

日本各地に大雪をもたらす大気循環場の特徴

本田明治（新潟大学理学部）

1. はじめに

地球温暖化が進む中でも、近年の冬季は日本の各地でしばしば大雪に見舞われている。1988/89 年冬季以降は暖冬傾向となっていたが、いわゆる「平成 18 年豪雪」と呼ばれている 2005/06 年冬季（本田・楠, 2007）以降、ほぼ毎冬のように大雪の特徴がみられる。冬毎の特徴にみると、全国的に低温・大雪となった冬（11/12 冬、12/13 冬、17/18 冬）、地域によっては大雪となった冬（09/10 冬、10/11 冬、13/14 冬、14/15 冬）、暖冬少雪傾向であったが一時的または局所的に大雪となった冬（07/08 冬、15/16 冬、16/17 冬、18/19 冬）など、05/06 年冬季以降 14 冬のうち 12 冬で大雪の声が聞こえてくる。

低温や大雪の傾向がみられるのは日本だけではなく、近年の冬季北半球の中高緯度帯はしばしば強い寒気に見舞われている。その要因についてはさまざま指摘されているが、中でも夏季から秋季の北極海の海水域面積の減少が主要なもののひとつとされている。これに伴う秋～冬の海水域の拡大の遅れによって、初冬の北極海特にバレンツ海の周辺では高温となり、露出した海面により大気は例年より加熱されやすくなる。その影響でユーラシア上空の偏西風ジェットはヨーロッパ側で北に蛇行、その反動で極東では南に蛇行しやすくなる（図 1）。これにより大陸上では寒気が蓄積されてシベリア高気圧の発達と東方への拡大を促し、ユーラシア中高緯度帯は広く低温偏差に覆われやすくなり、日本など極東にも寒気が入りやすくなる（Honda et al., 2009, 本田 2011）。Mori et al. (2018) によれば、近年の北半球中高緯度域の低温の約半分は北極海の海水域減少によって説明されるとしている。北極の寒気が日本を含む極東地域に流出しやすい状況が続いていることが、近年の日本の大雪傾向の背景にあると考えてよさそうである。

2. 大雪をもたらす大気循環場の特徴

2005/06 年冬季以降の大気循環場及び大雪の状況を振り返っていく。05/06～12/13 年冬季までについては簡潔に、13/14～18/19 年冬季以降は各冬の特徴を紹介する。

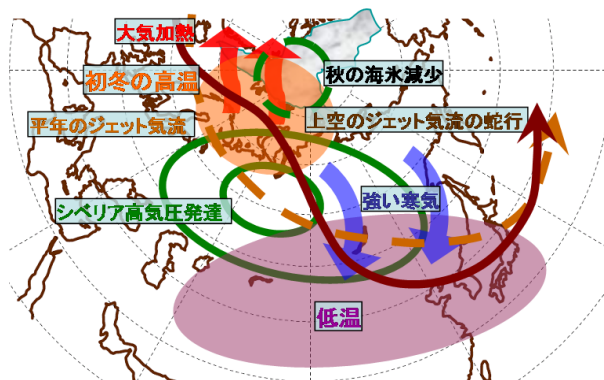


図 1. 夏～秋の北極海の海水域減少が、冬季ユーラシア大陸上の大気場応答を通じて、日本を含む極東一帯に寒気をもたらすメカニズムの模式図。バレンツ海は、大気加熱の矢印（赤）付近の海域。

2. 1. 2005/06 年冬季～12/13 年冬季

この 8 冬のうち、高温・少雪であった 06/07 冬及び 08/09 冬を除く 6 冬で、北極海の海水域減少に伴う「北極海の高温」、「シベリア高気圧の発達」、「ユーラシア大陸中高緯度の低温」の典型的な特徴が、冬毎に空間分布は異なるものの共通にみられている。この中で 05/06 冬、11/12 冬、12/13 冬は全国的に低温・大雪、エルニーニョ年であった 09/10 冬は寒暖差の大きい冬であったが 1 月までは各地で大雪傾向、10/11 冬は会津、山陰、九州など局所的大雪が特徴であった。07/08 冬の寒気は大陸中心で中国では記録的大雪となっている。

