

課題別総括：メソ気象モデル

Summary of Studies on Mesoscale Atmospheric Modeling

若月 泰孝^{*}・木村 富士男^{**}・佐藤 友徳^{***}・足立 幸穂^{****}・鈴木 智恵子^{*}

Yasutaka WAKAZUKI^{*}, Fujio KIMURA^{**}, Tomonori SATO^{***},
Sachiho ADACHI^{****} and Chieko SUZUKI^{*}

1 はじめに

大気循環における陸面の影響や降水過程に関する研究は、陸域環境研究センターにおいてとても重要なテーマとなっている。そこで用いられる研究手法は、メソ気象モデルもしくは領域大気モデルと呼ばれる数値計算ツールを用いた、大規模数値シミュレーションである。陸域環境研究センターは、木村を中心に、TERC (Terrestrial Environment Research Center, University of Tsukuba) -RAMS (Regional Atmospheric Modeling System) という領域大気モデル (メソ気象モデル) を開発し、山谷風などの局地循環 (Okamura and Kimura, 2003 など)、土地利用分布に起因する局地循環に関する研究 (Lee and Kimura, 2001 など)、冬季降雪 (Yoshikane and Kimura, 2008 など) や梅雨 (Yoshikane and Kimura, 2003, 2005 など) などの降水を含む大気循環、黄砂 (Adachi *et al.*, 2007 など) などの現象に関する研究に応用してきた。他にも NCAR (National Center for Atmospheric Research) -MM5 (Mesoscale Model version 5) を用いた研

究も推進してきた (Kang and Kimura, 2003)。また、近年広く世界中で利用されるようになってきた WRF (Weather Research and Forecasting Model) を導入して、将来の気候予測を含む領域気候研究を推進してきた (Sato *et al.*, 2007d など)。さらに、若月がセンター教員として着任した 2010 年以降は WRF や CReSS (Cloud Resolving Storm Simulator) などの領域大気モデルを研究ツールとして利用しており、領域大気研究の発展に大いに貢献してきた。以下、これまで行なってきたメソ気象モデルに関連した研究の推移をまとめる。

TERC-RAMS は、アメリカのコロラド州立大 (CSU) で開発されていた RAMS を Pielke 氏 (CSU) を通して提供を受け、木村が独自に開発していた LCM (Local Circulation Model) のノウハウを結合して開発した領域大気モデルである。TERC-RAMS の開発において、対流や放射過程など、雲物理過程を除くほとんどすべての物理過程でオリジナルの RAMS から書き換えを行った (Yoshikane *et al.*, 2001 ; Adachi *et al.*, 2009)。具体的には、地上気温の外挿気温、上部境界および

^{*} 筑波大学陸域環境研究センター

^{**} 独立行政法人海洋研究開発機構・筑波大学名誉教授

^{***} 北海道大学大学院地球環境科学研究院

^{****} 独立行政法人海洋研究開発機構

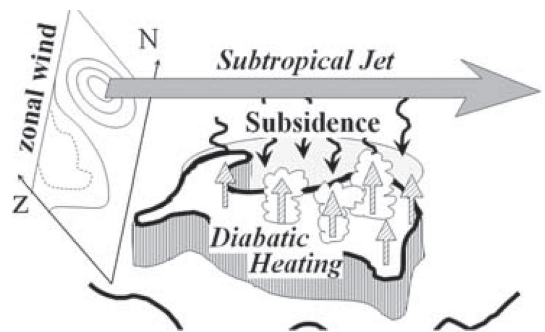
接続境界条件、圧縮出力フォーマットなどの書き換えが行われたことになる。中でも、地表面スキームに都市モデルを導入してモザイク都市を扱えるようにしたことにより大きな成果が得られた(Inoue and Kimura, 2007 ; Adachi *et al.*, 2012)。

