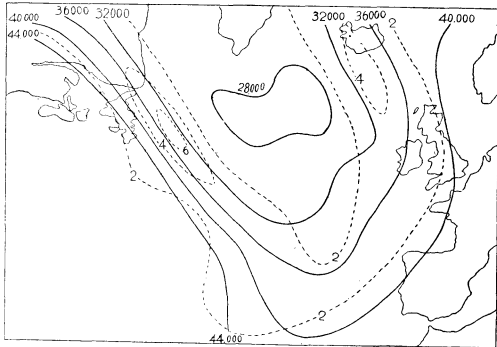


ジェット機とシア－風図*

上 松 清**

ジェット機の運航のために必要な気象資料は、WMO や ICAO の関係で数年来にわたって論議されてきた。現在では一応必要とする資料の大体の形式は決定されるにいった*1。しかしながらこれは図の形式の決定だけであって、これをいかに作るかの技術的な方法については何も決めていない。これは各国で研究し最も効果的な方法を用いて作業すればよい段階である。ここで説明する Wind Shear Chart もジェット機の運航のために必要な気象資料の一つである。WMO は Wind Shear Chart のなかでも、特に Vertical Wind Shear Chart を重要視して、その形式を決めている。第1図に WMO



第1図 Vertical Wind Shear の予想図

の決めた形式を説明しよう、その内容は大体次のようなものである。

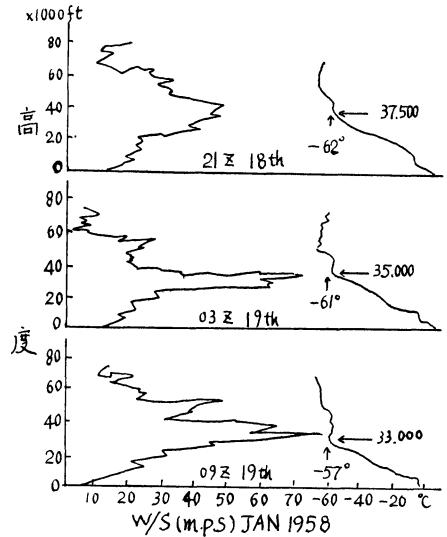
- (1) Vertical Shear の等値線はノット/1,000 フィートの単位として2ノット毎に引く
- (2) Shear を計算する層はジェット機の巡航高度層を目標にして、300mb-150mb の間とするが次の仮定を考

* Wind Shear Charts for the Jet-aircraft Operation

** Kiyoshi Agematsu. 東京航空地方気象台
—1963年5月20日受理—

える。

(3) 風の垂直分布は第2図に示す実例のように、圏界面附近の風速最大点まで増加し、それより減少する。そしてその増加と減少の割合は風速最大点を中心として、対



第2図 風速と気温の鉛直分布の一例

称的に同じものと仮定する。

- (4) Shear の値は最大点より下層10,000 フィートぐらいの層の値とする。あるいは風速最大点と 300mb 面の風速の間の Shear でもよい。
- (5) この図を利用するためには風速最大点の高度分布を明示しなければならない。そのために第1図の実線は風速最大点の高度線を示すものである。

以上のような内容が WMO と ICAO が決めた Vertical Wind Shear Char の概要である。

1. Vertical Wind Shear Chart の利用

この図を利用する目的に次の2つがある。

(1) 晴天乱流 (Clear Air Turbulence 略して C.A.T.) の予報の判定基準とする。

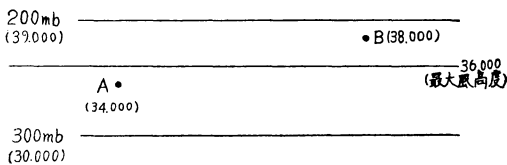
(2) 定圧面以外の任意の高度の風速を推定するために用いる。

まず前者から説明すると、じょう乱が増大するための基準として Richardson は

$$Ri = \frac{g(\Gamma + \frac{\partial T}{\partial Z})}{T(\frac{\partial V}{\partial Z})^2} < 1$$

