

— 2. 解 説 —

ストームトラック

北海道大学大学院理学研究院 稲津 将

今号の細氷においては偶然にも拙著の文章が3本掲載されております。本稿、気象講座の講演内容、そして平成20年度支部発表会の要旨であります。本文に入る前に、読者の皆様に編集の都合で前後するこれら3つの文章の関連について説明いたします。本稿は、あとにつづきます5節・気象講座の講演内容の中の5小節の部分の続編と位置づけることが出来ます。気象講座受講者の皆様で「細氷」を購読されている方は、本稿により日本周辺の気象と世界の気候の関係について更なる知識を得ることが出来ると思います。また、本稿は支部発表会の要旨の前座となるようにも構成しています。つまり、拙著記事の連続性は、今号の細氷の節番号で言えば、5、2、4の順であります。どのようにお読みいただいてもわかるようにしておりますが、予めお断りいたします。

1. 三寒四温

春先は三寒四温とって、1週間の間に三日間の寒い日と四日間の暖かい日を周期的に繰り返しながら、季節が移行していきます。韓国や中国にも同じ諺があり、厳密な意味は各国で少し異にしているかもしれませんが、三寒四温は春先の周期的な気象を表した東アジア共通の言葉と言えるでしょう。ただし、その周期性は、1年や1日のような天文学的にずれ難い周期とは違い、「二寒三温」にも「四寒五温」にもなりえるような幅があるものです。この気象状態を作り出すのは、温帯低気圧と移動性高気圧が西から東へ移動し、日本付近を次々に通過することによります。温帯低気圧は中国東北部や揚子江付近などで発生し、発達しながら日本海上あるいは太平洋上を通過する特徴があります。図1の天気図はその温帯低気圧の中でももっとも急速に発達する

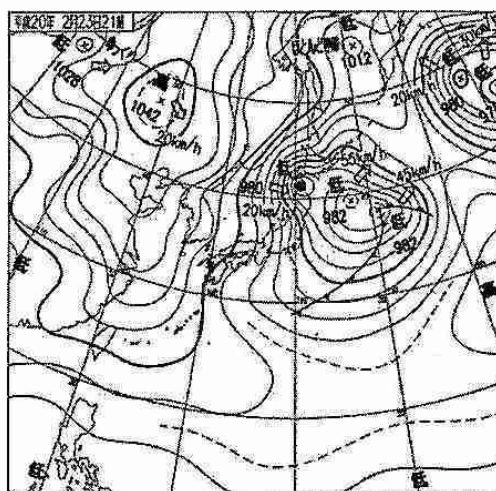


図1：2008年2月23日21時の地上天気図。
(気象庁資料より)

「爆弾低気圧」の例です。この例では北日本から三陸沖にかけて低気圧中心が複数あります。この低気圧群は図1の日時より1日以内に併合して更に強い低気圧に発達しました。温帯低気圧は弱いまま日本を通過するだけだと周期的な気象の繰り返しということになりますが、それが発達しながら強い勢力で通過すれば突風や豪雨豪雪などによる災害が発生する可能性が高くなります。

温帯低気圧の活動は、上記の例で示したような地域的な気象への影響にとどまるわけではありません。なんと温帯低気圧の「集団」としては世界規模の気候形成に大きな役割を果たしています。温帯低気圧の活動域をストームトラックと呼びます。ストームトラックという言葉は、英語の語義からして低気圧がよく好む経路を意味します。個々の低気圧の特性よりもその「集団」としての特性に焦点を当てた言葉と理解できます。つまり、個々の低気圧に注目しその微細構造や低気圧通過地域への影響を把握していくという微視的な立場とは異なり、複数の低気圧活動の平均像を描き出して、それが世界の気候に「集団」としてどのように作用するかを探求する巨視的な立場を強調しているのです。

本稿では、この巨視的な立場から2小節から5小節で理論的あるいは統計的にストームトラックの基本的な話題を解説します。一方で巨視的な立場とは独立に発展してきた微視的な立場との融合を図る試みについて、6小節の一部を借りて将来の研究を展望します。