2. 2. 2013/14 年冬季

この冬も北極海の海水域減少に伴う大気場の特徴は見られたが、寒気は大陸中心で日本は概ね平年並の気温であった。日本海側では全般に少雪であったが、この冬は南岸低気圧がしばしば発生し、2 月 8 日頃と 14 日頃は関東甲信地方で大雪となった。特に 2 月 14-15 日の事例では甲府で積雪 114 cm（従来の記録 49cm）に達するなど、各地で最深積雪の極値を更新する記録的な大雪となった。総観場（図 2）をみると、北日本に寒気を伴った 1030 hPa を越える勢力の強い高気圧が存在して本州南東方からの水蒸気の流入を強め、南岸低気圧の前面で水蒸気フ

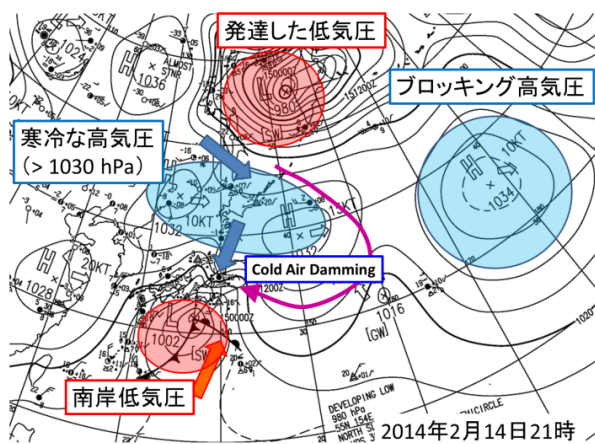


図 2. 2014 年 2 月 14 日 21 時の総観場の特徴 (気象庁地上天気図に加筆)。

ラックスの収束域を形成したことと、勢力の強い高気圧に伴う Cold-Air Damming に伴って北東風の寒気移流を強化されて、降雪が 24 時間以上に渡って継続したことが要因と考えられる (Honda et al. 2016)。

2014 年 2 月前半は南岸低気圧が数日おきに発生しており、また本州東方の太平洋上には発達したブロッキング高気圧が居座り、日本付近を通過する低気圧の東進を阻んでいたと考えられる。先行の南岸低気圧が北進してオホーツク海で発達したことによって顕著な寒気流入を伴い、北日本の高気圧の勢力を強めたと考えられる。このブロッキング高気圧は 1958 年以降この時期として最も勢力が強いものであることも確認されている (Yamazaki et al. 2015)。

2. 3. 2014/15 年冬季

夏季～秋季北極海の海水域面積が少ない状況は 2005 年以降ほぼ恒常化しており、ほぼ毎冬のように海水減少に伴う大気場のパターンが現れていたが、この冬以降状況が変わってきている。この冬は北極海上の高温に加え、北大西洋でアイスランド低気圧が顕著で、それに伴ってユーラシア大陸上は広域に渡って気温が高い状態であった。但し、日本は全般的に平年並の気温で降雪量はやや少なめであったが、本州の山沿いや北海道東部では降積雪ともに大雪傾向であった。

2. 4. 2015/16 年冬季

15/16 冬も北極海の海水が少なく状態は続いている

たが、14/15 冬と循環場の状況は似ており、北極海とユーラシア大陸では全般に高温であった。日本は 06/07 冬、08/09 冬に並ぶ高温少雪であったが、1 月下旬に極東アジア一帯を記録的な寒波が襲い、日本では 24-25 日にかけて西日本ほぼ全域で氷点下となり、沖縄・奄美でも雪やみぞれが観測された。1 月前半に偏西風の蛇行が強まり、ユーラシア大陸北部に発生したブロッキング高気圧が中旬にかけて強まって下層ではシベリア高気圧が 1078 hPa まで発達し、バイカル湖付近に形成された寒気が極東アジア一帯に流れ込んだことによるものである (図 3)。

12 月は北極一帯上空は負偏差に覆われ、北極振動 (Arctic Oscillation: AO; Thompson and Wallace, 1998) 指数は正の状態であったが、1 月に入ると半球スケールで循環場が大きく変化して負の AO パターンになり、寒気が流出しやすい状況であった。渦位の追跡から 12 月下旬の欧州にあった高気圧性偏差場が一の過程の引き金となったことが示唆されるが、詳細についてはまだ明らかになっていない。15/16 冬はエルニーニョ年であったことから、循環場変動が大きくなる傾向は整合的であるが、それだ

