互作用（都市デザインへの提言）

都市キャニオン内における気流計測の結果は、都市域における顕熱フラックスのパラメタリゼーションの精緻化に利用できると考えられる。これまでは都市キャニオン内の風速分布についてほとんど実測データが無かったため、数値モデルにおいて非現実的な仮定をおいたパラメタリゼーションが用いられる危険性が強かった。本研究での計測結果を用いて例えば、パラメタリゼーションにおいてキャニオン内を等温とする仮定がどこまで有効なのか？といった事項を検討することができる。これは数値モデルを高度化するのみならず、簡便なパラメタリゼーションの許容限界を明らかにすることで、モデル全体のパフォーマンスを上げることにもつながる。今後、形状の異なる都市キャニオンにおける計測結果を比較することで、都市形状による熱輸送効率の違いを見積もることができる。近年、熱帯夜などに見られるように住環境での温暖化問題が顕著になってきており、熱を貯めない涼しい都市（良好な温熱環境）の目指した都市計画に、本研究は寄与することができると考えられる。

(2.2) メソスケールにおける大気－陸面－海面相互作用の解明

(d) 東京湾が首都圏大気に及ぼす影響

各地で頻発する豪雨・洪水被害は防災対策上重要であり、その中で近年クローズアップされている、“都市型豪雨”あるいは“都市型洪水”は社会的にもインパクトが大きく、その対策が急がれている。積雲対流の形成過程を観測的に捉えるためには、水蒸気が凝結して雲になる過程、すなわち大気下層の水蒸気量や熱力学的な場をおさえる必要があり、大掛かりな観測体制が要求される。さらに大都市での観測では多くの困難を伴う。今回の研究では、1台のXバンドレーダを用いて積乱雲エコーの発生過程を観測したが、今後複数台のレーダを用いて関東平野全体をカバーする試みや、ドップラーライダーを用いて雲の形成前の場を解明するなどの研究が必要と考えられる。今後のさらなる研究が望まれる。また、メカニズムの解明と同時に、豪雨の予測（短時間予測：ナウキャスト）も進めていく必要がある。現在、複数のレーダを用いたリアルタイムの観測を試みているが、都市型豪雨の予測手法の開発も今後行うべき課題と考えられる。

また東京湾の表面水温は時空間的にダイナミックに変化しており、その気象および海洋モデルへの同化は、大気環境と湾内流動の両者に顕著な影響を及ぼす。これらのモデルを有機的に結合することにより、都市生態圏が大気圏へ及ぼす強制力（フォーシング）を1つのフローとして物理的に捉え直すことが可能となる。本研究は、水・エネルギーさらには物質の循環を総合的に扱う境界領域分野の体系化に踏み込んだものと言える。将来的に環境の重要な構成要素である物質循環を考える際も、同様に都市によるフォーシングの概念が必要となるであろう。本研究は、そのベースとなる境界物理スキームを提供した。本研究の物理スキームは、アジアのメガシティにおいて、不十分な観測ネットワークをバックアップしての現況監視および都市成長に伴う将来変化を予測する強力な解析ツールとしての応用が期待される。

3-3 東京湾の長期水温変動の把握と説明（東京工業大学 沿岸海洋グループ）

(1) 研究実施内容及び成果

(c) 東京湾水温の長期変動原因の解明

本プロジェクトでは、都市生態圏が大気圏・水圏へ及ぼす強制力（フォーシング）すなわち水・エネルギーフラックスを物理的に解明し、大気圏・水圏統合型モデルのフォーシングをモデル化することを目指している。特に、沿岸海洋グループでは、大気圏、陸水圏が沿岸域へ及ぼす影響として、沿岸域の長期的な熱環境の変化に着目し、沿岸域の熱フォーシングの実態解明によって統合型モデルのベースを築くことを目的としている。具体的には、東京湾を中心とした、首都圏水域の長期的な熱環境構造、特に熱フォーシングの変化を明らかにするために、i) 東京湾周辺水域の長期的な水温変動特性の解明、ii) 東京湾への外海水進入挙動と水温環境への影響解析を行った。

c-1 東京湾周辺水域の長期的な熱収支変動の解明

ヒートアイランドに見られる都市の気温変化等と比べ、都市水域の長期的な変動特性はこれまでその性質が十分に把握されていなかった。そこで本グループでは、まず、複数の環境データを統合することで、流入する河川も含め東京湾周辺水域の長期的（過去30年）な水温変化の特徴を把握することを試みた。その結果、①東京湾及びその周辺水域では冬季を中心に水温上昇が顕著であること、②初夏（6月）には逆に水温低下の傾向があることを明らかにした（図3.3.1参照）。前者については、流入河川（特に荒川）及び多摩川河口沖～横須賀沖の東京湾西岸海域で顕著な水温上昇が確認され、このうち流入河川については下水道水の影響が水文グループによって明らかにされている（水文グループ参照）。一方、海域については、i)水温上昇とともに塩分上昇が生じており、水温上昇が湾口側で大きいこと（図3.3.2）、ii)後述するように多摩川河口沖～横須賀沖は外海水進入が熱環境に大きな影響を与えていることから、東京湾の水温上昇は外海水影響が主体と考えられる。近年、Yanagi & Guo(1990)、岡田ら（2006）が、東京湾への淡水流入量の増加（流域外から東京湾

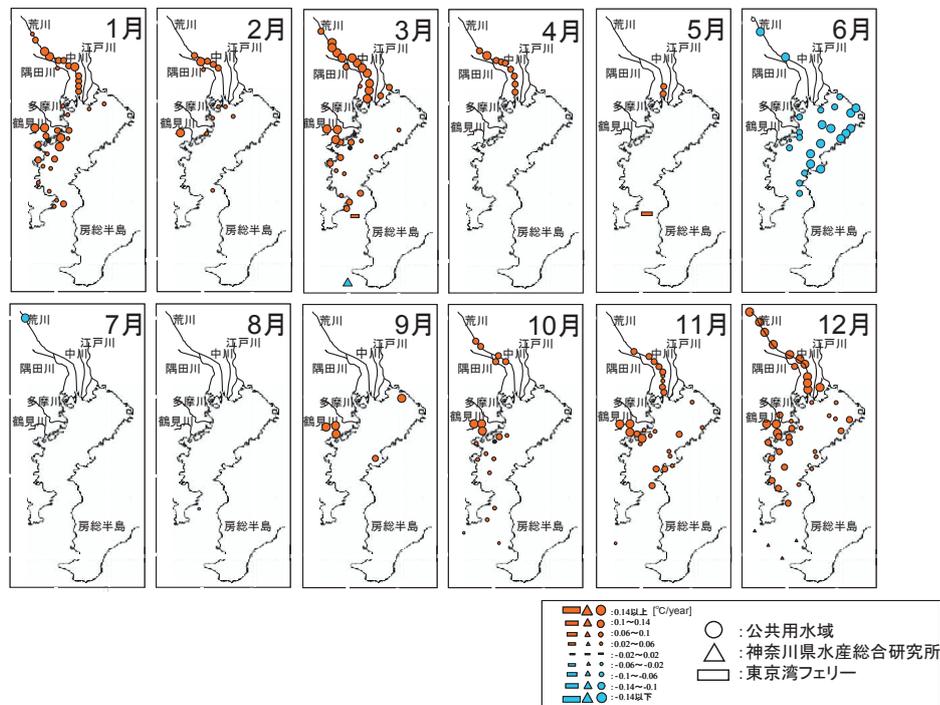


図 3.3.1 東京湾周辺水域の長期水温変動特性（八木ら，2004）

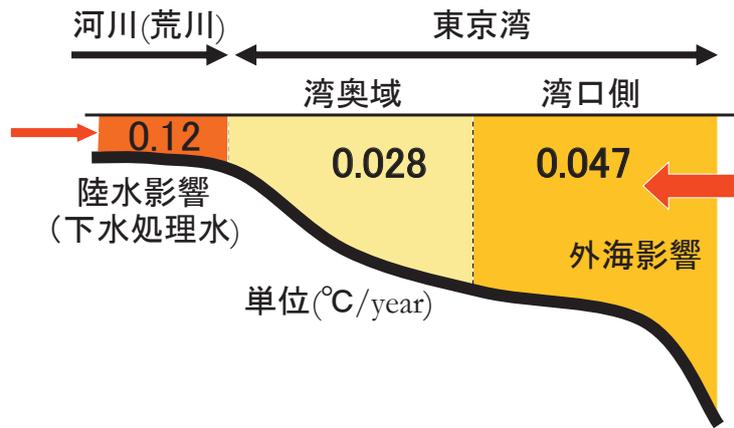


図 3.3.2 東京湾周辺水域の1月の水温上昇率の比較（八木ら，2004）

流域への導水）と東京湾の密度流循環（エスチュアリー循環）の強化を指摘しているが、今回明らかとした冬季の水温上昇は、このような密度循環流の強化が外海水（暖水）の東京湾への引き込みを強化し、結果として水温上昇を引き起こしたものと考えられる。なお、夏季には外海水温が相対的に低いため、エスチュアリー循環の強化は水温低下を引き起こし、これが6月の長期的な水温低下につながっている。

八木 宏・石田大暁・山口 肇・木内豪・樋田史郎・石井光廣：東京湾及び周辺水域の長期水温変動特性，海岸工学論文集，Vol.51,pp.1236-1240,2004.

c-2 東京湾への外海水進入挙動と水温環境

水温変動解析によって長期的な水温上昇が確認された東京湾多摩川沖海域において、流動構造とそれが水環境（熱環境構造を含む）に与える影響を把握するための現地調査・数値実験が行われた（八木ら，2007）。その結果，流動構造には内湾流動のベースとなる密度流循環（エスチュアリー循環）に加え海上風が大きな役割を果たしており，冬季には卓越する季節風（北風）によって表層では湾口向き，中層～下層には湾奥向きの流れが発達（図 3.3.3），これが外海水の内湾域への進入を強化すること（図 3.3.4），北風連吹期間中に短期間だが強い南風（春一番等）が作用することによって，北風によって進入した外海水が湾口側へ後退し，同時に東京湾西岸域に沿岸湧昇を引き起こすことが確認された（図 3.3.4）。東京湾の熱環境はこのような流動構造に連動して，①冬季の季節風（北風）による外海水進入の強化によって外海からの熱供給（暖水流入）を強化されていること，②海上風変動に対応して東京湾への外海水の進入・後退が変化することで東京湾内の熱環境が大きく変化していることが明らかになり，外海水の東京湾への進入度が熱環境に重要な役割を果たしていることが示された。なお，前述のように，近年東京湾への淡水流入量の増加（流域外から東京湾流域への導水）が東京湾の密度流循環（エスチュアリー循環）を強化していることが指摘されており，長期的に見れば，このような東京湾への淡水供給量変化が外海水進入度を変化させ長期的な水温上昇につながっていることが考えられる。

八木 宏・井瀬 肇・江連伸明・Tanuspong POKAVANICH・灘岡和夫・下司 弘之・古土井 健・有路隆一・古殿太郎・大野 幸正，冬季東京湾羽田沖の流動特性と多摩川河口域への影響について，日本流体力学会年会 2007 講演論文集，2007.

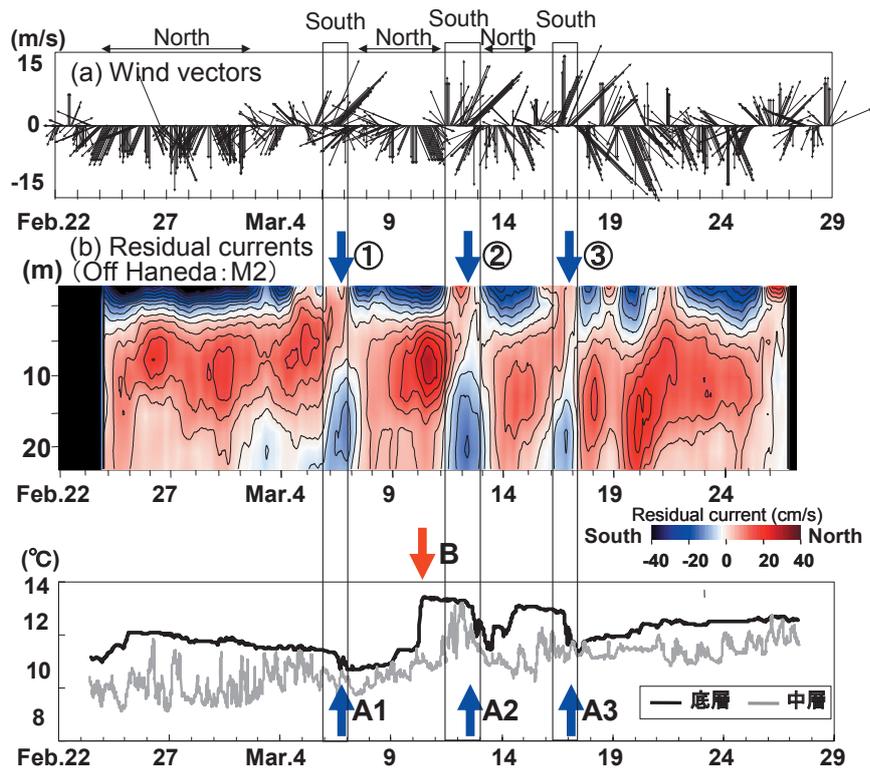


図 3.3.3 東京湾多摩川沖の流動構造・水温変動と海上風の関係 (八木ら, 2007)

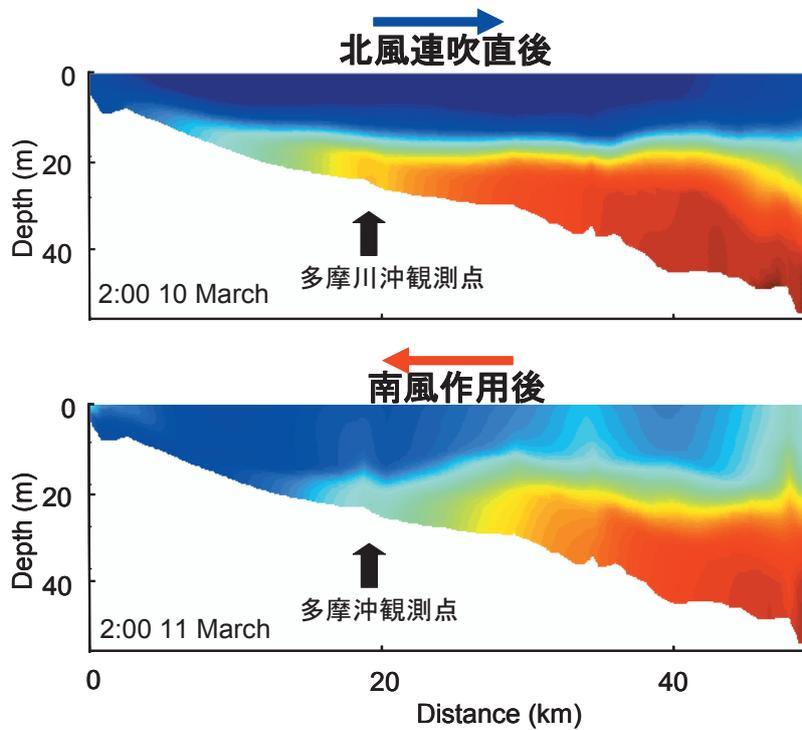


図 3.3.4 海上風による東京湾への外海水進入変化の数値実験結果 (八木ら, 2007)

(2) 研究成果の今後期待される効果

東京湾の流動や水温形成メカニズムが現地観測と数値シミュレーションによって解明されつつある。今後は海洋モデルと気象モデルとのカップリングによって、これらの相互作用を考慮に入れた都市域における大気圏－水圏の環境評価を行っていくことが必要である。またその際に重要となるのが、両者の境界となる海表面温度の情報であるが、これについては、大気グループが行っている東京湾内湾全域にわたる海表面温度の直接測定の結果がよい検証データとなるであろう。

3-4 東京における大気-陸面-海面相互作用の解明 (福島大学 水文グループ)

(1) 研究実施内容及び成果

(a) 河川水・東京湾の長期水温変動の実態把握

大気-陸面-水面の相互的な作用において、水温は支配的な因子のひとつと考えられる。また、都市内を流れる河川や都市に面した閉鎖性水域の水質・生態環境にとっても、水温は基本的かつ支配的な要素である。本研究では、世界的な大都市である東京を貫流する河川と、その流出先である東京湾の水温が都市の影響を受けてどの程度変化しているのかについて、複数の長期観測データを組み合わせて解析し、長期的な水温変化傾向の実態を明らかにすることを試みた。また、これらの水域の水温変化には、取水、給水、水利用から排水へと至る都市の人工系水循環に伴って陸域から水域に排出される熱量の変化も関連していると考えられることから、人工系水循環に関連する給水温度・下水温度等の長期変化の実態を明らかにした。

a-1 河川水・東京湾の最近30年間の水温変動 (八木ほか, 2004; Kinouchi et al., 2007)

1978年～1999年にかけて測定された公共用水域水質データ等複数のデータセットに基づいて東京湾とその流入河川(荒川, 江戸川, 中川, 多摩川, 鶴見川)の長期水温変動の実態を解析した。その結果, 流入河川については, 荒川, 中川, 鶴見川を中心として冬季(12～3月)に顕著な水温上昇傾向が見られた(図3.4.1)。荒川についてはより詳細な分析を行い, 流域からの排熱影響や気象条件との関係について考察した(b-3参照)。東京湾についても, 冬季(12～3月)に湾口に近い神奈川県側海域を中心として水温上昇の傾向が確認された(図3.4.1)。一方, 6月には東京湾湾奥部の千葉県側を中心に低温化の傾向が見られた。冬季の東京湾の水温上昇要因を明らかにするため, 1966～1975年及び1993～2003年のそれぞれ10年間の各月平均海水温の鉛直分布を解析して東京湾全体の貯熱量年間変動パターンを調べた。その結果, 貯熱量は10～3月の期間において近年大きくなっていること, また, 貯熱量の増加(水温上昇)とともに高塩分化の傾向があることから, 外海域からの海水流入による熱供給増加が東京湾の水温上昇の主要な原因の一つであると推察された。ただし, 外海域からの海水流入は, 河川等から東京湾への淡水流出によって増強されることが沿岸海洋Gによる数値シミュレーションによって明らかになったことから(3-3を参照されたい), 東京湾の水温上昇には河川等からの淡水流入の影響も関連していると考えられた。

a-2 上下水道水温・気温の最近40年間の変動 (Kinouchi, 2007)

東京においては, 戦後, 都市の発展と水関連インフラの整備によって取水, 給水, 排水システムが高度化し, 人工系の水循環が都市の水循環において大きなウェイトを占めるようになった。同時に, 東京が消費する家庭部門や業務部門のエネルギー量も1970年から2004年の間に3倍近くに膨れ上がっており, この一部が水域に排出されて熱的な影響を及ぼしてきたと考えられる。これらの実態を明らかにするため, 東京都区部にある13の下水処理場からの放流水温の長期変化を分析した結果, 1965年から2004年の間に年平均で5.5℃, 冬期(12月～3月)は7℃以上, 12月には8℃近い放流水温の上昇が生じていたことが明らかとなった(図3.4.2)。放流される処理水量も増大しているため, 水域への放流熱量は, 1970年代から2004年までの間におよそ6倍に膨れ上がったことがわかった(図3.4.5)。一方, 上水道から都市内の建物に至る間の水温(給水栓温度)のデータを収集分析した結果, 1970年から2004年の間に年平均で2.6℃, 冬期(12月～3月)は1.7℃～3.0℃の上昇が見られた(図3.4.2)。また, 夏期(7月～9月)には1.3℃～6.7℃の上昇であった。2004年冬期の下水温度は上水温度を7.6℃～9.8℃も上回り, 夏期では1.5℃～2.2℃上回った。気温の増加傾向と下水放流水温の増加傾向を比較したところ, 冬期の月平均気温は0.05～0.08℃/年で, 下水放流水温は0.18～0.21℃/年と大きく異なっていた。このように, 下水放流水温の上昇

