

熱帯気象学の展望*

柳 井 迪 雄**

1. はじめに

熱帯気象研究の推進が、これからの気象学の中心課題の一つであると言われ出してからもう数年になる。特に最近、地球大気開発計画 (GARP) が国際的に議論されるようになり、その中でも特に熱帯気象学の研究、熱帯地方での特別観測計画などが強調されている (Charney, 1966; 小倉, 1966; 山本, 1967)。この総合報告の一つの目的も、何故今日特に熱帯気象学の重要性が強調されているのか、その背景を説明することにある。それには先ず、最近熱帯気象学の分野でどのような進歩があり、また他の分野から何が要請されているかを説明しなければならない。

学問の進歩を展望するには、10年位のタイム・スケールをとることが、目先の進歩を過大評価しないためにも、また逆にあまりに進歩がおそいという悲観論におちいらないためにも有効であろう。さて最近10年間に熱帯気象学はどれだけ進歩したか、まず熱帯低気圧論から話をすすめてみよう。

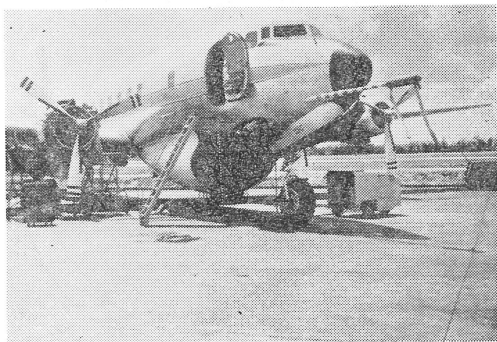
2. 熱帯低気圧の構造

台風やハリケーンなど熱帯低気圧に関する研究は、最近10年間に長足の進歩をとげたといつてよい。第二次大戦後から1955年頃まで、熱帯低気圧の構造は、時たま得られる域内のラジオ・ゾンデ資料、それにアメリカ空軍・海軍などの気象偵察機による資料などから少しずつ解明されていった。Palmén と Riehl (1957) は、これらの資料を一つのモデルにまとめ、それに基づいて角運動量、運動エネルギー、熱エネルギーの収支をはじめて定量的に論じた。この頃からアメリカでの研究は加速度的に進歩する。

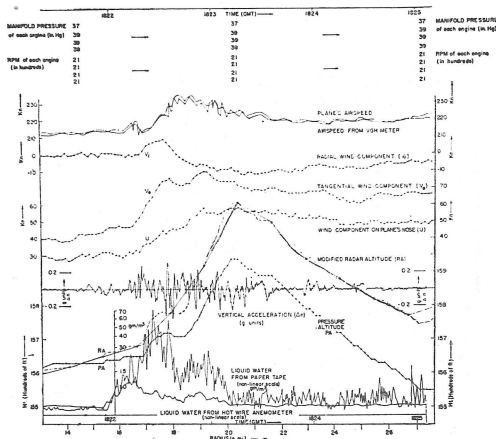
* A review of tropical meteorology

** Michio Yanai 東京大学理学部地球物理学教室,
気象研究所台風研究部
—1967年3月9日受理—

1956年にアメリカ気象局は Simpson の指導の下にマイアミにハリケーン研究所を設け、はじめて気象研究専用の観測機による大がかりなハリケーン内飛行観測を始めた。第1図に現在用いられている DC-6 の写真を示



第1図 National Hurricane Research Laboratory がハリケーン研究用に用いている観測機 DC-6.



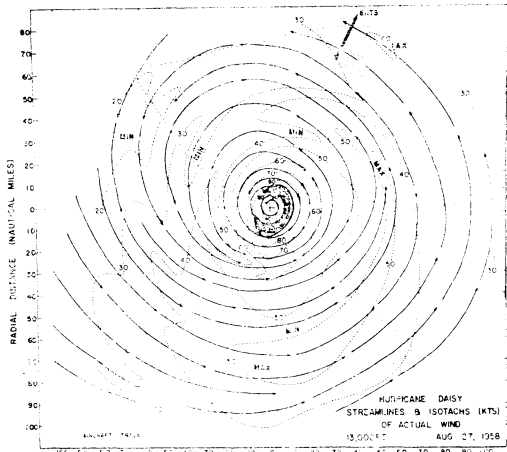
第2図 ハリケーン観測機による飛行経路に沿う気象要素の記録例。激しい対流域を横切るときの垂直加速度、含水量の変化がよく見える (Gray, 1965)。

す。筆者もこの飛行機に同乗してメキシコ湾の上を飛んだことがあるが、気温、気圧、風などの気象要素、飛行高度、位置などは刻々機上の観測者席方々に対し計器表示され、同時に1秒単位で資料は機上で磁気テープに記録される。このほか、レーダーとシネ・カメラによって連続的に降水と雲の分布が写真撮影される。特に重要な風の観測は AN/APN-82 システムと呼ばれるドップラー・シフトを利用した装置により機上で刻々計算される。第2図は、飛行径路に沿って、種々のデータをプロットした例である (Gray, 1965)。

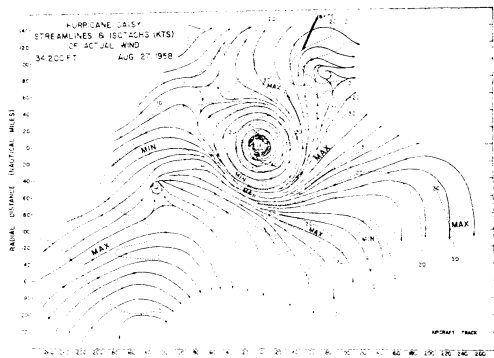
この研究用飛行観測の開始以来、ハリケーンの構造に関する知識は飛躍的に増大した。特に有名な例は1958年8月に行なわれたハリケーン Daisy についての3日間に

わたる観測で、中心部の warm core 領域の詳細な構造が明らかにされた。第3図に高度 13,000ft と高度 34,200 ft における風の分布、第4図に34,200ft (約 250mb) における温度の分布を示す (Colón et al, 1961)。第3図 b では中心附近の cyclonic な循環が、このような高いレベルにまで及んでいることが目立つ。また第4図では中心部に集中した高温域が特徴的である。このハリケーン Daisy の観測資料から、本格的な研究を推進したのは Malkus と Riehl である。Malkus たち (1960, 1961) はシネ・カメラで連続撮影された雲の写真を詳しく解析し (第5図)、ハリケーン中心部で、上空までつき抜けた巨大積乱雲の分布を調べた。Malkus によると、中心から 200 海里以内で、高度 37,000ft において観測された巨大積乱雲は、8月25日には総面積の1%、26日には2.5%、27日には4%を占めていた。ハリケーンが成長期に達した27日には約 200 個の巨大積乱雲が観測されたという。

これより先、1958年に Riehl と Malkus は熱帯収束帯

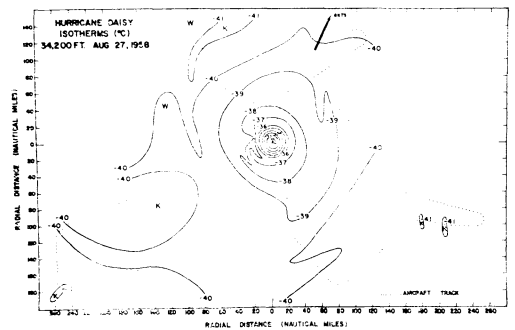


(a)

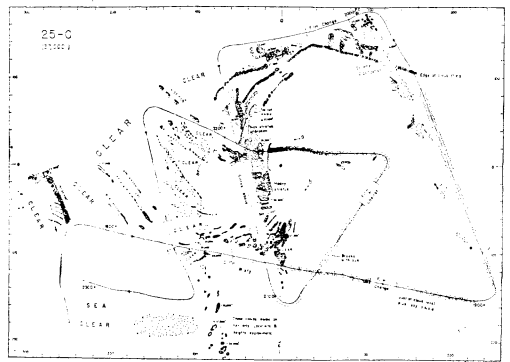


(b)

第3図 ハリケーン Daisy の中心部の気流
(a) 13,000ft (約 4000m)
(b) 34,200ft (約10400m)
(Colón et al, 1961).



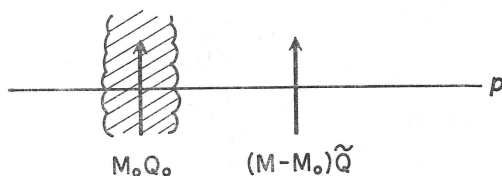
第4図 ハリケーン Daisy 中心部の温度分布。高度 34,200ft (約 250mb) (Colón et al, 1961)。



第5図 ハリケーン Daisy の中心部、高度 37,000ft で観測された積乱雲の分布 (Malkus et al, 1961)。

の熱収支の研究から、空間的には僅かな面積しか占めていない巨大積乱雲が、実は熱を上方へ輸送するには極めて重要な役割を果しているといういわゆる“hot-tower”説を提出していた。

積乱雲中の空気は、海面に近い湿潤層の相当温位を保存して上昇するから、雲の周囲にある空気よりもずっと大きな熱量 Q_0 を持っている。それに積乱雲中の上昇気流は数 m/sec というような大きい値をもつと考えられるので、積乱雲による上方への熱輸送量 $M_0 Q_0$ (M_0 は上昇流束) は、残余の上昇流束 $(M - M_0)$ によってなされる周囲の低い熱量 \tilde{Q} の輸送量 $(M - M_0)\tilde{Q}$ よりもはるかに大きいと考えられる。(第6図)。Riehl と Malkus



第6図 積乱雲による熱の垂直輸送 (Riehl and Malkus, 1961).

(1961) は Daisy の中心部について熱収支の詳しい計算を行ない、ハリケーン内で、巨大積乱雲によってなされる上方への熱輸送が極めて重要であることを強調した。このことは、次節で述べるように、熱帯低気圧の理論にとって重要な事実である。

熱帯低気圧にとって、もう一つ重要な因子は、海面との熱、水蒸気、運動量の交換過程である。古くから、海面上を熱帯低気圧の中心に吹込む気流が殆ど等温を保つことが知られ、これは断熱冷却を打消すだけの海面からの顕熱の供給があることを示している。Malkus と Riehl (1960) は、ハリケーン内の垂直温度分布を、海面上の相当温位の値と結び付けることにより、海面気圧 p_s の下降量と、相当温位 θ_E の上昇量との間に

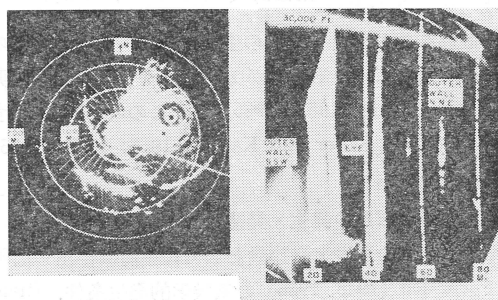
$$-\delta p_s = 2.5 \delta \theta_E$$

なる関係を見出した。海面気圧が 12.5mb 下降するには、相当温位が 5°K 上昇しなければならない。彼等は更に、ハリケーン内下層の摩擦層内を流入する気流について、吹込み角を仮定した半定性的理論により、海面との交換過程を詳しく計算した。それによると中心に近いところでは $720\text{cal}/\text{cm}^2/\text{day}$ の顕熱供給、 $2,420\text{cal}/\text{cm}^2/\text{day}$ の潜熱供給がある。

