



Title	総観気象と大気：陸面相互作用
Author(s)	佐藤，友徳；中村，哲；エルデンバト，エンフバト 他
Citation	低温科学， 77， 61-70
Issue Date	2019-03-20
DOI	https://doi.org/10.14943/lowtemsci.77.61
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/73993
Type	departmental bulletin paper
File Information	09_p061-070.pdf



総観気象と大気-陸面相互作用

佐藤 友徳¹⁾, 中村 哲¹⁾, エルデンバト エンフバト¹⁾, 寺村 大輝²⁾

2018 年 11 月 18 日受付, 2018 年 12 月 12 日受理

大気と陸面の相互作用は様々な時間スケールで生じており, 双方の時空間変動において重要な役割を果たしている. ここでは総観規模の大気場と関連した大気陸面相互作用について, ユーラシア大陸の中高緯度帯を対象地域とした研究を概説する. 近年の東ヨーロッパから西シベリアの積雪偏差は植生活動の水に対する依存度を高めていた. さらに, 積雪偏差は土壌水分偏差として夏まで情報を持続し, 熱波のきっかけとなる準定常波の発生確率を変調する. モンゴル周辺の半乾燥地域では, 初夏の土壌水分量が数値モデルによる夏季降水量の季節内変動の再現に重要である. また, 陸面状態の不均一性はメソ対流系の発生確率に有意な影響を与えることも分かった.

Atmosphere-land interaction in synoptic-scale meteorology

Tomonori Sato¹, Tetsu Nakamura¹, Enkhbat Erdenebat¹ and Hiroki Teramura²

Interaction between atmosphere and land plays a crucial role in their spatial and temporal variations. This article reviews recent progresses on atmosphere-land interaction that relates to synoptic meteorology over mid-to-high-latitude Eurasia. We found a potential impact of snow water anomaly on the following summer climate via modifications of local vegetation activities and quasi-stationary waves.

キーワード: 総観気象, 大気陸面相互作用, ユーラシア大陸, 土壌水分

Synoptic meteorology, Atmosphere-land interaction, Eurasian continent, Soil moisture

1. はじめに

陸面と大気は様々な時空間スケールで相互作用している. 土地利用変化のように人間活動の直接的な寄与が大きい局地的な大気陸面相互作用については, 簡単な解説が佐藤 (2009) で述べられている. 本稿では, 特にメソスケールから総観スケールの気象の中にみられる大気陸面相互作用について, 著者らの最近の研究を紹介しながら解説する. 対象とする現象の空間規模が大きくなるにつれて, 時間スケールも長くなる. 本稿で紹介する総観規模の話題は, 数日以上 の時間スケールに対応するため,

気象の中～長期予報や年々変動に関係する. また, 広域の大気陸面相互作用を考える場合には, 大気と陸面は鉛直一次元的な関係から複雑化し, 水平方向に構造を持つようになる. 結果として, 相互作用のシグナルが空間方向に同調することもある. このような大気と陸面の相互作用の関係性とその空間的特徴を理解することで, 総観気象における陸面過程の重要性を把握することができる. 現在, 国際気候研究プログラム WCRP が主導する S2S (Seasonal to subseasonal) 予測プロジェクトでは, リードタイムが数週間から数か月程度の気象予報の精度向上において, 陸面過程は重要な役割を果たしていると

連絡先

佐藤 友徳

北海道大学 大学院地球環境科学研究院

〒060-0810 札幌市北区北 10 条西 5 丁目

Tel. 011-706-2288

e-mail: t_sato@ees.hokudai.ac.jp

1) 北海道大学 大学院地球環境科学研究院

Faculty of Environmental Earth Science, Hokkaido University, Sapporo, Japan

2) 北海道大学 大学院環境科学院

Graduate school of Environmental Science, Hokkaido University, Sapporo, Japan

認識され、様々な研究が展開されつつある (Mariotti et al., 2018)。

ここで紹介する研究の多くは、中国-モンゴル-ロシアにかけてのユーラシア大陸北東部に位置する気候遷移帯を対象に行われている。日本の天候にも影響するこの地域は降水量の年々変動が大きく、年降水量に対して多くの割合を占める夏季降水量の将来変化は、複数の気候モデル間で一致した見解が得られていない。もともと中緯度帯は自然変動の振幅が大きいため、温暖化のシグナルを検出することが難しいが、それに加えてユーラシア大陸全域における大気陸面相互作用の外部強制に対する応答過程がモデル間で異なっている可能性も考えられる。以上のことから、広域の大気と陸面の相互作用は、中長期予報と気候変動研究のどちらにも関連する重要な課題であるといえる。

2. 北東アジアにおける熱波の増加と土壌の乾燥化

モンゴルを中心とする北東アジア地域では、2000年代に熱波が頻発した。Erdenebat and Sato (2016)によると、モンゴルにおける熱波の日数は1980年代にはひと夏あたり0.6日、1990年代は4.2日であったのに対し、2000年代は9.4日であり、最も多かった2002年は22日に達した。1981年～2010年の気象場を解析すると、2000年代にはモンゴル周辺の500 hPa高度場に有意な正偏差が認められることから(図1)、2000年代にはモンゴル周辺は高気圧に覆われることが多くなったと考えることができる。すなわち、総観規模の大気循環場の変化が熱波増加の主要因として挙げられる。このときモンゴル周辺で大気と陸面との間に起こっているであろう相互

作用の過程を図2に示す。図2の右側、すなわち大気から陸面への強制は広く知られている。高気圧下で熱波が生じることはいわば当然であり、今回の事例でも疑う余地はないだろう。しかし、同じ高気圧の条件下でも、土壌が乾燥している場合と湿潤な場合とでは、前者の方がボーエン比が大きくなるため、熱波が強くなることが予想される。実際に2003年に発生した欧州の熱波では、数値モデルを用いた感度実験によって、春の土壌が乾燥していた場合の方が熱波が強化されると指摘されている (Fischer et al., 2007a, b)。Erdenebat and Sato (2016)では、観測データを丁寧に解析し、モンゴルにおける熱波に対する陸面の寄与の評価を試みた。その結果、土壌が乾燥している場合は、そうでない場合に比べて、熱波の発生が数日早まることが分かった。すなわち、乾燥した土壌は熱波の開始を早め継続時間を延ばす効果がある。また、モンゴルが高気圧支配下にあった日数を大気強制インデックスと定義し、大気強制インデックスと熱波の日数を年ごとに比較すると、土壌が乾燥していた年ほど大気強制インデックスに対する熱波日数の増加率が大きいことが分かった。すなわち、同様な大気条件下であっても、土壌が乾燥しているときほど熱波の総日数が長くなりやすいといえる。この傾向は、領域大気モデルを用いた数値実験でも実証されている (Erdenebat, 2016)。これらが意味することは、強い高気圧が原因で、気温上昇と土壌乾燥化が結果であるという関係だけでなく、もともと存在していた土壌水分の負偏差が気温上昇の原因になり得る(図2左下)という点である。

