

1. 大気運動の観測

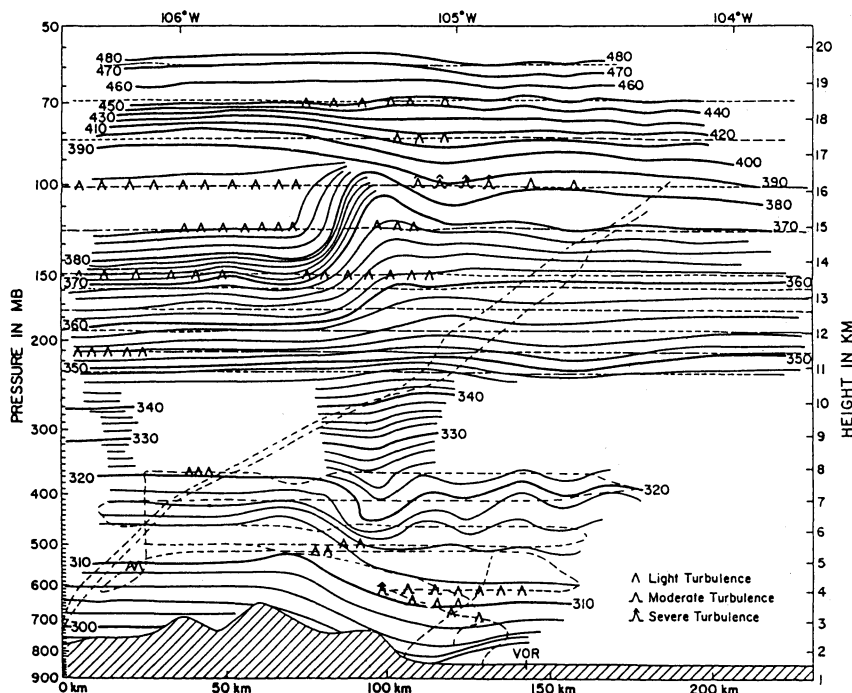
—大気波動の研究と航空機観測—

佐藤 薫*

1. Colorado Lee Wave Program

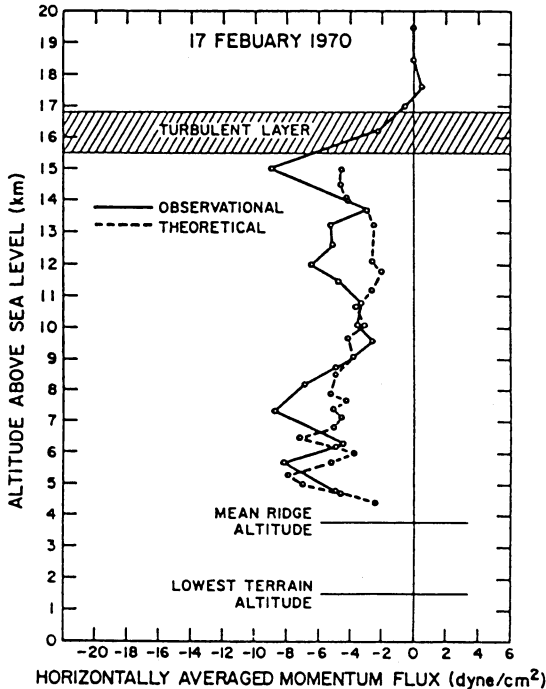
航空機による本格的な大気波動の観測は1970年の Colorado Lee Wave Program が最初ではないかと思う。第1図は、このプロジェクトで観測された Lilly and Kennedy (1973) によるおなじみの山岳波の断面図である。高度20km 近い下部成層圏まで3台の飛行機 (NCAR Sabreliner, ESSA (現在の NOAA) B-57B, アメリカ空軍の B-57F) で、0.6~1.3km 毎に水平ス

キャン観測をしている。実線は等温位線でロッキー山脈の風下側 (右側) に山岳波によると考えられる大きな変位が見られる。第2図の実線は3つの方法から (飛行機の鉛直速度データから、熱力学の式から、連続の式から) 鉛直風 w を推定して得た $\overline{u'w'}$ の平均である (u' , w' はそれぞれ波動の水平風成分, 鉛直風成分)。平均をとる前の3つの $\overline{u'w'}$ はよくあっており妥当な推定ができているものと考えられる。このプロファイル



第1図 1990年2月17日におけるコロラドロッキー山脈付近の温位の断面図。破線は航空機とバルーンの航路。方位角275度から95度の断面 (Lilly and Kennedy, 1973)。

* 京都大学大学院理学研究科。



第2図 第1図と同じ観測より求めた運動量フラックス (実線). 破線はおよそ高度6 kmの水平スキャンデータを基に定常、断熱な山岳波を仮定し、背景場の鉛直プロフィールを用いて理論的に計算した $\overline{u'w'}$ である (Lilly and Kennedy, 1973).