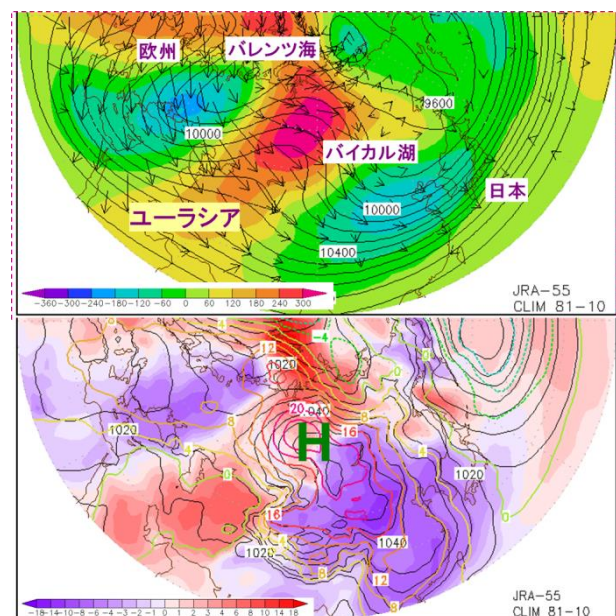


図 3. 2016 年 1 月第 5 半旬 (1 月 21 日～25 日) 平均の、(上) 250 hPa 面高度 (m: 黒実線) 及び平年からの偏差 (m: 陰影)、定常ロスビー波の活動フラックス (m^2s^{-2} : 矢印)、(下) 海面気圧 (hPa: 実線)、1000 hPa 気温の平年からの偏差 ($^{\circ}C$: 陰影)。「H」はシベリア高気圧の中心。使用したデータは JRA-55 再解析 (Kobayashi et al. 2015)。

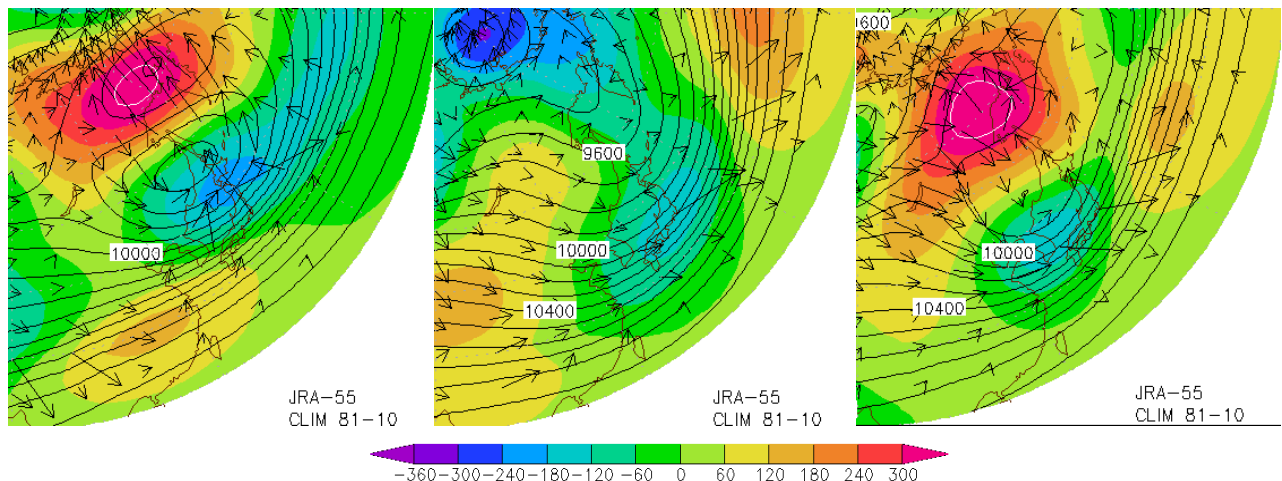


図 4. (左) 2017 年 1 月 11 日～15 日、(中) 1 月 21 日～25 日、(右) 2 月 9 日～13 日の各 5 日平均の、250-hPa 高度 (m、実線)、偏差 (m、寒暖色系陰影)、定常ロスビー波の活動度フラックス (m^2s^{-2} 、矢印)。偏差は 1981 年～2010 年平均の気候値との差。JRA-55 再解析データに基づく。

けでは最強と言われる今回の寒波は説明できない。

2. 5. 2016/17 年冬季

16/17 冬も、14/15 冬や 17/18 冬と循環場の状況は似ていたが、低気圧が北極海で発達しユーラシア大陸は西部がやや低温で東部が高温傾向であった。日本は全国的に暖冬で、降雪量は山陰～近畿北部と本州山沿いの一部を除いて平年より少ない地点がほとんどであった。最深積雪は全般に平年より少ないか平年並みであったが、山陰～近畿北部で平年の 1.5～3 倍と非常に多かった。1 月～2 月は全国的に寒暖の変動が大きく、特に 1 月中旬、1 月下旬、2 月中旬を中心に入った強い寒気は、北信越、近畿北部、山陰の各地方に大雪をもたらした。特に山陰地方が 2 度大雪に襲われたのが特徴で、1 月下旬は山沿い、2 月中旬は海岸沿いで大雪となり、いずれも日本海寒帯気団収束帯 (Japan Sea Polar Convergence Zone: JPCZ) によってもたらされている。