高気圧下で乾燥化した陸面は、より上層の大気、例えば総観規模の高気圧に対してどのような役割を果たすのだろうか？ Fischer et al. (2007b)では、前述の欧州熱波の事例において、乾燥した土壌がもともと存在してい

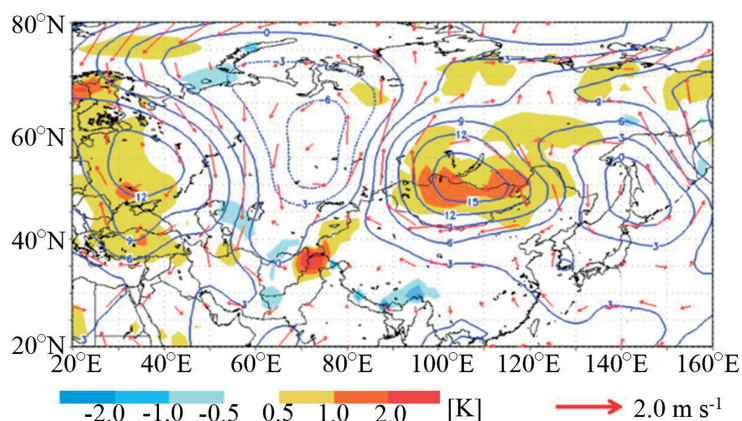


図1: 気候値に対する2000年代の500 hPa高度偏差(等値線)および地上気温偏差(カラー)の分布。
Erdenebat and Sato (2016) より。

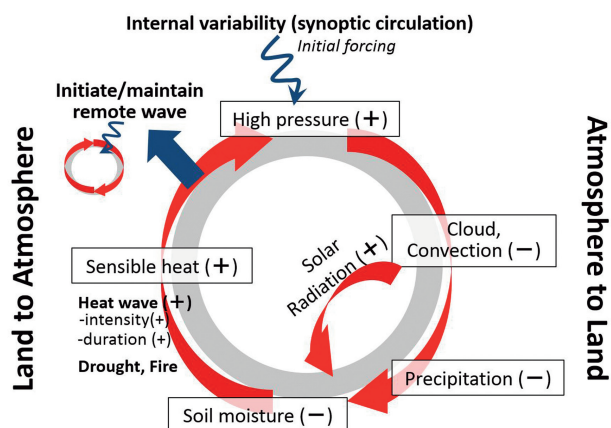


図2：大気陸面相互作用と総観規模大気場の関係。

た高気圧偏差をさらに強めることを示している。これは、図2の左側部分に相当する陸面から大気への強制に相当する。モンゴル周辺においても、土壌水分の偏差に対して図1に示したリッジ（気圧の尾根）がどのように影響を受けるのか、数値実験によって調べられている（Erdenebat and Sato, 2018）。しかし、リッジの陸面に対する応答は、さらに広域の陸面状態やユーラシア大陸上を通過する偏西風の内部変動にも左右されるため、大陸の西に位置する欧州に比べると複雑なようである。これに関連する研究は4節でも述べることにする。

3. 降水量の季節内変動における初期土壌水分の役割

アジアモンスーン地域の降水量変動、特に年々変動においては、土壌水分が重要な役割を果たしている。Sato and Xue (2013) は、陸面モデル SSiB (Xue et al. 1991; 2001) と結合した領域気象モデルを用いて、夏季東アジアモンスーンの年々変動に着目した実験を行った。彼らは複数の陸面モデル出力に基づいて作成された初夏の土壌水分量の空間分布を真値と仮定し、これを初期値として用いることで、引き続く夏季の降水量の再現性がどの程度改善するかを調べた。その結果、低緯度起源の水蒸気輸送が降水量変動に支配的であると考えられる 35°N よりも南の地域では、土壌水分が補正されても降水量の年々変動は改善されなかったのに対して、中国西北部やモンゴルなど中緯度の半乾燥地域では、夏季降水量の年々変動が大幅に改善した。Sato and Xue (2013) の実験では5月の土壌水分量の気候値を初期値として用いているため、土壌水分の初期値には年々変動の効果が含まれていない。それにも関わらず、降水量の再現性が向上した。すなわち、この地域では年々変動を考慮した土壌

水分を用いることよりも、バイアス（気候値からの系統的なずれ）を取り除くことの方が重要であるといえる。バイアスが含まれる土壌水分初期値を用いた場合にはその悪影響が数ヶ月持続することを意味している。これは、陸面からの顕熱・潜熱フラックスの配分割合が土壌水分の多寡に応じて敏感に変動する乾燥・半乾燥地域の特徴であろう（Seneviratne et al., 2010）。Sato and Xue (2013) によると、土壌水分の平年からの偏差が特に大きかった2002年の干ばつ年では、土壌水分の湿潤バイアスを補正した効果が顕著である。このように初夏の土壌水分量が夏季平均降水量に影響するという事実は、リードタイム1ヶ月以上の予報において重要な意味を持つ。これらの地域では、陸面と大気の間に強い正のフィードバックが存在することで陸面状態の偏差が維持されやすく、陸面の対大気に対する強制が長期間継続していると考えられる。このフィードバックは局所的なものだけでなく、4節で紹介するように大陸規模の大気や陸面の偏差の持続性にも寄与している可能性がある。

