

## 4. テレコネクション —日本の天候を左右するもの—

北海道大学大学院 地球環境科学研究科 渡部 雅 浩

### (1) 天気予報と月～季節スケールの「天候」

30年ほど前を振り返って、あらためて現在の日々の天気予報を考えてみると、その信頼性の向上と情報の精密化には驚くばかりです。これはもちろん気象庁のような予報現業機関のたゆまない努力によるものですが、その歴史の中では、経験による予報からより物理法則に準拠した力学的予報への転換という大きな変化がありました。力学的予報とは、おおざっぱに言えば運動方程式のような大気の状態を記述する物理法則に従う数値モデルを用いて、注意深く作成された初期値から計算を始めて予報したい時刻まで積分してゆくものです。初期にはモデルに多くの不備があったために依然として経験による予報の方が優れていたようですが、現在では力学的数値予報は一こと日々の高低気圧の移り変わりを予測するには—その優位性から世界中で使われています（詳しいことは増田（1981）などのテキストを参照）。また、「短期の天気予報に使えるならば、同じ方法で時間を延長できないか」というのは自然な要望ですが、古くは1970年代後半からそうした1ヶ月程度の長期予報の可能性が追求され、既に力学的1ヶ月予報は現業化されています。

さて、本稿が取り上げる「天候」とは何でしょうか。高低気圧に代表される日々の気象要素の移り変わりを「天気」、数十年あるいはそれ以上の長い時間で平均したときの大気・海洋などの状態を「気候」と定義すれば、天候はちょうどそれらの中間、比較的短い期間の天気の統計的状态、とすることができます。天気の傾向と考えてもよいでしょう。上述の1ヶ月予報や、やや長い季節予報が対象とするのがこの天候です。予測という観点からは、これら3つの用語で定義されるものはそれぞれ異なるカテゴリーに分類されます。例えば、数値天気予報の先駆者であるフォン・ノイマンは、大気変動予測を

- a. 短期的であれば、大気の運動は初期条件に支配されながら変動してゆく。
- b. ある期間が過ぎれば、初期条件の拘束が緩くなり大気の運動に固有な非線型効果により、乱流的な振る舞いをする。しかしこの場合、外的な条件によって乱流の振る舞いはある程度制約を受ける。
- c. 時間が長く経過すると、大気の運動は初期条件とは全く無関係になり、外的な条件に大きく支配された運動形態となる。

と区分しています（von Neuman, 1959 [岸保と佐藤, 1986から転載]）。ここで、a. と b. を分けているのが、高低気圧などのいわゆる総観規模現象のもつ時間スケールです。これがだいたい1週間程度で、そのために長く見積もってもせいぜい2週間というのが、初期条件だけが拘束する大気状態の予測限界と言われています（これを第一種の予測可能性と呼ぶこともあります）。ではそれを越える期間の予測は全く不可能なのか、というと必ずしもそうでもありません。b. にあるように、外的条件が大気の循環にとってある程度の制約条件となり得ます。1ヶ月から季節程度の時間スケールでは海面水温が最も大気に影響する外的条件で、かつ海面水温は大気よりもゆっくり変化しますから、現時点の正確な海面水温が分かればある程度

先の大気の平均的状态=天候も推測できるかもしれませんが（これを第二種の予測可能性とも言います）。しかし、ここで問題をややこしくするのは、地球上の各地点における天候は全く独立ではなく、数千キロからひょっとすると一万キロという大きな空間スケールで秩序だつ「大気循環のとりやすいかたち」があるということです。こうした大規模な循環のパターンは、総観規模現象よりもゆっくりと変化し、外的条件とも無関係ではありません。従って、月～季節といった時間スケールでは、ある場所の外的条件によりその天候が変わるといふ局所的な過程に加えて、ある場所で外的条件が与えられたときに付随して大規模な循環のパターンが変わり、それにより離れた場所の天候が影響を受けるという過程も加わります。それを理解するには、ゆっくりした大気変動に現れやすいかたちが何であるか、また何故それが現れやすいのかを知ることが必要です。以下では、そうした「現れやすいかたち」であるテレコネクションと、それに関わる外的条件について見てゆきましょう。

