

1. ジェット＝ストリームの謎を

気候モデルで解く

北海道大学大学院理学研究院 稲津 將

1. ジェット＝ストリーム

真っ赤に染まる夕焼け空を見ながら「明日は晴れか」とつぶやいてみる。実にありふれた観天望氣の言葉には、天気情報が西から東へと伝わる日本の気象現象の特性を強く含意する。そのように天気が西から伝わる所以は、TOKYO FM の有名なラジオ番組でお馴染み「はるか雲海の上を音もなく流れ去る気流」こと、**ジェット気流**(英語ではジェット＝ストリーム)が猛烈な強さで西から東に流れている為である。このジェット気流は天気のみならず、空飛ぶ航空機も、そして中国内陸部の黄砂も、西から東へと流してしまう。

対流圏^{たいりゅうけん}とは地表から高度 10km 程までの領域のことである。約 8 割の空気はこの対流圏の中を巡る(勿論、それより上の**成層圏**^{せいそうけん}との間で空気のやりとりは存在する)。さて、その対流圏の中で最も風速の強い場所はどこであろうか？アメリカ東海岸にも強いジェット気流が存在する。南半球に目を転ずれば、インド洋上にも強いジェット気流が存在し、それは船乗りをして「吠える 40 度」と言わしめる荒天をもたらす。しかし、それらを遥かに凌ぎ圧倒的な風速を誇るのは、他ならぬ冬場の日本上空のジェット気流なのである。

図 1 は 1 月における東京付近の上空の平均風速の高さ方向の分布を示している。縦軸に高さを取り、横軸に風速を秒速メートル(m/s)で示し、観測された平均的な風速データを線グラフにした。これを見ると、地表付近は高々 10m/s 程度であるが、高度を増すにつれて風速を増し、海拔高度 10km に至れば 70m/s、時速にして新幹線並みの 250km/h 程度もの猛烈な風が吹いていることが分かる。この風は殆んど西から東に吹く風(このように西から吹く風を**西風**という)で、その風向きは高度が変わっても一定である。この西風のジェット気流をはじめて発見したのは日本の高層気象台である。1924 年の高層気象台彙報に「是ヨ

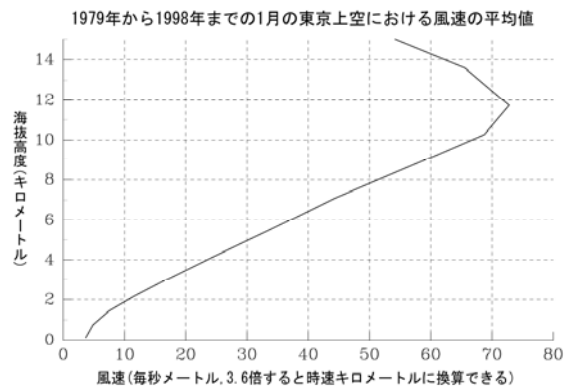


図 1 : 1 月の東京上空の風速の高さ方向の分布(単位は秒速メートル)。ヨーロッパ中長期予報センターの再解析データのうち、1979 年から 1998 年までの 20 年間の東経 140 度北緯 35 度のデータをもとに作成した。

り高キニ上ルニ從ヒ大氣一般循環ノ氣流ニ合シ海拔 1.5^{キロメートル} 以上ニアリテハ殆ンド一定不變ノ西風ヲ觀測セリ(中略) 海拔 7^{キロメートル} 以上ニ至レバ高サ一^{キロメートル} 付キ風速約 15^{メートル} / 秒ノ割合ヲ以テ之ヲ劇増スルヲ見ル而シテ海拔 9^{キロメートル} 以上ニアリテハ實ニ 72^{メートル} / 秒ノ大速度ヲ顯ハスニ至レリ」とジェット気流の観測記録が残る。

