

赤道における変動する熱輸送により起る 海洋と大気の大規模な相互作用*

—ビヤクネス教授の東京講演より—

林 良 一** 遠 藤 昌 宏***

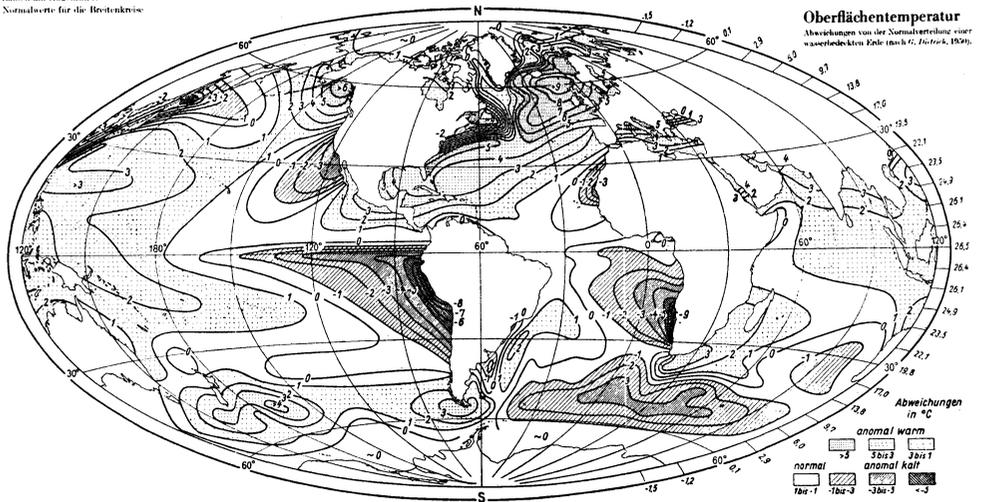
1970年9月25日、気象庁の講堂に熱心な気象学研究者が集り、ビヤクネス教授の約一時間半にわたる講演が始まった。以下その概要をお伝えする。

プロローグ

「私は只今の紹介の言葉をとでもうれしくまた名誉に思います。これから私の研究の最近の結果をお伝えした

いと思います。この種の研究こそ海洋学者と気象学者を結びつけるものです。そのような会議****がこの二週間東京で開かれ、ちょうど終つたところです。そして今純粋な気象学研究者たちに招かれ、もっと良く問題を認識していただける機会が得られ大変喜んでおります。」

Zahlen am Äquator:
Normalserie für die Breitenkreise



第1図 緯度平均からのずれで表わした表面海水温度。Dietrich (1957) より。

* Large-scale Ocean/Atmosphere Interaction Resulting from Variable Heat Transfer at the Equator—Summary of the lecture given by Professor J. Bjerknes on Tokyo on September 25, 1970

** Y. Hayashi 東京大学地球物理学教室 気象研究室

*** M. Endoh 東京大学海洋研究所

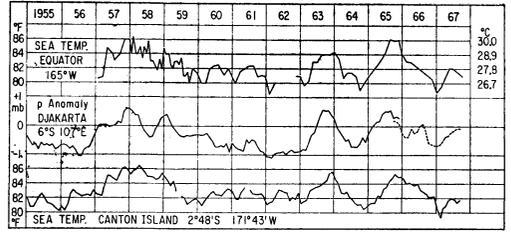
**** IAPSO (The Fifteenth General Assembly of the International Association of the Physical Sciences of the Ocean)

—1970年11月24日受理—

1. イントロダクション

この研究の対象は、熱帯における熱供給の長期変化が大気循環におよぼす影響である。特に典型的な例として1964年11月の赤道太平洋で湧昇流 (upwelling) の最も活発な時期および1965年11月の赤道太平洋の中央および西部で湧昇流がなくなった時期に大気循環がどのように反応するかを示す。赤道地方の状況は中緯度やさらに北極までも遠距離作用 (teleconnection) をおよぼす。