量は上水や気温に比べて非常に大きく、エネルギー多消費型の大都市が水域に及ぼす象徴的な現象が本研究によって明らかにされた。

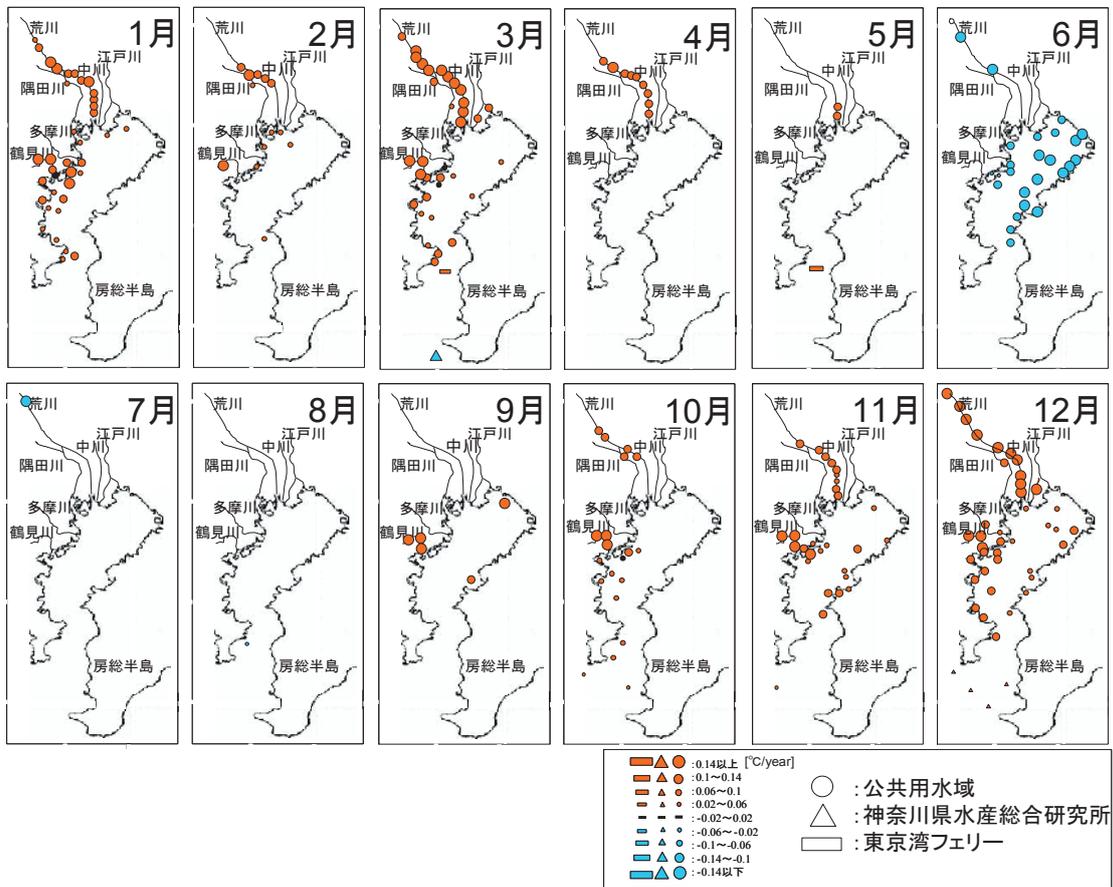


図 3.4.1 東京湾及び周辺河川の長期的な水温変化率

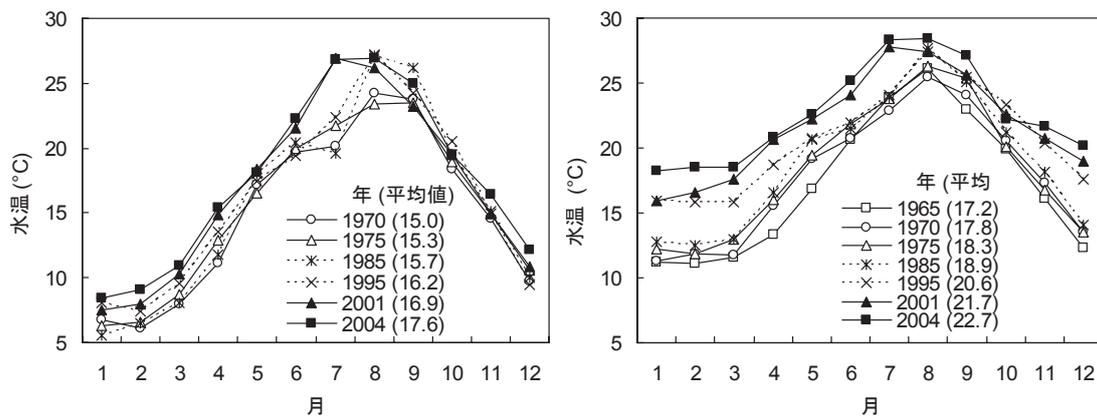


図 3.4.2 月別給水温度 (左) と月別下水放流水温度 (右) の長期変化

(b) 都市下水温・河川水温の長期変動原因の解明

(a) で示したように、都市の影響を多分に受けると考えられる上水道、下水道、都市河川、東京湾の水温上昇傾向が明らかとなった。下水温度には給水温度、都市の消費エネルギー量、地中温度などが大きく影響することが想像されるが、どの要因がどの程度影響しているのかは不明であることから、これらの因果関係についてモデリングと実態観測を組み合わせて検討を行った。また、大気―陸面（都市）―水域の相互作用の全体像を把握する上でも、また、水域の生態環境や都市環境を保全する上でも、河川や東京湾の水温がどのような要因により形成されるのかを解明することが重要であることから、ここでは都市河川の水温の長期変動原因や水温形成要因について検討した。

b-1 人工排熱と下水道水温変動の因果関係と予測 (Kinouchi, 2007)

都市における水とエネルギーの消費・排出量や気温・地中温度などの環境状態を入力条件として、a-2 で述べた下水放流水温の長期変動を推定する熱収支モデルを提案し、東京都部下水処理場からの放流水温の長期上昇傾向の再現性や要因分析を行った。このモデルにより計算される 1970 年と 2004 年の下水放流水温計算値と実測値は近い値を示しており、このモデルの有用性が確認された (図 3.4.3)。

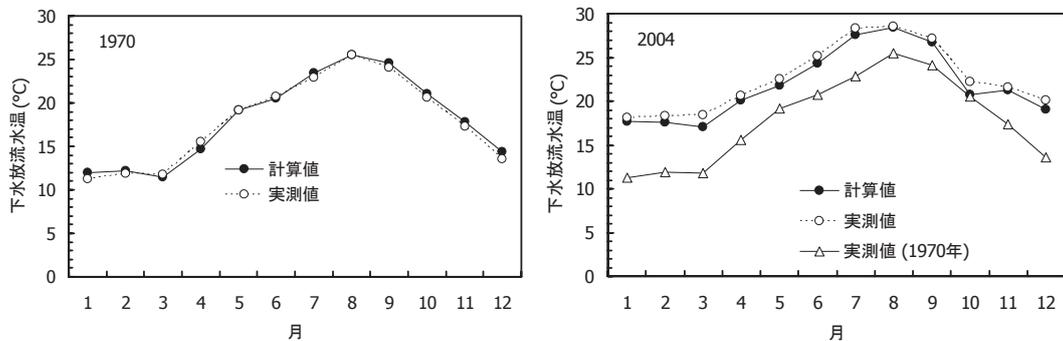
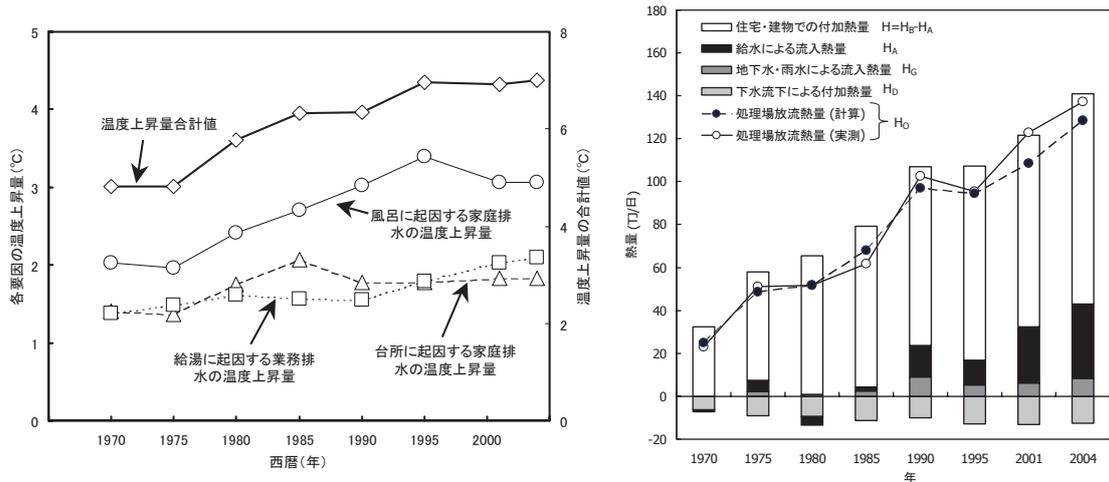


図 3.4.3 都市から水域への熱輸送モデルの適用結果 (放流水温)

このモデルを利用して、下水放流水温の長期変動がどのような原因に起因するのか分析した。図 3.4.4 には 1970 年から 2004 年までの代表年における都市建物からの排水の温度上昇量 (排水温度から給水温度を差し引いた値、年平均値) とその要因を示す。なお、各要因の和が全体の温度上昇量となる。風呂に起因する家庭排水の温度上昇量が全体の温度上昇の主たる要因であることと、1995 年までは上昇するがそれ以降は横ばい傾向であることがわかった。また、業務部門の給湯に起因する温度上昇量と家庭部門の台所に起因する温度上昇量は同等であるが、近年は業務部門の上昇量が増加傾向にあることが推定された。図 3.4.5 は 1970 年の年平均気温を基準として、給水から処理場放流に至るまでの各過程における熱量を比較したもので、住宅・建物で付加される熱量が最も多く、近年では給水によって都市に流入する熱量が多くなっていることがわかった。これらの結果、水域への放流熱量が 1970 年代から 2004 年までの間におよそ 6 倍に膨れ上がっていたことが判明した。また、今後、地球温暖化やヒートアイランド現象の進行に伴い気温が上昇した場合を想定して、このモデルを用いた将来の放流水温の予測を行ったところ、気温上昇を若干下回る放流水温上昇になることがわかった。



左：図 3.4.4 家庭部門と業務部門における要因別の排水温度上昇量の計算結果
 右：図 3.4.5 処理場からの年平均放流熱量と各熱量成分の計算結果

b-2 下水道網を通じた水・熱輸送の実態解明 (中山ら, 2007)

b-1 で明らかになった事象をより詳細に検証するため、都区部 13 カ所の下水処理場における測定ネットワークを構築して下水処理水量と処理場流入水温、放流水温のデータ蓄積を図るとともに、上水データや水文・気象データも収集利用しながら、下水道網を通じた水・エネルギー輸送の実態解明を行い、年間の水・エネルギー輸送の全体像を整理した。

東京都 23 区水収支の分析の結果、土壌から下水道へ浸出する地下水量が下水処理場での処理流量の約 2 割を占めていることが明らかとなった。また、都市活動で排水に付加されて水域に流出する熱量は東京都区部における家庭・業務部門の年間エネルギー消費量の 1 割に相当することが判明した。季節別に見てみると、夏季には水利用に伴って付加された熱が下水道を流下する間に土壌への熱伝導などにより 40% 失われ、残りの 60% が水圏へと放流されることがわかった (図 3.4.6)。すなわち、夏季の人工系水循環において、下水道は都市からの排出熱が大量に水域へ放出されないようにする緩和機能を持っていることが示された。一方、冬季は夏季の 2.3 倍の熱量が水利用により付加されて下水に流入するが、土壌への熱伝導による損失が小さいため、下水道を通してほとんどそのまま水圏へと排出されることがわかった (図 3.4.7)。よって、これらの熱エネルギーの再利用が水域への影響削減や省エネルギーにもなり、環境保全上効果的であることから、今後、下水熱エネルギーの有効活用に関する技術・施策の進展が必要である。

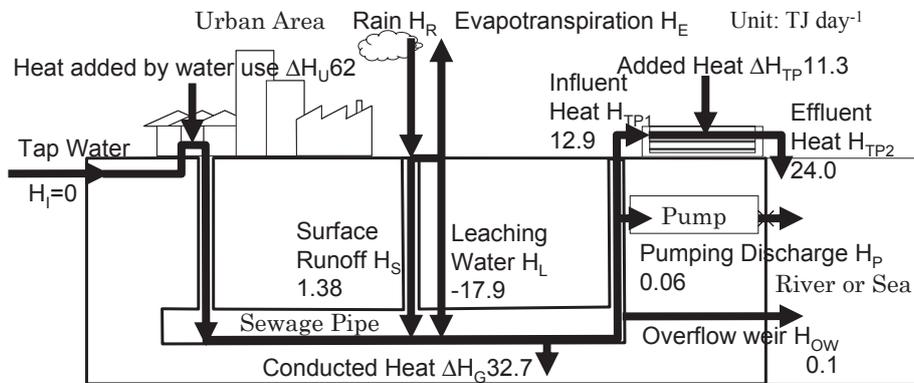


図 3.4.6 都市の夏季熱収支 (東京都 23 区, 2004 年 8 月)

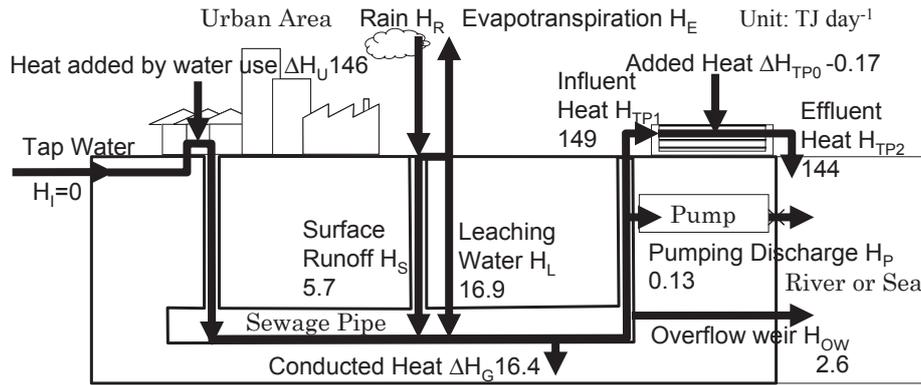


図 3.4.7 都市の冬季熱収支（東京都 23 区，2004 年 2 月）

b-3 都市河川を通じた水・熱輸送の実態解明と予測（Kinouchi et al., 2007；宮本・木内, 2007；木内・賈, 投稿中；Kinouchi & Jia, submitted）

a-1 で述べたように，冬季における河川や沿岸域の顕著な水温上昇が確認された．果たしてこれにはどのような現象が関与しているのかを解明するため，荒川水系（荒川及び新河岸川・隅田川）を対象として流域からの排熱量や気象条件との関係について詳細に分析した．荒川では高度経済成長期以降に急激に都市化が進んだ地域（埼玉県南部から東京都区部の北部）において，特に，河川水温が冬季から春先にかけて大きく上昇しており，最大で過去 20 年間に 4.2℃に相当する上昇量であったが，水温の上昇度合いは測定地点の近傍下水処理場からの放流熱量が多いほど大きい傾向にあった（図 3.4.8）．気温上昇や海域の水温上昇といった他の上昇要因の影響との比較分析を行った結果，下水を通じた都市から河川への排熱が最も支配的な要因であることが明らかとなった．

また，このようなトレンド分析とは別に，荒川水系を対象とした水・熱流動の数値シミュレーションを行って下水放流の有無による河川水温の違いを計算し，下水放流に伴う顕著な河川水温の上昇を確認した．このシミュレーションにより，荒川水系の下流感潮域においては，新河岸川・隅田川への下水排出によって加熱された河川水が岩淵水門を經由して荒川の本川へと流入し，荒川の上下流に輸送されることにより水域の熱汚染を拡大していることがわかった．

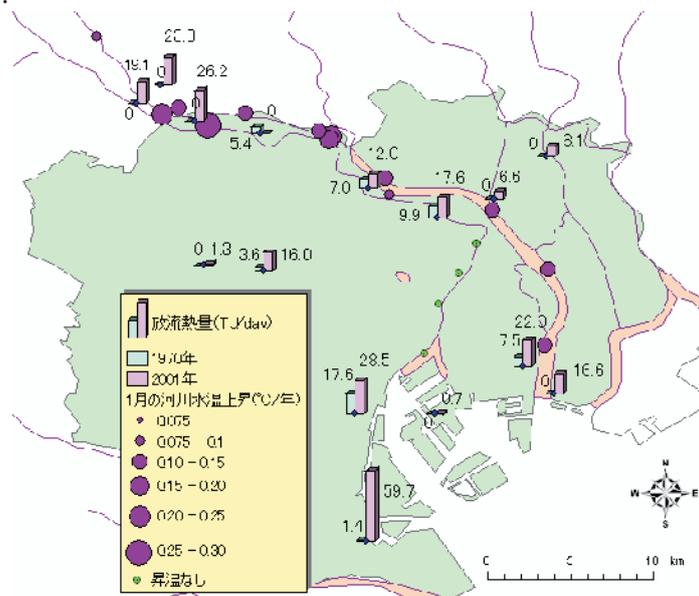


図 3.4.8 河川水温と下水放流熱量の長期変化の対応

水温の長期観測データのない中小都市河川においても荒川等と同様な現象が起きているのかどうかを明らかにするため、都区部を流れる神田川流域をケーススタディエリアとして水温計測を行うとともに、水・エネルギー輸送の分布物理型モデルを構築・適用した。本モデルにより実測の河川流量・水温を良好に再現できることを確認した上で、シミュレーション結果に基づき神田川の河川水温形成要因を分析した。その結果、神田川では処理場からの放流水などの人工系水循環の影響を極めて強く受け、冬期（12月）には10℃～14℃の水温上昇が恒常的に発生していることが判明した（図 3.4.9）。一方、夏期には、日射の他、河床への伝導熱、河川の幾何形状などに依存した放射、街路樹等による日射の遮蔽が水温形成に大きく関与していることや、地下水温・地温とも関係しており、水温形成過程はきわめて複雑であることがわかった。河川は大都市に残された貴重な自然空間であり、ここでは、水が流れることによって景観保全、生物生息域の確保、微気象の緩和といった機能が働いていることから、水温を適正な状態に保つためには、人工系排熱の輸送の制御とともに、周囲の植生・構造物や地圏環境の保全、水量確保にも配慮が必要であると言える。

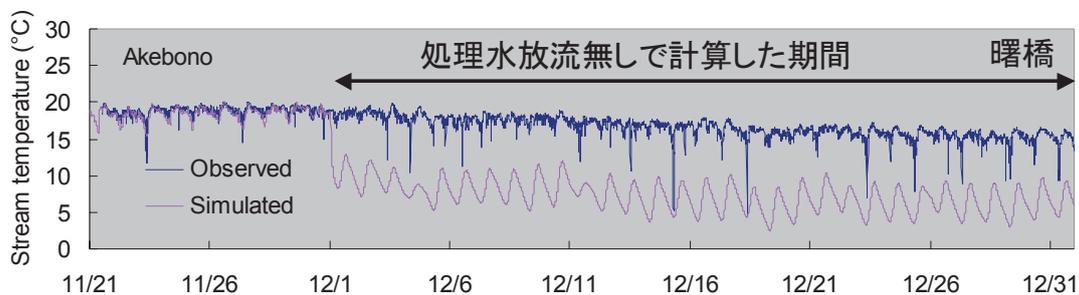


図 3.4.9 都市河川の水・熱循環モデルの適用結果（神田川・曙橋地点の水温）
神田川の河川水温実測値と計算値の比較、曙橋は2箇所ある処理場より下流の地点

参考文献

- T. Kinouchi (2007) : Impact of long-term water and energy consumption in Tokyo on wastewater effluent: implication for thermal degradation of urban streams, *Hydrological Processes*, 21, 1207 - 1216.
- T. Kinouchi, H. Yagi, and M. Miyamoto (2007) : Increase in stream temperature related to anthropogenic heat input from urban wastewater, *Journal of Hydrology*, 335, 78-88
- T. Kinouchi, Y. Jia: Urban stream temperature simulation using a hydrological model with anthropogenic heat transport and urban canopy processes (Submitted).
- 木内豪，賈仰文（投稿中）：流域スケールの水循環・熱輸送モデリングと都市河川流域への適用，*水工学論文集*，Vol.52，2008.2.
- 宮本守，木内豪（2007）：感潮域における都市河川の水・熱輸送特性と下水処理水が河川水温に与える影響，*水文・水資源学会誌*，Vol.20，No.4，291-302.
- 中山有，神田学，木内豪（2007）：下水処理場での水温観測に基づく都市下水道の水・熱輸送に関する研究，*水文・水資源学会誌*，Vol.20，No.1，25-33.
- 八木宏，石田大暁，山口肇，木内豪，樋田史郎，石井光廣（2004）：東京湾及び周辺水域の長期水温変動特性，*海岸工学論文集*第 51 巻，1236-1240.

