

例会講演要旨集

第 139 号

目 次

詳細目次・・表紙裏

例 会

1. 岡山県高梁盆地でしばしば観測される大気の高温暖化現象について・・・・・・・・・・1
2. 岡山大学津島キャンパス気象ネットワーク観測 2016・・・・・・・・・・5
3. 領域気象モデルWRFを用いた2014年8月広島豪雨の地形的要因に関する感度計算・・・・・・・・8
4. 春季シベリアにおける長期積雪変化が大気循環場に与える影響・・・・・・・・12

特別講演

- 「グリーンランド氷床表面の暗色化に関する科研費の概要」・・・・・・・・・・15
青木 輝夫氏（岡山大学理学部地球科学科 教授）

2016 年 11 月 19 日（土）

岡山大学理学部本館（津島キャンパス）21 講義室

（岡山市北区津島中 3 丁目 1-1）

日本気象学会関西支部

詳細目次

例 会

1. 岡山県高梁盆地でしばしば観測される大気の高温暖化現象について 1
*小川 晃生 (岡山理科大学大学院総合情報研究科) ・大橋 唯太 (岡山理科大学生物地球学部)
2. 岡山大学津島キャンパス気象ネットワーク観測2016 5
高島 昌子・稲澤 睦美 (岡山大学理学部地球科学科)
はしもと じょーじ・*野沢 徹 (岡山大学大学院自然科学研究科)
3. 領域気象モデルWRFを用いた2014年8月広島豪雨の地形的要因に関する感度計算 8
*松田 直樹・横尾 楨哉・田中 健路 (広島工業大学環境学部)
4. 春季シベリアにおける長期積雪変化が大気循環場に与える影響 12
*藤原 昂・野沢 徹 (岡山大学大学院自然科学研究科)

(*は講演者)

特別講演

- 「グリーンランド氷床表面の暗色化に関する科研費の概要」 15
青木 輝夫氏 (岡山大学理学部地球科学科 教授)

岡山県高梁盆地でしばしば観測される大気の高温化現象について

*小川 晃生 (岡山理大院 総合情報) ・ 大橋 唯太 (岡山理大 生物地球)

1. はじめに

近年、夏の猛暑日だけでなく、5月でも日最高気温が 30℃を超える真夏日が多くなってきている。特に高温化する地域として埼玉県熊谷市や岐阜県多治見市が有名であるが、岡山県内にも晩春から初秋にかけて全国で上位となる日最高気温をよく記録する地域がある。それが、岡山県中西部に位置する高梁市である (図 1)。

2010年から2016年までの各年に高梁アメダスで観測された猛暑日と真夏日の日数を、ウェブサイト「気温と雨量の統計のページ」から調べて、表 1 にまとめている。2011年と2014年の猛暑日と真夏日、2016年の真夏日は全国の上位 50 以内に入っておらず順位は記載されていなかったが、そのほかの年は全国アメダスの中で上位 5% 以内に入っていた。このことから、高梁は高温化しやすい地域であることがわかる。

大気の高温化の要因について、高根 (2012) は次の二つを挙げている。一つは、フェーン現象といった総観スケールの影響である。フェーンにはドライフェーンとウェットフェーンが知られ (Hann,1866; Seibert,1990)、ドライフェーンは山の風上側で降水を伴わない特殊なフェーン、ウェットフェーンは山の風上側で降水を伴う典型的なフェーンである。もう一つは、海風の影響を受けず標高の低い閉鎖地形でみられる内陸盆地型気候といった、局地スケールの影響である。その場の気温がどう決定されるかは、この二つの要素を考慮する必要がある。

これまで高梁市の暖候期の高温化現象については研究が行われていないため、その実態はよくわかっていない。そこで本研究では、高梁およびその周辺地域の過去のアメダス気温を解析して、高梁の高温化メカニズムを調べた。



図 1 岡山県高梁市の位置。赤枠で囲った部分が高梁市のおおよその範囲で、枠内の点には高梁アメダスがある市街地エリアを表す。

2. 解析概要

2.1 使用データ

解析には、気象庁が公開する気象データ、各種天気図、気象衛星雲画像を使用した。気象データは、解析対象日の日最高気温や風向風速、相対湿度の変化を調べる目的で使用した。解析する一日の時間帯は、午前 8時から高梁アメダスが日最高気温を記録した時刻までを主とした。天気図と雲画像は、解析対象日の午前 9時の資料を使用した。

また、アメダス地点の地上気温も計算した。このとき計算に必要な現地気圧は、気圧を観測していない高梁アメダスでは津山アメダスの観測値を、倉敷アメダスでは岡山地方気象台の観測値をそれぞれ代用した。

表 1 2010年から2016年までの各年に高梁アメダスで記録した猛暑日・真夏日の日数と全国順位。

年	猛暑日		真夏日	
	日数	順位	日数	順位
2010	31日	23位/921地点 (上位2.5%)	87日	39位/921地点 (上位4.2%)
2011	9日	-	61日	-
2012	17日	42位/929地点 (上位4.5%)	76日	38位/929地点 (上位4.1%)
2013	32日	5位/929地点 (上位0.5%)	95日	38位/929地点 (上位4.1%)
2014	6日	-	59日	-
2015	16日	19位/929地点 (上位2.0%)	61日	43位/929地点 (上位4.6%)
2016	18日	33位/930地点 (上位3.5%)	52日	-

2.2 解析地点

解析地点には、高梁アメダスと岡山県南西部、広島県東部のアメダス並びに気象台を選んだ。また、一部の解析日では鳥取県内や中国山地のアメダスも対象としている。解析アメダスの地点を図2に示す。

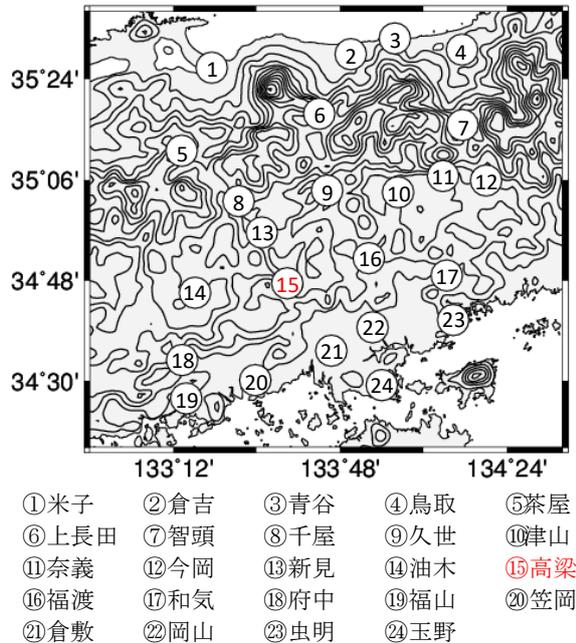


図2 本研究で解析したアメダスと気象台の位置。

2.3 解析対象日の選定

2010年から2015年までの6年間で、高梁アメダスの日最高気温が全国1位を記録した日をウェブサイト「気象人」で調べたところ、5~6月の初夏に集中していた。これらの日は計6日存在し、解析対象日とした。さらに同じ時期を対象に、高梁アメダスの日最高気温が30.0℃を超え、日積算日照時間が10時間以上の日も含めると、新たに11日が抽出された。したがって5~6月は、計17日が解析対象に選ばれた(図3)。

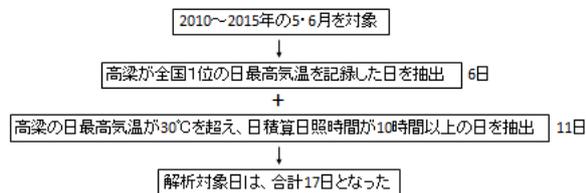


図3 解析対象日の選定(5・6月)抽出方法。

このほか比較のため、夏季8月の観測データも解析対象日を選定した。まず2010年から2015年までの8月で、高梁アメダスが35.0℃以上の日最高気温を記録した猛暑日を抽出した。その結果61日が得られたが日数が多いため、各年で最も日最高気温が高かった日の気温との差が1.0℃以内だった日に絞ったところ、15日が得られた。

3. 結果と考察

3.1 総観スケールの影響

春季の解析対象17日のうち、総観スケールの影響が卓越していた日は、2013年5月23日の1日のみであることがわかった。この日の日最高気温・最多風向・平均風速の水平分布を図4に示す。図中の赤い点線で囲った高梁を含む4地点で、真夏日となる高温化がみられた。このとき、瀬戸内海沿岸を除くすべての地点で北寄りの風が卓越していた。

また、相対湿度と地上温位、日照時間の変化も調べてみた。相対湿度は、風上にあたる鳥取県内では8時から15時まで60%前後であったが、風下の岡山県内は10時以降には20%台にまで低下していた。一方、午後の地上温位は、鳥取県内と岡山県内のあいだで5℃前後の差がみられた。この事実は、岡山県内の空気塊が鳥取県側よりも高温であることを意味する。日照時間は、中国山地でも日中のあいだ十分にあったことから、この日はウェットフェーンというよりもドライフェーンが発生していた可能性が示唆される。

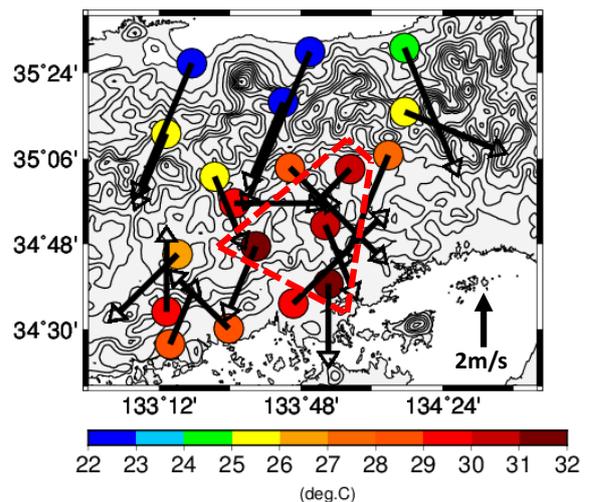


図4 2013年5月23日の日最高気温・最多風向・平均風速の水平分布。マーカーの色が日最高気温、矢印が風ベクトルを表す。最多風向と平均風速の時間帯は、午前8時から高梁アメダスが日最高気温を記録した時刻まで。

3.2 局地スケールの影響

(a) 地理的・地形的要素との関連性

地域の気温を決定する四つの地理的・地形的な要素が、ここでは考えられた。その要素は、①海岸からの距離、②標高、③地形の閉鎖性、④都市化率である。本稿ではこのうち、①・②の要素と高梁の気温上昇の関連性を述べる。

