

タナカ ヒロシ
田中 博

略 歴

1981年11月 ミズリー大学コロンビア校主任研究員
1988年09月 アラスカ大学地球物理学研究所助教授
1991年09月 筑波大学地球科学系講師
2001年02月 筑波大学地球科学系助教授
2005年06月 筑波大学計算科学研究センター教授

異常気象をもたらす北極振動の解明とその予測 (第2報)

Analysis and Prediction of the Arctic Oscillation and Abnormal Weather (2nd Report)

In this study, eigenmodes and singular modes are analyzed for a dynamical system of the atmosphere linearized about a winter basic state in order to understand the dynamics of the Arctic Oscillation (AO). Since the fluctuations of the sea-level pressure are dynamically linked with the barotropic component of the atmosphere, the AO is investigated in the framework of a barotropic model.

As a result of the analysis, we find an eigenmode which is similar to the AO with a negative pole in the Arctic and positive poles in the Pacific and Atlantic sectors. Since the eigenmode is stationary and unstable, a linear drag is introduced to shift the eigenvalues so that the eigenmode becomes a singular with respect to steady forcing showing resonant behavior. It is found that the strong damping effect must be canceled by the positive feedback between the AO index and the baroclinic instability waves associated with the polar jet. In reference to the canceling effect of the linear drag and the baroclinic waves, we may conclude that the AO is a singular eigenmode of the global atmosphere excited resonantly by arbitrary external forcing.

1. はじめに

北極振動(Arctic Oscillation: AO)とは、ワシントン大学の Thompson and Wallace (1998) により1998年提唱された現象で、北緯約60度を挟んで南北に海面更正気圧場が逆相関を持つというものである。定義の詳細については、本研究の第1報で説明したが、ここでも簡単に紹介する(田中 2004 参照)。

北極振動指数が正の時には、北極域で低圧偏差、中緯度で高圧偏差が生じる（図1）。この時の気温偏差の分布を見ると、グリーンランド付近が低温域、シベリアからヨーロッパにかけてとカナダ北西部に高温域が見られる。日本はシベリアに中心を持つ大きな高温域の西部に含まれている。北極振動と同様な環状パターンは南半球でも解析され、力学的には類似したものと考えられる。南半球環状パターンは高緯度が負偏差の時に中緯度でリング状に正偏差がみられるのに対して、北極振動はユーラシアとアメリカ大陸上で正偏差のリングが途切れ、太平洋と大西洋の2カ所に正偏差の中心が形成されているという違いがある。北半球でも、北極振動のことを北半球環状パターンと呼ぶ場合もある。南半球では、中緯度の傾圧波動が形成するストームトラック（高低気圧の通り道）がほぼリング状に存在するため、リング状の環状パターンが形成されると考えられるが、北半球では海陸分布や大規模山岳の影響でそれが変形され、大西洋側に偏って生じる。そのため、北極振動（AO）は北大西洋振動（NAO）と同義である、と考える立場がある。

北大西洋振動（NAO）とは、アイスランド低気圧とアゾレス高気圧直下の2地点の気圧の逆相関で特徴づけられるローカルなテレコネクション、として定義される。ここで、テレコネクションとは、地球上の異なる2地点で、地上気圧が互いに有意に相関しあう現象であり、外部強制等により励起された準定常ロスビー波が、特定の方向に伝播することにより生じる現象である。それに対し、北極振動は北半球の海面更正気圧を、統計的な経験直交関数(EOF)に展開した場合の第一主成分(EOF-1)として定義され、北極海の作用中心とは逆符号の作用中心が太平洋と大西洋の2カ所に見られるのが特徴的である。つまり、海面更正気圧の変動の振幅が最も大きい卓越的なパターンとして、統計的に抽出されるものが北極振動である。太平洋と北極海でも気圧場が逆相関となるので、これを北太平洋振動と呼ぶと、北極振動は北太平洋振動と北大西洋振動の両方を

