

—解説①—

エル・ニーニョと南方振動

北海道大学低温科学研究所 竹内謙介

1. エル・ニーニョという現象

エル・ニーニョという言葉が日本でもよく聞かれるようになったのは1982-3のエル・ニーニョからである。このエル・ニーニョは観測史上最大と言われるもので、世界各地に異常気象をもたらし、一挙にこの言葉を有名にしてしまった。ほとんどの人にとってエル・ニーニョという言葉を目にするようになったのはこの時が最初であろうが、多分、最初に日本にこの言葉が一般に紹介されたのは1972-3のエル・ニーニョの時であったであろう。この時はペルー沖のアンチョビ漁が壊滅的な打撃を受け、それが回り回って日本の豆腐の値段を押し上げた現象が有名である。ちなみに、アンチョビ漁は未だに回復しておらず、乱獲も原因していたと言われる。

さて、エル・ニーニョとは一体どういう現象であろうか？ 図-1は通常の冬（ここでは特に断わらな

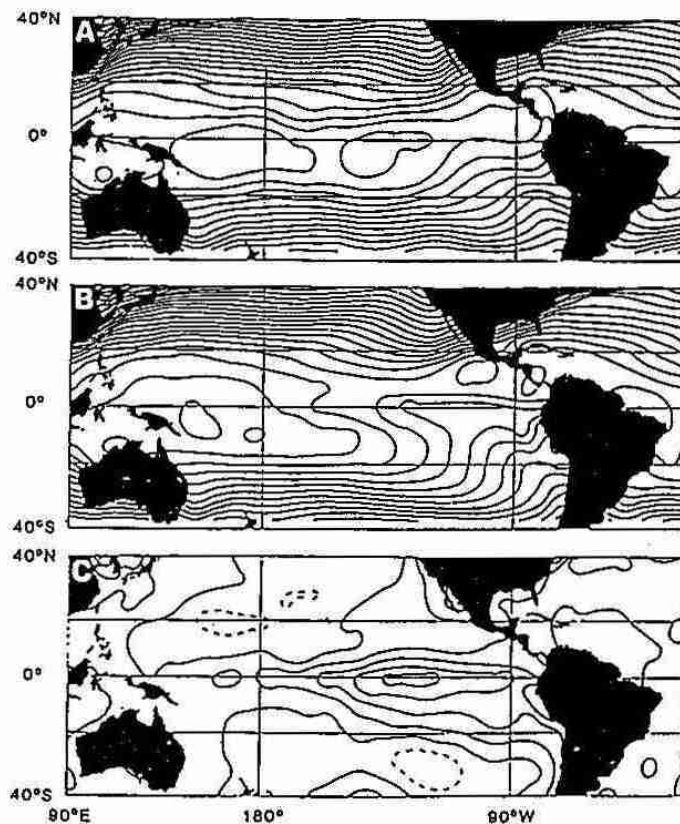


図-1 1982-3のエル・ニーニョ(A)、通常年(B)の北半球の冬の海面水温分布とその差(C)。等値線間隔は1度。(Rasmusson and Wallace, 1983 より)

い限り北半球を基準とする)の熱帯太平洋の海面水温と1982-3のエル・ニーニョの時の冬の海面水温を比較したものである。常識的には熱帯の海面水温は高いと思われがちだが、そして確かに西太平洋ではそうであるが、東太平洋ではむしろ赤道近辺が周囲より低くなっている。この冷水域は南米沖から舌状に赤道に沿って延びている。ところがエル・ニーニョの年にはこの冷水舌が非常に弱まり、東西の差は小さくなっている。むしろ、知らされないで両図を見れば、エル・ニーニョの時の分布の方が正常と思う人も多いのではないかとにかく、このような異変で、かなり広い海域で海面水温は1-3度上昇する。このような現象がほぼ4年に一度位の割合で起きる。といっても、完全に周期的である訳ではなく、10年近く起きないときもあれば2年位の間隔で起きるときもあり、規模もいろいろである(図-2)。注意して欲しいのは、エル・ニーニョというと、この平年からの水温上昇が注目される為、いかにもこの海域の水温が周囲より高くなる様に思われがちだが、実際には元々低い所が回りに近づくだけである。