から分かる注目すべき事実は、下層でマイナスのおよそ一定の値をもつ $\overline{u'w'}$ が、15~17 kmの高さでほぼ0となり、しかもそこで乱流が観測されていることである。いうまでもなく、これは山岳波の碎波によるもので運動量フラックス収束にみあうだけ背景風を減速していることを示唆する結果である。このような Lilly らによる航空機を用いた画期的な研究により重力波ドラッグの重要性が注目され、Palmer *et al.* (1986) や McFarlane (1987) の GCM 山岳波ドラッグのパラメタリゼーションの研究へとつながっていった。その後、重力波等の小規模大気運動の観測の主流は MU レーダー等の大型大気レーダーやライダー、高分解能ラジオゾンデに移っていくのだが、最近の成層圏を中心とする航空機観測プロジェクトが多くなされるようになるまでの期間、注目すべき研究があるので次に紹介する。

2. GASP プロジェクト

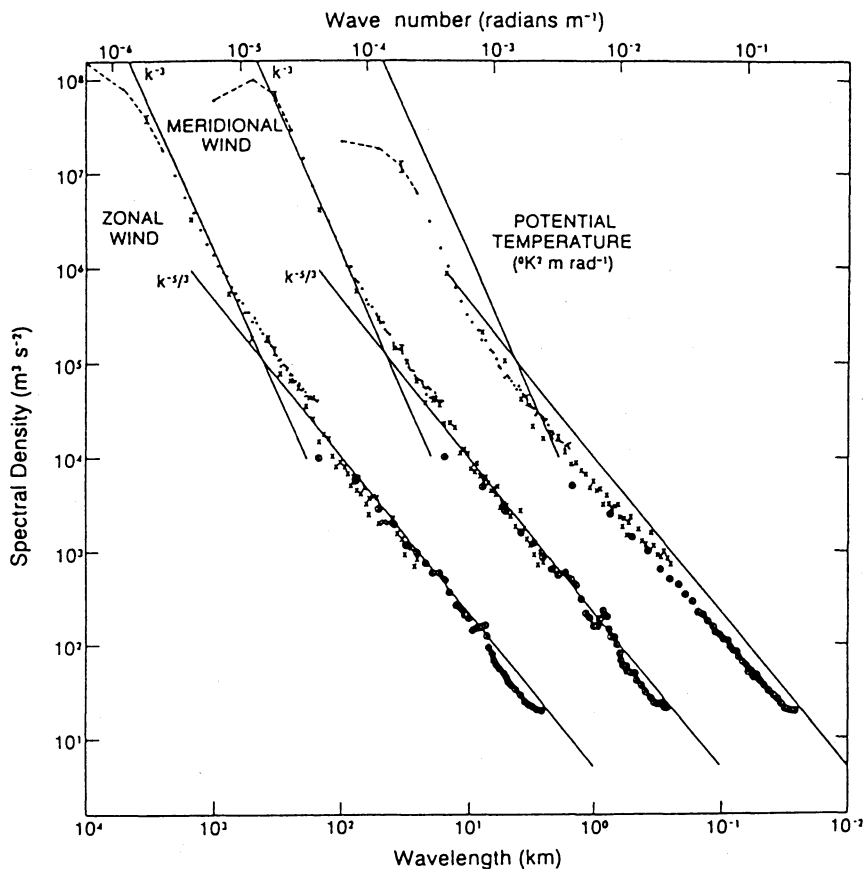
Global Atmospheric Sampling Program (GASP)