北極振動と日本の異常気象

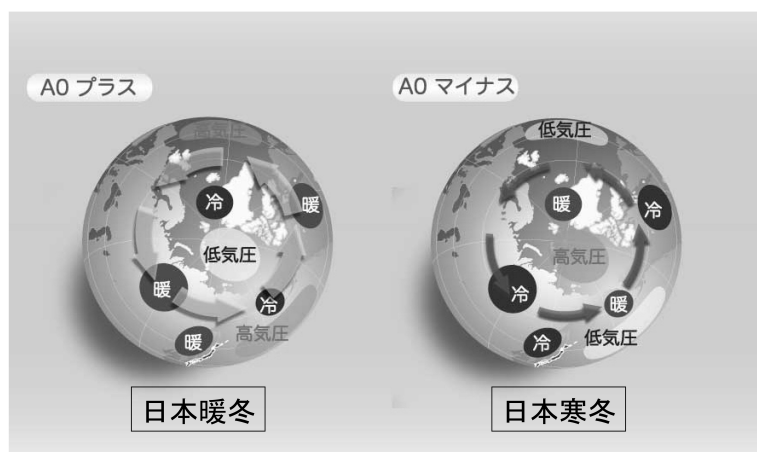


図1 北極振動と日本の異常気象

統合したグローバルなパターンである。しかし、北太平洋と北大西洋の海面更正気圧に有意な相関が見られないことから、北極振動をテレコネクションのひとつとすることはできない。そのため、未だに力学的に十分に理解されているわけではない。いずれにせよ、北極振動はその順圧的な構造から、上空の寒帯ジェットが地衡風関係式により強まったり弱まったりすることと力学的に同値である。ストームトラックにおける総観規模擾乱を介した波と平均流の相互作用によって、北極振動や南半球環状パターンの時間的変動を解釈する研究が多い (Tanaka and Terasaki 2005)。また、夏の北極振動についても、研究が進んでいる (Yokoyama and Tanaka 2005)。

古典的な東西指数が北緯45度付近の偏西風ジェットの強弱に注目し、亜熱帯ジェットと寒帯前線ジェットを合わせた偏西風ジェットの強弱を見ていたのに対し、北極振動指数は明らかに寒帯前線ジェットと極夜ジェットを合わせた偏西風ジェットの強弱に注目しているという点で、両者は異なっている。北極振動指数は寒帯前線ジェットの強弱の指標であり、亜熱帯ジェットの強弱とは逆相関を示す。また、偏西風ジェットの偏差の鉛直構造は対流圏下層、上層、成層圏でほぼ一貫しており、順圧的な構造をしめしていることが明らかである。

北極振動指数と世界の異常気象との関係を見ると (図1)、北極振動指数が正の時には、ヨーロッパでは偏西風の強化により温和で雨が多くなり、日本付近では温和な天候が続く。逆に北極振動指数が負の時には、図中の気圧場や気温場の正負の符号が反転し、極域で高压偏差、中緯度で低压偏差が生じ、ヨーロッパでは晴天が続き、寒気の流入で寒冷化すると同時に日本付近も寒冷化する傾向にある。日本という北半球の1地点の天候が、このように北半球規模の異常気象とリンクして発生するという点が、北極振動という現象の特徴である。

2. 近年の北極振動指数

北極振動指数の長期的傾向については、第1報で紹介した。近年の北極振動指数を季節平均値 (90日移動平均) で調べると (図2)、1988/1989年の気候シフトの際には、冬季において北極振動指数は過去最高の正の値となり、寒帯前線ジェットが極端に強まったことが伺える。このように大きな正の北極振動指数は1989, 1990, 1993, 1995, 2000, 2002, 2003年の冬季において発生し、これ等の年はいずれも日本に暖冬をもたらしている。特に、2002年の暖冬は桜の異常開花をもたらした。本来、寒冬では入学式頃に満開となるソメイヨシノが、この年には平年より3週間も早く卒業式の頃に満開になってしまった。この年の異常気象は、まさしく北極振動が正に大きくふれたことと関係している。地球温暖化が脚光を浴びるようになった1989年以降は、ほぼ毎年のように正の値に振れ、暖冬が恒常化したように思えたが、1993年に久しぶりに負となった後、1998, 2001, 2003, 2004, 2006年と寒冬が頻発するようになった。興味深いことに、トレンドとしては地球温暖化と並んで北極振動指数は正を示すことが報告されたが、10年スケールの変動においては1990年以降、北極振動指数は減少している。これが、北半球平均気温にも影響するかどうかは、今後の課題として注意深く見守る必要がある。

1988年以降の北極振動指数

Arctic Oscillation Index (90-day mean)

