

水循環系の物理的ダウンスケーリング 手法の開発

研究代表者
小池 俊雄

水循環系の物理的ダウンスケーリング手法の開発

東京大学大学院工学系研究科 小池俊雄

1. 研究目的

豪雨災害，水不足，水質汚染，生態系の破壊など水に関わる深刻な問題が世界各地で近年広がってきており 21 世紀は水危機の時代といわれている。これらの問題は，人口増や都市化などの社会的諸要因を有する地域で水循環の大きな変動が生じた場合に一層深刻となる。水循環変動のメカニズムを理解し，その予測精度を向上させる科学的基盤を形成することは，水危機回避の有力な解決策の一つと言える。

水循環はエネルギーフローとあわせて地球気候システムを形成する重要なサブシステムであり，全球規模，地域規模の水循環が流域規模の水文現象と密接に関係している。つまり，流域規模の降雨や河川流出は全球規模，地域規模の水循環変動の影響を色濃く受けている。したがって，たとえ流域規模の水問題に対応する場合にも，全球規模，地域規模の水循環変動予測情報を効果的に流域規模の予測情報にダウンスケーリングする手法の開発が急務となっている。

本研究は，全球規模，地域規模の水循環変動様相を取り込むために，海洋－陸面－大気結合全球モデルから分布型流出モデルまで物理的にダウンスケーリングする手法を，衛星観測を用いたデータ同化手法の開発により実現し，河川流域規模の極端事象の予測精度の向上や，広域の長期（一ヶ月，季節）予報精度の向上に貢献することを目的としている。

2. 研究手法・体制

全球規模，地域規模の予測情報を局所規模の情報にダウンスケーリングするために，数値気象予測モデル分野ではネスティングや，広域予測のための粗いグリッド規模のモデル出力の統計的性質と対象とする局所規模の観測データの統計的性質を合わせる手法が用いられてきた。

しかし，これらの手法では，短期の数値予測において極めて重要な初期値を，対象とする狭域規模で物理的整合性をもって得ることはできず，それがゆえに広域規模の予測情報を効果的に狭域規模に利用し，その予測精度を向上するには至っていなかった。

また，より長期の数値予測においては，物理的妥当性と安定性を有する境界条件のモデル化が不可欠であるが，現在の多くの予測システムは観測された境界条件に関するデータを物理モデルに適用して予測するという，いわば一方通行のシステムであり，観測データとモデル出力が整合する条件下でのモデルパラメータの同定など，いわば双方向の検討による予測精度の向上は図られてこなかった。

さらに，大気と地表面の相互作用の結果，地表面から大気への影響を含めた大気水循環の予測値を，物理的整合性を保ったまま河川流出予測に導入し，さらにはその情報を洪水管理や渇水対策などの水管理情報につなげる一貫した予測システムの構築も図られてこなかった。

これらの状況と，わが国がリードする近年の衛星リモートセンシングの発展，地球観測の新たな国際的枠組み（GEOSS）の構築，さらには水問題解決に直結する陸面と大気との相互作用の重要性に鑑み，本研究では衛星マイクロ波放射計観測データを効果的に用いたデータ同化手法を中核とする，全球規模－地域規模－流域規模を一貫して記述できる物理的ダウンスケーリングシステムの開発を目指している。図1は本研究で開発するダウンスケーリングシステムの全体構造を示しており，3つの研究領域から構成されている。

