

雪融けの早さが北海道に大気汚染をもたらす可能性を発見！

－東ユーラシアの早期雪融け・昇温・乾燥長期化が大規模森林火災の発生要因に－

ポイント

- ・2003年以降北海道に大気汚染をもたらした東ユーラシアの大規模森林火災3事例の発生要因を解析。
- ・年明けからの平年に比べた乾燥化、早期融雪、地上付近の昇温により、結果として乾燥が長期化。3事例の大規模森林火災が発生し、そのスモークが北海道まで輸送され大気汚染をもたらした。
- ・今後、広域・局所的な防災・環境保全に向けた森林火災の高精度予測化につながることを期待される。

概要

北海道大学大学院工学研究院（北極域研究センター兼務）の安成哲平助教らの、米国 NASA、日本自動車研究所、北海道立総合研究機構（環境科学研究センター）による国際研究チームは、2014年7月の札幌市による初のPM_{2.5}に関する注意喚起の原因となった大規模シベリア森林火災の気候的発生要因の特定に成功し、2003年以降同様に北海道に大気汚染をもたらした他の2事例の東ユーラシアの大規模森林火災についても同様の発生要因であったことを明らかにしました。

2014年7月、シベリア森林火災由来と思われるスモークが札幌市に大気汚染をもたらし、札幌市が初めてPM_{2.5}に関して注意喚起を行うほどの事例がありました (<https://goo.gl/AG2pQX>)。研究チームがNASAの再解析データMERRA-2^{*1}を解析したところ、森林火災発生域のサハ共和国から高濃度大気汚染が広範囲に広がり、北海道でもPM_{2.5}濃度の大きな上昇をもたらしたことがわかりました。

また、札幌におけるPM_{2.5}と粒子状有機物濃度（主に有機炭素；森林火災の指標）の月別平均値の変化をMERRA-2を使用して調べたところ、森林火災の影響が比較的大きい大気汚染が2003年5月と2008年4月にも起こっていました。2003年5月、2008年4月、2014年7月の3事例の大気汚染の起源をMERRA-2及びMODISによる衛星データ^{*2}を用いて解析したところ、これらの年は、年明けから平年より乾燥しており、火災数ヶ月前に平年より雪が少ない状態（早期融雪）と地上付近の昇温が見られました。これらにより乾燥状態が強化され、その結果土壌水分の少ない乾燥状態が何ヶ月も長期化し、大規模森林火災が発生しうる気候・環境状態が形成されていたと結論づけられました。

本研究により、将来の森林火災発生とその大気汚染の高精度予測化に向けて、火災発生月以前の気候・環境状態を考慮することの重要性が示されました。本研究の成果は、将来の気候変動に伴う森林火災発生とその広域・局所的な影響評価、地域の防災・生態系などの環境保全に向けた今後の数値モデルによる高精度予測化につながることを期待されます。

本研究は、文部科学省の補助事業である北極域研究推進プロジェクト（ArCS）の支援の下で行われ、研究の一部は、科学研究費助成事業の基盤研究（B）（特設分野研究、17KT0066）によって支援されました。MERRA-2及び衛星データはNASAが作成したものを使用し、本研究は、NASAと安成助教の継続的な国際共同研究として行われました。PM_{2.5}濃度のデータは環境省によって維持・管理されているものを使用しました。なお、本研究成果は、英国時間2018年4月25日（水）に英国Springer Natureのオープンアクセス電子ジャーナル「Scientific Reports」にオンライン掲載されました。

【背景】

森林火災（バイオマス燃焼）から発生するスモークは大気汚染をもたらすことが従来の研究より知られています（論文中の文献参照）。2014年7月には、札幌市が2010年の観測以来PM_{2.5}に対する初めての注意喚起を行い、そのスモークは東ユーラシア域のシベリア起源であったことが報告されています（<https://goo.gl/AG2pQX>）。しかし、何故このような大規模森林火災が発生し、その影響が北海道にまで及んだのかについては明らかになっていませんでした。また、森林火災が原因とみられるスモークの北海道への大気汚染の影響としては、2003年5月と2008年4月の事例において、利尻の観測や大気輸送モデルを使用した先行研究でも報告されていました（Ikeda and Tanimoto, 2015, *Environ. Res. Lett.*, doi:10.1088/1748-9326/10/10/105001）。

将来の気候変動に伴って、このような大規模森林火災発生とその大気汚染を高精度で予測できるようになることは、森林火災の発生域及び風下域の人々の防災や生態系などの環境保全という観点から極めて重要です。そこで本研究では、将来の高精度予測化に向けた第一歩として、2014年7月の大規模森林火災の詳細解析に併せて2003年5月と2008年4月の森林火災の解析も行い、これらの大規模森林火災の気候・環境的発生要因と、北海道にその大気汚染が到達した理由を解明することを目的に研究を行いました。