2. 格差社会

日本は格差社会になってきたという風説があります。とはいえ、データが示すところでは世界の様々な国との比較において、日本はまだまだ貧富の差の小さい国なのかもしれません(総務省統計局ウェブページ)。いずれにしろ所得格差が拡大すると、社会が不安定になりやすいとされています。多くの歴史的な革命や騒乱は、一握りの特権階級が国家の富の大部分を持っているという状況を打開するものといってもよいでしょう。現代社会では、所得税の累進課税制や社会福祉政策などで所得格差是正が行われており、社会の安寧が保たれているのかもしれませんが。

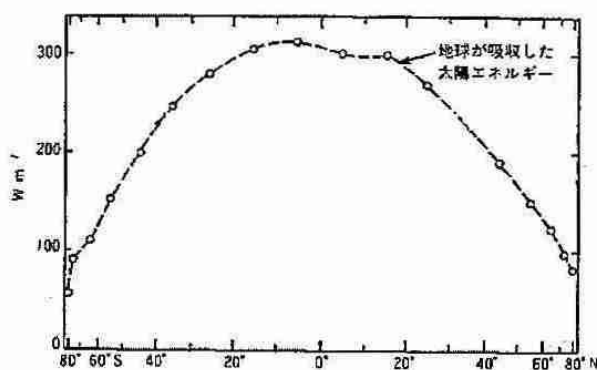


図2: 地球が平均的に受け取る太陽光エネルギーの緯度分布。中心に赤道があり、右が北半球、左が南半球です。一般気象学の図を改変、原典は von Harr and Suomi (1969)。

この格差の話をとらえて、気象の問題を考えてみましょう。図2は緯度別の地球が平均的に受け取る太陽光エネルギーです。地球はほぼ球体をしているため、太陽光線は赤道付近では殆んど頭上から照らされますが、極付近では殆んど真横から照らされます。この違いのため、一年を平均すると、赤道付近と極付近とは受け取る太陽光エネルギーに3倍以上の差が生じてしまうのです。もしも大気海洋の運動がなく、太陽光エネルギーだけで地表面の温度分布が決定するとすれば、地表気温は100 K以上の差が生じると計算されます。

幾つかの大気海洋の運動はこの赤道と極の間の太陽光エネルギー「格差」を解消する役割を担います。「格差」を解消するためには、熱エネルギーを赤道から極へ輸送しなければなりません。低緯度では主に海洋の運動と大気の南北鉛直運動(赤道付近では地表面が温まると軽くなって強い上昇気流を作り出します。この気流は高度10 km付近の対流圏界面付近で赤道から亜熱帯と流れ、ハドレー循環という赤道から極向きへの熱輸送が実現します)によって、中高緯度は主に温帯低気圧によって、赤道から極向きに熱が輸送されています。

3. 基礎理論

温帯低気圧の理論は傾圧不安定論と呼ばれます。もっとも簡単な理論では、温帯低気圧と移動性高気圧は区別せずに一連の気象擾乱として扱うこととしています。また、以降、断らない限り北半球の冬についての議論とします。

まず、中高緯度の風は地表付近でなければ地衡風によって近似できます。つまり、高気圧から低気圧に向かう力(気圧傾度力)と吹く風に対し右向きに働く地球の自転に起因する力(コリオリ力)の釣り合いによって、今考えている北半球であれば、高気圧のまわりを風は時計回りに吹き、低気圧のまわりを風は反時計回りに吹きます。また、低気圧の中心気圧が低いほど低気圧周辺の気圧傾度は大

¹ 厳密に言うと、気象擾乱には時間によらない定常的な成分の渦と、時間によって大きく変動する非定常成分の渦があります。温帯低気圧活動は後者の代表格と言えます。北半球の場合、定常成分の渦による熱輸送も無視することは出来ません。

きくなりますから、大きな風速をともなう低気圧となります。その気象学の知識をもとにして、温帯低気圧・移動性高気圧の理論解(Eady, 1949; 図3)を見ることにしましょう。この図は、東西高度断面図で、横軸の右方向は東方向であり、縦軸は0の値が地表面²、1の値が対流圏界面を表すものと考えて差し支えないでしょう。0.5とあるところは高度5 km くらいの対流圏中層を意味します。図3(a)で地衡風について復習します。この図は東西高度断面図ですから、高低気圧のまわりの地衡風の議論で使う東西南北の水平面とは直交しています。この図に無理やり水平面を想像するには、紙の奥に北が、手前に南があるとします。Hと書かれた高気圧のまわりを時計回りの風が吹くので、高気圧の前方(東)では紙の奥(北)から手前(南)に北風が吹きます。同様に高気圧の後方(西)では南風が、また、Lと書かれた低気圧の前方(東)では南風、後方(西)では北風となります。