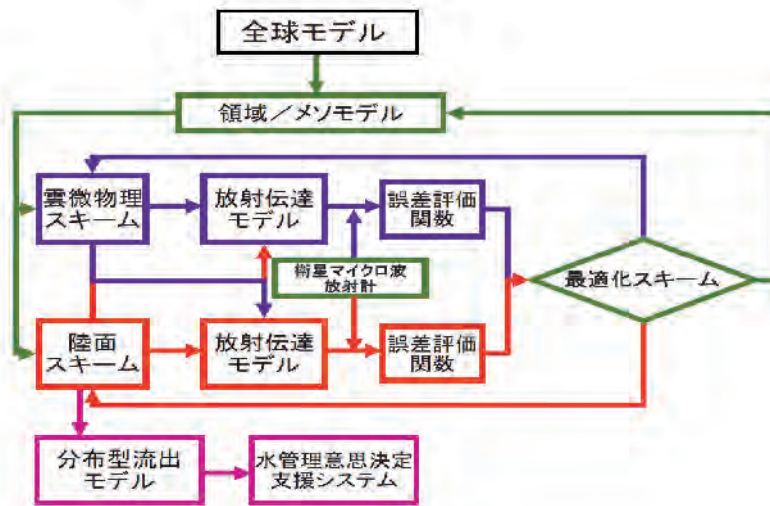


図1 研究の全体構造

- (1) 大気-陸面結合データ同化スキーム (大気：青，陸面：赤)
- (2) ダウンスケーリング手法：緑
- (3) 大気-陸域相互作用予測モデルと分布型流出モデルの結合モデル：ピンク

また，本研究ではこれらのシステムの検証のため，チベット高原での長期観測体制を確立し，CEOP 集中観測実験データを取得した。

3. 研究成果

本研究では，図1の(1)～(3)の研究領域について，下記の研究項目を設定している。

- (1) 大気-陸面結合データ同化スキームの開発
 - 1) マイクロ波放射伝達モデルの精緻化 (陸面：土壌・植生・積雪，大気：雲・水蒸気・氷晶等)
 - 2) 陸面データ同化システムの開発 (土壌・植生・積雪)
 - 3) 雲微物理データ同化システムの開発 (暖かい雨，冷たい雨)
 - 4) 大気-陸面結合データ同化手法の開発
- (2) ダウンスケーリング手法の開発
 - 1) 初期値改善
 - 2) 境界条件改善
- (3) 大気-陸域相互作用予測モデルと分布型流出モデルの結合モデルの開発
 - 1) 分布型流出モデルへの陸面スキームの導入
 - 2) 水管理意思決定支援システムの開発

本研究では，これまでに以下の2つの研究項目

- (1)-(2) 植生のデータ同化システム
- (1)-(4) 大気-陸面結合データ同化手法

以外に関するすべての研究項目に関して，下記に述べる研究成果を挙げている。

(1) 大気-陸面結合データ同化スキームの開発

- 1) マイクロ波放射伝達モデルの精緻化 (陸面：土壌・植生・積雪，大気：雲・水蒸気・氷晶等)

東京大学田無農場，北海道大学低温科学研究所に地上マイクロ波放射計を設置し，土壌水分，植生，積雪の影響を定量的に評価するためのマイクロ波放射輝度温度観測を実施し，そのデータを用いてマイクロ波放射伝達モデルの精緻化と検証をおこなった。図2は東京大学田無農場での実験風景を示している。

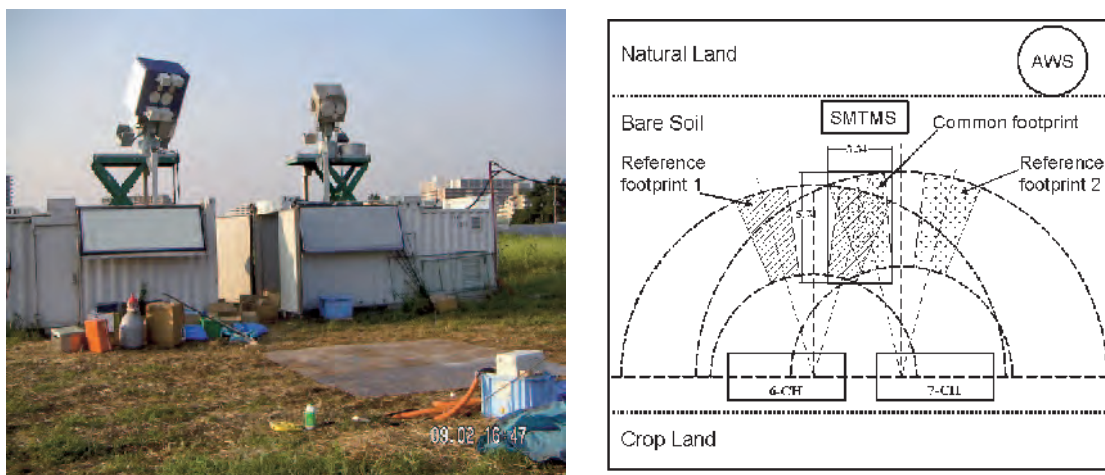


図2 2台のマイクロ波放射計による地上観測実験
(左：観測風景，右：共通のターゲット領域)