## (2) テレコネクション—経験から力学へ

テレコネクションという用語は「遠隔結合」と直訳されますが、一般には「離れた場所の気圧などの気象要素に高い相関がある」ことを指します。この説明には時間スケールについての言及がありませんが、多くの場合は高低気圧の時間スケールよりも長い、月・季節・年といった時間スケールで定義します。テレコネクションという現象自体は、1ヶ月力学予報が始まるずっと前から経験則および高層気象観測データの解析で存在が分かっていた。日本やアメリカなど、北半球中緯度に位置する国では地上気圧や500hPaの等圧面高度などを用いてテレコネクションを同定していましたし、一方熱帯においては、現在エルニーニョと対にして語られる気圧の東西シーソー現象である南方振動もまた、エルニーニョが脚光を浴びるずっと前に発見されたテレコネクションです。こうしたテレコネクションのパターンを検出する簡便かつ有効な方法に一点相関という解析があります。これはある地点の気圧なり風なりといった要素の時系列を基準にして他の全ての地点の要素との相関係数を地図上にプロットするもので、絶対値が大きいほど基準点との連携が強いことを意味します。北半球全体のテレコネクションを最初に網羅的に調べた研究として Wallace and Gutzler (1981) の論文があります。例えば図1には、彼らが半球上の全ての点について一点相関をとってまとめた 'teleconnectivity'（テレコネクション度とでもいうのでしょうか）を示してあります。矢印で繋がった地域がそれぞれ遠隔「結合」していることを意味します。

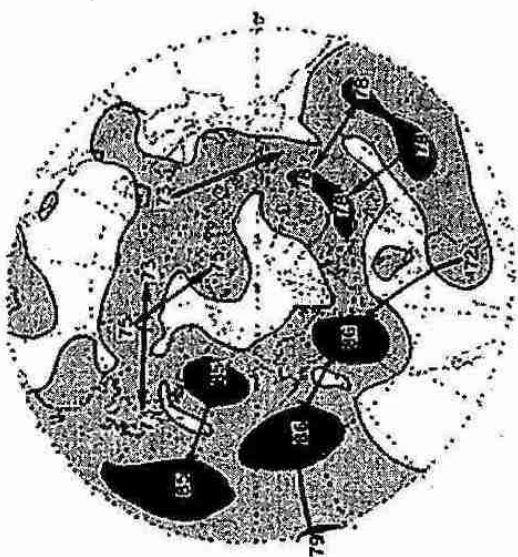


図1からは、北太平洋からカナダ・アメリカ東岸にいたるグループ、大西洋上で南北に連動するグループ、日本に近い太平洋西部でやはり南北に繋がったグループ、などが見てとれます。また、相関係数の二乗が分散比ですから、それらの中心領域では月単位の気圧変動のうち6～7割がこうしたテレコネクションに伴うものと解釈できます。この teleconnectivity は絶対値ですが、実際にはグループ内の一つが正（高気圧）ならば他方は負（低気圧）というようにシーソー的な振る舞いをします。図2（左）には、代表的なテレコネクションである太平洋/北米（Pacific/North American, PNA）パターン

図1 月平均の500hPa高度場データを用いた、テレコネクションの「結合度」。日本は図左下付近にある。数字は高結合度域の中心における相関係数の絶対値。Wallace and Gutzler (1981) より。