16/17 冬の 3 回の寒気の襲来は、いずれも上空の偏西風蛇行による寒気の切離・貫入が起こっていたが、ブロッキング高気圧の発達と寒冷渦の形成による「ブロッキング型」と定常ロスビー波列による「寒気貫入型」とに分類され、1 月中旬は前者、1 月下旬は後者が卓越、2 月中旬は前者が卓越するも後者の影響も見られた (図 4)。「ブロッキング型」では北方のブロッキングに対する南方の寒冷渦の位置で降雪の分布が決まってくるようである。寒冷渦の位置は 1 月中旬日本海北部、2 月中旬は日本海南部に

位置し、それぞれ主な降雪エリアは北信越と山陰であった。「寒気貫入型」は亜寒帯ジェット強化による定常ロスビー波列により、上空の気圧の谷が南西方向への延伸するため西日本に寒気が入りやすく、JPCZ の走向にも影響することで山陰地方の大雪の要因のひとつになることが考えられる。

2. 6. 2017/18 年冬季

17/18 冬は全国的に低温・大雪となり、12/13 冬以来 5 冬振りの本格的な冬であった。低温傾向が持続する中、12 月前半、1 月 10 日前後、1 月下旬、2 月上旬に特に強い寒気の流入がみられ、各地で低温・大雪となった。この冬の降雪の特徴としては北陸～新潟地域の海岸平野部にしばしば降雪が集中したことで、最深積雪が福井 147 cm、金沢 87 cm、新潟 80 cm など各県庁所在地でも記録的な大雪となった。

今冬は北極海の海水域減少に伴う「北極海の高温」、「シベリア高気圧の発達」、「ユーラシア大陸中高緯度の低温」の典型的なパターンがみられた。また今冬の低温大雪の持続は、顕著な偏西風の蛇行で分裂した極渦の一つが、極東の上空で冬季の間ほぼ留まっていたことによるものと考えられる (図 5)。また亜寒帯・亜熱帯の両ジェットに沿う波列がしばしば強化され、日本付近で南に蛇行することで、極東上空の寒気を日本付近に南下させやすい状況をつくっていた。また西回りで寒気が入りやすく JPCZ が発達しやすい状況であったことも各地で記録的な大雪となったと要因の一つと考えられる。

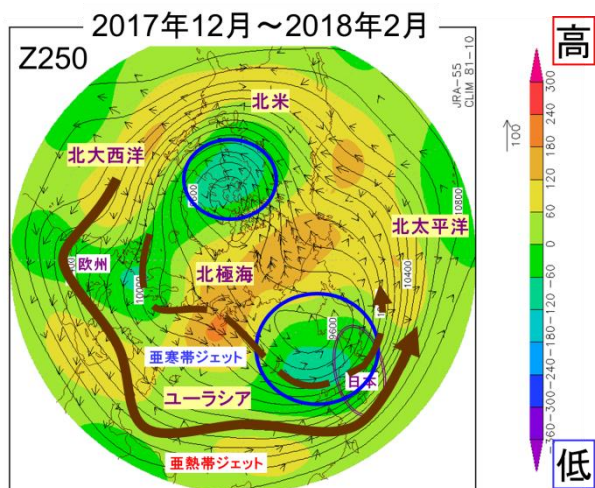


図 5. 2017 年 12 月～2018 年 2 月平均の 250 hPa 面高度 (m: 黒実線) 及び平年からの偏差 (m: 陰影)、定常ロスビー波の活動フラックス (m^2s^{-2} : 矢印)。茶色の実線と破線の矢印は、それぞれ亜熱帯ジェットと亜寒帯ジェットの蛇行を模式的に示したもの。青の楕円は分裂した極渦を表す。JRA-55 再解析データに基づく。