このような海面の熱源は、熱帯低気圧域内の海面に接する気層の相当温位を定める。そこから湿潤断熱的に上

昇する空気の温度が、熱帯低気圧内の気温の上限を与えることになる。温度分布は(高空で等圧面が変化しないとして)圧力分布を定めるから、それに対応して風が吹き、上空では風はほぼ傾度風になるが、海面近くでは運動量の損失があり、摩擦による吹込みが生ずる。この一連の関係を Riehl (1963) は極めて簡単でエレガントな理論にまとめた。彼は上空の outflow に対しては絶対角運動量保存則 $\frac{dQ}{dt} = 0$ が成立つとし、摩擦層では $v_0 r^2 = \text{constant}$ となるような stress 分布を仮定した。このとき定常状態が維持されるためには、海面からの熱供給、海面への運動量損失の間に或る関係があり、最大風速が定まる。

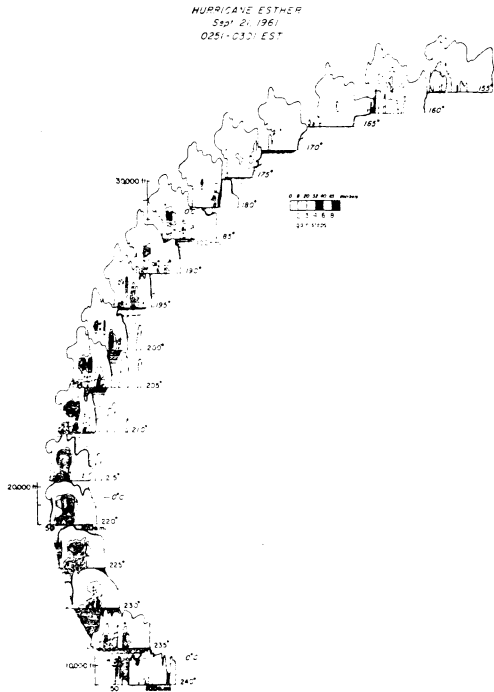
このように熱帯低気圧に関する巨視的な構造論、エネルギー論、定常場の力学はほぼ完成に近づいている。勿論、熱帯低気圧の構造論が全く片付いてしまったわけではない。例えば eye や rain band 等熱帯低気圧内のメソ・スケールの現象について未だ研究すべきことは多い。以前には熱帯低気圧の眼の壁 (eye wall) は上方に行くほど広がった漏斗状の形をしていると考えられていたが、最近のレーダー観測で殆ど垂直であることが判って来た。(Jordan et al 1960, 1961) 第7図はハリケーン



第7図 ハリケーン Donna (1960) の眼
(左) PPI (Jordan, Schatzle and Cronise, 1961)
(右) RHI (Jordan et al, 1961)

Donna (1960) の eye を飛行機搭載のレーダーで撮影したものである。

Spiral rain band に関しては Atlas ら (1963) が、1961年のハリケーン Esther について行なった詳しいレーダー解析がある(第8図)。Atlas らは Spiral band は bright band を伴うことから層雲タイプの降水が、上層からの氷晶の seeding によって生じているとし、何かハリケーン中心から上層で広がる source cloud が氷晶の塊を撒いて行き、撒かれたものがハリケーン内の流線に沿ってできたものが band であるという説明をしてい



第8図 ハリケーン Esther (1961) の spiral band の RHI 断面図 (Atlas et al, 1963).

る。最近このような band の生成を Ekman 境界層内の力学的不安定に求める考えがあり、室内での回転水槽実験 (Faller, 1962, 1963, 1965) や、この不安定に関する理論的研究 (Faller and Kaylor, 1966; Lilly, 1966) が行なわれている。

3. 熱帯低気圧の発生・発達

熱帯低気圧の発生・発達論として10年前に存在した研究は Palmén (1948, 1956) の気候学的発生条件, Riehl (1954) が '40年代の研究をまとめた 偏東風波動からの発達説, それに Haque (1952), Syōno (1953) が提出した線型不安定理論があり, それらはお互いに結び付いてはいなかった。充分な data がないため実証的研究も進まず, 理論の方も問題がはっきりしないまま行詰り状態にあった。筆者自身, 当時大学院で台風の発生を専攻しようとしていたが, 何をどこから勉強したものか, 何も手がかりになるものが見当らなかったことを記憶している。

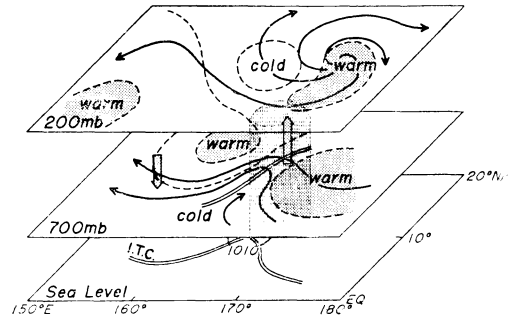
実際の台風の発生過程に関しては, 1958年に行なわれた Marshall 群島での臨時観測資料を用いた筆者の研究 (Yanai, 1961 a) が現在に至るまで最も詳細な研究として通用している。筆者は, この研究に基づいて台風の発

生過程を3つの段階に分け,

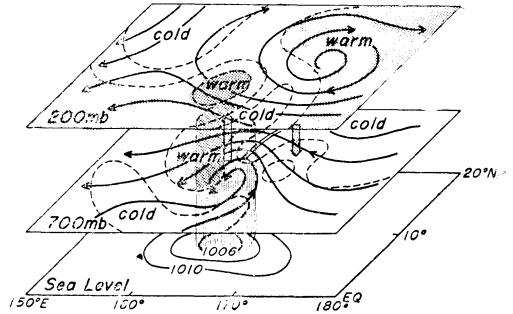
- (i) cold core を持つ偏東風波動の段階
- (ii) 凝結熱により上層から温暖化する段階
- (iii) warm core が出来上って台風として急速に発達する段階を定義した (第9図)。

筆者は更に, この3段階に夫々対応して今後 (i) 力学的上昇気流を伴う偏東風波動自体の研究が重要であること, (ii) はじめ冷たい上昇流が徐々に上層から温暖

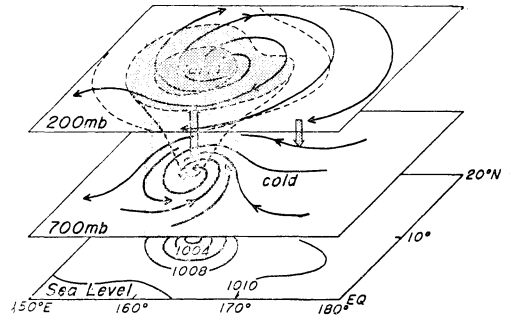
(a) Wave Stage (Initial)



(b) Warming Stage (24hour later)



(c) Developing Stage (48hour later)



第9図 台風発生の3段階 (Yanai, 1961 b)

化する過程は積雲対流による熱の放出とそのたまりによると推論されること、及びその過程を大規模運動に関する量で記述することの重要性、(iii) 傾圧場の完成に伴う等温位面上の慣性不安定が台風発達に重要と思われることを述べた (Yanai, 1961 a, b)。およそ熱帯低気圧の発生ということについて体系らしいものが提出されたのはこれが最初であるといつてよい。

この頃、MIT, Chicago 大学, 東大などで熱帯低気圧の発達を数値実験により再現してみようという試みが始まっていた。Kasahara (1961), Syōno (1962) により発表された初期の計算では、積乱雲のような小規模な対流が激しく発達してしまい、どうしても大規模な台風スケールの循環が生じないことが示され、台風を単純に対流不安定理論で説明することに疑問が持たれ始めた。Lilly (1960), Kuo (1961), Yanai (1961 b) は線型理論を吟味直して、湿潤不安定な成層中では、水平スケールの小さい対流が速く成長することを示した。

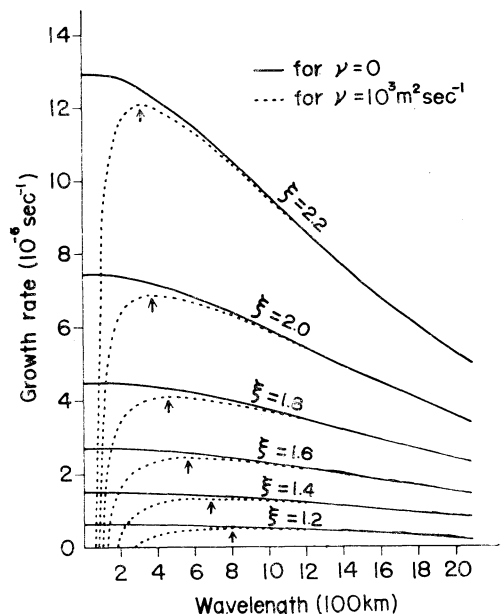
このように、解析理論、数値実験といろいろな面から熱帯低気圧の発達機構に関するイメージが作り直される時期が来た。熱帯低気圧そのものと、その中で凝結熱の放出と輸送にあずかる個々の積乱雲とは対流としては別の機構で生じている。しかしこの両者は相互に助け合っており、熱帯低気圧にとっては積乱雲群は熱源であり、また積乱雲群が組織されるには熱帯低気圧に伴う大規模な収束気流が必要なのである。1960年頃、数値実験の行き詰りを打開するために多くの研究者が考え、討論して次第にこのような思想が出来上って行った。前に述べた Riehl-Malkus (1958, 1961) の hot-tower 説や、Yanai (1961 a) の見出した warm core 形成過程、積乱雲による熱輸送をとりこむ提案 (Yanai, 1961 b) などの重要性は直ちに認識された。

1962年から1964年まで筆者はアメリカにいろいろな研究者に会い、また学会などに出席したが、この期間中に多くの研究者が、熱帯低気圧に積乱雲による熱放出をとりこんだモデルによる数値実験を行なうか、計画していた。一番困難な問題は、積乱雲群を大規模運動を記述する量とどう結び付けるかということである。これは現在でも、本当の意味では解決されておらず、GARPの研究目標の一つになっている。

Ooyama (1963) は、この積雲対流のパラメーター化を正面から行なうことは避け、積乱雲群によって放出、輸送される熱量を直接、Ekman 層における摩擦収束量に比例させるという方式を台風モデルにとり入れた。こ

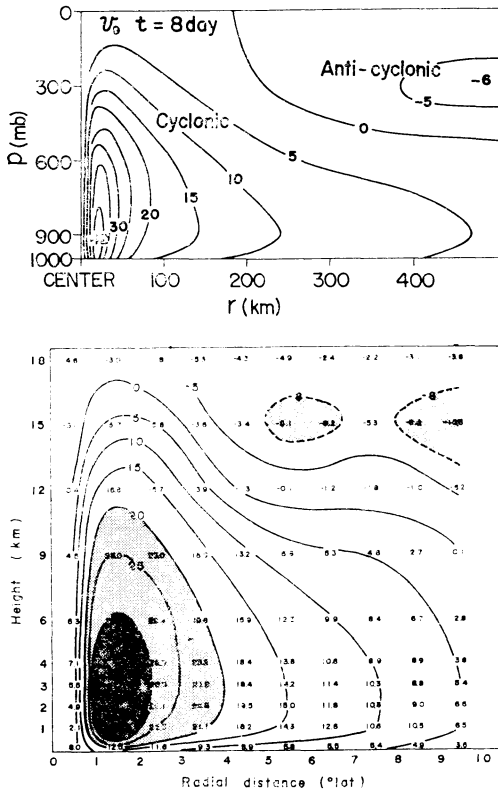
の方法は、実際の熱帯低気圧内で tower が湿潤な海面近くの気層から上空まで貫通している事実をうまく表現している。また Ekman 境界層での収束量は渦度に比例するので、熱の放出を大規模な運動と結び付け、小規模な対流が成長することを避けたことにもなっている。この方式をとり入れたモデル台風の成長率は、従来と異なっており、水平スケールに対する依存性が弱く、かつ実際の熱帯低気圧発達と比較して reasonable な値をとる。

この Ooyama 方式以来、熱帯低気圧の数値実験は第2期に入り、Charney & Eliassen (1964), Ogura (1964), Kuo (1965) 等の結果が発表された。最近 Syōno & Yamasaki (1966) は、これらの論文で共通している傾度風バランスの仮定をやめ、また摩擦層にも、自由大気中にも primitive 方程式系を用い、また自由大気中2層で熱の放出を与えるモデルについて安定性を詳しく調べ、Ooyama 達が得た台風スケールの擾乱は、或る条件で primitive 方程式系でも再現できることを示した。第10図は、理論的に求められた台風スケールの擾乱の成長率を水平スケールの函数として示したものである。Yamasaki (1967) はこの理論的基礎に立って更に4層モデルを作り、primitive 方程式系で台風の発達を準定常状態まで再現することに成功している。第11図上に数値実験で得られた台風内の風速分布を示した。Izawa (1964)



第10図 台風型擾乱の成長率—波長関係 (Syōno and Yamasaki, 1966).