次に、気柱のふくらみと気温の関係を考えて見ましょう。ある空気を暖めると膨張します。逆に空気は冷やすと収縮します。上空に高気圧があって地表に低気圧があると気柱は膨らんでおり、上空に低気圧があって地表に高気圧があると気柱は縮んでいます。つまり、前者は暖

かい領域であり、後者は寒い領域です。このことを図3の(a)と(c)を使って復習しましょう。図3(a)の対流圏中層における高気圧の前方(低気圧の後方)では、上空に低気圧があって、地表面に高気圧があります。この領域では気柱が縮んでいます。そして、その領域は図3(c)の気温が相対的に冷たい領域とピッタリ一致します。同様に低気圧の前方では気柱が膨らんでいる領域となり、まさに気温が相対的に暖かい領域となっています。実は温帯低気圧の存在および発達にはこのような気温構造を持っていることが本質的です。これは上空にいくほど低気圧(高気圧)の中心が西へずれた気圧構造が本質的と言い換えることも出来ます。

これまでの図3の理論解に関する記述を総合すると、気温が冷たいところには北風が、気温が暖かいところには南風が吹くこととなります。つまり、温帯低気圧と移動性高気圧の理論解は、冷たい空気を北から南へ運び、暖かい空気を南から北へ運ぶこととなります。これは赤道側から余分な熱エネルギーを極側へ輸送することに他なりません。別の言い方をすると、温帯低気圧は赤道と極の間の南北気温傾度を弱めるように作用する、と言えます。そうすると温帯低気圧活動なしの場合と比べて、より緩やかで穏やかな状況になるといえるでしょう。エネルギー的に考えても、空気が持つ(有効)位置エネルギーは温帯低気圧活動によって小さくなっています。ここでエネルギー保存の原理を考えると、減少した位置エネルギーのやり場を考えねばなりません。それが温帯低気圧自身の運動エネル

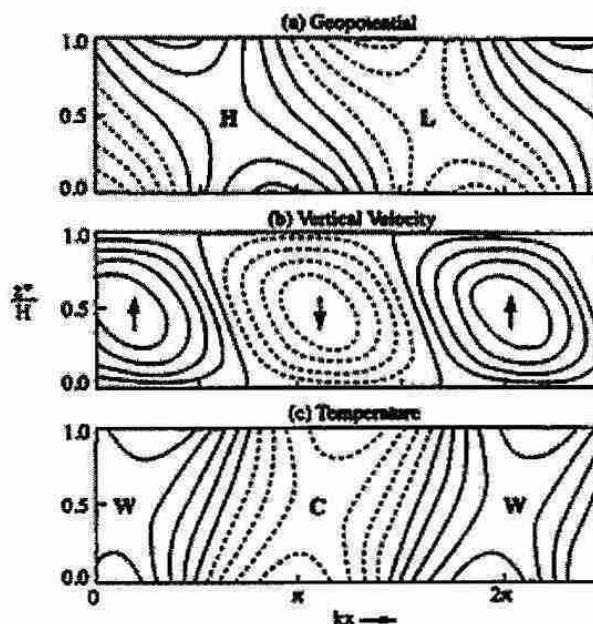


図3: 温帯低気圧の基礎理論である傾圧不安定波動論で、上空ほど西風が強い状況で温帯低気圧・移動性高気圧がどのような構造になるのかを計算した理論解(これはEady (1949)に基づく解)。図の横軸は東西を表し、縦軸は高度を表します。(a) ジオポテンシャル高度のずれ、近似的には気圧の高低のうち、高度による部分を除いたものと見做してよいでしょう。(b) 鉛直速度分布。矢印は上昇風と下降風を示します。(c) 気温分布、各高度の平均気温を除いたもの。Holton (2004)より転載。

