

「水の循環系モデリングと利用システム」

平成 14 年度採択研究代表者

神田 学

(東京工業大学大学院理工学研究科 助教授)

「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」

1. 研究実施の概要

アジアのメガシティにおける都市生態圏—大気圏—水圏の水・エネルギー輸送の物理機構の解明とモデリングを目的として、以下の3本柱で研究を遂行してきました。(1) 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(現地観測)、(2) 準実スケールのモデル都市実験による水・エネルギーフラックス素過程の解明(室外実験)、(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(数値モデリング)。研究は大筋で計画通り遂行され、多くの新しい発見が得られています。その中で、特筆すべき成果は、(1) 1年以上におよぶタワー連続観測から、接地境界層で広範に用いられている既存理論の一部見直しを迫る観測事実が発見されたこと、(2) 屋外スケールモデルから、屋外観測・室内実験では得られないスケール相似則・陸面パラメータに関する知見が取得されたこと、(3) 観測・実験で得られた物理過程の本質点を考慮した、簡易な気象モデル用陸面モデルを提案したこと、です。プロジェクトの残りの期間では、これらの3本柱を推し進めると同時に、それらの成果を整理・統合し、汎用的なデータベース・モデル公開のための準備を進めたいと考えています。

2. 研究実施内容

都市生態圏—大気圏—水圏における水・エネルギー輸送には、様々な物理現象が関与しています。このような「複合性」は環境問題の大きな特徴であり、そのシステムの解明は、一つの手法でなし得るものではありません。本プロジェクトでは、(1) 現地観測、(2) スケールモデル実験、(3) コンピュータシミュレーション、という3つの方法論の特徴を活かしてこの難問の解決を目指しており、本年度は次のような成果が得られました。

(1) 都市フラックスネットの構築と水・エネルギー輸送の実態把握

実際の大都市圏においては様々な制約から環境物理データの取得が困難です。AMEDASなど地上に近いルーチン観測網は充実していますが、とりわけ現象の解明の鍵を握る上空大気のフラックスデータが不足しています。そこで、土木・建築・気象・水文などの専門家集団からなる本グループは、久が原住宅街・東京湾の2カ所において水・エネルギーフ

ッラクス計測を時空間的に展開しました。

住宅街の観測ステーションからは以下のような成果が得られました。(1) 夜間安定時における都市キャノピー内での高濃度 CO_2 現象、および最高気温の出現高度の季節依存性（冬は屋根面・夏は道路面）、の発見。(2) モーニン・オブコフ相似則の修正、スカラー輸送の物理的非相似性の指摘。

東京湾ステーションでは一年を通した通年観測から、以下のような成果が得られました。(1) 冬季の熱・水・ CO_2 のフラックス挙動の把握。特に、強風時には陸域の発生量に匹敵する CO_2 が東京湾で吸収されていること、および $150\text{--}250 \text{ Wm}^{-2}$ の膨大な潜熱が供給されていること。(2) 東京湾のシンク・ソース量は陸上からの移流の影響を強く受けていること。

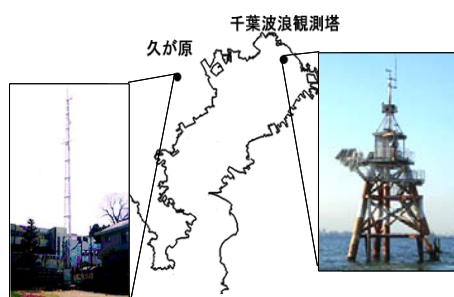


図 長期モニタリングを継続している住宅街の観測タワー（左）と東京湾フラックス観測サイト（右）

(2) 屋外準実スケール都市モデル実験

都市構造と水・エネルギー強制力の因果関係をシステマ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す。そこで、世界初の試みとして、大規模な屋外スケールモデル実験を行っています。モデルは一辺 1.5m のコンクリート製キューブ（ 20cm 厚で中は空洞）であり、初期設定として、 $50\text{m} \times 100\text{m}$ のサイトに 25% の建坪率で規則正しく配置しています。これにより、現実的な放射・大気安定度条件のもとで、都市幾何構造と水・熱・運動量フラックスの因果関係をシステマティックに解析し、モデル構築・検証に必要な貴重なデータセットを取得することが可能となります。物理相似則をチェックするために同じ材料と配置で $1/10$ のスケールモデルも作成し同じサイトに併設しました。本年度の主要な結果は以下の通りです。(1) 運動量の抵抗係数はストリートと主風向の交差角度が大きくなるほど増大するが、熱・スカラーの交換係数には風向依存性がほとんど認められない。(2) 熱収支インバランスと呼ばれる渦相関法によるフラックスの過小評価の問題が確認され、そのインバランス量は風速の増大に比して減少する。(3) 都市模型の純放射に対する熱貯留量は、風速の増大と共に減少する。(4) 超小型高サンプリング超音波風速計の多点同時計測結果から、フラックス輸送に支配的に関与する大規模な乱流組織構造（ストリーク）の時空間構造を把握。