は民間の定期航空便を利用してデータを集める NASA によるプロジェクトであった。ボーイング747に測器を搭載し水平風、温度の他にオゾンや水蒸気、一酸化炭素のデータを1975~1979年の間蓄積した。観測は6900フライト以上に及ぶ。GASP データは中緯度圏界面を挟む9~14 kmの高度で季節、経度に均一なデータセットである。緯度的には30~55°N に集中しているものすべての領域をカバーしている。

航空機観測の優れた特長のひとつはいうまでもなく擾乱の水平構造が直接調べられることである。この特長は、一地点で鉛直構造、時間変化を調べる大型大気レーダーやライダー、ラジオゾンデ観測とは対照的である。Nastrom and Gage (1985) は GASP データのうち特に水平分解能の良い(4秒毎、約1 kmに対応) データをもちいて東西風 (u)、南北風 (v)、温位 (θ) の水平波数スペクトルを計算した。その結果が第3図である。水平波長約500 km を境に長波長側では k^{-3} 、短波長側では $k^{-5/3}$ の傾きをもつ。彼らはこのスペクトルを2次元乱流として(2次元性は大気の成層構造から来る) 解釈した。2次元乱流はエネルギーがあるスケールに注入されると、低波数側ではエネルギーカスケードにより $k^{-5/3}$ 、高波数側ではエンストロフィーカスケードにより k^{-3} に比例するスペクトル構造を持つようになる。注入スケールが5000 km (傾圧波動をイメージ)、1 km (小さな対流渦をイメージ) の2箇所にあるとすれば観測スペクトルを説明できるというものである。

しかしこれは大型大気レーダーやラジオゾンデ観測による風や温度の鉛直波数スペクトルを重力波で説明しようとする研究(例えば、VanZandt, 1982; Smith *et al.*, 1987) と相容れない解釈なので、大いに議論された。

GASP データを用いて重力波の視点からの研究も行われている。Fritts and Nastrom (1992) は特に質のよい30余りのデータについて、衛星の雲画像や地上天気図から航路に沿って存在した気象擾乱を調べ、水平波長64 km と256 kmの成分の u' 、 v' 、 T' の分散を求めた。第4図はそれらをまとめた棒グラフである。山岳起源の重力波がもっとも振幅が大きく、ついでジェット気流、フロント、対流の順である。山岳起源の重力波の u 成分が v 成分より大きい特徴は西風の中で発生する地形性重力波の力学特性とよく一致している。ただし、この解析は重力波の水平伝播を考慮に入れていないので定定的でエネルギーが水平にほとんど伝播しない山岳起源の重力波を除き不確実性があ



第3図 GASP データセットを用いて作成した対流圏界面付近の u, v, θ の水平波数スペクトル。見易いように10倍ずつ右にずらしてある (Nastrom and Gage, 1985)。

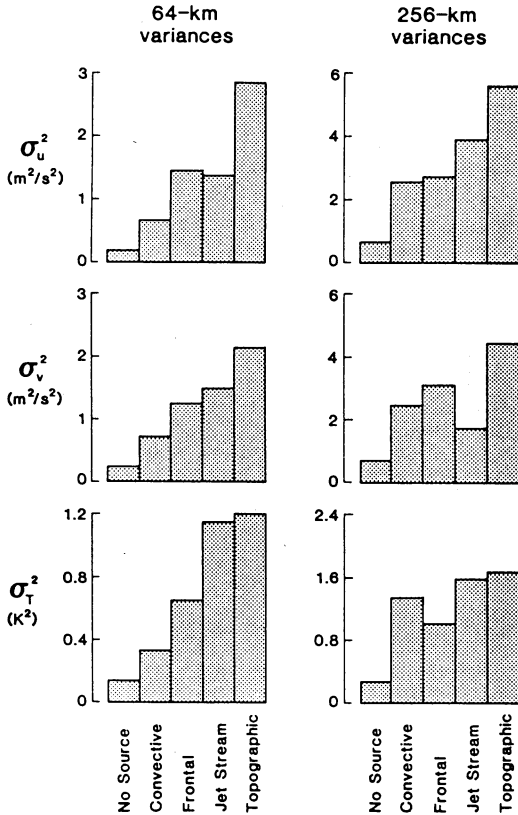
る。より正確には客観解析データなどを用いてレイトレーシングを行い起源を特定する必要がある。