第1図は Dietrich (1957) による海面の緯度平均からのずれを示す。太平洋上で南アメリカの海岸から赤道にそって西方にかけて海面温度の低い地域が見られる。これは主として湧昇流の影響である。この湧昇流は赤道に沿って吹く偏東風による Ekman drift が赤道から極側に発散するためにおこり自励的である。すなわち偏東風により誘起された湧昇流は赤道太平洋の東部を冷し、東西の温度差をつくる。冷された東部では大気が沈降し西部では上昇し、赤道に沿う大気の循環がおこり、偏東風が



第3図 Walker の「Southern Oscillation」, Djakarta の月平均気圧偏差の6ヶ月平均を1955年から65年まで示してある。(ダッシュをうった曲線は Singapore のデータを続けた。) 同じ時間間隔で Canton Island の月平均海水温と赤道165°Wの海水温が船の観測で示されている。1958年から1959年の短周期の変動の大部分は船の観測が多かった事を示す。

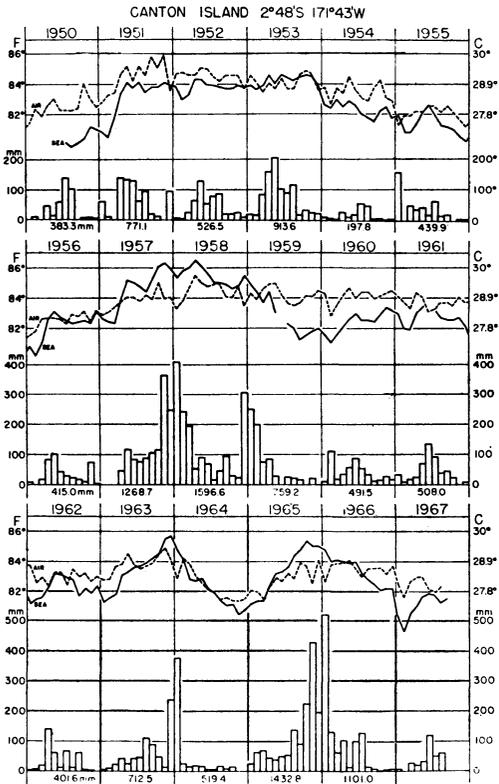
強まる。しかし何かの原因で偏東風が弱まると湧昇流も弱まり温度差が小さくなり偏東風は更に弱まってしまう。

2. 赤道太平洋の湧昇流と大気への feed back

2.1 海面温度と気温の変動

Canton Island (2°48'S, 171°43'W) は海面温度のおもしろい変動を示す。第2図は1950年から67年の期間の記録を表わす。ほとんどの期間、赤道湧昇流から生ずる海水は Canton Island まで達し、そこで比較的冷い27°~28°の水温を維持する。しかしいくつかの短い期間湧昇流の影響は十分小さくなるかまたは全く止んでしまい、月平均では29°~30°Cになることもあり得る。1960年代には準二年周期振動がしばらくの間続き、その最大は1963年と65年の終りにかけて、最小は1962年と64年の終りや67年の初めに起る。

Canton Island の気温(第2図の破線)は海面温度の傾向に沿って変動しているが、平均値からのずれは気温の方が少ない。従って海水が冷い時には気温は水温より高く、海水が暖い時には気温は水温より低い。後者の条件の時には水蒸気の供給が容易に得られ、大気中に強い対流や降雨が起きやすくなる。これは第2図の降水量のダイアグラムで示される。1963年の11月には海面温度は気温をほとんど越えていなく、12月になるまで激しい雨は降らなかった。1965年の前半は海面温度が気温より十分に高く、その結果雨が沢山降った。海水が冷い期間にはずっと雨量が少ない事がわかる。この準乾燥期は1962, 64, 66月の11月に良く代表されている。