【研究手法】

本研究では、NASAが作成した全球グリッド再解析データであるMERRA-2、NASAのAqua/Terra衛星のMODISセンサーによって得られた火災発生のパixelカウント数データや積雪被覆率の衛星データを主な解析データとして使用しました。また、環境省が測定・維持・管理するPM_{2.5}濃度のデータ（確定値）を使用しました*3。MERRA-2からのPM_{2.5}濃度の見積もりは、Buchard et al. (2016, *Atmos. Environ.*, doi: 10.1016/j.atmosenv.2015.11.004)の方法によって算出しました。なお、MERRA-2作成に使用されているNASA GEOS-5の化学輸送モデルGOCARTでは、有機炭素(Organic Carbon, OC)は、粒子状有機物として計算されています(Particulate Organic Matter, POM; OCの1.4倍として計算: Colarco et al., 2010, *J. Geophys. Res.*, doi:10.1029/2009JD012820)。

3つの事例の気候的条件の解析では、MERRA-2データの月平均値を使用し、2003-2015年の月別平均値（気候値と呼ぶ）からのアノマリー（偏差）を計算しました。また、各変数の標準誤差(Mean Standard Error: MSE)を求めて、各対象変数のアノマリーの絶対値が3.055*MSE (t分布と呼ばれる確率分布をベースにした99%信頼区間)より大きい場合に、「通常でない(平年でない)」と判断しました。図4-6の月ごとの帯状平均積雪被覆率アノマリーでは、上記MSEの条件に加えて、積雪被覆率は、その気候値が1%より小さいデータは上記議論の対象外として除外しました。

【研究成果】

2014年7月25日には、シベリア域のサハ共和国内で発生している森林火災とそのスモークが日本に輸送されているのが衛星画像からはっきりと捉えられており(図1a)、NASAのMERRA-2によるPM_{2.5}濃度の日平均値(算出値)は広範囲において日本の環境基準の日平均値(35 μg m⁻³; <http://www.env.go.jp/air/osen/pm/info.html#STANDARD>)を超えていることもわかりました(図1b)。日本の観測では、このスモークによる大気汚染は北日本では北海道が顕著に影響を受けていました(図1c)。

また、MERRA-2による算出PM_{2.5}濃度は、2014年7月の札幌市のPM_{2.5}濃度の時間変動をおおむねよく再現しており、MERRA-2を使用することの妥当性も確認できました(図2)。札幌では、2003年以降に、MERRA-2の粒子状有機物濃度(主に有機炭素; 研究手法参照)の月平均値の上位3つのピークとPM_{2.5}濃度(計算値)の上昇が連動しており、2003年5月、2008年4月、2014年7月に顕

著な森林火災による大気汚染の影響があったことが示唆されました（図 3）。前者 2 つの森林火災による PM_{2.5} 濃度の上昇は北海道の利尻での観測でも報告されており（Ikeda and Tanimoto, 2015）、本研究の札幌での解析と整合的でした。

これらの 3 つの森林火災の発生年の気候・環境条件を MERRA-2 及び衛星データを使って解析したところ、これらの事例には共通する気候・環境的特徴がありました（図 4-6）。森林火災発生年の始め頃から、平年より表面土壌が乾燥した状態が見られました。また、森林火災発生の数ヶ月前に、積雪が平年よりも少なく（雪解けが早い：気候値との比較より）、地上付近温度も平年より暖かい昇温状態でした。そして、夏頃まで長期化した土壌の乾燥化が続きました。つまり、早期の雪融けと暖かい条件が重なることで、融解水はいったん土壌に入るものの、地表付近の暖かい状態が蒸発を強化することで、その後、土壌水分の少ない乾燥した状態が長期的（数ヶ月）に維持されるのではないかと考えられました。平年より乾燥した状態に、更に早期の雪融けと平年より暖かい状態が重なることで、長期的な（数ヶ月も続く）乾燥状態が維持され、その結果、森林火災月には大規模な森林火災が発生してもおかしくない気候・環境が形成され、これら 3 事例の大規模森林火災が発生したと結論づけられました（図 7）。そして、平年に比べて卓越した大気循環場（高圧・低圧偏差場；850 hPa を使用）の位置的条件により大気汚染の輸送パターンが決まり、例えば、2014 年の事例では、ロシア・アムール州の辺りに発達した低気圧性の渦（負の偏差）により、高緯度から中緯度の北海道まで大気汚染が輸送されやすい状況が同時に形成されていたことも明らかになりました（図 6）。