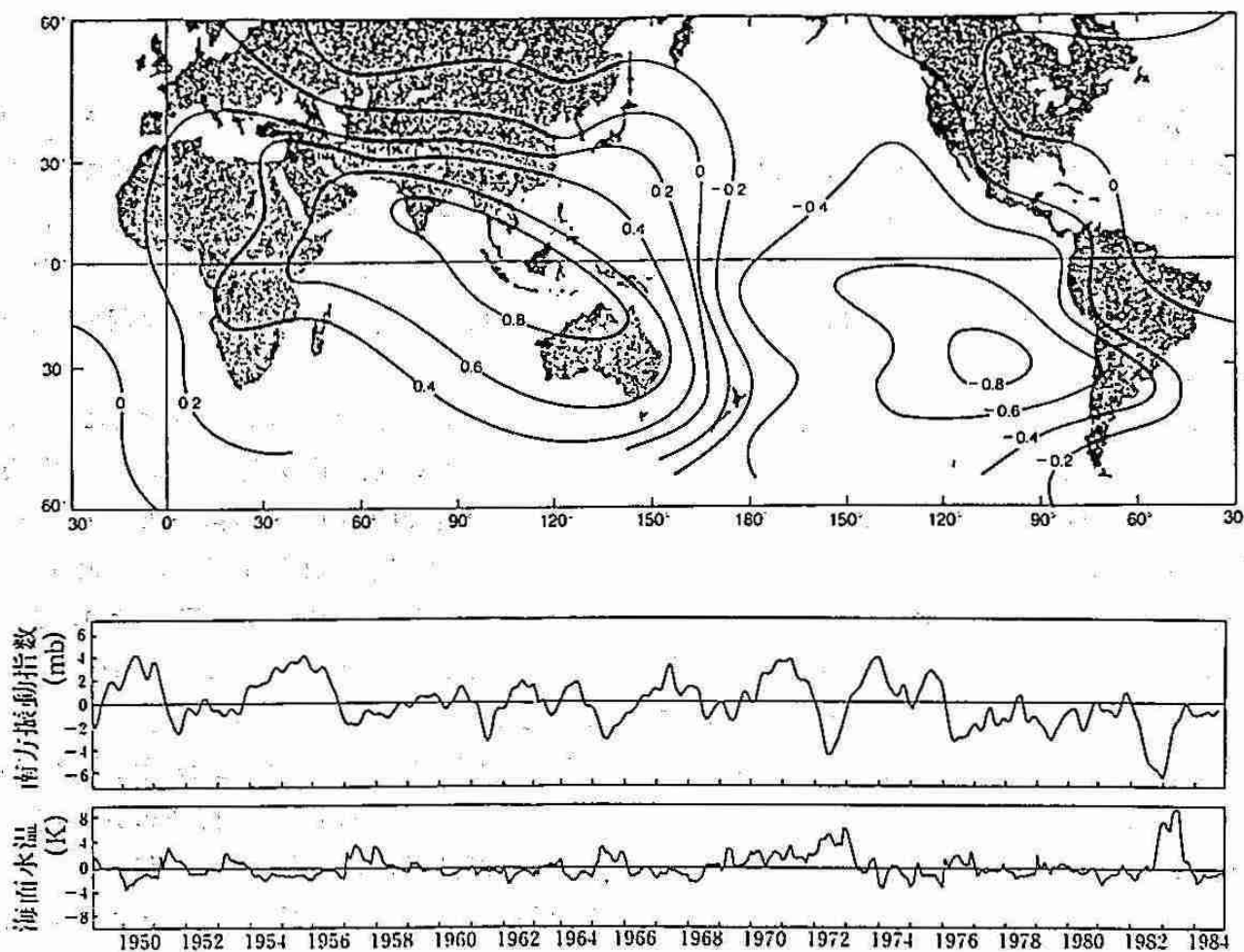


図-2 (上) ジャカルタの地上気圧の異常(平均からの偏差)と世界各地のそれとの同時相関係数。
 (中) 南方振動指数。上図での相関係数が正負でそれぞれ高い場所(ここではダーウィンとイースター島)の地上気圧の差の異常。
 (下) ペルー沖の海面水温の異常。(浅井、1988より)