による実際の台風についての分布 (第11図下) と比較してみると面白い。



第11図 (上) は数値実験により得られた台風内の tangential velocity の分布 (Yamasaki, 1967) (下) は実際の台風内の tangential velocity の分布 (Izawa, 1964)

流体力学と熱力学方程式に基づいて、高速度電子計算機による数値積分により、熱帯低気圧の発達過程の simulation が行なえるようになったのは熱帯気象学における最もめざましい進歩の一つである。しかし積雲対流が本当にはどう大規模運動と結び付いているのかは依然残された問題である。また数値実験の対象になっているのは実際の熱帯低気圧の発生・発達過程からみればそのごく一部に過ぎない。次節でとり上げるような初期擾乱についての気象力学は白紙に近く、また台風の発達期において、warm coreに伴う傾圧性がどう寄与しているかの問題 (Klinschmidt, 1951; Yanai, 1961 b) も依然解決されていない。

4. 熱帯地方の擾乱

熱帯地方に存在する大規模な気象擾乱は台風、ハリケーンばかりではない。第12図に夏季西太平洋上 700mb

面での典型的気流分布の1例を示した。本邦南方にある成長した台風のほか、北太平洋高気圧の南側の貿易風中に偏東風波動 (easterly waves) が2個認められる。

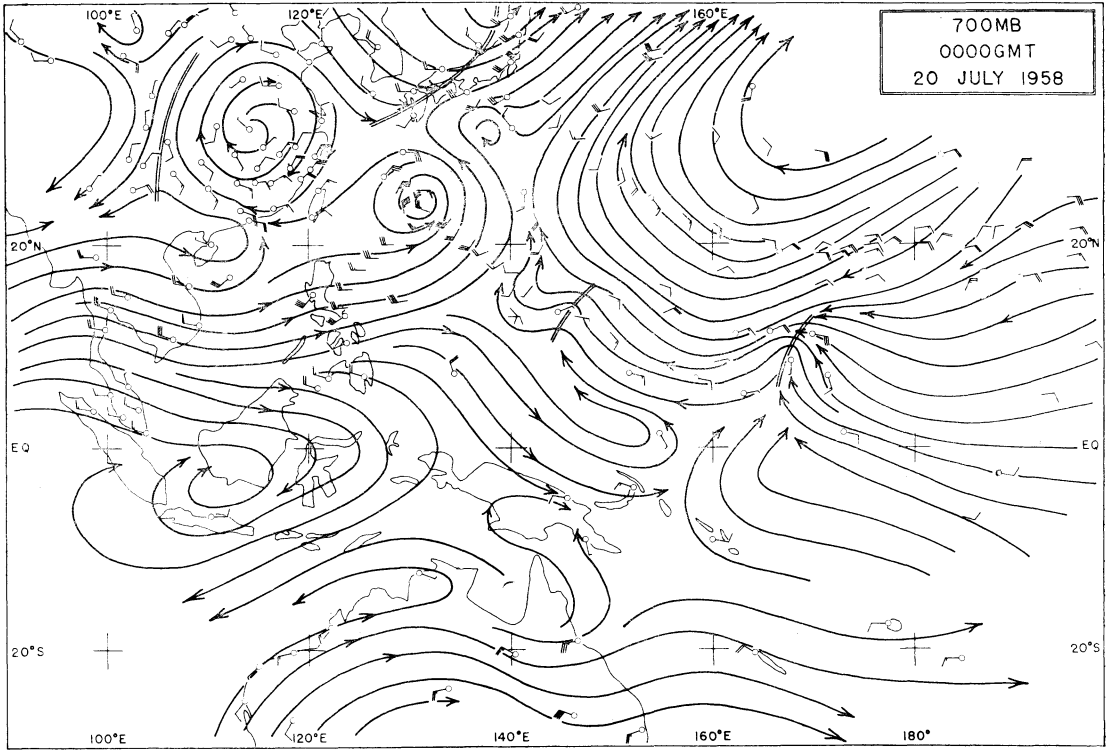
偏東風波動についてはカリブ海の例につき Riehl (1945, 1948a) が、次いで Marshall 群島での例につき Palmer (1951, 1952) が研究した。我国にも田辺 (1960) などの若干の調査があるが、現在に到るまでそれほど本格的なものではなく、偏東風波動の構造、力学については定性的なことしか判っていない。今まで知られていることを要約すると

(i) 波動の波長は約 2000km 程度で、貿易風中を西進する速度は一般流速とほぼ同じか、やゝおそい場合が多い。(ii) 波動の軸 (trough) の東側に水平収束があり、気圧は僅かに上昇する。またしゅう雨などの悪天候を伴う。逆に軸の西側には水平発散と気圧下降があり、雲量は少ない。(iii) 波動を東西の垂直断面でみると、軸は東側に傾いていることが多く、また軸の東側 (雨域) の上層気温は周囲より低い。つまり cold-core 型である。

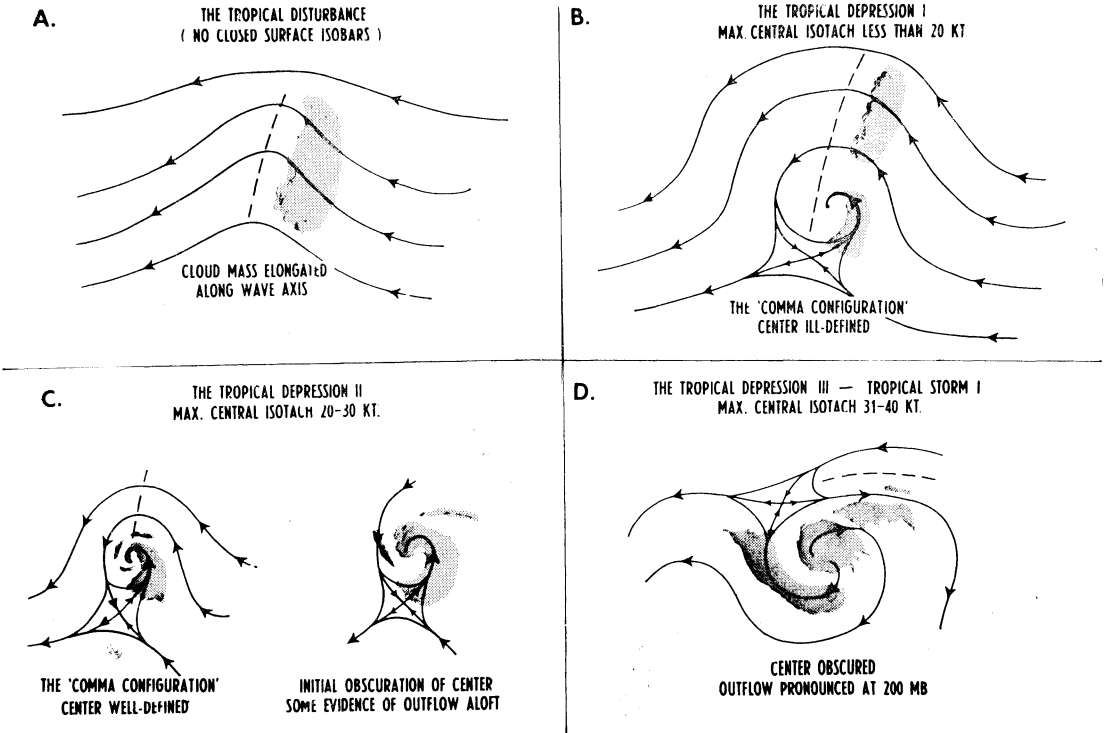
偏東風波動の東側に組織的な上昇気流があることは、気象衛星による雲の写真 (第13図) や、力学計算 (Krisnamurti & Baumhefner, 1966; Yanai & Nitta, 1967) でも認められている。問題はこの上昇域が冷たく、ふつうの傾圧不安定波と異なる点である。一体偏東風波動の運動エネルギーはどこから来るのであろうか? それは貿易風中の水平シャーによる barotropic 不安定に伴うもの (Yanai, 1961b) と考えてよいか、それともこの冷たい上昇域は極めて局所的な現象で、全体としてはやはり傾圧的にも運動エネルギーが補給されるような構造をしているのか未だよく判っていない。

更に厄介なことは、偏東風波動中にも勿論すでに凝結熱の放出は起っているので、断熱的な流体モデルだけを考えていても偏東風波動の属性のどれだけが説明されるかははっきりしない。Yanai (1963) の調査によると、Marshall 群島での降雨と、偏東風波動の通過とは極めて良い相関があり、一寸考えると at random に起っているような熱帯地方の shower も、かなり大規模な擾乱による上昇気流に支配されているようである。

このような大規模擾乱に伴う一般場と、積雲対流との関係を見付けることは、観測的にも、理論的にも難しいことである。航空写真による熱帯海上の雲の分布と大規模な流れとについての膨大な研究 (Malkus & Riehl, 1964) も結局ははっきりした結論を出していない。熱帯低気圧の項でも述べたように、この関係付けこそ今後の研



第12図 西太平洋上 700mb 面の気流図 (1958年7月20日)。

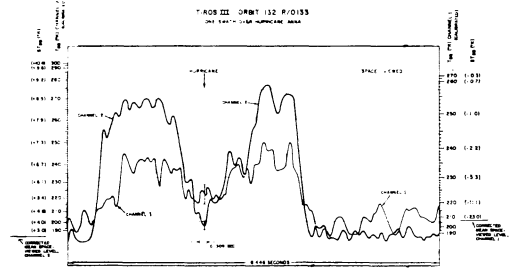


第13図 偏東風波動から熱帯低気圧への発達に伴う雲の分布の変化 (Fett, 1966)。

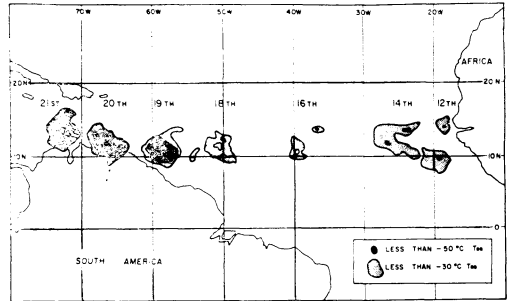
究課題の一つなのであるが、別に浅井博士が詳しく論じられる予定なので本稿では余り触れない。また上記 Malkus & Riehl の航空観測や気象衛星など (Schuetz and Fritz, 1961) により、熱帯海上での雲の列 (cloud street) の存在が判って来たが、この成因について Kuettnner (1959) や Kuo (1962) の理論がある。何れも一般流の垂直シヤーと対流セルの方向性を結び付けたものである。