Barotropic Component of the Atmosphere

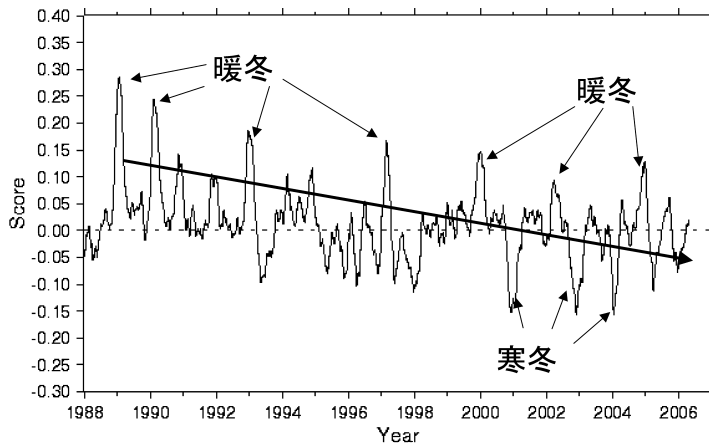


図2 近年の北極振動指数と日本の異常気象

3. 北極振動のメカニズム

北極振動は寒帯前線ジェットの強弱として捉えることができる。北半球では亜熱帯ジェットと寒帯前線ジェットが合流したり分流したりしてシングルジェットになったり、ダブルジェットになったりするが、その背景にあるものが北極振動である。さらに、半球規模の異常気象の原因となったり、地球温暖化の特徴的な分布を決めているのも北極振動である。このように北極振動は、大気大循環において重要な現象であるが、そのメカニズムはどのようになっているのか、最新の研究成果をまとめてみよう。ただし、これらの研究成果は現在検討中のところもあり、完全に確立した概念ではないことをお断りしておく。

はじめに、北極圏で低気圧偏差が生じるときに、それを取り囲む中緯度で高気圧偏差が生じる。そして、さらに細かく見ると、その高気圧偏差は太平洋と大西洋の2箇所に中心を持ち、ユーラシア大陸上とアメリカ大陸上でくびれた構造になっている。このような構造はどこから来るのであろうか。北大西洋には北大西洋振動というテレコネクションがあり、北太平洋には北太平洋振動というテレコネクションがある。北太平洋振動については、ロスビー波列が北太平洋からアラスカ、そしてアメリカ東海岸に伝播するPNAテレコネクションや、それがさらにアイスランド方面へ反射するという、アリューシャン・アイスランドシーソーというテレコネクションなどがメカニズムとして提唱されているが、ここでは北極圏と北太平洋の南北の逆相関を北太平洋振動と捉えることにする。ロスビー波列は純粋に南北には伝播しないので、ロスビー波列により北太平洋振動や北大西洋振動を理解するのはそもそも困難かもしれない。

北極振動指数が負から正に転じる際に、寒帯前線ジェットが加速されるが、その運動エネルギーはどこから来るのであろうか。運動エネルギー方程式にしたがって、その収支計算を行ってみると、軸対象な寒帯前線を加速するエネルギーは、総観規模擾乱からの波と平均流相互作用によってもたらされていることが分かる。詳細なエネルギー論によると、傾圧不安定により総観規模擾乱に供給された順圧エネルギーが、2次元流体力学の束縛により平均流へ逆カスケードして帯状順圧エネルギーを供給していることがわかる。

一方で、運動方程式を帯状平均して、西風運動量についての収支計算を行うと、帯状流の西風運動量も擾乱から供給されていることが確かめられる。ただし、その供給は停滞性プラネタリー波によりもたらされており、非定常な総観規模擾乱からもたらされるのではない、という一見矛盾する結果を得る。運動エネルギー収支と西風運動量収支とで、このように結果が異なるのはなぜであろうか。

4. 大気大循環の特異固有解としての北極振動

これらの疑問に答えるために、大気大循環を支配する基礎方程式系（プリミティブ方程式系）の数学的な固有振動を求めてみる。固有振動とは、例えばギターの弦の音色のように、与えられた弦の質量や張力の下では、固有の音程（振動数）の音が生じるように、与えられた力学系のなかで発生する固有の振動のことである。ギターの弦を指で引いてもピックで弾いても音程は同じ。つまり与えられる外力が何であっても、外力に応答してその力学系に固有の振動が起こる。これが固有振動である。