岡山県内と広島県東部のアメダスに対して、解析対象すべての日の日最高気温の平均値を、春季5・6月と夏季8月でそれぞれ算出した。春季の水平分布(図5)からは、高梁が周辺地域に比べ

て特に高温化している様子がわかる。海岸からの距離が近い図中「領域Ⅰ」の地点や、標高が高い「領域Ⅱ」の地点は、高梁を含む内陸部の地域に比べて気温が低くなっている。この特徴は、図6の棒グラフを使った比較でも明らかである。一方、夏季の水平分布(図7)からは、春季に比べて広範囲で高温化がみられ、特に沿岸部と内陸部のあいだの気温差が小さくなっている様子がわかる。

そこで、沿岸の玉野アメダスを基準点とした、海岸から高梁アメダスまでの距離 1km あたりの気温上昇量を計算してみた。このとき、高梁の気温が玉野を超えた時刻から高梁が日最高気温を記録した時刻までのあいだに、高梁と玉野の気温差 ΔT を積算した値を、高梁と玉野の直線距離 Δx (45.8km) で割った。全解析対象 32 日に対して計算し、春季と夏季の平均値を求めたところ春季は $0.7^{\circ}\text{C}\cdot\text{hr}/\text{km}$ 、夏季は $0.2^{\circ}\text{C}\cdot\text{hr}/\text{km}$ が得られ、春季のほうが夏季に比べて 3.5 倍も気温傾度が大きくなっていった。この理由として、春季は瀬戸内海の海上気温が低く海風気塊が陸上の大気よりも冷たいため、沿岸・平野部の気温は上昇しにくい理由があると考えられる。この結果から、春季に高梁で極端な高温化が発生しやすいのは、岡山県の沿岸・平野部では冷たい海風の影響を受け、山地部は標高が高いことで気温が上昇しにくいいため、結果として高梁を含む内陸地域で「みかけ上」の高温になることが考えられる。つまり、高梁は海岸から距離がある内陸であり、標高が低い地理的・地形的特徴が、高温化の要因であるといえる。

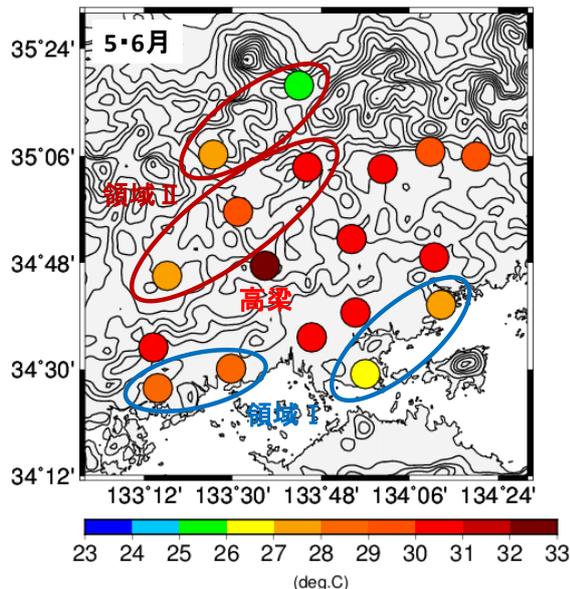


図5 春季5・6月の解析対象17日で平均した日最高気温の水平分布。

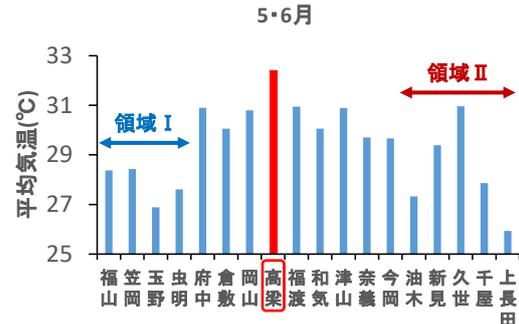


図6 図5と同じ。ただし、棒グラフを使って示した結果。

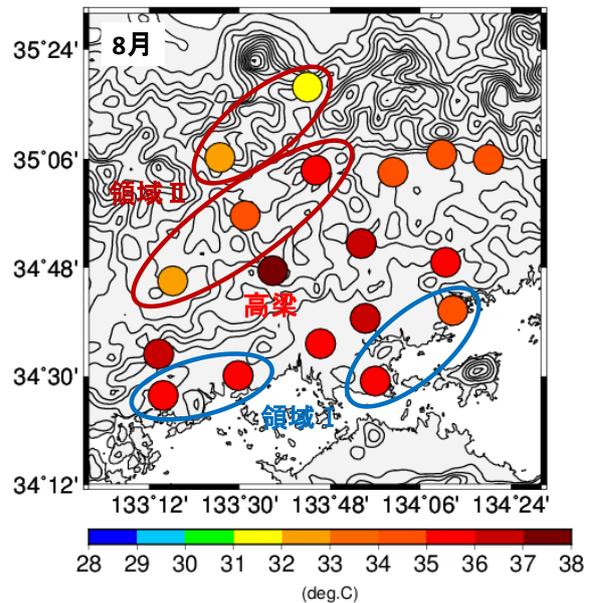


図7 夏季8月の解析対象15日で平均した日最高気温の水平分布。

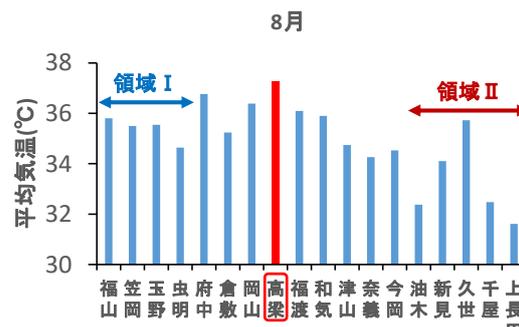


図8 図7と同じ。ただし、棒グラフを使って示した結果。

(b) 事例解析

解析対象日のうち、局地スケールの影響が卓越したとみられる2013年5月14日の事例を考察する。この日の日最高気温・最多風向・平均風速の水平分布を図9に、地上温位の時系列変化を図10にそれぞれ示す。5月にもかかわらず日最高気温は、高梁で 33.0°C を記録した。そのほかの地点

は 32.0°C 未満であり、高梁で局地的な高温化が出現したとわかる。このときの地上温位は、高梁と平野部の岡山・倉敷のあいだで 4°C ほど違っていた。これは高梁の空気塊が、岡山や倉敷よりも高温であることを意味している。したがって、この日に高梁でみられた局地的な高温化は、内陸盆地特有の現象であったと考えられる。

風向は、府中アメダスを除くすべての地点で南寄りであった。松江で観測された高層ゾンデ・データからも、この日は沿岸部で海風が発達していたと推測される。この海風が高梁まで侵入していると考えられるが、対流混合層を考慮した簡単な水平 1 次元の移流モデルによって議論できる。

高梁アメダスから東に約 30km の位置にある福渡アメダスは、標高や海岸からの距離が高梁とよく類似しているが、多くの解析日で高梁ほど高温化することがなかった。この日も福渡の日最高気温は高梁よりも 1.5°C 低く記録された。これには地形の閉鎖性の違いが関連していると考えられるが、今後詳しい解析をおこなう予定である。

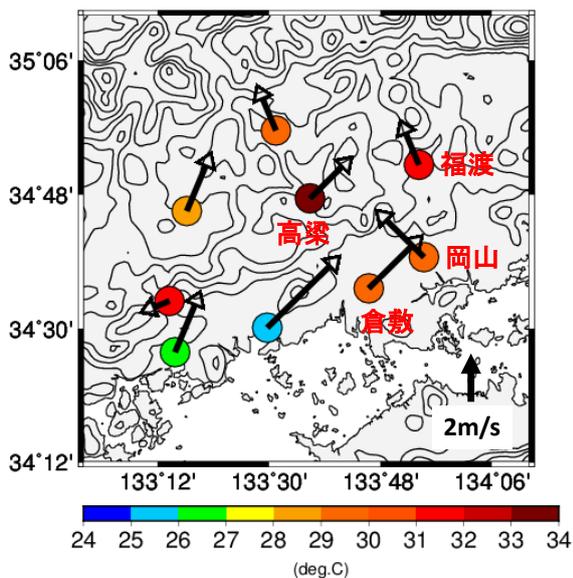


図 9 2013 年 5 月 14 日の日最高気温・最多風向・平均風速の水平分布。

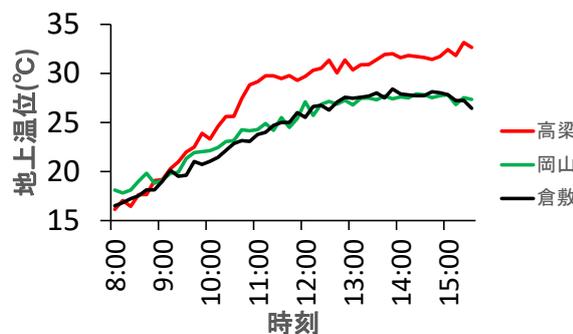


図 10 2013 年 5 月 14 日に高梁・岡山・倉敷で観測された地上温位の時系列変化。

4. まとめ

高梁の日最高気温が全国の上位になる月は、春季に多いことが明らかとなった。過去 6 年間に高梁が特に高温化した春季 5~6 月の 17 日のうち、総観スケールの影響とみられる日は 1 日のみで、そのほかはすべて局地スケールの影響による日であることもわかった。

気圧配置を調べたところ、17 日中 13 日で日本列島は移動性高気圧の圏内であった。

本研究の解析から、高梁で局地的な高温現象が発生する要因に、①海岸から距離があり海風冷気の影響を受けにくいことと、②内陸にもかかわらず標高が平野部並みに低いことが重要であるといえた。

また、春季に高梁で極端な高温化が目立つのは、夏季と違って冷たい海風の影響を受ける沿岸・平野部の気温が上昇しにくいいため、高梁付近の地域が「みかけ上」の高温となると考えられる。