台風や、ハリケーンの起源となる貿易風中の擾乱は、一体上流のどの辺までさかのぼって追跡されるだろうか。最近では気象衛星によって雲の写真や赤外放射量の資料が常時得られるので、通常の観測網のない海洋上の擾乱の追跡ができる (Fritz, 1962; Erickson, 1963; Erickson & Fritz, 1965)。特に赤外放射の観測からは雲頂高度が推定でき (Bandein et al, 1964, 第14図)、遠くアフリカ沖合からカリブ海までの擾乱の発達が追跡されている。第15図には Fujita & Arnold (1964) によるハリケーン Anna (1961) の前身となった擾乱に伴う雲の移動、発達を示す。最近の気象衛星の発達はまことに急速で、熱帯気象研究者の方が未だ資料を充分使いこなしていない。NIMBUS 衛星の HRIR (高分解能赤外放射) 資料による熱帯擾乱の断片的研究 (Allison et al, 1966) を見ても今後の成果が期待される。

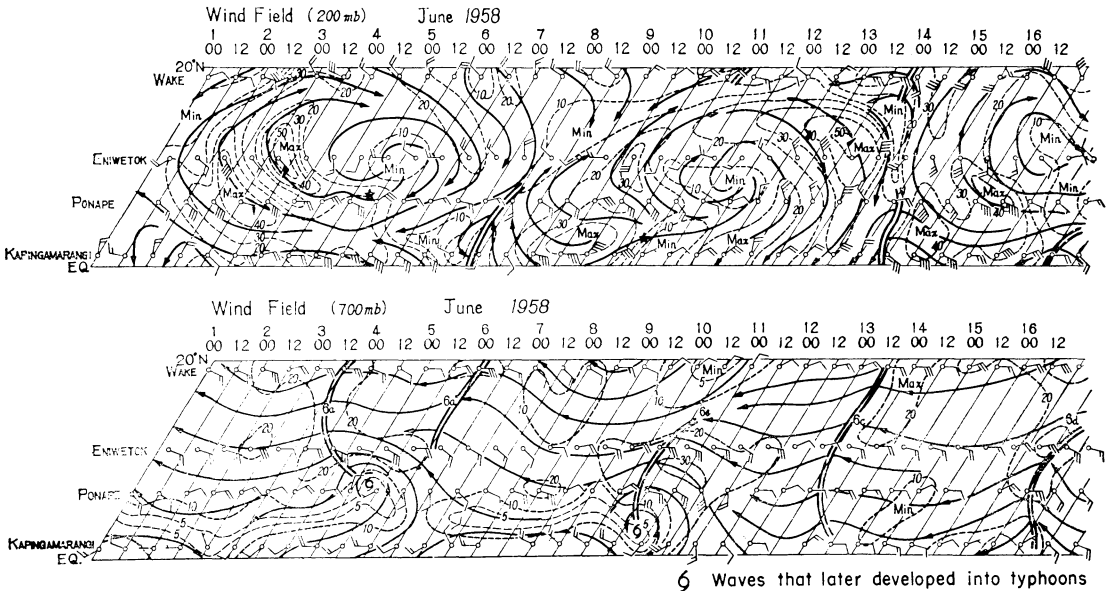
このほか熱帯地方の対流圏上部 (200mb 附近) には、



第14図 TIROS III の第2チャンネル (8~12 μ , window 領域) と第1チャンネル (6.0~6.5 μ , 水蒸気による吸収の強い領域) とで観測された放射量, ハリケーンのあるところは雲頂が高いため放射量が少ない (Bandein et al, 1964)。



第15図 TIROS III で観測されたハリケーン Anna (1961) の初期擾乱に伴う雲からの放射分布 (7月12日~21日) (Fujita and Arnold, 1964)。



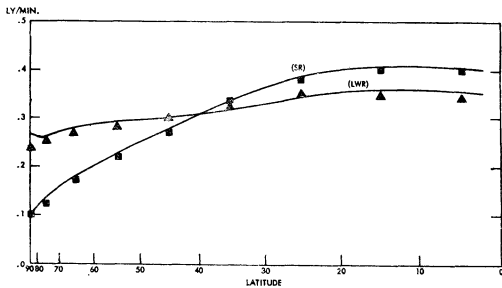
6 Waves that later developed into typhoons

第16図 Marshall 群島上空を次々に通過する擾乱, 200mb (上) では大きな渦動が, 700mb (下) では偏東風中の波動がみられる (1958年6月) (Yanai, 1963)。

下層の偏東風波動とはスケールを異にする擾乱が存在することが知られている。Riehl (1948 b), Yanai (1963) のシノプチックな研究や, Rosenthal (1960a) のスペクトル解析により, このあたりには水平スケール数千 km の雄大な渦動が存在することが知られ (第16図), またその下層擾乱との位置関係が台風の発生に寄与する一つの因子であることが経験的に知られている。しかしこの上部対流圏擾乱についての研究は未だ断片的で, 甚だ不十分なものである。

5. 熱帯大循環と ITCZ

よく知られているように, 大気の global な大循環をひきおこす原動力は赤道地方と極地方との間の放射収支の不均衡である。1年間を平均すると, 大気の上端に入射する日射量, 大気上端から射出される長波放射量は, 緯度 40° あたりを境に, 赤道側にエネルギー過剰, 極側に不足を生ずるような分布をしている (第17図)。大気



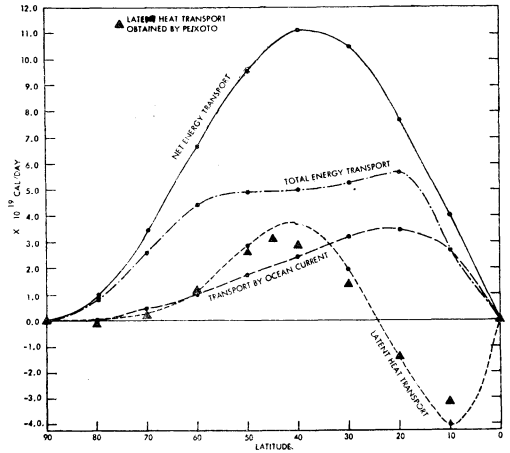
第17図 大気の上端に入射する放射量 (S.R) と, 大気上端からの長波放射量 (LWR) の緯度別分布 (Manabe et al, 1965)

はこのエネルギー不均衡を解消するように, つまりエネルギーを絶えず赤道地方から極地方へ輸送するような運動を起す。これに地球の自転による転向力, 地表や海面との運動量, 顕熱, 潜熱のやりとりが加わって, 現実に見られるような大気の大循環が生じているわけである。

baroclinic な波動擾乱が卓越する中, 高緯度地方と異なって, 熱帯地方での大循環は, ごく大まかには, 昔 Hadley が考えたような貿易風, 子午面循環という図式通りになっている。最近資料の充実に伴って Tucker (1959), Palmén & Vuorela (1963), Palmén (1964), Holopainen (1965) 等によって熱帯地方の Hadley 型子午面循環の存在, そのエネルギー輸送に対する役割は再確認されつつある。

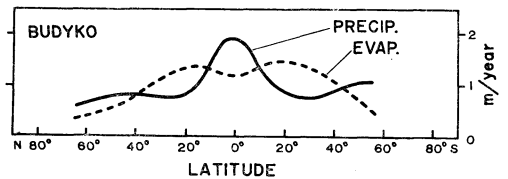
ところで放射収支の不均衡を解消するに要する極向きエネルギー輸送量を, 大気による顕熱 $C_p T$ と位置エネ

ルギー ϕ の輸送量, 潜熱 Lp の輸送量, それに海流による熱輸送量に分けて緯度別に示したものが第18図であ



第18図 放射収支の不均衡を解消するに要する極向きエネルギー flux とその内訳 (Manabe et al, 1965).

る。緯度 24° あたりから赤道側に負の潜熱輸送がある。これは亜熱帯高圧帯で蒸発した水蒸気が, 貿易風により赤道地方へ輸送されていることを示す。両半球から集まる気流は熱帯収束帯 (ITCZ) を作り, 上昇して凝結熱を放出し, 大気に熱源を与えることにより大循環を強めていることになる。Budyko (1964) による年間降水量と蒸発量の緯度別分布を参考に示した (第19図)。

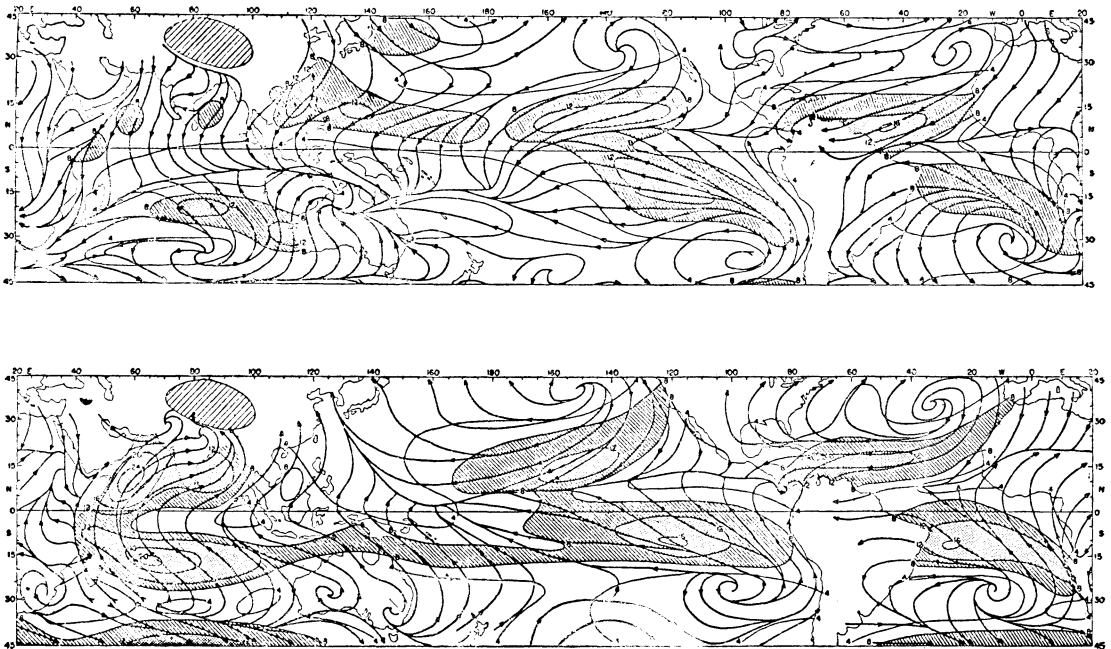


第19図 Budyko (1964) による年間降水量, 蒸発量の緯度別分布 (Manabe et al, 1965 より)。

貿易風が, 亜熱帯高圧帯から赤道地方へ吹送して行く間に海面から水蒸気を吸収して, 貿易風逆転層 (trade-wind inversion) が消失して行く様子などは古くから Riehl et al (1951) などにより研究されている。

最近では大気大循環の数値実験の進歩によって, 特に Manabe & Smagorinsky (1965, 1966) の水サイクルを入れたいわゆる 'wet' model の数値実験で, 熱帯地方での凝結熱の役割が一層はっきりして来た。

両半球からの貿易風の集風線が熱帯収束帯 (ITCZ) であるというとは甚だ簡単だが, 勿論実際の ITCZ は海陸



第20図 熱帯地方の平均流線と等風速線 (上) 1月, (下) 7月 (Riehl, 1954).

