

気象庁季節予報ハインドキャスト実験における 北半球冬季成層圏予報と対流圏への影響

田口正和（愛知教育大学地学領域）

1. はじめに

近年の研究で、対流圏季節予報における成層圏の重要性を指摘するものがある。Sigmond et al. (2013) は、現実に発現した突然昇温時に予報を開始すると、その後の2ヶ月程度の間、成層圏・対流圏の両方で北半球環状モード（Northern Annular Mode、NAM）指数が普通よりもよく予報されることを示した。Scaife et al. (2016) は、Global seasonal forecasting system (GloSea5) を用いた季節予報ハインドキャスト（HC）実験における冬季北大西洋振動指数の予報スキルが、突然昇温を含むアンサンブルメンバーを除くと、ほとんどなくなることを示した。

これらのような先行研究は、対流圏季節予報における成層圏の重要性を指摘するあるいは示唆するが、その詳細な描像は十分には調査されていない。具体的には、季節予報スケールで成層圏がどのように予報されているか、それが対流圏の予報とどのように関連しているか、といった点がある。このような中で、気象庁による季節予報 HC 実験データが、“気象コンソーシアム”の枠組みにより、成層圏・日々データを含めて公開されたので、本研究は、そのデータを用いて、冬季のNAM指数に着目してこれらの問題を調査する。

2. データ

この季節予報 HC 実験は、JMA/MRI-CPS2 システムに基づいている。このシステムの大気モデルは、水平分解能約 110 km、地表から上端 0.1 hPa までを 60 層で表現する。Charlton-Perez et al. (2013) の区分をあてはめると、このモデルは、“HIGH top”モデルに分類される（彼らを用いた閾値は、上端 1 hPa）。

この実験は、1979~2014 年の各月の2つの初期日それぞれから、メンバー数5でアンサンブル予報を実施した。

ここでは、晩秋に開始された2つのセット（初期日は10/28と11/12）を合わせて、メンバー数10として、北半球冬季（DJF）平均のNAM指数を対象に、JRA-55 データ（Kobayashi et al. 2015）と比較・検証した。NAMは、現実と予報のそれぞれで、中高緯度における等圧面高度のEOF第一モードとして得た。以下では、特に明示しない限り、季節のラベルは、1月の年を参照する。

ここで関係ある季節予報の特徴として、このシステムは、数ヶ月のリードタイムではENSOをよく予報する一方、QBOを（初期値には含むが）予報しないことが挙げられる。予報データにおける赤道下部成層圏の東西風は、時間とともに弱い東風に近づく。

3. 結果

（1）成層圏・対流圏での予報の概観

まず、成層圏・対流圏の各レベルにおけるNAM指数の季節予報の様子を2つの方法で概観した。

第一の方法では、各レベルにおけるDJF平均NAM指数の年々変動について、JRA-55と予報データの間で相関係数を求めた（図1a）。予報データにおいては、さらにアンサンブル平均を用いた。

相関係数に基づく検証は、このシステムは、冬季成層圏（100 hPa 以上）のNAM指数について、統計的に有意な相関、すなわち予報スキル、を持つことを示す。一方、このシステムは、冬季対流圏のNAM指数には、有意な相関・予報スキルを持たない。