参考文献

- Hann J, 1866 : Zur Frage über den Ursprung des Föhn. *Z. Öbster. Ges. Meteorol.* 1 : pp.257-263.
- 飯塚悟, 伊藤奨, 黒木美早衣, 2012 : 領域モデル WRF による多治見高温化要因の感度解析. *日本建築学会環境系論文集*, 第 77 巻, 第 680 号, pp.779-787.
- 野口翔平, 佐土原聡, 田中貴宏, 2014 : 盆地都市における夏期気温分布の形成要因に関する研究. *日本建築学会技術報告集*, 第 20 巻, 第 46 号, pp.1029-1034.
- Seibert RS, 1990 : South foehn studies since the ALPEx experiment. *Meteorol. Atmos. Phys.*, 43, pp.91-103, doi : 10.1007/BF01028112.
- 高根雄也, 2010 : 関東平野内陸域における夏季高温現象の実態調査と形成メカニズムの解明. 2009 年度筑波大学大学院修士論文.
- 高根雄也, 2012 : 関東平野内陸域で発生する極端高温現象のメカニズム. 2011 年度筑波大学大学院博士論文.
- Takane Y, Kusaka H, Kondo H, Okada M, Takaki M, Abe S, Takana S, Miyamoto K, Fuji Y, Nagai T, 2016 : Factors causing climatologically high temperatures in a hottest city in Japan : a multi-scale analysis of Tajimi. *Int. J. Climatol.*, doi : 10.1002/joc.4790.
- 気象庁ホームページ
<http://www.jma.go.jp/jma/index.html>
 気象人
<http://kishojin.weathermap.jp>
 気温と雨量の統計のページ
<http://weather.time-j.net>

岡山大学津島キャンパス気象ネットワーク観測 2016

高島昌子（岡山大学理学部），稲澤睦美（岡山大学理学部），
はしもとじょーじ（岡山大学大学院自然科学研究科），
野沢徹*（岡山大学大学院自然科学研究科）

1. 概要

岡山大学で教養教育科目のひとつとして開講されている「教養地球科学実験」の授業において、気象のネットワーク観測をおこなった。この観測の目的は、岡山大学津島キャンパス内に25名の履修者が散らばって気温・風向・風速を同時観測することで、キャンパス内における気温の空間分布とその時間変化を明らかにすることである。本発表では、観測準備、観測結果、そして観測結果に基づいて津島キャンパスの気象について考察した結果について、それぞれ説明する。

2. 観測準備

観測準備は、(1)観測計画班、(2)日除け班、(3)吹き流し班、の3班にわかれておこなった。以下それぞれの班について述べる。

2.1. 観測計画班

今回2016年の観測は、津島キャンパスの東半分には25か所の観測点を配置した。配置にあたっては、津島キャンパス内の風向と風力を全体的に把握することを優先するものとした。全ての観測点について現場の下見を行い、建物や木の影響が懸念さ



図1. 観測点の配置図。黒丸は観測点を表わす。

れる観測点については、その影響を評価できるように2つの観測点を隣接して配置した。

観測は、9月28日～9月30日のなかで、降水の可能性が低い日を選んでおこなうことにした。

2.2. 日除け班

日除けの設計にあたっては、直射日光だけでなく反射光も遮ること、通風性が確保されていること、量産性があること、を重視した。4種類の試作品を制作し、性能試験を行って実際に使用する日除けを選定した。

日除けの性能試験は、太陽に見立てた投光器の下に、剥き出しの温度計、日除けに入れた温度計、アスマン温度計、以上3つの温度計を並べておこなった。投光器は、観測時の太陽の角度に合わせて斜めから光が照射されるように調整し、温度は30秒おきに5分間計測をおこなった。性能試験の結果をふまえて、今回は図2の日除けを採用することにした。

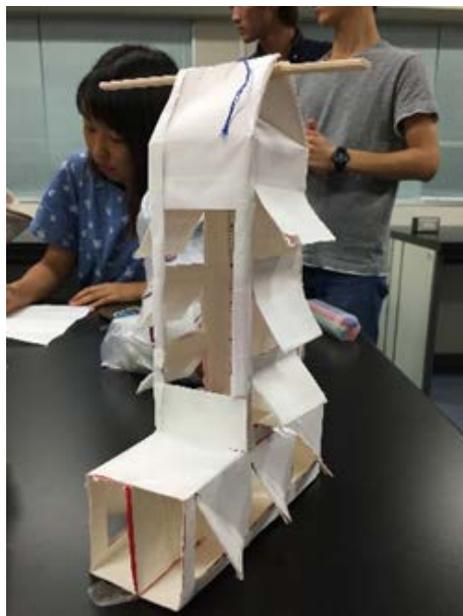


図2. 2016年採用の日除け。

2.3. 吹き流し班

風向と風速を測定する吹き流しを設計し、室内で送風機と熱線風速計を使って風速に対する較正をおこなった。風向によって測定に影響が出ないようにするため、図3に示すような逆L字型の支柱を立てて吹き流しを吊るす設計とした。吹き流し本体はすずらんテープで作成することとし、すずらんテープの長さや形状は実験によって決定した。観測時の風速を数 m/s と想定し、吹き流しのたなびく角度が 1m/s で 30 度、2m/s で 60 度、3m/s で 90 度となるように調整した。

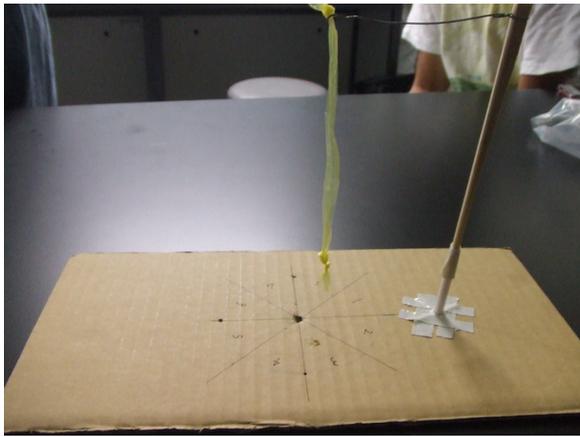


図3. 吹き流し。すずらんテープの下の方が太くなっているのは、重さの分布を調整するためにつくった結び目である。

3. 観測

観測は2016年9月30日の09:30-11:30におこなった。図4は観測日9時の天気図である。

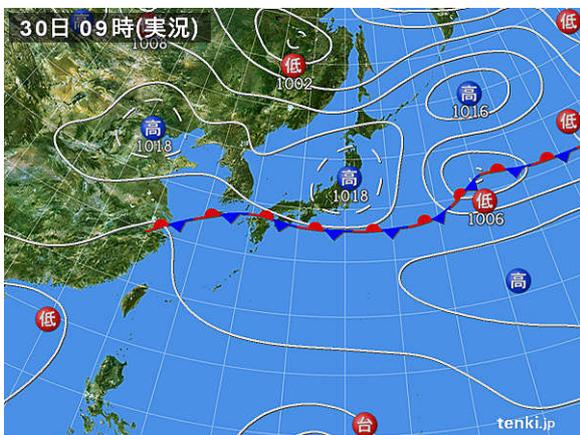


図4. 観測日(2016年9月30日)9時の天気図 (<http://www.tenki.jp/>より引用)

日除けと吹き流しは実験準備において設計したものを各自が製作した。1分毎に気温、風向、風

速を記録した。常にうちわを用いて風を送ることで日除けの通風を行った。

4. 観測結果

4.1. 気温

アルコール温度計の器差補正は、2015年におこなわれた較正実験の結果を用いておこなった。図5は気温観測結果の一例である。



図5. 観測点P15で測定された気温の時間変化。

4.2. 風向・風速

風向と風速はそれぞれ8方位と4段階で記録した。図6と7は風向と風速の観測結果の一例である。

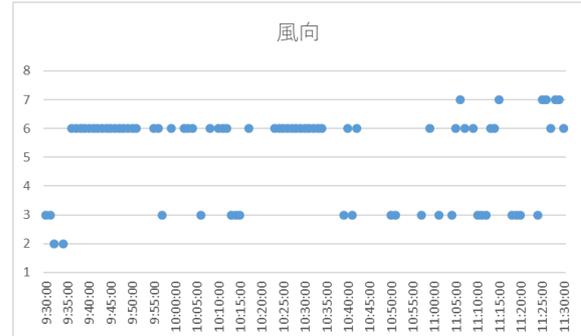


図6. 観測点P15で測定された風向の時間変化。数字は方位を表し、1は北風、3は東風である。この観測点では南西の風が卓越した。

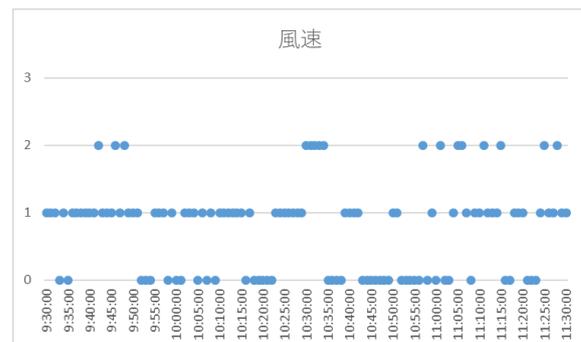


図7. 観測点P15で測定された風速の時間変化。(0はほぼ無風。3はおよそ3m/s)

5. 津島キャンパスの気象

観測を実施した2016年9月30日の9:00から11:00において、ほぼ全ての観測点で気温はゆるやかに上昇した。観測期間中には強い風が吹かなかったため、風向ははっきりと決められなかった。図8は観測点P03で観測された気温と風速である。この観測点では、風速2が観測された後に、気温が大きく変化している。風によって気温が変わったのかもしれない。

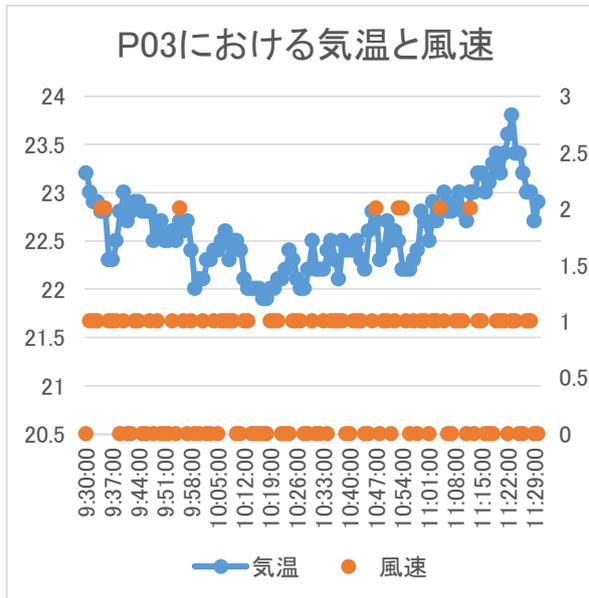


図8. 観測点P03で観測された風速と気温。左の軸は気温、右の軸は風速の 카테고리 (0 はほぼ無風, 3 はおよそ 3m/s)。

6. 参考・引用文献

- ・伊藤学 (1986) 風のはなし, 技報堂出版.
- ・気象庁, <http://www.jma.go.jp/jma/index.html>
- ・津島キャンパス気象ネットワーク観測 2016, <http://epa.desc.okayama-u.ac.jp/~metobs/2016/index2016.htm>
- ・光田寧 (1988) 気象のはなし, 技報堂出版.
- ・tenki.jp, <http://www.tenki.jp/>