【今後への期待】

今後の地球温暖化により、北半球中緯度以北の森林火災発生が増加することが気候モデルで予測されています（Veira et al., 2016, *J.Geophys. Res. Atmos.*, doi:10.1002/2015JD024142）。東ユーラシアの森林火災発生域周辺や日本などの風下域に住む人々への健康影響、発生域周辺の火災による生態系への環境影響などを考えますと、森林火災発生、それに伴う大気汚染物質発生量、生態系への影響などを今後高精度で予測できることが、人々の健全な生活の維持や生態系保全（環境保全）などに直結するため極めて重要です。

本研究の成果により、3 事例の大規模森林火災発生の主な要因が乾燥状態の長期化であったことが示唆されましたが、その乾燥状態長期化維持のためのメカニズムとして、大規模火災発生の数ヶ月前からの積雪・地上付近気温と土壌水分といった気候・環境状態が相互的に関連していることが明らかとなりました。この知見は、大規模森林火災発生数ヶ月前からの気候・環境状態を考慮することが数値モデルによる森林火災発生の定量的な高精度予測化のために非常に重要であることを示唆しています。

しかし、今回のケースのみですべての森林火災発生を説明できるわけではなく、今後、多様な森林火災研究が必須となります。また、様々な分野の研究者により今後、北極域の森林火災研究が活発に行われることで、将来的に上記地域の人々・生態系の持続可能性を健全に高めることができると考えられます。また、本研究でも示されたように、森林火災の大気汚染の影響は北極圏から日本（北海道）を含む中緯度まで広範囲に及ぶため、日本が推進する「我が国の北極政策」の意義（<https://goo.gl/be996f>）もさらに強調される内容となりました。北極圏及びその周辺域の中高緯度の「森林火災」というキーワードを軸とした多様かつ学際的な研究テーマが、日本の今後の北極域研究の一つの重要な長期的研究課題となることが考えられます。このためには、日本と多くの関連諸国の研究による国際協力・連携が今後益々重要となります。本研究成果が、広域・局所的防災・環境保全に向けた森林火災及びその大気汚染発生の数値モデルによる高精度予測につながっていくことがおおいに期待されます。

論文情報

論文名 Extreme air pollution events in Hokkaido, Japan, traced back to early snowmelt and large-scale wildfires over East Eurasia: Case studies (東ユーラシア域における早期融雪と大規模森林火災に帰着できる北海道の大気汚染イベント：ケーススタディ)

著者名 安成哲平^{1,2}, Kyu-Myong Kim³, Arlindo M. da Silva³, 早崎将光⁴, 秋山雅行⁵, 村尾直人¹
(¹北海道大学大学院工学研究院, ²北海道大学北極域研究センター, ³アメリカ航空宇宙局(NASA), ⁴日本自動車研究所, ⁵北海道立総合研究機構環境科学研究センター)

雑誌名 Scientific Reports

DOI 10.1038/s41598-018-24335-w

公表日 英国時間 2018 年 4 月 25 日 (水) (オンライン公開)

お問い合わせ先

北海道大学大学院工学研究院 助教 安成哲平 (やすなりてっぺい)

T E L 011-706-6872 F A X 011-706-6872 メール t.j.yasunari@eng.hokudai.ac.jp

配信元

北海道大学総務企画部広報課 (〒060-0808 札幌市北区北 8 条西 5 丁目)

T E L 011-706-2610 F A X 011-706-2092 メール kouhou@jimuhokudai.ac.jp

【参考図】

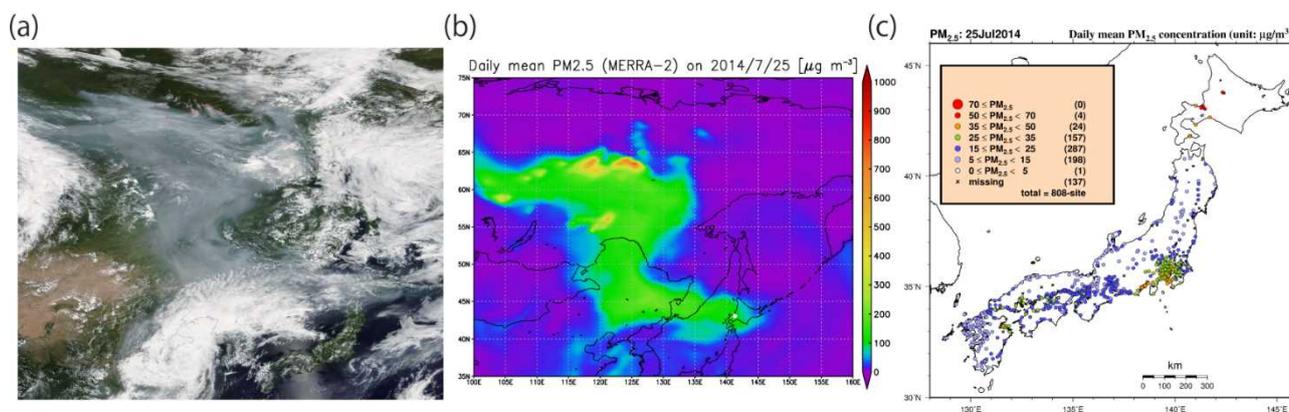


図 1 :