(2) 研究成果の今後期待される効果

i) 資料解析による都市の成長が沿岸海域の生態系環境に及ぼす影響評価

今回の研究結果は、都市から水圏に廃棄されてしまう膨大な熱量を未利用エネルギーとして有効活用し、ひいては化石燃料の消費削減や水圏環境の改善を進めていく必要があることを示唆する。そのための取り組みが昨年度より国土交通省都市・地域整備局と土木学会環境工学委員会の間で始まった。本研究の成果はこの活動にも活用されており、水分野における資源創出の取り組みに貢献している。

また、都市の成長が河川水温に及ぼす影響を長期間のデータを用いて分析した今回の成果は世界的にも先駆けたものであり、本研究によって、21世紀の温暖化と人口増の下での都市水循環・水環境に関する新たな課題を示すことができたと考える。本研究の英語論文に対しては海外の生態学研究分野も関心を寄せており、また、都市問題をテーマにした海外書籍として、本研究の成果が出版される予定となっている。今後、生態水文学分野としての展開の可能性のある分野と考えられる。

ii) 集水域における水文量計測とその解析

上記1)で述べた活動や同様な目的を持つ取り組みに対して、本研究で得られた詳細なデータが活用されていくと見込まれる。また、熱収支の検討結果からは、都市の地下水資源をより積極的に都市環境(水環境, 熱環境)の改善に利用していく方向性が示唆される。

iii) 都市生態圏から水圏へのフォーシングモデルの構築と適用

過度な都市化は、都市特有の水文・気象現象を招くとともに、水害, 渇水, 水質汚濁, 非常時の水不足などの問題を引き起こす。また、都市の温暖化は一層の深刻さを増している。このような状況にあって、本研究成果は、流域の水・熱循環系を考慮した今後の都市環境改善の方向性を示したものであり、気圏・地圏・水圏の間の相互的な水・熱循環過程を適切な状態に保つことによる良好な都市環境づくりの取り組みへと発展していく可能性を持つものである。

3-5 Building scale~neighborhood scaleにおける都市の熱・水・運動量 forcing の説明 (日本工業大学 建築微気象グループ)

(1) 研究実施内容及び成果

(a) 陸面パラメータの理論体系化

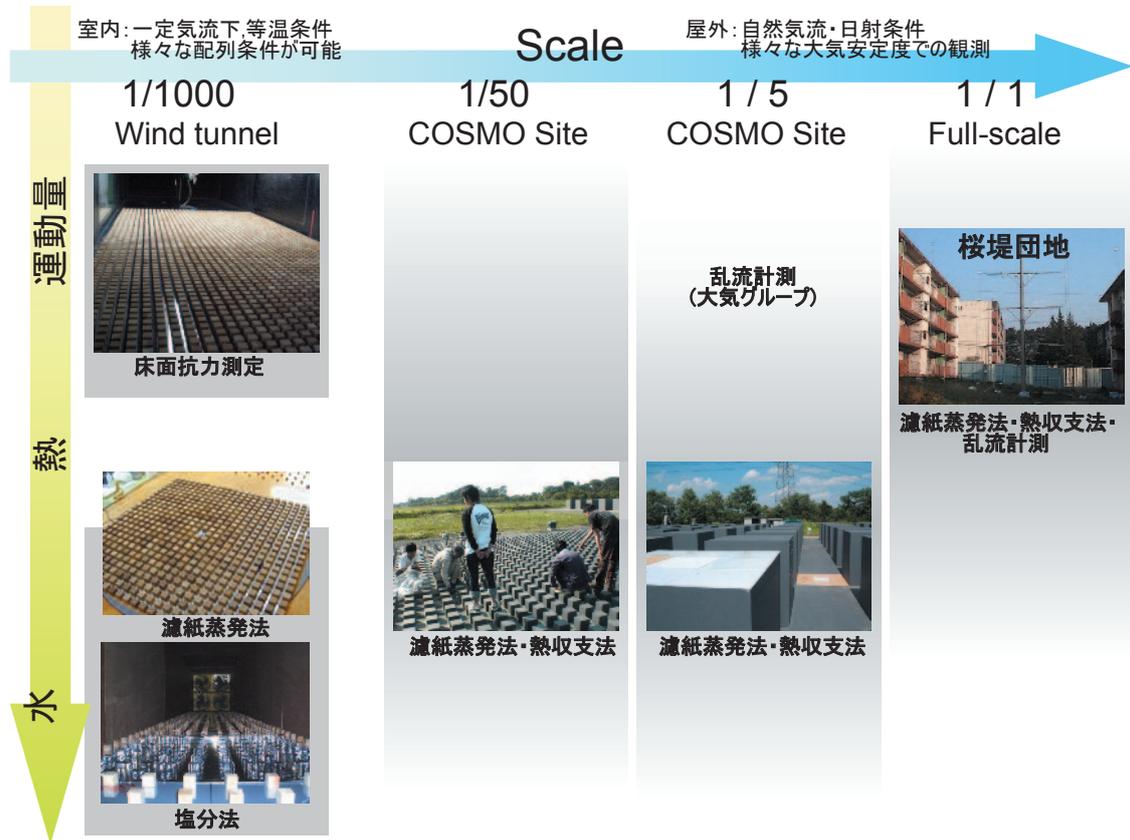


図 3.5.1 建築微気象グループにおける様々な条件下の陸面パラメータ測定の概要

建築微気象グループでは、都市キャノピー表面-大気間の熱・運動量・物質輸送過程の解明を目的として、様々な粗度サイズを対象として運動量粗度（床面抗力係数）、スカラー粗度（バルク係数・対流熱伝達率）の測定を行った。その概要を図 3.5.1 に示す。大気グループがメソ気象への都市域のインパクト評価を主たるターゲットにしているのに対して、建築微気象グループでは人々の生活空間となる都市キャノピー空間（建物群に囲まれた隣棟空間）の熱・風環境に対して都市計画や建築デザインが及ぼす影響を高精度に評価することをターゲットとしている。

そこでまず、一定気流下で安定的にデータが取得できる風洞装置内で 1/1000 スケールの模型群を用いて様々な模型配列パターンの実験を行うことで、建物の配列パターンや建物密度の影響を詳細に検討した。また、建物の屋根、壁、地面など部位毎に都市キャノピー空間内へのスカラーソースの寄与の割合を調べるため、濾紙蒸発法や塩分法など独創的な測定方法を用いている。次いで、1/50 スケールと 1/5 スケールの COSMO サイトでの観測によって、時間変動や風向変動が大きい自然風下でキャノピー面内の放射不均一による温度むらのある状況でのデータ取得を行った。この観測データは 1/1000 スケールの風洞実験結果との比較検証を行っている。最後に、実大スケールとして東京都武蔵野市に位置する桜堤団地における大規模な熱収支観測を行い、同様に風洞実験との比較検証を行っている。

以下に、運動量およびスカラーについての種々の風洞実験及び屋外観測の概要を報告する。

a-1 運動量粗度

直方体粗度群の床面抗力測定 (1/1000 スケール 風洞実験)

都市を吹き抜ける風は建物群周囲に大小様々な3次元的な渦を作り出しており、複雑な様相を示している。都市の風環境についての従来的な関心は局所的なビル風の予測や対策であったが、近年ではヒートアイランド現象の顕在化や自動車排ガスなどの汚染物質拡散の問題とも相まって、夏季の弱風による屋外空間の暑熱環境の悪化や室内通風量の減少などが問題視され、適切な「都市の風通し」を確保した街づくりの必要性が指摘されている。

そこで本研究では、都市の風通しに対する建物群の配列状況の影響を把握することを目的とした風洞実験を行った。この実験の最大の特徴は、建物群の大气への影響を表す床面抗力の直接測定にある。

図 3.5.2 に実験の模式図を示す。風洞装置の床の一部を切り欠き、水槽に浮かべたテストプレートを挿入して、模型群に加わる水平力を歪みセンサで直接測定する、という仕組みである。測定された床面抗力は上空風の運動エネルギーとの比率を表す「抗力係数」に換算される。加えて、抗力を測定したエリア上空の風速分布の測定を行っている。抗力係数と風速分布の測定結果を用いることで、模型群の大气への運動量シンクの能力を表す長さスケールである運動量粗度 z_0 を推定した。その結果を図 3.5.3 に示す。

この結果から、1) 低密条件では整形に比べ千鳥配列、高密条件では千鳥に比べ整形配列の方が z_0 が大きい、2) 平均模型高さ一定の条件では高さ分布が大きいほど z_0 は大きく、その影響は高密条件で顕著となる、3) 模型高さにバラツキがある場合、高層模型の配列条件が z_0 に与える影響が支配的であり、低層模型の配列の影響は小さい、という知見が得られた(萩島他 2007, AIJ 619)。これにより、風通しの良い街づくりを行うためには、1) 地域の平均的な建物高さではなく最高建物高さの影響が大きい、2) 地域内で高さにバラツキがある場合は高層建物の配列を主風向に対して整形(格子状)に並べることが風速低減抑制に効果がある、以上2点を示唆される。

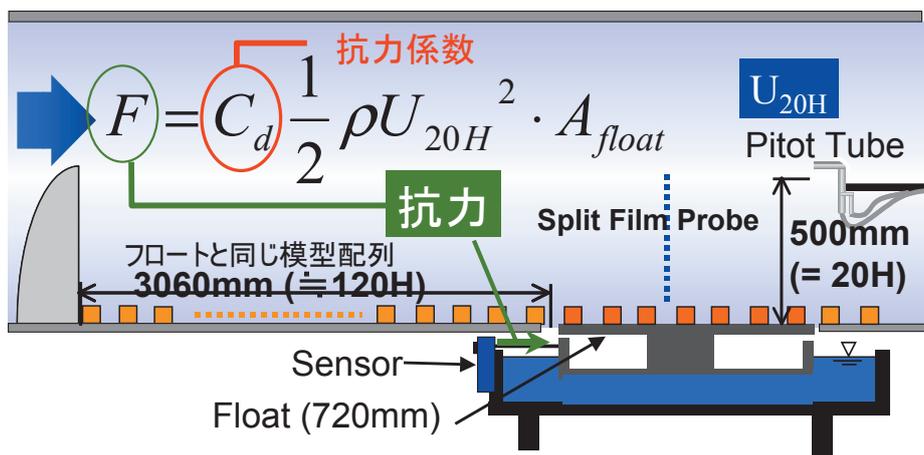


図 3.5.2 床面抗力測定装置の設置状況

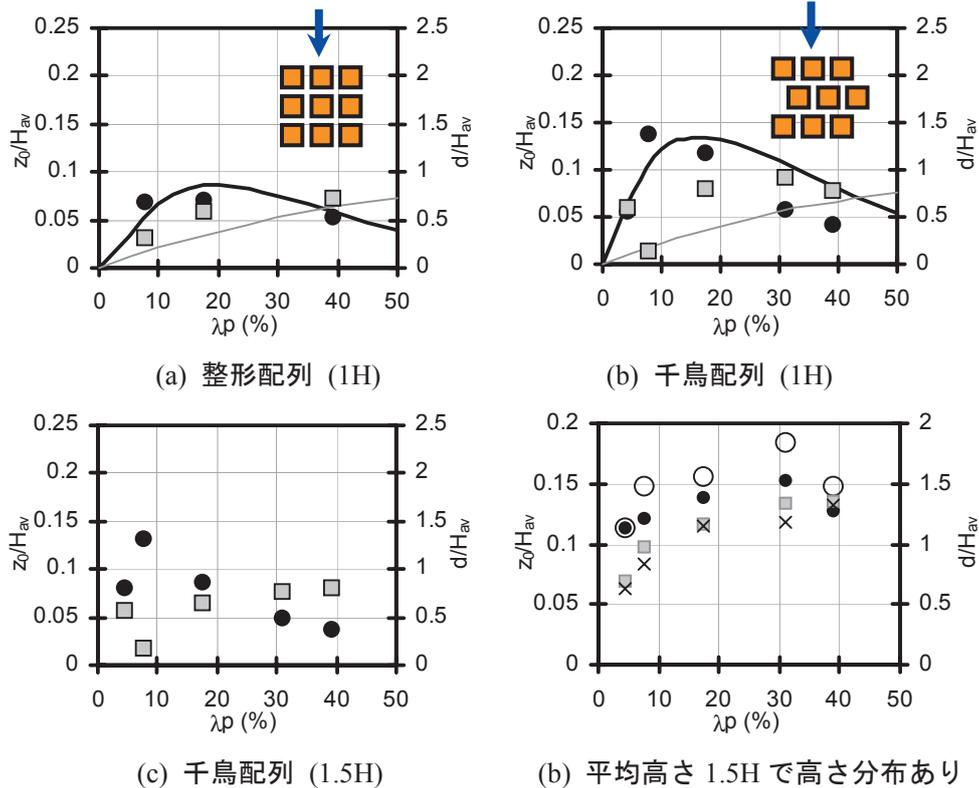


図 3.5.3 粗度群のラフネスパラメータの同定結果

凡例：黒太線と灰色線はそれぞれ Macdonald(1998)に基づく粗度長とゼロ面変位，黒丸と灰色四角は実験による粗度長とゼロ面変位

a-2 スカラー粗度

都市気候の高精度予測において大きな問題となっている都市キャノピー表面とキャノピー大気間の顕熱フラックスの輸送効率に関しては，大気グループがメソ気象モデルへの連成を想定した様々な研究を行っている．これに対して建築微気象グループでは，建物群の配列条件および風向の異なる様々な条件において，都市キャノピーの各面（屋根・壁・地面）の輸送効率がどのような挙動を示すか，という点について詳細な実験を行った．

ここで取り上げた部位別スカラー輸送効率は「バルクスカラー係数」として包括的にデータ整理されており，人間の生活空間である都市キャノピー内の複雑な温度場を高精度に予測するためには欠かせない基礎的なパラメータのデータベースが作成されたことになる．実験に際しては，建築微気象グループの成田が独自に開発した濾紙蒸発法および塩分法を用いている．

濾紙蒸発法を用いた直方体粗度群のバルクスカラー係数測定 (1/1000 スケール 風洞実験)

濾紙蒸発法とは，飽和状態の濾紙を貼付した薄板状の試験体を測定対象面に固定し，環境下に設置する前後の試験体の重量変化から蒸発量及びスカラー輸送効率を得る方法である．スカラーの輸送量を直接測定するという点で，伝熱工学分野において用いられているナフタレン昇華法と類似しているが，有害ガスによる危険性が無い．

この測定法を用いて中立条件の風洞内で様々な配列のキャノピー模型群のバルクスカラー係数の測定を行った (Narita 2007, BLM 122・成田 2005, AIJ 21)．この実験における特に重要な成果は，2次元キャノピー（長い bar が等間隔で流れ方向に並べられた状態）における様々なキャノピー縦横比(H/W)に対するバルクスカラー係数の分布を明らかにした点で

ある (図 3.5.4, 3.5.5). なお, 濾紙蒸発法による結果については, 他研究者によるナフタレン昇華法に基づく実験結果と条件が類似していたため比較を行ったところ, 両者は適切な無次元化を施せば概ね類似の傾向を示した (萩島他 2004, 水水 17・Hagishima et al. 2005, BLM 117).

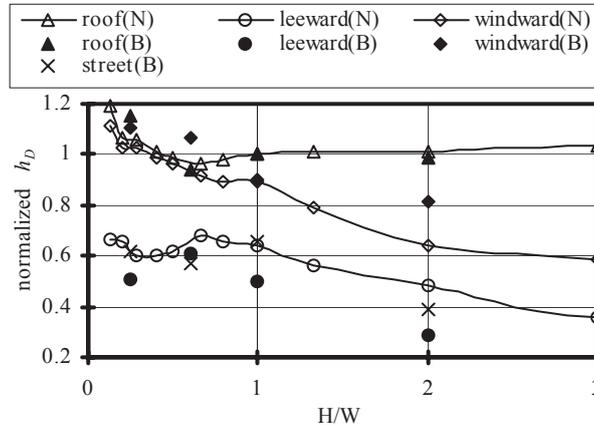


図 3.5.4 キャノピー高さとキャノピー幅の比 (H/W) とバルクスカラー係数の関係
凡例の(N)は Narita (2007), (B)は Barlow et al (2004)に拠る. 物質伝達率は各々の研究者の $H/W=1.0$ の屋根面の値で基準化している.

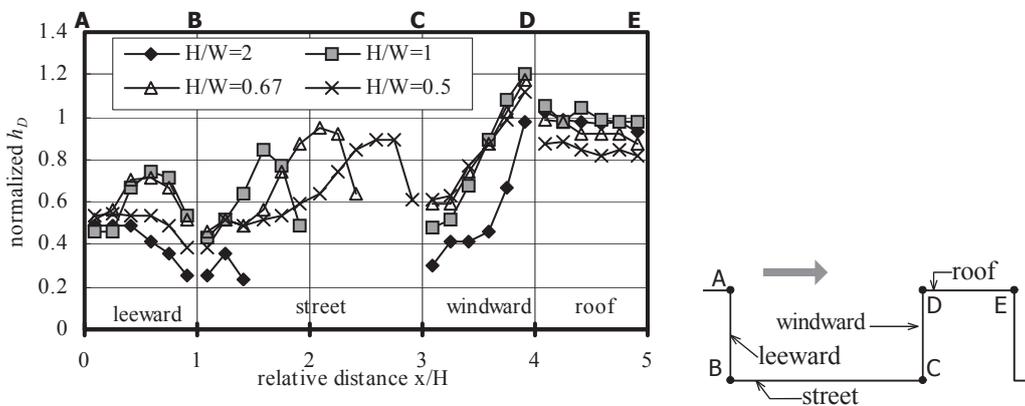


図 3.5.5 2次元キャノピーの面内バルクスカラー係数分布 (Narita 2007)
物質伝達率は $H/W=1.0$ の屋根面平均値で基準化している.

また, 直方体粗度群を用いて高さの不均一性の影響について検討し, 平均模型高さが同じ条件で高さが不均一になるとバルクスカラー係数は減少することを明らかにした (成田他 2007, AIJ 大会報告). この結果を図 3.5.6 に示す. 粗度群の高さが不均一となると運動量粗度が增加するという床面抗力測定の結果とは逆の傾向と言える. 運動量とスカラーでこのような違いが生じた原因としては, 1) 運動量粗度 (床面抗力) は粗度の風圧差・form drag の影響が支配的であるのに対して, スカラー粗度は表面近傍の分子運動 (対流熱輸送) に起因しており輸送メカニズムが本質的に異なる, 2) 運動量粗度が大きくなることで粗度周辺気流が弱められるためスカラー輸送が抑制される, という 2 点が考えられる.

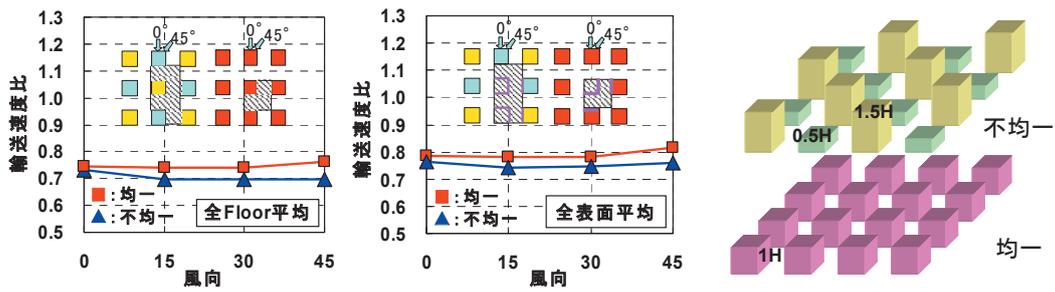


図 3.5.6 均一高さ配列と不均一高さ配列の輸送係数の比較 (左から, 全床面および全表面平均)

塩分法による直方体粗度群の床面バルクスカラー係数の測定 (1/1000 スケール 風洞実験)

塩分法とはこれは風洞に設置した水槽に塩水を満たし, 蒸発量を曝露前後の塩分濃度から求め, エリア平均のバルク係数を求めるという方法であり, 水の重量変化から蒸発量を推定する方法とは異なり覆水による測定誤差が生じないという利点を有する (図 3.5.7). 濾紙蒸発法に比べると広い領域の空間平均値を測定することに適しているため, 今回は床面抗力測定と全く同じ模型配列条件において床面スカラーバルク係数の測定を行っている (末永他 2007, AIJ 大会報告). まだ当初計画していた全配列のデータ取得には至っておらず, 現在も実験は進行中であるが, これまで得られたデータの中で興味深い結果が得られている.

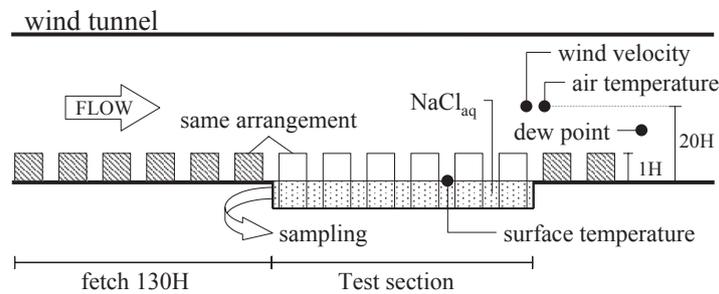


図 3.5.7 塩分法による実験状況

表 3.5.1 塩分法による床面バルクスカラー係数の測定結果

	粗度占有率 λ_p [%]	平均模型高さ 1.5H			
		模型高さ 1H	平均模型高さ 1.5H		
		均一	均一	不均一 (高層模型: 整形配列)	不均一 (高層模型: 千鳥配列)
整形配列	7.7	0.00520	0.00496	0.00461	0.00483
	17.4	0.00493	0.00490	0.00431	0.00438
	30.9	0.00484	0.00371	0.00365	-
千鳥配列	7.7	0.00545	0.00564	0.00493	0.00519
	17.4	0.00572	0.00513	0.00481	0.00438
	30.9	0.00496	0.00382	0.00412	-

測定結果を表 3.5.1 に示す。注目すべき点は、平均模型高さが同じで、高さのバラツキがある場合と無い場合の違いである。濾紙蒸発法を用いた前述の結果（粗度占有率 $\lambda_p = 25\%$ ）では、高さが不均一な方が高さ一定条件に比べて床面バルクスカラー係数は小さくなっていった。それに対して塩分法は大半のケースで同様の結果が見られたが、千鳥配列で高密度の 30.9%の条件では高さ不均一の方が床面バルクスカラー係数が大きくなるという逆の傾向を示している。

この結果の違いについては、模型周辺気流の特性の違いなど引き続き検討を行っていく予定である。

COSMO サイトの立方体キャノピーにおける観測 (1/5, 1/50 スケール 屋外)

屋外の COSMO サイトにおいて 1/50 と 1/5 の 2 種類のスケールモデルを用い、濾紙蒸発法によるスカラー輸送効率と熱収支法による熱輸送効率の同時測定を行った。

この測定により、立方体粗度の屋上面のバルク係数は熱輸送とスカラー輸送のアナロジーがほぼ成立していることが明らかとなった（図 3.5.8a）。また、風洞実験の結果と 1/50 スケールモデル野外実験の結果を比較し、鉛直壁面のバルク係数に関して両者でほぼ同様の風向依存性が得られていることが確認された（図 3.5.8b）（成田他 2007, AIJ 大会報告）。

この結果から、様々な模型配列条件でのデータ取得が容易な風洞実験により蓄積されたバルク係数のデータが、日射による温度むらや乱れの大きな自然風下の大スケールの都市群の熱輸送現象予測に適用できる可能性が示唆される。

なお、残念ながら 1/5 スケールモデルのキャノピー内熱伝達率分布については、測定精度の限界からか解析に耐えうる十分な結果を得ることができなかった。この点については、引き続き測定方法の再検討を行っているところである。