なる判定式をだした。ここで g は重力の加速度、 Γ は乾燥大気気温減率、 T は絶対温度で示した気温、 $\frac{\partial V}{\partial Z}$ は Vertical Wind Shear である。Richardson の判定基準によれば Ri の値が 1 以下にならなければじょう乱は増加しないことになるが、かなりの厚さの層を考える場合には 1 以下にならなくとも相当強いじょう乱が発生しうる。いま取扱いを簡単にするために、ジェット機の飛行高度を 10km 前後の圏界面の下方とし、 T の値を平均的に 240°K (-33°C)、気温減率を 0.6°C/100m、 Γ を 1°/100m、 g を 980cm/sec² と仮定し $\partial V/\partial Z$ を 5 ノット/1,000 フィートとすると $Ri=2.3$ となる。したがって $Ri < 2$ 以下すなわち $\partial V/\partial Z$ 6 ノット/1,000 フィート以上の地域に対して CAT の起りうる可能性に注目することが必要である。米国では現業的には 8 ノット/1,000 フィート以上の地域を CAT 発生 の判定基準とする現業規定を作っている。

次に後者 (2 項) の方の説明をしよう。ジェット機の巡航は上昇巡航とって、プロペラ機のように一定の気圧高度を飛行する場合と違い、数段階に分けて上昇しながら巡航するのが特長である。したがっていろいろな高度の状況を知る必要がある。一般にジェット機の巡航高度の範囲は 300mb-150mb の間であるから、300mb と 200mb の定圧面の風をもとにして、その間の Shear を求めることによって、目的が達せられるわけである。第 3 図に定圧面高度と最大風高度と Shear の関係を示



第 3 図 定圧面高度と最大風高度とジャーの関係

す。いま昭行機が A 点にいとすると A 点の風は 300mb の風に示された Shear に 4 倍して 300mb の風速に加

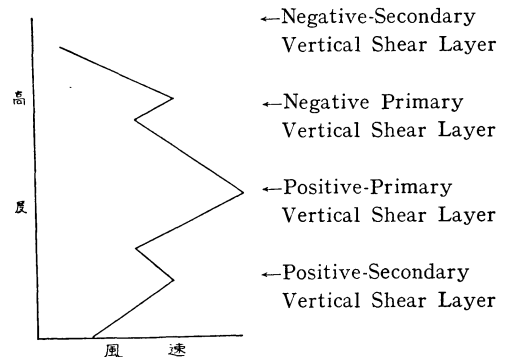
算すればよい。B 点の高度を 38,000 フィートとすれば、200mb の風から Shear の 1 倍を加算すればよいことになる。

米国ではこの関係を非常に単純化して一つの技術規則を作った。それは最大風高度と圏界面について一つの仮定を試みたのである。統計的な調査などから中緯度地帯においては最大風高度は大体において、中緯度圏界面の 2~4 千呎前後の高度にあることを示している。ゆえに観測の誤差や航空の要求する精度及び予報技術の精度から考えて、圏界面において風速が最大になると仮定した。すなわち最大風速高度は圏界面高度と同じにしたのである。この仮定は理論的にも一応は説明はできるものである。このために米国では TVWS Chart (Tropopause Vertical Wind Shear Chart) を作成する。そして最大風速高度の高度線の代りに圏界面の等高度線を入れて、上述のような風の推定を行うわけである。この場合圏界面の気温も記入しておくから成層圏の気温の推定も割合簡単にできるという利点がでてくるのである*2。

2. Vertical Wind Shear Chart の作成

作成方法については米国では特に新しい組織を作って研究した。ミズリー州の Kansas city に Clear Air Turbulence Forecast Section (Chief は E.W. Frey) を設けて組織的に調査したわけであるが、第一次の作業としては前述したように CAT は Vertical Wind Shear に最も密に関係するので Vertical Wind Shear Chart の作成について検討したわけである。その方法*3 は紙面の都合上詳述するわけにゆかないが、大体次のような方法である。

まず必要とする全観測点の風のプロフィールを作成する。



第 4 図 風のプロフィールのモデル

第4図に示すように Shear の増を+とし、減を-とする層を決める。また一般的には風速最大点はきれいに単純形として一点にならないから、第2次あるいは第3次の風速最大点を決める。そして各層毎にプロファイルから図的に shear の値を求める。ジェット機の巡航高度を中心として2~4,000 フィート間隔の高度で、各高度面の shear Char を作成する。勿論これにはトラフやジェット流軸の位置との関係はあらかじめ調べておく必要がある。このようにして作成した毎日の Shear Chart と実際に飛行機が観測した CAT のデータによって得た結果は次のような値になった。