領域気象モデル WRF を用いた 2014 年 8 月広島豪雨の地形的要因に関する感度計算

松田直樹*・横尾慎哉・田中健路(広島工業大学環境学部地球環境学科)

1. はじめに

2014 年 8 月 19 日から 20 日にかけて、広島県南西部に線状降水帯が停滞し、広島市安佐北区、安佐南区を中心に 1 時間雨量 100mm 以上、3 時間雨量 200mm 以上の局地的大雨が発生した。大雨発生直後の速報的調査によれば、複数の独立した降水帯が接近・合流し、総延長 100km 以上の線状降水帯となったと報告されている(土木学会・地盤工学会, 2014)。また、2014 年広島豪雨以前の先行研究として、広島地域での線状降水帯の発達メカニズムの一つとして、九州山地の東西を迂回して中国地方上空で合流する下層暖湿流、特に、豊後水道からの強い南風による水蒸気の流入が重要であることが指摘されている(栗原ら, 2009)。しかしながら、広島県西部の地形による線状降水帯発達・維持の効果については詳細が明らかにされていない。

本研究では、2014 年 8 月広島豪雨の地形的要因を明らかにすることを目的として、領域気象予報モデル WRF を用いて計算を行った。

2. 計算設定

2.1. 一般的な設定

今回の計算では WRF (Weather Forecast and Research) (Skamarock and Klemp, 2008) ver. 3.6 を用いた。計算領域は、東経 131 度、北緯 33 度を中心とした東西 500km、南北 600km の範囲(第 1 図)とし、九州の東西を迂回する下層暖湿気流が広島県上空を通過する過程を計算した。水平方向の格子点間隔は 1km で、鉛直方向は地上から 100hPa 等圧面までを 50 層(最下層は約 50m 間隔~対流圏中層以上は約 470m 間隔)に分割して計算を行った。

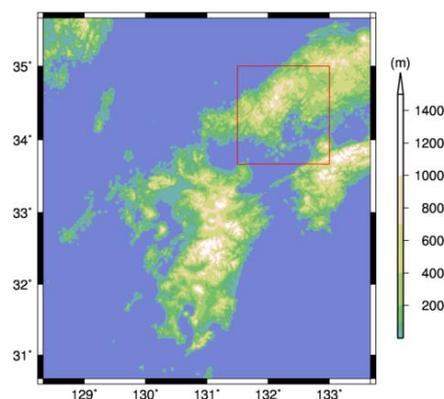
雲物理過程は Milbrandt and Yau (2005) を使用し、積雲パラメタリゼーションは省略した。大気境界層過程は Yonsei University Scheme を使用した。土壌は熱伝導・土壌水分移動式をからなる 4 層モデルを与えて計算した。

初期条件、および水平境界条件には、気象庁数値予報 GPV メソモデル(MSM)と全球モデル(GSM)の初期値を組み合わせ使用した。本研究では、3 時間降水量の最大値を記録した 8 月 20 日 1 時 30 分~4 時 30 分(日本時間)の時間帯に着目し、2014 年 8 月 19 日 21 時(日本時間)を開始時刻として、翌 20 日 6 時(日本時間)までの 9 時間分を計算した。計算

時間ステップを 6 秒とし、10 分毎の大気場の 3 次元分布と、6 秒(計算ステップ)毎の広島市安佐北区三入のアメダスに対応する格子点上の地上気象要素の時系列を出力した。

2.2. 地形条件

本研究の地形データは、全球 30 秒メッシュ地形データ(GTOPO30)を基準地形データとして参照した。まず、計算領域全体の標高を 0.0 倍~1.2 倍まで 0.1 倍刻みで倍率を変えて計算を行った。次に、九州・四国地方を標高 0m として平坦化した場合、中国地方を標高 0m として平坦化した場合についてそれぞれ計算を行った。



第 1 図 計算領域。標高は GTOPO30 の元データ。

3. 計算結果と考察

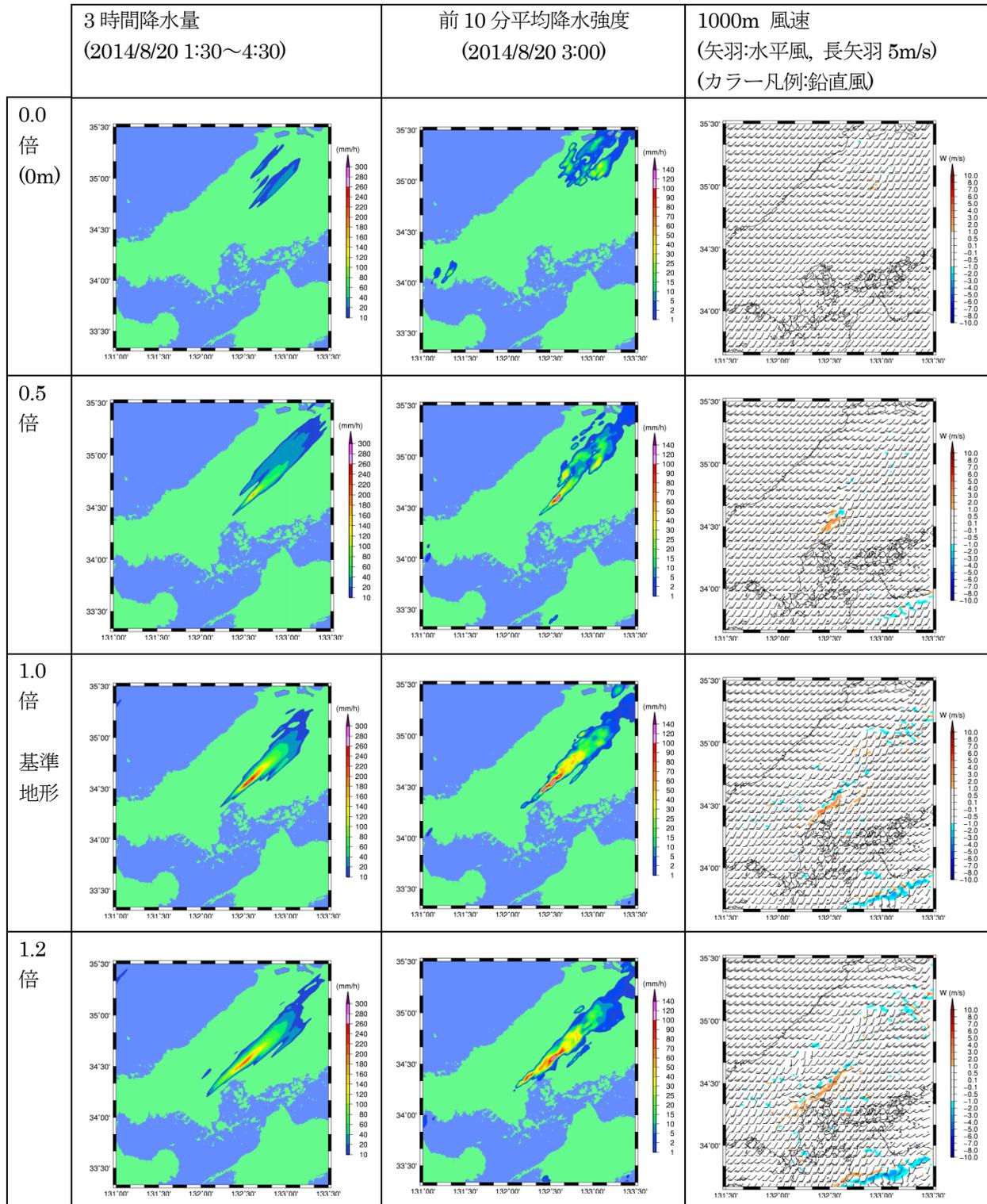
第 2 図に、領域全体の標高を基準地形データ比 0.0 倍、0.5 倍、1.0 倍、1.2 倍の 4 条件で計算を行った場合の 2014/8/20 1:30~4:30 の 3 時間降水量、8/20 3:00(日本時間)における前 10 分間降水強度、および、上空 1000m における水平風・鉛直風分布を示す。また、比較のために、レーダーアメダス解析雨量による、8/20 1:30~4:30 の 3 時間降水量を第 3 図に、気象庁 C-BAND レーダーで観測された 8/20 3:00 の降水強度分布を第 4 図にそれぞれ示す。

倍率 0.0 倍の平坦な地形の場合、広島市付近で発生した降水系全体が下流の島根県上空へと流され、降水強度 30~40mm/h 程度の団塊状の積乱雲群として発達していった。対象時間帯の 3 時間雨量分布は、島根県側に 20~40mm の降水域が現れる程度で、広島市内では殆ど降水が生じない結果となった。

地形倍率を 0.5 倍に増大させると、広島平野北東側の根の谷川の谷筋に沿って、バックビルディング型の線状降水帯が現れるようになった。8/20 3:00 には 100mm/h 以上の降水強度を持つ降水セルが出現した。広島平野西側から北側の山地斜面にかけて上空 1000m 付近で上昇流が発達し、降水セル内部での

降水粒子の落下に伴う下降流がスポット状に現れる形となった。

倍率 1.0 倍の元の地形条件を与えた計算では、広島市安佐北区から広島市西部にかけて降水強度 100mm/h を超える降水域が見られた。レーダー観測と比べてやや内陸側に降水帯が位置しており、降水



第 2 図 領域全体の地形の倍率設定による降水量分布および上空 1000m 風速の比較

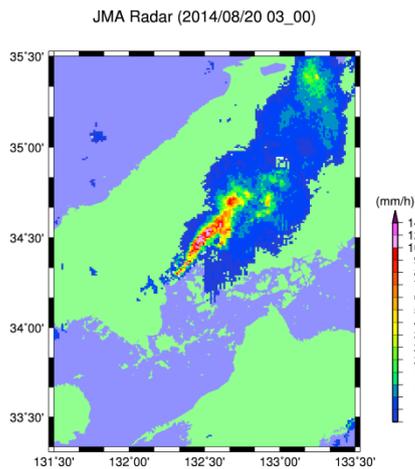
量の最大値の点は解析雨量のそれと比べて、10km前後北東側に位置していた。

倍率を1.2倍として基準となる地形よりも起伏を大きくすると、岩国付近を発生点とする降水帯と廿日市市上空を発生点とする降水帯が別々に発生し、前者の降水帯は後者よりも10km程度内陸側を北東進した。2本の降水帯に分かれて発達することで、3時間雨量100mm以上の範囲は基準地形の計算結果と比べて南西側に20km程度伸長したが、降水帯内部の3時間雨量の最大値は200mm程度にとどまった。