エル・ニーニョの名前の由来は最近良く知られているが、スペイン語で男の子の意味で、ここでは“神の子”と言うような意味で使われている。元々はペルーの沿岸で毎年、クリスマスの頃、海面水温がやや上昇する現象を呼ぶ言葉であったからである。しかしいつの間にかもっと大きな現象に使われる様になり、そのまま定着してしまった。さらに最近では全世界的な大気、海洋の異常に使われるまで意味が拡大してきている。エル・ニーニョの研究の歴史は、エル・ニーニョという言葉の意味の拡大の歴史と言って良い。そのため、どこまで広い現象を指すのか、定義が曖昧になっている傾向がある。エル・ニーニョという言葉は南米沖の現象に限るべきと言う考え方もある。ちなみに最近ラ・ニーニャという言葉がよく使われるようになってきた。これは女の子の意味で、エル・ニーニョとは反対の現象、つまり冷水舌が強く発達する現象を言う。しかし、もともとエル・ニーニョが宗教的な意味を持った言葉であることから、特にスペイン語圏の人たちには違和感があるようだ。アンチ・エル・ニーニョという言い方もあるが、これも反キリスト的な意味合いを持ってしまう。老人を意味するスペイン語を使っている研究者もいるようだがまだ定着していない。

2. 南方振動

太陽からの放射等の外部要因はそれ程変動は大きくないのに気候は年によって変動が大きい。その原因についてはまだよく解っていない。もともと大気は熱容量が小さく、反応が速い。外部条件の変化に対して数日で平衡状態に達してしまうと言われている。その様な反応の速い大気の数年にも渡る変動にはもっと長い反応速度をもつ物が関与する必要がある。その意味で海洋が大きな役割をしていることは十分予想されたことであった。エル・ニーニョは正にそのことを示した現象であり、気候変動のメカニズムを解明する為の突破口として注目を集めている。

1982-3のエル・ニーニョで気候変動が関心を集める半世紀以上も前、しかし、エル・ニーニョに対応する大気の変動は既に知られていた。気象学者のWalker(1924)は世界各地の地上気圧の変動を比較し、大規模なシーソーを発見した。北オーストラリアを中心とする広い範囲の地上気圧が南東太平洋のタヒチの周辺の気圧と逆相関があり、数年の時間規模で両者の高低が入れ替わっている。これを南方振動(southern oscillation)と言う。その当時は原因が分からなかったが、Bjerknes(1966)の先駆的な研究により、これがエル・ニーニョと密接な関係がある、というより表裏一体の現象であることが明かになった(図-2)。エル・ニーニョ(El Nino)と南方振動を合体させてENSOと呼ぶ事が多い。

1982-3のエル・ニーニョでは影響が熱帯に留まらず、極域に至るまで全世界に及ぶことが示された。熱帯の現象がこの様に遠くまで影響を及ぼす、いわゆるテレ・コネクションの一例として有名なのがPNAパターンである。これは地球の大円上を正・負の気圧の異常が交代に現れる形で影響が遠方まで伝わるもので、太平洋から北米にかけて現れる。この様に、これまで全く関係の無いと思われた現象までエル・ニーニョとの関連が考えられるようになった。少し前までは、何でもかんでもエル・ニーニョのせいにする傾向が無きにしもあらずであった。日本ではエル・ニーニョの年には暖冬、冷夏になる傾向があるとされている。しかし、いつもそうなる訳ではなく、1989-90の冬の様にラ・ニーニャにも関わらず暖冬になった年もある。もう少し関連が強いのが台風の数で、エル・ニーニョの年には日本に接近する台風が少ない。逆に普段殆ど

台風が接近しないハワイに上陸したりする。

3. エル・ニーニョの原因

エル・ニーニョが前述の冷水舌が弱まる現象であるから、その原因を知るためには冷水舌の成因を知る必要がある。これはコリオリ力がゼロになるという赤道の特殊性が関係している。熱帯太平洋上では大雑把に言って、東風である貿易風が卓越している。北半球では風が海上を吹くと、コリオリの力の影響で海洋上層には風応力の直角右方向の流れが生じる。これをEkman輸送と言う。太平洋熱帯域では風は西向きであるから流れは北に向く。反対に南半球ではコリオリ力が逆に働き、南への輸送が生じる。結局赤道付近の上層の海水は両極方向に輸送され、それを補う為の下層の温度の低い海水が引き上げられる。これが赤道湧昇である。このため、赤道上に冷水域ができる。