上で述べたように、適切な土壌水分の初期値化はさらに時間スケールの短い季節内の降水量変動も改善するのだろうか。Sato and Xue (2013) のモデル出力データを用いて、土壌水分のバイアスを除去した効果が5日平均降水量の時間変動を改善するのかどうか検証してみた。この数値実験は地域気象モデルの一つである WRF-ARW version 3.0.1 (Skamarock et al. 2008) を用いて、各年5月25日を初期値として1993年から2003年の11年分の夏季の計算を行ったものである。モデルの水平格子間隔は54kmとした。土壌水分の初期値は NCEP-DOE Reanalysis 2 (National Centers for Environmental Predictions および Department of Energy が共同で作成した再解析データ; Kanamitsu et al., 2002) による1998年5月25日の値を使用した（以降、CNTL 実験）。また感度実験として GSWP2 (Second Global Soil Wetness Project; Dirmeyer et al. 2006) によって作成された5月の気候値（1986-1995年）を初期値とした実験も行われた（以降、GSWP 実験）。両実験ともに積分期間中の土壌水分は陸面過程モデルが予報している。図3にモンゴル周辺（42°-52°N, 90°-120°E）を領域平均した1998年夏季の5日降水量の時系列を示す。降水量の観測データとして APHRODITE (The Asian Precipitation Highly Resolved Observational Data Integration Towards the Evaluation of Water Resources; Yatagai et al., 2009) を用いた。CNTL 実験では、6月の降水量が観測値の2倍近くに達し過大であった。一方、GSWP 実験では、6月の降水量の過大傾向が改善されている。各実験と

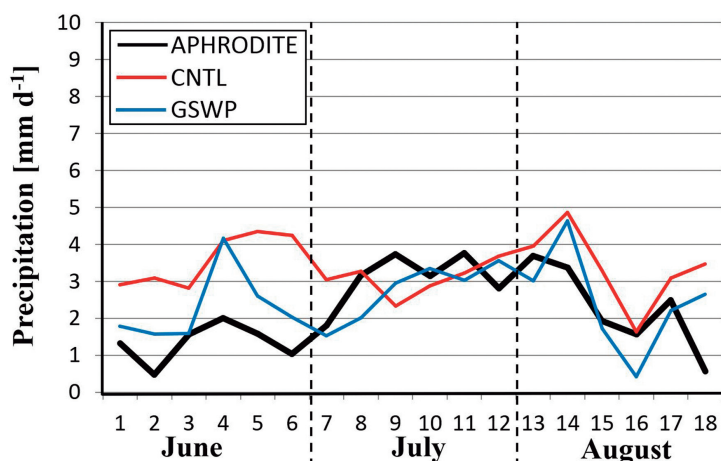


図3：モンゴル周辺における1998年6-8月の5日降水量の時系列。
黒線、赤線、青線はそれぞれAPHRODITE, CNTL 実験, GSWP 実験による。

表1：6-8月の降水量時系列に対する各実験とAPHRODITEとの相関係数。

	1993	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003
CNTL	0.64	0.61	0.25	0.56	0.55	0.07	0.47	0.22	0.57	0.68	0.76
GSWP	0.70	0.59	0.43	0.58	0.56	0.54	0.52	0.35	0.68	0.66	0.86

APHRODITE との間の領域平均5日降水量の相関係数を表1に示す。実験を行った多くの年において、GSWP実験の方が観測降水量との相関が高く、現実的な降水量変動を再現できていることが分かる。特に、CNTL実験において相関が極めて低かった1995年、1998年、2000年においてGSWP実験では顕著な改善が見られた。この改善に至るまでの詳細なメカニズムは今後調査する必要があるが、土壌水分量の変化に対して内陸の水蒸気輸送量が変化するだけでなく、大気循環パターンの変化に伴う水蒸気輸送経路の変化も関係していると考えられる。さらに、6節で触れるメソ降水系の振る舞いも土壌水分の大小に応じて変化している可能性がある。また、表1から分かるように降水に対する土壌水分のインパクトは、年によって異なっている。Guo and Dirmeyer (2013)は、乾燥地域では湿潤年に、湿潤地域では乾燥年に、それぞれ土壌水分と降水量のカップリング強度が強まると主張している。どのような大気場や水文レジームが土壌水分の降水に対するインパクトの大小を決めているのか、今後の進展が期待される。

4. 中-高緯度陸域の夏季気温分布と陸面過程

ユーラシア大陸上の中-高緯度地域において、夏季降水量や地上気温の年々変動の偏差場に東西方向に走る波状パターンが見られることが多くの研究で指摘されてい

る。Iwao and Takahashi (2006)やIwasaki and Nii (2006)はモンゴルにおける降水量の年々変動に着目し、これを決定する大気場の偏差として、大陸を東西に縦断する波列パターンが存在することを示した。すなわち、ユーラシア大陸上を流れる亜熱帯ジェットや亜寒帯ジェットの近傍で準定常ロスビー波が伝播し、各地域の降水量の年々変動をコントロールしているのである。さらに、Horton et al. (2015)や2節で述べたErdenebat and Sato (2016)では、数十年に及ぶ異常高温の発生頻度のトレンドも同様に波状パターンを呈していることを示している。このことは、準定常波が近年は特定の位相を持ちやすい傾向にあることを暗示している。Koster et al. (2016)は北米大平原の一部に与えた土壌水分偏差が準定常波を励起し、北米全体に波及する高度偏差を形成すると主張している。このような陸面状態の偏差を起源とするテレコネクションパターンは、ユーラシア大陸北部でも存在する可能性がある。しかし、Koster et al. (2016)でも述べられているように、大気-陸面間の相互作用は複雑であり、サンプル数が不十分だと有意なシグナルを検出することが困難である。つまり再解析データ等の過去データのみから陸面の寄与を同定することは容易ではない。そこで、Sato and Nakamura (2018)では、AGCM (大気大循環モデル) による大規模アンサンブル実験のデータを解析することで、ユーラシア大陸上における過去の地上気温の偏差場に対する陸面過程の寄与を調べ

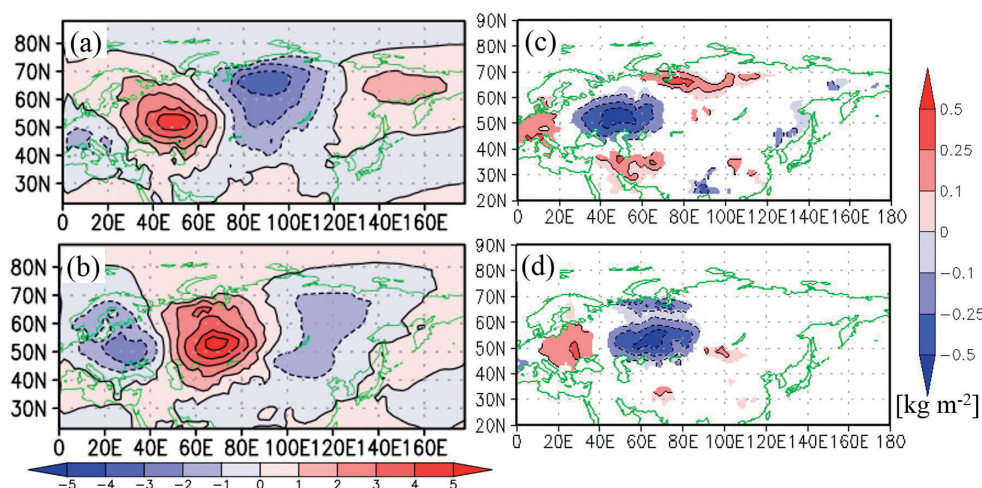


図4：d4PDFによる6-8月平均地上気温の(a)第1主成分および(b)第2主成分と、(c, d)各主成分のスコアで回帰した5月の表層土壌水分偏差。(a)および(b)の符号が逆転すれば、(c)および(d)の符号も逆転する。

