

「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

本研究では、都市生態圏—大気圏—水圏における水・エネルギー輸送の実態を解明すべく、現地フラックス観測、スケールモデル実験および強制力モデルの開発、を3本柱として研究を推進してきました。現地フラックス観測では、都市（大田区久が原・東京都水再生センター13カ所）および水圏（東京湾）の長期連続観測システムによる結果が揃い、東京域の大気圏・水圏における水・エネルギー輸送の全体像が明らかになりました。COSMO と命名された屋外スケールモデル実験では、エネルギー収支、スケール効果、陸面パラメータ、乱流構造、などのデータベース蓄積と解析が進み、ヒートアイランドと都市構造の因果関係を決定する物理的体系を確立しました。強制力モデルでは、簡易モデル（SUMM）、標準モデル（AUSSSM）、精密モデル（LES-CITY）の全てが完成し、気象モデルへの導入を前提として開発された SUMM では、現地フラックス観測データおよび COSMO 屋外実験データとの比較検証がなされその精度が確認されました。また、人的活動に依拠する人工廃熱・水使用量の予測を可能とする統計モデルの開発を完成させ、気象モデルに組み込むデータが完成しました。最終年度は、これらの貴重なデータベースおよびソフトウェアの一般公開を行う予定です。

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) コンピューターシミュレーション、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めざし、以下のような成果を得ました。

(1) 現地観測による水・エネルギーフラックスの実態把握

久が原住宅街・東京湾・東京都水再生センター13カ所の連続自動フラックス観測データが1年分蓄積し、水・熱・CO₂ フラックスの季節・時間変動の実態が明らかになりました。水再生センターの流量・水温データからは、下水道網が、浸出水という形で下水管に地下

水を取り込み河川まで輸送していることや、都市の人工廃熱の約1割相当が下水に排出され、夏期には河川に到達するまでにその熱の40%以上が熱伝導によって土壌圏に蓄積されることが明らかになりました（図1）。

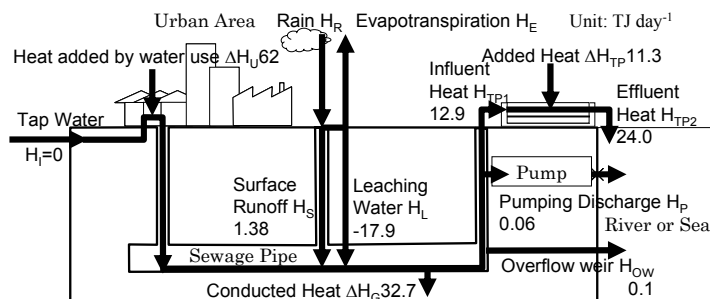


図-1 都市の夏季熱収支
(東京都23区, 2004年8月)

(2) 屋外準実スケール都市モデル実験 (COSMO)

都市幾何構造と水・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ためにデザインされた本実験は、COSMO (Comprehensive Outdoor Scale Model Experiment) と命名され、世界に発信されました。エネルギー収支、スケール効果、陸面パラメータ、乱流構造、などデータベース蓄積と解析が進みました。COSMO の1年間にわたる熱収支データと、久が原の現地フラックスデータ、および世界の都市で短期的に取得されている熱収支データを包括的に整理することにより、都市の熱収支の季節性・風速依存性などが明らかとなりました（図2）。気象モデルの中で極めて重要でありながら未知であった熱・水の輸送効率パラメータ（スカラー粗度）に関する半理論式も同定することが出来ました（図3）。また、詳細な乱流データからは、水・エネルギー輸送を担う乱流組織構造の実態が明らかにされました。このように、ヒートアイランドと都市構造の因果関係を決定する物理的体系が確立されました（図4）。