3. 最近の成層圏観測

GASP データは圏界面付近に集中していたが、最近 NASA による ER-2 を用いた成層圏の観測も盛んに行われつつある。1984 年の中緯度をターゲットにした STEP (Stratosphere-Troposphere Exchange Project) を始めとし、1987 年の熱帯をターゲットにした STEP、同じく 1987 年の AAOE (Airborne Antarctic Ozone Experiment), 1988~1989 年及び 1991~1992 年の AASE (Airborne Aircraft Stratospheric Expedition) I と II, 1993 年の SPADE (Stratospheric Photochemistry Aerosol and Dynamics Experiment), 1994 年の ASHOE/MAESA (Airborne Southern Hemisphere Ozone Experiment/Measurements

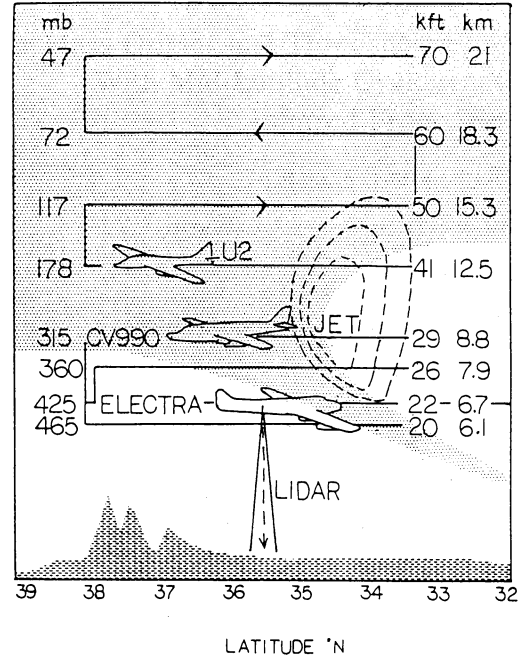
for Assessing the Effects of Stratospheric Aircraft), そして現在進行中の STRAT (Stratospheric Tracers of Atmospheric Transport) と続いている。

中緯度 STEP は亜熱帯ジェットの内側をスキャンして対流圏成層圏の物質交換の実態を明らかにする目的で行われた。第5図は観測の概略図である。水平および鉛直スキャン観測を行なって、ジェットの内側側は対流圏、外側側は成層圏という構造をもつ大気断面の物質及び風の微細構造が解析された。第6図は U2 (現在の ER-2) の観測をもとに作成されたオゾンの緯度高度断面図、および水平風ベクトルを示す。特に内側側で高さ方向に約 1km の厚さで極大と極小が入れ替わるきれいな層構造が存在するのがわかる。オゾン濃度の高い空気は成層圏側 (高緯度側) から、濃度の低い空気は対流圏側 (低緯度側) から移流により運ばれてきたものと考えられる。ここには示してい



第4図 GASP データセットを用いて得られた u , v , T の水平波長64km, 256km 成分の分散. 航路に沿って存在していた大気現象(重力波の起源と考えられる)によって分類してある (Fritts and Nastrom, 1992).

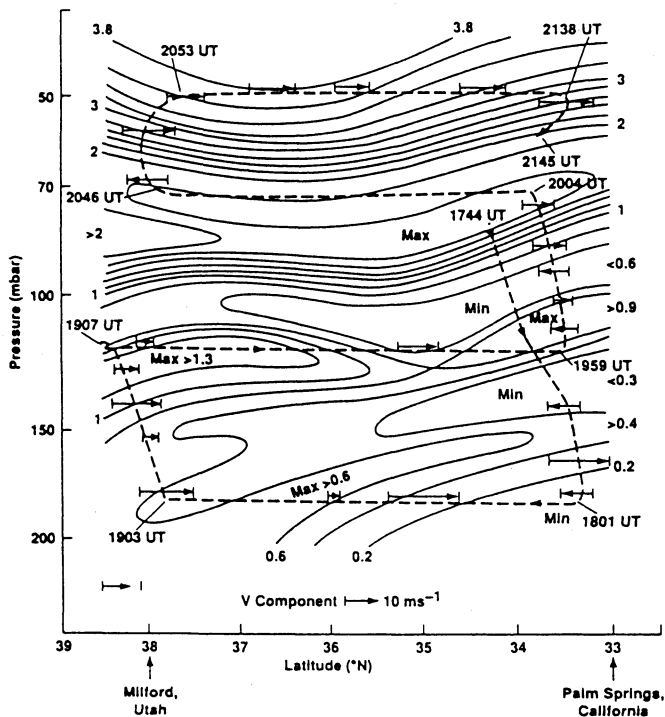
ないがこのパターンは成層圏起源の水蒸気, 対流圏起源の凝結核 (エアロゾル) にも同様に見られる. そして第6図の水平風ベクトルを見ればたしかにオゾン濃度の極大域は低緯度向き, 極小域は高緯度向きに偏っていることがわかる. Danielsen *et al.* (1991) は風の hodograph 解析からこの移流は慣性周期よりわずかに長い周期をもち(したがって内部慣性重力波ではない)短い鉛直波長をもつ重力の影響を受けた波動により引き起こされていると推察した. さらに Danielsen *et al.* はより細かいスケールでの風と温位, 物質の揺らぎを調べ, 第6図に見られる大きなスケールによる波動の上に, 小スケール重力波による鉛直移流があることを見出した. 第6図のパターンから推測される移流が1つの断熱的な波動によるものならば, いずれは元に戻るの正味の輸送は起こらない. しかし, この場合のようにもう一つ, あるいはもっと沢山の波動が同時に