分布や季節に支配されて複雑な形をとる。第20図はやゝ古いだが、Riehl (1954) の教科書にある1月と7月の平均流線と等風速線の分布である。ITCZは常に夏半球にある。つまり冬半球の平均子午面循環は、反対側の半球に張り出している。このことが両半球間の角運動量やエネルギー交換にどう効いているかも最近研究され出した (Rao, 1962, 1964; Tucker, 1965; Iida, 1966)。インド洋や西太平洋にはアジア大陸の熱的影響によるモンスーンが北半球の夏に起り、ITCZもこの領域で顕著になる。Obasi (1963) や Tucker (1965) は定常 eddy による夏半球への運動量輸送を論じているが、これには大いにモンスーンが寄与していることと考えられる。

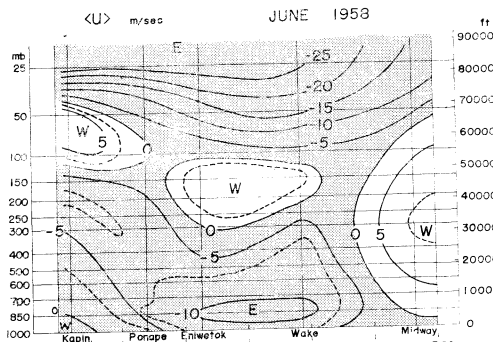
さて ITCZ そのものについて、上記のような平均的乃至気候学的記述以上に我々は何を知っているだろうか。我国では古くから ITCZ と台風の発生が関係あるとされて来たが、その割にみるべき研究はされていない。筆者は、そもそも ITCZ についてどのような文献があるのか調べたことがあるが、第二次大戦後今日に至るまで、はっきりと ITCZ を題目としてされた研究は Alpert (1945, 1946 a, b) による東太平洋 (メキシコ沖) についてのものしかないのである。世界中で最も顕著な ITCZ のみられる西太平洋で充分な研究がないのは、台風国日本の気象学研究者としては怠慢のそしりを免れないように思

う。戦後偏東風波動の概念が輸入されてから、昔ほどの教科書にも書いてあった「赤道前線」というものの実体も、台風発生との関係も忘れ去られた感がある。実はアメリカで偏東風波が強調され、それほど ITCZ が強調されなかったのは、大西洋上にろくな観測がないことと、カリブ海でのハリケーンはいわば台湾あたりで台風を見ているのと同様、原因が何であれ、既に出来ている擾乱をみているからに他ならない。実は偏東風波動自体、ITCZ 上の擾乱として発生するのかも知れない。Fujita & Arnold (1964) や Sadler (1964 a, b) の研究はそれを示唆している。気象衛星によって、たしかに熱帯海洋上に雲の組織的帯状分布が認められ (Hubert, 1961; Allison et al, 1964), ITCZ の日々の実が見直されようとしている。今後 TROMEX などによる観測充実と共に本格的な研究をしたいものである。

6. 熱帯成層圏・中間圏

ここで少し眼を転じて、熱帯地方上空の成層圏・中間圏で最近判って来たことに触れたい。1883年に Krakatoa 火山が爆発したとき、成層圏に舞上った灰が地球を取巻いて東から西へ流れたことから、このあたりには東風が吹いているというのが通念になっていた。一方 Von Berson (1909), Van Bemmeln (1924) は赤道上空のごく狭い領域に偏西風が存在することを見出した。第二次

大戦後になっても、Marshall 群島などでの断片的資料からは、熱帯成層圏全般にわたりクラカトア東風、赤道上の下部成層圏にベルソン西風が夫々存在すると思われていた。第21図は1958年6月の Marshall 群島上空での

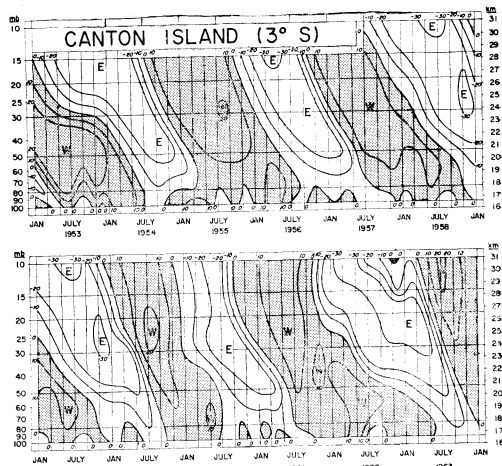


第 21 図 1958年 6月の Marshall 群島上空の平均带状流

平均带状流分布を示す断面図であるが、赤道上 60,000ft (約18km) に中心を持つ带状の西風が、中緯度対流圏の偏西風とは別に存在している。この西風は、赤道直下の海洋中で見出されたやはり带状の Cromwell 海流と対比され、若干の研究者の関心を集めていた。Palmer (1954) は既にクラカトア東風の下限、つまり西風との境界が変動することに注目している。

1960年頃になって、Ebdon(1960), McCreary (1961), Reed et al (1961) 等により、実は赤道上成層圏には、クラカトア東風、ベルソン西風という二つの風系が定常的に存在するのではなく、下部成層圏(16~30km)全体にわたって西風と東風がほぼ1年毎に交代し、しかもその位相は上から下へ伝わって行くような高さによるずれを持っていることが判って来た。従って、それまでの熱帯成層圏風に関する知識は、たまたま或る年の資料に基づいた全く見当違いのものであったわけである。Reed 達多くの研究者による研究は最近立派な総合報告(Reed, 1965) にまとめられている。この数年間に熱帯成層圏について書かれた論文の数は戦後から現在までに例えば台風について書かれた論文よりもはるかに多いのではないと思われる。

第22図は Canton 島(南緯 3°)での1953年から1963年までの月平均東西風の変化を示す垂直時間断面図である。带状風振動の周期は21~30月で、平均約26月。位相は1月に1km位の速さで下方へ伝わる。この約2年の周期は気温にも現われる(Veryard & Ebdon, 1961)。振幅の最大は赤道上で約 2°C、北緯 15°あたりで振幅は



第 22 図 Canton 島における月平均成層圏带状風の変化。単位は m/s (Reed, 1965)

一旦小さくなり、それより高緯度側で再び大きくなる。また気温振動の位相は北緯 15°を境に 180°異なっており、一種の停留振動であることが判る。带状風の変動と気温の変動とは大体温度風の関係式をみたしている(Reed, 1962)。オゾン量の変動にも約2年の周期があり(Funk & Garnham, 1962; Ramanathan, 1963), 赤道側の21kmあたりの高度で気温が高いとき、オゾン量は赤道側で多く、高緯度側で少なくなり、上述の停留振動というモデルに一致する。

興味あることは、この熱帯成層圏の带状風、気温について見付かった約2年周期が、中・高緯度の成層圏にも存在することが調和分析から知られ、更にもっといろいろな気象要素、例えば地上気温、降水量や樹木の年輪、湖水の水位等にまで検出され始めた(Angell & Korshover, 1962, 1963, 1964; Landsberg et al, 1963; Shapiro, 1964)。また南半球における振動も報告されている(Sparrow & Unthank, 1963)。

それではこの約2年という奇妙な周期を持つ現象についてどのようなメカニズムが考えられているだろうか。Staley (1963) は、Shapiro & Ward (1962) の見出した太陽黒点数の約25月の僅かなスペクトル・ピークなどを引用して、何等かの外因により、成層圏上部に周期的な温度変動が起つたとして、それが成層圏中を下方に伝播する波動を生ずるという解釈を提出している。最近 Lindzen (1965, 1966) は放射伝達及び光化学反応を流体力学モデルに導入し、成層圏・中間圏での大気放射量変動に対するレスポンスや、波動の垂直伝播を論じている。

原因が何であろうと、赤道上空に西風、東風の（全球同時の）交代、つまり運動量の集中、発散が起るためには、水平方向か垂直方向に eddy による運動量輸送がなければならない。Tucker (1964, 1965) は成層圏 50mb の風の資料から運動量の南北輸送量を数箇所て計算し、それが約 26 月の周期を示すことを示した。ごく最近 Wallace and Newell (1966) は北半球成層圏の 1958 年 5 月から 1965 年 4 月にわたる約 250 箇所の観測資料に基づいて膨大な運動量輸送の計算を行い、中緯度では 50mb 面以上で、熱帯地方では 30mb 面以上に eddy による運動量輸送及びその発散量に約 2 年の周期があることを結論した。

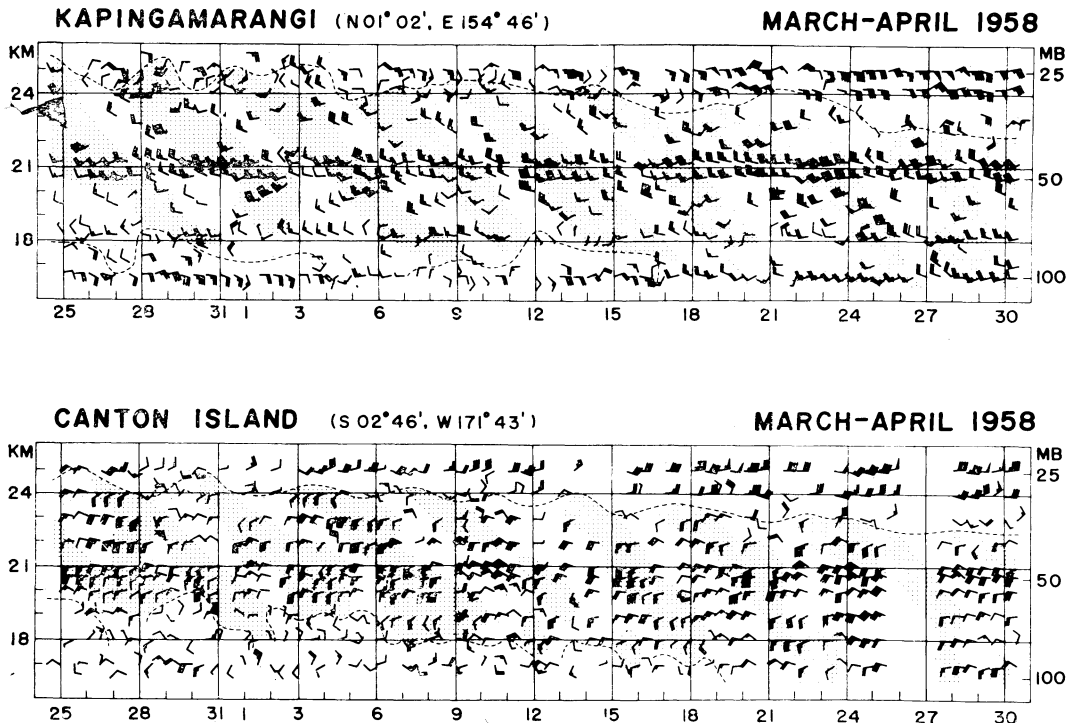
ところで成層圏、特に熱帯成層圏での擾乱は一体どんなものであろうか。運動量輸送に 2 年の周期があったら、擾乱の構造にもそれが現われているだろうか。僅かにカリブ海での Riehl & Higgs (1960) の case study を除いては、熱帯成層圏での擾乱の記述は皆無であった。筆者たちはこの点に着目し、1958 年の Marshall 群島上空での資料を丹念に調べることにした。その結果、約 5 日の周期をもつ風の変動が見出され、それが波長約 1 万 km に及ぶ波長の長い波動が西進するために起って

いることを確めた (Yanai & Maruyama, 1966; Maruyama & Yanai, 1967), 第 23 図は赤道に近い 2 つの観測所での成層圏風の日々変動を示したもので、高度 21km あたりの風向が、約 5 日の周期で WSW と WNW の間を変動しているのが判る。更に南分、北分の交代の位相が毎日 1 km 位づつ下方へ伝わっていることも判る。これは実は西に軸の傾きを持つ超長波が西進しているためである。現在 Maruyama によってスペクトル解析、filter 法による擾乱の構造解析などが行なわれていて近くその全貌が発表される予定である。

ごく最近、Ascension 島 (8°S) や Kwajalein 環礁で気象ロケットによる高度 100km 位までの観測も行なわれている (Reed, 1965, 1966; Masterson et al, 1966)。面白いことに、帯状風の約 2 年の周期は高度 30km 位までしかはつきりせず、32~40km 位では 1 年周期、40km 以上では 6 月周期が卓越しているようである。

7. 低緯度の気象力学と数値予報

熱帯地方の気象擾乱、大循環を力学的に理解し、予報できるためには、理論、観測共一層の強化が必要である。理論上の課題を一口に云えば、積雲対流、台風や偏東風波動などの synoptic scale の擾乱、そして ITCZ,



第 23 図 赤道附近下部成層圏の偏西風中に発見された数日周期の擾乱 (Maruyama, 1967).