土壌、積雪のモデルは、何れも多く均一の球形粒子が密につめられたスラブ構造と仮定し (L. Tsang et al., 1977), 粒子の体積散乱の計算には稠密媒体の放射伝達モデル (DMRT) が導入された。また、土壌の表面散乱には AIEM モデルが導入されているが、これまでは垂直偏波については絶対値、傾向とも良好な結果が得られているものの、水平偏波の絶対値に関してはモデルの推定値が過小であるという問題があったが、地表面での shadowing 効果を導入することにより、水平、垂直両偏波で定量的に妥当な値が得られるようになった。植生はスラブ状の植生層としてモデル化することにより工学的厚さと単一散乱アルベドの簡単なパラメータ化で比較的高い精度の再現性を得た。

2) 陸面データ同化システムの開発 (土壌・植生・積雪)

以下の陸面データ同化システムを開発し、1) のデータを用いて検証した。

- 大気モデルとの結合に使われる鉛直一次元の陸面モデル (SiB2, 新 SiB) や、積雪量変化や雪崩シミュレーションに用いられる積雪モデルにおける初期値を設定し、観測データや数値気象予報モデルの出力を入力して、土壌水分や地温、積雪量や積雪温度などの土層、積雪層の状態量の変化を予測
- この状態量の予測値を土層内および積雪層におけるマイクロ波放射伝達モデルに入力して衛星で観測されるマイクロ波輝度温度を算定
- 算定されたマイクロ波輝度温度の算定値と地上マイクロ波放射計観測値を比較し、その誤差が許容範囲に入るように様々な最適化手法 (Simulated Annealing 法 (焼きなまし法), Ensemble Kalman Filter 法, Shuffled-Complex Evolution 法) を適用して妥当な初期値を推定

3) 雲微物理データ同化システムの開発 (暖かい雨, 冷たい雨)

領域モデル (ARPS) と大気中の放射伝達モデル (4ストリームファーストモデル) を組み合わせた水蒸気の凝結過程のみを対象とする「暖かい雨」、氷・雪形成を伴う「冷たい雨」の双方について、雲微物理同化システムを開発して、初期値を改善して降雪集中観測 (福井) の際の降雪予測に適用した結果、図3にあるように地上レーダ観測と適合する地上降雪分布予測結果を得た。

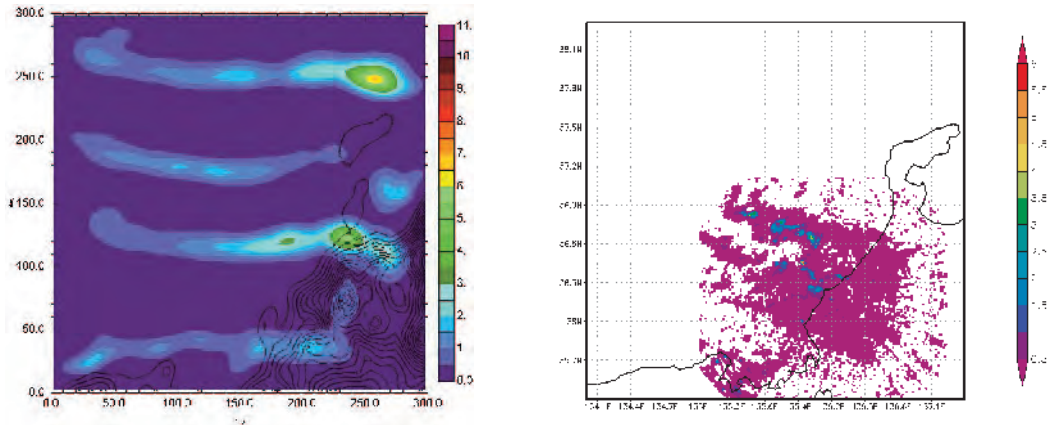


図3 雲微物理同化システムを組み込んだ物理的ダウンスケーリングによる降雪予測
(左：3時間先の予測結果，右：地上レーダによる降雪分布)