第5図 中緯度 STEP 観測 (1984年4月20日) の航路と気象状況の概略図 (Russell *et al.*, 1991).

存在していたらどうなるだろうか? 元に戻る前に別の波によって別の方向に流されてしまうであろう. その結果不可逆な輸送がおこるのである. つまり, 複数の波動は全体として乱流のように物質を拡散するのではないかということを Danielsen *et al.* の結果は示唆しているのである.

中緯度 STEP に続く熱帯域 STEP 以降の観測では, 大気力学の視点から次の2つの測器が開発され使用された. ひとつは MMS (Meteorological Measurement System) と呼ばれ, 風の3成分と温度, 気圧を約50m (5Hz) の水平分解能で測定する測器である (Scott *et al.*, 1990). 測定誤差は水平風1m/s, 温度0.3度, 気圧0.5hPa と大変良い. 鉛直風精度はまだ十分検討されていないが, ほぼ0.1m/s ということから大型大気レーダーやウィンドプロファイラーと変わらない精度である. もう一つは MTP (Microwave Temperature Profiler) と呼ばれ, 水平に飛行しながら温度の鉛直プロファイルを測定する測器である (Denning *et al.*, 1989). 精度は0.25度. 高度幅5km の鉛直プロファイルを水平方向に3.5km 間隔 (14秒) で観測する. 大気の成層状態がわかるのでポテンシャル渦度が計算できるようになるし, 波動のポテンシャルエネ



第6図 第5図の観測によるオゾン混合比の断面図。破線は航路。矢印は水平風の極大値、極小値を示す(Chan et al., 1991)。

ルギーが得られる。また、鉛直断面図により重力波等の2次元構造がダイレクトに解析できる。

1995年11月5日にハワイ南方の対流システム上空を観測した例を第7図に示す。MMSによる温度 T (第7図a実線)、 v (第7図a点線)、 w (第7図b実線)と、MTPによる dT/dz (第7図b点線)と T の緯度高度断面図(第7図c)である。第7図cの点線は飛行機の位置を示す。水平波長約50kmの波動がクリアに見える。 v と T がほぼ90度位相がずれている点、 v と w がほぼ同位相である点、 T の位相が高さとともに北に傾いている点はいずれもこの波動が北に伝播する内部重力波であることを示唆している。8°Nには発達した対流システムがあり、波動はこれより外向きに伝播していることからこの対流システムが波動の起源であったと考えられる。