² 理論上は地表面の影響が少ないところと定め、現実大気では高度1 km~2 kmあたりをさします。

ギーへと転換されます。運動エネルギーは風速の2乗に比例しますから、このことは気圧勾配が大きくなっていく、つまり温帯低気圧の中心気圧が下がっていく(移動性高気圧の中心気圧が上がっていく)ことを意味します。従って、赤道と極の空気が対峙し南北気温傾度が非常に大きい中緯度帯で温帯低気圧はよく発達するのです。

図3(b)には上昇流と下降流の分布を示しました。図3(a)を見ると、地表の低気圧は、対流圏中層に比べ東にあります。地表付近の低気圧では摩擦力の影響で風の収束が起こりますから、その上空に上昇流が存在することになります。逆に、地表付近の高気圧では風の発散がありますからその上空には下降流があります。図3(a)と比べると、低気圧の前面では上昇流で高温になり、後面では下降流で低温になっていることがわかります。従って、ここで示した理論解は、低気圧の接近中の暖気の流入にともなう悪天と、低気圧通過後の冷気の流入と晴天という私たちの経験とも合致するのです。

4. 統計解析

前節の理論的な考察により、理論的に南北気温傾度が大きい領域が温帯低気圧の発達域であることが考えられます。では、実際の観測では、温帯低気圧は「集団」としてどのような活動域をもつのでしょうか？図4の影付きはヨーロッパ中長期予報センターの1979年から2001年までの再解析データを使って計算した、1週間程度の周期を持つ温帯低気圧に代表されるような擾乱の運動エネルギーです。太平洋と大西洋のそれぞれ中央部に温帯低気圧活動が活発な領域(影の濃い領域)が見られます。これらはそれぞれ太平洋ストームトラックおよび大西洋ストームトラックと呼ばれ、12月から2月の気候値でみると太平洋ストームトラックより大西洋ストームトラックの方がその活動度は大きいことがわかります。

ストームトラック域は南北気温傾度が大きいところでよく発達するという理論を述べました。温

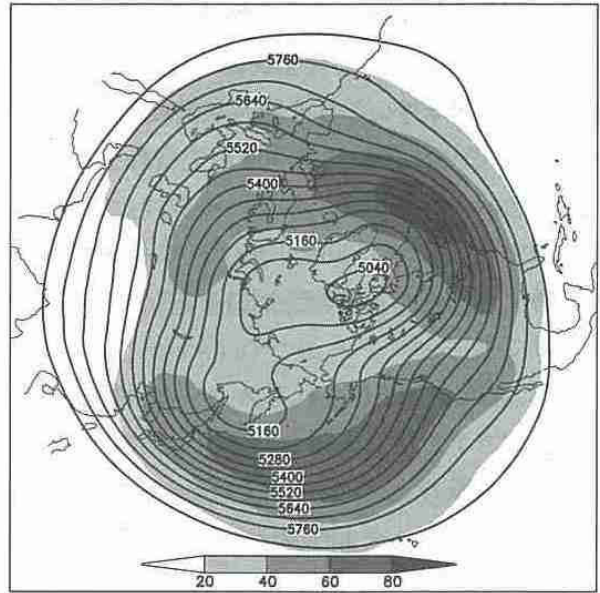


図4: ヨーロッパ中長期予報センター再解析データERA40に基づいて計算した1979年から2001年までの500 hPa面における12月から2月の気候平均値。ジオポテンシャル高度を等値線(m)で、ストームトラック活動にともなう運動エネルギー(m^2/s^2)を影付きで表しました。等値線は60mごとに附しました。影付きは図下の凡例のように濃いほど大きな値を表しています。