(2) ダウンスケーリング手法の開発

1) 初期値改善

「雲微物理同化システム」と「大気-陸面結合同化システム」と、全球スケールの数値気象予報モデルの出力，領域およびメソスケールの数値気象予報モデルを組み合わせ、全球モデルからメソモデルへの物理的ダウンスケーリング手法を開発した。前者については前出の図3に示す通りである。後者については、図4に示すようにチベット高原での上昇流シミュレーションにおいて、物理的ダウンスケーリングシステムによる結果が、地上レーダで観測された降雨の日周変化パターンをよく予測していることが示された。

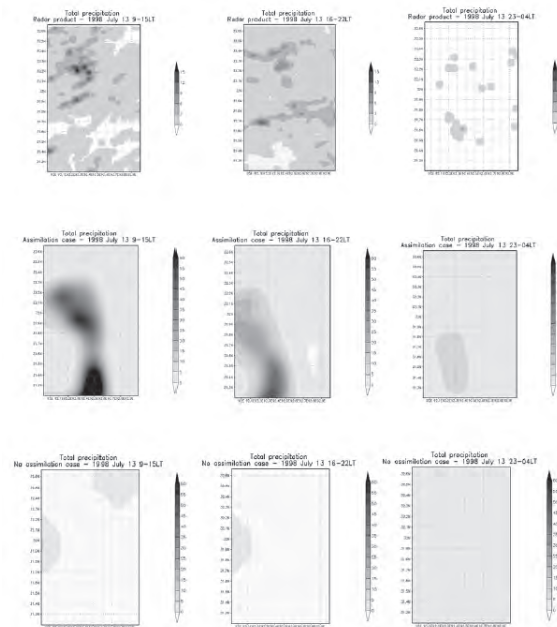


図4 大気-陸面結合同化システムを組み込んだ物理的ダウンスケーリングによるチベット高原での降雨の日周変化（上段：レーダ，中段：本システムの結果，下段：同化を含まないネスティングの結果，左列：9-15時，中列：16-22時，右列：23-04時（何れも現地時間：Basin Standard Time)）

2) 境界条件改善

全球規模のデータセットを陸面データ同化システムに入力し、衛星観測情報と、陸面衛星データ同化システムを用いて、数カ月にわたる長期の同化により境界条件を記述する陸面モデルのパラメータを適切に推定する手法を開発した。この手法をチベット高原に適用したところ、モンスーン開始前は顕熱フラックスが多く、モンスーン開始後潜熱フラックスが増加するという季節変化傾向を正確に表し、地上観測データを用いた検証の結果、高い精度を示すことが確認された。

(3) 大気-陸域相互作用予測モデルと分布型流出モデルの結合モデルの開発

1) 分布型流出モデルへの陸面スキームの導入

陸面スキーム (SiB2) を分布型流出モデル (GBHM) に導入し、これを中国永定河に適用して、年間を通して、低水から洪水まで河川流量を一貫して表現できることが示された。本研究では陸面データ同化システムを SiB2 をもとに開発してきており、本研究項目の達成により、大気と結合でき、かつ河川流出量を算定できるデータ同化システムの開発の道が拓けた。図5はシステムの概要を表している。