第2図 Canton Island (2°48'S, 171°43'W) での月平均の海水温, 気温と降雨量の時間変動 (1950-67)。

2.2 海面気圧の変動

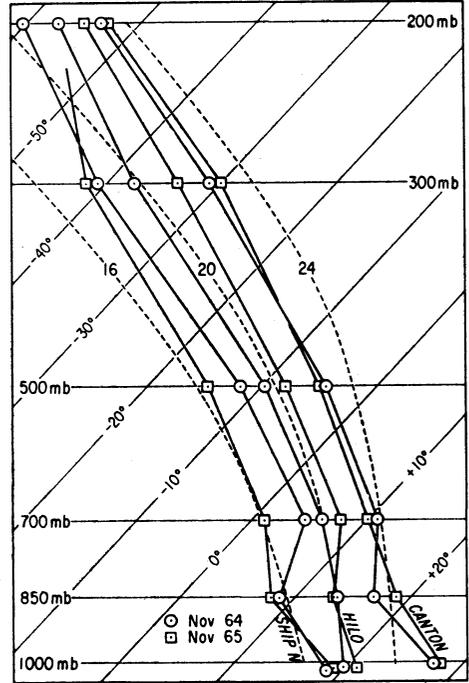
1960年代の準二年周期振動はインドネシアの Djakarta の平滑化した気圧の時系列や Canton Island の海面温度の時系列にも見られる (第3図)。

Djakarta の海面気圧が地球の四分の一周離れた中央太平洋の赤道地域の海面温度と同位相で変化するという事実、赤道に沿って長距離の遠隔作用が働いている事を示す。第3図により11月を試験期間に適えば赤道上の熱源の振動に対する反応が最大になる時期に遠隔作用を調べられて最も都合が良いことがわかる。

11月の海面気圧の地図では (図は省略する) 二年周期振動は赤道上の低気圧の位置の東西への移動にも現われている。1962, 64, 66年の11月には低気圧は New Guinea の附近にあり, 1963, 65年の11月には太平洋の東の方までのびている。この振動のさらに重要な結果は東アジアの冬の初期のモンスーンの気圧傾度が1963, 65年よりも1962, 64, 66年の方が強まっていることにも見られる。

2.3 Walker Circulation

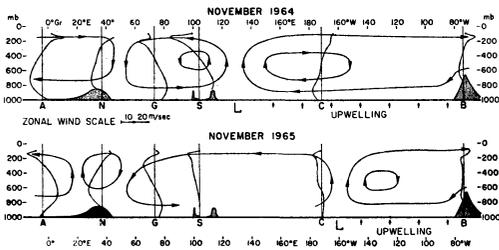
第4図は赤道上の風系が一年ごとにどの様に変動するかを示したもので、1964年11月、低気圧の中心が New Guinea (130°E) の西端にある時と1965年11月低気圧が Canton Island (170°W) の近くにある時が例示してある。第4図には西方のアフリカから東方の南米にかけての6つの赤道附近の観測所における風の緯度成分が高度の関数としてのせてあり、流線がスケッチ的に描かれている。1964年の11月には赤道太平洋の海面の偏東風はインド洋から来る赤道偏西風とぶつかり、インドネシアの低気圧の中心の上で上昇し対流圏上部で発散する。対応する下降流は赤道太平洋の東側とインド洋の西側で起る。私はこの結果太平洋とインド洋に生じる循環を元イ



第5図 Canton Island (2°48'S, 171°43'W), Hilo (17°44'N, 155°4'W) と観測船 N (30°N 140°W) での1964年11月と1965年11月の平均垂直気温分布。ダッシュをつけた曲線は1,000mbから出発して得られる飽和断熱曲線である。Canton Island は1964年11月には、850mbと700mbの間に安定層を示すが1965年11月には存在しない。Hilo では1964年から1965年にかけて上部対流圏が赤道から運ばてくる空気によって温められるにつれて下部対流圏での安定度が増してくる。強まりつつある偏東風ジットの北側の観測船 N では、Hilo とは逆に1964年から1965年にかけて気温が下がった。

ンド気象庁の長官であった Sir Gilbert Walker を記念してと “Walker Circulation” 命名したい。彼は “Southern Oscillation” を発見し、そう名づけたが、これは私自身の解釈では1964年、65年の11月の二つの極端な型により第4図で例示されるような流れのパターンの間を往復するふらつき (vacillation) とみなされる。

1965年の11月には流れのパターンはインド洋と太平洋に二つの Walker Circulation の cell を維持しているが、太平洋上の cell は縮退して太平洋の東半分を占めるにすぎない。海の湧昇流はその部分では持続しているが Canton Island では停止していると想定される。