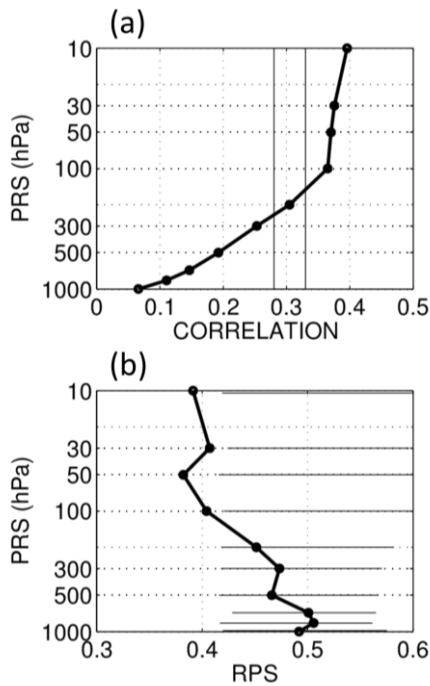


図1：(a) 各レベルでのDJF平均NAM指数の年々変動について、JRA-55と予報データ(アンサンブル平均)の間の相関係数の高度分布。2つの補助線は、36個のデータについて統計的に有意な相関の目安：0.28(有意水準90%)、0.33(同じく95%)。(b) 同じく平均的RPSの高度分布。補助線は、各レベルで、1000回のブートストラップテスト(実況のカテゴリをランダムに配置)による90%の区間。

第二の方法では、同じく各レベルにおけるDJF平均NAM指数から、Wilks(2011)の定義に基づいて、Ranked Probability Score(RPS)を求めた(図1b)。RPSは、各冬において、10メンバーによるNAM指数予報値から下位(LO)/中位(NT)/上位(HI)の3カテゴリに対する確率予報を求め、現実の実現したカテゴリと比較する。3カテゴリは、現実のDJF平均NAM指数(1980~2015年)の上位1/3以上をHI、下位1/3以下をLO、それ以外をNTと分類した。NAMの位相の定義により、LOカテゴリが、極渦が弱い状態を示す。3カテゴリに対する確率予報の場合、RPSは0から2まで変化し、小さいRPS値ほど良い予報を表す。

RPSに基づく検証は、相関係数を用いた解析の場合と整合的な結果を示す。すなわち、このシステムは、成層圏では有意に小さいRPS値(有意な予報スキル)を持つが、対流圏ではそ

うではない。

(2) 成層圏(50 hPa)予報の詳細

次に、下部成層圏(50 hPa)でのNAM指数予報の詳細を、分割表を用いて検討した(図2)。分割表は、各冬における主な予報カテゴリと、現実のカテゴリから構成される。主な予報カテゴリがLOであるのは、LOの予報確率が最大で、かつ50%以上である場合とした。HIも同様である(LOとHIが両立する場合はなかった)。それら以外の場合が、NTである。

この分割表によると、LOカテゴリの偏りが特徴的で、有意である。すなわち、LOの予報が主である場合、その多くが現実にLOになる(9/12)。また、現実のLOの多くの年は、主たる予報はLOである(やはり9/12)。特に、LOの的中率が9つあり、予期されるように、そのRPSは小さい。一方、主な予報がLOであったのに、現実には、反対のHIとなった(現実のHIを見逃したと言うこともできる)年が3つあった。これらの年では、RPSは非常に大きい。

		現実のカテゴリ			
		LO	NT	HI	SUM
主な予報カテゴリ	LO	9 0.25	0	3 0.98	12 0.44
	NT	3 0.47	7 0.17	5 0.59	15 0.37
	HI	0	5 0.37	4 0.28	9 0.33
	SUM	12 0.31	12 0.26	12 0.59	36 0.38

図2: 50 hPaにおけるNAM指数予報の分割表。各セルにおける大きな数字はサンプル数を示し、小さな数字はRPSの平均を示す。

冬季成層圏極渦の年々変動は、ENSOやQBOに影響を受けていることが知られている(Taguchi 2015など)ので、ここでの成層圏季節予報スキルがこれらの要因とともに変動

しているか検討した(図3)。具体的には、50 hPaでの DJF 平均 NAM 指数のカテゴリ予報に対する RPS の分布を、現実の ENSO または QBO の位相で二分して、比較した。

ENSO の 2 つの位相 (現実の、DJF 平均 NINO3.4 指数¹が 1980~2015 年平均より小さい場合と、平均以上の場合) の間では、RPS の違いは明瞭でないようである。

一方、RPS は、QBO の位相とともに明瞭に変化することが分かった。具体的には、ELY 年 (現実の、DJF 平均の 50 hPa 赤道東西風²が負) において、RPS が系統的に小さい。この場合には、LO の的中が寄与している (図示しない)。逆に、WLY 年 (赤道東西風が 0 m/s 以上) では、RPS が全体的に大きい。これには、現実の HI が見逃されていることが寄与している (図示しない)。