図 2 は図 1 と同じデータを使って高度約 10km 付近の風速の分布を等値線(同じ風速の値を持つ地点を結んだ線)で書いたものである。この図を見ると確かに日本の上空だけ 70m/s を超える特別に強い風が吹いていることがわかる。アメリカ東海岸の風速の値もその周りの地域に比べると大きい、その値は最大でも 45m/s 程度である。この高度約 10km 付近の風速は、高度約 5km 付近の気温と大きく関係している。図 2 の点線とまだら模様の陰影で示したのはその気温である。日本の北での高度約 5km の気温は -40℃非常に低く、それと対照的に日本の南での高度約 5km の気温はその周りより幾分高い。高度約 5km で

小笠原諸島からサハリンまで約 3000km 北へ移動すると気温は約 30 度低下することになる。ほぼ同じ緯度間の移動でも北米大陸西海岸のメキシコシティからバンクーバーまでなら気温の低下は 10 度強に過ぎない。実は物理の法則を使うと、気温の南北の差はその上空の西風の強さに概ね比例することが示される。このような風と気温の関係を **温度風の関係** という。

高度約5km付近の気温(摂氏)と高度約10km付近の風速(秒速メートル)

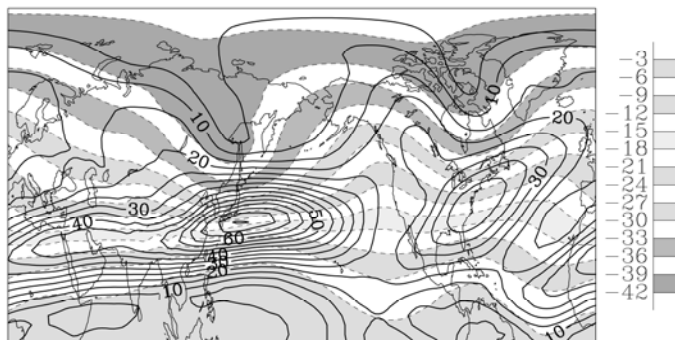


図 2: 1月の平均的な上空約 5km の気温と上空約 10km の風速の分布。気温は右に示すような陰影と点線で示している(単位は摂氏)。また、同じ風速値を示すところを線で結んだ。その等値線の間隔は 5m/s である。図 1 同様、ヨーロッパ中長期予報センターの再解析データのうち、1979 年から 1998 年までの 20 年間のデータをもとに作成した。

では、なぜ日本上空にだけこのような強い西風が吹くのであろうか? もしも地球が山も陸もなくツルツルの海面で覆われていたとしよう。然らば、日本上空(といってもこの空想では日本列島そのものもないのだが)だけに特別に強い西風が吹くはずもない。日本上空だけに西風が強いのは、山や陸や海が不均一に東西に分布しているからである。では、日本上空のジェット気流が強いのは、山のせい、海のせい? もしも山を削った状況が実現できたら、山のせい、海のせいは分かる。しかし、金銭的にも、人道的にも、そしておそらくエネルギー的にも、世界のすべての山を削ってみせる事は、如何なる土建国家も如何なる大帝国もやってみることは出来ないだろう。そこで**気候モデル**の出番となる。次節に述べる方法で仮想的な大気海洋をコンピュータ上に作り出すことに成功した。その仮想大気海洋を作り出すシステムを気候モデルという。気候モデルを使えば、山を排除するなどの非現実的な状況をコンピュータの中に作り出すことが可能になる。この気候モデルは非常に使い勝手がよく、天気予報や**地球温暖化計算**でも活躍している。

2. 気候モデル

まず、気候モデルとは何かを説明しよう。気候に関係する風速や気温、気圧、或いは湿度といったものは、それら同士の関係づける物理法則が分かっている。例えば、気温は放射、対流、伝導の過程によって決まることは分かっている。細かく言えば、これから気温が上がるか下がるかは、上下左右から暖気や冷気が流れて込んでくる具合、太陽光の当たり具合、黙っていれば冷えてしまう地球や空気の事情、そして水蒸気が水になるとき熱を出すことの5者によって決定される。「地球や空気は黙っていれば冷えていく」には説明が必要だろうか。如何なる物体も温度があれば、それに見合う光(電磁波)を発する。「私の体温は36度だが、後光でもさしていただろうか」と言う勿論そういうわけではなく、地球の気温や人の体温程度ならば目に見えない光である赤外線が出る。そして、物体は赤外線を出した分だけ冷えねばならない。晴れた冬の日、朝方に非常に冷え込むのは、この赤外線が地球から発せられることによる。また、石焼いもに手を近づけると暖かく感じるのは、石焼いもが発する赤外線が手に当たるからである(ちなみに石焼いも自体は冷えてくる)。ここで敢えて大学専門課程の知識を要する数式で表現するなら