(a) NASA の Aqua 衛星によって捉えられた 2014 年 7 月 25 日の森林火災及びそのスモーク (NASA's Worldview website より取得 : <https://worldview.earthdata.nasa.gov/>)。

(b) NASA MERRA-2 から算出された同じ日の日平均 PM_{2.5} 濃度 (色付き等値線 ; 単位は $\mu\text{g m}^{-3}$)。

(c) 同じ日の観測 (環境省) による PM_{2.5} 濃度 (確定値 ; 単位は $\mu\text{g m}^{-3}$)。

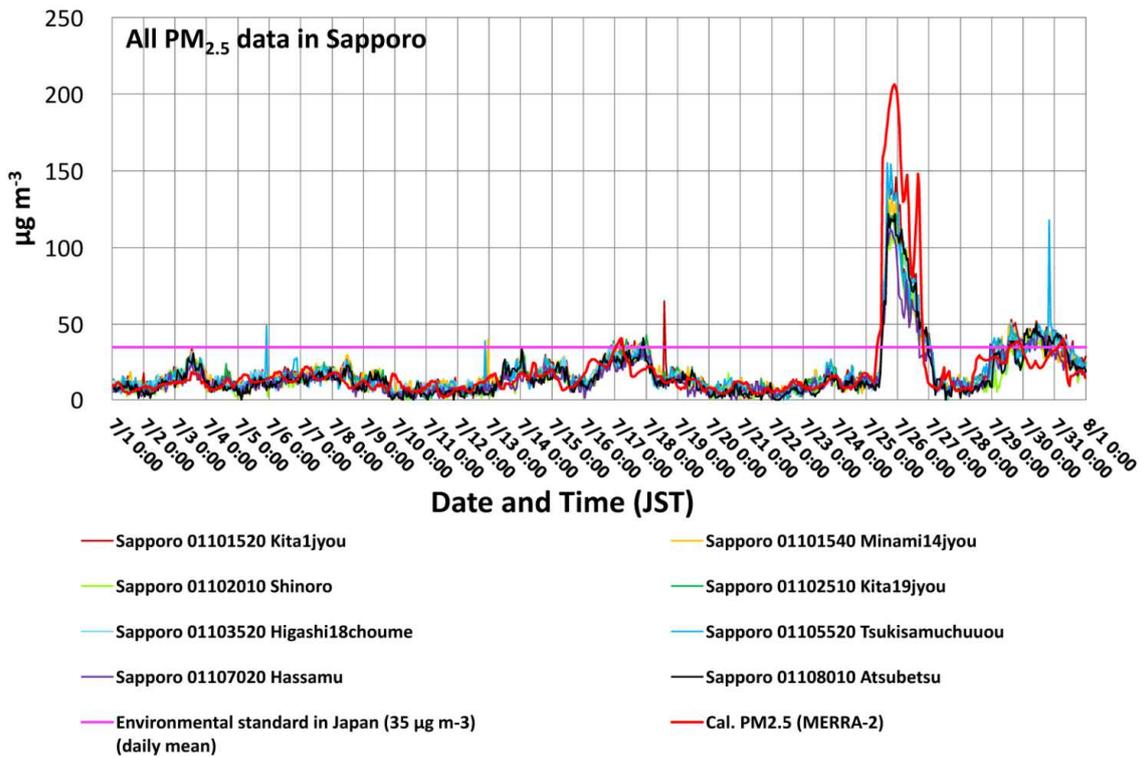


図 2 :

2014年7月の札幌市内の観測によるPM_{2.5}濃度(確定値)とMERRA-2によって算出されたPM_{2.5}濃度(赤線)。ピンクの線は、参考として表示した、環境省によるPM_{2.5}濃度の日平均値の環境基準値(35 µg m⁻³)。横軸は時間(日本標準時)で、縦軸はPM_{2.5}濃度(µg m⁻³)。