貿易風等の大循環的現象という時間、空間スケールを異にする運動の相互作用、その間のエネルギー変換を解明することであろう。それを更に基礎的な問題へ還元して行けば、結局

(a) 積雲対流と一般流の相互作用の研究

(b) 低緯度固有の大気運動の力学

に帰着されるのではなからうか。(a)については浅井博士が別にお書きになる予定なので、ここでは(b)について少し現状を述べておきたい。

ごく最近に至るまで、例えば低緯度地方で、風と気圧の関係はどうなっているのかといった極めて初等的な疑問に対し、気象学的にきちんとした研究は皆無に近かった。僅かに Miyakoda (1960) によるバランス方程式による解析例がある、最近 Rosenthal et al (1967) は、赤道上では等圧線と流線の関係は極めて複雑で、中・高緯度での常識はそのままで通用しないことを示した。Charney (1963) は、熱帯地方での大規模運動のスケール・アナリシスを行ない、低緯度地方では Rossby 数は大きい、成層が安定で Richardson 数も大きいため、運動は中・高緯度地方よりも更に水平非発散流に近くなることを示した。この議論には凝結の影響は入れていないが、低緯度の大気が barotropic に近く、擾乱はしばしば上層、下層で独立に運動するように見える、また擾乱は渦度波の性質を持つなどの経験的事実をよく説明するようである。

Rosenthal (1965), Matsuno (1966) は赤道近くで、コリオリ因子を緯度の一次関数としたときの順圧波の振動解を論じた。特に Matsuno は発散順圧大気について、赤道上での準ロスビー波的運動、慣性重力波的運動を統一的に論じた。またこれら擾乱の振巾が、赤道から $\sqrt{c/\beta}$ (c は重力波の位相速度、 β はロスビー因子) の距離までの間に限られることを示し、Stern (1963), Bretherton (1964) によって示された慣性振動の赤道上への trapping の理論を拡張した。筆者と Maruyama が最近見出した赤道上空成層圏の波動の振巾は赤道上に集中していて、Matsuno の理論的予想とよく一致していることを付記しておこう。

低緯度の気象力学が説明しなければならない具体的な問題の例は偏東風波動の構造と、維持のメカニズムである。これについては Rosenthal (1960 b) の定性的理論があるが、筆者たちは先ず、偏東風波動がどの程度まで、水平シャーを持つ貿易風中の不安定波動として説明できるかを研究したいと思っている。

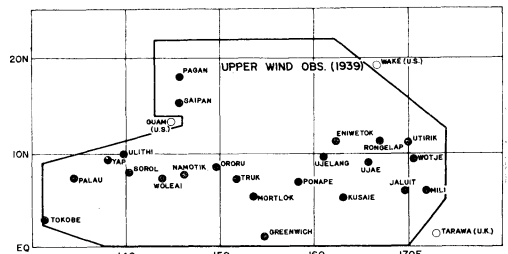
低緯度気象力学は未だ基礎研究の段階であり、すぐに数値予報が問題になるとは思えないが、解析のむづかしい気圧場よりも、航空機などの風の資料を活用して客観解析を行い、それによって流線函数による順圧予報を行うことが第一歩であろう、それに関連した研究もいくつかされている (Bedient and Vederman, 1964; Hawkins and Rosenthal, 1965; Yanai, 1964)。

8. GARP 計画と TROMEX

現在 WMO が計画している WWW 計画や ICSU-IUGG 内の大気科学委員会で議論が進められている地球大気開発計画 (GARP) では、熱帯地方に特別な研究観測網を展開することも考えられており、国際的に working group を作ってその計画を練ることになっている。

熱帯における気象現象をもっと正確に把握し、理解し、ひいては大気大循環研究に役立たせるためには、何をおいてももっとしっかりした観測を行なう必要がある。およそ熱帯地方の気象現象を解析した経験のある人なら、これまでいかに僅少な断片的材料から、想像力を働かせていろいろな研究がされて来たかを知っているであろう。

勿論、熱帯地方に恒久的に現在よりも飛躍的に稠密な観測網をおくことは経済的に不可能に近い。しかし現状はまた逆にひどすぎる。synoptic scale の擾乱をつかまえるにも、例えば西太平洋上の観測網は粗に過ぎる。我中央気象台が帝国海軍時代の水路部と共同して展開した 1939年 (昭14) の南洋における観測網 (第24図) と較べ



第24図 昭和14年における夏季特別上層観測網。

ると、現在維持されている観測所は僅か数点に過ぎず、これでは ITCZ などの本格的な研究は不可能である。

数年前までは、熱帯における観測網強化を唱える人はごく稀だった。気象衛星が出現すると、これによって観測所が不要になるかの如く考える人もいた。気象観測を目先の予報、警報のためだけに限定するならそのような発想法もあり得るわけである。しかし時折行なわれた原水爆実験時などの臨時観測資料を使ったことのある研究

者なら熱帯地方で、あの程度の観測網を1年間でも純学術用に展開できたらどれほど成果が得られるかを知っている筈である。

筆者は日米科学協力計画の話が出たときに、南洋での共同観測を考えて答申したことがあるが、当時は時期尚早であった。在米中に知ったことは、一般にアメリカの研究者も熱帯での観測ということに消極的であるということだった。この雰囲気ですっかり変えたのは Charney 達の熱意である。Charney の要請で Riehl と LaSeur が熱帯における研究観測網の計画を考え始め、筆者も参加して草案を作ったことがある。結局こうしたものが、現在、NCAR が行なっている Line 諸島実験 (第25図) や、GARP における TROMEX (Tropical Meteorology Experiment) 計画にまで発展して来たわけである。

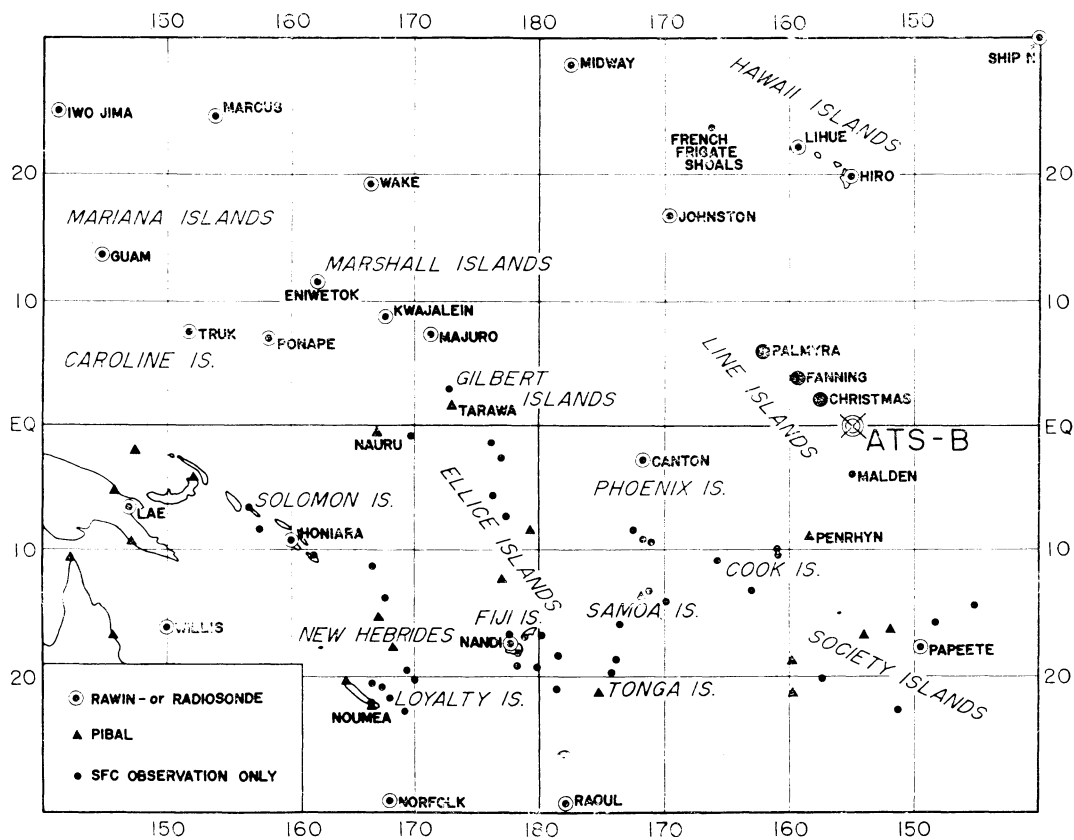
今年の2月から始まっている Line 諸島での予備観測では、静止衛星 ATS-B による雲の観測、Christmas, Fanning, Palmyra 3島での臨時高層観測、NCAR の小

型機による観測、Woods Hale 海洋研究所の Bunker による flux 測定、放射量測定用の飛行機観測、ESSA の観測船1隻による船上ゾンデ観測が行なわれ、この附近での熱帯収束線と積雲活動の関係の主対象に研究を行なうことになっている。この全計画の責任者 Zipser 博士は、筆者が在米中は未だ大学院学生であった。

アメリカ側はこれら一連の pre-TROMEX 計画が旨く行ったら、国際協力で Marshall-Gilbert 方面あたりで TROMEX をやりたいと呼びかけて来ている。我国もこの辺で積極的な姿勢をとりたいものである。いつも何か国際計画があると、すべてが決定されてから参加するという傾向があるが、本来 TROMEX などは日本から言い出しておかしくない筈のものである。それには勿論ふだんの基礎研究を積上げて、どういう密度の、何を対象とした観測が必要かを考えておかねばならない。

附記

筆者はこれまで東大理学部地球物理学教室、気象研究



第25図 TROMEX 実施に最適な Marshall-Gilbert 諸島方面の現在の観測網と Line 諸島における 1967年の予備観測に用いられる観測点 (大きい黒丸)、静止衛星 ATS-B の位置も示した。

所台風研究部，コロラド州立大学大気科学教室，アメリカ気象局ハリケーン研究所等で熱帯気象学を勉強する機会に恵まれ，正野教授はじめ多くの先輩，友人のお世話になった。それらは皆直接，間接に本稿執筆の材料になっている。丸山健人，山岬正紀の両君からは未発表の図面を特に本稿用にに使わせていただいた。製図をして下さった赤松郁子夫人と文献表の作製や原稿の点検，浄書などいろいろお手伝いをお願いした小野塚雅子嬢に感謝する。