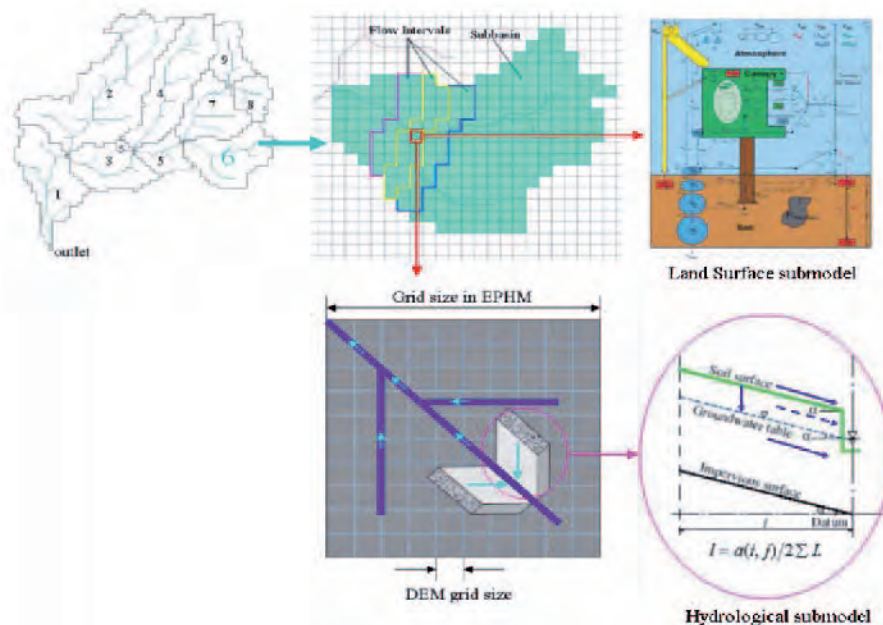


図5 陸面スキーム (SiB2) を組み込んだ分布型流出モデル (GBHM) の概要

2) 水管理意思決定支援システムの開発

物理的ダウンスケーリングシステムを洪水防御や渇水管理になどのためのダム操作に適用するには、システムの前測精度を加味したダムの最適操作情報の提供が必要である。これまでの最適操作と異なる点は、前測情報を用いるという点と、得られる情報が点情報でなく流域全体をカバーする面的分布情報であることである。本研究では、前測情報の誤差評価の部分に、Ensemble Kalman Filter 法や Shuffled-Complex Evolution 法を適用した手法を確立し、利根川上流域の複数のダムに関する概念的な場を設定し、実際の洪水データを用いて最適操作をシミュレートするシステムを開発した。

4. 考察

本研究では、衛星マイクロ波放射計観測データを効果的に用いたデータ同化手法を中核とする、全球規模-地域規模-流域規模を一貫して記述できる物理的ダウンスケーリングシステムを開発しており、「大気-陸面結合データ同化スキーム」、「ダウンスケーリング手法」、「大気-陸域相互作用予測モデルと分布型流出モデルの結合モデル」の各研究領域およびそれぞれの研究項目の目標を、予定を上回るスケジュールで達成してきている。

また、2004年度にチベット高原での集中観測を実施し、データをアーカイブするとともに、中国科学院、中国国家気象局と協力して、長期的観測体制の確立にも成功した。

5. 今後の展開

今後、東京大学田無農場にて様々な作物を対象として地上観測実験を行うことにより、(1)-2)「植生のデータ同化システム」の開発に取り組むとともに、土壌と大気のマイクロ波放射伝達モデルを統合的に用いて、(1)-4)「大気-陸面結合データ同化手法」の開発を進める。

これらの成果と、これまでの成果を統合化して、全球規模、地域規模の水循環変動様相を取り込むために、海洋-陸面-大気結合全球モデルから分布型流出モデルまで物理的にダウンスケーリングするシステムを開発する。

6. 引用文献

L. Tsang and J. A. Kong, 1977: Theory of thermal microwave emission from a bounded medium containing spherical scatters, *Journal of Applied Physics*, vol. 48, 3593-3599.