た。使用したデータは、気候変動リスク情報創生プログラムによる「地球温暖化対策に資するアンサンブル気候予測データベース」(d4PDF; Mizuta et al., 2017)である。ここでは特に60 km-AGCMによる1951-2010年の60年分の過去実験(100メンバー)の月平均値を使用した。この実験では、過去に観測された全球の海面水温データを境界条件として用いている。そのため、過去の海面水温変動に対する100通りの大気の応答の様子が出力されていることになる。

夏季(6-8月)平均したユーラシア大陸周辺の地上気温分布(サンプル数6,000=60年×100メンバー)に対する主成分解析を行い、卓越する気温偏差パターンとその形成過程を解析した。ここでは、温室効果ガス濃度の変化などの外部強制と海面水温や海水分布の変化による影響を排除し、大気と陸の内部変動に起因する夏季気温変動に着目するため、地上気温として各年のアンサンブル平均値からの偏差を解析に用いている。第1, 2主成分はユーラシア大陸上を東西に走る波状パターンであることから、前述のように準定常波の伝播が夏季気温分布を決める主要因であることが確認できる(図4a, b)。両モードはそれぞれ約1/4波長ずつ水平方向にずれているのみで、波長や経路は類似している。また、スコア時系列も解析した60年間でほぼランダムな変動をしていることから、波列パターンは大気-陸面結合系の内部変動によるものと解釈することができる(図略)。100通りのアンサンブルメンバーの中には、図5に示すようなユーラシア大陸上の地上気温偏差が波列状に分布している様子を現実的に再現するメンバーも存在する。次に、波列パターンの位相を決める要因を考察する。第1主成分ス

コアで回帰した5月の土壌水分(図4c)は、黒海・カスピ海の北で乾燥偏差(または湿潤偏差)であり、6-8月の同地域における高温偏差(または低温偏差)と整合している。同様に第2主成分スコアで回帰した5月の土壌水分(図4d)はカザフスタン周辺で乾燥偏差(または湿潤偏差)を示した。これらの結果から、カザフスタン-ロシア-ウクライナ周辺における春の積雪水量偏差や土壌水分偏差が、準定常波の位相の選択に影響し、引き続く夏のユーラシア大陸広域の気温偏差を決めている、というストーリーを考えることができる。この地域では近年の北極海の水表面積減少にともなってプロッキングの発生頻度が増加し、寒波の発生が増えているとの主張があり(Liu et al., 2012)、この地域の陸面過程は北極と中緯度の気候変動の橋渡しを担う重要なプロセスであるかもしれない。図6を見ると、ユーラシア大陸上では500 hPa面高度の年々変動の振幅が大きいことが分かる。バイカル湖周辺では1980年代は5700 m高度線が低緯度側を通過し(赤線)、2000年代には高緯度側を通過(青線)している。基本場として高緯度側が高高度(すなわち低気圧)で、低緯度側が高高度(すなわち高気圧)であることを考慮すると、2000年代には同地域は高気圧傾向になっているといえる。これとは対称的に60°E付近の地域では、2000年代は1980年代に比べて低緯度側に5700 m高度線が位置しているため、低気圧傾向になっている。この特徴は図1や図5とも整合する。

これらの結果をふまえると、モンゴル周辺の近年の熱波の増加は、大気の内部変動に由来するカザフスタン-ロシア-ウクライナ周辺の積雪水量の増加が関係している可能性が示唆される。Bulygina et al. (2009)によれば、

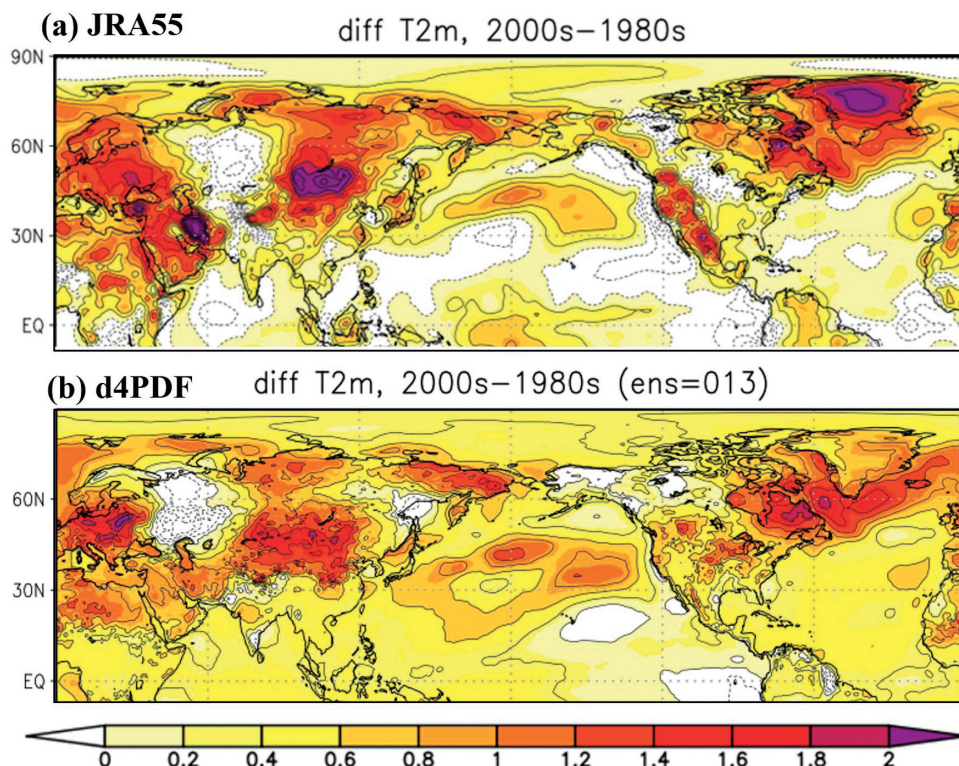


図5：2000年代と1980年代の6-8月平均地上気温の差。

(a) JRA-55, (b) d4PDF, d4PDFの図は特定のメンバー(N=13)を用いている。東西に並んだ波列状の気温差の分布, すなわち西ヨーロッパおよびモンゴル周辺における2000年代の昇温強化とロシア西部およびカザフスタン周辺における昇温抑制, が(a)と(b)で類似している。