と呼ばれる気圧の偏差（平均状態からのずれ）を示してあります。太平洋から北米にかけて低圧・高圧・低圧という波のような気圧分布をしており、それぞれの中心は teleconnectivity の図に表れています。数あるテレコネクション・パターンの中で、まず PNA への関心が研究者の間で高まってきました。これは、PNA パターンがエルニーニョの発生した冬によく見られるという観測事実と、こうした地球を横切る波状の構造がなぜ現れるかという理論的説明が奇しくも Wallace and Gutzler (1981) と同じ年に英国の B. ホスキンスによって与えられたためです (Hoskins and Karoly, 1981)。煩瑣になるために詳細は述べませんが、彼らは低緯度で強制された定常ロスビー波によるエネルギー伝播という気象力学の王道的な理論を提示しました。ロスビー波というのは、地球大気のように回転する球体上の流体に特有の波動現象で、コリオリ力が緯度によって変わる効果（ベータ効果と呼んでいます）が復元力となる波です。理想的な条件のもとでのロスビー波は西に進みますが、位相速度がゼロである（=定常）ようなロスビー波は、波源の緯度によってさまざまな形をとります。Hoskins and Karoly (1981) の説明が妥当であったことは、後に多くの研究者が数値モデルによる計算を繰り返して確かめられました。図2（右）はその一例ですが、太平洋の赤道域で大気を加熱して大気循環がそれとバランスする状態（時間が経っても変わらない=定常）を計算した結果です。観測された PNA パターンによく似て、北太平洋で低圧、アラスカ付近で高圧…という気圧偏差の分布が現れています。赤道での加熱というのは、エルニーニョ発生によって熱帯太平洋の対流活動が東にずれたときに相当しますから、こうした結果はまさにエルニーニョ時に PNA パターンが現れやすいことを物理的に説明してくれます。

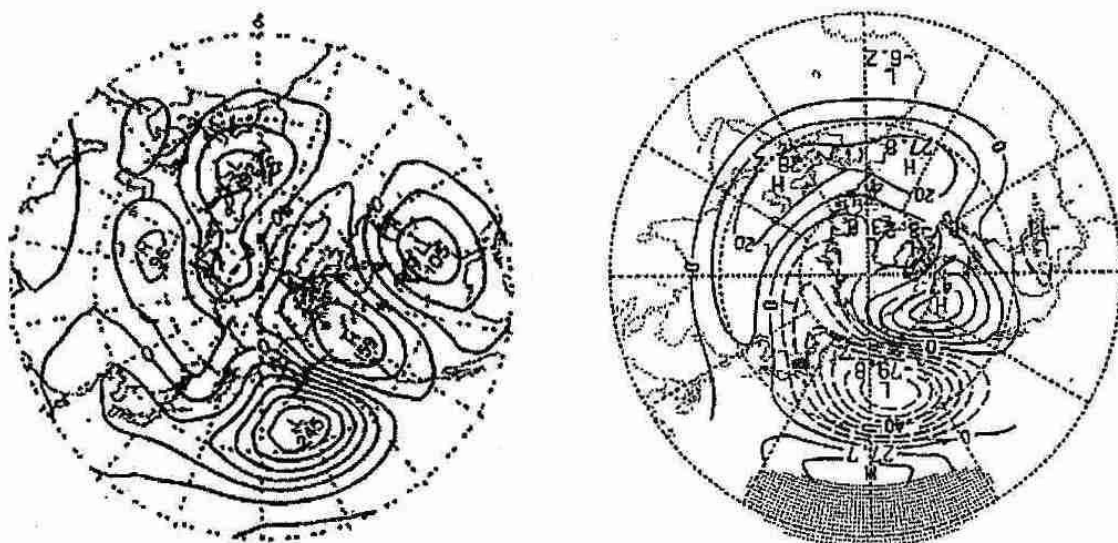


図2 (左) 月平均の500hPa高度場偏差で定義される太平洋/北米 (PNA) パターン (Wallace and Gutzler, 1981) と (右) 3次元力学モデルで計算された、赤道上の加熱 (影の領域) に対する515hPa高度場の定常線型応答 (Karoly et al., 1989)。後者の基本場は東西一様。

図2を見て分かるように、PNA パターンは太平洋から北米大陸に中心をもちますから、エルニーニョの冬に PNA パターンが現れるとアメリカ西海岸などは直接的に大きな影響を受けます。では日本や他の東アジアではどうなのでしょう。というわけで、次には日本の天候を左右し得るテレコネクションについて議論します。