しかし、なぜ東太平洋だけに冷水舌ができるのか。熱帯の海洋は図-3の様に均一の温度、塩分を持つ上層と、それらが急に变化する躍層で特徴付けられる。西向きの貿易風はこの暖かい上層の海水を西の方に押し付け、そのため西太平洋熱帯域では暖水の層が厚くなり、東では薄くなる。このため東では赤道湧昇で上昇する海水は下層の温度の低い海水であるのに対し、西ではその影響が弱くなる。

Wyrtki(1975)はエル・ニーニョの原因として、エル・ニーニョの年に主として西太平洋で貿易風が弱まることを見だし、このため西太平洋熱帯域に蓄積された暖水が東太平洋に逆流することが原因であるという説を出した。支えを失った西太平洋の暖水はやはり赤道の特殊性で、赤道に沿って東に伝播するケルビン波と呼ばれる波として東に移動し、東太平洋の上層を暖水で埋め尽くしてしまう。この仮説はその後多くの観測、数値モデルで確かめられている。

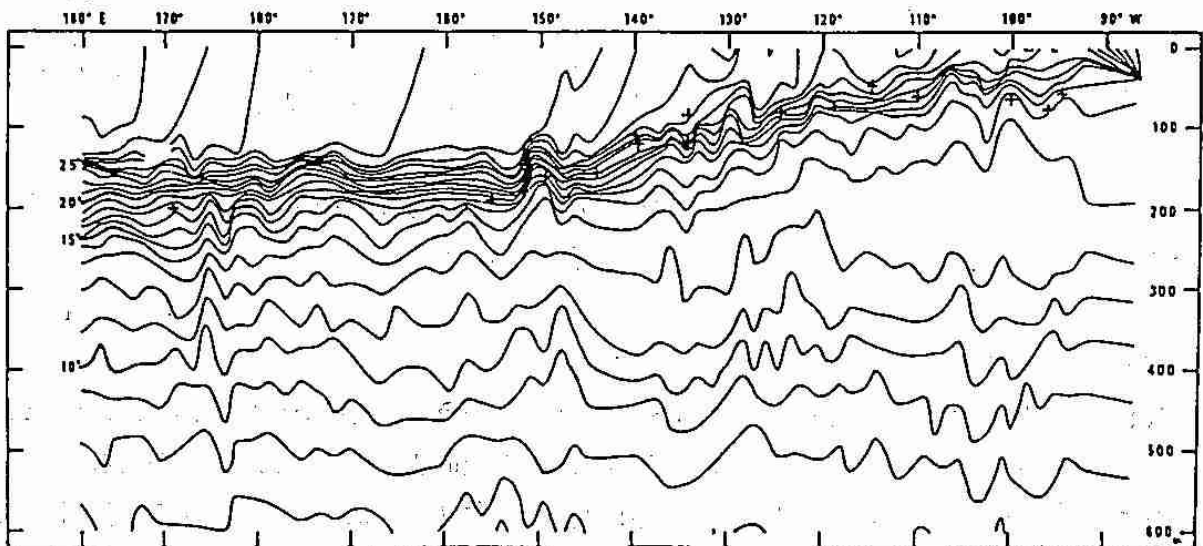


図-3 太平洋の赤道断面に於ける水温分布。(Colin et al.より)

4. 大気・海洋相互作用

それではなぜ貿易風が弱まるのであろうか？西太平洋熱帯域は世界中の海洋で最も海面水温の高い海域であり、対流活動が活発で、いわば世界中の大気の加熱の中心になっている。この上昇気流を補う為に、海面水温の低い東から大気が流れ込む。これが貿易風の成因の一つである。つまり、貿易風は西太平洋熱帯域の海面水温を維持する原因でもあり、またその結果でもある。両者が互いに支えあっているのである。

ではもし何等かの原因で、対流活動の中心が東に移動したらどうなるか？対流の西側では風の方向が逆転するか少なくとも東風が弱まることが予想される。すると暖水塊は支えを失って東に移動する。すると海面水温の高い海域も東に移動する。正の帰還が起きて、この現象は増幅する事が予想される（図-4）。Philander等(1984)は簡単な大気・海洋結合系の不安定解析を行い、'82-83のエル・ニーニョが西太平洋から発達しながら東進する様子を説明する事に成功した。このモデルでは大気の加熱が海洋上層の厚さの異常に比例するという定式化を用いている。この点については異論もあり、その後様々な定式化による不安定解析が行われている。