7. 主要な成果報告

(1) 論文発表

<レビューのある国際誌>

- 1) Kun Yang, Toshio Koike and Baisheng Ye : Improving estimation of hourly, daily, and monthly solar radiation by importing global data sets, *Agricultural and Forest Meteorology*, Volume 137, Issues 1-2, 1 March 2006, Pages 43-55.
- 2) Taniguchi, K., and T. Koike (2006), Comparison of definitions of Indian summer monsoon onset: Better representation of rapid transitions of atmospheric conditions, *Geophys. Res. Lett.*, 33, L02709, doi:10.1029/2005GL024526.
- 3) Yang, K. and T. Koike, 2005: A general model to estimate hourly and daily solar radiation for hydrological studies, *Water Resources Research*, 41, W10403, 10.1029/2005WR003976.
- 4) Yang, K., T. Koike, B. Ye, and L. Bastidas (2005), Inverse analysis of the role of soil vertical heterogeneity in controlling surface soil state and energy partition, *J. Geophys. Res.*, 110, D08101, doi:10.1029/2004JD005500.
- 5) Boussetta, S., T. Koike, M. Pathmathevan, K. Yang, 2005: Investigation of the effect of a coupled land-atmosphere satellite data assimilation system on land-atmosphere processes, *Predictions in Ungauged Basins: Promises and Progress, IAHS publ.* 303.
- 6) Yang, K., and T., Koike, 2005: Comments on "Estimating soil water content from soil temperature measurements by using adaptive Kalman filter", *Journal of Applied Meteorology*, Vol. 44, No. 4, pages 546-550.
- 7) Dawen Yang, Toshio Koike, Hiroshi Tanizawa: Application of a distributed hydrological model and weather radar observations for flood management in the upper Tone River of Japan, *Hydrological Processes*, Volume 18, Issue 16, Pages 3119-3132, 2004.
- 8) Yang, K., T. Koike, H. Ishikawa, and Y. Ma, 2004: Analysis of the surface energy budget at a site of GAME/Tibet using a single-source model, *Journal of the Meteorological Society of Japan*, 82, pp.131-153.
- 9) Yang, K., T. Koike, H. Fujii, T. Tamura, X. Xu, L. Bian, and M. Zhou, 2004: The daytime evolution of the atmospheric boundary layer and convection over the Tibetan Plateau: observations and simulations, *Journal of the Meteorological Society of Japan*, Vol. 82(6), 1777-1792.
- 10) M. Pathmathevamn, T. Koike, and X. Li, 2003: A New Satellite Based Assimilation Algorithm to

Determine Spatial and Temporal Variations of Soil Moisture and Temperature Profiles, *Journal of the Meteorological Society of Japan*, Vol. 81, No. 5, 1111-1135, 2003.

- 11) Yang, K., T. Koike, and D. Yang, 2003: Surface flux parameterization in the Tibetan Plateau, *Boundary-layer Meteorology*, 106(2), 245-262.