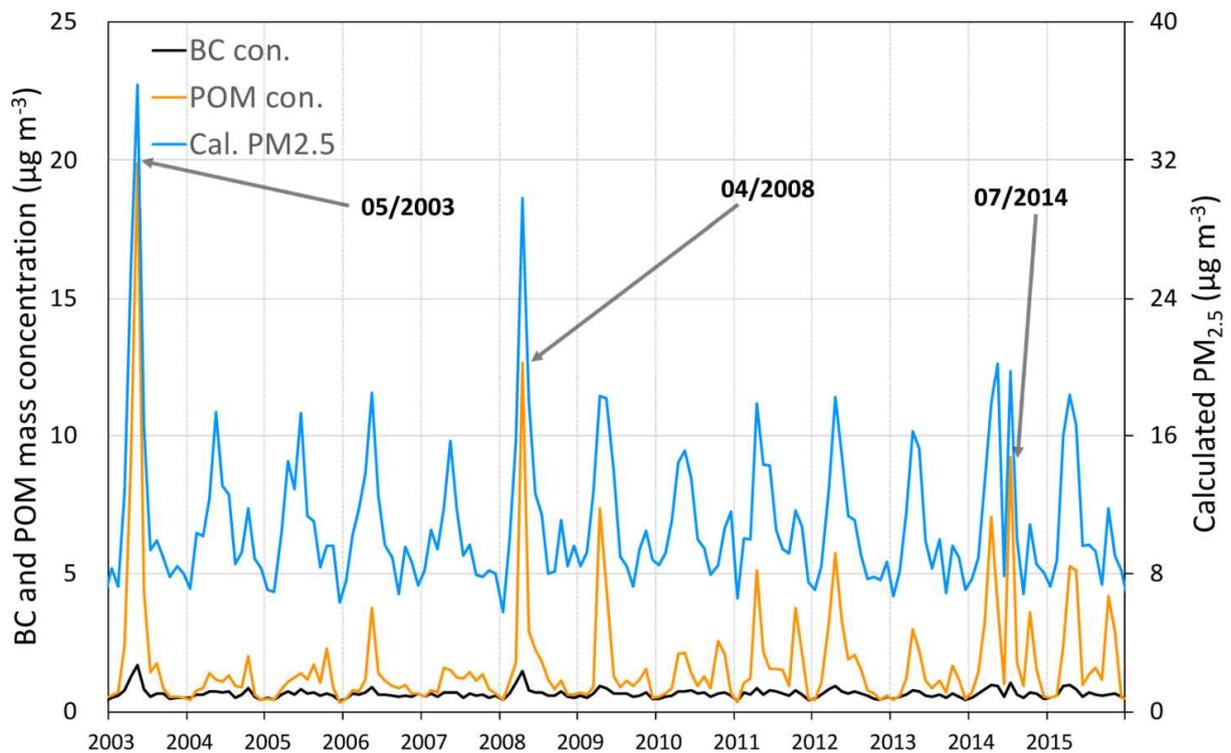


図 3 :

札幌市に最も近いMERRA-2のグリッドで算出された月別平均値のPM_{2.5}濃度、Black Carbon (BC)濃度、粒子状有機物濃度(Particulate Organic Matter, POM; 主に有機炭素; 研究手法参照)。2003年以降のPOMのトップ3の濃度ピークに合わせてPM_{2.5}濃度も増加している(森林火災による大気汚染を示唆)。