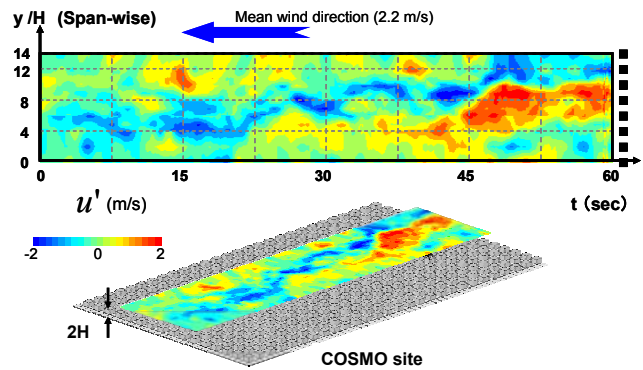


図 大規模スケールモデル（左）とモデル上に発達する大規模乱流組織構造（右）。

現地観測・準実スケールモデル実験で得られた知見を基に、都市幾何構造（建坪率・容積率・緑被率・材料物性値）、都市活動パラメータ（人口分布・経済活動・土地利用）、環境変数（太陽軌道や基準点気象・水文要素）、都市植生の蒸散生理（気孔パラメータ・LAI）、などを入力変数として大気圏・水圏への熱・水フォーシングを出力する都市生態圏強制力モデルを構築しています。都市生態圏強制力モデルは一つの物理モジュールとして、既存の気象モデル・海洋モデル・水文モデルを統合することを可能とし、ヒートアイランド、内湾汚染などの環境現象の予測精度を向上することが期待されています。

都市圏—大気圏の強制力モデルとして簡易都市キャノピーモデル(SUMM)の開発を行いました。この簡易モデル開発の目的は、現在 GCM はもちろんメソスケールモデルにも陽的には組み込まれていない都市インフラの影響を考慮した低計算負荷の物理モデルを提案することです。現況では、3次元の規則的な建物配列を前提として、多重反射ルーチン、各壁面のバルク係数、室内気温予測モデルとの結合など、従来モデルには実現されなかった困難なソルバーの開発を終えています。各構成面の乱流輸送係数を与える半経験的手法を、スケールモデルの実験結果と高精度 LES-CITY モデルの計算結果を併用して構築し、その結果を用いて小スケールモデルの各面熱収支・表面温度の結果と比較したところ、極めて良く実験結果を再現しました。

3. 研究実施体制

「大気グループ」

①研究分担グループ長：神田 学（東京工業大学、助教授）

②研究項目：

- (1) 久が原タワー観測点における水熱収支解析・物理量鉛直分布・フラックス空間分散の検討
- (2) スケールモデル実験における水熱収支計測・気温分布計測・フラックス空間分散の検討
- (3) 東京湾・オフィス街におけるフラックスネットの拡充

- (4) 簡易都市キャノピーモデル(SUMM)のスケールモデル実験との比較検証
- (5) 高精度 LES-CITY モデルのスケールモデル実験との比較検証
- (6) レーダー・ソーダー・ライダーによる首都圏の降水システム・風系の観測

「沿岸海洋グループ」

①研究分担グループ長：八木 宏（東京工業大学、助教授）

②研究項目：

- (1) 東京湾流入河川下流部における熱フラックス計測
- (2) 全国の河川，沿岸域の長期水温変化の傾向分析

「水文グループ」

①研究分担グループ長：木内 豪（福島大学、助教授）

②研究項目：

- (1) 観測・スケール実験における水文量計測とその解析
- (2) 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」