一例として、通常降積雪の少ない新潟市において 1 月 11 日昼頃～12 日午前にかけてほぼ 24 時間降雪が持続して最深積雪が 80 cm に達した事例を紹介する。日本付近は 9 日より冬型の気圧配置となり、10 日～11 日にかけて日本海の西側で南北に走る等圧線は次第に「くの字状」になり (図 6 左上)、JPCZ が形成され始めた。本州上空では西南西の風が卓越し、これにより JPCZ は山陰沖～北陸・新潟の走向となり、新潟県方面に雪雲が入りやすい状況が 11 日午前～12 日昼頃まで継続していた。また北海道西岸付近では 10 日夜に小低気圧が発生し、11 日朝～12 日朝にかけて北海道南西部で停滞していた (図 6 左上)。この低気圧の南方の東北日本海側～新潟県では等圧線が「逆くの字状」の高気圧性循環となり、山形県～新潟県の沿岸部では次第に北北東～南南西に延びる収束線が形成され、帯状の雪雲が新潟市域に流れ込みやすい状況となった (図 6 右上)。気象庁メソ気象モデル JMA-NHM を用いた数値実験においても (実験の詳細な設定は省略)、西方向からの JPCZ と北東方向からの帯状降雪雲が新潟県付近でぶつかる様子が再現されている (図 6 下)。新潟市付近では雪雲の侵入は 11 日の夕方までは主に JPCZ によるものであったが、次第にこの帯状降雪雲が北～東寄りの風に伴って侵入しその状態が 12 日午前中まで継続し、24 時間で 80 cm という記録的な降雪となった。

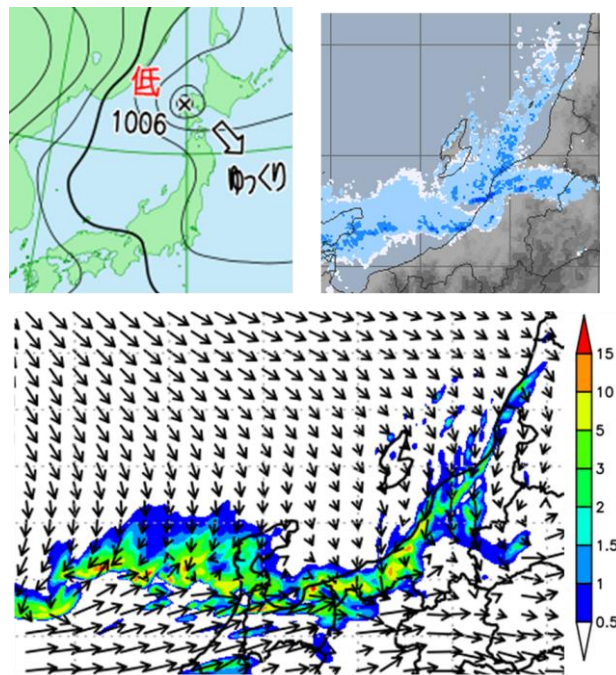


図 6. (左上) 1 月 11 日 15 時の地上天気図 (気象庁)、(右上) 1 月 11 日 20 時 30 分のレーダー降雨強度 (気象庁)、(下) JMA-NHM により再現された 1 月 11 日 19 時の降雨強度 (mm/h) と風向風速 (m/s)。

観測及び数値実験に基づいて日本海上の大気場の 3 次元構造に着目すると、JPCZ 及び北海道沖の低気圧に伴う上昇流が 600 hPa 付近で発散域を形成し、両者の間の日本海上空では収束線を形成していた。この上空の収束線に伴って対流圏下層は下降流となっており、海上付近では発散場及びこれに伴う高気圧循環が形成されたと推測される。発散風に伴って東北沿岸に吹き出した風は海岸線に沿って収束線を形成し、雪雲を新潟市付近に継続的に侵入させたと考えられる。

日本海側の海岸部の大雪に JPCZ が寄与することはよく知られているが、本事例のように同時に北海道西岸付近の小低気圧及び東北日本海側の高気圧性循環を伴っているケースは、過去の大雪事例でもしばしば確認されている。今冬の 2 月上旬の福井県を中心とした大雪事例でも同様の気圧配置を示しており、今後詳しい解析が必要である。

2. 7. 2018/19 年冬季

18/19 冬は全国的に高温・少雪で、西に進むほどその傾向が顕著であった。日本海側の降雪量をみると、北海道で平年の 7 割前後、東北地方で平年の約半分、北信越地方で平年の 2～3 割、近畿・山陰で

平年の 1 割程度と、西日本では記録的な少ない雪であった。一時的に強い寒気が入った時期もあり、最深積雪は内陸部を中心に平年並みの地点が多く、または北日本では平年を上回る地点もあった。

