

## 研究課題別事後評価結果

1. 研究課題名： 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

2. 研究代表者名及び主たる研究参加者名(研究機関名・職名は研究参加期間終了時点)

研究代表者

神田 学 (東京工業大学大学院理工学研究科 准教授)

主たる共同研究者

森脇 亮 (愛媛大学大学院理工学研究科 准教授)

成田 健一 (日本工業大学工学部建築学科 教授)

谷本 潤 (九州大学大学院総合理工学研究院 教授)

萩島 理 (九州大学大学院総合理工学研究院 准教授)

八木 宏 (東京工業大学大学院理工学研究科 准教授)

木内 豪 (福島大学理工学群共生システム理工学類 准教授)

小林 文明 (防衛大学校地球海洋学科 准教授)

3. 研究内容及び成果

本研究では、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、言い換えれば、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標として、首都圏を主な研究対象地域とし、次の4つのサブグループと分担課題によって進められた。

- A. 大気グループ： 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、都市生態圏から大気圏へのフォーシングモデルの構築、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
- B. 沿岸海洋グループ： 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、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
- C. 水文グループ： 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、観測・スケール実験における水文量計測とその解析、都市生態圏から水圏へのフォーシングモデルの構築
- D. 建築微気象グループ： 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、スケール実験による都市キャノピー伝熱、流力機構のモデル化及び検証、メソスケールモデルへのリンクを前提とした都市キャノピーモデルの開発とシミュレーション研究

以下に、主な研究内容と成果の概要を列記する。

- (1) 広域水・エネルギーフラックスの実態把握： 首都圏において、(a) 固定点(久が原、東京湾、桜堤団地)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、が実施された。(a)では、久が原住宅街と東京湾の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が得られた。また、久が原で短期集中的に実施された多点同時フラックス計測により、点計測の空間分散の把握が行われた。桜堤団地では、数ヶ月に渡ってフラックス・微気象の同期観測が行われ、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が解析された。これらにより、都市モデルの検証に資する貴重なデータベースが得ら

れるとともに、冬季静穏時の都市街区内での  $\text{CO}_2$  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、などについて新たな知見が得られた。(b)、(c)では、降雨レーダーやレーザーレーダーなどのリモートセンシングや航空機・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、集中豪雨と東京湾の流動状況のモニタリングが実施された。また、1年間に渡って東京湾水温分布(14点で10分間隔)の連続計測が行われた。これらの観測結果から、東京都心で発生する積乱雲について、その発生特性、形成メカニズム、下層環境場に関する知見が整理された。東京湾については、冬季に表面水温上昇が顕著であり、初夏に低下する傾向があること、その原因は首都圏河川等からの下水処理水の流入と湾内外の海水流動にあることが明らかにされた。原因のうちの後者に対しては、数値シミュレーションによってそのメカニズム(密度流循環、海上風、外海水の進入などの役割)が説明されている。

- (2) 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：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するために、屋外空間に準実スケールのモデル都市を作成し、(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、(c)遮断蒸発量、が調べられた。

(a)については、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。(b)については、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・熱収支特性を調べる予定であったが、時間の関係で達成されなかった。それを補うため、ポット植生の分散度を制御した系統的な蒸散実験が行われ、オアシス効果の検証データが得られた。(c)についても、モデル化に資するデータが取得された。COSMOによる特筆すべき成果として、COSMOのフラックスデータが年間フラックス現地観測データと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されたこと、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、特に、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こと、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)が明らかにされたこと、COSMOと室内実験と現地観測のデータ解析を総括して、乱流相似則に及ぼす外層乱れの影響が定量化されたこと、など上げられている。

- (3) 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、大気圏モジュールと水圏モジュールで構成される。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もので、計算負荷に併せて3つのモデル、高精度モデル(LES-CITY:パラメータ算定用の超微細モデル)、標準モデル(AUSSSM:建築微気象用の詳細モデル)、および簡易モデル(SUMM:グローバルからメソスケールに渡る汎用都市陸面モデル)が開発され、検証された。LES-CITYは、複雑な都市幾何形状に容易に適用可能なモデルであり、スケールモデル実験の補間研究ツールとして開発された。このモデルによって、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、が可能になった。これを用いて、SUMMに必要な構成面バルク輸