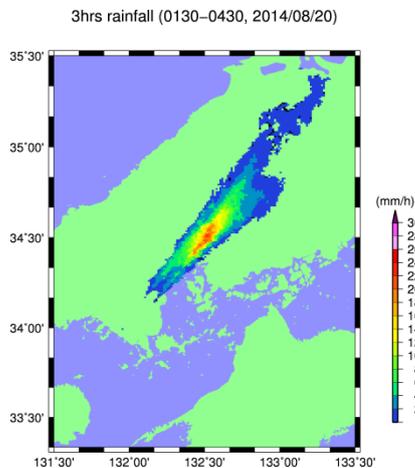
九州・四国の起伏を除去し、中国地方の地形の起伏のみを与えて計算を行うと(第5図)、広島県西部沿岸で斜面の走向にほぼ平行に下層の水平風収束と空気塊の上昇が生じ、線状降水帯が現れた。但し、計算開始3時間後～6時間後の3時間が降水量最大となり、計算開始後6時間以降は、広島市以外の中国地方沿岸部で空気塊の強制上昇に伴う降水系が発

達する結果となった。

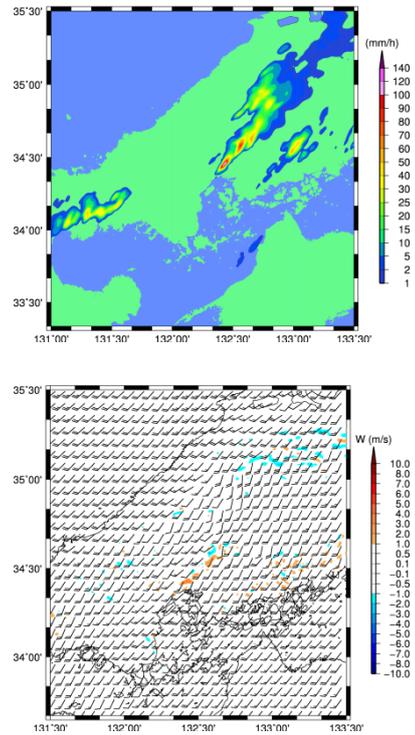
一方、九州四国の地形を考慮し、中国地方を0mの平坦な地形を仮定して計算を行うと(第6図)、国



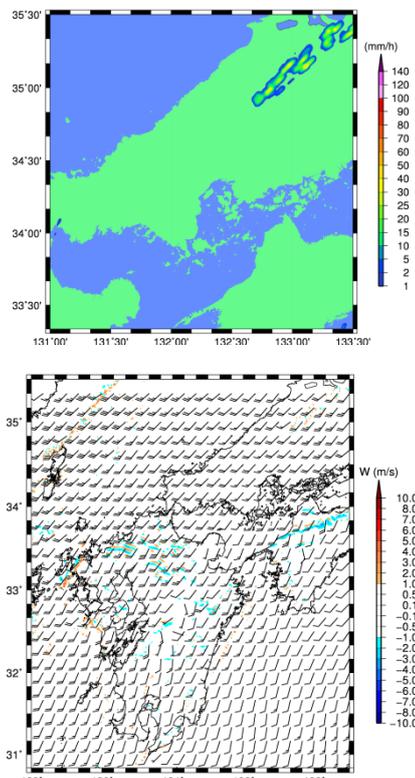
第3図 気象庁レーダーで観測された2014/8/20 3:00の降水強度分布



第4図 レーダーアメダス解析雨量 8/20 1:30～4:30の3時間雨量の分布



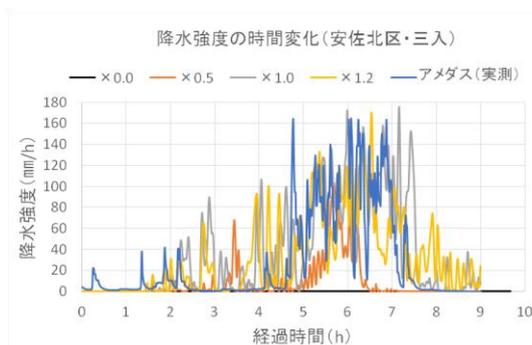
第5図中国地方のみの地形を与えたときの降水強度分布(上)と高度1000m風速分布(下)(8/20 3:00)



第6図中国地方の地形を除去した場合の降水強度(上)と高度1000m風速分布(下)(8/20 3:00)

東半島北東側で下層水平風の収束が見られたが、広島県西部上空ではほぼ様な風向となった。広島上空では顕著な下層空気の上昇は見られず、ほとんど降水が発生しない結果となった。

第7図に広島市安佐北区のアメダス三入観測所に対応する格子点上での降水強度の時系列を示す。比較のために、気象庁提供のアメダス1分値観測の降水強度の時系列も合わせて示している。降水のピーク時間帯の8/20 1:30~4:30(日本時間)で、観測値の降水強度が160mm/h前後であり、基準地形条件の計算が最も観測値と適合しているように見られる。また、地形の起伏が大きくなると、降水帯上流側での降水粒子の落下に伴い、上述の時間帯の中でも降水強度が100mm/hを下回る割合が多くなる。三入観測所での3時間雨量の最大値は、基準地形条件の場合(倍率1.0倍)が最も大きく(第8図)、それよりも地形の起伏が大きいと降水量が少なくなる傾向が見られた。尚、中国地方の地形のみを与えた場合の3時間雨量の最大値は、150.2mm(8/20 0:00~3:00)であった。



第7図 安佐北区アメダス三入観測所に対応する格子点での降水強度の時間変化とアメダスの実測値(1分値データ)との比較。



第8図 計算領域の標高の設定倍率とアメダス三入観測所での3時間雨量との関係。

本研究で実施した計算設定の範囲では、降水帯の上流側に対応する広島湾上空での自由対流高度が概

ね750~1000m程度で、極楽寺山(標高693.0m)や阿武山(586m)など広島西部沿岸の山頂よりも少し高い位置である。沿岸の山地斜面上で形成された降水系からの冷氣外出流が沿岸側に向かって流出し、広島湾側からの下層暖湿気と衝突し、自由対流高度よりも高く持ち上げられることで、降水セルの発達を促し、総延長100km以上の降水帯となったと考えられる。

4. まとめ

本研究では、2014年広島豪雨の線状降水帯を対象として、地形による線状降水帯の発達への影響について数値計算を行った。九州山地および豊後水道に伴う湿潤空気の迂回と合流のみでは、必ずしも広島上空に停滞する線状降水帯が形成されるとは限らず、より大きな強制条件として、広島県西部の沿岸域から山地部の地形が作用することが分かった。稜線あるいは谷筋の走向にほぼ平行に線状降水帯が伸びる際、降水帯に向かう下層暖湿気の上昇流域が降水帯の走向に平行に延びることで、降水帯の伸長が促される。また、広島市安佐北区・安佐南区を中心とした線状降水帯が最も強く発達するのは、基準となる地形条件の場合である。起伏が大きくなると線状降水帯の発生点付近での降水セルの成長が早まり、2本の降水帯に分離し、ピーク強度が弱まる傾向にあることが分かった。

謝辞

本研究の実施にあたり、広島地方気象台よりアメダス三入観測所(広島市安佐北区)の1分値観測データをご提供いただきました。ここに謝意を表します。

参考文献

- 土木学会・地盤工学会, 2014: 平成26年広島豪雨土砂災害緊急調査団調査報告書, 300p.
- 栗原佳代子, 金森恒雄, 瀬古弘, 2009: 2003年7月18日に広島県で発生した線状降水帯—気象庁非静力学モデルで解析した気流構造と地形や中層乾燥気塊の効果—, 天気, 56, 613-627.
- Milbrandt, J.A. and Yau, M.K., 2005: A multimoment bulk microphysics parameterization, Part I: analysis and the role of the spectral shape parameter, J. Atmos. Sci., 62, 3051-3064.
- Skamarock, W.C. and J. Klemp, 2008: A time-split nonhydrostatic atmospheric model for weather research and forecasting applications, J. Comput. Phys., 227, 3465-3485.

春季シベリアにおける長期積雪変化が大気循環場に与える影響

藤原 昂 ・ 野沢 徹 (岡山大学大学院自然科学研究科)

1. はじめに

気候変動に関する政府間パネル(IPCC)の第5次評価報告書によれば、近年の地球温暖化にともない、北半球春季の積雪域が急速に減少していることが報告されている(IPCC, 2013)。積雪は高いアルbedoや断熱特性を有しており、地表面の熱収支を考える上で重要な要素の一つである。このような地表面状態の変化は、局所的に大気を加熱・冷却することにより大気循環場を変化させ、比較的遠方の地域にも影響を及ぼし得る。

そこで本研究では、衛星観測データと全球客観解析データを解析し、シベリア域における春季積雪域の長期的な変化が、主にアジア域の大気循環場に及ぼす影響について調べた。

2. 解析データ

積雪域の解析には、宇宙航空研究開発機構(JAXA)より提供されている地球環境変動研究のための衛星観測データセット(JASMES)を用いた。従来、広域積雪の研究には米国海洋大気庁(NOAA)の積雪データが用いられているが、複数の解析担当者が気象衛星による可視画像を参照して積雪分布域を判定するなど、様々な問題点の存在も指摘されていた。一方で、JASMESの積雪データは、統一的・客観的な基準で処理されている等、多くの改良が加えられている。また、雪質に関して乾雪と湿雪を分けて判別するなど、これまでにはない新たな情報も付加されている。ここでは、半月毎に集計された $0.05^{\circ} \times 0.05^{\circ}$ の等緯度経度格子における積雪フラグから、 $2^{\circ} \times 2^{\circ}$ の解像度の積雪被

覆率に変換したデータを解析した。

大気循環場の解析には、気象庁の提供する長期再解析データ(JRA-55, Kobayashi et al., 2015)の月平均値を用いた。特に、中緯度域の上部対流圏における総観規模の大気循環場への影響に着目するため、ここでは、350Kの等温位面上の渦位分布を中心に解析を行った。なお、解析対象期間は、両データが共に存在している1979~2015年とした。