<国内の学術誌>

- 1) Tobias GRAF, Toshio KOIKE, Hideyuki FUJII: TOWARDS THE DEVELOPMENT OF A LAND DATA ASSIMILATION SYSTEM FOR SNOW, *水工学論文集* 50 巻, pp. 1-6, March, 2006.
- 2) Hui LU, Toshio KOIKE, Nozomu HIROSE, Masato MORITA, Hideyuki FUJII, David Ndegwa KURIA, Tobias GRAF, Hiroyuki TSUTSUI: A BASIC STUDY ON SOIL MOISTURE ALGORITHM USING GROUND-BASED OBSERVATIONS UNDER DRY CONDITION, *水工学論文集* 50 巻, pp. 7-12, March, 2006.
- 3) Oliver SAAVEDRA, Toshio KOIKE, Dawen YANG: APPLICATION OF A DISTRIBUTED HYDROLOGICAL MODEL COUPLED WITH DAM OPERATION FOR FLOOD CONTROL PURPOSES, *水工学論文集* 50 巻, pp. 61-66, March, 2006.
- 4) 谷口健司・小池俊雄：アラビア海における低気圧の発生および発達過程に関する研究, *水工学論文集* 50 巻, pp. 391-396, March, 2006.
- 5) 広瀬 望・小池俊雄：チベット高原における凍土融解過程の長期変動, *水工学論文集* 50 巻, pp. 415-420, March, 2006.
- 6) 筒井浩行・小池俊雄・Tobias Graf・兒玉裕二・青木輝夫：地上マイクロ波放射計を用いた地上積雪観測に基づく積雪量推定衛星アルゴリズム検証, *水工学論文集* 50 巻, pp. 433-438, March, 2006.
- 7) Souhail BOUSSETTA, Toshio KOIKE, Mahadevan PATHMATHEVAN, and KunYANG: A basic study on the development of a satellite data assimilation OF A land-atmosphere coupled system, *水工学論文集* 49 巻, pp. 283-288, March, 2005.
- 8) Cyrus Raza MIRZA, T. Koike, Yang, K., Graf, T.: Development of 1-D Cloud Microphysics Data Dssimilation System (CMDAS) by using AMSR-E Data, *水工学論文集* 49 巻, pp. 289-294, March, 2005.
- 9) 筒井浩行・小池俊雄・玉川勝徳・藤井秀幸・Tobias GRAF：マイクロ波放射伝達理論に基づく積雪量・積雪粒径推定衛星アルゴリズム開発の基礎研究, *水工学論文集* 49 巻, pp. 319-324, March, 2005.
- 10) Tobias Graf, Toshio Koike, Hideyuki Fujii, Richard Armstrong, Mary J. Brodzik, Marco Tedesco and Edward J. Kim: Integrated Snow Observation during the Cold Land Processes Field Experiment and its Application for the Development of Radiative Transfer Model for Snow, *水工学論文集* 49 巻, pp. 325-330, March, 2005.
- 11) Bashir AHMAD, Dawen YANG, Toshio KOIKE, Hiroshi Ishidaira, Li Chong and Tobias GRAF: Remote sensing based snowmelt runoff model coupled with distributed hydrological model in upper yellow river basin, *水工学論文集* 49 巻, pp. 331-336, March, 2005.
- 12) M. Pathmathevan, T. Koike, X. Li, H. Fujii: A GBMR Experiment and Validation of IDVAR-LDAS in Different Bare Soil, *水文・水資源学会誌*, 第 18 巻 3 号, pp. 233-243, 2005.
- 13) 谷口健司・小池俊雄・生駒栄司・喜連川優：データ統合活用による夏季インドモンスーン形成過程の研究, *水工学論文集*, 第 48 巻, 第 2 号, 3 月 (2004), pp.199-204.
- 14) 小池俊雄・中村佳照・開発一郎・Gombo Davaa・松浦直人・玉川勝徳・藤井秀幸：改良型高性能マイクロ波放射計 (AMSR-E) による土壌水分・植生水分観測手法の開発, *水工学論文集*, 第 48 巻, 第 2 号, 3 月 (2004), pp. 217-222.
- 15) 筒井浩行・小池俊雄・玉川勝徳・藤井秀幸：積雪粒径の効果を考慮した積雪量推定衛星アルゴリズム開発の基礎研究, *水工学論文集*, 第 48 巻, 第 2 号, 3 月 (2004), pp. 247-252.

- 16) T. Graf., T. Koike, K. Nishimura : Correcting Solid Precipitation Data From Gauge Observations Using Passive Microwave Brightness Temperature Data., *水工学論文集*, 第48巻, 第2号, 3月(2004), pp. 259-264.
- 17) P. Koudelova., T. Koike. : Estimation of Rainfall Pate In Eastern Tibet Using Ground-Based Radar Observations: Method Development., *水工学論文集*, 第48巻, 第2号, 3月 (2004), pp. 271-276.

(2) 口頭・ポスター発表 (海外68件, 国内4件)

(3) 出版物

- 1) CEOP Newsletter, No. 10, August 2006.
- 2) CEOP Newsletter, No. 9, February 2006.
- 3) CEOP Newsletter, No. 8, August 2005.
- 4) CEOP Newsletter, No. 7, January 2005.
- 5) CEOP Newsletter, No. 6, July 2004.
- 6) CEOP Newsletter, No. 5, January 2004.

(4) 取材など

- 1) 2004年8月 人民日報 (Web版) Tibet 総合科学
<http://www.people.com.cn/GB/keji/25509/36375/index.html>