送係数のデータセットが構築された。SUMM は、久が原とバーゼルと 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することが実証された。水圏モジュールについては、既存の分布物理型水循環モデルをベースとして、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、上下水道や排水路や河川などの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分布型水・エネルギー輸送モデルが開発された。このモデルは、神田川流域に適用され、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することが検証された。また、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て、首都圏の人工排熱・水蒸気マップ(顕熱・潜熱別、各月平均値、時間別、1km解像度)が作成された。強制圏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む完全なカップリングには至らなかったが、開発した強制力モデルを既存のメソ気象モデルと海洋モデルにリンクして、現地観測から得られたデータを同化して感度分析的検討を行い、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ことなどを明らかにした。

#### 4. 事後評価結果

##### 4-1. 外部発表(論文、口頭発表等)、特許、研究を通じての新たな知見の取得等の研究成果の状況

原著論文(国内誌56件、国際誌46件)、学会発表(招待講演:国内6件、国際6件、口頭発表:国内52件、国際40件、ポスター発表:国内45件、国際18件)、特許出願0件と、これまでに国内外への論文発表は極めて活発に行われ、4-3に示されるように論文賞に値するような成果を上げている。今後も横浜での国際学会の開催等に向けて成果のとりまとめが進むと期待される。

以下に、研究全体を通しての評価をまとめる。

- (1) 東京の市街地・住宅団地および東京湾海域と流入河川等で行われた系統的で周到的な現地観測、ならびに屋外準実スケールモデル実験COSMOにより、都市域での水・エネルギー循環について世界的にも稀な貴重なデータセットが整備されたことが、まず高く評価される。特に、久が原市街地での観測データは、世界の都市陸面モデルの相互比較実験において検証データとされることが決まっており、COSMOは、世界初の準実物大都市モデル実験であり、熱・水(スカラー)粗度、乱流構造、スケール相似則など、ラフネスの大きい境界層の物理過程の解明と検証に資する貴重なデータを提供している。
- (2) そうした観測・実験データを基盤として、新たな3つの大気圏モデルと分布型水・エネルギー輸送モデルが開発されたことは、この分野では新規性のあるユニークな成果として評価される。特に、都市陸面パラメータの汎用モデル化、都市の熱収支の一般的特徴の抽出、乱流相似則と乱流構造の普遍性の抽出などのプロセス研究において得られた新たな知見をもとに構築された大気圏モデルは、理論的構成が明確であり、都市気象・気候分野の進展に大いに貢献している。
- (3) 当初計画の目標“都市生態圏 大気圏 水圏における水・エネルギー交換過程を1つのフローとして解明する”という趣旨に照らせば、陸面過程に関する研究では多大な成果を上げているが、陸域での水・エネルギー輸送と海洋・沿岸域の研究が必ずしも十分でないと感じられる。本研究で構築された強制力モデルを気象モデルや海洋モデルにカップリングするには、これらの面での更なる研究の進展が必要であろう。

##### 4-2. 成果の戦略目標・科学技術への貢献

本研究プロジェクトの提案では、首都圏を事例研究対象として水循環系とエネルギー循環系を一

体化的に捉えようという研究計画と方法論の双方が、極めて斬新かつチャレンジングであった。この方向に沿って、市街地等と東京湾とその周辺水域において様々な計測手法を駆使した系統的な観測ならびにユニークな発想に基づく都市の準実スケールモデル実験が実施された。これらのデータセットは、ドイツ・バーゼルの都市フラックス観測データの他に類例がなく、世界的な意味でこの分野の発展に資する貴重なデータ基盤として評価されている。このデータ基盤を用いて、都市気象・気候分野においては国際的にも高いレベルのパイオニア的成果を上げている。今後、当初の目標の達成に向け、水圏における研究をさらに深化・発展させて整合性の取れた統合化がなされることを期待する。

#### 4 - 3 . その他の特記事項(受賞歴など)

##### (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
稲垣厚史(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) 神田チームの CREST 研究の成果が国際的に認知され、2009 年の第7回国際都市気象学会(ICUC-7)を横浜で主催することが決定されている。