3. 解析結果

図1は、3月から6月にかけての月平均した積雪被覆率の長期変化傾向を示す。上段から順に、全積雪(乾雪+湿雪)、乾雪、湿雪の積雪被覆率の長期トレンドを、有意水準95%で有意な領域のみ図示している。乾雪と湿雪を合わせた全積雪域で見ると、3月から6月にかけて、積雪被覆率が有意に減少している地域が中央アジアから西シベリア南部、西シベリア~中央シベリア、北極海沿岸の北シベリアへと北西方向に推移していくことがわかる(図1a-d)。このような推移は乾雪についても同様に見られるが(図1e-h)、特に4月には、乾雪が有意に減少している領域が全積雪に比べ広範囲(中央シベリア高原まで)に及んでいる(図1f)。同時期の同地域においては湿雪が有意に増加しており(図1j)、積雪表面が融解して雪質が変化しているものの地表面が露出したわけではなく、依然として雪に覆われていることが示唆される。この点を除けば、各月において、乾雪(図1e-h)、湿雪(図1i-l)それぞれが有意に減少している領域を合わせると、全積雪の積雪被覆率の長期トレンド分布(図1a-d)にはほ

ば一致しており、これらの地域では、近年の温暖化にともない、積雪域が後退して地表面が露出してきていることが示唆される。

このような長期積雪変化にともなう大気循環場への影響を調べるため、図 1b,c 中の緑線で囲まれた領域で平均した積雪被覆率と、月平均大気場との相関解析を行った。影響が遅れて発現する可能性も考慮し、同時相関だけでなく、1~2 ヶ月程度のラグ相関についても調査した。図 2 は、このようにして大気場（350K 等温位面上の渦位）との有意な相関が見られた例を示している。西シベリア南部で平均した 4 月の積雪被覆率の変動に対しては、日本付近における 6 月の大気場

と有意な相関が見られた（図 2a）。北日本から北太平洋上において有意な負の相関が、その南側に有意な正の相関が見られることから、西シベリア南部で 4 月に積雪被覆率が減少すると、6 月に日本付近で渦位の南北傾度が大きくなり、対流圏上層のジェット気流が強化されることを示唆している。また、西シベリア~中央シベリアで平均した 5 月の積雪被覆率に対しては、7 月の大気場と有意な相関が見られた（図 2b）。カムチャッカ半島~千島列島付近で有意な正の相関、中央シベリアで有意な負の相関が見られることから、西シベリア~中央シベリアにおける 5 月の積雪被覆率の変動にともなって、その風下側

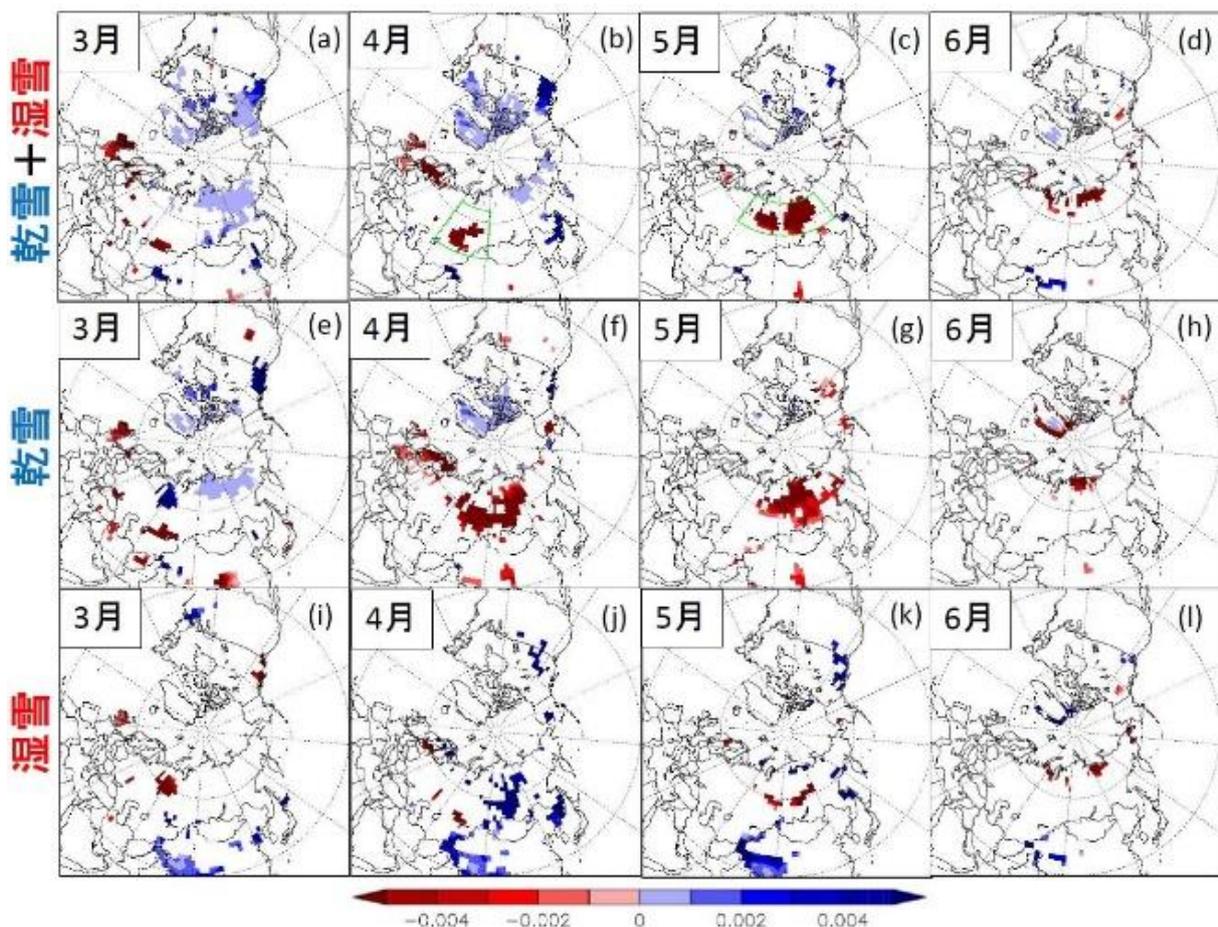


図 1. 3~6 月における月平均した積雪被覆率の長期変化傾向。単位は 1/年。(a-d) : 乾雪+湿雪、(e-h) : 乾雪、(i-l) : 湿雪それぞれを示す。また、図には有意水準 95%で有意な領域のみ示している。

で対流圏上層のジェット気流が蛇行することが示唆される。

4. まとめと今後の課題

衛星観測に基づく広域積雪データを解析し、4月には西シベリア南部で、5月には西シベリア～中央シベリアにかけて、過去35年程度の期間で積雪被覆率が有意に減少していることがわかった。また、衛星観測データと客観解析データの解析から、これらの長期積雪変化が北東～北アジア域における2か月後の対流圏上層の大気場（350K等温位面上の渦位）の変化と有意な相関のあることがわかった。

大気場への影響がなぜ2か月遅れて出るのか、また、その具体的なメカニズムは何か、を明らかにすることが今後の課題である。

参考文献

IPCC, 2013: Climate Change 2013. Cambridge Univ. Press, Cambridge.

Kobayashi et al., 2015: The JRA-55 Reanalysis: General specifications and basic characteristics.

J. Meteor. Soc. Japan, 93, 5-48,

doi:10.2151/jmsj.2015-001.

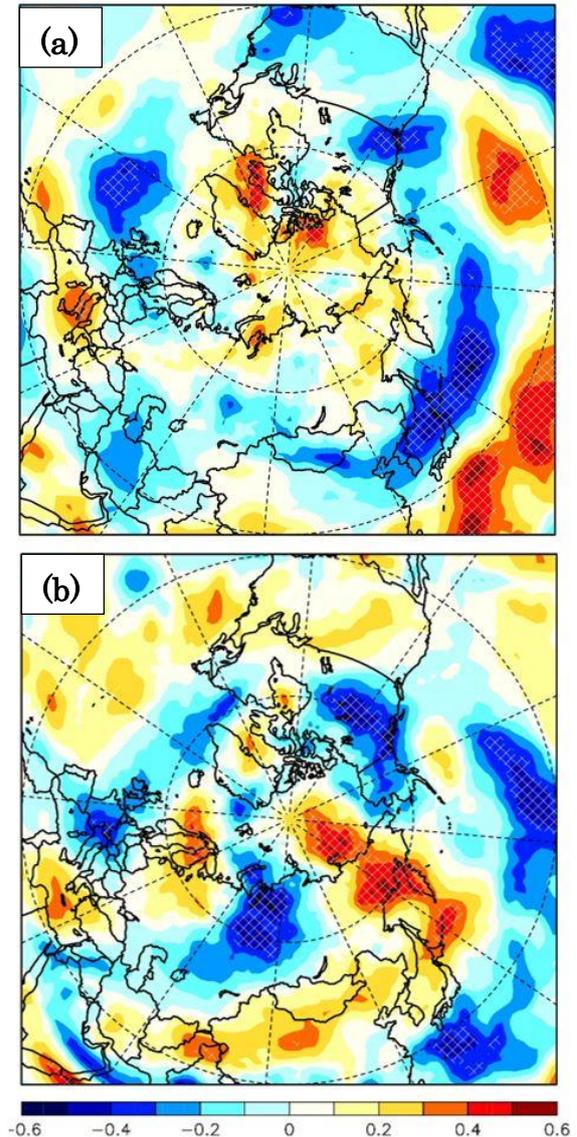


図2. 領域平均した積雪被覆率と350K等温位面渦位とのラグ相関の地理分布。(a) 西シベリア南部で平均した4月の積雪被覆率と6月の350K等温位面渦位との相関、(b) 西シベリア～中央シベリアで平均した5月の積雪被覆率と7月の350K等温位面渦位との相関。網掛け領域は有意水準95%で有意な領域を示す。