$$\frac{\partial T}{\partial t} = -\mathbf{u} \cdot \nabla T - \Gamma_w + \frac{Q}{c_p} \quad (1)$$

となる。ともかく、この定式化のおかげで、気温の上昇下降に関する問題は式(1)という数学の問題を解けばよいことになった。

しかし、残念なことに式(1)を含めて気象の方程式は一般に数学的に解くことが出来ない。従って、**コンピュータを使って数値的に解く**こととなる。コンピュータが扱うことが出来る計算は、足し算、引き算、掛け算、割り算、そして条件処理(この条件を満たせばこう計算し、満たさなければああ計算する、という類の処理)だけである。式(1)に含まれる $\frac{\partial T}{\partial t}$ は気温 T の時間的な変化を表す。式(1)の右辺(等号より右の部分)の各項は現在の値が代入される。そうすると未来の気温が推定できるのだが、 $\frac{\partial T}{\partial t}$ は高校でやる微分の変種で無限に小さい時間だけ先の未来のことしか分からない。従って、無限に計算を積み重ねないと20分先の未来の気温を推定することが出来ない。コンピュータは無限に続く計算を処理することが出来ないので、例えば

$$\frac{\partial T}{\partial t} \approx \frac{20分後の気温 - 現在の気温}{20分} \quad (2)$$

と言う風に引き算と割り算に近似することになる。

さらに、コンピュータで計算する為には、もう1つ近似を施さなければならない。式(1)で、 T と書いたのは気温であるが、数学上これを地球上すべての場所で定義している。数学上すべての場所と言うと、1ミリメートルでも離れていれば別の場所として扱うことを意味する。しかし、気候モデル計算では1ミリメートルの距離の差はおろか、大通西3丁目と

大通西 4 丁目の区別をつける必要もない。仮にそれをしたくても、計算量が非現実的なまでに膨大になる。そこで計算可能な程度に地球を東西南北に、そしてついでに高さ方向にも分割する。図 3 に示すように地球を分割する様は、まるで札幌が碁盤の目のように何条何丁目と区画されるが如しである。そして、気候モデルではその升目の中の平均的な状態を計算することにする。現在、通常の研究では、東西南北に 250km 間隔、また高さ方向には 1km 程度の間隔で計算を行う。気候モデル計算では、あの雲とこの雲をきちんと計算したいという場合に数 km 間隔で計算したいという欲求もあるし、そういった科学的なことは別にしても札幌と岩見沢の違いくらいを知っておきたいという欲求もあろう。しかし、現実には北海道と本州の違いもおぼつかない程度でしか計算できない(が、第 4 節で紹介するように、近年の気候モデル計算では「本気」を出せばもう少しマシになる)。