Vertical Shear	CAT の強さ
9-12ノット/1,000フィート	並 (moderate)
12-15ノット/1,000フィート	並 時には強 (severe)
15ノット以上/1,000フィート	強 (severe)

しかし実際には各観測点の風プロファイルを毎日の現業作業として行うことは不可能であるから、最近では次のような方法*4をおこなっている場合が多いのである。

すなわち温度風を用いるのが便利とされている。いま2つの等圧面を考え、その面の地衡風を V_{g1} 、 V_{g2} とす

ると

$$\frac{\partial(V_{g2}-V_{g1})}{\partial Z} = V_{gt} \frac{1}{T_m} \frac{\Delta T_m}{\Delta Z}$$

ただし V_{gt} は温度風

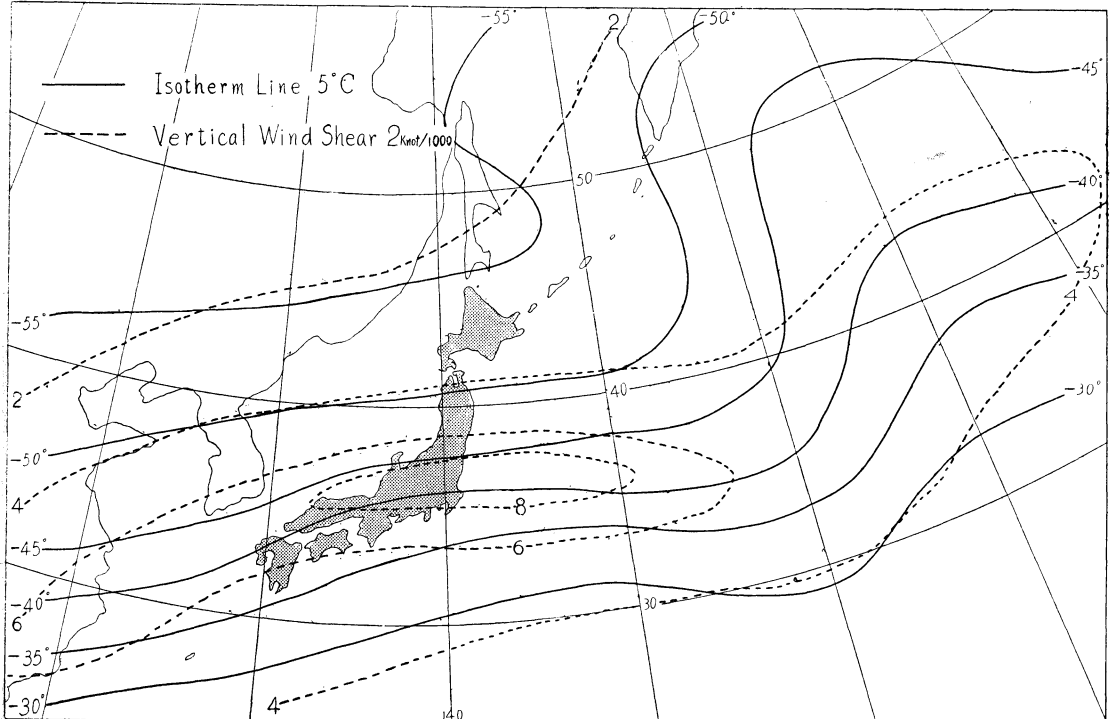
上式のような関係がでてくる。この式を 300mb 面天気図を用いて、等温線を 5°C 毎に、等高度線を200フィート毎に描異してあるものとする、1,000 フィート毎の Shear は

$$\begin{aligned} \frac{\partial(V_{g2}-V_{g1})}{\partial Z} \Delta V_g &= V_{gt} \times \frac{1}{T_m} \times \frac{5}{200} \times 1000 \\ &= V_{gt} \times \frac{25}{T_m} \end{aligned}$$