TERC-RAMS を用いた大気現象の研究では、日中の谷風循環に伴う山岳への水蒸気輸送の過程が理想化された2次元実験によって明らかとなり、GPS (Global Positioning System) やラジオゾンデによって観測された大気中の水蒸気量の日変化をよく説明することが分かった(Sato and Kimura, 2003, Sasaki *et al.*, 2003, Fujita *et al.*, 2006)。日中に山岳へ、夕方から夜間にかけて山麓へと運ばれる水蒸気は、大気中～下層の安定度を変化させることから、東南アジア(Sasaki *et al.*, 2004 ; Wu *et al.*, 2003) や関東地方(Sato and Kimura, 2005a) で観測された降水の日周期の要因のひとつとされている。また、寒候期の気象については、Kawase *et al.* (2005) が太平洋沖に発生する筋状雲の形成メカニズムを調べた。TERC-RAMS を用いて、山岳を除去した実験や海陸の温度差を小さくする実験など様々な感度実験を駆使することで、四国の山岳の風下で発生する雲だけでなく、海陸の熱コントラストに起因して発生する筋状雲も存在することが分かった。さらに、Kawase *et al.* (2006) は、数値実験によって再現された海上の下層収束線を、伊豆諸島に点するGPS観測網によってとらえることに成功した。TERC-RAMS は、境界条件として特殊な条件のデータを与えることで、気候形成のメカニズム研究にも大きく貢献してきた。帯状平均した大気場が偏西風ジェットの季節的な特徴を良く表現している特性を利用して、Yoshikane *et al.* (2001) は梅雨前線の形成には、海陸コントラストと帯状平均の構造が重要であることを示した。同様の実験により、Sato and Kimura (2005b, 2007a) はチベット高原による夏の非断熱加熱と偏西風ジェットがインドモンスーンの急激なオン

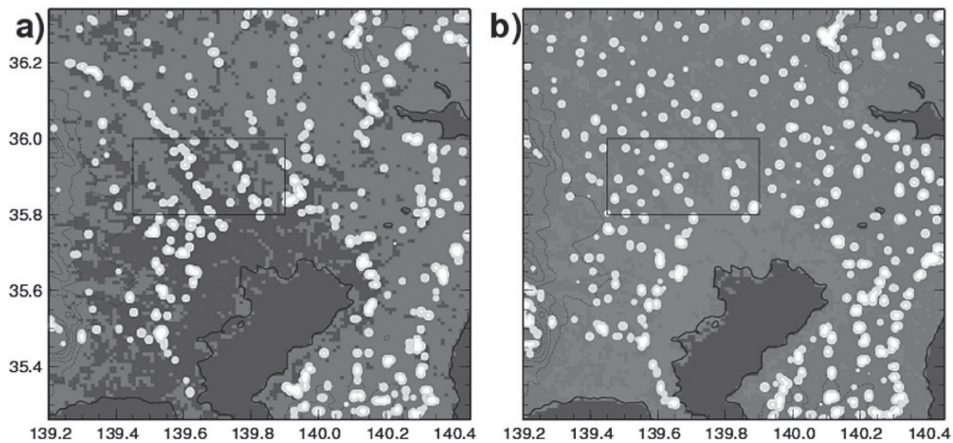
セットや北東アジアの乾燥気候の形成に重要であることを示した(第1図)。

一方、TERC-RAMS は大気現象の理解だけでなく、大気陸面相互作用の研究にも応用され、特筆すべき成果を得ることができた。Inoue and Kimura (2004) による衛星データ解析から明らかになった、都市の分布に沿って周辺よりも雲の出現頻度が高くなる現象について、そのメカニズムをモデル実験から明らかにした(Inoue and Kimura, 2007 ; 第2図)。その感度解析の結果、都市の顕熱フラックスが郊外よりも大きい時にその特徴をよく再現し、都市では顕熱フラックスが大きいために、郊外より混合層高さが高くなり、サーマルが持ち上げ凝結高度に達しやすいことが明らかになった。また、周辺の郊外では都市での強いサーマルの補償下降流が広範囲に卓越しているために、サーマルや雲の発生が抑制されていることが示された。