文 献

* 印は教科書又は総合報告である

1. 熱帯気象学一般
- * Riehl, H., 1954: Tropical meteorology. McGraw Hill, 392pp.
- * 柳井迫雄, 1967: 熱帯気象学, 科学, **37**, 132-136.
2. 熱帯低気圧の構造
- Atlas, D., K.R. Hardy, R. Wexler and R.J. Boucher, 1963: The origin of hurricane spiral bands. 3rd Technical Conference on Hurricanes and Tropical Meteorology, Mexico City, (Geofisica Internacional Vo. 3) 123-132.
- Colón, J.A., and Staff, N.H.R.P., 1961: On the structure of hurricane Daisy 1958: N.H.R.P. Report No. 48, 102pp.
- * Donaldson, R.J., and D. Atlas, 1964: Radar in tropical meteorology. Proc. Symp. Tropical Meteorology, Rotorua, New Zealand, 1963.
- * Dunn, G.E., and B.I. Miller, 1964: Atlantic hurricanes. (2nd ed.) Louisiana State University Press. 377pp.
- Faller, A.J., 1962: An experimental analogy to and proposed explanation of hurricane spiral bands. Proc. 2nd Technical Conferences on hurricanes, 1961, Miami Beach. N.H.R.P. Report No. 50, 307-313.
- Faller, A.J., 1963: An experimental study of the instability of the laminar Ekman layer. J. Fluid Mech., **15**, 560-576.
- Faller, A.J., 1965: Large eddies in the atmospheric boundary layer and their possible role in the formation of cloud rows. J. atmos. Sci., **22**, 176-184.
- Faller, A.J., and R.E. Kaylor, 1966: A numerical study of the instability of the laminar Ekman boundary layer. J. atmos. Sci., **23**, 466-480.
- * Gentry, R.C., 1963: Structure of tropical storms. Proc. Inter-regional Seminar on Tropical Cyclones in Tokyo, 133-158.
- Gray, W.M., 1965: Calculations of cumulus vertical draft velocities in hurricanes from aircraft observations. J. applied Meteor., **4**, 463-474.
- Gray W.M., 1966: On the scales of motion and internal stress characteristics of the hurricane. J. atmos. Sci., **23**, 278-288.
- Hilleary, D.F. and F.E. Christensen, 1957: Instrumentation of National Hurricane Research Project aircraft. National Hurricane Research Project, Report No. 11, 71pp.
- Jordan, C.L., D.A. Hurt, Jr., and C.A. Lowrey, 1960: On the structure of hurricane Daisy on 27 August 1958. J. Meteor., **17**, 337-348.
- Jordan, C.L., and F.J. Schatzle, 1961: The "double eye" of hurricane Donna. Mon. Wea. Rev., **89**, 354-356.
- Jordan, C.L., F.J. Schatzle, and W.G. Cronise, 1961: Some interesting radar features of hurricane Donna. Proc. 9th Weather Radar Conference, 6-11. Amer. Meteor. Soc.
- Lilly, D.K., 1966: On the instability of Ekman boundary flow. J. atmos. Sci., **23**, 481-494.
- Malkus, J.S., 1960: Recent developments in studies of penetrative convection and an application to hurricane cumulonimbus towers. in **Cumulus Dynamics**, Pergamon Press, 65-84.
- Malkus, J.S., and H. Riehl, 1960: On the dynamics and energy transformations in steady-state hurricanes. Tellus, **12**, 1-20.
- Malkus, J.S., and C. Ronne and M. Chaffee, 1961: Cloud patterns in hurricane Daisy, 1958. Tellus, **13**, 8-30.
- Palmén and H. Riehl, 1957: Budget of angular momentum and energy in tropical cyclones. J. Meteor., **14**, 150-159.
- Riehl, H., Some relations between wind and thermal structure of steady state hurricanes. J. atmos. Sci., **20**, 276-287.
- Riehl, H., and J.S. Malkus, 1958: On the heat balance in the equatorial trough zone. Geophysica, **6**, 503-538.
- Riehl, H., and J. Malkus, 1961: Some aspects of hurricane Daisy, 1958. Tellus, **13**, 181-213.
3. 熱帯低気圧の発生・発達
- Charney, J.G., and A. Eliassen, 1964: On the growth of the hurricane depression. J. atmos. Sci., **21**, 68-75.
- Haque, S.M., 1952: The initiation of cyclonic circulation in a vertically unstable stagnant air mass. Quart. J. Roy. meteor. Soc., **78**, 394-406.

- Izawa, T., 1964: On the mean wind structure of typhoon. Typhoon Research Laboratory Technical Report No. 2, 19pp.
- Kasahara, A., 1961: A numerical experiment on the development of a tropical cyclone. *J. Meteor.*, **18**, 259-282.
- Kleinschmidt, E., 1951: Grundlagen einer Theorie der tropischen Zyklonen. *Archiv Meteor. Geophys. Bioklim. A*, **4**, 53-72.
- Kuo, H.L., 1961: Convection in conditionally unstable atmosphere. *Tellus*, **13**, 441-459.
- Kuo, H.L., 1965: On formation and intensification of tropical cyclones through latent heat release by cumulus convection. *J. atmos. Sci.* **22**, 40-63.
- Lilly, D.K., 1960: On the theory of disturbances in a conditionally unstable atmosphere. *Mon. Wea. Rev.*, **88**, 1-17.
- Ogura, Y., 1964: Frictionally controlled, thermally driven circulations in a circular vortex with application to tropical cyclones. *J. atmos. Sci.*, **21**, 610-621.
- Ooyama, K., 1963: A dynamical model for the study of tropical cyclone development. *Dept. Meteor. Oceanography. New York Univ.*, 26pp.
- Palmén, E., 1948: On the formation and structure of tropical hurricanes. *Geophysica*, **3**, 26-38.
- * Palmén, E., 1956: Formation and development of tropical cyclones. *Proc. Tropical Cyclone Symposium, Brithbane*, 213-231.
- Rosenthal, S.L., 1964: Some attempts to simulate the development of tropical cyclones by numerical methods. *Mon. Wea. Rev.*, **92**, 1-21.
- Syōno, S., 1953: On the formation of tropical cyclones. *Tellus*, **5**, 179-195.
- Syōno, S., 1962: A numerical experiment of the formation of tropical cyclones. *Proc. Inter. Symp. Numerical Weather Predictions, Tokyo, 1960*, 405-418.
- Syōno, S., and M. Yamasaki, 1966: Stability of symmetrical motions driven by latent heat release by cumulus convection under the existence of surface friction. *J. meteor. Soc. Japan*, **44**, 353-375.
- Yamasaki, M., 1967: Numerical simulation of tropical cyclone development with the use of primitive equations. (未印刷)
- Yanai, M., 1961a: A detailed analysis of typhoon formation. *J. meteor. Soc. Japan*, **39**, 187-214.
- Yanai, M., 1961b: Dynamical aspects of typhoon formation. *J. meteor. Soc. Japan*, **39**, 282-309.
- * Yanai, M., 1964: Formation of tropical cyclones. *Rev. Geophys.*, **2**, 367-414.
4. 熱帯地方の擾乱
Allison, L.J., G.W. Nicholas and J.S. Kennedy, 1966: Examples of the meteorological capability of the high resolution infrared radiometer on the Nimbus I Satellite. *J. appl. Meteor.*, **5**, 314-333.
- Bandeem, W.R., V. Kunde, W. Nordberg and H.P. Thompson, 1964: TIROS III meteorological satellite radiation observations of a tropical hurricane. *Tellus*, **16**, 481-502.
- Erickson, C.O., 1963: On incipient hurricane near the west African coast. *Mon. Wea. Rev.*, **91**, 61-68.
- Erickson, C.O., and S. Fritz, 1965: Early history of tropical storm Katherine, 1963. *Mon. Wea. Rev.*, **93**, 145-153.
- Fett, R.W., 1966: Upper-level structure of the formative tropical cyclone. *Mon. Wea. Rev.*, **94**, 9-18.
- Fritz, S., 1962: Satellite pictures and the origin of hurricane Anna. *Mon. Wea. Rev.*, **90**, 507-513.
- Fujita, T., and J.E. Arnold, 1964: Detection of hurricanes using TIROS infra-red data. *Proc. Symp. Tropical Meteorology, New Zealand*. 582-589.
- Krishnamurti, T.N., and D. Baumhefner, 1966: Structure of a tropical disturbance based on a solutions of a multilevel baroclinic model. *J. appl. Meteor.*, **5**, 396-406.
- Kuettner, J., 1959: The band structure of the atmosphere. *Tellus*, **11**, 267-294.
- Kuo, H.L., 1962: Perturbations of plane couette flow in stratified fluid and origin of cloud-streets. *The Univ. of Chicago, Dept. of the Geophysical Sciences*, 60pp.
- * Malkus, J.S., and H. Riehl, 1964: Cloud structure and distributions over the tropical Pacific ocean. *Univ. California Press*, 226pp.
- * Palmer, C.E., 1951: Tropical meteorology. *Compendium of Meteorology, Amer. Meteor. Society*, 859-880.
- * Palmer, C.E. 1952: Tropical meteorology. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, **78**, 126-163.
- Riehl, H., 1945: Waves in the easterlies and the polar front in the tropics. *Dept. Meteor. Univ. Chicago, Misc. Rept. No. 17*, 79pp.
- Riehl, H., 1948a: On the formation of west Atlantic Hurricanes. *Dept. Meteor. Univ. Chicago, Misc. Rept.*, No. 24, 1-64.
- Riehl, H., 1948b: On the formation of typhoons.

- J. Meteor., **5**, 247-264.
- Rosenthal, S.L., 1960a: Some estimates of the power spectra of large-scale disturbances in low latitudes. *J. Meteor.* **17**, 259-263.
- Schuetz, J., and S. Fritz, 1961: Cloud streets over the Caribbean Sea. *Mon. Wea. Rev.*, **89**, 375-382.
- 田辺三郎, 1960 (昭35): 偏東風波動について. *天気*, **7**, 231-235.
- Yanai, M., 1963: A preliminary survey of large-scale disturbances over the tropical Pacific region. *Geofisica Internacional (Mexico)*, **3**, 73-84.
- Yanai, M., and T. Nitta, 1967: (未印刷)
5. 熱帯大循環と I.T.C.Z.
- Allison, L.L., T.I. Gray, and G. Warnecke, 1964: A quasi-global presentation of TIROS III radiation data. National Aeronautics and Space Administration, 23pp.
- Alpert, L., 1945: The intertropical convergence zone of the eastern Pacific region (I). *Bull. Amer. meteor. Soc.*, **26**, 426-432.
- Alpert, L., 1946a: The intertropical convergence zone of the eastern Pacific region (II). *Bull. Amer. meteor. Soc.*, **27**, 15-29.
- Alpert, L., 1946b: The intertropical convergence zone of the eastern Pacific regions (III). *Bull. Amer. meteor. Soc.*, **27**, 62-66.
- Holopainen, E.O., 1965: On the role of mean meridional circulations in the energy balance of the atmosphere. *Tellus*, **17**, 285-294.
- Hubert, L.F., 1961: A subtropical convergence line of the south Pacific. *J. geophys. Res.*, **66**, 797-812.
- Iida, M., 1966: Computations of the transports of momentum, sensible and latent heat across the equator. (太平洋会議, 講演, 未印刷)
- Manabe, S., J. Smagorinsky, and R.F. Strickler, Simulated climatology of a general circulation 1965: model with a hydrologic cycle. *Mon. Wea. Rev.*, **93**, 769-798.
- Manabe, S., and J. Smagorinsky, 1966: Simulated climatology of a general circulation model with a hydrologic cycle. II. Analysis of the tropical atmosphere. GFDL, ESSA 31pp.
- Obasi, G.O.P., 1963: Poleward flux of atmospheric angular momentum in the southern hemisphere. *J. atmos. Sci.*, **20**, 516-528.
- * Palmén, E., 1964: General circulation of the tropics. *Proc. Symp. on Tropical Meteorology*. New Zealand, 3-30.
- Palmén, E., and L.A. Vuorela, 1963: On the mean meridional circulations in the Northern Hemisphere during the winter season. *Quart. J. Roy. meteor. Soc.*, **89**, 131-138.
- Rao, Y.P., 1962: Transequatorial exchange of angular momentum. *Quart. J. Roy. meteor. Soc.*, **88**, 96-99.
- Rao, Y.P., 1964: Interhemispheric circulation. *Quart. J. Roy. meteor. Soc.*, **90**, 190-194.
- Riehl, H., T.C. Yeh, J.S. Malkus and N.E. Laseur, 1951: The north-east trade of the Pacific ocean. *Quart. J. Roy. meteor. Soc.*, **77**, 598-626.
- Sadler, J.C., 1964a: Tropical cyclones of the eastern North Pacific as revealed by TIROS observations. *J. appl. Meteor.* **3**, 347-366.
- Sadler, J.C., 1964b: TIROS observations of the summer circulation and weather patterns of the eastern north Pacific. *Proc. Symp. Tropical Meteorology*, Rotorua, New Zealand 1963. 553-571.
- Tucker, G.B., 1959: Mean meridional circulations in the atmosphere. *Quart. J. Roy. meteor. Soc.*, **85**, 209-224.
- Tucker, G.B., 1965: The equatorial tropospheric wind regime. *Quart. J. Roy. meteor. Soc.*, **91**, 140-150.
6. 熱帯成層圏・中間圏
- Angell, J.K., and J. Korshover, 1962: The biennial wind and temperature oscillations of the equatorial stratosphere and their possible extension to higher latitudes. *Mon. Wea. Rev.*, **90**, 127-132.
- Angell, J.K., and J. Korshover, 1963: Harmonic analysis of the biennial zonal-wind and temperature regimes. *Mon. Wea. Rev.*, **91**, 537-548.
- Angell, J.K., and J. Korshover, 1964: Quasi-biennial variations in temperature, total ozone, and tropopause height. *J. atmos. Sci.*, **21**, 479-492.
- Belmont, A.D., and D.G., Dartt, 1964: Double quasi-biennial cycles in observed winds in the tropical stratosphere. *J. atmos. Sci.*, **21**, 354-360.
- Belmont, A.D., D.G. Dartt, and M.S. Ullstad, 1966: The 10.7cm solar flux and the 26-month oscillation. *J. atmos. Sci.*, **23**, 314-319.
- Dartt, D.G., and A.D. Belmont, 1964: Periodic features of the 50-millibar zonal winds in the tropics. *J. geophys. Res.*, **69**, 2887-2893.
- Ebdon, R.A., 1960: Notes on the wind flow at 50mb in tropical and sub-tropical regions in January 1957 and January 1958. *Quart. J. Roy. meteor. Soc.*, **86**, 540-543.