ともかく大気・海洋の相互作用によってENSOが起きる事についてはほとんどの研究者に受け入れられていると言って良い。それと共にエル・ニーニョが積雲対流活動の中心の移動する現象であるという認識

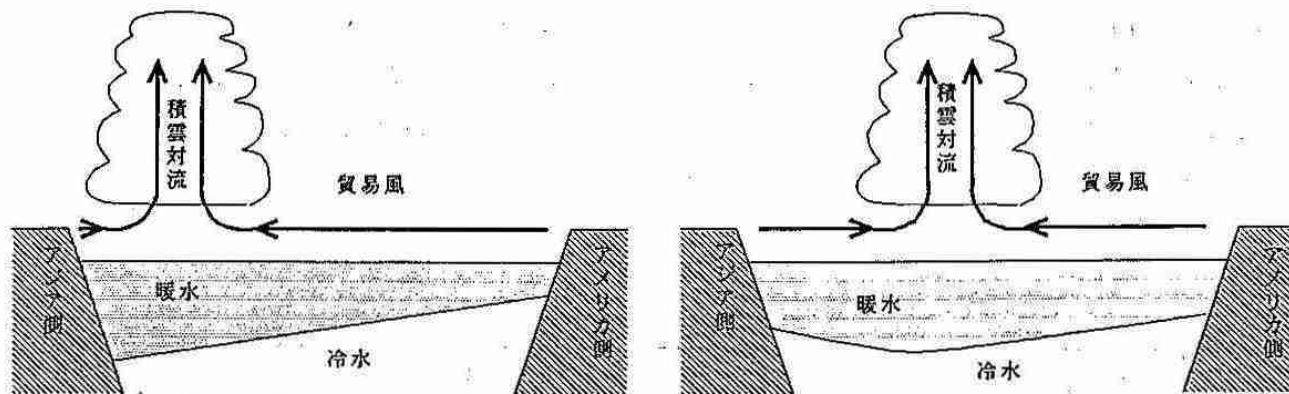


図-4 大気・海洋相互作用の概念図。(上)通常時、(下)エル・ニーニョ時。

が強まった。大気循環の熱源の変動であるから世界中の気候に影響を与えるのは不思議ではない。そして研究者の関心は大気・海洋相互作用の発端になる西太平洋に移りだした。

5. 大気・海洋結合モデルと遅延振動説

ENSOの本質が大気・海洋相互作用であるとすれば大気モデルと海洋モデルを結合させればENSOが再現できるであろうという事は当然考えられる。Cane and Zebiak(1985)は非常に単純な結合モデルを作り、これを走らせたところ、数年の周期で自励振動を始めた。この振動はいくつかの点で実際のENSOの特徴を再現している。このモデルでは大気・海洋とも太平洋熱帯域に限られ、大気は海洋の状態により準平行状態として一意的に決まってしまう。もし彼らの再現した振動がENSOの本質を現しているとする、海洋が振動の進行を司っている事になる。

その後各所で単純な結合モデル実験が行われ、同じ様な振動が次々と再現され、この振動の機構が明らかになってきた。図-5はSchopf and Suarez(1988)のモデルの結果である。大気・海洋の相互作用が起きて西風異常が強くなり、海洋には上層の暖水が赤道に集まり、これが(暖かい)赤道ケルヴィン波として東に伝播し、エル・ニーニョを起す。この時赤道の高緯度側では上層の厚さが減少し、これがロスビー波として西に伝播する。このロスビー波は西岸で反射し、上層が薄くなる(冷たい)ケルヴィン波として戻って来る。これがエル・ニーニョを終わらせ、逆の位相(いわゆるラ・ニーニャ)に入る。大気・海洋相互作用も逆になり、東風異常が起き冷たいケルヴィン波が増幅される。この時同時に暖かいロスビー波が励起され西に伝播する。これが西岸で反射し、次の暖かい位相(エル・ニーニョ)を引き起こす。