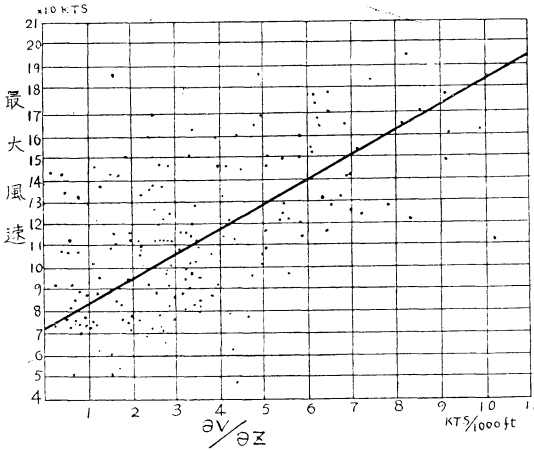
いま T_m を 300mb 面の平均温度として $-23^\circ\text{C} = 250^\circ\text{A}$ と仮定すれば

$$\Delta V_g \approx V_{gt} \cdot \frac{1}{10}$$

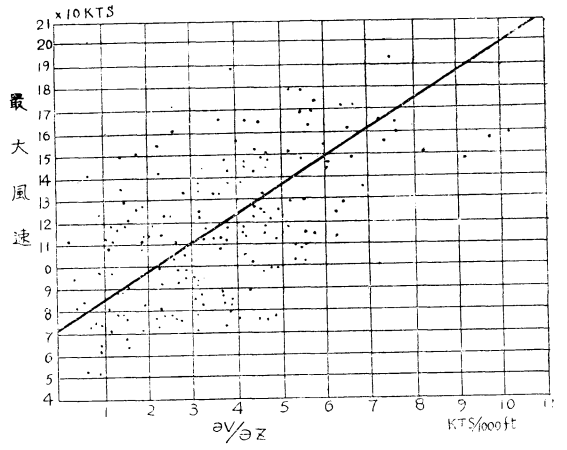
したがって 300mb 面の 5°C 毎の等温線から地衡風尺によって V_{gt} を読みとるとその 1/10 は 1,000 フィートについてのノット単位の Shear となることになる。第5図にその実例を示そう、shear 分布もジェット流軸と関連があることはあきらかであるから、大体において shear の極大軸とジェット流軸がほぼ一致してよいわけ



第5図



a 最大風速面の上



b 最大風速面の下

第6図 最大風速面より上下の部分における垂直シャーと最大風速の関係

である。

この方法は毎日の現業作業の手続としては割合に簡単で作業がやり易いというところがある。しかしこの方法は 300mb の温度風という考え方から 300mb と 200mb の間の層の平均値を与えるものである。実際の Vertical Shear は最大風軸（ジェット流軸）の近傍において、急激に大きくなるのが普通である。この温度風の方法では shear が急増する部分にはどうしても実況値に一致しないことになる。杉本氏*6の研究によると平均 shear は最大風関数としてその上下方向のシャーの値を統計的に求めたものを利用するのが実際的だと言っている。すなわち最大風速の値が大きくなればなるほど、シャーの値も大きくなるということである。第6図は1959年2月の秋田、仙台、館野、稚内、潮岬、八丈島及び鳥島の7地点の資料からその最大風速とその面上及び下の5000フィートの層の平均 shear の値を示している。風速の垂直分布のプロファイルはジェット流軸からの南北方向の距離によってかなり相異しており、軸に近い部分の shear は遠い部分の shear より大きいため、第6図のようにこの関係を考慮に入れずに求めた図では点の分布は相当に大きい、全体を平均した傾向としては平均線からわかるように最大風速が強いほど平均 shear の値が大きくなるのがあきらかである。第6図の平均線は