### (3) 日本の天候に影響するテレコネクション

まず東アジアの気候を考えてみますと、冬は冷たいシベリアからの寒気の吹き出しという冬季モンスーンが支配的である一方、梅雨から盛夏期は亜熱帯高気圧の発達とその西縁に沿って南西から流入する暖かく湿った気流が重要になってきます。では、日本付近の天候は、冬は高緯度の大陸の影響、夏は低緯度の海からの影響だけで説明できるのでしょうか。一概にそうとは言えません。天候を支配する要因は、循環パターンの強さ・頻度とともに循環に影響を及ぼす変動現象の季節性をも含みます。例えば、後述するように、エルニーニョは冬に成熟期を迎えますから、その影響は夏だけでなく冬にも現れてきます。

#### 3.1) 熱帯-亜熱帯の影響

夏の日本は大規模な下降流を伴う高気圧に覆われます。この亜熱帯高気圧の位置あるいは強さの変化は、夏の天候を左右し得るわけですが、そこにもやはりテレコネクションが関わってきます。数年前に惜しくも他界された東京大学の新田教授（筆者の恩師でもあります）は、夏のフィリピン沖の積雲対流活動が一ちょうどエルニーニョに伴う赤道域の対流活動の変動が PNA パターンを励起するように一日本からアリューシャン列島にかけての定常ロスビー波を生じるというメカニズムを提唱しました (Nitta, 1987)。この考えに従うと、図3の模式図にあるように、フィリピン沖で積雲活動が普段よりも活発だと日本付近の高気圧は強まり、結果的に暑い夏が訪れることになります。このテレコネクションは今では太平洋-日本 (Pacific-Japan, PJ) パターンとして知られています。ロスビー波は、背景の風が西から東へ流れていないとエネルギーを遠くまで伝えられないという性質がありますが、夏の西太平洋では比較的低緯度までそのような風が吹いているので（これはまさに亜熱帯高気圧があるためですが）、図3のような波型の循環変動が存在し得るわけです。また、エルニーニョが起きる年の夏はフィリピン付近で対流活動が抑さえられる（逆もまた然りです）傾向にあるので、PJ パターンは「ラニーニャ（エルニーニョの逆）の夏は暑くなりやすい」理由を説明してくれそうです。しかし、最近の研究からは、夏のフィリピン沖の対流活動にはインドのモンスーンやインド洋東部の海面水温も影響するという結果が得られており、フィリピン付近の対流活動の変動メカニズムを知ることが夏の天候予測に重要だと言えそうです。

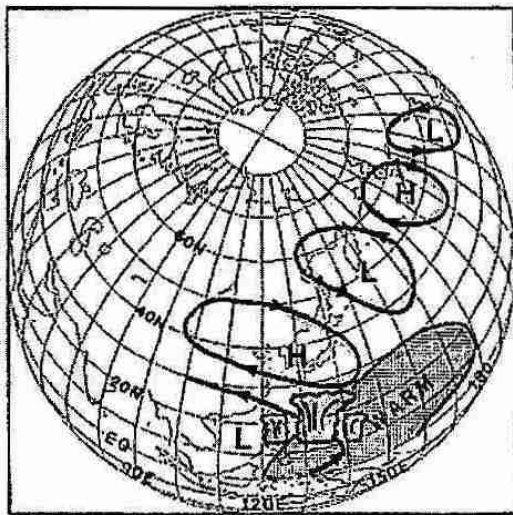


図3 夏のフィリピン付近の対流活動の変動によって励起されるテレコネクション・パターンの模式図 (Nitta, 1987)。LとHはそれぞれ低圧部と高圧部を表す。

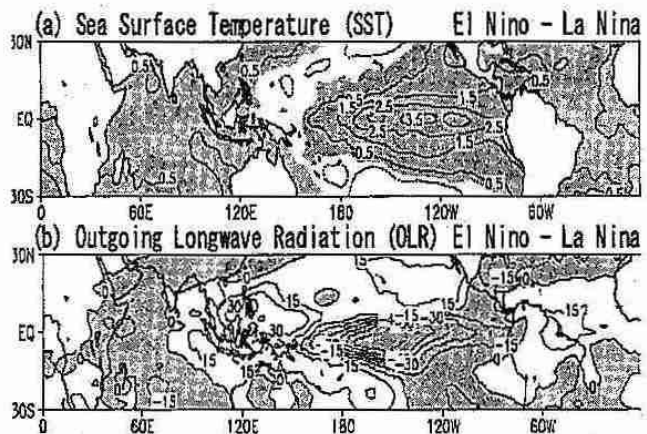


図4 エルニーニョ年からラニーニャ年を引いた合成図、(a)冬の海面水温偏差、(b)冬の外向き長波放射（対流活動の指標）偏差。単位はKとW/m<sup>2</sup>、海面水温は正偏差、長波放射は負偏差の領域に影をつけた。