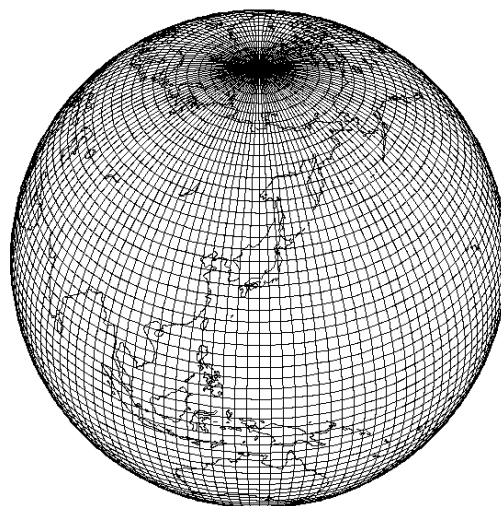


図 3：気候モデルにおける計算間隔のイメージ図。

このように東西南北 250km 間隔で計算することは、計算量を現実的な程度に低減する為に必要な措置であるが、当然不都合もある。気候にとって重要な雲の情報が多く欠落してしまう。250km 四方があればその中に多種多様な雲が存在し、気候に大なり小なり影響を及ぼす。その雲の効果を 250km 間隔の情報から物理法則や合理的な仮定に基づきながらも半ば無理矢理推定(パラメタリゼーションという)することになる。その推定方法には幾つかの流儀があるため、気候モデル計算には不確定性が生じてしまう。このように様々な近似や推定、そしてここでは説明しない数値計算上の工夫を重ねた結果、未来の気温を、現在の気温、風速、風向などから、東西南北 250km 間隔ではあるが、コンピュータを使って計算できる方策が立った。

最後にこの計算をコンピュータにやらしてもらわなければならない。その為、コンピュータに計算の方法を教える必要がある。それがコンピュータ=プログラムである。プログラムを書く仕事は地味ながら気候モデル開発になくてはならない。そして実際の気候モデル計算はただならぬ計算である為、各大学や研究機関にある大型計算機を利用する。例えば、北海道大学情報基盤センターの大型計算機は 1 秒間に「通常」約 1500 億回(最大はその 40 倍)の「足し算」などが可能である。

まとめると、人間が計算式を立て、人間がプログラムを通じてその計算式をコンピュータに教え、そして大型計算機がその計算を実行する。これが気候モデル計算の一連の流れとなる。

3. なぜ日本上空のジェット気流は強いのか？

なぜ日本上空のジェット気流は強いのか？第 2 節で気候モデルを用意した。仮想大気海洋の下、東西南北 250km 間隔での計算が可能となった。つまり、現在の状態の再現計算は勿論のこと、山岳を削った気候モデル計算も出来るのである。

図 4 上は、規準となる通常の気候モデル計算、下は仮想的に山岳を除いてすべての陸地を海拔 0m の平野に差し替えた計算の結果である。図中の×印は東京付近(東経 140 度北緯 35 度)に附した。上の規準となる計算では、実際の観測データ(図 2)のように日本上空のジェット気流は 70m/s 超と非常に強い。また、アメリカ東海岸にも強いジェット気流が計算されている。それに対して、山岳を除いた仮想計算だと日本付近のジェット気流は 50m/s 程度の西風と、風速で 20m/s も低下した。このような気候モデル計算のお

かげで、日本上空のジェット気流の強い西風は、山岳の存在が重要である、ということが明らかになった。なお、図 4 下でも日本上空は他に比べて幾分強い西風であるが、それは海洋と大陸の間の気温の差や赤道付近の海洋の温度差(インドネシア近海とペルー沖では 6 度以上違う)が作り出すことが追加の計算により分かっている(Inatsu et al., 2000)。

4. 日本上空のジェット気流は地球温暖化するとどうなるのか？

気候モデル計算を使うと、第 3 節のような「なぜ」に答えることも出来るが、もっと喫緊の我々の生活に関わる問題にも答えられるかもしれない。その 1 つが地球温暖化計算である。気候モデルの中で、二酸化炭素やメタンをはじめとする温室効果気体を増加させて、コンピュータ上の仮想大気海洋がどうなるかを計算すれば、現在分かっている法則や現在、気候モデルに使っている経験則が未来にも適応できるという仮定の下ではあるが、地球温暖化が気候に与える影響を推定することが出来る。