北東アジア乾燥地域の研究では、黄河流域の灌漑地域とその周囲の砂漠との間で、雲の発生頻度や日周期に大きな違いがあることが静止気象衛星の解析によって明らかになった(Sato *et al.*, 2007b)。Kawase *et al.* (2008) はこれについて数値実験を行い、両地域の顕熱フラックスの差によって湖陸風に似た明瞭な局地循環が発生し、それが雲の分布を決定していることを示した。中国



第1図 北東アジアの乾燥地域における沈降流の形成メカニズム。(Sato and Kimura (2005b) の Fig. 7 より引用)



第2図 RAMSによって再現された積雲。(a) 再現実験, (b) 都市なし実験。(a)の濃い灰色領域は都市の分布を示す。(Inoue and Kimura (2007) の Fig. 2 を一部改変)

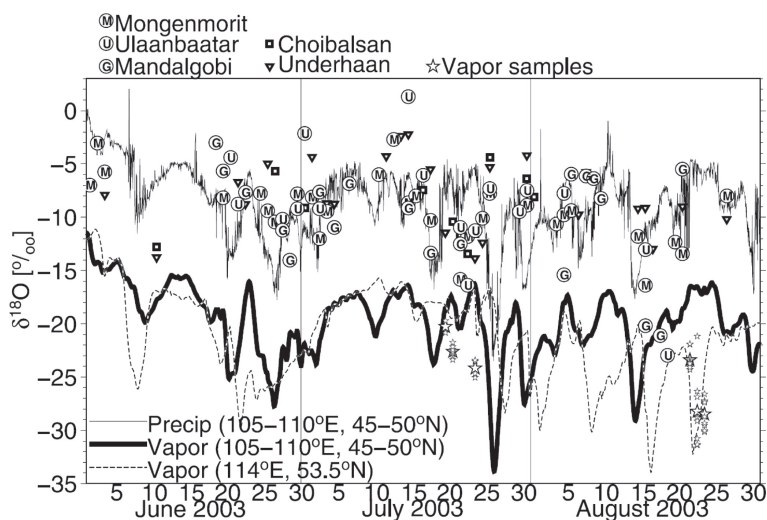
北部の砂漠地帯では、低気圧活動が活発な春季を中心にダストストームが発生し、黄砂として社会的に様々な問題をもたらすだけでなく、全球規模の気候にも影響を及ぼしていることを示した。Aoki *et al.* (2005) はダストの主要な発生源であるタクラマカン砂漠を対象地域としてダストストーム発生時の気象条件を3つのタイプに分類した。その中でも寒冷前線の通過に伴って発生するダストストームでは、観測データがほとんどない砂漠でも TERC-RAMS が威力を発揮し、局地的な前線構造の侵入がダストストームの発生をもたらしているという重要な発見をした。Aoki *et al.* (2005) の分類では、前線の通過に伴ってダストストームが徐々に拡大していく特徴があったが、Tsunematsu *et al.* (2005) はタクラマカン砂漠の複数の観測点や人工衛星で確認された同時多発的なダスト発生イベントを調べた。2004年3月26日の事例は、砂漠の広い範囲でほぼ同時刻にダストストームが確認され、その発生の様子はライダーでも観測された。TERC-RAMSによる実験の結果、接地逆転層の消滅が広域的なダストの発生を生じていたことが分かった。つまり、夜間に上空には強風域が侵入していても、安定な接地