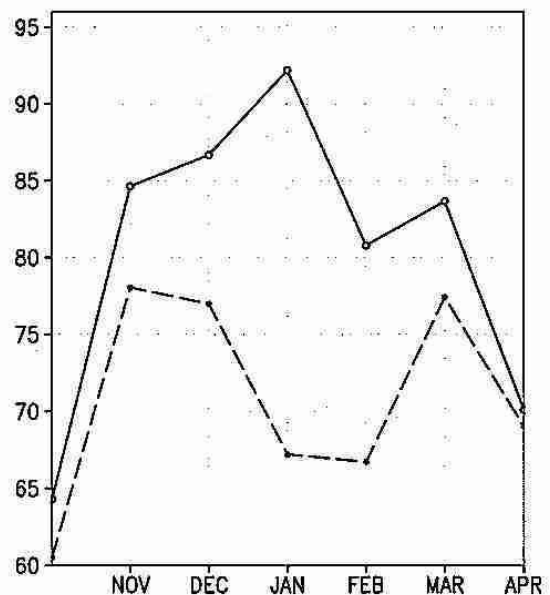


図5: ERA40に基づいて計算した1979年から2001年までの500 hPa面におけるストームトラック活動にともなう運動エネルギー(m^2/s^2)の気候値の季節変化。10月から4月までの月平均値を折れ線グラフで表しました。実線は大西洋ストームトラックの中心域(西経70度から50度、北緯40度から45度)の領域平均値であり、点線は太平洋ストームトラックの中心域(西経175度から155度、北緯37度から47度)の領域平均値です。横軸のNOV、DEC、JAN、FEB、MAR、及びAPRは11月、12月、1月、2月、3月、及び4月を表しています。

度風の関係式によれば南北気温傾度はそのまま上空の西風の強さと等価ですから、南北気温傾度の大きい領域はジオポテンシャル高度の等高線が緯度方向に込み入っている西風の強い領域から読み取ることが出来ます。これより日本付近と北米の東部は非常に西風が強いことがわかります(図4の等値線)。すると、理論によって求められる温帯低気圧の最大成長域より、実際のストームトラック域のピークが少し東側にずれているのは一体何故でしょう?この答えは、下流発達理論により説明されています(例えば、Chang, 1993)。これは、温帯低気圧はその波動的性質のためエネルギーを下流側へ伝播する性質があり、そのせいでストームトラックの中心は最大発達域より下流側にずれるという考え方です。

また、理論から予想されるストーム活動度の強さは上空の西風(または南北気温傾度)の強さに比例するはずですが。西風の強さは日本上空の方が北米東部より強いことがわかっています(拙著の気象講座要旨を参照のこと)。それにもかかわらず、図4ではどうして大西洋ストームトラックの方が太平洋ストームトラックより強いのでしょうか?この問題の解決に大きく貢献したのは中村尚准教授(東京大学)のグループであります。彼らは、この問題の本質は渦発達域と地表面付近の西風強風域である極前線ジェット的位置関係にあると説明しました(Nakamura et al., 2005)。大西洋ストームトラックは極前線ジェットと一致しているため、温帯低気圧活動は大西洋において活発になります。それに対し、太平洋ストームトラックは、とくに真冬には、極前線ジェットの南に位置してしまうため、温帯低気圧の発達が抑えられるのです。この現象を真冬の振幅極小(Nakamura, 1992)と呼びます。図5は、図4で用いたものと同じデータを使って、太平洋と大西洋のストームトラック活動度の寒候期における季節変化を計算したものです。確かに大西洋ストームトラックは上空の西風(または南北気温傾度)がもっとも大きくなる真冬にストームの活動度を最大にしていますが、太平洋ストームトラックは上空の西風(または南北気温傾度)がもっとも大きくなる真冬にストームの活動度は弱くなっています。季節で言えば晩秋と早春において、太平洋ストームトラックはその活動度の極大を迎えるわけです。この結果は、冒頭で紹介した諺、三寒四温は春先であって、真冬ではないという、われわれの気象経験からも実感できるでしょう。

5. 西高東低

では、日本付近では真冬にどのような天気図になっているのでしょうか?温帯低気圧の通過よりは比較的定常性の高い、西高東低の冬型の気圧配置が幾日も続くというものです。しかし、われわれは生活実感から厳冬の年と暖冬の年があることを知っています。では、このような年ごとの西高東低の強弱と、日本付近のストームトラックの活動度との間にはどのような関係があるのでしょうか?この問題も中村尚准教授のグループによって説明されています。図6は彼らの計算