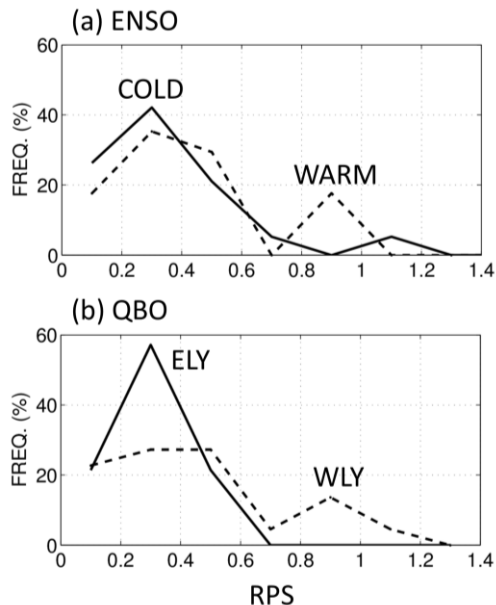


図 3: 50 hPa における DJF 平均 NAM 指数の RPS の頻度分布。(a)は、全 36 冬を、ENSO の 2 つの位相で分類した。COLD/WARM は、現実の DJF 平均 NINO3.4 指数が、1980~2015 年の平均より小さい/以上である場合。(b)は、同じく QBO の 2 つの位相で分類した。ELY/WLY は、現実の DJF 平均赤道東西風 (50 hPa) が、0 m/s より小さい/以上である場合。

1

<http://www.cpc.ncep.noaa.gov/data/indices/ersst3b.nino.mth.81-10.ascii>

2

<http://www.geo.fu-berlin.de/met/ag/strat/produkte/qbo/qbo.dat>

QBO 位相に伴って現れる特徴的な場合について、東西平均東西風・EP フラックスの様子を検討した (図示しない)。ELY 年で LO が的中した場合には、現実・予報とも、冬季には中高緯度成層圏の東西風が負偏差 (秋から冬にかけて極向きに伝播してくる) で、LO の的中と整合的である。これらの東西風負偏差は、強い惑星波強制に伴って現れている。一方、WLY 年で現実の HI が見逃された時の現実の様子は、ELY 年で LO が的中した場合と逆のセンスとなっている (東西風が正偏差で、惑星波活動が弱い)。それに対して、予報は、真冬から晩冬にかけて、現実とは反対に、惑星波強制の強化を示し、それが東西風の負偏差をもたらしている。

本題とは外れるが、本予報データにおける大昇温の発現確率 (各 DJF において、10 メンバーのうち、60°N、10 hPa で東風を示すものの割合) も検討した。その結果、発現確率の平均 (約 30%) は、現実の平均 (およそ 2 年に 1 回) より低いものの、発現確率が現実の大昇温の発現と比較的よく連動している。

(3) 成層圏・対流圏の予報スキルの関連

最後に、成層圏と対流圏における季節予報スキルの関連を調査した。そのために、まず、NAM 指数で見た時の上下結合がどのように表現されているかを検討した。その結果、予報データも、現実と同じように、成層圏と対流圏で NAM 指数が同符号になる傾向をよく再現していることを確認した (図示しない)。

図 4 は、50 hPa と 500 hPa での RPS の散布図を示す。全体としては、正の相関+0.42 を示し、成層圏・対流圏の予報の良し悪しは、弱いながらも連動していることが分かる。特に、右上のデータ (成層圏・対流圏の両方で RPS が大きい) は、成層圏で HI を見逃している状況である。そのような場合には、対流圏の予報評価も低い。一方、左上のデータは、成層圏の予報評価は低くない (それらの現実