第4図 1964年11月と1965年11月の平均的な空気の流れの赤道断面。W の符号は $\partial u / \partial x$ から判る。L の記号は太平洋の赤道での最低海面気圧の位置を示す。海の湧昇流はLの位置から南アメリカ沿岸まで及ぶ。

Canton Island とシンガポールでは対流圏下部に非常に強い風の緯度成分を記録し、この二つの観測地の間には大規模な経度方向の風はなく無風状態であると想定される。このように風が弱まり、湧昇流が無くなると、赤道太平洋の中央及び西部は温暖化し、大気の大気対流は最適の条件の下で起っているにちがいない。

第4図の二次元の流線はもちろん厳密に二次元の空気の軌道を表わしていると解釈されてはならない。一つの理由としては地上附近のアジア・モンスーンや上空の逆流は赤道平面をよぎることがある。しかしこのような赤道を越える流れは真冬や真夏より11月の方が顕著でない。しかしながら、いろいろなスケールの擾乱は平均化されると第4図の大規模な流れ図のようになり Walker Circulation と Hadley Circulation との間に、ある程度の空気粒子の交換がなされる。

2.4 気温の鉛直分布

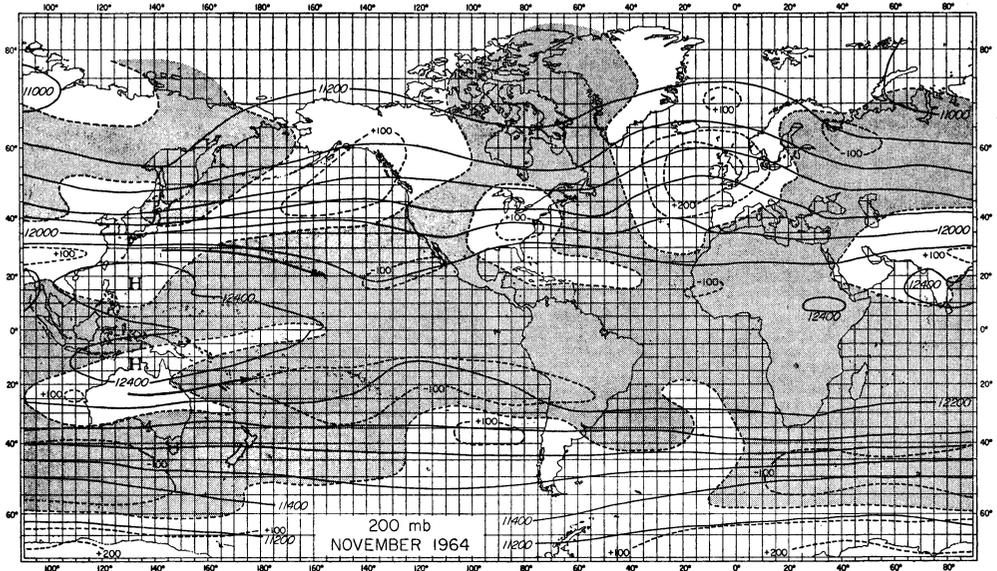
このような気塊の問題を例示する為に第5図の1964、65年の11月の気温の鉛直分布や第6、7図の等圧面高度図をえらんでみる。1964年11月 Canton Island 上空には、平均して850mb~700mbの間に安定層が存在した。安定層の下層の空気塊は冷い湧昇水と接して長い距離を移動しており、その前には南太平洋の Hadley Circulation の貿易風から Walker Circulation へと流入している。Canton Island の安定層より上部の空気塊は大変乾燥し

ており、太平洋の Walker Circulation の東部での下降運動を示唆している。500mb以上の上部対流圏の空気は太平洋の Walker Circulation の西端、Indonesia 上空の上昇域からきている。500mbと海面の間では空気は暖かい海洋に向かって移動しながら下層から徐々に暖まって、上昇域に向っている。