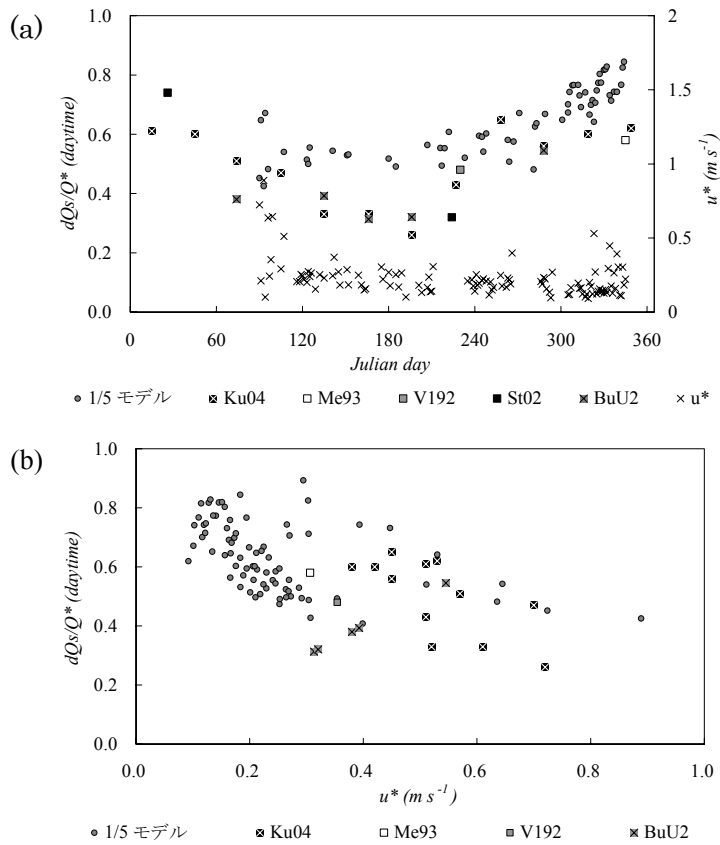


図-2 (a) $dQ_s/Q^*(daytime)$ の年変化, (b) $dQ_s/Q^*(daytime)$ と u^* の関係

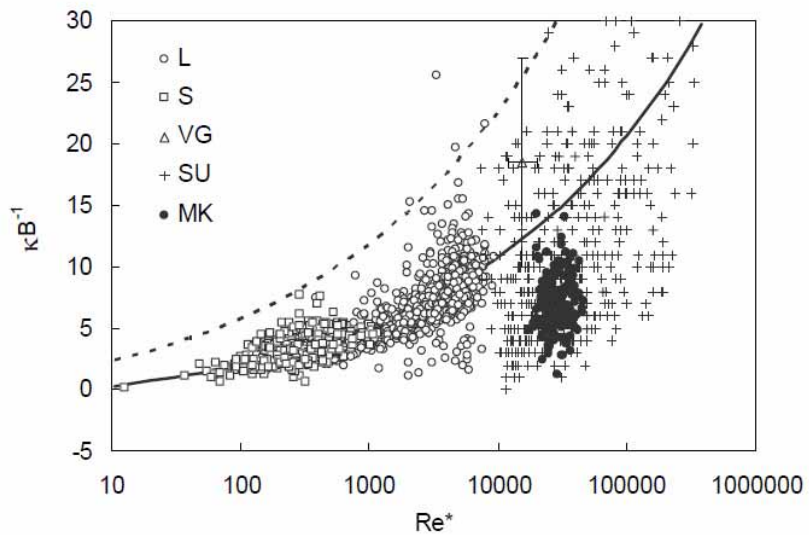


図-3 熱粗度パラメータと粗度レイノルズ数の関係 (L: COSMO(1/5), S: COSMO(1/50), VG:バンクーバー(Vogt and Grimmond 2000), SU:新宿(Sugawara 2000), MK:久が原(Moriwaki and Kanda 2004))

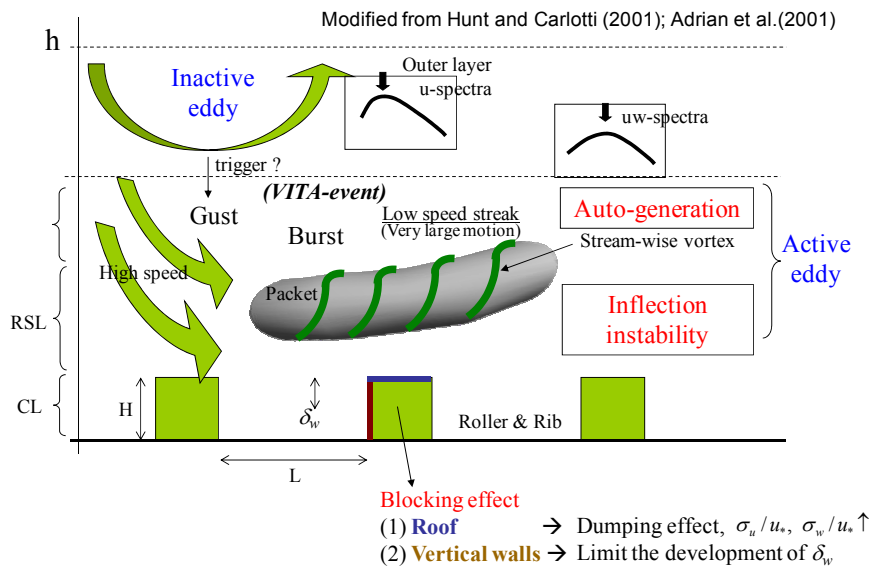


図-4 都市大気境界層における乱流構造の概念図

(3) 都市生態圏強制力モデルの構築

現地観測および COSMO 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ました。計算負荷に応じて、簡易型(SUMM)・標準型(AUSSSM)・高精度型(LES-CITY)の3モデルを開発しました。SUMMは久が原フラックス観測およびCOSMOの1年にわたる観測データ（久が原観測：2001年～2002年，COSMO：2005年～2006年）との比較検証が行われ良好な再現性が確認されました（図5）。