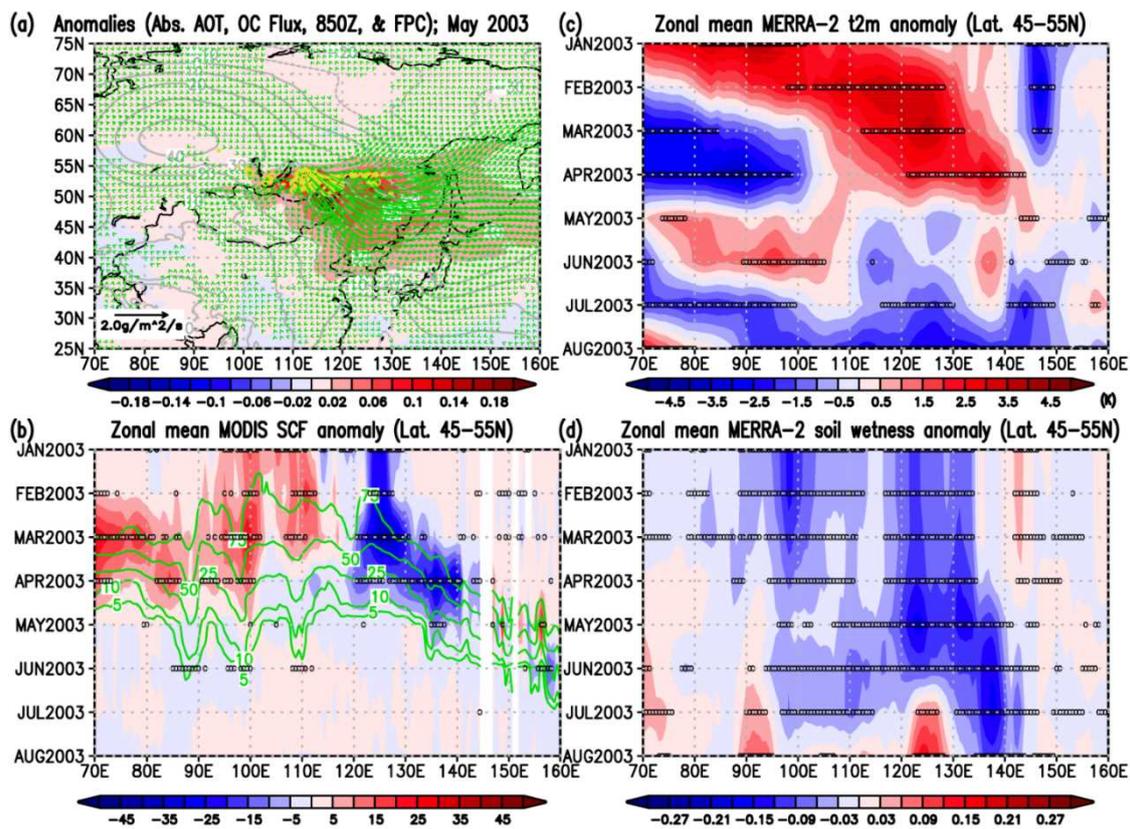


図 4 :

2003 年 5 月の森林火災と 2003 年の気候・環境変数の気候値からのアノマリー（偏差）。

- (a) 吸収性エアロゾルの光学的厚さアノマリー（吸収性エアロゾルの量の指標：単位なし；赤青等値線），火災のピクセルカウント数のアノマリー（黄色の等値線；MERRA-2 グリッド当たりのピクセルカウント数），カラム積算有機物フラックスのアノマリー（森林火災からの大気汚染の流れの可視化；緯度経度で 2 データごとで，さらに緯度・経度方向の値のどちらかが，【研究手法】で定義した「通常でない場合」と判断されたグリッドのみプロット；計算 POM と OC の関係は本文参照；単位は $\text{g m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ），850 hPa の高度場偏差のアノマリー（灰色等値線；単位は m）
- (b) MODIS の積雪被覆率の緯度 45-55 度で帯状平均した月ごとのアノマリー（赤青等値線；【研究手法】で定義した「通常でない場合」と判断されたデータには黒の 0 マークを記載；0 マーク除外条件は研究手法参照；%表示）と積雪被覆率の気候値（緑線）
- (c) (b) とほぼ同様の図であるが（赤青等値線；【研究手法】で定義した「通常でない場合」と判断したデータには黒の 0 マークを記載），MERRA-2 の地上 2 m 温度のアノマリー（単位は K）
- (d) (c) と同様であるが，MERRA-2 の地表面土壌水分（湿性度）のアノマリー（単位はなし）