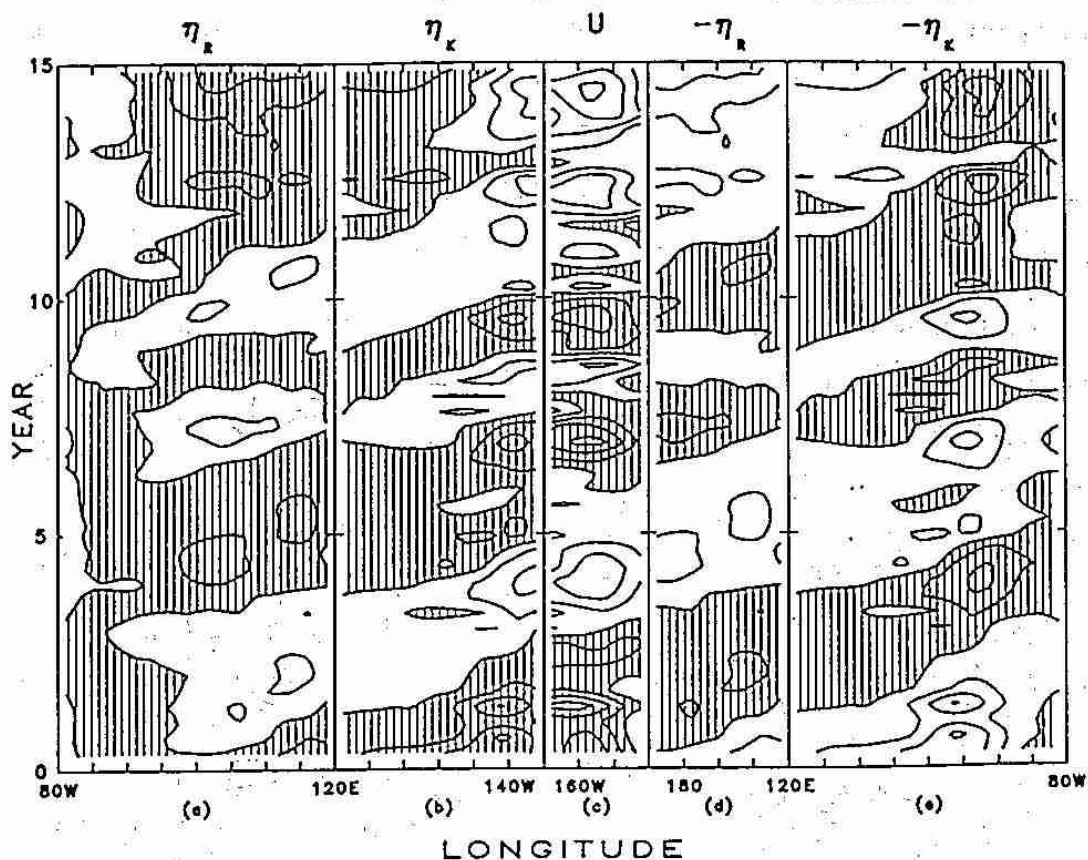


図-5 Schopf and Suarez(1988)の大気・海洋結合モデルにおける時間発展。 η は海面の高さ(海洋上層の厚さ)。Kの添字は南緯2度から北緯2度の平均でケルヴィン波の、Rは両半球5度から7度の平均でロスビー波の、それぞれ振幅を表す。Uは赤道海面上の風の東西成分。(d)、(e)では符号が逆にしてある。

Cane等のモデルで起きている現象も本質的には同じ機構によっている。これは基本的には海洋の赤道波の伝播による遅延効果に起因する自励振動である。周期は赤道波の伝播時間と相互作用の発達に要する時間で決まる。より本格的なモデル、いわゆる大循環モデルを組み合わせた結合モデルでも同じ様な機構によると思われる振動を起こす例がでてきている。但し、振幅等はやはり小さいようである。

これらのモデルでは共通して大気・海洋相互作用が実際より東で起きている。これは東太平洋の方が海面水温の変動が大きく、相互作用が起き易いからである。実際には西太平洋の海面水温が高い所の方が海面水温の変動に対して対流活動が敏感で、変動が小さくても相互作用は起こり易い。しかし、そのメカニズムがモデルではうまく表現出来ていないから起きる相違である。それだけなら些細な相違と言ってすませられそうなのだが、相互作用の位置が異なると赤道波の伝播にかかる時間が異なり、周期が変わってくる。この機構で実際と同じ様な場所で相互作用が起きるとすると周期はもっと短くなるはずである。