冬の熱帯一亜熱帯からの影響はどうでしょうか。実は、冬においてもフィリピン付近の積雲活動が鍵であることに変わりはありません。しかし、エルニーニョは成熟期に当たるために夏よりもずっと支配的になります。そのエルニーニョ成熟期（12月から2月）の海面水温と、外向き長波放射（赤外域の地球からの放射フラックスを人工衛星から測ったもので、積雲のように背の高い雲があるとフラックスは小さくなることを利用して対流活動の指標として使われています）の偏差を見ますと（図4）、まず海面水温はエルニーニョの中心である熱帯東太平洋で大きな昇温があり、西太平洋で若干冷えていること、またインド洋全体がやや暖まっていることがわかります。海面水温はとにかく東太平洋の温度上昇が目立ちますが、対流活動は熱帯太平洋中部で強まり西部で弱まるという双極型の変化をしています（図4(b)）。対流活動はインドネシアからフィリピン東方の広い領域で弱まっていますから、図3の模式図の符号を逆転させて考えてもよさそうです。ただし、夏とは対流活動偏差の場所や平均的な風系が多少違いますから、ただ符号を逆にしたようにはなりません。図4と同じやりかたで、大気下層の風と気温の合成図を作ってみますと、対流が弱まっている場所の北西に高気圧性の循環があります（図5(a)）。これは図3で積雲のすぐそばにある低圧部をひっくり返したのですが、冬の場合その北に明瞭な低圧部は形成されず、かわりに東北以南の日本を含む東アジア域を高温な空気が覆います。これは、高圧部の西縁から南西気流が暖かい空気を運んでくるためと考えられ、「エルニーニョの冬は暖冬になりやすい」という一般的議論に根拠を与えます。それでは、エルニーニョが起きると西太平洋で積雲活動が弱くなるのは何故か。これはそれほど自明なことではありません。例として私たちが行っている数値モデルの診断を図5に示します。このモデルはいわゆる大循環モデル（GCM）ではありませんが、同様に海面水温を与えて対流活動と風や気温の変化を計算します。まず、エルニーニョに伴う太平洋の海面水温偏差を与えた場合、フィリピン付近に高気圧性循環はある程度できますが、東アジアはほとんど暖かくなりません（図5(b)）。一方、それにインド洋の昇温（図4参照）が加わると、高気圧性循環とともに東アジアの温暖気塊が（場所は南に寄っていますが）再現されます（図5(c)）。インド洋が暖まるのはやはりエルニーニョが原因と考えられますから、冬のエルニーニョから日本の天候への影響は、東太平洋からインド洋、西太平洋へへ行ったり来たりする過程の結果であるかもしれません。これもまだ仮説の域を出ませんが、研究者によってはこうした過程を「熱帯の大気の橋」と呼ぶこともあります。