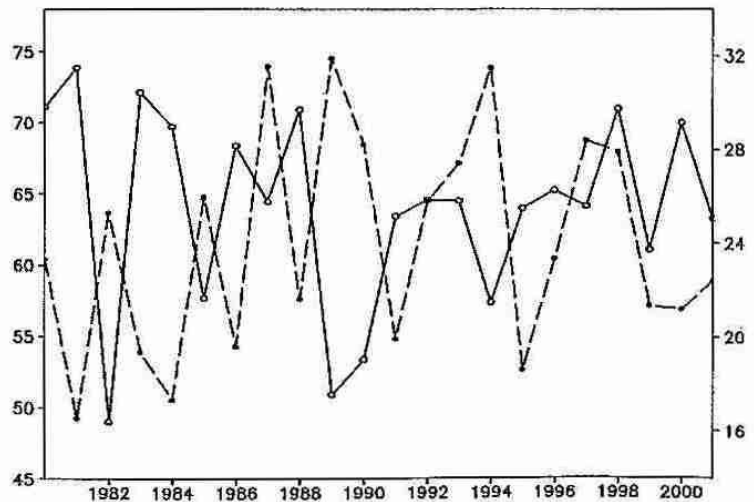


図6: ERA40に基づいて計算した1979/80年冬から2000/01年冬までの(実線)シベリア高気圧(東経80度から110度、北緯40度から55度)とアリューシャン低気圧(東経160度から西経160度、北緯40度から55度)の海面気圧差(軸ラベルは右、単位はhPa)と(点線)500hPa面における太平洋ストームトラック西部(東経140度から180度、北緯35度から50度の領域平均)の活動度(軸ラベルは左、単位は m^2/s^2)の経年変化。

(Nakamura et al., 2002)を参考にして書いた西高東低と日本付近のストームトラック活動度が年々でどのように変化しているかを示したものです。西高東低はシベリア高気圧とアリューシャン低気圧の差ですから、それぞれの領域の海面気圧の差をここでは西高東低の指標としています。また、太平洋ストームトラックの中心は北太平洋の中央部にありましたが、ここでは特に日本付近の気象に注目するため、太平洋ストームトラックの西側の活動度を指標としています。図6から明らかなように、西高東低の冬型の気圧配置の強さと日本付近のストームトラック活動度との間には明らかな負の相関関係が見られます。つまり、西高東低の気圧配置が強いときは温帯低気圧活動が抑制的であり、西高東低の気圧配置が弱いときは温帯低気圧活動が活発になる、というのです。

6. 未来予想

通例の論文には結論という項目が締めめの段には来るのですが、本稿では2つの意味での未来予想を提示することに代えます。1つはストームトラック活動の未来予想、もう1つはストームトラック研究の未来予想です。

太平洋ストームトラック活動の未来予想は、本稿で述べた4節と5節を参考にすると推測することが出来ます。まず、世界の多くの研究機関の気候モデル(こちらにも拙著の気象講座要旨を参照)に共通した結果として、向こう100年程度、世界の気候は社会情勢にもある程度は因るもの的大なり小なり地球温暖化が進行するとされています。地球が温暖化した場合、シベリアのように厳寒な地域は、他の地域に比べてより昇温量が大きくなります。これは、雪の白い地表面状態では太陽光線を反射し低い気温を保ちやすいのに対し、雪が融けて黒い地面が露出すると太陽光線を吸収するようになり気温をより上昇させるというメカニズムによります。ちょうど春先に農家が雪解けを促進するために黒い融雪剤を畑にまくことがこの原理をうまく生かした例と言えるでしょう。さて、現在気候では非常に冷たい大陸と比較的暖かな海洋との間で大きな温度のコントラストを作り出し、それが図4の等高線に見られるような大きく波打つ定常的な気圧配置を作り出す1つの要因になっています。地球温暖化気候では、このような海陸間の気温コントラストは弱くなることが予想されますから、当然、定常的な気圧配置の波打ち方も弱くなり、西高東低の気圧配置も弱くなることでしょう。そうすると、4節や5節での季節変動や経年変動の議論より、日本付近では、真冬の振幅極小の現象が起こりにくくなって、ストームトラック活動が強化されることが予想されます。Inatsu and Kimoto (2005)では、東京大学が中心となって行った人・自然・地球共生プロジェクトの計算結果を使って、日本付近ではストームトラックが強化される可能性があることを示しました。しかし、地球温暖化に対してストームトラック活動がどのように変化するかについては、気候モデル間でのばらつきも大きく、目下研究途上の問題であると考えてよいでしょう。