$$\frac{\partial V}{\partial Z} = -6.5 + 0.09V_{max} \dots \text{最大風速面より上方}$$

$$\frac{\partial V}{\partial Z} = -6.5 + 0.08V_{max} \dots \text{最大風速面より下方}$$

但し $\frac{\partial V}{\partial Z}$ は1,000フィート当りの shear

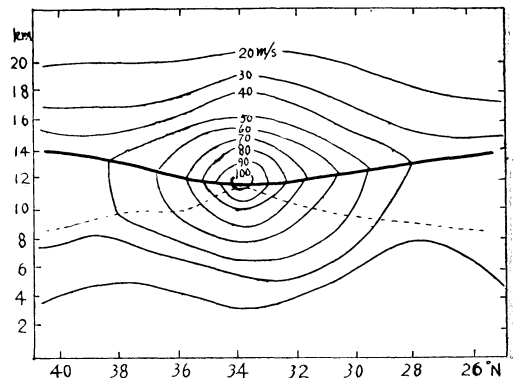
V_{max} は最大風速（ノット）

したがって現業的の作業としては前述の温度風による方法にしたがって解析し、ジェット軸の近傍ではこの統計的結果によって補正すればよいようである。

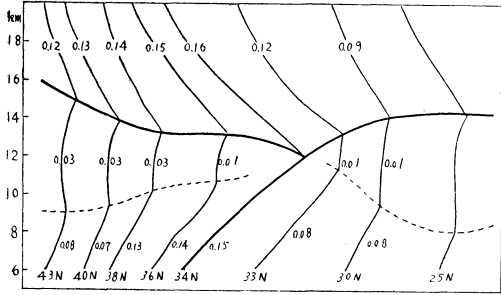
3. 解析上の注意

Vertical Shear の解析で最も関連の深いものはジェット流との問題である。いま例としてジェット流近傍の風速の垂直分布について考えてみよう。

第8図は1958及び1959年の冬期本州付近で偏西風が卓越した10例をえらび、東経140度線における平均風のプロフィールを示したものである。この場合にはジェット軸



第7図 東経140度に沿うジェットが卓越した例の平均風速分布図



第8図 第7図を用いて求めた主要地点の風速の垂直分布
 (注……線の下層部のkの値は……の部分の風速をVmaxとして計算した)

の風速は平均して12kmの高度で108m/secであった。第7図ではジェットのコアの部分では風速分布は最大風速面(太い実線で画いた部分)を中心にして上方はほぼ対称的で、コアの上下1kmの範囲内では最大のshearの値つまり15m/1000mと大きな値をとるがその他の部分では最大風速面から下方のshearは第8図で破線で結んだ線と最大風速の間の層ではShearの値が急速に小さくなりその値は1000mにつき1~2mの値をとる層がある。

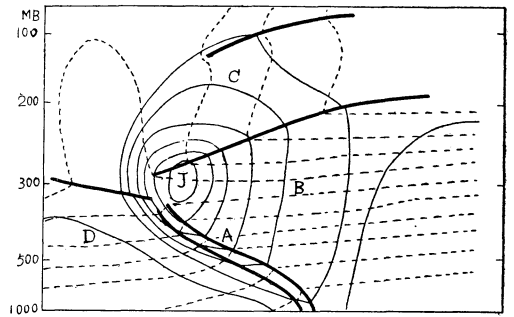
垂直shearは最大風速面の上方の値が下方の値よりかなり大きくなることは前述のとおりであるが、第8図でもこのことをあきらかにしている。またコアの上方の層では8~15m sec⁻¹/1000m ぐらいを示すが、コアより南北200km位はなれた区域では上方に向う風速の減率は急速によまゐる。

いま最大風速面の風速をVmaxとし、最大風速面よりある高さへだたった高度面との高度差をkm単位でxとすれば、任意の高度の風速Uは一般に指数関数で示される

$$U = V_{max} \times e^{-kx}$$

第8図は第7図の各緯度における風速の垂直プロファイルをかけたもので図中の数字は上式のkの値である。この図でわかることは最大風速面より上方が大きく、下方が小さく、下方でも面のすぐ下に風速の増率のきわめて小さい層があるということがあきらからである。

以上は主として亜熱帯ジェットの卓越する地域のシャーについて述べてきたが、ポーラージェットの卓越する地域ではシャーはどうなっているかみてみよう。第9図は典型的なポーラージェットの断面図であるが、各部分のshearの強さを考えるためのモデルとして示すもの



第9図 西風が卓越している場合の垂直断面図
 (ポーラーフロント・ジェット)

である。

風速の垂直方向の変化は一般に水平方向の温度傾度の大小によって支配される。温度傾度の強い部分とは第9図の極前線に沿う地域がもっとも強く、次に強い部分は中緯度圏界面上方の区域である。また弱い区域はジェットコアの南側の中緯度圏界面の下方および極圏界面下方の極気団内である。これら各区域内の垂直シャーについてはS.M. Serebreny*6が統計的に求めた結果がある。上で述べたような区域を、第9図に示すように、A、B、C、Dの区域とすると、表に示すような値をとるといのである。