逆転層が発達することによって、大気下層は上空の強風の影響を受けなかったと解釈された。ところが、日の出後に逆転層が崩壊すると運動量の鉛直輸送が活発に行われて、広範囲で一斉に風速が強まりダストが発生する。平成13年より陸域環境研究センターを中心に実施された戦略的創造研究推進事業「北東アジア植生変遷域の水循環と生物・大気圏の相互作用の解明 (RAISE; The Rangelands Atmosphere-Hydrosphere-Biosphere Interaction Study Experiment in Northeastern Asia)」では、気象学だけでなく水文や植物生態の分野にも TERC-RAMS の実験データが活用された。モンゴル東部で展開された観測では、ユーラシア大陸内部の乾燥地域で初めて降水と水蒸気中の酸素・水素安定同位体の集中観測が行われた。TERC-RAMS を用いた同位体輸送のシミュレーションによって、ストームの通過時に大気中の酸素安定同位体比が急激に低下していることが明らかになった (Sato *et al.*, 2007c)。これは、同位体比の小さい低温位気塊の移流が低気圧の後面に顕著であるに整合している。また、モンゴルへの水蒸気起源を調べたトレーサモデルの結果、平均的なモンゴルへの水蒸気輸送は中・高緯度の陸

地で再循環した水がほとんどであることや、アジアモンスーン起源の水は擾乱が通過する際に一時的に取り込まれていることが分かった。さらにモンゴルの周辺で蒸発散した水蒸気は、夏季平均すると可降水量のおよそ3分の1程度に相当しており、集中観測で推定された見積もりとも一致していることが確認された（第3図）。このようにTERC-RAMSは観測が得られにくい地域でのメソ気象の理解を目指した研究に大いに貢献した。

一方、これらのTERC-RAMSなどの大気モデルを、特定の境界条件の下で長期計算することによって、領域スケールの気候情報を把握することができるようになってきた（Kimura and Yoshikane, 2001, 足立・木村, 2010 など）。以後、長期積分を目的とした領域大気モデルは領域気候モデルと呼ぶこととする。領域気候モデルによる数値実験は、GCM（General Circulation Model）や客観解析データなど粗い解像度のデータを特定地域に対して詳細化する実験に相当するので、これをダウンスケーリング実験と呼ぶ。この際、領域気候モデルの初期値や境界値として一般的に用

いられる再解析データに、全球気候モデルによって予測された将来の気候変化の差分を上乗せすることで、簡易的かつ近似的に温暖化予測のダウンスケーリング実験を行うことができる（擬似温暖化手法）。Sato *et al.* (2007d) は、この擬似温暖化実験手法をモンゴルの気候予測に適用し、GCMによる誤差の影響が小さいことやアンサンブル実験にも適用可能であることを指摘した。受託研究環境省環境研究総合推進費戦略的研究プロジェクトS-5「地球温暖化に係る政策支援と普及啓発のための気候変動シナリオに関する総合的研究」では、「温暖化予測評価のためのマルチモデルアンサンブルとダウンスケーリングの研究（テーマリーダー：気象庁気象研究所 高数出）」に参画し、TERC-RAMS及びWRFを用いた日本域の領域気候ダウンスケール実験を実施した。空間解像度20 kmで1985年から2004年までの20年間についてJRA25/JCDASを境界値に与えた現在気候再現実験を行った。その結果、TERC-RAMSでは冬季に低温傾向、夏季に高温傾向を持つが多くの地域でバイアスは1℃以内と



第3図 モンゴル東部において観測された降水中および水蒸気中の酸素安定同位体比（マーク）とモデルで再現された同位体比の時間変化（線）。(Sato *et al.* (2007c) の Fig. 5 より引用)

なること、降水は四国九州沖縄で夏季に顕著な降水量過少のバイアスがあり、観測に比べて 1/2 程度になることがわかった。一方、WRF の場合、冬季の北海道東北を中心とした低温バイアスと夏季の関東における高温バイアスを除き、広い範囲で気温のバイアスは 0.5℃以内となることがわかった。また、降水量は年間を通して過大評価し、特に冬季の東北北海道で 2 倍程度になることがわかった。このことから、降水についてはバイアスがあるものの、気温については気候モデルとして十分な性能があることが示された。さらにこの結果は、気象庁気象研究所の NHRCM (Non-Hydrostatic Regional Climate Model) と防災科学技術研究所の RAMS による同様の設定で行われたダウンスケール結果と比較を行うことで不確実性の評価にも活用された (Ishizaki *et al.*, 2012; Iizumi *et al.*, 2011)。