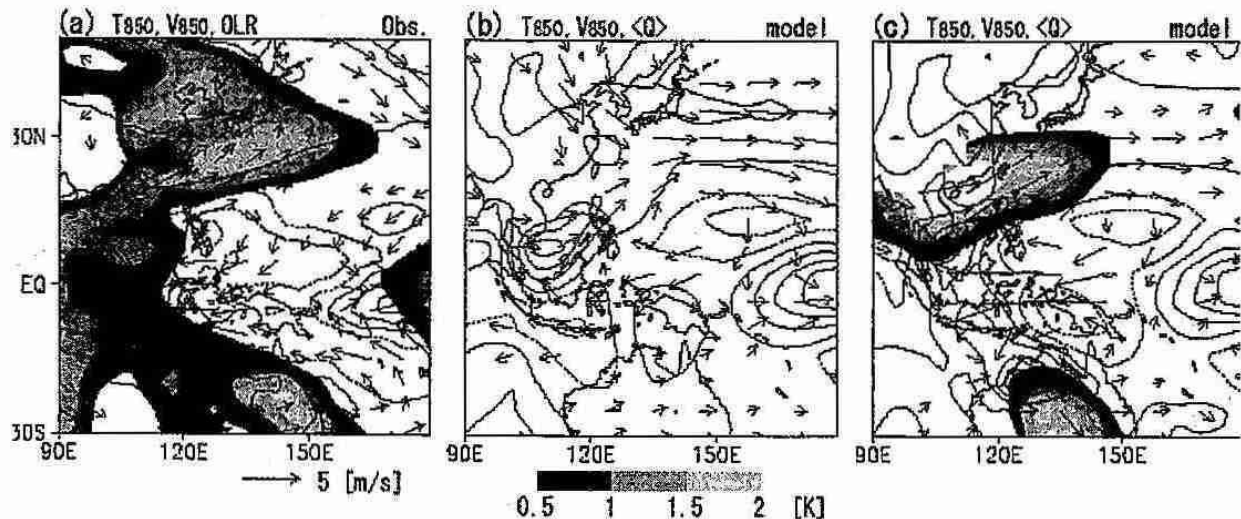


図5 エルニーニョ年からラニーニャ年を引いた合成図、850hPaにおける気温と風の偏差分布。(a)観測値、(b)数値モデルで太平洋の海面水温偏差だけを与えた場合、(c)モデルで太平洋とインド洋の海面水温偏差を与えた場合。Watanabe and Jin (2002) を修正。

### 3.2) 中高緯度の影響

もう一度図1を見直してみましょう。大西洋に南北に「結合している」テレコネクションがあります。これは北大西洋振動と呼ばれる、19世紀から存在が知られていたテレコネクション・パターンです。北大西洋振動はアイスランド低気圧とアゾレス高気圧の強さがシーソーのように変わる現象で、ヨーロッパの天候の一大支配要因であるために欧米では盛んに研究されていました。しかし近年では、日本付近の天候を考える際にも、この遠く離れたテレコネクション・パターンを無視できなくなってきました。というのは、最近この北大西洋振動の拡大版として、北極振動というテレコネクションがあるという見方がでてきたためです。この北極振動は、海面気圧で見ると図6(a)のようにグリーンランドを中心とした極で低圧、北大西洋と北太平洋で高圧という半球全体にまたがる分布をしています。北大西洋の高圧部とグリーンランド付近の低圧部は北大西洋振動の分布とほぼ同じで、それに太平洋側の高圧部が加わったように見えます。この二つの海洋上の高気圧偏差は実は互いに関係がなく、そのために北極振動には実体がなく、もとの北大西洋振動と同じものであるという反対意見も多くあります。しかし、ここで重要なことは、テレコネクションの名前が北極振動であるか北大西洋振動であるかではなく、それがユーラシア大陸上の気温と非常に高い相関をもっていることです。北極振動（の正位相）に伴う冬の地表気温の変化（図6(b))を見てみますと、北米大陸の北東部で冷たく中東部で暖かくなりますが、それ以上にスカンジナビアからシベリア、中国にかけての広い地域で1~2℃昇温することが目立ちます。この温暖化は、北大西洋での気圧変動に伴って北緯50度付近で西寄りの風が強まり、それがユーラシアの内陸部に海からの暖かい空気を送り込むためと理解できます。