図-6は気象庁の東経137度線の観測から海洋上層の熱総量の異常を計算したものである。遅延振動説によれば、エル・ニーニョが起きる前には暖かいロスビー波が伝播してきて、海洋上層の厚さが増し、熱総量も増加するはずである。確かに、この期間で起きたエル・ニーニョの前年の冬にはすべて北緯5~10度を中心として正の異常が見られる。その点では遅延振動モデルは正しい。しかし、正の異常が見られるのはエル・ニーニョの前年に限らない。むしろ2年周期が目立っているようにも見える。遅延振動モデルで相互作用の起きる場所が西・中部太平洋であるとするとむしろ2年位の周期の方が考え易い。とにかく正の異常があっても必ずしもエル・ニーニョにはつながっていない点は遅延振動モデルには都合が悪い。

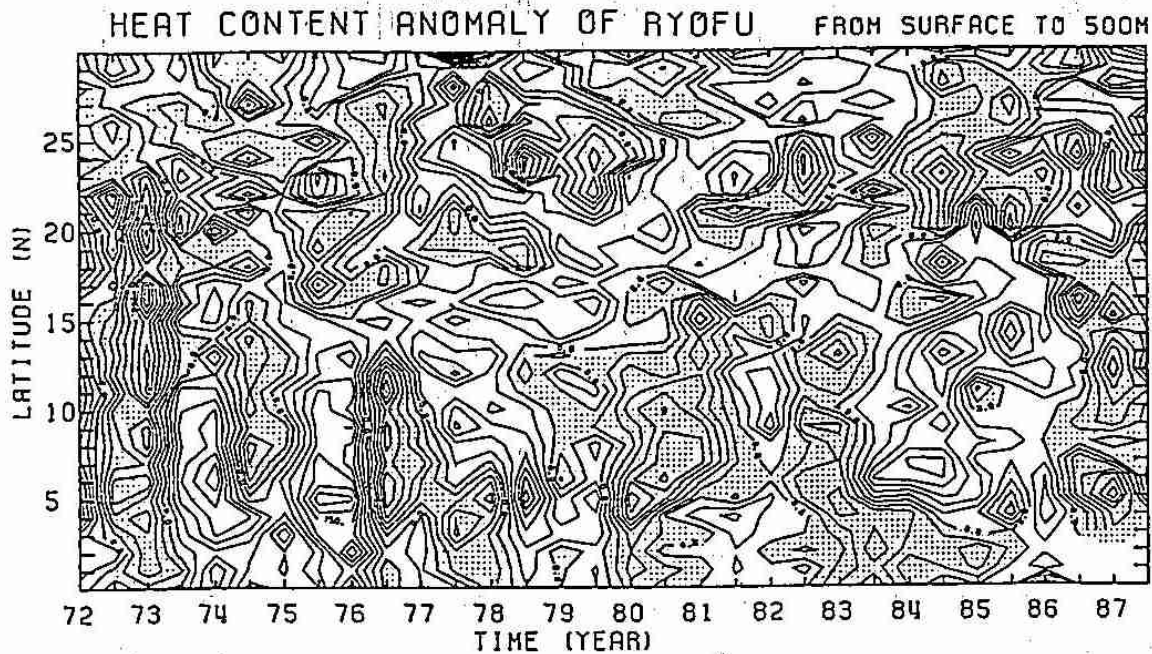


図-6 東経137度における海洋上層500mの総熱量の平均からの偏差。影は負の値を示す。

(Matsumoto and Takeuchi, 1988 より)

6. 準2年振動とモンスーン

大気・海洋結合モデル、特に単純なモデルは、ENSOが熱帯太平洋とその上の大気の結合系として閉じた系の現象であるという立場に立っている。ENSOの影響は全世界的に広がっているが、逆にそれから影響を受ける事は無いと言う考えである。それにはしかし、異論もある。その一つがインドモンスーンがE