さらに本課題では、「空間詳細な地域気候変動シナリオ作成のための都市効果の評価」も行なった。都市キャノピーモデルを組み込んだ高解像度領域気候モデル TERC-RAMS を用いて、2070 年代までの首都圏の将来気温変化を対象に、温室効果ガスによる気候変化と都市化の影響を評価した (Adachi *et al.*, 2012)。関東地方における今後 70 年間の温暖化による気温上昇は平均で約 2.0℃と予測され、2070 年代までの今後 70 年間の都市化による気温上昇は約 0.5℃と見積もられた。この昇温量は全球規模の気候変化による昇温量よりも小さいものの、都心における過去から将来までの都市化による昇温量が 1.5℃であることを考慮すると、2070 年代 8 月のヒートアイランド強度は約 2℃であり、将来の温暖化による昇温に匹敵する。これにより、東京のような発展した都市域では、ヒートアイランドの緩和が将来の温暖化の適応策となりうることを示した。

地球環境再生プログラム「中部山岳地域大学間連携事業 (筑波・信州・岐阜大学)」では、高解像度の領域気候実験を、WRF を用いて現在実施

中である。高解像度の気候実験結果は、観測が粗な中部山岳地域における環境把握に大きな役割を果たすと期待されている。特定年の再現シミュレーションでは、解像度 2 km の実験結果で再現された高地の積雪深が、観測とよく対応していることがわかった (若月, 2011)。また、将来的には、人為起源の温室効果ガスの増加に伴う地球温暖化によって、中部山岳域の環境がどのように変化するかというテーマで将来気候予測実験を実施する計画がある。さらに、若月のテニユアトラック普及・定着事業では、WRF による実験だけでなく、名古屋大学の坪木和久氏が開発した領域大気モデル CReSS を用いたシミュレーションも実施している。CReSS は、気候把握を目的とする長期シミュレーションで利用するのではなく、主に降水過程が重要な役割を果たす豪雨の再現実験を行っている。豪雨災害における予測可能性についての総合的研究を実施することで、減災に寄与する情報の創出を目指している。CReSS による地域短時間気象予測システムを開発し、準リアルタイムでの予測を行えるようになった。2012 年沖縄で実施した梅雨前線帯の降水システムの総合観測では、地上気象測器、ラジオゾンデ、マルチパラメータレーダで主に積乱雲の観測を行った。そこで観測された現象は、CReSS による再現シミュレーションと比較しつつ、豪雨現象の理解に向けた解析が行われている。この時観測された梅雨前線帯のメソ β スケール弧状降水システムについて、データ解析と再現シミュレーションによるメカニズムの解明を目指している。また、同じ環境場で観測された複数の孤立積乱雲の比較では、シングルセル型とマルチセル型がほぼ同時に存在しており、理想化した数値シミュレーションによって発生要因や発達要因の違いについて研究している。さらに、CReSS は、2012 年 5 月 6 日につくばで発生した竜巻の現象理解、2011 年 3 月の福島第一原発の事故における放射性物質拡散に関わる研究でも利用され、あらゆる気象災害研究

に威力を発揮している。

本報告を作成するにあたり、木村の指導した筑波大学の多くの卒業生に資料提供や助言をいただいた。その一員である川瀬氏（海洋研究開発機構）には、本報告の修正と確認をしていただいた。筑波大学陸域環境研究センターのメソ気象モデル研究に携わった全ての方々に深く感謝するものである。

参考文献

足立幸穂・木村富士男（2010）：近年の関東域における高温化傾向の要因分析。気候影響・利用研究会会報, **28**, 5–13.

若月泰孝（2011）：中部山岳域の地域気候変化予測に向けた課題と準備状況。中部山岳地域大学間連携事業 2011 年度年次研究報告会。

Adachi, S., Kimura, F., Sugata, S., Hayasaki, M. and Wakamatsu, S. (2007): Dust transport along a cold front: A case study of a cyclone observed on 19-20 April 2000 in Northeast Asia. *J. Japan Soc. Atmos. Environ.*, **42**, 327–338.