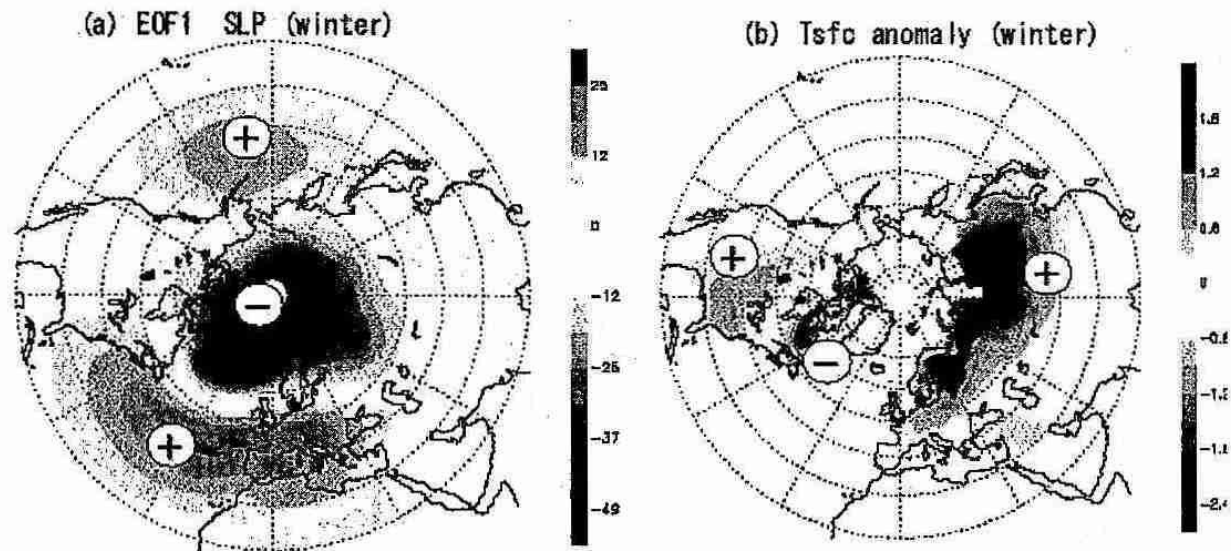


図6 北極振動に伴う大気偏差場の空間分布。冬平均の(a)海面気圧および(b)地上気温。単位は高度換算のmとK、+と-はそれぞれ高気圧あるいは高温域と低気圧あるいは低温域を表す。Thompson and Wallace (1998)に加筆。

ユーラシアの昇温は日本にも及びますが、面白いことにその影響は北海道と東北の一部で特に強く現れます。これは前節で述べた熱帯のエルニーニョによる影響とよい対比をなすもので、日本各地における地上気温と、3つの変動要素（冬季モンスーン、エルニーニョ、北大西洋振動）の指標の相関を計算した図7を見るとそのことが明瞭に識別できます。このうち、モンスーンの指標は冬の季節風の吹き出しの強さを表しますが、それ自身はエルニーニョと北極振動の両方から影響を受けていると考えられます。興味深いのは図7の(b)と(c)の比較です。エルニーニョの指標である南方振動指数は、東北より南で地上気温とよく対応する一方、北大西洋振動指数（北極振動の指数とほとんど同じです）は北海道と青森付近では気温変動をよく説明

するものの、それより南ではあまり相関がありません。

つまり、熱帯—亜熱帯の変動現象は中部・西日本の天候に、中高緯度の循環変動は北日本の天候に影響すると言えそうです。エルニーニョとそれに関係したフィリピン沖の対流活動は日本から離れた場所の話ですし、北極振動もまた実体が北大西洋振動であるならば、その源は遠い大西洋にあるわけで、どちらの影響も非常に空間スケールの大きなテレコネクションと考えてよいでしょう。これらが、タイトルにある「日本の天候を左右するもの」なわけです。もっとも、今の時点では影響があるとは言えますが、果たしてどこまで天候を「左右する」か、あるいはこうしたテレコネクションを知ることで月～季節スケールの天候予測にどう役立つかは未知の部分もあります。冬のフィリピン沖対流活動の変動に関しては、支配的要因であるエルニーニョがゆっくりと変化する(=比較的長い「記憶」をもつ)現象ですから、エルニーニョの予測ができれば(これもまた大変な問題ですが)日本の天候予測に十分役立つ見込みがあります。しかし、北極振動の場合、現象を励起する外的要因がはっきりしません。むしろ、北極振動を含むテレコネクション・パターンの多くは、月単位で気まぐれに変化する大気循環の現れであることが多いのです。言い換えれば、地球規模の大気の流れがどういうかたちをとりやすいか、それが何故か、が理解できたとしても、そのかたちが「いつ・どのくらいの強さで」現れるかを知るのは依然困難なのです。従って、これから解明すべきなのは、どこのどのような外的条件が北極振動を最も効果的に励起しているか、という問題です。源が北大西洋にあるわけですから、その海面水温というのはありそうな要因です。また、私たちの研究では、北極振動が強く現れる前の秋にユーラシア大陸上の積雪域が変化することが分かっています。例えば、太陽放射を反射する積雪面積が減れば、相対的に太陽からのエネルギーは余計に地面を熱めますから、それが大気に伝えられて流れを変える、という可能性が考えられます。しかし、これらはまだ確実な知見ではなく、今後の一層の研究を待たねばなりません。