Z=5700m at 500hPa, JJA 1981–2010

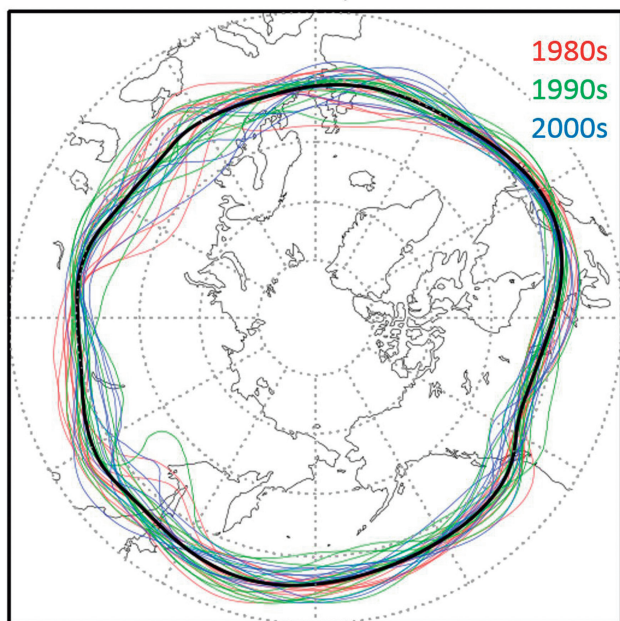


図6：500 hPa面におけるジオポテンシャル高度分布。カラー線は各年代における各年の6-8月平均した5700 m高度線の位置を表す。黒線は1981–2010年の平均を表す。

この地域では実際に1990年代以降、積雪深の増加が指摘されており、この解釈と整合する。Nitta et al. (2017)によると、全球気候モデルにおいて、融雪に伴って拡大する湿地をモデル中で適切に再現し、低地に融雪水が長期間滞留する状態を表現できるようになると、この地域の夏の高温バイアスが軽減される。これも、この地域の積雪偏差が夏の気温に対して重要な要因であることの証左である。

本節で述べたような大陸規模の大気陸面相互作用では、冬の積雪偏差が陸面過程の様々なプロセスに蓄積され、夏の気温偏差へと伝達されていることが確認できる。つまり、本稿の冒頭で述べたように、大気陸面相互作用の詳細な理解は季節予報の改善に貢献できる可能性がある。話は逸れるが、広域かつ長期間持続する熱波は、土壌の乾燥傾向を強め、大規模な森林火災を誘発することがある。シベリア周辺を起源とする森林火災由来の大気汚染物質がはるばる日本まで長距離輸送される例も報告されており (Ikeda and Tanimoto, 2015; Yasunari et al., 2018), 陸面状態の偏差が物質輸送という形で再び広域の大気に情報を伝達するという地球化学的経路が存在することも付け加えておく。

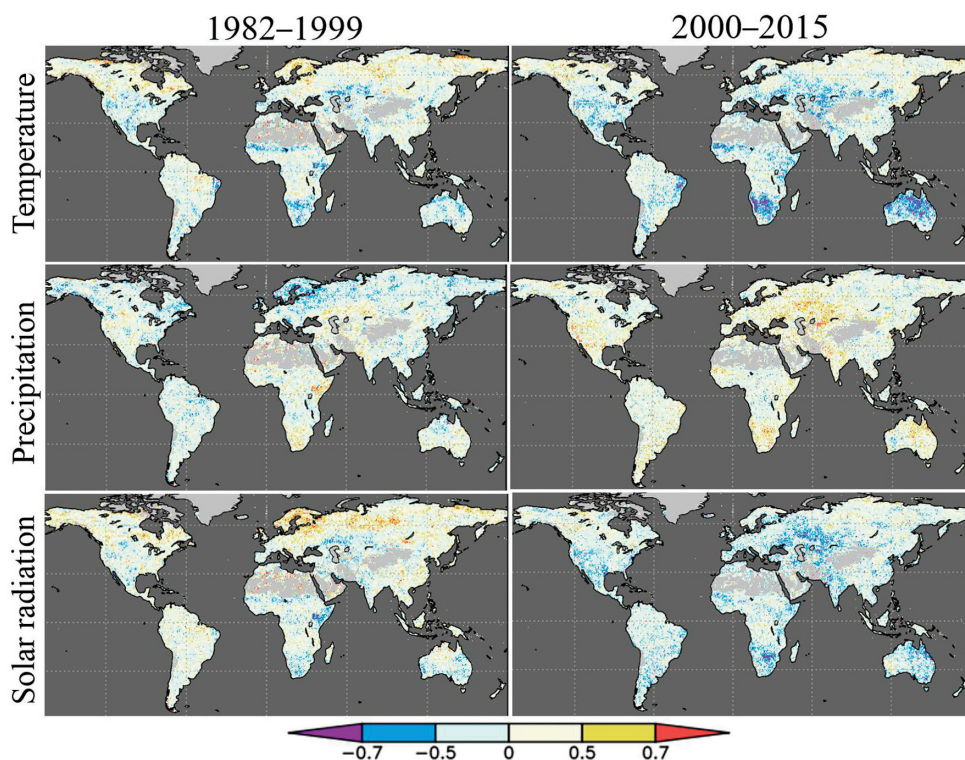


図7：年最大NDVIと各気象変数（上段から地上気温、降水量、日射量の順）の年々変動の相関係数の分布。左段は1982-1999年、右段は2000-2015年を解析対象としている。玉本（2017）より。

5. 植生活動度と気候偏差の連動

4節で紹介した解析では、カスピ海や黒海の北に位置するカザフスタン-ロシア-ウクライナの国境周辺で春の積雪偏差と夏季平均気温との関係が示唆された。ここでは、この地域の陸面過程にどのような特徴があるのか、植生活動と気象条件の年々変動の係に注目しながら大気陸面相互作用を考えることにする。植生活動の様子を観測できる高い空間分解能を持つ衛星データが利用可能になって、既に数十年が経過した。このデータ蓄積のおかげで、気候変動に対する陸上生態系の応答がさかんに研究されている。Ramakrishna et al. (2003) や Seddon et al. (2016) は植生のモニタリングによく使われる衛星搭載センサーである AVHRR や MODIS をそれぞれ利用して植生活動と気象の係を調べているが、気候変化を議論するためにはさらに長期間の解析が望ましい。そこで、玉本 (2017) では、1982年から2015年の期間について、正規化植生指数 (NDVI: Normalized Difference Vegetation Index) と気象要素（ここでは降水量、気温、日射量）の係がどのように変遷しているのか調査した。植生指数の算出には AVHRR および MODIS のデータを用い、気象データは全球再解析データ JRA55 を用いた。図7に植生指数と各気象変数の年々変動の相関係数