Adachi, S. A., Kimura, F. and Tanaka, M. (2009): Reproducibility of Past 20 Years Climate using Dynamical Downscaling Method and Future Prediction of Snow Cover in Winter. 筑波大学陸域環境研究センター報告, **10**, 51–60.

Adachi, S. A., Kimura, F., Kusaka, H., Inoue, T. and Ueda, H. (2012): Comparison of the Impact of Global Climate Changes and Urbanization on Summertime Future Climate in the Tokyo Metropolitan Area. *J. Appl. Meteor. Climatol.*, **51**(8), 1441–1454, doi:10.1175/JAMC-D-11-0137.1.

Aoki, I., Kurosaki, Y., Osada, R., Sato, T. and Kimura, F. (2005): Dust storms generated

by mesoscale cold fronts in the Tarim Basin, Northwest China. *Geophys. Res. Lett.*, **32**(3), L06807, doi:10.1029/2004GL021776.

Fujita, M., Sasaki, T. and Kimura, F. (2006): A Dramatic Daytime Decrease in Water Vapor over Coastal Thailand, *SOLA*, **2**, 49–52.

Iizumi, T., Nishimori, M., Dairaku, K., Adachi, S. A. and Yokozawa, M. (2011): Evaluation and intercomparison of downscaled daily precipitation indices over Japan in present-day climate: Strengths and weaknesses of dynamical and bias correction-type statistical downscaling methods, *J. Geophys. Res.*, **116**, D01111, doi:10.1029/2010JD014513

Inoue, T. and Kimura, F. (2004): Urban effects on low-level clouds around the Tokyo metropolitan area on clear summer days, *Geophys. Res. Lett.*, **31**, L05103, doi:10.1029/2003GL018908.

Inoue, T. and Kimura, F. (2007): Numerical experiments on fair-weather clouds forming over the urban area in northern Tokyo, *SOLA*, **3**, 125–128.

Ishizaki, N. N., Takayabu, I., Oh'izumi, M., Sasaki, H., Dairaku, K., Iizuka, S., Kimura, F., Kusaka, H., Adachi, S. A., Kurihara, K., Murazaki, K. and Tanaka, K. (2012): Improved performance of simulated Japanese climate with a multi-model ensemble. *J. Meteor. Soc. Japan*, **90**(2), 235–254, doi:10.2151/jmsj.2012-206.

Kang, S. D. and Kimura, F. (2003): Effect of Tropical SST on the Northwest Pacific Subtropical Anticyclone. Part I: Linear Rossby Wave Propagation. *J. Meteor. Soc. Japan*, **81**, 1225–1242.

Kawase, H., Sato, T. and Kimura, F. (2005): Numerical experiments on cloud streets