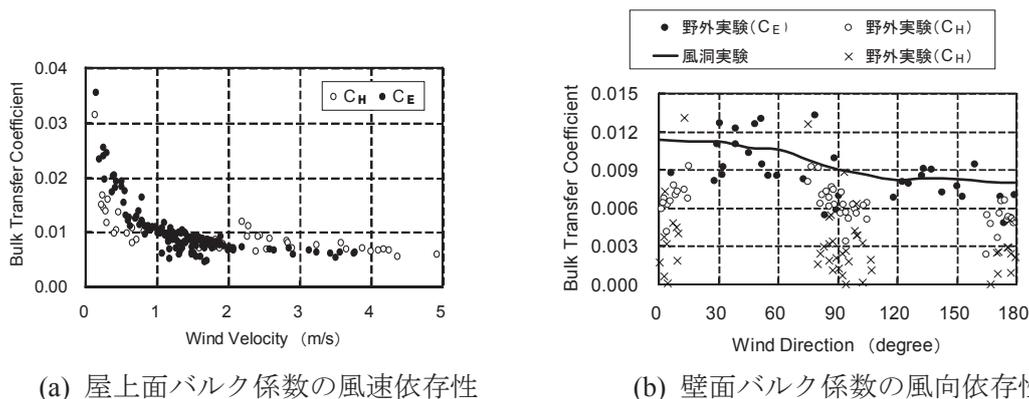
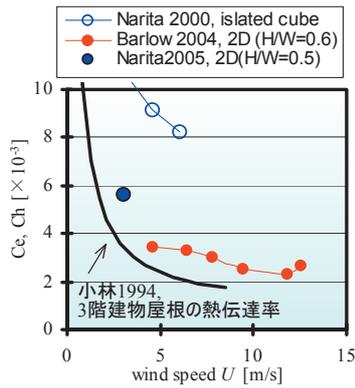


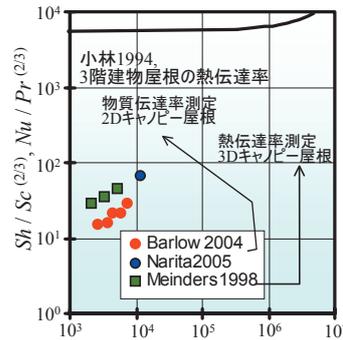
図 3.5.8 1/1000 スケール風洞実験, 1/50 スケール屋外実験によるバルクスカラー係数の比較 (CH: バルク熱輸送係数, CE: バルク水蒸気輸送係数)

室内実験と実大建物のバルクスカラー係数の比較

2次元, 3次元キャノピー表面のスカラーバルク係数について風洞模型実験から屋外での実大建物を対象とした観測まで様々な既往観測データの比較検討を行った（図 3.5.9）。その結果、実大建物と風洞装置内の縮小模型のバルク係数は、模型長さを代表長さとした無次元数（Re 数, Nu 数, Sh 数）によっては統一的に表現できない事を明らかにした。この課題に対しては、大気グループによって運動量粗度と熱粗度の比を粗度レイノルズ数の関数で一意に表現する、という解決法が提示されている。また、都市キャノピー内のバルク係数分布に関する風洞実験結果が実大スケールに外挿できるか否かについて、観測データに基づく検証の必要性が明らかとなった。（萩島他 2004, 水水 17・Hagishima et al. 2005, BLM 117）



(a) 風速とバルク係数の関係



(b) Sc 数, Nu 数と Re 数の関係

図 3.5.9 風洞装置内模型と実大建物のスカラー交換係数の比較
(プロットは風洞実験, 実線は実大建物観測)

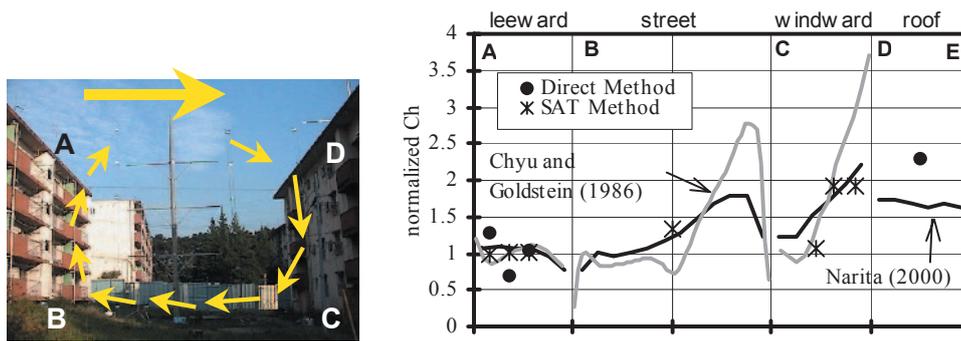
集合住宅団地における熱収支観測 (Full スケール 屋外)

気象グループの菅原氏と建築微気象グループの共同で、実大スケールの 2 次元キャンノピーとして立て替え予定の集合住宅団地（東京都武蔵野市の桜堤団地）において、表面对流熱伝達特性に関する観測を行った（萩島他 2007 AIJ 投稿中）。測定内容は熱収支各成分、濾紙蒸発法に基づく建物表面伝達率分布、キャンノピー内外風速、空気温度分布、キャンノピー表面温度及び熱流などである。

建築微気象グループにおける本実測の主たるテーマは、風洞内で観測された 1/1000 スケールの模型群表面のバルクスカラー係数分布が実際の建物群のそれと同様の傾向を示すかどうかを明らかにすることである。ここで比較対象とする風洞実験は Chyu and Goldstein (1986) と Narita (2007) の 2 つである（図 3.5.10b に実線でその結果を示す）。前者はナフタレン昇華法を用いておりスカラーのソース（ナフタレン塗布面）はキャンノピー全体である。これに対し後者は、濾紙蒸発法を用いておりスカラーのソース（濡れた濾紙面）は模型高さの 1/6 の小サイズとなっている。このスカラーのソースエリアの違いにより、両者は異なる傾向を示している（スカラーソースが全面の場合の方が、面内分布は激しく変化する）。

実際の都市では、日向と日影が混在するため熱ソースの偏在パターンも様々ではあるが、本観測サイトでは、概ね北側壁面が高温、南側壁面が低温の温度分布が出現していた。このような条件下で得られたバルクスカラー係数の壁面分布は、Narita (2007) よりもむしろ Chyu and Goldstein (1986) と類似した特性を示していると判断されるが、データのバラツキから考えると引き続き同種の観測データによる検証が必要であろう。一方、壁面に設置された高温の小試験体によるバルクスカラー係数分布は、概ね Narita (2007) のそれと類似の傾向を示した。

以上の結果及び前述の 1/50 スケールおよび 1/5 スケールの実験結果を併せて考察すると、スカラーソースの偏在パターンが類似していれば、縮小模型を用いた風洞実験は実大の都市スケールのバルクスカラー係数分布を再現できる可能性が高い。しかし現実には、日射により作り出される都市の複雑な温度むらを実験で再現することには限界がある。メソスケールの気象予測にはバルクスカラー係数の面内分布は大きな影響を及ぼさないことから、今後は実験データの蓄積のみならず、キャンノピー空間の予測精度に及ぼすバルクスカラー係数の感度解析など、多方面の検討が必要であろう。



(a) 観測場所の写真 (矢印は主風向の流れ場) (b) バルク係数の面内分布

図 3.5.10 桜堤団地において観測されたバルク係数の特徴

Chyu and Goldstein (1986), Narita (2007)は風洞内の2次元キャノピーに対する物質伝達率, “SAT method”は建物壁面に固定された加熱板(SAT計)の対流熱伝達率, “direct method”は建物壁面の対流熱伝達率の測定結果に基づく. いずれも, leeward wallの平均値で無次元化している.

a-3 オアシス効果

都市に散在する小スケール緑地のオアシス効果に関する屋外観測

大気グループによる久が原の住宅街における熱収支観測によって, 都市に散在するサイズの小さな植生からの単位面積当たり蒸発量が森林など homogeneous な植生からのそれに比べかなり大きい, という可能性が明らかとなった.

そこで建築微気象グループでは, ポット植栽を用いて都市の単独樹木の蒸発量についての屋外実験を行った. 観測場所は COSMO サイトの 50×100m のコンクリート床上で, サザンカの鉢植え 203 個を用いて 3 種類の群落密度のグループを作り (図 3.5.11), 各群落の日積算蒸散量の比較を行った (図 3.5.12). 単独樹木は高密度群落中央部の樹木に比べ 1 本当たり蒸散量で約 1.6 倍, 上空からの植生の投影面積当たりでは 2.7 倍の大きな値となっている.

この結果を都市気候モデリングのための知見として翻訳するならば, 都市域の植生の蒸発フラックス評価のためには, 森林などの homogeneous な植生のモデリングを単純に援用するのではなく, スケール効果を考慮したモデルとする事が必要である, ということになる (Hagishima et al. 2007, HP 21・成田, 2006 AIJ 608).

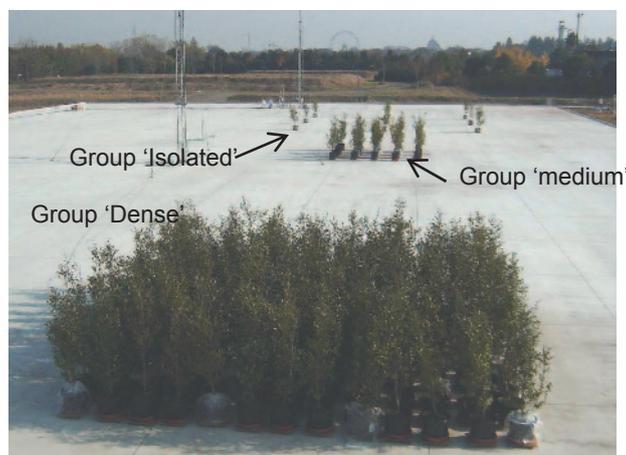


図 3.5.11 ポット植栽を用いたオアシス効果に関する屋外実験の様子

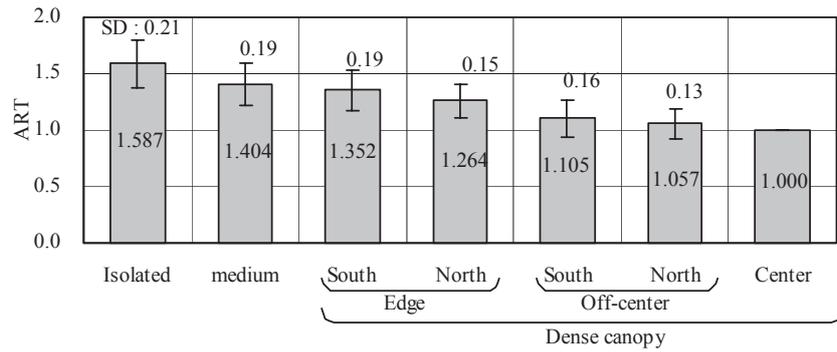


図 3.5.12 日積算蒸散量 (植栽密度の高い dense canopy 中央部の蒸散量で無次元化)

(b) 熱収支の理論体系化

b-2 陸面モデルの構築と検証 街路放射モデル・多層都市キャノピーモデル の構築および web 公開

九州大学でこれまで開発してきた幾つかのソースコードをベースとして、建物群で構成された都市の放射バランスおよび熱収支について、3次元街路の放射モデルおよび多層都市キャノピーモデル AUSSSM (図 3.5.13) の構築を行った。なお街路放射モデルについては、都市形状パラメータ (粗度面積率 λ_p , 建物高さ分布 H/W) と壁・床・地面の各日射反射率がアルベドに及ぼす影響についての感度解析が可能なコンピューターソフトとしてパッケージ化を行い、web 上にて公開している (Chimklai et al. 2004, BE 39) (図 3.5.14a)。

多層都市キャノピーモデル AUSSSM についても、プログラムコードを様々な都市条件・気象条件に対応出来るように汎用化を施した。また、AUSSSM の入出力部分を GUI 機能によって容易に設定できるように改良した Windows 用パッケージを Fortran のソースコードとともに web 上にて公開している (Tanimoto et al. 2004, EB 36) (図 3.5.14b)。この2つのソフトウェアは web 上でのダウンロード件数が累積で 300 件を超えている。今後は、本プロジェクトで得られた陸面パラメータについての知見を組み込み、定期的にソルバーのバージョンアップを続けていく予定である。

尚、様々な条件で安定的に計算が実行できるよう、都市条件や気象要素を制御因子として AUSSSM を用いた感度解析を行い、夏季晴天日における都市域の熱収支構造や高温化要因に及ぼす気象条件の影響について体系的な定量比較資料のデータベース作成を行っている。(萩島他 2006, AIJ 601)

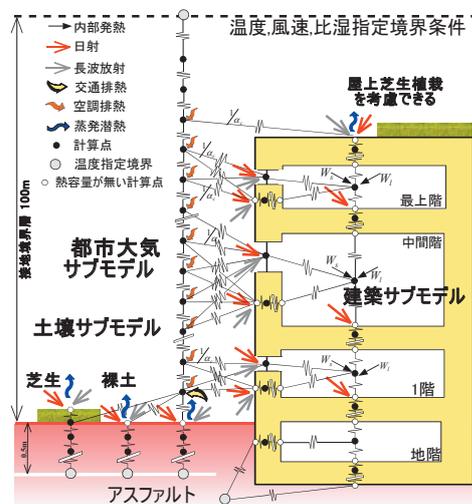


図 3.5.13 多層キャノピーモデル AUSSSM の模式図



(a) Albedo Calculator (街路放射モデル) (b) AUSSSM Tool (多層都市キャノピーモデル)

図 3.5.14 web 上で公開中のソフトウェア

(d) 人間活動の影響とモデル化

d-2 人工排熱の一般的算定手法に関する可能性

大気グループによって、メッシュ毎の建物床面積に原単位を乗じる方法で東京の現在の人工排熱マップおよび人工水蒸気発生マップが作成された。これに対して建築微気象グループでは、今後のライフスタイルや人口動態の変化、東京以外の様々な地域に対応できる普遍的な算定手法を目指して、原単位法とは異なるアプローチによるモデルの提案を行った。このモデルは、都市における多様な人間活動のスケジュール予測モデルをベースとしたものである。モデル全体のアルゴリズムを図 3.5.15 に示す。

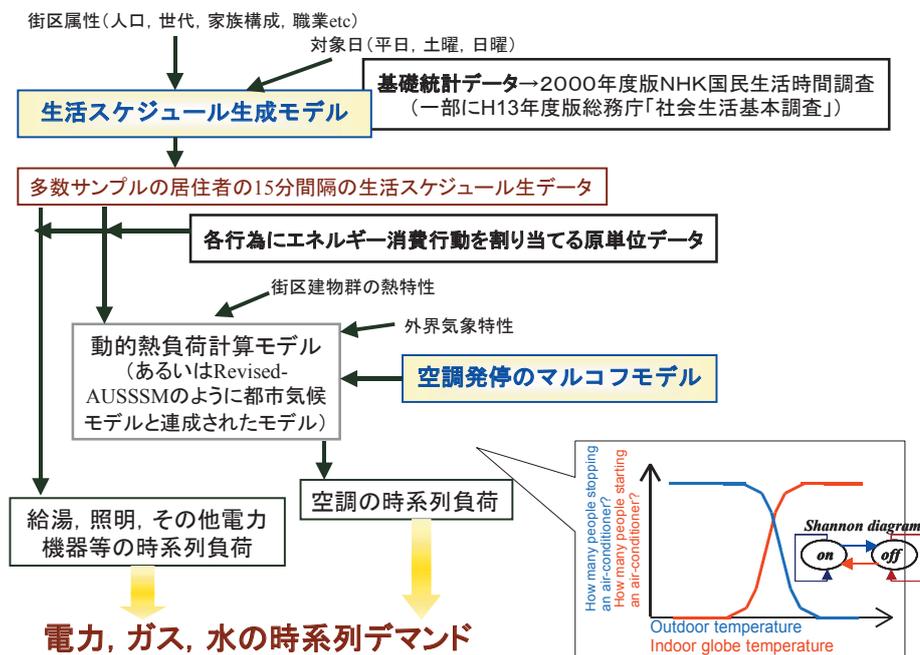


図 3.5.15 都市の人工排熱発生量・水使用量の時変動予測モデルのフロー

モデルの核となるのは生活スケジュール生成モデルである。このモデルは、公刊されている統計データ (NHK 国民生活調査) を入力条件として、都市居住者個々の生活行為スケジュールを generate & kill 法で確率的に生成するアルゴリズムを有している。このモデルで生成された多数エージェントのデータは、都市域の人間の統計特性 (平均値と分散) を精

度良く再現できる。

ここで得られたエージェントベースの生活スケジュールデータに対して、各行為毎のエネルギー消費、水消費の原単位を貼り付ける事で、職業・年齢などの属性別、曜日別に電力、ガス、水の時系列デマンドおよび人工排熱量が予測できる、というものである。

これにより時間分解能の高い都市気候モデルの境界条件として付与する人工排熱及び水使用量の予測モデル構築の足掛かりを得た。モデルの精度検証のため、4つの観測データとモデルによる計算結果の比較を行ったところ、モデルの予測値は観測値は良好な一致をみた。一例として図 3.5.16 に産総研による観測データとの比較結果を示す。

今後は本モデルを利用して、様々な将来シナリオ（例えば、省エネ機器の普及や少子高齢化の進展など）に対応したシミュレーションへの応用が期待される。

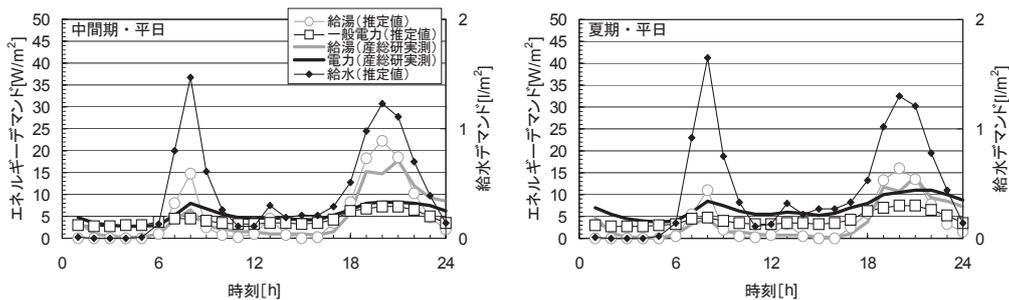


図 3.5.16 モデルによる予測データと産総研データの時系列比較（中間期，夏期／平日）

(e) 大気-微気象相互作用（都市デザインへの提言）

都市の植生や保水面からの蒸発は、都市の暑熱環境緩和に大きな役割を果たす事が広く知られており、近年ではヒートアイランド現象緩和を目的として建物緑化や保水性舗装の導入が進められている。建築微気象グループでは、それらの熱収支構造や周辺微気象についての観測や解析を行った。

壁面緑化の都市気候への影響

建物に試験施工された壁面緑化システムを対象として、約半年間熱収支各成分の観測を行った（図 3.5.17）。なお、Leading edge effect を受ける小面積の植生からの蒸発量測定のために、植生を模した「植生 SAT 計」とよばれる装置を自作し、植生群の対流熱伝達率を測定する方法を提案している。この観測結果から日射反射率、葉群層熱コンダクタンス、蒸発効率の特性を明らかにした（萩島他 2005, AIJ 技報 22）。なお、観測で得られた蒸発効率を多層都市キャノピーモデル AUSSSM に組み込み、壁面緑化システムの都市気温低減効果を調べたところ、窓以外の壁面全てを緑化した場合、標準的な東京のオフィスビル街では気温は日最高値で約 0.3℃低下する、という結果を得ている。



図 3.5.17 壁面緑化システムの測定状況

大規模屋上緑化建物の都市気候への影響

大規模な 13 層の階段状屋上庭園（緑化斜面）を有する建物（図 3.5.18）を対象として、緑化斜面の周辺微気象の観測を行った。その結果、夜間上空が 3m/s 以下の弱風条件では約 45～65%の割合で頻繁に低層部で下降気流が発生していることが明らかとなった。また、こ

の下降気流は乱れが小さく、継続時間は20~80分程度で間欠的に発生する。また、下降気流の流速が大きくなるほど低層部の気温が高層部に比べ低く、下降気流の最大流速は約0.5m/s、斜面上下の最大温度差は約1℃である(萩島他 2004, AIJ 577)。

この下降気流はその性質から、谷間や盆地で静穏な晴れた夜間に発生する冷たい下降気流「山谷風」と類似のメカニズムで発生したと考えられる(図 3.5.19)。即ち、まず夜間の放射冷却によって谷を構成する植物群落の上面が冷やされ、それに接して低温の空気塊が生成される。この低温空気塊は周辺空気より密度が大きいため重力による下向きの力を受けるが、当初は重力が植物群落の凹凸による摩擦力より小さいため、空気塊の移動は生じない。その後、徐々に低温空気塊が成長し、重力が斜面摩擦力を上回ると冷気流となって斜面を駆け下る。以上の空気塊の生成と下降というサイクルが夜間に繰り返されるため、冷気流の発生は間欠的となるのである。



図 3.5.18 大規模緑化建物の概観写真

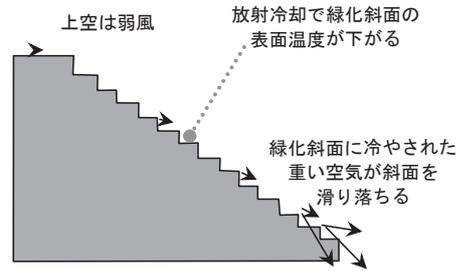


図 3.5.19 大規模緑化建物で観測された冷気流の模式図

保水性舗装の蒸発特性

従来の舗装材より多くの空隙を持たせた舗装材に粘土とセメントで構成された保水材を充填した保水性舗装を対象にした熱収支観測を行った(図 3.5.20)。なお、直接測定が困難な顕熱フラックスと潜熱フラックスを分離するために、濾紙蒸発法によるスカラー輸送効率の測定を行っている。この結果、保水性舗装に毎分6lで1時間の散水を行った場合、保水持続性はおおむね2時間程度となった(図 3.5.21)(成田他 2004, AIJ 技報 20)。