の分布を示す。解析では、各グリッドの年最大NDVIと、年最大NDVIとなる月の気象変数の平年からの偏差を用いた。西シベリアからカザフスタンの周辺地域は、周囲に比べて気象変数と植生活動の相関が高いことが分かるだろう。2000年以前は気温や日射量と植生指数の年々変動に正の相関が認められるが、2000年以降は、降水量と植生指数との間の正相関が強まっている。すなわち、解析期間の前半は気温と日射量が植生活動の制限要因だったが、近年は降水量が制限要因となっている。さらにこの地域では、1~2か月前の降水量と植生指数との相関が高いことが分かっており（玉本, 2017）、降水量偏差が土壌水分偏差としてシグナルを持続し、夏の植生活動の偏差として現れるというメモリ効果の存在が示唆される。ただし、本研究では気象データの解析には再解析データを使用しており、詳細な議論には検討の余地が残っているため、後続研究が待たれる。

6. メソ対流系を介した大気と陸面の関係

最後に、陸面状態が北東アジア地域で発生・発達する対流システムに与える影響について述べる。Iwasaki et al. (2008) や Sato et al. (2007) によって、中国北部やモンゴル周辺では夏季に対流活動の日変化が顕著であるこ

とが示されている。この対流活動の日変化は山谷風循環のような地形起伏に起因するものに限らず、植生や土壌水分の空間分布の不均一性に起因することもある。半乾燥地域の西アフリカサヘルでは、地温の分布が不均一であるほどメソ対流系(MCS)の発生数が増加する(Taylor et al., 2011)。同様の関係がモンゴル周辺でも見られるのかどうか、寺村ほか(2018)では長期間の衛星観測データを用いて解析を行った。その手順と結果は以下の通りである。

気象衛星ひまわり5号の赤外輝度温度が -40°C 以下となる領域を発達した対流雲とみなし、対流雲の日変化を調べた。解析期間は1998-2002年の6-8月、対象地域は $40^{\circ}\text{--}50^{\circ}\text{N}$, $100^{\circ}\text{--}120^{\circ}\text{E}$ である。この地域では対流雲の面積が午後に最大となるため、ピークとなる時間帯4時間の平均対流雲面積と午前中の4時間の平均対流雲面積の差を対流活動度と定義し、それぞれの日について対流活動度を算出した。対流活動度が大きいほど、対流雲が午後に広く発達することを表す。次に、地温分布を推定するために可視反射率が0.2以下の領域の赤外輝度温度を地温の指標(LST_{BB})とした。ここでは、対流雲の出現頻度が最も少なかった午前10時の LST_{BB} を解析する。データの空間分解能0.05度よりも小さな雲による LST_{BB} への影響を極力排除するため $\text{LST}_{\text{BB}} \leq 0^{\circ}\text{C}$ の領域は解析に用いない。さらに、前後10日平均 LST_{BB} からの各日の偏差を本解析に用いている。

図8に LST_{BB} 分布の標準偏差を対象地域内で平均した値と対流活動度との関係を示す。 LST_{BB} 分布の不均一性が大きい場合ほど対流活動が活発になりやすいことが図から読みとれる。地温分布の不均一性が大きいと、熱的局地循環が発達しやすくなり、水平対流の収束域で上昇流が強まる。これが積雲対流のトリガーとなると解釈することができる。ここで紹介した解析方法では、衛星の空間分解能より小さな小積雲の影響を除去できていない可能性があり、 LST_{BB} の標準偏差が大きい日には既に対流雲が発生している可能性を否定できない。すなわち、午前10時の時点で小積雲が多く存在している日ほど、対流活動の日変化が大きくなるという効果も含まれている。静止気象衛星データを用いて客観的に自動検出したMCSが最初に発生した位置の LST_{BB} を詳細に調べるなど今後の進展を期待したい。図8で示された結果は、改善の余地はあるものの、次の2つの観点から非常に重要な意味を持つと考えている。

(1) 大気の総観場は各日のMCSの発生確率と潜在的な発生可能エリアを決定する。それに対して陸面状態はMCSの発生しやすい場所をより詳細に特定する際の手

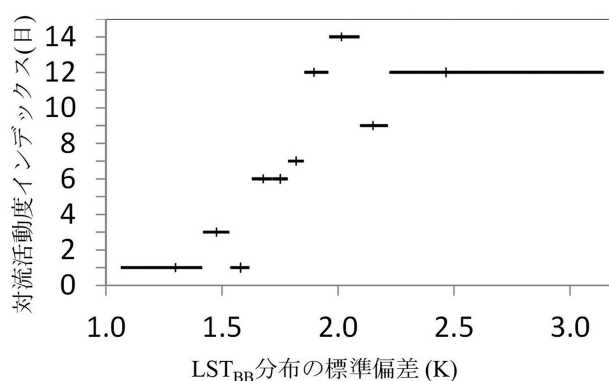


図8: $0.4^{\circ} \times 0.4^{\circ}$ 格子内の LST_{BB} 分布の標準偏差と対流活動度インデックスの関係。

対流活動度インデックスは対流活動の日変化振幅が上位20%を超えた日数で定義した。横棒は LST_{BB} 標準偏差の10パーセンタイルごと(棒)の範囲を示す。バーの横幅は10%ごとの値の範囲を、短い縦棒との交点はその平均値を表す。

がかりとなる。一般的な短時間降水の数値予報では、下層風の収束や水蒸気量の増加など、対流活動の予兆であるメソスケール循環を観測によって捕えることが重要である。一方、本研究から得られた知見は、メソスケール循環の発生に寄与する陸面諸量を解析することで、循環が生じる前にメソ対流系が発生・発達しやすい場所を見つけることができるかもしれない。