グリーンランド氷床表面の暗色化に関する科研費の概要

青木輝夫（岡山大学、気象研究所）

1. はじめに

近年、北極域の温暖化が進行し、グリーンランドでは1990年代後半から氷床質量の減少率が加速している（Shepherd et al., 2012）。この原因として主に夏季の氷床表面の融解量の増加と氷床から海洋への溢流水河の流出量の増加が考えられる（van den Broeke et al., 2009）。その基本的な原因は気温の上昇と考えられるが、不確定要素としてブラックカーボン等の光を吸収する性質のエアロゾルによる積雪汚染、表面積雪状態の変化、雪氷微生物の繁殖がもたらす雪氷面のアルベドの低下が挙げられる。一方、衛星データ解析から2000年以降グリーンランド氷床全体のアルベドの低下が確認されている（Box et al., 2012）。氷床表面融解に対する積雪汚染や雪氷微生物の効果を明らかにするため、科研費（基盤研究（S））による「北極域における積雪汚染及び雪氷微生物が急激な温暖化に及ぼす影響評価に関する研究（SIGMA）」：<http://www.mri-jma.go.jp/Dep/cl/cl6/sigma/sigma-j.html>）が2011年度から5年間に実施された（Aoki et al., 2014a）。主要な観測は氷床上における自動気象観測装置（AWS）による連続観測、雪氷・放射観測、浅層アイスコア掘削、下流消耗域での微生物調査である。さらに、2016年からは新規科研費（基盤研究（A））「近年のグリーンランド氷床表面の暗色化と急激な表面融解に関する研究（SIGMA-2）」（2016-2019年度）が始まった。

本発表ではSIGMAの現地観測と主な成果、SIGMA2の計画の概要を述べる。

2. SIGMAの現地観測と研究成果の概要

2.1 2011年

初年度の2011年は観測サイトを決めるための予備調査を実施した。欧米の観測地点は既に中西部のカングルサック（Kangerlussuaq）やイルリサット（Ilulissat）付近の氷床上に展開されているため、我々は観測空白域である北西部のカナック（Qaanaaq）地域を第1の候補地とした（図1）。ヘリコプターをチャーターし、図1の淡紅色の丸印で示す地点を調査した結果、カナック周辺域がAWSの設置とアイスコア掘削に適していることが分かった。

2.2 2012年

翌年の2012年は氷床上のSIGMA-A地点（標高1,490 m）にヘリコプターで人員と物資を輸送し、6月下旬から約3週間のキャンプを行った。ここでは、AWSの設置（図2）、気象観測、分光放

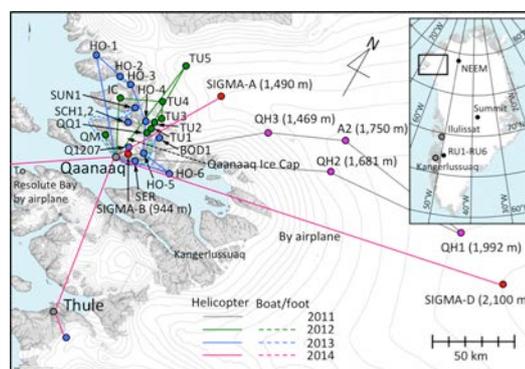


図1 グリーンランドにおけるSIGMAプロジェクトの観測地点。自動気象観測装置（AWS）はSIGMA-A、SIGMA-B、SIGMA-D地点（赤丸印）に設置した。桃色丸印は2011年の予備調査地点、緑丸印と青丸印はそれぞれ2012年と2013年の生物観測地点を示す（地点名はAoki et al. (2014a)を参照）。

射観測、積雪断面観測、雪尺観測、積雪不純物観測、19 mフィルンコア掘削等を実施した（Aoki et al., 2014a, Yamaguchi et al., 2014）。この年の夏のグリーンランドは記録的な高温で、6月から始まった高温傾向は7月中旬にピークに達し、グリーンランド氷床表面のほとんどが融解を経験し、また西部を中心に標高2,000 mを越える地点でも降雨が観測された（Nghiem et al., 2012）。このとき、SIGMA-Aでも断続的な降雨があり、顕著な表面融解が起こった。

SIGMA-Aで得られた積雪不純物濃度及びアルベドデータを解析した結果、積雪不純物によるアルベド低下よりも、気温の上昇に伴う積雪粒



図2 グリーンランド氷床上SIGMA-A（標高1,490 m）の自動気象観測装置（2012年6月29日）

径の増加の方がアルベド低下に寄与していることが分かった (Aoki et al., 2014b)。また、積雪変質モデルSMAP (Niwano et al., 2012) を用いて、2012年7月中旬の顕著な表面融解時の熱収支を再現した結果、暖かな下層雲の流入に伴い、下向き長波放射の増加が、表面融解に大きな影響を与えたことが分かった (Niwano et al., 2015)。

SIGMAプロジェクトでは、氷床上のフィールド観測支援のための気象予測情報を日本国内から提供した (橋本ほか, 2016)。具体的には気象庁の非静力学モデル (JMA-NHM) を用いてグリーンランド全域を対象に水平方向の空間解像度5 kmで42時間予報を12時間毎に行った。この予報システムが確立されたことにより、2012年以降の野外活動では非常に利用度の高いシステムとなった。

2012年のSIGMA-Aの観測終了後、カナック氷帽上SIGMA-B地点 (標高944 m) に2機目のAWSを設置した。AWS設置時のSIGMA-B周辺の表面状態は裸氷で、堆積物で汚れた積雪が薄く表面を覆っていた。カナック氷帽は過去の調査では、標高約1,100 mの山頂部が通年積雪で覆われていたことが報告されているが、2012年には氷帽の大部分が暗色の堆積物で覆われていた (図3)。

カナック周辺における雪氷微生物調査で採取された試料の分析の結果、氷河上の不純物 (クリオコナイト) は、北西部、南西部ともに、下流部よりも中流部に量が多く、さらにその不純物にはシアノバクテリアなどの微生物が大量に含まれていることが分かった。このことからグリーンランドでも、微生物活動及びその生産物によるアルベド低下が顕著であることが示された (Takeuchi et al., 2014; Uetake et al., 2016)。

2.3 2013年

翌2013年は一転して寒い夏となり、SIGMA-Aではほとんど表面積雪の融解を経験しなかった。図4はSIGMA-Aにおける2012年7月以降の気温と雪面高度の変化を表す。2012年7-8月には気温の上昇に伴い、雪面高度の低下が見られたが、そ



図3 表面をクリオコナイトで覆われ暗色化したカナック氷帽 (2012年7月16日)

の後の涵養量が多かった上、翌2013年6-8月には気温が正の値になることは少なく、夏季の表面融解がほとんどなかった。その結果、2012年9月1日から1年後までの雪面高度の変化は+117 cmと大きくなった。

この年の7-8月にはSIGMA-A及びSIGMA-BでAWS保守、分光放射観測、積雪断面観測等を実施した。上述のように2013年の夏季は低温で、カナック氷帽の標高700 m以上の領域が積雪で覆われた状態で夏を終えた。このため、SIGMA-B周辺には裸氷が出現せず、一年を通して高いアルベドが持続した。しかし、積雪内部には数十センチメートルの上積氷 (浸透した積雪の融解水が下層の低温の氷に接し、再凍結し形成された氷) が発達し、寒冷な夏には裸氷の上に氷として涵養していることを示していた。

2.4 2014年

2014年5-6月SIGMA-D (標高2,100 m) において氷床コア掘削を実施した (Matoba et al., 2015)。SIGMA-Dにおけるキャンプは5月上旬から約1ヶ月間行い、氷床コア掘削、3機目のAWSの設置、流動測量、積雪断面観測、積雪不純物観測等を実施した。氷床コア掘削では最終的に深さ223 m (A.D.1200年頃) のコア試料が得られた。現地ではアイスコアの密度、層位、近

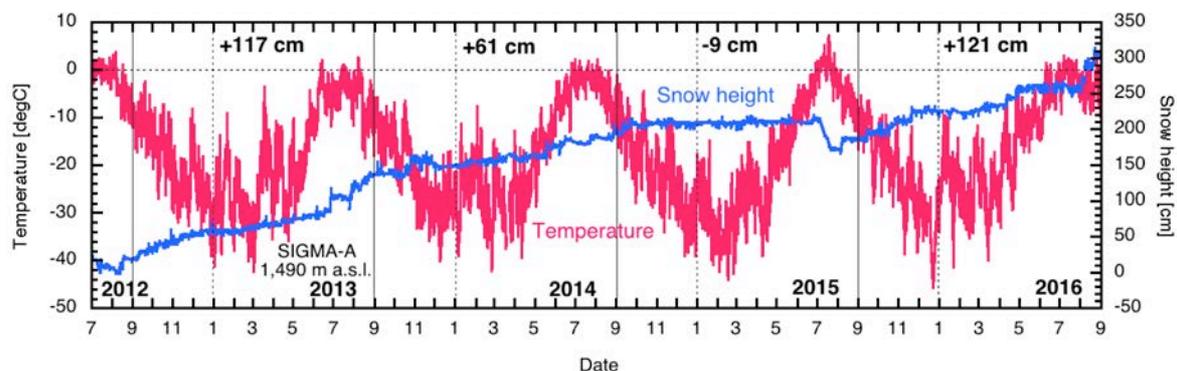


図4 SIGMA-Aにおける2012年7月~2016年8月の気温 (赤線、左軸) と積雪深計による雪面高度 (青線、右軸) の観測値の変化。積雪表面高度は2012年の最小値をゼロとした場合の相対的变化。図上部に示す数字は年間 (各年の9月1日から翌年8月31日まで) の高度変化を表す。

赤外反射率測定等を行ったのち、一部を融解試料、残りを冷凍試料としてそれぞれ日本に輸送した。試料のうち、現地で融解した水試料から水同位体比、溶存イオン主成分、年間涵養量の分析が行われ、冷凍試料からはブラックカーボンやダスト濃度、金属成分の分析が現在研究参加者によって行われている。

6月からはAWS保守、分光放射観測、積雪観測、積雪不純物観測等を実施した。2014年夏季のカナック周辺気象条件は、2012年と2013年のほぼ中間の気温で、7-8月にかけて、短期間の気温の上昇に伴い、SIGMA-Aでも積雪表面高度の低下が観測された(図4)。涵養量は前年より少なく、結果的に2013年9月1日からの1年間における雪面高度の変化は+61 cmと前年の約半分程度であった。

2.5 2015年

最終年の2015年には集中観測は実施せず、7-8月に主にSIGMA-Bの保守と、カナック氷河周辺域での分光放射観測等を行った。この年の7月は非常に気温が高く、SIGMA-Aでは図4に示すように大幅な雪面高度の低下が観測された。これに加え、前年冬期からの涵養量が非常に少なかったために、2014年9月1日からの1年間における雪面高度の変化は-9 cmという異常な値となった。