この実験で得られたパラメータ(蒸発効率)を都市キャノピーモデルに組み込むことで、保水性舗装のヒートアイランド現象緩和効果を定量的に評価することが可能となった。

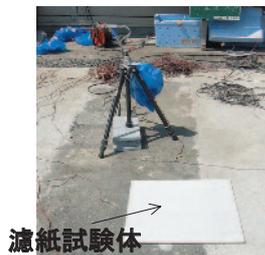


図 3.5.20 実験風景

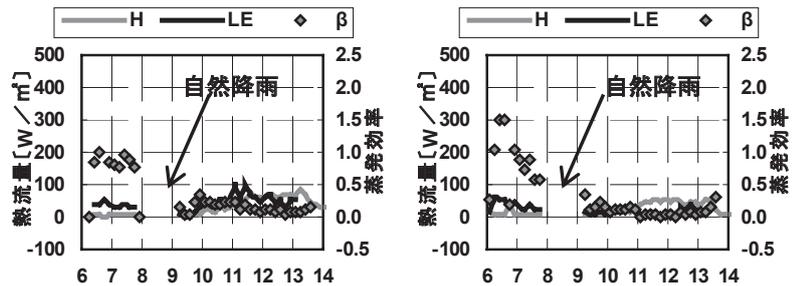


図 3.5.21 保水性舗装の蒸発効率の時変動(左 10cm厚,右 5cm厚)
H: 顕熱フラックス, L: 潜熱フラックス, β : 蒸発効率

(2) 研究成果の今後期待される効果

i) 実験により集積された陸面パラメータの都市気候モデルへの適用

様々な粗度サイズ・幾何形状を対象とした実験および観測により、都市表面－大気間の熱・運動量・物質輸送効率に関するパラメータ（運動量粗度、バルクスカラー係数）の特性を明らかにした。しかし、実際の都市の複雑な幾何形状を考えると、規則的な直方体ブロック群による本実験の結果の汎用性にはまだ課題も残されている。よって、下記の点については引き続き研究を進めていきたい。

- 運動量粗度と幾何形状に関係
特に、建物のアスペクト比、風向、高さ分布に関して条件を追加した実験が望まれる。
- バルクスカラー係数分布に及ぼすスカラーソースサイズの影響
日向・日影のある実際の街路空間における熱輸送と風洞実験でのスカラー輸送の相似性について、ソースサイズの影響を加味した検討が必要

以上の残された課題はあるものの、本プロジェクトで得られた知見の大部分はそのまま都市気候モデルへの組み込みが可能である。

例えば運動量輸送パラメータに関しては、メソスケール気象モデルのサブモデルとして、建物密度に応じた粗度長変化を再現できることになる。一方、スカラー輸送パラメータについては、人間の生活空間である都市キャノピー内の複雑な温度場・速度場・濃度場をターゲットとした neighborhood モデル（CFDモデルや多層都市キャノピーモデルなど）に組み込むことで、都市形状に応じた熱放散・物質拡散の特性差を考慮する事が可能となる。加えて、ヒートアイランド現象の緩和策として注目を集めている壁面緑化や保水性舗装についても、本プロジェクトで得られた蒸発パラメータを都市キャノピーモデルに組み込むことで、その有効性を定量的に評価することが可能となる。

以上により、ヒートアイランド現象の顕在化や自動車排ガス・都市型テロによる有毒ガスの拡散問題に対処しうる、適切な「都市の風通し」を確保した街づくりのための指針づくりに貢献できると考えられる。これは、社会的に見た建設投資の効率的運用に大きく貢献し、環境負荷軽減、緊急時の社会リスク軽減に寄与するとともに、ひいては国土基盤整備の健全な発展に繋がるものである。

ii) 都市の水・エネルギー需要予測モデルの発展－ 都市基盤設備の設計支援へ

ライフスタイルや人口動態の変化に応じて、様々な地域における水・エネルギー需要および人工排熱・人工水蒸気発生の時空間分布を予測するためのモデルフレームの提案を行った。このモデルは原単位法とは全く異なるアプローチに拠っており、人間の生活スケジュールの多様性を考慮したマルチエージェント的な考え方をベースとしているため、住棟、街区、都市の最大ユーティリティ負荷を高精度に確率的に予測できる利点を有している。

この提案の背景にあるのは、現行の多くの住宅におけるエネルギー需要モデルの次のような問題点にある。

即ち、現実の住者の生活パターンは個人により、大きく異なることが容易に予想される。しかし、現行モデルでは、対象とする街区もしくは住棟・住戸において、冷暖房や給湯・給水スケジュールやエネルギー機器の使用スケジュールの全てが標準的住戸を想定して決めたスケジュールを入力条件として確定的に付与されることが一般的である。このような算法に基づく電力・給湯・ガスなどのデマンド予測は大きな誤差を生むものと考えられる。特に、標準住戸を重畳して住棟・街区・都市域全体の最大負荷を積み上げて予測すると大きな誤差が発生してしまうことが知られている。また、これら生活系の水・エネルギーデマンドの予測誤差はヒートアイランドを含む都市大気の水・熱循環の高精度予測にも大きな影響を及ぼすであろう。

本研究で提案した手法によれば，ある居住エリア（住棟から街区，都市スケールまで）の世帯構成（人口や家族構成，居住者属性）が既知なら，エネルギー，水等のユーティリティデマンドの高精度時系列が予測可能となり，原単位法など従来の工学手法では不可能とされた高精度のピーク負荷，時系列変動特性が予測出来ることになる。

今後は本手法を発展させることで，コージェネレーションシステム，燃料電池など地域の熱供給プラントの設計支援ツールを構築できるであろう。また，多様な将来シナリオ（例えば，省エネ機器の普及や少子高齢化の進展など）に対応したシミュレーションにより，都市スケールの住宅におけるエネルギー消費動向を推定するに有意な資料を得る事が期待される。

4 研究参加者

①大気グループ(現地観測・スケール実験・モデル研究における大気関連の研究)

氏名	所属	役職	研究項目	参加時期
神田 学	東京工業大学 大学院理工学 研究科	准教授	現地観測・スケール実験における大気関連研究・モデルの構築と応用 および全体統括	平成14年11月～ 平成20年3月
森脇 亮	愛媛大学 大学院理工学研究科	准教授	現地観測・スケール実験における大気関連研究	平成14年11月～ 平成20年3月
河合 徹	東京工業大学 大学院理工学 研究科	CREST 研究員	スケールモデル実験とSUMMの構築	平成15年3月～ 平成20年3月
稲垣 厚至	東京工業大学 大学院理工学 研究科	D3	高精度 LES-CITY モデルの修正と検証	平成16年4月～ 平成20年3月
Mohammad. Kholid Ridwan	東京工業大学 大学院理工学 研究科	D3	簡易都市気象モデルSUMMの改訂	平成17年11月～ 平成19年10月
笠松 扶美	東京工業大学 大学院理工学 研究科	M2	フラックス観測における計測とその解析	平成16年5月～ 平成17年3月
金賀 将彦	東京工業大学 大学院理工学 研究科	M2	スケールモデルの予備実験	平成15年9月～ 平成18年3月
中山 有	東京工業大学 大学院理工学 研究科	M2	観測における水文量計測とその解析	平成16年2月～ 平成18年3月
小田 僚子	東京工業大学 大学院理工学 研究科	D2	フラックス観測における計測とその解析	平成16年5月～ 平成20年3月
廣岡 智	東京工業大学 大学院理工学 研究科	M2	スケールモデル実験および現地観測	平成17年4月～ 平成19年3月
森泉 孝信	東京工業大学 大学院理工学 研究科	M2	スケールモデル実験および現地観測	平成17年4月～ 平成20年3月
章 晋	東京工業大学 大学院理工学 研究科	M1	高精度 LES-CITY モデルの修正と検証	平成17年8月～ 平成20年3月
仲吉 信人	東京工業大学 大学院理工学	M1	スケールモデル実験	平成18年5月～ 平成20年3月

	研究科			
津國 眞明	東京工業大学 工学部	B4	スケールモデル実験	平成17年9月～ 平成19年3月
高島 亜紗	東京工業大学 工学部	B4	スケールモデル実験と その解析	平成16年5月～ 平成17年3月
新田 晴美	東京工業大学 工学部	B4	フラックス観測におけ る計測とその解析	平成16年5月～ 平成17年3月
後藤 朋美	東京工業大学 大学院理工学 研究科	研究補助 員	事務全般	平成14年12月～ 平成16年7月
明間 恵美	東京工業大学 大学院理工学 研究科	事務補佐 員	事務全般	平成16年8月～ 平成18年11月
岡本 祐子	東京工業大学 大学院理工学 研究科	事務補佐 員	事務全般	平成18年12月～ 平成20年3月
Matthias Roth	Univ. of Singapore Dept. of Geography	Associate Professor	フラックス観測におけ る高度技術供与	平成16年4月～ 平成20年3月
Siegfried Raasch	Univ. Hannover Inst. of Meteorology and Climatology	Professor Doctor	超並列化 LES-CITY モ デルの共同開発	平成17年4月～ 平成20年3月
Marcus Oliver Letzel	Univ. Hannover Inst. of Meteorology and Climatology	助手	超並列化 LES-CITY モ デルの共同開発	平成17年4月～ 平成20年3月
小林 文明	防衛大学校 地球海洋学科	准教授	リモートセンサーを用 いた大気環境計測	平成14年11月～ 平成20年3月
菅原 広史	防衛大学校 地球海洋学科	講師	リモートセンサーを用 いた大気環境計測	平成14年11月～ 平成20年3月
奥田 智洋	防衛大学校 地球海洋学科	M2	リモートセンサーを用 いた大気環境計測	平成16年7月～ 平成17年3月
鈴木 菊男	防衛大学校 地球海洋学科	M2	リモートセンサーを用 いた大気環境計測	平成16年7月～ 平成18年3月
小川 弘子	防衛大学校 地球海洋学科	M2	リモートセンサーを用 いた大気環境計測	平成16年7月～ 平成18年3月
小川 由佳	防衛大学校 地球海洋学科	M2	リモートセンサーを用 いた大気環境計測	平成17年5月～ 平成19年3月
菅原祐也	防衛大学校 地球海洋学科	M2	リモートセンサーを用 いた大気環境計測	平成18年5月～ 平成20年3月
今井真希	防衛大学校 地球海洋学科	M2	リモートセンサーを用 いた大気環境計測	平成18年5月～ 平成20年3月

佐藤 歩	電力中央研究所環境科学研究所	主任研究員	スケールモデルを用いた屋外トレーサー実験	平成18年4月～平成20年3月
道岡 武信	電力中央研究所環境科学研究所	主任研究員	スケールモデルを用いた屋外トレーサー実験	平成18年4月～平成20年3月
神崎 隆男	電力中央研究所環境科学研究所	主任研究員	スケールモデルを用いた屋外トレーサー実験	平成18年4月～平成20年3月

②沿岸海洋グループ(現地観測とモデル研究のうち沿岸海洋関連の研究)

氏名	所属	役職	研究項目	参加時期
八木 宏	東京工業大学大学院理工学研究科	准教授	現地観測における海洋関連研究	平成14年11月～平成20年3月
石田 大暁	東京工業大学大学院理工学研究科	M2	海洋関連データ解析	平成16年5月～平成18年3月
瀬戸 徹	東京工業大学大学院理工学研究科	M2	海洋関連データ解析	平成16年5月～平成18年3月
井瀬 肇	東京工業大学大学院理工学研究科	M2	海洋関連データ解析	平成16年4月～平成20年3月
安井 進	東京工業大学大学院理工学研究科	M2	海洋関連データ解析	平成17年5月～平成20年3月
西本 拓馬	東京工業大学大学院理工学研究科	M2	海洋関連データ解析	平成16年4月～平成17年3月
山口 肇	東京工業大学大学院理工学研究科	M2	海洋関連データ解析	平成15年5月～平成16年3月
松村 航裕	東京工業大学大学院理工学研究科	M2	海洋関連データ解析	平成17年11月～平成20年3月
江連 伸明	東京工業大学大学院理工学研究科	M2	海洋関連データ解析	平成17年11月～平成20年3月

③水文グループ(現地観測・スケール実験・モデル研究における水文関連の研究)

氏名	所属	役職	研究項目	参加時期
木内 豪	福島大学 環境システム マネジメント 専攻	准教授	都市域の水・エネルギー フラックスの実態把 握とモデル化	平成14年11月～ 平成20年3月
賈 仰文	中国水利水電 科学研究院水 資源研究所	教授	都市生態圏から水圏へ の強制力モデルの構築	平成14年11月～ 平成20年3月
宮本 守	福島大学 環境システム マネジメント 専攻	CREST 技 術員	都市域の水・エネルギー フラックスの実態把 握とモデル化	平成14年11月～ 平成19年3月

④建築微気象グループ(現地観測・スケール実験・モデル研究による建物スケールに焦点を当てた都市キャンपी内伝熱, 流力機構の解明)

氏名	所属	役職	研究項目	参加時期
成田 健一	日本工業大学 工学部建築学 科	教授	現地観測・スケール実 験における建築スケ ールに焦点をあてた都市 キャンピー内微気候の 解明・伝達率に関する 風洞実験	平成14年11月～ 平成20年3月
鈴木 直人	日本工業大学 大学院建築学 専攻	M2	伝達率に関する風洞実 験	平成17年2月～ 平成18年3月
武藤 順	日本工業大学 大学院建築学 専攻	M2	スケールモデル初期実 験	平成16年2月～ 平成17年3月
谷本 潤	九州大学大学 院総合理工学 研究院	教授	スケール実験における 建築スケールに焦点を あてた都市キャンピー 内微気候の解明, 都市 域の水・エネルギー消 費量予測モデルについ ての検討	平成14年11月～ 平成20年3月
萩島 理	九州大学大学 院総合理工学 研究院	准教授	スケールモデル実験と 都市キャンピーの放 射・伝導モデルの比較	平成14年11月～ 平成20年3月

			検証, 抗力係数に関する風洞実験	
末永啓	九州大学大学院総合理工学研究院	M2	バルクスカラー輸送係数に関する風洞実験	平成17年4月～平成20年3月
佐藤 翔	九州大学大学院総合理工学研究院	M2	抗力係数に関する風洞実験	平成18年4月～平成20年3月
永山 浩二	九州大学大学院総合理工学研究院	M2	抗力係数に関する風洞実験	平成17年4月～平成19年3月
古賀 正浩	九州大学工学部	B4	抗力係数に関する風洞実験	平成18年4月～平成19年3月
木村 聖	九州大学大学院総合理工学研究院	M2	スケールモデル実験, 集合住宅団地観測のデータ解析	平成16年9月～平成18年3月
伊牟田航生	九州大学大学院総合理工学研究院	M2	スケールモデル初期実験	平成15年4月～平成18年3月
長谷川 毅	九州大学工学部	B4	スケールモデル初期実験	平成15年4月～平成16年3月

5 招聘した研究者等

氏名(所属, 役職)	招聘の目的	滞在先	滞在期間
賈 仰文 (中国水利水電科学研究所 水資源研究所 教授級高級工務師)	水圏モジュールに関する専門的知識の供与及び IAHS 総会に出席	独立行政法人 土木研究所	平成15年7月1日～平成15年7月20日
Siegfried Raasch (University of hannover, Institute of Meterology and Climatorogy, Associate Professor)	研究打ち合せ 及び データ検証, 特別講演	東京工業大学 神田研究室	平成17年9月10日～平成17年9月18日

6 成果発表等

(1)原著論文発表 (国内誌 5 6 件, 国際誌 4 6 件)

国際ジャーナル

- 1) Hagishima, A. and J. Tanimoto : Field measurements for estimating the convective heat transfer coefficient at building surfaces, *Building and Environment*, 38, 873-881, 2003.
- 2) Kobayashi, F. and N.Inatomi: First radar echo formation of summer thunderclouds in southern Kanto, Japan, *J. Atmos. Electricity*, 23, 9-19, 2003.
- 3) Kanda, M., A. Inagaki, M.O. Letzel, S. Raasch, and T. Watanabe: LES study of the energy imbalance problem with eddy covariance fluxes, *Boundary-Layer Meteorology*, 110, 381-404, 2004.
- 4) Kanda, M., R. Moriwaki, and F. Kasamatsu: Large-eddy simulation of turbulent organized structures within and above explicitly resolved cube arrays, *Boundary-Layer Meteorology*, 112, 343-368, 2004.
- 5) Kinouchi, T.: Analysis of long-term change in thermal forcing to receiving water due to urban water and energy consumption, *Journal of Hydrosience and Hydraulic Engineering*, 22, 71-80, 2004.
- 6) Chimklai, P., A. Hagishima, and J. Tanimoto: A computer system to support Albedo Calculation in urban areas, *Building and Environment*, 39, 1213-1221, 2004.
- 7) Tanimoto, J., A. Hagishima, and P. Chimklai: An approach for coupled simulation of building thermal effects and urban climatology, *Energy and Buildings*, 36, 781-793, 2004.
- 8) Sugawara, H., K. Narita and T. Mikami: Representative air temperature of thermally heterogeneous urban areas using the measured pressure gradient, *Journal of Applied Meteorology*, 43, 1168-1179, 2004.
- 9) Moriwaki, R. and M. Kanda: Seasonal and diurnal fluxes of radiation, heat, water vapor and CO₂ over a suburban area. *Journal of Applied Meteorology*, 43, 1700-1710, 2004.
- 10) Kanda, M., T. Kawai, and K. Nakagawa : A simple theoretical radiation scheme for regular building arrays, *Boundary-Layer Meteorology*, 114, 71-90, 2005.
- 11) Kanda, M., R. Moriwaki and Y. Kimoto : Temperature profiles within and above an urban canopy, *Boundary-Layer Meteorology*, 115, 499-506, 2005.
- 12) Kanda, M., T. Kawai, M. Kanega, R. Moriwaki, K. Narita and A. Hagishima : Simple energy balance model for regular building arrays, *Boundary-Layer Meteorology*, 116, 423-443, 2005.
- 13) Tanimoto, J. and A. Hagishima: State transition probability for the Markov Model dealing with on/off cooling schedule in dwellings, *Energy and Buildings*, 37, 181-187, 2005.
- 14) Hagishima, A. and J. Tanimoto, Investigations of Urban Surface Conditions for Urban Canopy Model, *Building and Environment*, 40, 1638-1650, 2005.
- 15) Hagishima, A., J. Tanimoto, and K.Narita: Intercomparisons of experimental research on

- convective heat transfer coefficient of urban surfaces, *Boundary-Layer Meteorology*, 117, 551-576, 2005.
- 16) Kanda, M. : Progress in the scale modeling of urban climate, *Theoretical and Applied Climatology*, 84, 23-34, 2006.
 - 17) Moriwaki, R. and M. Kanda : Flux-gradient profiles for momentum and heat over an urban surface, *Theoretical and Applied Climatology*, 84, 127-136, 2006.
 - 18) Kanda, M. : Large eddy simulations on the effects of surface geometry of building arrays on turbulent organized structures, *Boundary-Layer Meteorology*, 118, 151-168, 2006.
 - 19) Moriwaki, R., M. Kanda, H. Nitta: Carbon dioxide build-up within a suburban canopy layer in winter night, *Atmospheric Environment*, 40, 1394-1407, 2006.
 - 20) Inagaki, A., M. O. Letzel, S. Raasch, and M. Kanda : The impact of the surface heterogeneity on the energy imbalance problem using LES, *Journal of the Meteorological Society of Japan*, 84, 187-198, 2006.
 - 21) Moriwaki, R. and M. Kanda: Local and global similarity in turbulent transfer of heat, water vapour, and CO₂ in the dynamic convective sublayer over a suburban area, *Boundary-Layer Meteorology*, 120, 163-179, 2006.7
 - 22) Sugawara, H. and T. Takamura: Longwave flux evaluation from directional radiometric temperature measurement over an urban canopy, *Remote Sensing of Environment*, 104, 226-237, 2006.9
 - 23) Kanda, M., F. Kasamatsu, and R. Moriwaki: Spatial variability of turbulent fluxes and temperature profile in an urban roughness layer, *Boundary-Layer Meteorology*, 121, 339-350, 2006.11
 - 24) Moriwaki, R. and M. Kanda: Scalar roughness parameters for a suburban area, *Journal of the Meteorological Society of Japan*, 84, 1065-1073, 2006.12
 - 25) Kobayashi, F., Sugawara, H., Ogawa, Y., Kanda, M., Ishii, K.: Cumulonimbus generation in Tokyo metropolitan area during mid-summer days, *Journal of Atmospheric Electricity*, 27, 41-52, 2007.1
 - 26) Narita, K.: Experimental study of the transfer velocity for urban surfaces with water evaporation method, *Boundary-Layer Meteorology*, 122, 293-320, 2007.2
 - 27) Kinouchi, T., Yagi, H., and Miyamoto, M.: Increase in stream temperature related to anthropogenic heat input from urban wastewater, *Journal of Hydrology*, 335, 78-88, 2007.3
 - 28) Kinouchi, T.: Impact of long-term water and energy consumption in Tokyo on wastewater effluent temperature: implications for the thermal degradation of urban streams, *Hydrological Processes*, 21, 1207-1216, 2007.3
 - 29) Hagishima, A., K. Narita, and J. Tanimoto: Field experiment on transpiration from isolated urban plants, *Hydrological Processes*, 21, 1217-1222, 2007.3
 - 30) Kanda, M., Kanega, M., Kawai, T., Sugawara, H., and Moriwaki, R.: Roughness lengths for momentum and heat derived from outdoor urban scale models, *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 46, 1067-1079, 2007.3

- 31) Gerald, S., Letzel, M.O., Raasch, S., Kanda, M., and Inagaki, A.: Spatial representativeness of single tower measurements and the imbalance problem with eddy-covariance fluxes: results of a large-eddy simulation study, *Boundary-Layer Meteorology*, 123, 77-98, 2007.4
- 32) Kawai, T., Kanda, M., Narita, K., and Hagishima, A.: Validation of a numerical model for urban energy-exchange using outdoor scale-model measurements, *International Journal of Climatology* (Special Issue: Urban Climatology ICUC6), 27, 1931-1942, 2007.
- 33) Kanda, M.: Progress in Urban Meteorology: A Review : *Journal of the Meteorological Society of Japan*, 85B, 363-383, 2007.
- 34) Tanimoto, J., A. Hagishima, and H. Sagara: A methodology for maximum energy requirement considering actual variation of inhabitants' behavior schedule, *Building and Environment* (in press). <http://dx.doi.org/10.1016/j.enbuild.2007.02.032>
- 35) Tanimoto, J., A. Hagishima, and H.Sagara: Validation of Probabilistic Methodology for Generating Actual Inhabitants' Behavior Schedules for Accurate Prediction of Maximum Energy Requirements, *Building and Environment* (in press). <http://dx.doi.org/10.1016/j.enbuild.2007.02.032>
- 36) Inagaki, A and Kanda, M: Turbulent flow similarity over an outdoor reduced urban model, *Journal of Fluid Mechanics* (submitted)
- 37) Sugawara, H. and K. Narita: Roughness length for heat over an urban canopy, *Theoretical and Applied Meteorology* (submitted)
- 38) Sugawara, H., A., Hagishima, K., Narita, H. Ogawa, M. Yamano: Temperature distribution in the urban canyon, *SOLA* (submitted)
- 39) Moriwaki, R., Senoh, H., Kanda, M., Hagishima, A., and Kinouchi, T.: Anthropogenic vapour emissions in Tokyo, *Water Resources Research* (submitted).
- 40) Kawai, T., Kholid Ridwan, M., and Kanda, M.: Evaluation of simple urban energy balance model using one-year observed fluxes at two different cities, *Journal of Applied Meteorology and Climatology* (submitted).
- 41) Nakayoshi, M., Moriwaki, R., and Kanda, M.: Experimental study of rainfall interception on an outdoor urban scale model, *Journal of Hydrology* (to be submitted).
- 42) Kinouchi, T. and Jia, Y.: Urban stream temperature simulation using a hydrological model with anthropogenic heat transport and urban canopy processes (to be submitted).
- 43) Inagaki, A. and Kanda, M.: Horizontal distribution of turbulence over the reduced urban scale model (to be submitted).
- 44) Kawai, T., Kanda M.: Energy Balance Obtained from Comprehensive Outdoor Scale model Experiment, Part I: Basic Feature of the Energy Balance, *Journal of Applied Meteorology and Climatology* (to be submitted).
- 45) Kawai, T., Kanda M.: Energy Balance Obtained from Comprehensive Outdoor Scale model Experiment, Part II: Comparison with field data using new energy indexes, *Journal of Applied Meteorology and Climatology* (to be submitted).