- in the lee of island arcs during cold-air outbreaks. *Geophys. Res. Lett.*, **32**, L14823, doi:10.1029/2005GL023256.
- Kawase, H., Takeuchi, Y., Sato, T. and Kimura, F. (2006): Precipitable water around orographically induced convergence line. *SOLA*, **2**, 25–28.
- Kawase, H., Yoshikane, T., Hara, M., Kimura, F., Sato, T. and Ohsawa, S. (2008): Impact of extensive irrigation on the formation of cumulus clouds. *Geophys. Res. Lett.*, **35**, L01806, doi:10.1029/2007GL032435.
- Kimura, F. and Yoshikane, T. (2001): Effects of Soil Moisture of the Asian Continent upon the Baiu Front. Present and Future of Modeling Global Environmental Change, (ed. T. Matsuno and H. Kida), 101–110.
- Lee, S. H. and Kimura, F. (2001): Comparative studies in the local circulation induced by land-use and by topography. *Boundary-Layer Meteorology*, **101**, 157–182.
- Okamura, O. and Kimura, F. (2003): Behavior of GPS-derived precipitable water vapor in the mountain lee after the passage of a cold front. *Geophys. Res. Lett.*, **30**, 1746, doi:10.1029/2003GL017572.
- Sasaki, T., Wu, P., Kimura, F., Yoshikane, T. and Liu, J. (2003): Drastic Evening Increase in Precipitable Water Vapor over the Southeastern Tibetan Plateau. *J. Meteor. Soc. Japan*, **81**, 1273–1281.
- Sasaki, T., Wu, P., Mori, S., Hamada, J.-I., Tauhid, Y. I., Yamanaka, M. D., Sribimawati, T., Yoshikane, T. and Kimura, F. (2004) : Vertical moisture transport above the mixed layer around the mountains in western Sumatra. *Geophys. Res. Lett.*, **31**, L019730, doi:10.1029/2004GL019730.
- Sato, T. and Kimura, F. (2003): A two-dimensional numerical study on diurnal cycle of mountain lee precipitation. *J. Atmos. Sci.*, **60**, 1992–2003.
- Sato, T. and Kimura, F. (2005a): Diurnal cycle of Convective Instability around the Central Mountains in Japan during the Warm Season. *J. Atmos. Sci.*, **62(5)**, 1626–1636.
- Sato, T. and Kimura, F. (2005b): Impact of diabatic heating over the Tibetan plateau on subsidence over Northeast Asian arid region. *Geophys. Res. Lett.*, **32(3)**, L05809, doi:10.1029/2004GL022089.
- Sato, T. and Kimura, F. (2007a): How does the Tibetan Plateau affect the transition of Indian monsoon rainfall? *Mon. Wea. Rev.*, **135**, 2006–2015.
- Sato, T., Kimura, F. and Hasegawa, A. S. (2007b): Vegetation and topographic control of cloud activity over arid/semiarid Asia. *J. Geophys. Res.*, **112**, D24109, doi: 10.1029/2006JD008129.
- Sato, T., Tsujimura, M., Yamanaka, T. Iwasaki, H., Sugimoto, A., Sugita, M., Kimura, F., Davaa, G. and Oyunbaatar, D. (2007c): Water sources in semi-arid Northeast Asia as revealed by field observations and isotope transport model. *J. Geophys. Res.* **112**, D17112, doi:10.1029/2006JD008321.
- Sato, T., Kimura, F. and Kitoh, A. (2007d): Projection of global warming onto regional precipitation over Mongolia using a regional climate model. *J. Hydrol.*, **333**, 144–154, doi: 10.1016/j.jhydrol.2006.07.023.
- Tsunematsu, N., Sato, T., Kimura, F., Kai, K., Kurosaki, Y., Nagai, T., Zhou, H. and Mikami, M. (2005): Extensive dust outbreaks following the morning inversion breakup in the Taklimakan Desert. *J. Geophys. Res.*, **110**,

- D21207, doi:10.1029/2005JD005994.
- Yoshikane, T., Kimura, F. and Emori, S. (2001): Numerical study on the Baiu Front genesis by heating contrast between land and ocean. *J. Meteor. Soc. Japan*, **79**, 671–686.
- Yoshikane, T. and Kimura, F. (2003): Formation Mechanism of the Simulated SPCZ and Baiu front using a Regional Climate Model. *J. Atmos. Sci.*, **60**, 2612–2632.
- Yoshikane, T. and Kimura, F. (2005): Climatic features of the water vapor transport around east Asia and rainfall over Japan in June and September. *Geophys. Res. Lett.*, **32**, L18712, doi:10.1029/2005GL023665.
- Yoshikane, T. and Kimura, F. (2008): Formation Mechanism of an Intensified Cold Air Mass in the Middle Troposphere over East Siberia in December 2005 Using a Regional Climate Model. *J. Meteor. Soc. Japan*, **86**, 773–785
- Wu, P., Hamada, J., Mori, S., Tauhid, Y. I., Yamanaka, M. D. and Kimura, F. (2003): Diurnal Variation of Precipitable Water over a Mountainous Area in Sumatra Island. *J. Appl. Meteor.*, **42**, 1107–1115.