のカテゴリは NT) が、対流圏の予報だけが低評価されている。

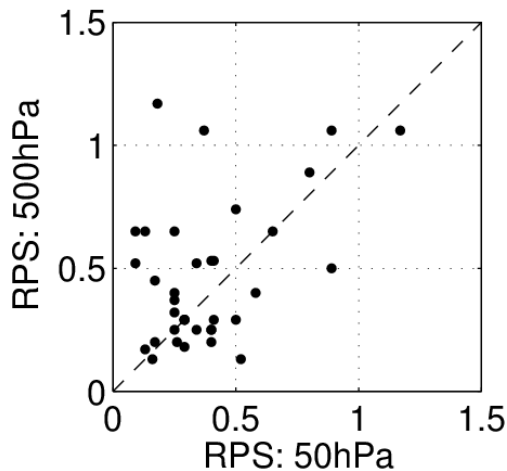


図4: 50 hPa と 500 hPa における NAM 指数の RPS の散布図。破線は、両者が等しい場合を示す補助線。

4. まとめ

本研究では、気象庁季節予報 HC 実験データを用いて、北半球冬季成層圏の季節予報と、その対流圏との関連を調査した。

晩秋に開始された予報で、DJF 平均の NAM 指数の様子を見ると、アンサンブル平均やカテゴリ予報に有意なスキルが成層圏でのみ見られ、かつそのスキルが QBO 位相によって変化していることが分かった。具体的には、ELY の時には、現実の LO (成層圏極渦が弱い状態) がよく予報される一方、WLY の時には、現実の HI が見逃されるという傾向があった。

これは、成層圏 NAM 指数が、QBO 位相により予報しやすい、またはしにくい、場合があることを含意する。具体的な可能性のひとつは、「現実には、QBO ELY が成層圏極渦を弱くするように強く影響し、予報データもそのことをよく表現している。一方、QBO WLY の影響は、さほど強くなく、その場合の極渦の強弱の予報は困難である」、というものである。一方、別の可能性として、このシステムが QBO を予報していないので、そのバイアスの影響が WLY の時に大きく現われていることもありうる。

成層圏予報と対流圏予報の関連について、両

者は、全体としては、弱いながらも連動する傾向にある。ここでは、因果関係に踏み込んでいないが、もし成層圏 NAM 予報が大きく外れる場合を改善できれば、その時の対流圏 NAM 予報も改善できる可能性が示唆される。一方、対流圏 NAM 予報の誤差だけ大きい場合もあり、そのような場合には、成層圏とはあまり関係なく、対流圏や地表 (海洋・雪氷を含む) のプロセス自体が重要と考えられる。

謝辞

本研究に用いた気象庁季節予報 HC 実験データは、“気象コンソーシアム”の枠組みにより公開頂きました。

参考文献

- Charlton-Perez, A. J., and coauthors, 2013: On the lack of stratospheric dynamical variability in low-top versions of the CMIP5 models. *J. Geophys. Res. Atmos.*, **118**, 2494-2505, doi:10.1002/jgrd.50125.
- Kobayashi, S., and coauthors, 2015: The JRA-55 Reanalysis: General specifications and basic characteristics. *J. Meteor. Soc. Japan*, **93**, 5-48, doi:10.2151/jmsj.2015-001.
- Scaife, A. A., and coauthors, 2016: Seasonal winter forecasts and the stratosphere. *Atmos. Sci. Lett.*, **17**, 51-56, doi: 10.1002/asl.598.
- Sigmond, M., J. F. Scinocca, V. V. Kharin, and T. G. Shepherd, 2013: Enhanced seasonal forecast skill following stratospheric sudden warmings. *Nat. Geosci.*, **6**, 98-102, doi:10.1038/ngeo1698.
- Taguchi, M., 2015: Changes in frequency of major stratospheric sudden warmings with El Niño/Southern Oscillation and quasi-biennial oscillation. *J. Meteor. Soc. Japan*, **93**, 99-115, doi:10.2151/jmsj.2015-007.
- Wilks, D. S., 2011: *Statistical Methods in the Atmospheric Sciences*. Academic Press, 676 pp.