地球大気の運動形態の中には、地球の半径や重力、自転速度や密度成層などの与えられた条件の下で、固有の波長や位相速度を持った特徴的な構造の固有振動が存在するであろう。例えばロスビー波や重力波、傾圧不安定波などはみな大気の固有振動の一種である。基本場に微小ノイズが重なっているもとの仮定し、その大気変数を基礎方程式に代入する。方程式系は非線形なので、基本場に時間変化はなく、ノイズは基本場に比べて十分に小さいとの仮定をすれば、方程式系は線形化される。これにより、微小ノイズは、時間発展する大気の固有振動の重ね合わせとして理論的に解かれるのである。その無数にある固有振動の中から、最も急激に増幅する解を探すと、それが傾圧不安定波であることが判明する。解の固有値から位相速度と増幅率が分かり、解の構造からそのようなパターンが描ける。

北極振動もこのような大気大循環の固有解として存在する、との期待をこめて、観測された高度場の気候値に微小なノイズが重なっていると仮定して、その大気変数を基礎方程式系に代入し、基本場が定常でノイズは基本場に比べて十分小さいものと仮定し、方程式を線形化する。線形方程式の解は固有解の重ね合わせとして表現できるので、無数にある固有解の中から北極振動の特徴を備えたものを探すのである。傾圧不安定波の場合、ターゲットとなる固有解の性質は最も急

激に成長する波であるから、固有値から得られる増幅率が最大の波を探すことになる。北極振動の場合、構造は波として伝播しないので位相速度がゼロの固有解を探す。位相速度はゼロで構造が正負の符号をとるような波を定在波という。よって、定在波の中で増幅率が最大の固有解を探すことが基準となる。ただし、粘性や地表摩擦を無視した力学系において増幅率が正の定在波も、粘性や地表摩擦を考慮するとすべてが減衰解となる。傾圧不安定波のように、粘性や地表摩擦に打ち勝って増幅するような強い不安定解は定在波には存在しないことが分かる。そこで最も減衰率の小さい定在波を探すことが基準となる。

多くの固有解の中からこのようにして得られた、位相速度がゼロとなり、減衰率が最もゼロに近い固有解についての構造を図3に示した (Tanaka and Matsueda 2005a; Tanaka and Matsueda 2005b)。理論的に得られた固有解の構造は、北極圏で低圧偏差の時に中緯度で高圧偏差となり、しかもその高圧偏差の中心は太平洋と大西洋の二箇所に現れる。この構造を観測値から統計的に得られる北極振動パターンと比較すると、両者はほぼ完全に一致する。このことから、これが北極振動に対応する固有解であると判断できる。さらに、任意の定常的な外力に対し、この定在固有解がどのように応答するのかを調べるために、地表摩擦の強さを変えたときの応答曲線を調べてみると、地表摩擦がゼロの時、定在固有解には2つの不安定解が得られる。そして、地表摩擦を徐々に上げてゆくと、それらの増幅率は順にゼロとなり、さらに上げてゆくとすべてが減衰解となる。このときの応答曲線は、増幅率がゼロとなったときに共鳴し、任意の外力に定在固有解の振幅は無限大となる。この応答関数は、固有値の逆数で与えられるため、定常外力に対しては、固有値がゼロの解が共鳴を起こす。位相速度がゼロで増幅率もゼロとなる固有解は、その固有値がゼロという特殊な解なので、特異固有解と呼ばれる。この特異固有解の共鳴応答が