(2) 北東アジア地域は夏季のストームトラック(低気圧活動の活発な領域)上に位置している。ここで大量に発生するMCSは、自由大気へ水蒸気を輸送する働きがあるだろう。またMCS内の凝結加熱は自由大気を強く加熱し、総観規模場を変質させるかもしれない。衛星データの解析から指摘されているように、陸面状態の空間不均一性がMCSの発生率に影響を与えているとすると、陸面状態は中緯度の低気圧活動を何らかの形で強制している可能性がある。メソからシノプティックの大気現象や大気場への強制プロセスの解明が今後の重要なテーマとなるだろう。

7. 結び

本稿では、様々な空間スケールで実施されている大気陸面相互作用の研究のうち、筆者等が行ったメソスケールとそれより大きな空間スケールの研究に焦点を当てて執筆した。ユーラシア大陸の中-高緯度地帯に見られる大気陸面相互作用の特徴を図9にまとめる。これらの研究にはそれぞれ個別の研究動機があり独立に開始した研究であったが、大気陸面相互作用をキーワードにすることで多くの共通項があることを確認でき、なかには今後発展が期待される発見があった。しかし、それと同時に

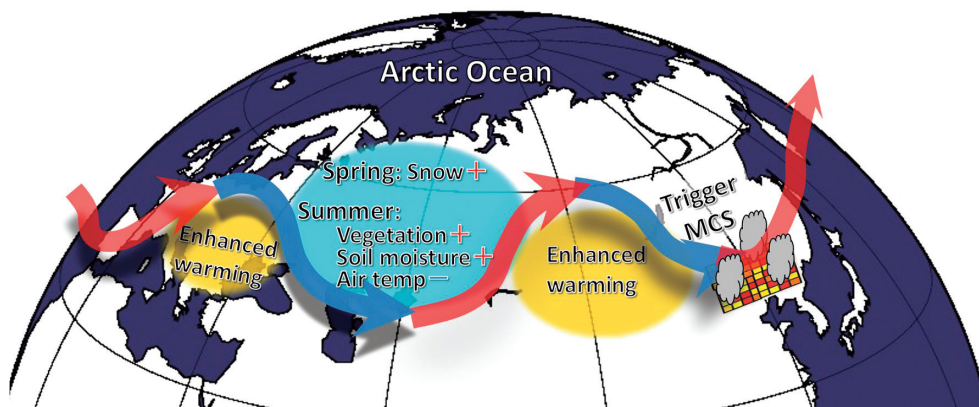


図9：ユーラシア大陸における夏季の大気総観場と大気陸面相互作用。

新しい疑問も浮かんでくる。例えば、東欧～西シベリアの地域では、積雪偏差が植生動態変化や夏のユーラシア広域の気温パターンに関係することが示唆された。この地域の積雪偏差はどのような要因で形成されるのだろうか。先行研究では、北極海の水表面積変動や北大西洋振動の寄与が指摘されているが、その寄与は数10年規模でどのように変動するのだろうか。また、この地域の陸面状態の変化は東アジア地域の季節予報精度に影響するのだろうか。モンゴル周辺の半乾燥地帯では、初夏の土壌水分が夏の降水量の多寡に寄与していることや、強い降水をもたらすメソ擾乱の発生と関係していることが分かりつつある。それでは、将来懸念されている強い降水や干ばつなどの極端気象の増加に対して、大気陸面相互作用はどの程度の貢献をしているのだろうか。また、陸面スキームの違いによって、将来の極端気象の頻度や強度はどの程度異なるのだろうか。

これらの疑問に答えるためには、大気陸面相互作用の素過程の理解を進めるのと同時に、気象予報や気候変動予測および要因分析などの時間変化を含んだ問いに対して、素過程の理解がどのように適用できるのかを常に探求することが肝要であると考える。

謝辞

本研究は、北極域研究推進プロジェクト（ArCS）、科学研究費補助金（15H05464）の支援で実施された。

参考文献

Bulygina, O. N., V. N. Razuvaev and N. N. Korshunova (2009) Changes in snow cover over Northern Eurasia in the last few decades. *Environ. Res. Lett.*, **4**, 045026. doi: <https://doi.org/10.1088/1748-9326/4/4/045026>.

[org/10.1088/1748-9326/4/4/045026](https://doi.org/10.1088/1748-9326/4/4/045026).

- Dirmeyer P. A., X. Gao, M. Zhao, Z. Guo, T. Oki and N. Hanasaki (2006) GSWP-2: multimodel analysis and implications for our perception of the land surface. *Bull. Am. Meteorol. Soc.*, **87**, 1381–1397.
- Fischer, E. M., S. I. Seneviratne, D. Lüthi and C. Schär (2007a) Contribution of land-atmosphere coupling to recent European summer heat waves. *Geophys. Res. Lett.*, **34**, L06707, doi: <https://doi.org/10.1029/2006GL029068>.
- Fischer, E. M., S. I. Seneviratne, P. L. Vidale, D. Lüthi and C. Schär (2007b) Soil moisture-atmosphere interactions during the 2003 European summer heat wave. *J. Clim.*, **20**, 5081–5099.
- Erdenebat, E. (2016) Statistical and numerical study of hot extremes in Mongolia: possible contribution of soil moisture to the recent increase in heat waves. PhD dissertation, Hokkaido University. 93pp.
- Erdenebat, E. and T. Sato (2016) Recent increase in heat wave frequency around Mongolia: Role of atmospheric forcing and possible influence of soil moisture deficit. *Atmos. Sci. Lett.*, **17**, 135–140.
- Erdenebat, E. and T. Sato (2018) Role of soil moisture-atmosphere feedback during high temperature events in 2002 over Northeast Eurasia. *Prog. Earth Planet. Sci.*, **5**, doi: <https://doi.org/10.1186/s40645-018-0195-4>.
- Guo, Z. and P. A. Dirmeyer (2013) Interannual variability of land-atmosphere coupling strength. *J. Hydrometeorol.*, **14**, 1636–1646.
- Horton, D. E., N. C. Johnson, D. Singh, D. L. Swain, B. Rajaratnam and N. S. Diffenbaugh (2015) Contribution of changes in atmospheric circulation patterns to extreme temperature trends. *Nature*, **522**, 465–469.
- Ikeda K. and H. Tanimoto (2015) Exceedances of air quality standard level of PM_{2.5} in Japan caused by Siberian wildfires. *Environ. Res. Lett.*, **10**, 105001 doi: [10.1088/1748-9326/10/10/105001](https://doi.org/10.1088/1748-9326/10/10/105001).
- Iwao, K. and M. Takahashi (2006) Interannual change in