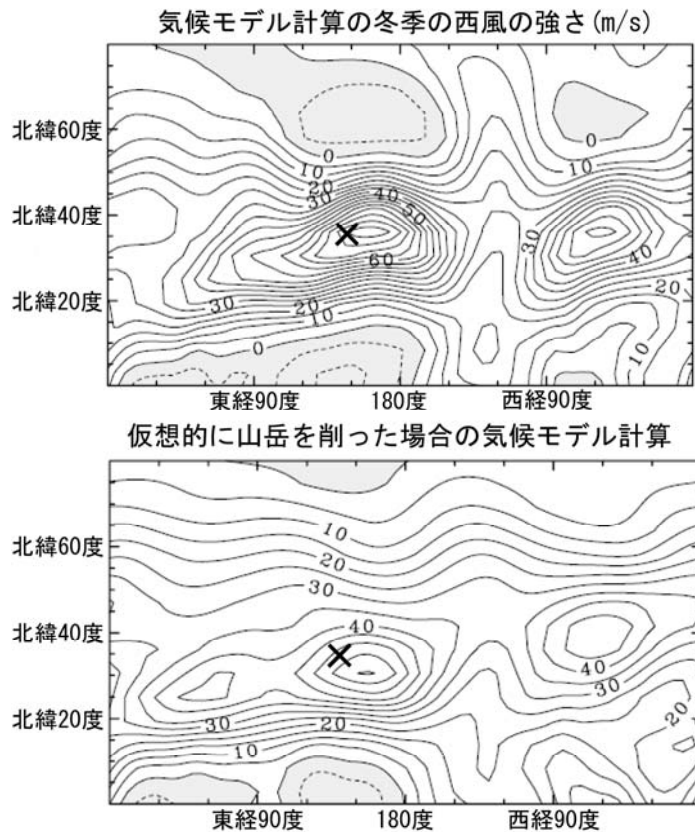


図 4 : (上)気候モデル計算における 1 月の平均的な上空約 10km の西風の分布 (m/s)。 (下) 仮想的に山岳を削った場合の計算結果。これは東京大学気候システム研究センターと国立環境研究所が共同開発した気候モデルのうち大気部分だけを計算した。なお、1999 年当時の計算の為、東西南北に 500km 間隔での計算である。稲津(2000)より引用。

昨今、地球温暖化問題が声高に叫ばれ、先日開催された北海道洞爺湖サミットでもその中心的な議題は地球温暖化問題であった。気温が何度上昇するか、集中豪雨の確率が増えそうだとか、あるいはそれらに伴って米の収量がどのように変わるとか、だから我々の生活様式はこのように改めねばならない、などといった情報が様々な報道を通じ人々の耳に届くようになった。しかし、このジェット気流が地球温暖化の影響を受けてどのように変化するかということは、実社会に余り関係ないと考えられている(実社会との関係については第5節で軽く触れる)のか、案外ニュースにはならない。

日本国内での地球温暖化計算は、文部科学省人・自然・共生プロジェクトとして世界最速級の大型計算機(横浜にある「地球シミュレータ」という名のものである)を用いて行われ

た。国家プロジェクトとして最新鋭の大型計算機を駆使して、数多くの研究者が気候モデルの開発に携わったおかげで、気候変動に関する政府間パネル(IPCC)の第4次報告書の中で「いち早く地域型を実現した」気候モデルとなった。その計算は東西南北に約100km間隔で行っている。この「本気」の計算ならば、北海

道と本州の違いをわかることが出来る。図5はその地球温暖化計算によって地上約10kmの西風がどのように変化するかを推定したものである。西風が強くなる場所は影なしで、西風が弱くなる場所は影ありで書いた。日本上空のジェット気流は南側で西風が弱くなっており、北側で西風が強くなっていることが読み取れる。また、アメリカの東海岸のジェット気流も同様に北へ僅かにずれている。つまり、この計算では、地球温暖化によってジェット気流は北へと僅かにずれることが推定している。

この推定の信頼性は、様々な状況証拠を積み重ねて判断されることとなる。このジェット気流の問題で言えば、世界各機関の異なる流儀の気候モデルの結果を幾つか比較したところ、概ね同様にジェット気流が北へ移動した結果が得られていた(Lorenz and DeWeaver, 2007)。また、20世紀後半、ジェット気流が徐々に北に移動していることも観測データの分析によって明らかになってきている(Archer and Caldeira, 2008)。では、この