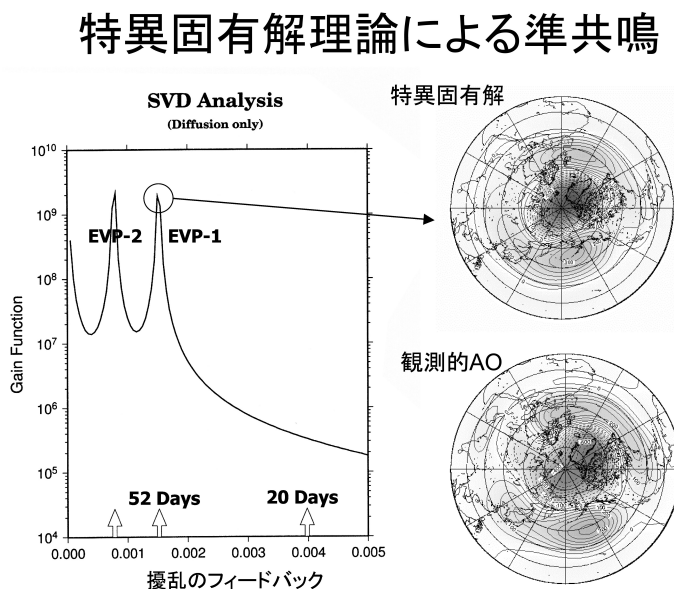


図3 特異固有解としての北極振動

北極振動のメカニズムとして重要と考えられる。ただし、問題なのは観測されるような地表摩擦を与えた場合には、固有解の増幅率は負となり減衰解になってしまうと同時に、外力に対する応答曲線も共鳴から外れてしまうため、このままでは北極振動は起こらない。この減衰解に対し、特定の外力が決定し、そのような外力が十分な強さで与えられた時に北極振動に似た定在波が励起されるという理論がある。これは中立モード理論と呼ばれ、特異固有解理論と対比されるが、どちらが正しいかは今後の研究を待たねばならない。特異固有解理論の問題は、どのようにすれば共鳴条件を満たすかである。この問題の答えはストームトラックの中で生起する温帯低気圧と帯上流との間の自律的な相互作用にあった。

5. 総観規模擾乱との北極振動の相互作用

温帯低気圧を発生させる傾圧不安定波は、熱を低緯度から高緯度に輸送する働きをするが、それに伴い西風運動量も低緯度から高緯度へ運ぶ。帯状平均東西風に微小ノイズを重ねて基礎方程式系を時間積分すると、傾圧不安定波が増幅してくる。基本場の偏西風ジェットは亜熱帯ジェットであり、北緯30度付近にジェット軸が存在する。亜熱帯ジェットの傾圧性を解消する目的で励起される。この傾圧不安定波は、その発見者の名前を取ってチャーネイモードと呼ばれる（図4右）。東西波数6の水平構造を見ると北緯45度付近に振幅の最大があり、それよりも南側のトラフ・リッジ軸は北東から南西に傾き、西風運動量を北に輸送している。一方、北緯45度よりも北側のトラフ・リッジ軸は北西から南東に傾いて、西風運動量を南に輸送するという特徴がある。したがって、波による南北からの西風運動量の収束により、亜熱帯ジェットは北にシフトするように相互作用が生じる。この傾圧不安定波の構造は普段の高層天気図でも見られ、あたかも扇風機のファンが回るように偏西風ジェットに流されて東進する。

北極振動と傾圧不安定波との関係を調べるために、北極振動指数が負の時と正の時の帯状平均東西風について、同様に傾圧不安定波の構造を求め、それらを比較してみると、重要な違いが見えてくる。北極振動指数が負で、寒帯前線ジェットが衰退し、亜熱帯ジェットがシングルジェットとして存在しているときの傾圧不安定波の構造は、チャーネイモードと同様の構造になる。ところが、北極振動指数が正で、寒帯前線ジェットが強化し、亜熱帯ジェットと寒帯前線ジェットがダブルジェットとして存在しているときの傾圧不安定波を調べると、総観規模スケールのチャーネイモードとは別に、東西波数1から4付近に新たな傾圧不安定波が発生していることがわかる。詳しく調べてみると、この新たな傾圧不安定波は、亜熱帯ジェットではなく、寒帯前線ジェットに伴う傾圧性を解消するために励起してくる傾圧不安定波であることが判明した。これをポーラモードと呼ぶことにする。

図4左は、東西波数3のポーラモードの高度場の構造を示す(Tanaka and Tokinaga 2002)。不安定波の振幅は北緯60度付近に最大となり、トラフ・リッジ軸は北東から南西に傾く構造をしている。したがって波による西風運動量は亜熱帯ジェットから寒帯前線ジェットに向けて輸送され、

亜熱帯ジェットを弱めると同時に、寒帯前線ジェットを強化するような相互作用を及ぼしている。不安定波は平均流に対して正のフィードバックをもたらしている。寒帯前線ジェットに伴う有効位置エネルギー（傾圧性）を消費して寒帯前線ジェットの運動エネルギーを増大させる働きをしているのである。このような波と平均流の間の正のフィードバックは、不安定波に限らず任意の擾乱に対しても働く。これはトラフ軸傾斜メカニズムと呼ばれる。これでフィードバックのループが完結し、北極振動のパターンに渦が重なると、その渦は北極振動パターンを一層強化する。傾圧不安定波であるポーラモード理論とトラフ軸傾斜メカニズムとを比較すると、前者では寒帯前線ジェットの強化により、西風運動量を北に運ぶようなトラフ軸が傾斜したポーラモードが励起されるのに対し、後者は任意の渦が背景場により傾斜するという点で異なる。ただし、後者では渦の初期の形状(等方性)が何によって決まるのかが明らかでない。