①研究分担グループ長：成田 健一（日本工業大学、教授）

②研究項目：

- (1) 集合住宅団地における熱収支観測データの解析
- (2) スケールモデル実験における熱収支及び表面伝達率観測
- (3) スケールモデル実験における熱・物質伝達に関するアナロジー検証
- (4) 濾紙蒸発法による建物表面伝達率の風洞実験
- (5) 都市内緑地でのフラックス観測と微気象測定
- (6) 風洞模型実験による複雑形状都市の抗力係数の測定
- (7) 都市域の人工排熱及び水使用量の予測モデルに関する検討

4. 主な研究成果の発表

(1) 論文（原著論文）発表

- Kanda, M., Moriwaki, R. and Kimoto, Y. : Temperature profiles within and above an urban canopy, *Boundary-Layer Meteorology*, **115**, 499-506, 2005.
- Kanda, M., Kawai, T., Kanega, M., Moriwaki, R., Narita, K., and Hagishima, A.: Simple energy balance model for regular building arrays, *Boundary-Layer Meteorology*, **116**, 423-443, 2005.
- 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.

- Kanda, M.: Progress in the scale modeling of urban climate, *Theoretical and Applied Climatology*, **84**, 23-34, 2006.
- Kanda, M., Kasamatsu, F., and Moriwaki, R.: Spatial variability of turbulent fluxes and temperature profile in an urban roughness layer, *Boundary-Layer Meteorology*, in press.
- Moriwaki, R., Kanda, M., and Nitta, H.: Carbon dioxide build-up within a suburban canopy layer in winter night, *Atmospheric Environment*, **40**, 1394-1407, 2006.
- Moriwaki, R. and Kanda, M. : Flux-gradient profiles for momentum and heat over an urban surface, *Theoretical and Applied Climatology*, **84**, 127-136, 2006.
- Moriwaki, R. and Kanda, M.: Local and global similarity in turbulent transfer of heat, water vapor, and CO₂ in the dynamic convective sublayers over a suburban area, *Boundary-Layer Meteorology*, online first, DOI: 10.1007/s10546-005-9034-4.
- Moriwaki, R. and Kanda, M.: Scalar roughness parameters for a suburban area, *Journal of the Meteorological Society of Japan* (submitted)
- Inagaki, A., Letzel, M. O., Raasch, S., and Kanda, M.: The impact of the surface heterogeneity on the energy imbalance problem using LES, *Journal of the Meteorological Society of Japan*, **84**, 187-198, 2006.
- Narita, K.: Experimental study of the transfer velocity for urban surfaces with water evaporation method, *Boundary-Layer Meteorology* (Submitted).
- Tanimoto, J., Hagishima, A., and Sagara, H.: A methodology for maximum energy requirement considering actual variation of inhabitants' behavior schedule, *Building and Environment* (Submitted).
- Tanimoto, J., Hagishima, A., and Sagara, H.: A comparison between estimated and measured time series of energy demand in residential buildings in Japan based on inhabitants' behavior schedule data, *Building and Environment* (Submitted).
- Hagishima, A., Tanimoto, J., and Narita, K.: Intercomparisons of experimental research on convective heat transfer coefficient of urban surfaces, *Boundary-Layer Meteorology*, **117**, 551-576, 2005.
- Hagishima, A. and Tanimoto, J.: Investigations of urban surface conditions for urban canopy model, *Building and Environment*, **40**, 1638-1650, 2005.
- Hagishima, A., Narita, K., and Tanimoto, J.: Field experiment on oasis effect of urban areas using potted plants, *Hydrological Processes* (Submitted).
- Kinouchi, T.: Modeling impact of long-term water and energy consumption trend in Tokyo on wastewater effluent temperature: implication for thermal degradation of urban streams, *Hydrological Processes* (Submitted).
- Kinouchi, T., Yagi, H., and Miyamoto, M.: Stream temperature increase due to anthropogenic heat input from urban wastewater, *Journal of Hydrology* (Submitted).

- Sugawara, H. and Takamura, T.: Longwave flux evaluation from directional radiometric temperature measurement over an urban canopy, *Remote Sensing of Environment* (submitted).
- 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.
- 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.
- 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.
- 小田僚子, 森脇 亮, 神田 学: 東京湾におけるエネルギー・ H_2O ・ CO_2 フラックスの季節変化, 土木学会水工学論文集, **50**, 463-468, 2006.
- 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.
- 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)ー都市域における建物外表面对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.
- 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.
- 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.
- 萩島 理, 谷本 潤, 浅野文宏: 改良・建築ー都市ー土壤連成系モデル(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** (掲載予定)
- 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.
- 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.