NSOと関連しているという説である。

インドモンスーンは熱帯西太平洋の海面水温分布と非常に良い相関を持っている。前述の様に、熱帯西太平洋では2年位の周期の変動が目立つのだが、これはインドモンスーンと共通する。また、インドモンスーンはその前の冬季のユーラシア大陸の降雪量と負の相関がある。これらの事から安成は次のようなシナリオを描いている。冬季にユーラシア大陸の降雪が少ないと大陸が加熱され易く、モンスーンは強くなる。その結果西太平洋熱帯域での東風が強まり、いわゆる暖かいロスビー波を励起する。これがエル・ニーニョを引き起こす引き金となる、というものである。しかし、インドモンスーンや西太平洋熱帯域の蓄熱量の変動は2・3年周期であるのに対し、エル・ニーニョの周期はもっと長い。その変調を何がやっているのか？また、エル・ニーニョからユーラシアの積雪の変動への過程も明確では無い。

ともかく、この理論ではENSOは単に大気と海洋の相互作用で有るばかりでなく、大陸までもを含んだ結合系の変動を考えている点で今後の気候変動の研究の方向性を示しているといえる。

7. ENSOは周期現象か？

遅延振動モデルにせよ、インドモンスーンが絡んでいるという説にせよ、ENSOは周期現象であるという捉え方をしている。しかし、大気・海洋の不安定相互作用でエル・ニーニョが起きるとすると、何らかの偶発的な刺激で起きる事も考えられる。現象だけから見れば完全な周期性は見られないし、さりとてまったくデタラメに起きている様でも無い。果たしてENSOは周期現象が変形した物なのか、偶発現象が修飾された物か（例えば一回起きるとしばらく起きにくいような条件になる）という事であろうか。言い替えれば前回のエル・ニーニョは次のエル・ニーニョにどう影響しているのであろうか。これはエル・ニーニョの予測の可能性に大きな影響がある。

不安定相互作用の引き金として注目されているものに西風バーストがある。これは10日間位の時間スケールで西太平洋熱帯域で強い西風が吹く現象である。これに伴ってよく南北両半球に対する渦が出来、台風やサイクロンに発達する。この西風バーストは季節内変動と関連していると思われるが、今一つ明確では無い。また、西風バーストそのものが西太平洋の海面水温やモンスーンの状態に影響されることも有り得るので、これがエル・ニーニョの引き金であるとしても必ずしもENSOに周期性が無いとは言えない。

この西風バーストとそれによる海洋の反応を調べようというプロジェクトがCOARE (COUPLED OCEAN ATMOSPHERE RESPONSE EXPERIMENT)である。これによってエル・ニーニョ発生のメカニズムの解明に有用な情報が得られる事が期待されている。

8. 終わりに

大気と海洋の相互作用で起きる気候変動はエル・ニーニョだけでは無いであろう。また更に陸水、生物、さらには人間活動が絡んだ現象もあるだろう。その意味でエル・ニーニョの研究はその始まりに過ぎない。より広い視野の研究者がより多く必要になるであろう。

文 献

- 浅井富雄, 1988: 気候変動. 東京堂出版, pp202.
- Bjerknes, J., 1966: A possible response of the atmospheric Hadley circulation to equatorial anomalies of ocean temperature. *Tellus*, 18, 820-829.
- Cane, M. A. and S. E. Zebiak, 1985: A theory for El Nino and the Southern Oscillation. *Science*, 228, 1085-1087.
- 松本善之, 竹内謙介, 1988: 気象庁137E線観測データに見られる西部熱帯太平洋の経年変動とそのENSOとの関連. 北海道大学地球物理学研究報告, 51, 63-75.
- Philander, S. G. H., T. Yamagata, and R. C. Pacanowski, 1984: Unstable air-sea interactions in the tropics. *J. Atmos. Sci.*, 41, 604-613.
- Rasmusson, E. M. and J. M. Wallace, 1983: Meteorological aspects of the El Nino/Southern Oscillation. *Science*, 222, 1195-1202.
- Schopf, P. S. and M. J. Suarez, 1988: Vacillations in a coupled ocean-atmosphere model. *J. Atmos. Sci.*, 45, 549-566.
- Walker, G. T., 1924: Correlation in seasonal variations of weather, IX: A further study of world weather. *Mem. India Met. Dept.*, 24, 75-131.
- Wyrtki, K., 1975: El Nino-The dynamic response of the equatorial Pacific Ocean to atmospheric forcing. *J. Phys. Oceanogr.*, 5, 572-854.