AO+ と AO-の時の傾圧不安定波

ポーラージェットの傾圧性

亜熱帯ジェットの傾圧性

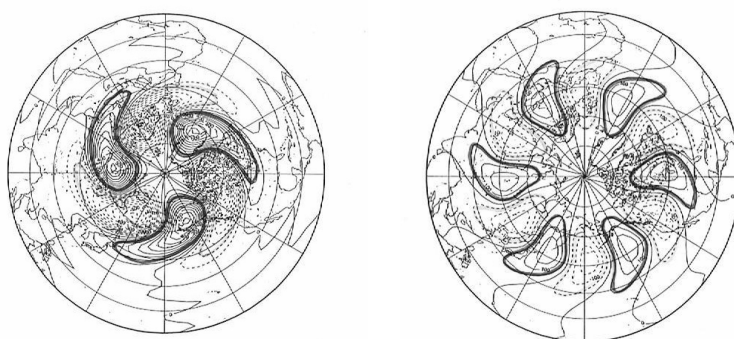


図4 AO指数が正負の時の傾圧不安定波

6. まとめと考察

北極振動指数の正負は日本の冬季の暖冬寒冬に直結し、長期予報において重要な大気現象であるが、そのメカニズムについては、良くわかっていなかった (Tanaka 2005)。北極振動指数は地球温暖化と同様なトレンドを持つことから、温暖化研究においても注目されてきたが、1990年以降は減少傾向にあり、温暖化との矛盾が生じ始めている。

本研究では、この北極振動が大気のひとつの固有振動であることを理論的に突き止めた。この固有振動は固有値がゼロとなる特殊なモードであることから、特異固有解と名づけられ。ただし、固有値をゼロとし、準共鳴を発生させるためには、地表摩擦による減衰効果を打ち消す、何らかの正のフィードバックが必要である。その答えは寒帯前線ジェットの傾圧性により増幅する

傾圧不安定波：ポーラーモードの発見にあった。寒帯前線ジェットとポーラモードの間の正のフィードバックは、北極振動が任意の定常外力に対する準共鳴で生じる、という特異固有解理論を完結させる最後の素材を与えてくれた。北極振動指数が正に振れたとき、北極振動パターンに非定常擾乱が重なると北極振動パターンが一層強化されるということは、北極振動の固有解の増幅率を正にシフトさせることに他ならない。これにより、地表摩擦による減衰率が相殺され、固有値はゼロ付近を行き来し、外力に対する応答曲線の共鳴点に到達する。北極振動の力学的解明というパズルの最後の一枚が、波と平均流の間の正のフィードバックにより埋められたわけである。

謝 辞

本研究を遂行するにあたり、(財) アサヒビール学術振興財団から研究助成金をいただきました。ここに記して感謝いたします。

文 献

田中博, 2004: 傾圧大気大循環モデルによる北極振動の数値実験およびその力学的考察。気象研究ノート、(共著 分担)、51pp.

Tanaka, H. L., 2005: Research on the Arctic Oscillation: Past, present, and future. Proc. GCCA-6, 12-13 December 2005, Tokyo Miraikan, Japan.

Tanaka, H. L. and M. Matsueda, 2005a: Arctic Oscillation analyzed as a singular eigenmode of the global atmosphere. J. Meteor. Soc. Japan, 83, 611-619.

Tanaka, H.L. and M. Matsueda, 2005b: Dynamical understanding of the Arctic Oscillation as a singular eigenmode of the global atmosphere. Proc. GCCA-6, 12-13 December 2005, Tokyo Miraikan, Japan.

Tanaka, H. L. and K. Terasaki, 2005: Energy spectrum and energy flow of the Arctic Oscillation in the phase speed domain. SOLA, 1, 65-68.

Tanaka, H.L. and H. Tokinaga, 2002: Baroclinic instability in high latitudes induced by polar vortex: A connection to the Arctic Oscillation. J. Atmos. Sci., 59, 69-82.

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.

Yokoyama, N. and Tanaka, H. L. 2005: Analysis of the structure and wave activity flux of the Arctic Oscillation in summer. Proc. GCCA-6, 12-13 December 2005, Tokyo Miraikan, Japan.