- summertime precipitation over northeast Asia. *Geophys. Res. Lett.*, **33**, doi: <https://doi.org/10.1029/2006GL027119>.
- Iwasaki, H. and T. Nii (2006) The break in the Mongolian rainy season and its relation to the stationary Rossby wave along the Asian jet. *J. Clim.*, **19**, 3394–3405.
- Iwasaki, H., T. Sato, T. Nii, F. Kimura, K. Nakagawa, I. Kaihotsu and T. Koike (2008) Diurnal variation of convective activity and precipitable water around Ulaanbaator, Mongolia, and the impact of soil moisture on convective activity during nighttime. *Mon. Wea. Rev.*, **136**, 1401–1415.
- Kanamitsu, M., W. Ebisuzaki, J. Woollen, S. K. Yang, J. J. Hnilo, M. Fiorino and G. L. Potter, (2002) NCEP-DOE AMIP-II Reanalysis (R-2). *Bull. Am. Meteorol. Soc.*, **83**, 1631–1643.
- Koster, R. D., Y. Chang, H. Wang and S. D. Schubert (2016) Impacts of local soil moisture anomalies on the atmospheric circulation and on remote surface meteorological fields during boreal summer: A comprehensive analysis over North America. *J. Clim.*, **29**, 7345–7364.
- Liu, J., J. A. Curry, H. Wang, M. Song and R. M. Horton (2012) Impact of declining Arctic sea ice on winter snowfall. *Proc. Natl. Acad. Sci.*, **109**, 4074–4079.
- Mizuta, R., A. Murata, M. Ishii, H. Shiogama, K. Hibino, N. Mori, O. Arakawa, Y. Imada, K. Yoshida, T. Aoyagi, H. Kawase, M. Mori, Y. Okada, T. Shimura, T. Nagamoto, M. Ikeda, H. Endo, M. Nosaka, M. Arai, C. Takahashi, K. Tanaka, T. Takemi, Y. Tachikawa, K. Temur, Y. Kamae, M. Watanabe, H. Sasaki, A. Kitoh, I. Takayabu, E. Nakakita and M. Kimoto (2017) Over 5,000 years of ensemble future climate simulations by 60-km global and 20-km regional atmospheric models. *Bull. Am. Meteorol. Soc.*, **98**, 1383–1398.
- Mariotti, A., P. M. Ruti and M. Rixen (2018) Progress in subseasonal to seasonal prediction through a joint weather and climate community effort. *npj Clim. Atmos. Sci.*, **1**, 4.
- Nitta T., K. Yoshimura and A. Abe-Ouchi (2017) Impact of Arctic wetlands on the climate system: Model sensitivity simulations with the MIROC5 AGCM and a snow-fed wetland scheme. *J. Hydrometeorol.*, **18**, 2923–2936.
- Sato, T., F. Kimura and A. S. Hasegawa (2007) Vegetation and topographic control of cloud activity over arid/semiarid Asia. *J. Geophys. Res. -Atmospheres*, **112**, D24109, doi: [10.1029/2006JD008129](https://doi.org/10.1029/2006JD008129).
- Sato, T. and Y. Xue (2013) Validating a regional climate model's downscaling ability for East Asian summer monsoonal interannual variability. *Clim. Dyn.*, **41**, 2411–2426, doi: [10.1007/s00382-012-1616-5](https://doi.org/10.1007/s00382-012-1616-5).
- Sato, T. and T. Nakamura (2018) Intensification of hot Eurasian summers by climate change and land-atmosphere interaction. Submitted.
- Seddon W. A., M. Macias-Fauria, P. R. Long, D. Benz and K. J. Willis (2016) Sensitivity of global terrestrial ecosystems to climate variability. *Nature*, **531**, 229–232.
- Seneviratne, S. I., T. Corti, E. L. Davin, M. Hirschi, E. B. Jaeger, I. Lehner, B. Orlowsky and A. J. Teuling (2010) Investigating soil moisture-climate interactions in a changing climate: A review. *Earth Sci. Rev.*, **99**, 125–161.
- Skamarock W. C., J. B. Klemp, J. Dudhia, D. O. Gill, D. M. Barker, M. G. Duda, X. Y. Huang, W. Wang and J. G. Powers (2008) A description of the advanced research WRF version 3. *NCAR TECHNICAL NOTE*, NCAR/TN-475 + STR.
- Taylor, C. M., A. Gounou, F. Guichard, P. P. Harris, R. J. Ellis, F. Couvreur and M. De Kauwe (2011) Frequency of Sahelian storm initiation enhanced over mesoscale soil-moisture patterns. *Nature Geoscience*, **4**, 430–433.
- Ramakrishna R. N., C. D. Keeling, H. Hashimoto, W. M. Jolly, S. C. Piper, C. J. Tucker, R. B. Myneni and S. W. Running (2003) Climate-driven increases in global terrestrial net primary production from 1982 to 1999. *Science*, **300**, 1560–1563.
- Xue Y, P. J. Sellers, J. L. Kinter and J. Shukla (1991) A simplified biosphere model for global climate studies. *J. Clim.*, **4**, 345–364.
- Xue Y, F. J. Zeng, K. E. Mitchell, Z. Janjic and E. Rogers (2001) The impact of land surface processes on simulations of the U.S. hydrological cycle: a case study of the 1993 flood using the SSiB land surface model in the NCEP Eta regional model. *Mon. Wea. Rev.*, **129**, 2833–2860.
- Yasunari, T. J., K.-M. Kim, A. M. da Silva, M. Hayasaki, M. Akiyama and N. Murao (2018), Extreme air pollution events in Hokkaido, Japan, traced back to early snowmelt and large-scale wildfires over East Eurasia: Case studies, *Sci. Rep.*, **8**, 6413, doi: [10.1038/s41598-018-24335-w](https://doi.org/10.1038/s41598-018-24335-w).
- Yatagai A, O. Arakawa, K. Kamiguchi, H. Kawamoto, M. I. Nodzu and A. Hamada (2009) A 44-year daily gridded precipitation dataset for Asia based on a dense network of rain gauges. *SOLA*, **5**, 137–140.
- 佐藤友徳 (2009) 土地被覆変化と気候. 細水, **55**, 2–7.
- 玉本 誠 (2017) 衛星データを用いた全球の過去 34 年間における植生活動と気象要素の関係. 北海道大学大学院環境科学院 修士論文. 26pp.
- 寺村大輝, 佐藤友徳 (2018) 北東アジア半乾燥地域におけるメソ対流系の発達に対する大気と陸面の寄与. 日本気象学会 2018 年秋季大会講演予稿集, A363.