地球温暖化に対する西風の変化(m/s)

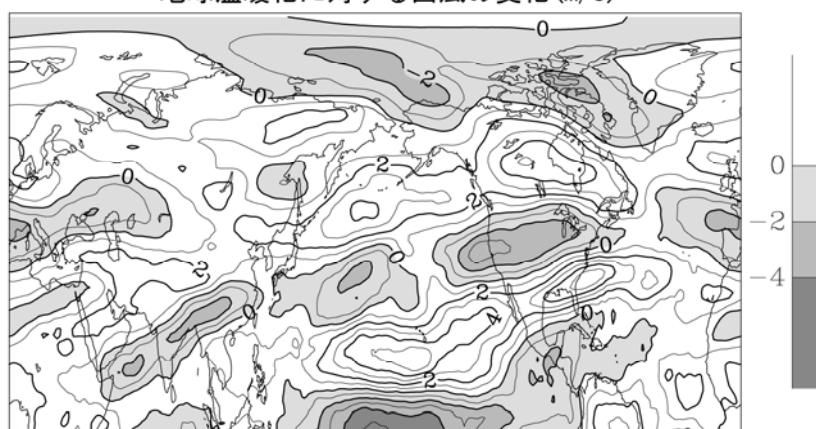


図5：12月から2月の平均的な上空約10kmの西風の分布が20世紀末と21世紀半ばでどう違うかを、地球温暖化計算で推定したもの(m/s)。21世紀半ば、20世紀末に比べ、西風が弱まる部分を影つきで、西風が強まる部分を影なしで表している。気候モデルは、東京大学気候システム研究センター、国立環境研究所、(独)海洋開発研究機構地球環境フロンティア研究センターが共同開発した気候モデルを使い、グローバル経済成長のシナリオA1bに基づいた温室効果気体濃度の増加が21世紀に起こるものとして計算した。

推定が本当だとして、何故ジェット気流は北へ移動するのであろうか？この問いに対して幾つかの仮説が提唱されているが、それを解説するのは極めて専門的な知識が必要であり、残念ながらここでは解説を割愛せざるを得ない。この推定が信頼できるか否かは置いておくとして、地球温暖化がジェット気流に何らかの影響を及ぼしたとしよう。これが一体、我々の生活と関わるどのような気象現象と関係するのだろうか？最後にその問題に軽く触れることとする。

5. 日本上空のジェット気流と関係の深い気象現象

秋や春の日本の天気はまさに三寒四温の諺の通りである。三寒四温をもたらす気象現象は、温帯低気圧と移動性高気圧が交互に日本上空を西から東へ駆け抜けることにある。秋と春に冬も含めた寒候期には、温帯低気圧の発達が特に顕著である。温帯低気圧の急激な発達は、しばしば日本に風雨に関係する災害をもたらす。この温帯低気圧の発達こそ、ジェット気流の強さに関係した現象である。

図6は、地球が太陽から受ける太陽光エネルギーの緯度分布である。赤道では太陽光はほぼ真上から照らされるのに対して、北極では太陽光はほぼ真横から照らされる。その為、赤道と北極の間で受け取る太陽光エネルギーは図5に示したように3倍近く違う。第2節で解説した地球自身の冷えの分を考慮しても、赤道と北極(あるいは南極)の間にはエネルギーの格差が存在する。この格差を是正するべく、大気のみならず海洋も動くことによって赤道から北極(南極)へ熱を運ぼうとする。その1つが温帯低気圧である。

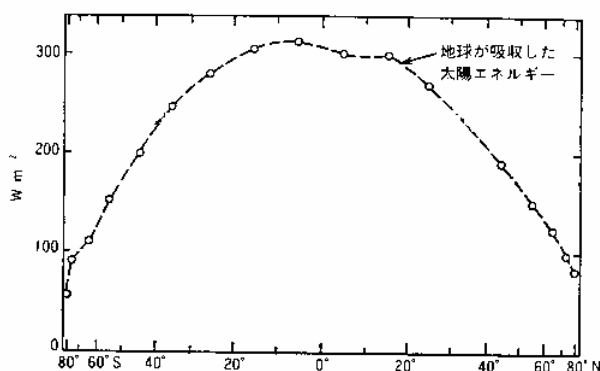


図6：地球が平均的に受け取る太陽光エネルギーの緯度分布。中心に赤道があり、右が北半球、左が南半球である。一般気象学の図を改変、原典は von Harr and Suomi (1969)。