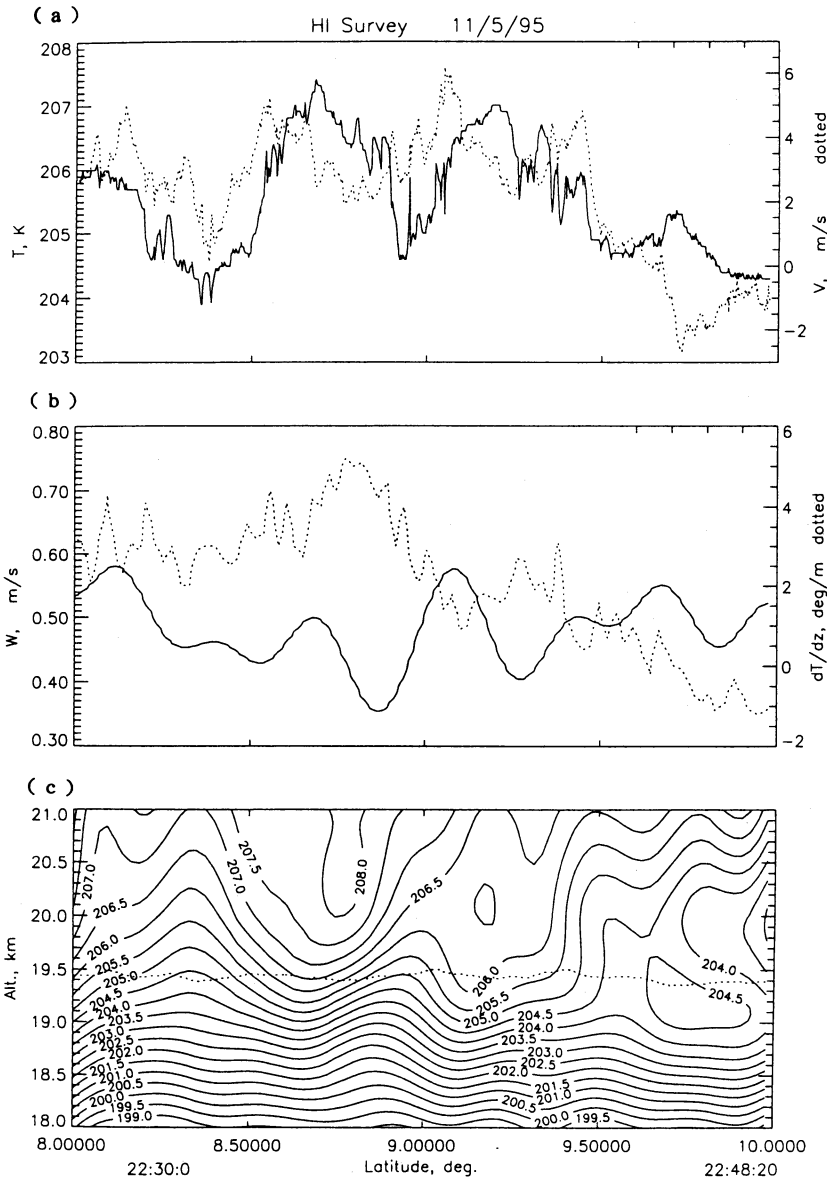
熱帯域 STEP ではこのような対流起源の重力波に注目して解析が行なわれた。対流に伴う重力波の発生メカニズムは、等温面の持ち上がりによる山岳効果、対流のライフサイクルに対応する非定常効果、加熱効果などが考えられている。Pfister et al. (1993) は、第7図に良く似た重力波を検出し、第1、第2のメカ

ニズムに着目して、観測時に存在していた100kmスケールの対流に伴い発生する重力波の理論計算を行ない、観測されたプロファイルは第2のメカニズムによる発生と良く特徴が一致することを示した。

第8図は同じく熱帯域 STEP のMMSによる鉛直風を含む風のデータを用いて解析した重力波に伴う運動量フラックスである(Alexander and Pfister, 1995)。運動量フラックスベクトルの向きは上向伝播重力波の場合(成層圏で観測される波は殆んどが上向きである)、水平伝播方向と一致する。発達した対流システムは10.5°S付近に航路に直角に存在していた。この緯度を境に運動量フラックスベクトルは北で北向き、南で南向きに片寄っており、重力波が対流システムから外向きに伝播していることがわかる。この伝播特性、および運動量フラックスの値は、MUレーダー観測による台風に伴う重力波(Sato, 1993)、スコールライン数値モデルに見られる重力波(Alexander et al., 1995)の特徴とよく一致している。