ストームトラック研究は地球温暖化問題以外にもさまざまな方向性が考えられています。著者がもっとも注目するものは中緯度海洋との関係です。熱帯では大気海洋が相互作用することで大きな気候変動が起こっています。その中でもエルニーニョ現象は有名で、熱帯のみならず中高緯度の気候にも影響を与える現象です。それとは対照的に、中緯度海洋は大気の変動をただ受動的に受けるだけであるという議論が一般的でした。しかし、近年、中緯度海洋が中緯度大気に及ぼす可能性が指摘され始めています(例えばXie et al., 2002; Inatsu et al., 2003; Minobe, 2008)。ただ、中緯度海洋が大気に影響を及ぼす時間スケールや空間スケールは限られていて、非常に変動が多くしかもその変動が不規則である中緯度大気から、中緯度海洋の影響をシグナルとして取り出すのは確かに難しいこと

です。そこで著者らは、中緯度大気海洋相互作用の1つの重要なポイントではないか有望視される亜総観規模(本稿で前節まで議論していたのは総観規模と呼ばれ、通常天気図に大きく現れる温帯低気圧に代表される擾乱を指しますが、亜総観規模とはそれより一回り小さい擾乱で100kmくらいの大きさを言います)を解像しながらも、その全球へ及ぼす影響を計算するコストが抑えられるシステムを開発しつつあり、一部研究利用を始めています(拙著記事の支部発表会要旨を参照; Inatsu and Kimoto, 2008)。このような新技術や、近年急速に充実してきた衛星観測データや各研究機関の再解析データを合わせて、微視的な視点と巨視的な視点を融合した、そして大気だけではなく海洋を含めて議論する、「マルチスケール・マルチアスペクト相互作用」の研究が展開されていくのではないかと、ということが、著者が思い描く研究の未来予想です。

参考文献

- Chang, E. K. M. 1993: Downstream development of baroclinic waves as inferred from regression analysis. *J. Atmos. Sci.*, 50, 2038-2053.
- Eady, E. T., 1949: Long waves and cyclone waves. *Tellus*, 1, 33-52.
- Inatsu, M., H. Mukougawa, S.-P. Xie, 2003: Atmospheric response to zonal variations in mid-latitude SST: Transient and stationary eddies and their feedback. *J. Climate*, 16, 3314-3329.
- Inatsu, M., M. Kimoto, 2005: Two types of interannual variability of the mid-winter storm-tracks and their relationship to global warming. *SOLA.*, 1, 61-64.
- Inatsu, M., M. Kimoto, 2008: A scale interaction study on East Asian cyclogenesis using a general circulation model with an interactively nested regional model. *Mon. Wea. Rev.*, to be submitted.
- Minobe, S., A. Kuwano-Yoshida, N. Komori, S.-P. Xie, and R. J. Small, 2008: Influence of the Gulf Stream on the troposphere. *Nature*, 452, 206-209.
- Nakamura, H., 1992: Midwinter suppression of baroclinic wave activity in the Pacific, *J. Atmos. Sci.*, 49, 1629-1641.
- Nakamura, H., T. Izumi, and T. Sampe, 2002: Interannual and decadal modulations recently observed in the Pacific storm track activity and East Asian winter monsoon. *J. Climate*, 15, 1855-1874.
- Nakamura, H., T. Sampe, Y. Tanimoto, and A. Shimpo, 2004: Observed associations among storm tracks, jet streams and midlatitude oceanic fronts, *Earth's Climate: The Ocean-Atmosphere Interaction*, C. Wang, S.-P. Xie, J. A. Carton, Eds., Geophys. Monogr., 147, 329-346.
- Xie, S.-P., J. Hafner, Y. Tanimoto, W.T. Liu, H. Tokinaga and H. Xu, 2002: Bathymetric effect on the winter sea surface temperature and climate of the Yellow and East China Seas. *Geophys. Res. Lett.*, 29, 2228.