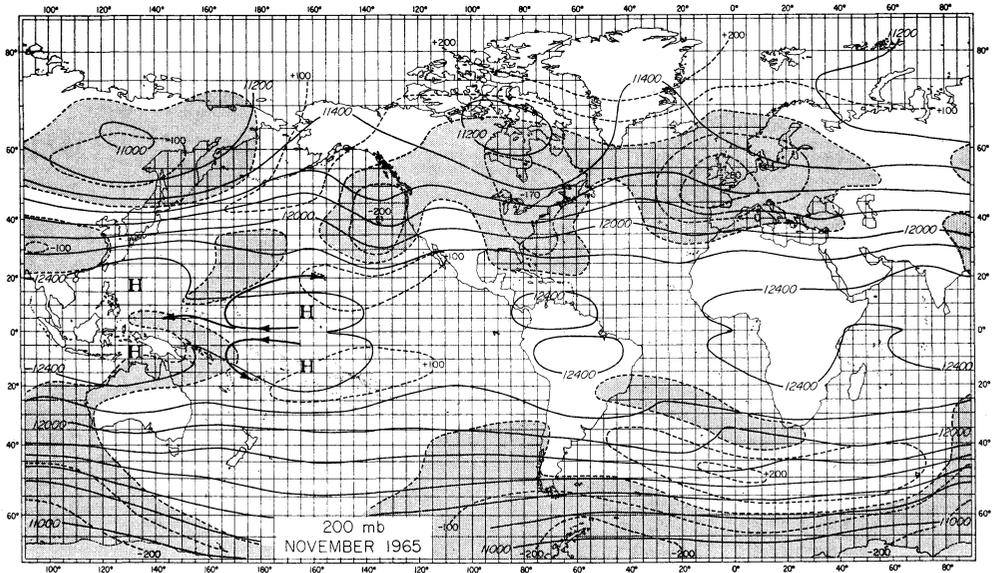
1965年11月までには上昇域は中部太平洋まで移って Canton Island での観測結果は上昇空気塊の熱的構造を示している。安定層は消え海面から対流圏の大部分までに条件付不安定になっている。この事は上昇する cloud tower もしくはそのような雲の meso-scale clusters が周囲より暖かくなり、浮力によって上向きに加速されることを意味する。上昇流の上端では空気は東方に戻り太平洋の Walker Circulation に入るか、西方に移動してインド洋の Walker Circulation に向うか、もしくは、一部は南北両半球の Hadley Circulation の上部に枝分かれして行く。最後のケースが1965年11月には卓越した様で、第5図の Hilo (20°N) では1964年から1965年にかけて、上部対流圏の気温が非常に上がっている。(第5図にはないが、赤道の南の亜熱帯での観測も同じである。)

2.5 赤道帯への影響

第7図は1965年11月200mb面へ上昇した空気の両半球の高気圧的な Hadley Circulation へ枝分れしていく軌



第6図 1964年11月 200mb 等圧面高度 (g.p.m). ダッシュをつけた等値線は1963年11月から 200 mb高度の変化を示し、影をつけた部分が負の変化を示す。



第7図 1965年11月200mb 等圧面高度 (g.p.m.). ダッシュをつけた等値線は1964年11月から200mb 高度の変化を示し、影をつけた部分が負の変化を示す。

跡が示してある。第6図は前の年の1964年11月の様子で、中部太平洋にはそのような枝分れの無かったことを示している。第6図と第7図は更に200mbの高気圧の対称な対が西側に、それぞれ Philippine 近くと北部 Australia の上空に存在する事を示す。これら上層の高気圧系は、暖かい Indonesia の海水と陸から常に熱補給を受取る半永久的 Hadley Circulation と関連しているが、一方中部太平洋上層の高気圧は、1965年に西部及び中部太平洋の赤道海水上で得る熱補給の増加によって発達する Hadley Circulations に起因している。

更に1964年から65年にかけての赤道での昇温とそれに伴う200mb等圧面上昇は全球的に拡がる。第6図と第7図には、200mb面での高度の年変化の等値線が100gpm間隔に引かれていて、前年度の11月より下がった場合、影をつけている。1963年11月から1964年11月までは熱帯の200mb面の低下が、1964年11月から1965年11月までは、200mb面上昇が、第2図 Canton Island で示した太平洋赤道地方の海水の冷却に同じ位相で起っている。