- 46) Oda, R., Moriwaki, R., and Kanda, M.: Seasonal and Diurnal Fluxes of Energy and CO₂ over Tokyo Bay (to be submitted).

国内ジャーナル

- 1) 森脇 亮, 神田 学, 木元由花: 都市接地層における乱流プロファイルの大気安定度依存性, 土木学会水工学論文集, 47, 1-6, 2003.
- 2) 稲垣 厚至, 神田 学, マルコス・オリバー・レッツェル, ジークフリート・ラッシュ: 非一様加熱場に生じるエネルギーインバランス, 土木学会水工学論文集, 47, 37-42, 2003.
- 3) 河合 徹, 神田 学: 都市を対象とした3次元高精度・低計算負荷放射解析モデルの提案, 土木学会水工学論文集, 47, 55-60, 2003.
- 4) 木内 豪: 都市の水利用が公共用水域に及ぼす熱的影響の長期的変化—東京都区部下水道と東京湾を事例として—, 土木学会水工学論文集, 47, 25-30, 2003.
- 5) 木内 豪: 水循環とヒートアイランド対策, 水循環 貯留と浸透, 51, 23-28, 2003.
- 6) 木内 豪: 都市が東京湾に与える影響—水・熱輸送の視点から—, 月刊海洋, 総特集「東京湾の環境回復—目標と課題—」, 35, 508-515, 2003.
- 7) 萩島 理, 谷本 潤, 片山忠久, 宮原直枝: 都市気候モデルの境界条件生成のための建物空調排熱位置及び都市形状の実態に関する調査, 日本建築学会環境系論文集, 567, 65-72, 2003.
- 8) 谷本 潤, 藤井晴行: エネルギー計算に用いる生活スケジュールに関する研究第1報 確率プロセスに基づく発生法の基礎的検討, 空気調和・衛生工学会論文集, 89, 29-36, 2003.
- 9) 森脇 亮, 神田 学: 都市接地層における放射・熱・水・CO₂ フラックスの長期連続観測, 水文・水資源学会誌, 16, 477-490, 2003.
- 10) 森脇 亮, 神田 学, 菅原 広史: 都市接地層における放射・熱・水蒸気・CO₂ の乱流輸効率の相似性, 水文・水資源学会誌, 16, 491-500, 2003.
- 11) 神田 学, 森脇 亮: 都市の熱収支---熱・水・CO₂ フラックスの長期連続観測を例に---, 日本風工学会誌, 97, 13-21, 2003.
- 12) 木内 豪: 都市の水・エネルギー利用が水域に及ぼす熱影響のモデル化と東京都区部下水道への適用, 水文・水資源学会誌, 17, 13-21, 2004.
- 13) 菅原広史, 栗田智哉, 遠峰菊郎: 気圧を用いた広域降水量の推定方法に関する検討, 水文・水資源学会誌, 17, 163-169, 2004.
- 14) 萩島 理, 成田健一, 谷本 潤, 三坂育正, 松嶋 篤, 尾之上真弓: 大規模な階段状緑化屋根を有する建築物周辺の微気象に関する実測調査, 日本建築学会環境系論文集, 577, 47-54, 2004.
- 15) 萩島 理, 谷本 潤, 成田健一: 都市表面の対流熱伝達率に関する既往研究のレビュー, 水文・水資源学会誌, 17, 536-554, 2004.

- 16) 成田健一, 三坂育正, 国島武史, 中山康孝, 若林伸介: 蒸発効率を用いた保水性舗装の性能評価, 日本建築学会技術報告集, 20, 187-190, 2004.
- 17) 森脇 亮, 神田 学, 木本由花: 都市境界層における風速・温度のシア関数, 土木学会水工学論文集, 48, 139-144, 2004.
- 18) 木本由花, 森脇 亮, 神田 学: 長期観測に基づいた都市キャノピー内外における温位プロファイル特性, 土木学会水工学論文集, 48, 163-168, 2004.
- 19) 笠松扶美, 神田 学, 森脇 亮: LES による都市建物群内及び上空における乱流の組織構造, 土木学会水工学論文集, 48, 607-612, 2004.
- 20) 木内 豪, 中山 有, 森脇 亮, 神田 学: 都市集水域における水・熱輸送の実態解明とモデリング—久が原水文気象観測データに基づいて—, 土木学会水工学論文集, 48, 175-180, 2004.
- 21) 妹尾泰史, 神田 学, 木内 豪, 萩島 理: 潜熱割合を考慮した人工排熱時空間分布の推計と都市局地気象に対する影響, 土木学会水工学論文集, 48, 169-174, 2004.
- 22) 八木 宏, 石田大暁, 山口 肇, 木内 豪, 樋田史郎, 石井光廣: 東京湾及び周辺水域の長期水温変動特性, 土木学会海岸工学論文集, 51, 1236-1240, 2004.
- 23) 小林文明: ヒートアイランドが降水におよぼす影響, 天気, 51, 115-117, 2004.
- 24) 小林文明: 練馬豪雨と東京都心周辺における積乱雲の発生特性, 第22回メソ気象研究会の報告—メソ対流系と豪雨—, 天気, 51, 55-60, 2004.
- 25) 森脇 亮, 神田 学, 木本由花: 住宅街における熱収支と CO₂ フラックスの年間積算値, 土木学会水工学論文集, 49, 361-366, 2005.
- 26) 稲垣 厚至, 神田 学, マルコス・オリバー・レッツェル, ジークフリート・ラッシュ: 非一様地表面加熱場での点計測乱流量に基づく領域熱収支, 土木学会水工学論文集, 49, 343-348, 2005.
- 27) 河合 徹, 金賀将彦, 神田 学: 3次元簡易都市キャノピーモデルの構築と屋外縮小模型都市を用いた実験, 土木学会水工学論文集, 49, 349-354, 2005.
- 28) 谷本潤, 萩島理, シムクライ・パリチャート: 複雑都市形状におけるアルベド解析のための放射計算モデルとそのアプリケーション ALBEDO Calculator & Viewer の開発, 日本建築学会技術報告集, 21, 153-158, 2005.
- 29) 成田健一, 小笠 顕, 野々村善民: 都市表面における対流物質伝達率に関する風洞実験(続報)—都市域における建物外表面対流熱伝達率に関する実験的研究(その3)—, 日本建築学会環境系論文集, 594, 69-76, 2005.
- 30) 萩島 理, 谷本 潤, 高尾京子: 壁面緑化システムの熱収支構造に関する屋外観測, 日本建築学会技術報告集, 22, 253-258, 2005.
- 31) 菅原 広史, 池東 旭, 遠峰 菊郎: ヒートアイランド強度算定のための都市気温分布の検討—ソウル(韓国)の例—, 天気, 52, 129-137, 2005.

- 32) 相良博喜, 谷本 潤, 萩島 理: エネルギー計算に用いる生活スケジュールに関する研究 第3報 普遍的データ生成法, 空気調和・衛生工学会論文集, 105, 29-35, 2005.
- 33) 森脇 亮, 神田 学: 住宅街における冬季夜間の局所的冷氣沈降とスカラー濃度プロファイルの形成機構, 土木学会水工学論文集, 50, 493-498, 2006.
- 34) 河合 徹, 金賀将彦, 神田 学: 屋外模型都市実験による都市構成面別対流熱伝達率の算定, 土木学会水工学論文集, 50, 451-456, 2006.
- 35) 稲垣厚至, 神田 学, 森脇 亮: 屋外都市スケールモデル実験で観測された乱流構造に関する考察, 土木学会水工学論文集, 50, 445-450, 2006.
- 36) 小田僚子, 森脇 亮, 神田 学: 東京湾におけるエネルギー・H₂O・CO₂フラックスの季節変化, 土木学会水工学論文集, 50, 463-468, 2006.
- 37) 中山 有, 神田 学, 木内 豪, 森脇 亮: 都市人工排水系における水・熱輸送に関する観測研究, 土木学会水工学論文集, 50, 511-516, 2006.
- 38) 宮本 守, 木内 豪, 八木 宏, 中山 有, 神田 学: 都市の人工排熱が河川水温に及ぼす影響, 土木学会水工学論文集, 50, 1069-1074, 2006.
- 39) 萩島 理, 谷本 潤, 浅野文宏: 改良・建築—都市—土壌連成系モデル(AUSSSM)による都市高温化の構造解析 第3報 気象条件による都市高温化要因の違い, 日本建築学会環境系論文集, 601, pp43-50, 2006.3
- 40) 谷本 潤, 相良博喜, 萩島 理: エネルギー計算に用いる生活スケジュールに関する研究 第4報 生成データの検証, 空気調和・衛生工学会論文集, 110, 35-41, 2006.5
- 41) 谷本 潤, 相良博喜, 萩島 理, 木内 豪, 神田 学, 中山 有: エネルギー計算に用いる生活スケジュールに関する研究 第5報 久が原の実給水量データと予測給水デマンドとの比較, 空気調和・衛生工学会論文集, 113, 35-38, 2006.8
- 42) 成田健一, 萩島 理, 谷本 潤, 高野武将: 都市域における樹木の蒸散特性-オアシス効果に関する野外実験, 日本建築学会環境系論文集, 608, 59-66, 2006.10
- 43) 小林文明, 菅原広史, 小川由佳, 神田 学, 田村幸雄, 日比一喜, 宮下康一, 本條毅, 足立 アホロ, 三上岳彦, 石井康一郎: 夏季晴天時東京都心における対流雲発生時の下層風系, 風工学シンポジウム論文集, 19, 43-48, 2006.12
- 44) 中山 有, 神田 学, 木内 豪: 下水処理場での水温観測に基づく都市下水道の水・熱輸送に関する研究, 水文・水資源学会誌, 20, 25-33, 2007.1
- 45) 成田健一, 萩島 理, 谷本 潤, 高野武将: 都市域における樹木の蒸散特性-オアシス効果に関する野外実験, 日本建築学会環境系論文集, 608, 59-66, 2006.
- 46) 森脇 亮, 森泉孝信, 神田 学: 都市キャノピーにおける温位・CO₂・H₂O の鉛直分布と鉛直拡散係数, 土木学会水工学論文集, 51, 271-276, 2007.3.

- 47) 河合 徹, 神田 学: 大規模屋外模型都市実験による熱収支の検討, 土木学会水工学論文集, **51**, 265-270, 2007.3.
- 48) 稲垣厚至, 神田 学: 屋外都市スケールモデルで観測された乱流統計量の鉛直分布, 土木学会水工学論文集, **51**, 247-252, 2007.3.
- 49) Kholid Ridwan, M., Kawai, T., Kanda, M., and Moriwaki, R.: Evaluation of simple urban energy balance for meso-scale simulation (SUMM) to real urban fields, *Annual Journal of Hydraulic Engineering, JSCE*, **51**, 259-264, 2007.3
- 50) 廣岡 智, 稲垣厚至, 神田 学: 乱流組織構造の抽出法に関する検討, 土木学会水工学論文集, **51**, 241-246, 2007.3.
- 51) 仲吉信人, 森脇 亮, 神田 学: 屋外都市スケールモデルにおける降雨中遮断蒸発実験, 土木学会水工学論文集, **51**, 247-252, 2007.3.
- 52) 宮本 守, 木内 豪: 下水道による水輸送過程を考慮したWE Pモデルの都市流域への適用, 土木学会水工学論文集, **51**, 1141-1146, 2007.3.
- 53) 谷本 潤, 相良博喜, 萩島 理, 飯尾昭彦: エネルギー計算に用いる生活スケジュールに関する研究 第6報-水・湯消費イベント予測時系列と田中・飯尾氏アンケート調査データとの比較, 空気調和・衛生工学会論文集, **123**, 33-37, 2007.6.
- 54) 宮本 守, 木内 豪: 感潮域における都市河川の水・熱輸送特性と下水処理水が河川水温に与える影響, 水文・水資源学会誌, **20**, 291-302, 2007.7
- 55) 萩島 理, 谷本 潤, 永山浩二, 古賀正浩: 高さの分布のある直方体粗度群の抗力係数に関する風洞実験, 日本建築学会環境系論文集, **619**, pp 39-45, 2007.9
- 56) 谷本 潤, 相良博喜, 萩島 理, 前田哲彦: エネルギー計算に用いる生活スケジュールに関する研究 第7報集合住宅における給湯, 電力需要時系列実測データとの比較, 空気調和・衛生工学会論文集 (掲載予定).

(2)その他の著作物(総説, 書籍など)

- 1) 菅原広史: 都市気候分野における流れの野外計測, ながれ, 26, 21-28, 2007.2
- 2) T. Kinouchi, Urban water and energy wastes affect aquatic environment - case study for streams in Tokyo -, "Urbanization: 21st Century Issues and Challenges", Nova Science Publishers, Inc (Invited contribution, submitted)

(3)学会発表(国際学会発表及び主要な国内学会発表)

- ① 招待講演 (国内会議 6件, 国際会議 6件)

国際学会

- 1) Kanda, M. (Tokyo Institute of Technology): Progress in the scale modeling of urban climate, Fifth International Conference on Urban Climate, International Association of Urban Climate, Lodz, Poland, 1-5 September 2003. (Invited Lecture)
- 2) Kinouchi, T. (Public Works Research Institute): Current topics on urban hydrological cycle

studies in Japan, International Symposium on the Urban Water Cycle in the Cheonggyecheon Watershed, Seoul, Korea, 2004.3. (Invited presentation)

- 3) Kanda, M. (Tokyo Institute of Technology) : Outdoor scale models for urban climate, The 16th Regional Conference of Clean Air and Environment in Asian Pacific Area, Tokyo, Japan, 2005.8.2-3. (Invited lecture)
- 4) Kanda, M. (Tokyo Institute of Technology) : Turbulent organized structure within and above building arrays derived from LES and outdoor scale model, Geophysical Turbulence Program Workshop, NCAR, 26-28 September 2006, Boulder, Colorado, USA. (Invited lecture)
- 5) Kanda, M. (Tokyo Institute of Technology) : Urban models in Japan / CDF approach and scale model experiment, Workshop on Model Urbanization Strategy, COST Action 728, 3-4 May 2007, Exeter, UK. (Invited lecture)
- 6) Hagishima, A. (Kyushu University) ; Requirements for an interdisciplinary bridge between building and urban scale physics, Invited Lecture, 10th IBPSA Conference, Beijing, China, 3-6 September, 2007. (Invited lecture)

国内学会

- 1) 神田 学 (東京工業大学) : 大気乱流の組織構造とエネルギーインバランス問題, 日本気象学会 2003 年度春季大会, つくば国際会議場, 2003.5.21. (招待講演)
- 2) 森脇 亮 (東京工業大学) : 都市域における乱流・フラックス観測研究の動向, 日本気象学会 2006 年度春季大会, つくば, 2006.5.22. (招待講演)
- 3) Siegfried Raasch (ハノーバー大学) : High resolution Large Eddy Simulations on the effects of land surface heterogeneities, 日本気象学会 2006 年度春季大会, つくば, 2006.5.22. (招待講演)
- 4) 神田 学 (東京工業大学) : 都市域における乱流観測の現状と展望, 第 53 回風に関するシンポジウム, 東京, 2007.6.21 (基調講演)
- 5) 神田 学 (東京工業大学) : 都市境界層における乱流相似則と組織構造, 日本流体力学会年会 2007, 東京, 2007.8.6-8 (特別講演)
- 6) 森脇 亮 (東京工業大学) : タワー観測によって得られた都市キャノピー内外の気温・水蒸気・CO₂ プロファイル, 第 48 回大気環境学会年会, 岡山, 2007.9.5-7 (招待講演)

② 口頭発表 (国内会議52件, 国際会議40件)

国際学会

- 1) Sugawara, H. (National Defense Academy of Japan): Heat island and urban geometrical structure, 8th International Conference on Atmospheric Sciences and Applications to Air Quality, Tsukuba, Japan, 2003.3.13.
- 2) Kinouchi, T. (Public Works Research Institute): Influence of urban heat island and energy use on effluent water temperature from sewage treatment plants, Fifth International Conference on Urban Climate, International Association of Urban Climate, Lodz, Poland, 1-5 September 2003.

- 3) Kanda, M. (Tokyo Institute of Technology): LES study on turbulent organized structures in and above urban canopy, Fifth International Conference on Urban Climate, International Association of Urban Climate, Lodz, Poland, 1-5 September 2003.
- 4) Moriwaki, R. (Tokyo Institute of Technology): A field experiment on how atmospheric stability affects vertical profiles of momentum and fluxes in an urban surface layer, Fifth International Conference on Urban Climate, International Association of Urban Climate, Lodz, Poland, 1-5 September 2003.
- 5) Sugawara, H. (National Defense Academy of Japan): Urban heat budget and geometrical structure of building canopy, Fifth International Conference on Urban Climate, International Association of Urban Climate, Lodz, Poland, 1-5 September 2003.
- 6) Narita, K-I. (Nippon Institute of Technology): Wind tunnel experiment on convective transfer coefficient in urban street canyon, Fifth International Conference on Urban Climate, International Association of Urban Climate, Lodz, Poland, 1-5 September 2003.
- 7) Tanimoto, J. (Kyushu University): Development of an advanced computer tool, AUSSSM TOOL, for a coupling simulation with building thermal system and urban climatology, 8th IBPSA conference, Eindhoven, Netherlands, 11-14 August 2003.
- 8) Kanda, M. (Tokyo Institute of Technology): Large eddy simulations on the effects of surface geometry of building arrays on turbulent flow structures, 5th Symposium on the Urban Environment, American Meteorological Society, Vancouver, BC, Canada, 23-27 August 2004.
- 9) Moriwaki, R. (Tokyo Institute of Technology): Annual fluxes of energy and CO₂ over a residential area in Tokyo, 5th Symposium on the Urban Environment, American Meteorological Society, Vancouver, BC, Canada, 23-27 August 2004.
- 10) Hagishima, A. (Kyushu University): Field experiment on the oasis effect of urban area using pot plants, 5th Symposium on the Urban Environment, American Meteorological Society, Vancouver, BC, Canada, 23-27 August 2004.
- 11) Narita, K-I. (Nippon Institute of Technology): Effects of building -height heterogeneity on area-averaged transfer velocity in the street surface- Wind tunnel experiments using salinity change technique, 5th Symposium on the Urban Environment, American Meteorological Society, Vancouver, BC, Canada, 23-27 August 2004.
- 12) Sugawara, H. (National Defense Academy of Japan): Estimation of the heat transfer resistance in the real urban canopy, 5th Symposium on the Urban Environment, American Meteorological Society, Vancouver, BC, Canada, 23-27 August 2004.
- 13) Kinouchi, T. (Public Works Research Institute): Development of cool pavement with dark colored high albedo coating, 5th Symposium on the Urban Environment, American Meteorological Society, Vancouver, BC, Canada, 23-27 August 2004.
- 14) Kinouchi, T. (Public Works Research Institute): Long-term stream temperature change due to urbanization – case study for the Central Tokyo Area –, International Conference on Water Sensitive Urban Design: Cities as Catchments, Adelaide, South Australia, 21-25 November 2004.
- 15) Inagaki, A. (Tokyo Institute of Technology) : The numerical experiment of the energy and CO₂ imbalance problem using LES, The 16th Regional Conference of Clean Air and

Environment in Asian Pacific Area, Tokyo, Japan, 2005.8.2-3.