- Ebdon, R.A., 1961: Some notes on the stratospheric winds at Canton Island and Christmas Island. *Quart. J. Roy. meteor. Soc.*, **87**, 322-331.
- Ebdon, R.A., and R.G. Veryard, 1961: Fluctuations in equatorial stratospheric winds. *Nature*, **189**, 791-793.
- Funk, J.F., and G.L. Garnham, 1962: Australian ozone observations and a suggested 24-month cycle. *Tellus*, **14**, 378-382.
- Landsberg, H.E., J.M. Mitchell, H.L. Crutcher and F.T. Quinlan, 1963: Surface signs of the biennial atmospheric pulse. *Mon. Wea. Rev.*, **91**, 549-556.
- Lindzen, R.S., 1965: The radiative-photochemical response of the mesosphere to fluctuations in radiation. *J. atmos. Sci.*, **22**, 469-478.
- Lindzen, R.S., 1966: Radiative and photochemical processes in mesospheric dynamics: Part II, vertical propagation of long period disturbances at the equator. *J. atmos. Sci.*, **23**, 334-343.
- Maruyama, T., 1967: Large-scale disturbances in the equatorial lower stratosphere. (未印刷)
- Maruyama, T., and M. Yanai, 1967: Evidence of large-scale wave disturbances in the equatorial lower stratosphere. *J. meteor. Soc. Japan*, **45**, (印刷中)
- Masterson, J.E., W.E. Hoehne, D.A. Lea and T. R. Carr, 1966: Strato-mesospheric measurements of density, temperature, and other meteorological variables in the central tropical Pacific. *J. appl. Meteor.*, **5**, 182-188.
- McCreary, F. E., 1961: Variation of the zonal winds in the equatorial stratosphere. Joint Task Force Seven, Tech. Paper. No. 20, 15pp.
- Palmer, C.E., 1954: The general circulation between 200mb and 10mb over the equatorial Pacific. *Weather*, **9**, 341-349.
- Probert-Jones, J.R., 1964: An analysis of the fluctuations in the tropical stratospheric wind. *Quart. J. Roy. meteor. Soc.* **90**, 15-26.
- Ramanathan, K.R., 1963: Bi-annual variation of atmospheric ozone over the tropics. *Quart. J. Roy. meteor. Soc.*, **89**, 540-542.
- Reed, R.J., 1962: Evidence of geostrophic motion in the equatorial stratosphere. *Quart. J. Roy. meteor. Soc.*, **88**, 324-327.
- * Reed, R.J., 1963: On the cause of the 26-month periodicity in the equatorial stratospheric winds. *Meteor. Abhandlungen, Freien Universität Berlin*, **36**, 245-257.
- Reed, R.J., 1964: A tentative model of the 26-month oscillation in tropical latitudes. *Quart. J. Roy. meteor. Soc.*, **90**, 441-446.
- * Reed, R.J., 1965: The present status of the 26-month oscillation. *Bull. Amer. meteor. Soc.*, **46**, 374-387.
- Reed, R.J., 1966: Zonal wind behavior in the equatorial stratosphere and lower mesosphere. *J. geophys. Res.*, **71**, 4223-4233.
- Reed, R.J., W.J. Campbell, L.A. Rasmussen and D.G. Rogers, 1961: Evidence of a downward-propagating annual wind reversal in the equatorial stratosphere. *J. geophys. Res.*, **66**, 813-818.
- Reed, R.J., and D.G. Rogers. 1962: The circulation of the tropical stratosphere during the years 1954-1960. *J. atmos. Sci.*, **19**, 127-135.
- Riehl, H., and R. Higgs, 1960: Unrest in the upper stratosphere over the Caribbean Sea during January 1960. *J. Meteor.*, **17**, 555-561.
- Shapiro, R., 1964: A mid-latitude biennial oscillation in the variance of the surface-pressure distribution. *Quart. J. Roy. meteor. Soc.*, **90**, 328-331.
- Shapiro, R., and F. Ward, 1962: A neglected cycle in sunspot numbers? *J. atmos. Sci.*, **19**, 506-508.
- Sparow, J.G., E.L. Unthank, 1964: Biennial stratospheric oscillations in the Southern Hemisphere. *J. atmos. Sci.*, **21**, 592-596.
- Staley, D.O., 1963: A partial theory of the 26-month oscillation of the zonal wind in the equatorial stratosphere. *J. atmos. Sci.*, **20**, 506-515.
- Tucker, G.B., 1964: Zonal winds over the equator. *Quart. J. Roy. meteor. Soc.*, **90**, 405-423.
- Tucker, G.B., 1965: The divergence of horizontal eddy flux of momentum in the lower equatorial stratosphere. *Quart. J. Roy. meteor. Soc.*, **91**, 356-359.
- Veryard, R.G., and R.A. Ebdon, 1961: Fluctuations in tropical stratospheric winds. *Meteor. Mag.*, **90**, 125-143.
- * Veryard, R.G., and R.A. Ebdon, 1963: The 26-month tropical stratospheric wind oscillation and possible causes. *Meteor. Abhandlungen*, **36**, 225-244.
- Wallace, J.M., and R.E. Newell, 1966: Eddy fluxes and the biennial stratospheric oscillation. *Quart. J. Roy. meteor. Soc.*, **92**, 481-489.
- Yanai, M., and T. Maruyama, 1966: Stratospheric wave disturbances propagating over the equatorial Pacific. *J. meteor. Soc. Japan*, **44**, 291-294.

7. 低緯度の気象力学と数値予報

- Bedient, H.A., and J. Vederman, 1964: Computer analysis and forecasting in the tropics. *Mon. Wea. Rev.*, **92**, 565-577.
- Bretherton, F.P., 1964: Low frequency oscillations trapped near the equator. *Tellus*, **16**, 181-185.
- Charney J.G., 1963: A note on large-scale motions in the tropics. *J. atmos. Sci.*, **20**, 607-609.
- Hawkins, H.F., and S.L. Rosenthal, 1965: On the computation of stream frictions from the wind field. *Mon. Wea. Rev.*, **93**, 245-252.
- Koss, W.J., 1966: Objective analysis of pressure height data for the tropics. *Mon. Wea. Rev.*, **94**, 237-257.
- Matsuno, T., 1966: Quasi-geostrophic motions in the equatorial area. *J. meteor. Soc. Japan*, **44**, 25-43.
- Miyakoda, K., 1960: Numerical solution of the balance equation. *Tech. Rept. Japan Meteor. Agency. No. 3*, 15-34.
- Rosenthal, S.L., 1960: A simplified linear theory of equatorial easterly waves. *J. Meteor.*, **17**, 484-488.

- Rosenthal, S.L., 1965: Some preliminary theoretical considerations of tropospheric wave motions in equatorial latitudes. *Mon. Wea. Rev.*, **93**, 605-612.
- Rosenthal, S.L., and R.W. Reeves, 1967: Some elementary theoretical considerations of the relationships between wind and pressure in low latitudes. *Mon. Wea. Rev.*, **95**, 11-19.
- Stern, M.E., 1963: Trapping of low frequency oscillations in an equatorial "boundary layer". *Tellus*, **15**, 246-250.
- Yanai, M., 1964: An experimental objective analysis in the tropics. *Tech. Paper No. 62, Colorado State Univ.*, 23pp.
8. GARP, TROMEX
- Charney, J.G., 1966: The feasibility of a global observation and analysis experiment. *Bull. Amer. meteor. Soc.*, **47**, 200-220.
- National Center for Atmospheric Research, 1966: *The Line Islands Experiment*. 13pp.
- 小倉義光, 1966: 地球大気研究計画について, *天気*, **13**, 225-230.
- 山本義一, 1967: 地球大気開発計画, *科学*, **37**, 22-25.

理事会だより

第14期第8回常任理事会

日時 3月10日16時～21時

場所 気象庁予報部会議室

出席者 神山, 根本, 吉野, 朝倉, 小平, 岸保,
畠山, 北岡.

議題

1. 総会準備

- (1)シンポジウム「熱帯気象」の予稿は天気の別刷をとり、会場で実費で販売する。また、熱帯気象シンポジウムの予稿に要した頁数はふやしてもらいたい件は、大田理事から桜庭理事に相談して、なるべく、そのようにとりきめてもらう。
- (2)発表会場をさらにふやすことは、困難な実情があるので、研究発表時間を延長し、18時30分までとする。また、椅子席をふやして、収容人員をますよう努力する。
- (3)総会議題には第4回国際大気電気会議の開催

の件を提出する。

- (4)ベトナム戦争反対の決議ないし、アピールをしたい希望がのべられたが、具体的でないので、必要なら次回に討論する。
2. 第4回 国際大気電気会議の募金趣意書は原案通り可決された。
2. 学会運営改善の常任理事会案はつぎのようにきまつた。
 - (1)理事長は理事の互選にする。
 - (2)外国人会員を設け、選挙権、被選挙権をあたえない。
 - (3)選管の任務をきめた細則をつくる。
 - (4)事務局強化は漸進的に進め、まず、B会員会費年120円値上、別刷代の徴集、会員の増加、気研ノートの発行回数をふやすことなどがきまつた。