循環場をみると、ユーラシア大陸上の亜寒帯ジェットのスラッグが全般に弱く、また亜熱帯ジェットのスラッグは概ね堅調であったが、17/18 冬とは位相が反対で日本付近は高気圧性偏差に対応し、エルニーニョもその傾向を下支えた可能性もあり、暖気に覆われやすかったと考えられる。日本付近への寒気の南下は、亜寒帯ジェットのスラッグの強化があった 12 月と、分裂して東シベリアに留まっていた極渦からの寒気侵入があった 2 月前半に見られたが北日本中心で、亜熱帯ジェットのスラッグの影響下にあった中部地方～西日本まで及ぶことはほとんどなかった。尚、今冬は中央アジアや東シベリアでは冬季平均で低温偏差となっている（図略）。特にモンゴル西部や中国北西部では、冬季平均としては記録的な低温となった地域もあったことを付記しておく。

3. おわりに

全球的に地球温暖化が進む中でも、2005/06 年冬季以降日本の各地でしばしば大雪に見舞われている。その要因の一つとしては、北極の寒気が日本を含む極東地域に流出しやすい状況が続いていることである。特に夏季から秋季の北極海の水氷域面積の減少に伴う、「北極海の高温」、「シベリア高気圧の発達」、「ユーラシア大陸中高緯度の低温」は 05/06 冬以降の 14 冬中 8 冬で確認されている。但し、温暖化の進行に伴う北極海の水氷域面積の更なる減少が、ユーラシア大陸の一層の低温化を招くことは考えにくく、過度的な状況と捉えるのが自然であろう。実際 14/15 冬、15/16 冬、16/17 冬のユーラシア大陸は全般に高温で、日本も暖冬傾向となっていた。

長期的にみて地球温暖化の進行は確実で、日本の降雪量は総じて減少していくと予想されるが、寒冬多雪となる年は今後も現れると予想する。日本の最深積雪の記録を持つ上位 20 地点のうち、8 地点が 21 世紀に入ってからのものであり、今後も新たに記録を更新する地点が出てくると考えられる。また暖冬年でも 15/16 冬や 16/17 冬のように、一時的な強い寒気が入り、記録的大雪・低温をもたらす事例がみられており、今後温暖化が進行していく中で典型的な寒気侵入の形態となっていくのかもしれない。

全般的な高温傾向の中で低温域が広域に及ぶことは少なくなっていくと予想されるが、局所的な低温域が出現する可能性は今後も高いとみられ、引き続き低温大雪には油断なく警戒する必要がある。

参考文献

- Honda, M., J. Inoue and S. Yamane, 2009: Influence of low Arctic sea-ice minima on anomalously cold Eurasian winters. *Geophys. Res. Lett.*, **36**, L08707.
- Honda, M., A. Yamazaki, A. Kuwano-Yoshida, Y. Kimura, and K. Iwamoto, 2016: Synoptic conditions causing an extreme snowfall event in the Kanto-Koshin district of Japan on 14-15 February 2014, *Sci. Online Lett. Atmos.*, **12**, 259–264.
- Kobayashi, S., Y. Ota, Y. Harada, A. Ebata, M. Mori, H. Onoda, K. Onogi, H. Kamahori, C. Kobayashi, H. Endo, K. Miyaoka, and K. Takahashi, 2015: The JRA-55 reanalysis: General specifications and basic characteristics. *J. Meteor. Soc. Japan*, **93**, 5–48.
- Mori, M., Kosaka, Y., M. Watanabe, H. Nakamura, and M. Kimoto, 2018: A reconciled estimate of the influence of Arctic sea-ice loss on recent Eurasian cooling. *Nature Climate Change*, **9**, 123–129.
- Thompson, D. W. J., and J. M. Wallace, 1998: The Arctic Oscillation signature in the wintertime geopotential height and temperature fields. *Geophys. Res. Lett.*, **25**, 1297–1300.
- Yamazaki, A., M. Honda, and A. Kuwano-Yoshida, 2015: Heavy snowfall in Kanto and on the Pacific Ocean side of northern Japan associated with western Pacific blocking, *Sci. Online Lett. Atmos.*, **11**, 59–64.
- 本田明治・楠昌司編, 2007: 2005/06 年 日本の寒冬・豪雪. 気象研究ノート, **216**, 290pp.
- 本田明治, 2011: 夏季北極海の水氷域減少がもたらす冬季ユーラシアの低温, 第 10 章, 気象研究ノート「北極の気象と海氷」(山崎孝治編), **222**, 133–143.