4. おわりに

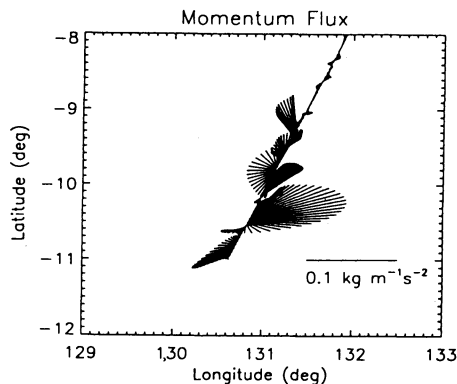
このように航空機観測は中小規模大気運動の観測に



第7図 ER-2に搭載されたMMS及びMTPによるハワイ南に存在した対流システム上空での観測(1995年11月5日)。(a) T (実線)と v (破線),(b) w (実線)と dT/dz (破線),(c) 温度断面図。温度断面図中の破線は飛行機の航路。 w と温度断面図は波状構造を明確にするため低域通過フィルターをかけてある(L. Pfister氏の好意による)。

適し、着実に成果を上げつつある。しかしながら、観測される風や温度、物質の揺らぎがどのような現象に伴うものか、未だ明らかではない。重力波だけで説明できるものもあるがそうでないものも多い。現象を明らかにすることは、例えば中小規模運動の物質輸送を

考える上でとても重要なことである。重力波による移流は局所的な物質混合比の傾きに依るであろう。そして、その局所的な傾きは、Danielsen *et al.* の解析に現れたような大規模な波動によって作られるものかもしれないし、最近盛んに行なわれている高分解能移流



第 8 図 熱帯域 STEP のデータを用いて推定した水平波長10~100km 成分の運動量フラックススペクトル $\rho_0 (u'w', v'w')$ の航路に沿ったプロファイル。活発な対流は 10.5°S 付近に存在した (Alexander and Pfister, 1995)。

モデルで表現されるような等温位面における2次元乱流的な運動によるフィラメントであるかもしれない。実際、観測データを基に計算された物質スペクトルは、重力波の移流から予想される形でも、2次元乱流による輸送から予想される形でもない (Bacmeister *et al.*, 1996)。今後も、航空機を用いた、あるいは、航空機とレーダーやラジオゾンデなどの地上観測、大気モデル等を組み合わせた、物質と運動の両方の視点からの研究が注目されていくことと思う。

謝 辞

MMS および MTP による観測例の図を提供してくださった Leonhard Pfister 博士, Bruce Gary 博士, Paul Bui 氏に心より感謝致します。

参 考 文 献

- Alexander, M. J., J. R. Holton and D. R. Durran, 1995 : The gravity wave response above deep convection in a squall line simulation, *J. Atmos. Sci.*, **52**, 2212-2226.
- Alexander, M. J. and L. Pfister, 1995 : Gravity wave momentum flux in the lower stratosphere over convection, *Geophys. Res. Lett.*, **22**, 2029-2032.
- Bacmeister, J. T., S. D. Eckermann, P. A. Newman, L. Lait, K. R. Chan, M. Loewenstein, M. H. Proffitt and B. L. Gary, 1996 : Stratospheric horizontal wavenumber spectra of winds, potential temperature and atmospheric tracers observed by high-altitude aircraft, *J. Geophys. Res.*, **101**, 9441-9470.
- Chan, K. R., S. G. Scott, S. W. Bowen, S. E. Gaines, E. F. Danielsen and L. Pfister, 1991 : Horizontal wind fluctuations in the stratosphere during large-scale cyclogenesis, *J. Geophys. Res.*, **96**, 17425-17432.
- Danielsen, E. F., R. S. Hipskind, W. L. Starr, J. F. Vedder, S. E. Gaines, D. Kley and K. K. Kelly, 1991 : Irreversible transport in the stratosphere by internal waves of short vertical wavelength, *J. Geophys. Res.*, **96**, 17433-17452.
- Denning, R. F., S. L. Guidero, G. S. Parks and B. L. Gary, 1989 : Instrument description of the airborne microwave temperature profiler, *J. Geophys. Res.*, **94**, 16757-16765.
- Fritts, D. C. and G. D. Nastrom, 1992 : Sources of mesoscale variability of gravity waves. Part II : Frontal, convective and jet stream excitation, *J. Atmos. Sci.*, **49**, 113-127.
- Lilly, D. K. and P. J. Kennedy, 1973 : Observations of a stationary mountain wave and its associated momentum flux and energy dissipation, *J. Atmos. Sci.*, **30**, 1135-1152.
- McFarlane, N. A., 1987 : The effect of orographically excited gravity wave drag on the general circulation of the lower stratosphere and troposphere, *J. Atmos. Sci.*, **44**, 1775-1880.
- Nastrom, G. D. and K. S. Gage, 1985 : A climatology of atmospheric wavenumber spectra of wind and temperature observed by commercial aircraft, *J. Atmos. Sci.*, **42**, 950-960.
- Palmer, T. N., G. J. Shutts and R. Swinbank, 1986 : Alleviation of a systematic westerly bias in general circulation and numerical weather prediction models through an orographic gravity wave drag parameterization, *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, **112**, 1001-1040.
- Pfister, L., K. R. Chan, T. P. Bui, S. Bowen, M. Legg, B. Gary, K. Kelly, M. Proffitt and W. Starr, 1993 : Gravity waves generated by a tropical cyclone during the STEP tropical field program : A case study, *J. Geophys. Res.*, **98**, 8611-8638.
- Russell, P. B., E. F. Danielsen, R. A. Graig and H. B. Selkirk, 1991 : The NASA spring 1984 stratosphere-troposphere exchange experiment : Science objectives and operations, *J. Geophys. Res.*, **96**, 17401-17404.
- Sato, K., 1993 : Small-scale wind disturbances observed by the MU radar during the passage of Typhoon Kelly, *J. Atmos. Sci.*, **50**, 518-537.