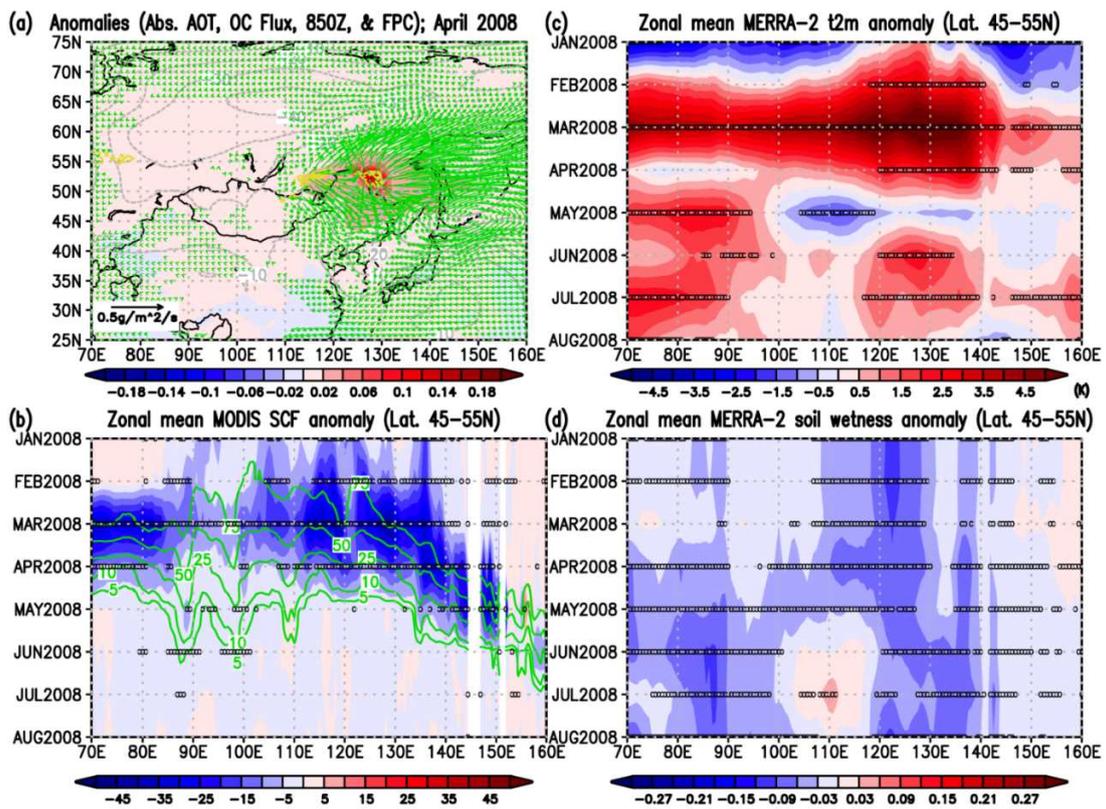


図 5 :

図 4 と同様だが、2008 年 4 月の森林火災のケースの解析結果。

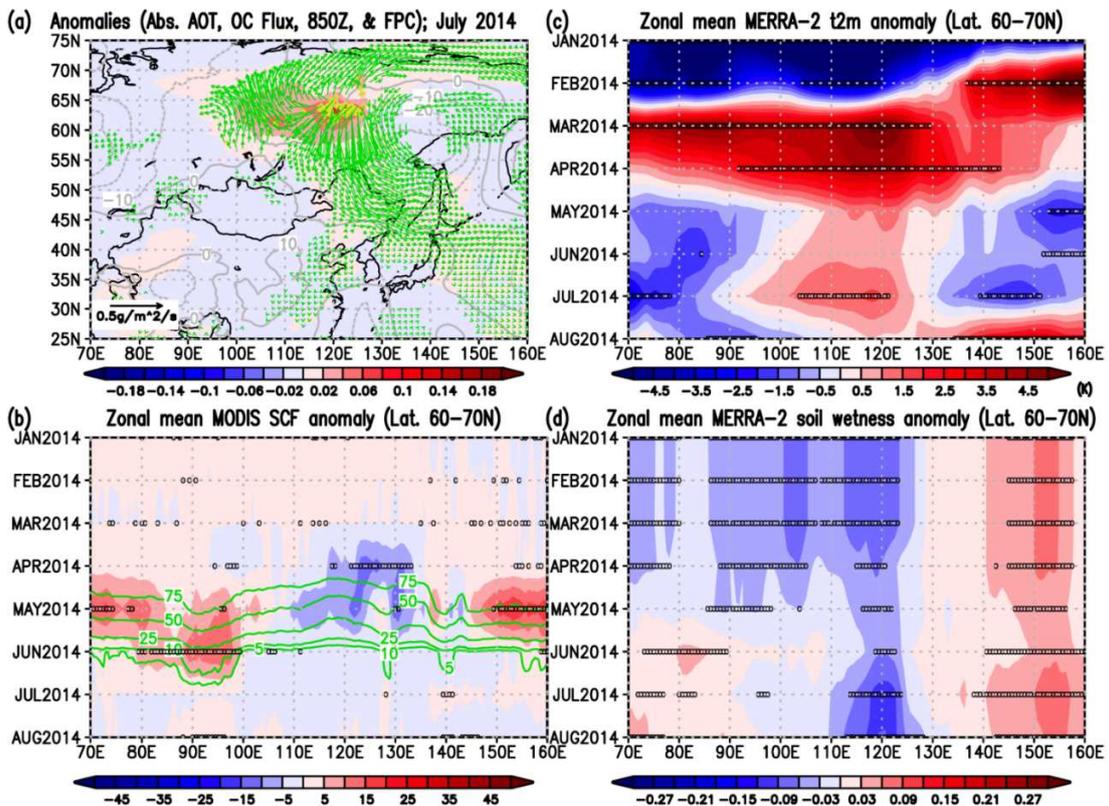


図 6 :