- 16) Kinouchi, T. (Fukushima University) : Long-term change of stream temperature: implication for impact of anthropogenic heat input due to urbanization, XXXI International Association of Hydraulic Engineering and Research (IAHR) Congress, Seoul, Korea, 11-16 September 2005.
- 17) Miyamoto, M. (JST / Fukushima University) : Simulation of wastewater impact on stream temperature in urban rivers under tidal variation, XXXI International Association of Hydraulic Engineering and Research (IAHR) Congress, Seoul, Korea, 11-16 September 2005.
- 18) Tanimoto, J. (Kyushu University) : Cooling load simulation considering actual variation of inhabitants' behavior for Accurate Estimation of Urban Maximum Energy Requirement, The 9th IBPSA Building Simulation '05 Conference, Montreal, Quebec, Canada, 15-18 August 2005.
- 19) Kanda, M. (Tokyo Institute of Technology) : Outdoor scale models for urban climate, 4th Japanese-German Meeting on Urban Climatology, Tsukuba, Japan, 30 November-2 December 2005.
- 20) Moriwaki, R. (Tokyo Institute of Technology) : Highly accumulated CO₂ and cold-air drainage within a suburban canopy layer in winter night, 4th Japanese-German Meeting on Urban Climatology, Tsukuba, Japan, 30 November-2 December 2005.
- 21) Hagishima, A. (Tokyo Institute of Technology) : Field measurement on thermal balance of full-scale 2D canopy, 4th Japanese-German Meeting on Urban Climatology, Tsukuba, Japan, 30 November-2 December 2005.
- 22) Letzel, M.O. (University of Hannover) : A new dimension of urban climate modelling with parallel large-eddy simulation, 4th Japanese-German Meeting on Urban Climatology, Tsukuba, Japan, 30 November-2 December 2005.
- 23) Kanda, M. (Tokyo Institute of Technology): Atmospheric boundary layer and scalar dispersion with explicitly resolved urban geometries using large eddy simulation for city (LES-CITY) , Sixth Symposium on the Urban Environment, American Meteorological Society, 29 January-2 February 2006, Atlanta, GA.
- 24) Kanda, M. (Tokyo Institute of Technology) : Simple urban energy balance model for meso scale simulations, Sixth Symposium on the Urban Environment, American Meteorological Society, 29 January-2 February 2006, Atlanta, GA.
- 25) Moriwaki, R. (Tokyo Institute of Technology) : Vertical profiles of carbon dioxide, temperature, and water vapor within and above a suburban canopy layer in winter, Sixth Symposium on the Urban Environment, American Meteorological Society, 29 January-2 February 2006, Atlanta, GA.
- 26) Moriwaki, R. (Tokyo Institute of Technology): Similarity on turbulent transfers of heat, water vapor, and carbon dioxide over a suburban surface under weakly unstable condition, Sixth Symposium on the Urban Environment, American Meteorological Society, 29 January-2 February 2006, Atlanta, GA.
- 27) Kawai, T. (Tokyo Institute of Technology): Outdoor scale model experiments for the evaluation of urban modeling studies, Sixth Symposium on the Urban Environment, American Meteorological Society, 29 January-2 February 2006, Atlanta, GA.

- 28) Inagaki, A. (Tokyo Institute of Technology): Turbulent organized structure over a reduced urban scale model, Sixth Symposium on the Urban Environment, American Meteorological Society, 29 January-2 February 2006, Atlanta, GA.
- 29) Moriwaki, R. (Tokyo Institute of Technology) : Vertical profile and turbulent transfer of heat, water vapor, and carbon dioxide at a suburban sublayer, The 6th International Conference on Urban Climate Göteborg, Sweden, June 12th - 16th 2006.
- 30) Hagishima, A. (Kyushu University) : Field measurement on convective heat transfer coefficient of full-scale 2D canopy, The 6th International Conference on Urban Climate Göteborg, Sweden, June 12th - 16th 2006.
- 31) Narita, K. (Nippon Institute of Technology) : Outdoor scale model experiments of the local bulk transfer coefficient for urban surfaces with a water evaporation method, The 6th International Conference on Urban Climate Göteborg, Sweden, June 12th - 16th 2006.
- 32) Kanda, M. (Tokyo Institute of Technology) : Comprehensive outdoor scale model experiment for urban climate (COSMO), The 6th International Conference on Urban Climate Göteborg, Sweden, June 12th - 16th 2006.
- 33) Inagaki, A. (Tokyo Institute of Technology) : The coherent structure of turbulence over a reduced urban scale model, The 6th International Conference on Urban Climate Göteborg, Sweden, June 12th - 16th 2006.
- 34) Sugawara, H. (National Defense Academy of Japan) : Observation of stability-influenced canyon flow patterns, The 6th International Conference on Urban Climate Göteborg, Sweden, June 12th - 16th 2006.
- 35) Kawai, T. (Tokyo Institute of Technology) : Evaluation of a Simple Urban energy balance Model for Meso-scale simulation (SUMM) with Comprehensive Outdoor Scale Model experiment for urban climate (COSMO), The 6th International Conference on Urban Climate Göteborg, Sweden, June 12th - 16th 2006.
- 36) Kurita, S. (Meteorological Research Institute) : Comparison of LES with wind tunnel experiment around and within localized urban canopy under atmospheric turbulent boundary layer, The Fourth International Symposium on Computational Wind Engineering (CWE2006), July 16-19,2006, p697-700, Yokohama, Japan
- 37) Tanimoto, J. (Kyushu University) ; Validation of the Probabilistic Methodology to Generate Actual Inhabitants' Behavior Schedules for Accurate Prediction of Maximum Energy Requirement, 10th IBPSA Conference, Beijing, China, 3-6 September, 2007.
- 38) Oda, R. (Tokyo Institute of Technology) : Impact of sea surface temperature on sea air temperature in Tokyo bay, Seventh Symposium on the Urban Environment, American Meteorological Society, 10-13 September 2007, San Diego, CA.
- 39) Inagaki, A. (Tokyo Institute of Technology) : Evaluation of the inner-scaling similarity of turbulence over urban-like roughness derived from an outdoor scale model experiment, Seventh Symposium on the Urban Environment, American Meteorological Society, 10-13 September 2007, San Diego, CA.
- 40) T. Kinouchi, M. Miyamoto: Application of WEP model to a highly urbanized watershed in Tokyo, International Seminar on the Distributed Watershed Modeling and Application, KICT, Feb., 2007.

国内学会

- 1) 逸見淳子（日本工業大学）：実大建物の鉛直外壁面における対流熱伝達率の測定，日本建築学会関東支部研究報告集，日本建築学会，2003.3.7.
- 2) 木内 豪（土木研究所）：都市の水利用が公共用水域に及ぼす熱的影響の長期的変化—東京都区部下水道と東京湾を事例として—，土木学会水理講演会，早稲田大学，2003.3.12.
- 3) 森脇 亮（東京工業大学）：都市接地層における乱流プロファイルの大気安定度依存性，土木学会水理講演会，早稲田大学，2003.3.12.
- 4) 河合 徹（東京工業大学）：都市を対象とした3次元高精度・低計算負荷・放射解析モデルの提案，土木学会水理講演会，早稲田大学，2003.3.12.
- 5) 稲垣厚至（東京工業大学）：非一様地表面加熱場に生じるエネルギーインバランス，土木学会水理講演会，早稲田大学，2003.3.12.
- 6) 木内 豪（土木研究所）：都市の水・エネルギー利用が水域に及ぼす熱影響のモデル化—東京都区部下水処理場月別放流水温の推定—，水文・水資源学会 2003 年度研究発表会，アクロス福岡国際会議場，2003.7.31.
- 7) 神田 学（東京工業大学）：「観測から見た熱帯夜の形成機構」に関するコメント—都市の大気物理環境解明に向けた3つの提案—，日本気象学会 2003 年度春季大会，つくば国際会議場，2003.5.21.
- 8) 神田 学：都市気象と水・熱循環，日本気象学会水循環シンポジウム—21 世紀の研究課題と展望—，日本気象学会 2003 年度春季大会，つくば国際会議場，2003.5.21.
- 9) 森岡 勲（當木工事）：傾斜屋根を有する2次元配列における交換係数の分布—都市域における各構成面別の交換係数に関する風洞実験（その1）—，2004 年度日本建築学会大会，北海道大学，2004.8.29-31.
- 10) 鈴木直人（日本工業大学）：3次元立方体配列における交換係数の分布—都市域における各構成面別の交換係数に関する風洞実験（その2）—，2004 年度日本建築学会大会，北海道大学，2004.8.29-31.
- 11) 高野武将（大成温調）：都市域における樹木の蒸散特性—オアシス効果に関する野外実験（その1）—，2004 年度日本建築学会大会，北海道大学，2004.8.29-31.
- 12) 伊牟田航生（九州大学）：ろ紙蒸発法に基づく平滑濡れ面の伝達率測定—オアシス効果に関する野外実験（その2）—，2004 年度日本建築学会大会，北海道大学，2004.8.29-31.
- 13) 小林文明（防衛大学校）：夏季東京都心周辺におけるドップラーソーダ観測—対流雲発生時の下層大気構造を捉える試み—，日本気象学会 2004 年度春季大会，気象庁，2004.5.16-19.
- 14) 金賀将彦（東京工業大学）：屋外模型都市実験による顕熱輸送効率の検討，土木学会第 59 回年次学術講演会，愛知工業大学，2004.9.8-10.

- 15) 中山 有 (東京工業大学) : 下水道を介した都市からの熱流出過程に関する観測研究, 土木学会第 59 回年次学術講演会, 愛知工業大学, 2004.9.8-10.
- 16) 宮本 守 (JST/福島大学) : 荒川下流部における河川水温の上昇傾向と都市排水の影響, 2005 年水文・水資源学会研究発表要旨集, 2005.8.
- 17) 宮本 守 (JST/福島大学) : 冬期の荒川下流域における水・熱輸送の実態解明, 土木学会第 60 回年次学術講演会, 早稲田大学, 2005.9.7-9.
- 18) 木村 聖 (九州大学) : 2 次元都市キャノピー空間の気流性状及び熱収支に関する屋外観測 第 1 報 気流分布及び気温分布, 2005 日本建築学会大会, 近畿大学, 2005.9.1-3.
- 19) 萩島 理 (九州大学) : 2 次元都市キャノピー空間の気流性状及び熱収支に関する屋外観測 第 2 報 対流熱伝達率, 2005 日本建築学会大会, 近畿大学, 2005.9.1-3.
- 20) 武藤 順 (栄進中学校) : スケールモデルによる都市キャノピーのエネルギー交換過程に関する野外実験 その 1 実験概要と濾紙面蒸発法, 2005 日本建築学会大会, 近畿大学, 2005.9.1-3.
- 21) 成田健一 (日本工業大学) : スケールモデルによる都市キャノピーのエネルギー交換過程に関する野外実験 その 2 アナロジーの検証と構成面別のフラックス寄与, 2005 日本建築学会大会, 近畿大学, 2005.9.1-3.
- 22) 稲垣厚至 (東京工業大学) : 屋外準実スケール模型都市における乱流特性の鉛直分布, 土木学会第 60 回年次学術講演会, 早稲田大学, 2005.9.7-9.
- 23) 河合 徹 (東京工業大学) : 屋外模型都市実験の性能評価と都市熱環境の検討, 土木学会第 60 回年次学術講演会, 早稲田大学, 2005.9.7-9.
- 24) 森脇 亮 (東京工業大学) : 都市キャノピー内における冬季夜間の CO₂ の高濃度現象, 土木学会第 60 回年次学術講演会, 早稲田大学, 2005.9.7-9.
- 25) 小田僚子 (東京工業大学) : 東京湾および都市における冬期の大気—表面間熱収支の相違, 土木学会第 60 回年次学術講演会, 早稲田大学, 2005.9.7-9.
- 26) 小川弘子 (防衛大学校) : 都市キャニオンにおける風速プロファイル, 日本気象学会 2006 年度春季大会, つくば, 2006.5.23.
- 27) 小田僚子 (東京工業大学) : 東京湾における気温と海表面温度の関係, 日本気象学会 2006 年度春季大会, つくば, 2006.5.24.
- 28) 栗田 進 (気象研究所) : 局在する都市の大気境界層に関する風洞実験と LES モデルの比較実験, 日本気象学会 2006 年度春季大会, つくば, 2006.5.24.
- 29) 萩島 理 (九州大学) : 屋外都市スケールモデル COSMO におけるキャノピー内の温度場と気流場の観測, 日本建築学会大会, 2006.9.9.
- 30) 永山浩二 (九州大学) : 複雑形状都市におけるバルク運動量輸送係数パラメータリゼーションのための風洞模型実験, 日本建築学会大会, 2006.9.9.

- 31) 鈴木直人 (日本工業大学) : 3 次元立方体配列の全構成面交換係数比率—都市域における各構成面別の交換係数に関する風洞実験 (その 3), 日本建築学会大会, 2006.9.9.
- 32) 森泉孝信 (東京工業大学) : 低層住宅街における温位・CO₂・H₂O の鉛直分布と拡散係数, 土木学会第 61 回年次学術講演会, 立命館大学, 2006.9.22.
- 33) 廣岡 智 (東京工業大学) : 屋外都市・準実スケールモデル COSMO における乱流組織構造, 土木学会第 61 回年次学術講演会, 立命館大学, 2006.9.22.
- 34) 小川弘子 (防衛大学校) : 都市キャニオンにおける風速プロファイル, 日本気象学会 2006 年度春季大会, つくば, 2006.5.23.
- 35) 小田僚子 (東京工業大学) : 東京湾における気温と海表面温度の関係, 日本気象学会 2006 年度春季大会, つくば, 2006.5.24.
- 36) 栗田 進 (気象研究所) : 局在する都市の大気境界層に関する風洞実験と L E S モデルの比較実験, 日本気象学会 2006 年度春季大会, つくば, 2006.5.24.
- 37) 森泉孝信 (東京工業大学) : 低層住宅街における温位・CO₂・H₂O の鉛直分布と拡散係数, 土木学会第 61 回年次学術講演会, 立命館大学, 2006.9.22.
- 38) 廣岡 智 (東京工業大学) : 屋外都市・準実スケールモデル COSMO における乱流組織構造, 土木学会第 61 回年次学術講演会, 立命館大学, 2006.9.22.
- 39) 末永 啓 (九州大学) : 複雑形状都市におけるバルク輸送係数モデル化のための風洞実験, 日本建築学会大会, 2007.8.29-31.
- 40) 萩島 理 (九州大学) : 複雑形状都市におけるバルク運動量輸送係数パラメータリゼーションのための風洞模型実験 第二報 境界層厚さ, 粗度長, ゼロ面変位の推定, 日本建築学会大会, 2007.8.29-31.
- 41) 成田健一 (日本工業大学) : 建物高さが不均一な街区の交換速度—都市域における各構成面別の交換係数に関する風洞実験 (その 4), 日本建築学会大会, 2007.8.29-31.
- 42) 小田僚子 (東京工業大学) : 東京湾における乱流フラックスの季節変化, 第 53 回風に関するシンポジウム, 東京, 2007.6.21
- 43) 森脇 亮 (東京工業大学) : 都市キャノピーにおけるフラックス・気温プロファイルの空間代表性, 第 53 回風に関するシンポジウム, 東京, 2007.6.21
- 44) 森脇 亮 (東京工業大学) : 屋外都市スケールモデルを用いた遮断蒸発実験, 水文・水資源学会 2007 年度研究発表会, 名古屋, 2007.7.25-27
- 45) 木内 豪 (福島大学) : 都市河川流域における水・熱輸送のモデリング—神田川流域を対象に—, 水文・水資源学会 2007 年研究発表会, 名古屋, 2007.7.25-27
- 46) 稲垣厚至 (東京工業大学) : 屋外都市模型上における接地境界層乱流特性, 日本

流体力学会年会 2007, 東京, 2007.8.6-8

- 47) 森泉孝信 (東京工業大学) : 都市キャノピーにおける温位・CO₂・H₂O の鉛直分布と拡散係数, 日本流体力学会年会 2007, 東京, 2007.8.6-8
- 48) 森脇 亮 (東京工業大学) : PIV を用いた屋外都市スケールモデルでの乱流計測, 日本流体力学会年会 2007, 東京, 2007.8.6-8
- 49) 森脇 亮 (東京工業大学) : 屋外模型都市における PIV を用いた乱流計測, 土木学会第 62 回年次学術講演会, 東広島, 2007.9.12-14.
- 50) 河合 徹 (東京工業大学) : 長期観測に基づいた都市熱収支の相互比較と季節性に対する検討, 土木学会第 62 回年次学術講演会, 東広島, 2007.9.12-14.
- 51) 仲吉信人 (東京工業大学) : 屋外都市スケールモデルを用いた降雨中遮断蒸発の検討, 土木学会第 62 回年次学術講演会, 東広島, 2007.9.12-14.
- 52) 近藤由美 (東京工業大学) : 気象モデルのための都市植生のオアシス効果のモデリング, 土木学会第 62 回年次学術講演会, 東広島, 2007.9.12-14.

③ ポスター発表 (国内会議45件, 国際会議18件)

国際学会

- 1) Hagishima, A. (Kyushu University): Sensitivity analysis of factors of urban heat islands of various meteorological regions using the urban canopy model, Fifth International Conference on Urban Climate, International Association of Urban Climate, Lodz, Poland, 1-5 September 2003.
- 2) Sugawara, H. (National Defense Academy of Japan): Re-examination of city air temperature in heat island intensity evaluation –case study in Seoul Korea–, Fifth International Conference on Urban Climate, International Association of Urban Climate, Lodz, Poland, 1-5 September 2003.
- 3) Moriwaki, R. (Tokyo Institute of Technology): Seasonal and diurnal variations of radiation, heat, water vapor and CO₂ fluxes over a suburban area, Fifth International Conference on Urban Climate, International Association of Urban Climate, Lodz, Poland, 1-5 September 2003.
- 4) Kawai, T. (Tokyo Institute of Technology): A simple 3D urban street canyon model for meso scale simulation, Fifth International Conference on Urban Climate, International Association of Urban Climate, Lodz, Poland, 1-5 September 2003.
- 5) Kawai, T. (Tokyo Institute of Technology): A simple 3-dimensional urban energy balance model and outdoor scale model experiments, 5th Symposium on the Urban Environment, American Meteorological Society, Vancouver, BC, Canada, 23-27 August 2004.
- 6) Inagaki, A. (Tokyo Institute of Technology): The impact of the surface heterogeneity on the energy imbalance problem using LES, 5th Symposium on the Urban Environment, American Meteorological Society, Vancouver, BC, Canada, 23-27 August 2004.
- 7) Hagishima, A. (Kyushu University): Comparisons of various experimental results on the convective heat transfer coefficient of urban surfaces, 5th Symposium on the Urban

Environment, American Meteorological Society, Vancouver, BC, Canada, 23-27 August 2004.

- 8) Moriwaki, R. (Tokyo Institute of Technology) : Diurnal, seasonal, and annual fluxes of energy and CO₂ in a residential (suburban) area of Tokyo, FLUXNET 2004 Open Workshop, Firenze, Italy, 13-15 December 2004.
- 9) Moriwaki, R. (Tokyo Institute of Technology) : Highly accumulated carbon dioxide within a suburban canopy layer in winter night, The 16th Regional Conference of Clean Air and Environment in Asian Pacific Area, Tokyo, Japan, 2005.8.2-3.
- 10) Kawai, T. (Tokyo Institute of Technology) : The first results from outdoor scale model experiments for urban climate, The 16th Regional Conference of Clean Air and Environment in Asian Pacific Area, Tokyo, Japan, 2005.8.2-3.
- 11) Oda, R. (Tokyo Institute of Technology) : Seasonal and diurnal pattern of energy, H₂O and CO₂ fluxes over Tokyo Bay, The 16th Regional Conference of Clean Air and Environment in Asian Pacific Area, Tokyo, Japan, 2005.8.2-3.
- 12) Kholid Ridwan, M. (Tokyo Institute of Technology) : Introducing building architectural aspects in the urban canopy model, The 16th Regional Conference of Clean Air and Environment in Asian Pacific Area, Tokyo, Japan, 2005.8.2-3.
- 13) Castillo, M.C.L. (Tokyo Institute of Technology) : Influence of various heat flux scenarios on the statistics of large-eddy simulations, The 16th Regional Conference of Clean Air and Environment in Asian Pacific Area, Tokyo, Japan, 2005.8.2-3.
- 14) Ogawa, H. (National Defense Academy of Japan) : Heat balance and flow pattern in the real building canopy, The 16th Regional Conference of Clean Air and Environment in Asian Pacific Area, Tokyo, Japan, 2005.8.2-3.
- 15) Oda, R. (Tokyo Institute of Technology) : Evaluation of seasonal pattern of energy, water and carbon dioxide fluxes over Tokyo bay, Sixth Symposium on the Urban Environment, American Meteorological Society, 29 January-2 February 2006, Atlanta, GA.
- 16) Inagaki, A. (Tokyo Institute of Technology) : The numerical experiment of the energy and CO₂ imbalance problem using LES, Sixth Symposium on the Urban Environment, American Meteorological Society, 29 January-2 February 2006, Atlanta, GA.
- 17) Kholid Ridwan, M. (Tokyo Institute of Technology) : Introducing building architectural aspects in the urban canopy model, , Sixth Symposium on the Urban Environment, American Meteorological Society, 29 January-2 February 2006, Atlanta, GA.
- 18) Hagishima, A. (Kyushu University) : Field measurement on air temperature distribution around regular cubic arrays on COSMO site, The 6th International Conference on Urban Climate Göteborg, Sweden, June 12th - 16th 2006.