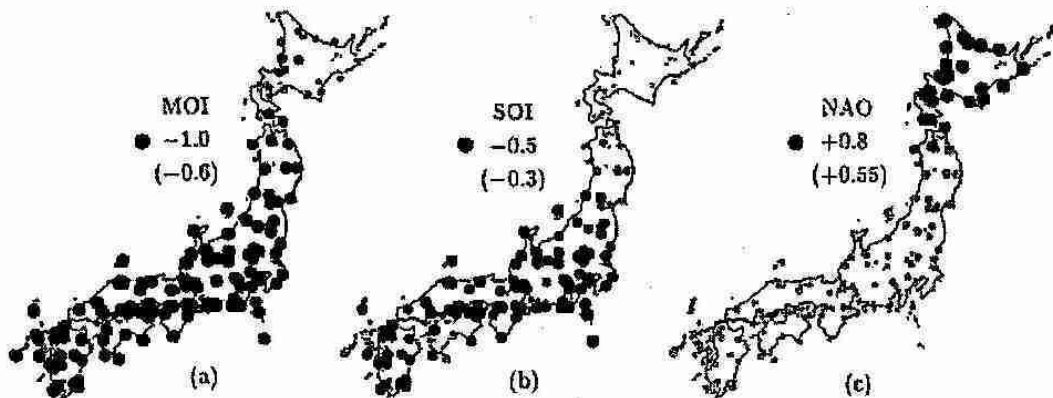


図7 日本各地における冬の地上気温と(a)冬季モンスーンの指標, (b)南方振動指数, (c)北大西洋振動指数との相関係数。黒丸が有意な相関 (Xie et al. 1999)。

#### (4) おわりに

経験的事実から始まったテレコネクションの研究は、比較的歴史もあり、気象学の伝統に沿った理論的裏づけもある分野ですが、いまだに分かっていないことも数多く残されています。その中には従来の気象学の延長として調べてゆくこともあれば、海洋や陸面状態といった、従来の気象学では外的条件として扱ってきた気候の要素まで含めて考えなければいけないこともあります。それは、言いかえれば気象学が発展させてきた考え方を気候の力学とでも言うべきフィールドに展開する作業であるかもしれません。冒頭で述べたように、テレコネクションは長期の天候予測の重要な一部ですが、と同時に気候の科学という学問分野でも依然エキサイティングな研究テーマであると私は考えています。

#### 参考文献

- 岸保勘三郎・佐藤信夫, 1986: 新しい気象力学。東京堂出版。  
増田義信, 1981: 数値予報。東京堂出版。  
Hoskins, B. J., and D. J. Karoly, 1981: *J. Atmos. Sci.*, **38**, 1179-1196.  
Karoly, D. J., R. A. Plumb, and M. Ting, 1989: *J. Atmos. Sci.*, **46**, 2802-2811.  
Nitta, Ts., 1987: *J. Meteor. Soc. Japan*, **65**, 373-390.  
Wallace, M., and D. S. Gutzler, 1981: *Mon. Wea. Rev.*, **109**, 784-812.  
Watanabe, M., and F.-F. Jin, 2002: *J. Climate*, submitted.  
Xie, S.-P., H. Noguchi, and S. Matsumura, 1999: *J. Meteor. Soc. Japan*, **77**, 573-582.