最も古典的な理論では、温帯低気圧はジェット気流の強さに比例した速さで発達するとされる。この理論に従えば、ジェット気流が強い日本上空で最も発達が大きいことになる[註：近年、日本上空の真冬のジェット気流は強すぎるが故、かえって温帯低気圧の発達が妨げられるという解析結果が発表された(Nakamura, 1992)。]。また、温帯低気圧はジェット気流の速度に応じて、温帯低気圧が西から東へ移動する速度が決まる。当然、地球温暖化如何に因らずジェット気流の位置や強さが変われば、我々の生活に関連の深い温帯低気圧がどのように発達し、そして何処を通過しやすいかが変わることになる。

6. 気候モデル計算の今後

先の気候モデル研究では、「本気」の地球温暖化計算をもってしても東西南北 100km

間隔が限界であった。また、いつも「本気」を出すわけにいかないのが、研究者は通例、東西南北 250km 間隔の気候モデル計算で研究する。この程度の計算ではジェット気流の大まかな事情を分かるに十分であっても、それがどのような「地域的な」現象をもたらすのかを思考したり推定したりするのに十分とはいえない。ジェット気流と温帯低気圧の話で例示すると、ジェット気流の具合によって温帯低気圧は日本海側を通過しやすいのか、太平洋側を通過しやすいのかを議論するのに、果たして東西南北 250km 間隔で十分であろうか？温帯低気圧自身も発生したばかりではその規模はそれ程大きくない為、そのような小規模低気圧も計算では抜け落ちることになる(注:「本気」の計算ではこの点は比較的改善されている)。ただ、東西南北の間隔を半分半分にして細かく計算すると、計算量は 8 倍になってしまう。従って、それは大変困難なことである。この問題に研究者は幾つかの方法で解決を試みようとしている。1つは、全世界を細かく計算することを諦めることである。全世界は大まかな間隔で計算し、その計算を使って一部の地域だけを細かく計算する。もう1つは更に巨大な大型計算機を用意して「もっと本気」で計算することである。現在、次世代型気候モデルでは東西南北約 3.5km 間隔の計算が実現されつつある(Satoh et al., 2007)。このような気候モデルの工夫と、より精緻な観測や雲に関する理解が合わさること(これ程、言うは易く行は難いことはないのだが)によって、ジェット気流のような大まかな現象の再現の精度向上にとどまらず地域に密着した精緻で実用的な気候モデル計算が可能になるものと期待される。

参考文献

- Archer, C. L., and K. Caldeira, 2008: Historical trends in the jet streams. *Geophys. Res. Lett.*, **35**, L08803.
- 稲津 将, 2000: 東西非一様な亜熱帯ジェットとストームトラックの形成に関する数値的研究, 平成 11 年度 北海道大学大学院地球環境科学研究科 修士論文, 109pp.
- Inatsu, M., H. Mukougawa, and S.-P. Xie, 2000: Formation of subtropical westerly jet core in an idealized GCM without mountains. *Geophys. Res. Lett.*, **27**, 529-532.
- Lorenz, D. J., and E. T. DeWeaver, 2007: Tropopause height and zonal wind response to global warming in the IPCC scenario integrations. *J. Geophys. Res.*, **112**, D10119.
- Nakamura, H., 1992: Midwinter suppression of baroclinic wave activity in the Pacific. *J. Atmos. Sci.*, **17**, 1629-1641.
- Satoh, M., T. Matsuno, H. Tomita, and H. Miura, 2007: Nonhydrostatic icosahedral atmospheric model (NICAM) for global cloud resolving simulation. *J. Comput. Phys.*, **227**, 3486-3514.