Scott, S. G., T. P. Bui and K. R. Chan, 1990: The meteorological measurement system on the NASA ER-2 aircraft, *J. Atmos. Oceanic Technol.*, **7**, 525-540.

Smith, S. A., D. C. Fritts and T. E. VanZandt, 1987:

Evidence of a saturation spectrum of atmospheric gravity waves, *J. Atmos. Sci.*, **44**, 1404-1410.

VanZandt, T. E., 1982: A universal spectrum of buoyancy waves in the atmosphere, *Geophys. Res. Lett.*, **9**, 575-578.

105: 501 (メソ降水雲系; メソモデル; 雲内測定)

2. メソ降水観測

—メソ降水雲系の研究発展と航空機—

藤 吉 康 志*

1. はじめに

航空機(観測)の魅力は、短時間に広域を調査できる点と、他の手段では手の届かない上空の目的とした場所に素早く行け、その場で作業・測定・サンプリングができる点である。従って、正に見てきたような実証データを作ることが可能である。その一方、高額な使用料、自分で操縦・管理できないこと、飛行時間・範囲の制限、搭載装置の重量・電源・大きさ・応答時間の制限等の短所もある。更に、時間・空間変化の大きい雲を対象とした場合、航空機で得られる点・線状データの代表性の問題は、どうしても避けきれない。今回のシンポジウムでは、このような航空機観測の長所・短所を踏まえ、メソスケール現象の解明に我が国では今後どのような航空機観測が必要かについて考えてみたい。その為に、先ず、メソスケール現象の研究発展にこれまで航空機がどのような役割を果

たしてきたかを概観する。

2. 1980年以前の航空機観測

この時代にどのような観測機が使用されていたかを見る為に、*J. Atmos. Sci.* と *Quart. J. Roy. Met. Soc.* に登場した使用頻度の高い上位5つの機種と、その航空機の参加したプロジェクトが行われた年次を第1表に示した。これを見ると、NCARのElectraとSabrelinerが早くから活躍していたことが分かる。また、測器の発展を見るために、各年次に初めて論文中に登場した測器名を第2表に示した。勿論、測器は論文にその名前が登場する以前に既に開発が終了しているはずであり、第1、2表共にひとつの目安を示したものである。

メソ降水雲系の航空機観測のはしりは、1955年から開始された National Hurricane Research Project で

第1表 J. Atmos. Sci.と Quart. J. Roy. Meteor. Soc.に登場した、1970年代に頻繁に使用された航空機種名と、その航空機が参加したプロジェクトの行われた年次。

使用航空機	'70	'71	'72	'73	'74	'75	'76	'77	'78	'79
Electra (NCAR)			○		○	○	○	○	○	○
P-3 (NOAA)						○		○	○	○
Queen Air (NCAR)			○	○		○	○	○	○	○
Queen Air (ワイオミング大学)			○		○				○	○
Sabreliner (NCAR)	○		○	○	○		○			○

* 北海道大学低温科学研究所。