1964年11月から1965年11月にかけての赤道地方の対流圏の昇温は、二つの Walker Circulation の中間の上昇域での海洋から大気への顕熱および潜熱補給の増加と伴に起こり、1964年後半に Indonesia 附近で、次に海水温の上昇と伴に、西部および中部太平洋の広い領域で起っ

ている。この二つの Walker Circulation の上昇流の強化は直ちに東部太平洋と西部インド洋での下降流の増加をもたらす。そこでは下降気流の断熱昇温と放射による熱の放出との熱平衡が破れて断熱昇温が卓越する。かくして上昇に伴う加熱（主に凝結熱による）は素早く赤道帯の約2/3の部分に達する。

Andes 山脈から Africa の赤道地帯にかけての残りの1/3の地域はやはり他の赤道帯と同じ位相で昇温している。この領域での対流圏の昇温は大西洋赤道地方の海水温の変化よりはむしろ Brazil と Africa の赤道地方からの熱供給の年変化に起因していると考えられるが、ここでは、はっきりとは言えない。ただ赤道帯の2/3にも及ぶ1964年から1965年にかけての対流圏の昇温は、大気が赤道断面であまり傾圧的にならない為に、残りの1/3の領域に伝わるはずである。

2.6 中・高緯度への影響

1964年から1965年にかけての赤道地方での昇温が北側に接する大気に及ぼす影響は、やはり1965年11月の200mbの地図（第7図）から判る。北東太平洋から北アメリカ、大西洋、ヨーロッパに及んで影をつけた領域は1964年11月に比べて、200mb面の高度が下がった事を示す。これは影の領域の南端すなわち150°Wから30°Eにおよぶ180°経度の幅の Hadley Circulation の到達する領域に沿って西風が強化したことを意味する。これは平

年より暖かい赤道帯の上部大気における Hadley Circulation の強化から期待できることである。

Hadley Circulation は大きい angular momentum の空気を亜熱帯西風ジェット気流に運び、下層の小さい angular momentum の空気を赤道偏東風に運ぶ。この事は1965年11月の200mbの地図の方が1964年11月の場合よりも特に西部太平洋で、たぶん南アメリカやアフリカの赤道帯でもはっきりと示している。

中緯度の上部偏西風帯における停滞波 (Stationary wave) はやはり二つの11月の地図で異っている。1964年11月には主なトラフが二つしか見られない。

(1) 冷たい大陸と暖かい黒潮との北太平洋の極前線の活動に関して東アジアに一つ、(2) 冷たい大陸と暖かい湾流 (Gulf Stream) との北大西洋の極前線に関して Newfoundland に一つ、1965年11月には赤道地方の中部太平洋の異常な昇温が Hawaii の南に Hadley 高気圧を生じ、その風下の偏西風帯では三つのトラフを維持していて、(1) 北アメリカ西岸沖、(2) 北アメリカ東部、(3) 西ヨーロッパに位置している。

1965年11月の極分線の活動の様子は二つの海洋の北部で異って、太平洋の極前線上の擾乱は、中部太平洋の高

気圧の生成に伴い普通より北側に移り、1964年11月に示したアリューシャン低気圧の普通の位置から40度西、5度北の Bering Sea に深い低気圧を維持している。一方大西洋の極前線上の擾乱は1965年には北アメリカから地中海にかけて上部対流圏の偏西風ジェット気流に沿っている。この極の軸に對する非対称性は極高気圧をグリーンランドへ移動させ、アイスランド近くの低気圧はイギリスまで移っている。

3. まとめ

これらすべての大気中の大規模な調整は赤道太平洋からの熱供給の増加と結びついた論理的な teleconnection である。付け加えて言うならば北極海でさえ影響を受けて Beaufort Sea では南東風の為アラスカとカナダの北極沿岸で氷結が緩み逆に大西洋側では北東風の為、東グリーンランドと北アイスランドでは氷結が進んだ。

最後に、この赤道地方の太平洋に発する大規模な大気の teleconnection はもちろん1964年11月と1965年11月の比較だけでは充分ではない。異った年や季節の数多くの例でこの経験的な発見を確かめなければならないし、海洋と大気を結合した全球モデルを扱う電子計算機で力学的に simulate しなければならない。