3. 衛星リモートセンシングによる観測

米国 NASA の衛星センサー中分解能撮像分光放射計 (MODIS) の 2000-2015 年のデータからグリーンランド氷床上の積雪域 (裸氷域を除く) における積雪粒径を抽出し、長期変動を解析した。その結果、標高 3,000 m 以上の低温領域を除いて、7 月に有意な増加トレンドがあることが明らかになった。積雪粒径の増加は、主に近赤外域におけるアルベド低下に寄与するため、内陸涵養域では標高の高い領域を除き、積雪粒径の増加によってアルベド低下が進行していることを意味する。この結果は、2.2 章で述べた積雪不純物観測の結果と整合的である。

一方、MODIS の 2000-2014 年のデータから、氷床上裸氷域の変化とその中の暗色裸氷域のそれぞれの面積の変化を調べた結果、共に年々増加傾向にあり、2000 年に比べ氷床上の表面融解が最も顕著であった 2012 年には、裸氷域が 3.1 倍、暗色裸氷域が 7.5 倍拡大していることが分かった (Shimada et al., 2016)。裸氷域のアルベドは積雪のそれよりも低いため、その拡大は氷床全体のアルベド低下に寄与し、その中の暗色裸氷域はさらにアルベドが低いため、この領域の拡大も氷床全体のアルベド低下に寄与していると言える。

その他、衛星データからの積雪物理量抽出精度向上に資する情報として、可視-短波長赤外域における偏光放射輝度および熱赤外域の射出率

の積雪粒径・雪質に対する依存性について調査した結果、短波長赤外域における雪面放射輝度の偏光度が積雪粒径に依存して変動することが明らかになった (Tanikawa et al., 2014)。また、MODIS がグリーンランド氷床域を観測して得られた熱赤外域輝度温度の変動を、地上の積雪断面観測結果と比較したところ、表面雪質を捉える情報を含んでいることが実証された (Hori et al., 2013; 2014)。

3. SIGMA2 による研究計画

SIGMA によって明らかになったグリーンランド氷床表面の暗色化メカニズムをより定量化するために、領域モデル及び全球モデルの研究を強化し、次の目標を設定した。

- ① グリーンランドでの現地観測に基づき氷床表面の暗色化の原因解明
- ② 衛星リモートセンシングによる氷床表面状態の監視
- ③ 光吸収性エアロゾル (LAA) の発生・輸送・沈着過程と積雪変質過程を含んだ領域及び全球数値モデルによるグリーンランド氷床暗色化の原因の定量化

- ④ 同上モデルによる氷床表面融解量の見積り

現在、領域モデルでは SMAP-NHM 結合計算を実施し、グリーンランド氷床全域における質量収支、熱収支計算を実施している。今後、大気エアロゾルの効果も考慮する計画である。

まとめ

近年の北極域における急激な雪氷の融解に対する積雪汚染及び雪氷微生物の効果を明らかにするため、SIGMA プロジェクトが 2011 年より 5 年間実施された。その研究の中心となったのは北西グリーンランドのカナック地域で、カナック氷帽とグリーンランド氷床上の異なる標高域の SIGMA-A、B、D に 3 機の AWS を設置した。現地観測と衛星リモートセンシングによって、涵養域のアルベド低下には積雪不純物効果よりも積雪粒径の増加効果が効いていること、消耗域では裸氷域の拡大と雪氷微生物を含む暗色裸氷の拡大がアルベド低下に寄与していることなどが明らかになった。この結果を踏まえ、領域モデル、気候モデルによる研究を強化した SIGMA2 プロジェクトを開始した。アルベド物理過程、積雪変質過程、大気エアロゾル過程などを含む領域モデルと気候モデルによって、グリーンランド氷床融解に対する温暖化の影響を評価とメカニズム解明を目指す計画である。

謝辞

SIGMA プロジェクトは JSPS 科研費 (基盤研究 (S) :23221004) の助成を受けた。また、SIGMA2 プロジェクトは JSPS 科研費 (基盤研究

(A) :16H01772) の助成を受けている。SIGMA AWS 観測データは北極域データアーカイブ (<https://ads.nipr.ac.jp/kiwa/Summary.action?selectFile=A20140714-002>) から公開されている。

参考文献

- Aoki, T., S. Matoba, J. Uetake, N. Takeuchi, and H. Motoyama (2014a) Field activities of “Snow Impurities and Glacial Microbe effects on abrupt warming in the Arctic” (SIGMA) Project in Greenland in 2011-2013. *Bull. Glaciol. Res.*, 32, 3-20, doi:10.5331/bgr.32.3.
- Aoki, T., S. Matoba, S. Yamaguchi, T. Tanikawa, M. Niwano, K. Kuchiki, K. Adachi, J. Uetake, H. Motoyama, and M. Hori (2014b) Light-absorbing snow impurity concentrations measured on Northwest Greenland ice sheet in 2011 and 2012. *Bull. Glaciol. Res.*, 32, 21-31, doi:10.5331/bgr.32.21.
- Box, J. E., X. Fettweis, J. C. Stroeve, M. Tedesco, D. K. Hall, and K. Steffen (2012) Greenland ice sheet albedo feedback: thermodynamics and atmospheric drivers. *The Cryosphere*, 6, 821-839, doi:10.5194/tc-6-821-2012.
- 橋本明弘, 庭野匡思, 青木輝夫 (2016) グリーンランド雪氷フィールド観測支援のための気象予測実験. *雪氷*, 78(4), 205-214.
- Hori, M., T. Aoki, T. Tanikawa, A. Hachikubo, K. Sugiura, K. Kuchiki, and M. Niwano (2013) Modeling angular-dependent spectral emissivity of snow and ice in the thermal infrared atmospheric window. *Appl. Opt.*, 52, 7243-7255.
- Hori, M., T. Aoki, T. Tanikawa, K. Kuchiki, M. Niwano, S. Yamaguchi, and S. Matoba (2014) Dependence of thermal infrared emissive behaviors of snow cover on the surface snow type. *Bull. Glaciol. Res.*, 32, 33-45, doi:10.5331/bgr.32.33.
- Matoba, S., H. Motoyama, K. Fujita, T. Yamasaki, M. Minowa, Y. Onuma, Y. Komuro, T. Aoki, S. Yamaguchi, S. Sugiyama, and H. Enomoto (2015) Glaciological and meteorological observations at the SIGMA-D site, northwestern Greenland Ice Sheet. *Bull. Glaciol. Res.*, 33, 7-14, doi:10.5331/bgr.33.7.
- Nghiem, S. V., D. K. Hall, T. L. Mote, M. Tedesco, M. R. Albert, K. Keegan, C. A. Shuman, N. E. DiGirolamo and G. Neumann (2012) The extreme melt across the Greenland ice sheet in 2012. *Geophys. Res. Lett.*, 39, L20502, doi:10.1029/2012GL053611.
- Niwano, M., T. Aoki, K. Kuchiki, M. Hosaka, and Y. Kodama (2012) Snow Metamorphism and Albedo Process (SMAP) model for climate studies: Model validation using meteorological and snow impurity data measured at Sapporo, Japan. *J. Geophys. Res.*, 117, F03008, doi:10.1029/2011JF002239.
- Niwano, M., T. Aoki, S. Matoba, S., Yamaguchi, T. Tanikawa, K. Kuchiki, and H. Motoyama (2015) Numerical simulation of extreme snowmelt observed at the SIGMA-A site, northwest Greenland, during summer 2012. *The Cryosphere*, 9, 971-988, doi:10.5194/tc-9-971-2015.
- Shepherd A., E. R. Ivins, A. Geruo, V. R. Barletta, M. J. Bentley, S. Bettadpur, K. H. Briggs, D. H. Bromwich, R. Forsberg, N. Galin, M. Horwath, S. Jacobs, I. Joughin, M. A. King, J. T. M. Lenaerts, J. Li, S. R. M. Ligtenberg, A. Luckman, S. B. Luthcke, M. McMillan, R. Meister, G. Milne, J. Mouginot, A. Muir, J. P. Nicolas, J. Paden, A. J. Payne, H. Pritchard, E. Rignot, H. Rott, L. S. Sørensen, T. A. Scambos, B. Scheuchl, E. J. O. Schrama, B. Smith, A. V. Sundal, J. H. van Angelen, W. J. van de Berg, M. R. van den Broeke, D. G. Vaughan, I. Velicogna, J. Wahr, P. L. Whitehouse, D. J. Wingham, D. Yi, D. Young, H. J. Zwally (2012) A reconciled estimate of ice-sheet mass balance. *Science*, 338, 1183-1189, doi: 10.1126/science.1228102.
- Shimada, R., N. Takeuchi, and T. Aoki (2016) Inter-annual and geographical variations in the extent of bare ice and dark ice on the Greenland ice sheet derived from MODIS satellite images. *Front. Earth Sci.*, 4:43, doi:10.3389/feart.2016.00043.
- Takeuchi, N., Nagatsuka, N., Uetake, J., and Shimada, R., 2014: Spatial variations in impurities (cryoconite) on glaciers in northwest Greenland. *Bull. Glaciol. Res.*, 32, 85-94, doi:10.5331/bgr.32.85.
- Tanikawa, T., M. Hori, T. Aoki, A. Hachikubo, K. Kuchiki, M. Niwano, S. Matoba, S. Yamaguchi, and K. Stamnes (2014) In situ measurements of polarization properties of snow surface under the Brewster geometry in Hokkaido, Japan, and northwest Greenland ice sheet. *J. Geophys. Res. Atmos.*, 119, doi:10.1002/2014JD022325.
- Uetake, J., S. Tanaka, T. Segawa, N. Takeuchi, N. Nagatsuka, H. Motoyama, and T. Aoki (2016) Microbial community variation in cryoconite granules on Qaanaaq Glacier, NW Greenland. *FEMS Microbiology Ecology*, 92(9), doi: 10.1093/femsec/fiw127.
- van den Broeke, M. R., J. Bamber, J. Ettema, E. Rignot, E. Schrama, W. J. van de Berg, E. van Meijgaard, I. Velicogna, and B. Wouters (2009) Partitioning Recent Greenland Mass Loss. *Science*, 326, 984-986, doi: 10.1126/science.1178176.
- Yamaguchi, S., S. Matoba, T. Yamazaki, A. Tsushima, M. Niwano, T. Tanikawa and T. Aoki (2014) Glaciological observations in 2012 and 2013 at SIGMA-A site, Northwest Greenland. *Bull. Glaciol. Res.*, 32, 95-105, doi:10.5331/bgr.32.95.