国内学会

- 1) 森脇 亮 (東京工業大学) : 都市接地境界層における運動量のシアー関数, 日本気象学会 2003 年度春季大会, つくば国際会議場, 2003.5.21-23.
- 2) 森脇 亮 (東京工業大学) : 都市における運動量フラックスの鉛直分布とシアー関数, 2003 年度水文・水資源学会研究発表会, アクロス福岡国際会議場, 2003.8.1.

- 3) 河合 徹 (東京工業大学) : 3次元簡易都市キャノピーモデルの構築と屋外模型都市実験による検証, 2003年度水文・水資源学会研究発表会, アクロス福岡国際会議場, 2003.8.1.
- 4) 木本 由花 (東京工業大学) : 都市キャノピー内外における温位プロファイル, 2003年度水文・水資源学会研究発表会, アクロス福岡国際会議場, 2003.8.1.
- 5) 笠松扶美 (東京工業大学) : LESによる都市建物群内外の数値シミュレーション, 2003年度水文・水資源学会研究発表会, アクロス福岡国際会議場, 2003.8.1.
- 6) 伊藤 晃佳 (日本自動車研究所) : RAMSを用いた関東圏における気象シミュレーション～高精度化に向けた検討～, 第44回大気環境学会年会, 2003.
- 7) 河合 徹 (東京工業大学) : 3次元簡易都市放射解析モデルの構築と検証, 日本気象学会 2004年度春季大会, 気象庁, 2004.5.16-19.
- 8) 森脇 亮 (東京工業大学) : 都市キャノピー内外における乱流統計量プロファイル, 日本気象学会 2004年度春季大会, 気象庁, 2004.5.16-19.
- 9) 稲垣厚至 (東京工業大学) : 非一様地表面加熱場での点計測乱流量に基づく領域熱収支, 水文・水資源学会 2004年研究発表会, 室蘭工業大学, 2004.8.19-21
- 10) 稲垣厚至 (東京工業大学) : LESによるエネルギーとCO₂に関する点計測インバランスの評価, 日本気象学会 2005年度春季大会, 東京大学本郷キャンパス, 2005.5.16-17.
- 11) 小田僚子 (東京工業大学) : 東京湾及び都市における冬季のフラックス比較—熱収支・CO₂フラックスの相違—, 日本気象学会 2005年度春季大会, 東京大学本郷キャンパス, 2005.5.16-17.
- 12) 鈴木菊男 (防衛大学) : ガストフロントの微細構造 (2), 日本気象学会 2005年度春季大会, 東京大学本郷キャンパス, 2005.5.16-17.
- 13) 金賀将彦 (東京工業大学) : 屋外都市準実スケールモデル実験の紹介とその地表特性の基礎的検討, 日本気象学会 2005年度春季大会, 東京大学本郷キャンパス, 2005.5.16-17.
- 14) 森脇 亮 (東京工業大学) : 低層住宅街における冬季のCO₂, H₂O, 温位の鉛直分布特性, 日本気象学会 2005年度春季大会, 東京大学本郷キャンパス, 2005.5.16-17.
- 15) 小川弘子 (防衛大学) : 建物群における熱フラックスと気流場の実測, 日本気象学会 2005年度春季大会, 東京大学本郷キャンパス, 2005.5.16-17.
- 16) 小田僚子 (東京工業大学) : 東京湾および都市における冬期のエネルギー・CO₂フラックスの特徴, 水文・水資源学会 2005年度研究発表会, 筑波大学, 2005.8.3-5.
- 17) 河合 徹 (東京工業大学) : 屋外模型都市実験の性能評価と都市熱環境の検討, 水文・水資源学会 2005年度研究発表会, 筑波大学, 2005.8.3-5.
- 18) 森脇 亮 (東京工業大学) : 都市キャノピー内における冬季のCO₂・温位・H₂Oプロファイル, 水文・水資源学会 2005年度研究発表会, 筑波大学, 2005.8.3-5.

- 19) 稲垣厚至 (東京工業大学) : 屋外模型都市における接地境界層内の乱流特性の鉛直分布 水文・水資源学会 2005 年度研究発表会, 筑波大学, 2005.8.3-5.
- 20) 中山 有 (東京工業大学) : 都市下水道による熱輸送に関する観測研究, 水文・水資源学会 2005 年度研究発表会, 筑波大学, 2005.8.3-5.
- 21) 小川弘子 (防衛大学) : 建物キャノピー内の気流場と風速プロファイル, 日本気象学会 2005 年度秋季大会, 神戸大学六甲台地区, 2005.11.20-22.
- 22) 稲垣厚至 (東京工業大学) : 屋外都市スケールモデルにおける乱流統計量の鉛直分布, 日本気象学会 2006 年度春季大会, つくば, 2006.5.21.
- 23) 廣岡 智 (東京工業大学) : 屋外都市・準実スケールモデル COSMO における乱流組織構造, 日本気象学会 2006 年度春季大会, つくば, 2006.5.22.
- 24) 河合 徹 (東京工業大学) : 屋外模型都市実験による空気力学的都市地表面パラメーターの検討と簡易都市エネルギーバランスモデル (SUMM) への適用, 日本気象学会 2006 年度春季大会, つくば, 2006.5.23.
- 25) 菅原広史 (防衛大学校) : 都市キャニオン内における建物高さスケールの渦の形成, 日本気象学会 2006 年度春季大会, つくば, 2006.5.23.
- 26) Kholid Ridwan, M. (東京工業大学) : Introducing Building Architectural Aspects in the Simple Urban Canopy Model, 日本気象学会 2006 年度春季大会, つくば, 2006.5.24.
- 27) 稲垣厚至 (東京工業大学) : 屋外都市スケールモデルにおける乱流統計量の鉛直分布, 日本気象学会 2006 年度春季大会, つくば, 2006.5.21.
- 28) 廣岡 智 (東京工業大学) : 屋外都市・準実スケールモデル COSMO における乱流組織構造, 日本気象学会 2006 年度春季大会, つくば, 2006.5.22.
- 29) 河合 徹 (東京工業大学) : 屋外模型都市実験による空気力学的都市地表面パラメーターの検討と簡易都市エネルギーバランスモデル (SUMM) への適用, 日本気象学会 2006 年度春季大会, つくば, 2006.5.23.
- 30) 菅原広史 (防衛大学校) : 都市キャニオン内における建物高さスケールの渦の形成, 日本気象学会 2006 年度春季大会, つくば, 2006.5.23.
- 31) Kholid Ridwan, M. (東京工業大学) : Introducing Building Architectural Aspects in the Simple Urban Canopy Model, 日本気象学会 2006 年度春季大会, つくば, 2006.5.24.
- 32) 小林文明 (防衛大学校) : 夏季東京都心周辺における積乱雲の発生過程—2004 年 8 月 10 日の事例—, 日本気象学会春季大会, つくば, 2006.5
- 33) 小林文明 (防衛大学校) : 夏季東京都心周辺における積乱雲の発生時の下層風系—2004 年 8 月 10 日の事例—, 日本気象学会秋季大会, 名古屋, 2006.10
- 34) 小林文明 (防衛大学校) : 夏季晴天時に東京都心周辺で形成される熱的低気圧, 日本気象学会春季大会, 東京, 2007.5

- 35) 小林文明(防衛大学校):夏季晴天時に東京都心で発生する積乱雲(1),日本大気電気学会第77回研究発表会,名古屋,2007.7
- 36) 小林文明(防衛大学校):2004年夏季晴天時南関東におけるファーストエコーの出現特性,日本気象学会秋季大会,札幌,2007.10(予定)
- 37) Kadarasa, Aldrian, E. (東京工業大学): Application of REMOTE to study of the spreading of forest fire smoke in the atmosphere over Indonesia 1996-1998, 日本気象学会 2007年度春季大会, 東京, 2007.5.13-16.
- 38) 稲垣厚至(東京工業大学):都市接地境界層内部スケールによる乱流統計量の相似性,日本気象学会 2007年度春季大会, 東京, 2007.5.13-16.
- 39) 津國眞明(東京工業大学):屋外模型都市におけるPIVを用いた乱流計測,日本気象学会 2007年度春季大会, 東京, 2007.5.13-16.
- 40) 小田僚子(東京工業大学):東京湾内全域における海表面温度連続自動計測システム,日本気象学会 2007年度春季大会, 東京, 2007.5.13-16.
- 41) 仲吉信人(東京工業大学):屋外模型都市における遮断蒸発特性に関する研究,日本気象学会 2007年度春季大会, 東京, 2007.5.13-16.
- 42) 近藤由美(東京工業大学):気象モデルのための都市植生オアシス効果のモデリング,日本気象学会 2007年度春季大会, 東京, 2007.5.13-16.
- 43) 廣岡 智(東京工業大学):乱流組織構造の定量的把握,日本気象学会 2007年度春季大会, 東京, 2007.5.13-16.
- 44) 河合 徹(東京工業大学):大規模屋外模型都市実験より得られた熱収支の年変化,水文・水資源学会 2007年度研究発表会,名古屋,2007.7.25-27
- 45) 小田僚子(東京工業大学):東京湾における冬季の海表面温度と海上気温変化,水文・水資源学会 2007年度研究発表会,名古屋,2007.7.25-27

(4)特許出願
なし

(5)受賞等

①受賞

神田 学(東京工業大学)	水文・水資源学会 学術賞	2003年
森脇 亮(東京工業大学)	水文・水資源学会 論文奨励賞	2004年
妹尾泰史(東京工業大学)	土木学会 水工学論文奨励賞	2004年
稲垣厚至(東京工業大学)	AMS 5th Urban Symposium Student Paper Competition, Runner-up of the prize for best poster)	
	土木学会 水工学論文奨励賞	2006年
谷本 潤(九州大学)	日本建築学会 学会賞(論文)	2006年
小林文明(防衛大学校)	大気電気学会 学術研究賞	2007年
廣岡 智(東京工業大学)	土木学会 水工学論文奨励賞	2007年

②新聞報道

朝日新聞社説 (2004. 8. 22) に水文グループの研究成果が引用.
 科学新聞 (2005. 4. 29) 「戦略的創造研究推進事業 vol. 68」
 朝日新聞 (2006. 8. 6), 「都心生まれの積乱雲」
 朝日新聞 (2007. 6. 5), 「気象災害にレーダ網」
 読売新聞 (2007. 7. 13) 「都会を冷やせ」

③その他

テレビ朝日「素敵な宇宙船地球号」(2006. 8. 27 放映) でスケールモデル実験が紹介
 CBC (中部日本放送) ラジオ「多田しげおの気分爽快！」で都市豪雨について解説
 朝日新聞朝刊 be「竹内敬二のどうする」にて水文 G の研究成果が紹介 (2005/12/5)
 TBS ラジオ「森本毅郎スタンバイ！」にて水文 G の研究成果が紹介 (2006/3/8)
 TBS テレビ「イブニング・ファイブ」にて水文 G の研究成果が紹介 (2006/3/13)

(6)その他特記事項

- ・第7回国際都市気象学会(ICUC-7)を2009年横浜で主催することが決定
- ・久が原タワー観測のデータが都市キャノピーモデルの相互実験の検証データとして使用される予定

7 研究期間中の主な活動

ワークショップ・シンポジウム等

年月日	名称	場所	参加人数	概要
平成 15 年 2 月 25 日	H14 年度研究成果および H15 年度計画会議	日本工業大学	8 名	H14 年度の研究進捗状況を情報共有し、これに基づき H15 年度の研究計画の方針を決定した。
平成 15 年 4 月 4 日	首都圏から東京湾への熱負荷に関するデータ解析についての打合せ	東京工業大学 神田研究室	4 名	都市が水圏に及ぼすインパクトを評価するためのデータ解析について議論した。
平成 15 年 4 月 23 日	スケールモデルに関する研究打ち合わせ	東京工業大学 神田研究室	7 名	スケールモデルの設計について検討を行った。
平成 15 年 5 月 7 日	日本工業大学スケールモデル kick of meeting	東京工業大学	4 名	JST 本部の方を招き、スケールモデルの展望について意見交換した。
平成 15 年 6 月 30 日	スケールモデル打合せ	日本工業大学	5 名	スケールモデルの入札スケジュールおよび予備実験について検討した。
平成 15 年 7 月 16 日	スケールモデル研究会	東京工業大学	8 名	コンクリート平板における実験の最新報告および今後の研究計画が議論された。

平成 15 年 11 月 5 日	スケールモデル打合せ	東京工業大学	8 人	ピンコロ入札仕様およびスケールモデル今後の予定が確認された。
平成 15 年 12 月 22 日	研究中間報告会及び打合せ	東京工業大学 神田研究室	9 人	全体ミーティングが行われ、各メンバーの研究進捗状況が報告され議論が行われた。
平成 16 年 2 月 4 日	スケールモデル打合せ	日本工業大学 成田研究室	6 人	小スケールモデルの問題点およびフラット面観測の現状報告と問題点の抽出が行われた。
平成 16 年 3 月 11 日	スケールモデル打合せ	日本工業大学 成田研究室	5 人	ブロックのサンプルチェックを行い改善点を議論した。
平成 16 年 3 月 22 日	野外観測に関する打合せ	東京工業大学 神田研究室	10 人	平成 16 年度に行う観測計画について議論が行われた。
平成 16 年 4 月 14 日	スケールモデル観測作業及び打合せ	日本工業大学 成田研究室	5 人	平板オアシス実験の報告と今後の観測作業の検討を行った。
平成 16 年 4 月 23 日	スケールモデル及び野外観測に関する打合せ	東京工業大学 神田研究室	9 人	フラット面(塗装後)観測に対する報告が行われ、ブロックの搬入スケジュールについて議論が行われた。
平成 16 年 5 月 12 日	現地観測に関する打合せ	東京工業大学 神田研究室	9 人	桜堤における観測計画の内容が検討された。
平成 16 年 7 月 9 日	スケールモデル実験研究打ち合わせ	日本工業大学 成田研究室	6 人	大スケール実験の今後の観測計画について意見交換を行った。
平成 16 年 9 月 10 日	都市-水圏インパクト研究打ち合わせ	東京工業大学 神田研究室	4 人	現地観測の現状報告と今後の研究計画について議論が行われた。
平成 16 年 9 月 11 日～18 日	桜堤団地の観測打ち合わせ	東京都武蔵野市 桜堤団地	4 人	現地での観測打ち合わせ、準備作業が行われた。
平成 16 年 10 月 21 日	スケールモデル打合せ	日本工業大学 成田研究室	8 人	スケールモデルで今後行う研究についてフリーディスカッションが行われた。
平成 16 年 11 月 16 日	水圏インパクト研究打ち合わせ	東京工業大学 神田研究室	5 人	下水処理場の観測結果が報告され、今後の方針について検討が行われた。
平成 16 年 12 月 22 日	神田チーム年末会合 成果発表と議論	東京工業大学 神田研究室	16 人	全体ミーティングが行われ、各メンバーの研究進捗状況が報告され議論

				が行われた。
平成 17 年 1 月 26 日	スケールモデル打ち 合わせ	日本工業大 学 成田研究室	8 人	ピンコロ内側表面温度、 気温測定に関する作業 報告と今後の計画につ いて話し合った。
平成 17 年 2 月 2 日	水文グループ研究打ち 合わせ	東京工業大 学 神田研究室	4 人	東京湾の水熱収支につ いて議論が行われ、今後 の計画について確認を 行った。
平成 17 年 4 月 15 日	水圏インパクト研究打 ち合わせ	東京工業大 学 神田研究室	5 人	水圏グループによりデー タ解析の進捗状況につ いて確認を行い今後の 方針を議論した。
平成 17 年 6 月 22 日	スケールモデル会合 - 経過報告と今後の予定 について	日本工業大 成田研究室	11 人	熱流板・濾紙実験・シン チロメータの結果が報告 され、内容について検討 した。
平成 17 年 7 月 11 日	水圏インパクト研究打 ち合わせ	東京工業大 学 神田研究室	4 人	水圏グループにより論文 のとりまとめ方針につ いて議論が行われた。
平成 17 年 9 月 16 日	CREST 特別講演会	東京工業大 学	20 人	ハノーバー大学のシギー 教授による超並列数値シ ミュレーションに関する特 別講演会を開催し、内外 からの多くの参加者によ って活発な質疑が行わ れた。
平成 18 年 5 月 26 日	スケールモデルミーテ ィング	東京工業大 学	10 人	スケールモデル実験の 経過報告および今後の 計画について議論
平成 18 年 7 月 25 日	チーム全体ミーティング	東京工業大 学	18 人	参加者の研究進捗状況 について議論
平成 18 年 9 月 13 日	チーム全体ミーティング	東京工業大 学	10 人	今後の研究とりまとめ方 針を議論
平成 18 年 10 月 5 日	Gunter Gross 氏(ハノ ーバー大学教授) 講 演	東京工業大 学	15 人	大気拡散の数値シミュレ ーションに関する講演
平成 19 年 2 月 6 日	チーム全体ミーティング	東京工業大 学	10 人	サブグループ間の連携と 今後のまとめに向けた議 論
平成 19 年 3 月 26 日	都市乱流シミュレーショ ンに関する打ち合わせ	東京工業大 学	3 人	超並列 LES モデルを用 いた都市乱流シミュレー ションに関する打ちわ せ
平成 19 年 3 月 30 日	水文流出モデルに関 する打ち合わせ	東京工業大 学	4 人	都市-水圏の水・熱輸送 モデルの高精度化に関 する打ち合わせ

8 結び

まず、「水の循環系モデリングと利用システム」という大きな領域テーマの中で、地表面過程の一つである「都市の水・熱循環」という切り口の計画案を採択し、チャンスを与えてくださった虫明先生はじめ、アドバイザーの先生方には、深く感謝致します。中間評価の際に、「これは水循環ではなく都市気候ではないか？」という外部評価コメントがあったことに対しては、がっかりすると同時に、せっかく採択してくださった研究総括・アドバイザーの先生に申し訳ないような気がしましたが、他の多くのチームが、森林・乾燥地といった自然地を対象としている中で、水文気象分野で最もモデリングが遅れていた都市陸面の研究体系を進められたことで、多少なりとも全体の領域テーマに貢献できたのではないかと考えております。グローバル水文気象が最盛ですが、1970年代において都市の大気環境問題が決着を見たと考えるのは大きな間違いであり、近い将来、必ずやアジア地域をはじめとするメガシティの水・熱循環の問題が再燃し、予測・対策の精緻化が求められるのではないかと、危惧致しております。

CREST においては、通常の科学研究費の予算規模では絶対できないこと、学問体系に残るような仕事をやろうと、固く決意しました。その目玉が「準実スケールモデル(愛称: COSMO)」でした。世界初めての試みであり、実験モノの宿命として、設計・建設・測定器のキャリブレーションに大幅な時間がかかりましたが、走り出すと、次々と新しい知見が得られました。とりわけ、熱・水(スカラー)粗度、乱流構造、スケール相似則に関する成果は、水文気象学はもちろん、ラフネスの大きい境界層の物理過程の解明という位置づけで、広く流体力学の体系にも貢献できたものと思います。COSMO は、プロジェクト終了後も当面は存続することが決まり、Only-one の実験インフラを残せたことを大変うれしく思います。それも、JST 関係者および実験サイトを所有する日本工業大学の関係者の協力、さらには、チームメンバーである成田先生の献身的な調整の賜物です。今後、この実験インフラを、広く、世界の研究者に開放できれば、と望んでいます。

当初の研究計画の80%以上は、達成されたと考えています。久が原のフラックス観測は、1年間に渡る詳細な熱収支の連続データが得られたことにより、今後、世界的な都市気象モデルの相互比較実験の検証データの一つとして使用されることが内定しております。COSMO は立ち上げに非常に時間がかかり、モデル配列の変更などのバリエーション研究が出来ませんでした。逆に当初、期待していなかった多くの成果も得られました。それらの結果に基づくモデルの構築・検証も順調に進みました。CREST の最終年にあたり、その総括にふさわしい2つの出来事がありました。1つは、2009年の第7回世界都市気象学会(ICUC-7)を横浜で主催することが決定しました。チームメンバーがCRESTの成果を精力的に発表し、ICUCの運営に貢献してきたことが認められたものです。プロジェクト期間中、研究に専念し、シンポジウムの主催・共催を一切行いませんでしたので、プロジェクト終了後ではありますが、せめてもの救いです。CREST の人脈を利用し、ICUC-7 の運営委員も、気象・建築・土木・地理・機械、の分野横断的陣容で組織しました。今後、この分野の連携と発展に繋がることが期待されます。もう1つは、気象学会の記念号に Urban meteorology の学問体系の発展をレビュー執筆することができたことと、流体力学年会の基調講演でCOSMOの成果発表を行えたことです。これらは、本プロジェクトの意義・今後の展望を客観的に把握する、非常に良い機会になりました。

CREST の研究成果とは別に、若手の人材がこのプロジェクトを通じて育ったことは大きな収穫でした。日本のある家電メーカーが打ち出した一人屋台方式をヒントに、分業を出来るだけ避け、1名の若手研究者が1つのテーマを自己完結型に責任を持ってこなしていく方式を取りました。博士関連だけを見ても、森脇亮(タワー観測)・河合徹(COSMOのエネルギー収支・SUMMの構築)・コリッドリドワン(タワー観測データによるSUMMの検証)・稲垣厚至(COSMOの乱流構造)・小田遼子(東京湾観測)・宮本守(水文観測)、など、彼らの活動が実質上、CRESTの成果の中核を担いました。

最後に、この研究プロジェクトを支えて頂いた水循環研究事務所の皆様、領域アドバイザーの先生方、研究総括の虫明先生、JST 関係者の方々、タワー観測を見守ってくれた久が原の住民の方々、COSMO の土地を貸与してくれた日本工大関係者の方々、心からの謝辞を申し上げます。