図 4 と同様だが、2014 年 7 月の森林火災のケースの解析結果 (パネル b,c,d は、緯度 60-70 度の帯状平均した月ごとのアナマリー)。

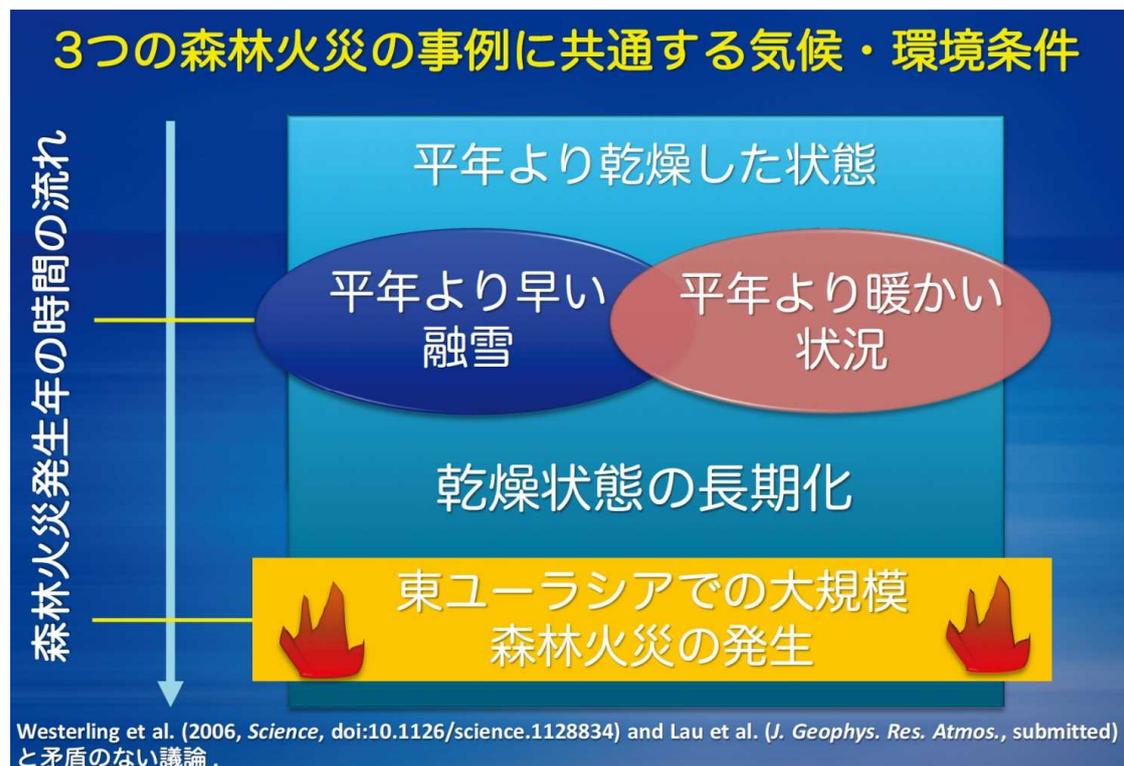


図 7 :

3つの大規模森林火災発生年のケースに共通する気候・環境条件のまとめの概略図（論文にはない図）。

【用語解説】

*1 NASA が作成した全球グリッド再解析データ（MERRA-2）

米国 NASA Goddard Space Flight Center で開発されている地球全体を数値シミュレーションで再現する全球数値モデル（GEOS-5）に、衛星などの観測データを組み合わせて（データ同化という）再度解析を行ったデータセット（再解析データ； <https://gmao.gsfc.nasa.gov/reanalysis/MERRA-2/>）。地球全体を細かい3次元のグリッドボックスに分け、大気エアロゾルや気象観測をできるだけ反映した全球をカバーするデータとなっている。GEOS-5 を使った全球のエアロゾル輸送やその他の数値シミュレーションのアニメーションは <https://svs.gsfc.nasa.gov/30017> などを参照。

*2 NASA の Aqua/Terra の MODIS センサーによる衛星データ

NASA の衛星 Aqua/Terra に搭載された MODerate resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS) センサーを使って観測されたピクセルごとの火災カウント数のデータ（<http://feer.gsfc.nasa.gov/>）や、全球の積雪被覆率（Snow Cover Fraction: 0-100%で示される； <https://modis.gsfc.nasa.gov/data/dataproduct/mod10.php>）のデータ。これらのデータは本研究では、MERRA-2 のデータと合わせて解析できるように、MERRA-2 のグリッドの水平空間解像度になるように再グリッド化している。

*3 環境省による PM_{2.5} 濃度データ

環境省が測定・維持・管理している PM_{2.5} 濃度の観測データが全国で利用できる。本研究では「確定値」を使用し、札幌市の8地点のデータも使用している（札幌では、2010年からPM_{2.5}濃度のデータが観測されている）（http://www.nies.go.jp/igreen/tj_down.html）。尚、PM_{2.5}濃度の測定やデータ処理などの詳細については環境省の「環境大気常時監視マニュアル 第6版」を参考にされたい（http://www.env.go.jp/air/osen/manual_6th/）。