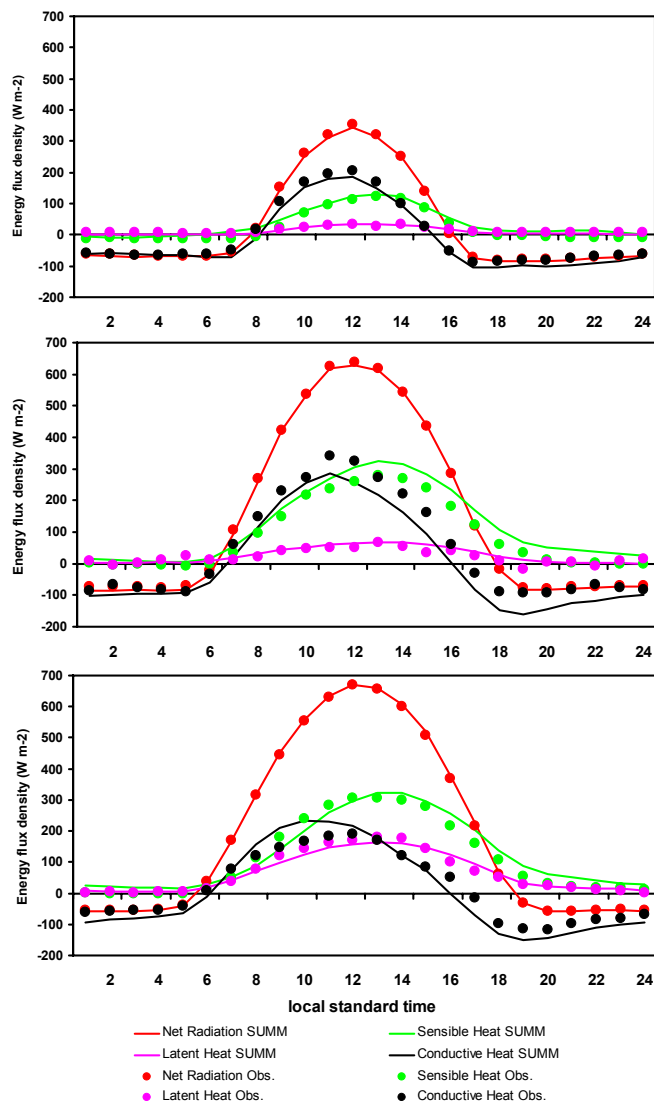


図5 熱収支の検証結果（久が原；2001年冬期，春季，夏季）

3. 研究実施体制

(1)「大気」グループ

①研究者名

神田 学(東京工業大学 助教授)

②研究項目

- ・久が原・東京湾タワー観測点における水熱収支解析結果の整理および全体像の解明
- ・スケールモデル実験における各種データベースの整理および物質交換過程の全体像の解明
- ・簡易都市キャノピーモデル(SUMM)の検証・改良

- ・高精度 LES-CITY モデルの検証・改良
- ・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

(2)「沿岸海洋」グループ

①研究者名

八木 宏(東京工業大学 助教授)

②研究項目

- ・東京湾の熱収支解析

(3)「水文」グループ

①研究者名

木内 豪(福島大学 助教授)

②研究項目

- ・観測・スケール実験における水文量計測
- ・都市生態圏から水圏へのフォーシングモデルの構築

(4)「建築微気象」グループ

①研究者名

成田 健一(日本工業大学 教授)

②研究項目

- ・集合住宅団地における熱収支観測データの解析
- ・スケールモデル実験におけるキャノピー内外多点気温分布観測
- ・スケールモデル実験における構成面別のバルク係数の把握と熱・物質伝達に関するアナロジー検証
- ・濾紙蒸発法による建物表面伝達率の風洞実験
- ・風洞模型実験による複雑形状都市の抗力係数及び床面伝達率の測定
- ・都市域の人工排熱および水使用量の予測モデルに関する検討

4. 研究成果の発表等

(1)論文発表(原著論文)

- 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
- 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

- 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
- 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
- Tanimoto, J., A. Hagishima, and H. Sagara: A methodology for maximum energy requirement considering actual variation of occupants' behavior schedule, *Building and Environment*, available online, 2006.12
- Moriwaki, R. and M. Kanda: Scalar roughness parameters for a suburban area, *Journal of the Meteorological Society of Japan*, 84, 1065-1073, 2006.12
- 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
- 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
- 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
- Narita, K.: Experimental study of the transfer velocity for urban surfaces with water evaporation method, *Boundary-Layer Meteorology*, 122, 293-320, 2007.2
- 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
- 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
- Hagishima, A., K. Narita, and J. Tanimoto: Field experiment on transpiration from isolated urban plants, *Hydrological Processes*, 21, 1217-1222, 2007.3
- Kanda, M., Kanega, M., Kawai, T., Moriwaki, R., and Sugawara, H.: Roughness lengths for momentum and heat derived from outdoor urban scale models, *Journal of Applied Meteorology and Climatology* (in press), 2007.3.
- 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
- 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
- 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, 253-258, 2007.3

- Mohammad Kholid Ridwan, Toru Kawai, Manabu Kanda, and Ryo Moriwaki: 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
- 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
- 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