表 ポーラージェットにもとなう各地域のシャーの値

地区	高 度	ジェット流の中心に 対し		コアの下方
		低圧側	高圧側	
D	前線面の下方 (500MBとその 下方)	2~5KTS 1000ft		
A	前線帯内 (500MBと400 MBの間)	8~12KTS 1000ft		8~15 KTS より20KTS 1000ft
B	前線の上方 (400MBより 200MBの間)	2~5KTS 1000ft	2~5KTS 1000ft	6~10KTS 1000ft
C	ジェットコ アの上方	8~12KTS より15KTS 1000ft	8~12KTS より15KTS 1000ft	

以上の事からは解析の実際面から経験する事実であって、解析技術上一応知っておかなければならない知識の一つであると思う。しかしジェット機運航のために用いる実際の資料の作成にあたっては、複雑な表現は禁物である。それは現在の運航が要求している精度は第1節で

述べた仮説のような状況で一応満足されるのであるから、できるだけ表現は簡単に割り切らなければならない。航空予報担当の予報官としてはこの点を充分承知のうちジェット機航運に満足されるならば、精度を落としても、使い易い資料にすることが必要である。

次にこの Vertical Wind Shear 図を予報図にする必要がある。これは現状では外そう法以外におこなわれていないが、このような予報図の作成こそ、数値予報の適応が効果的におこなわれるものと思われる。現用の外そう法の要点は、前述のようにシャーパターンはジェットパターンと関係が深いから、ジェットパターンによってシャーパターンが決まるといってさしつかえない。したがって 300mb 及び 200mb 天気図の予報図の作成が基礎作業となる。300mb 及び 200mb の予報図によってジェット軸が予想され決定されれば、その上にシャーパターンをのせることによって大きな間違いはでてこな

い。予報図の作成については別の機会にさらにふれてみたい。

参考文献

- 1) W.M.O. Technical Regulation [12. 2] 2.5.2.4.
- 2) The Tropopause Vertical Wind shear Chart-It's Operational Usage
S.G. Sinplicio (Supervising IAFS Forecaster)
U.S. Weather Bureau Technical Manual
- 3) A Clear Air Turbulence Analysis and Forecast Procedure Used in the U. S. A. E. W. Frey. Regional Association II Third Session Report, WMO 1962. III-RA II/INF 4.
- 4) 高々度気象解析, p. 112 風速の垂直シャー 杉本豊, 航空気象学文献抄, 第6巻 1, 2, 3月合併号
- 5) 最大風速層および Wind Shear の解析と予報, 杉本豊, 小野けい子, 東東航空気象台 技術報告 1962. 9月
- 6) Forecasting Manual for the Jet Stream over the Pacific. PAA Technical Publications.

日本気象学会九州支部昭和38年度第1回講演会および西部管区気象研究会

会期 5月7, 8日

会場 鹿児島市下荒田町 鹿児島県婦人会館

講演題目	所属	氏名
1. 長崎県における波浪注意報と警報の発表基準	長崎	城間 恒信
2. 宮崎県の気象災害の調査	宮崎	伊藤 剛男
3. 大分県の風水害	大分	笠村 幸男
4. 宮崎における一点観測による震源誤差	宮崎	安井 豊
5. 長崎付近の地震	長崎	坂本 琢磨
6. 台風6213風号のレーダーおよび天気図解析	種子島	広森 章
7. 台風6228号のレーダー解析	名瀬	井田 秀治
8. 異常低気圧のレーダー解析	鹿児島	稲垣 豊秋 内村 進
9. 南北に伸びる帯状エコーから低気圧性エコーへの推移	種子島	石硯 浩章 広森 章
10. 温暖前線に交わるレインバンド	鹿児島	大迫 盛夫
11. 福岡におけるマイクロウェイブの異常伝ぱんと気象	気象協会	深渡 瀬征男
12. みかん産地の微気象的観測	下関	赤井 清康
13. 冬期間における体感表現のための指数	気象協会	小林 義男
14. 熊本県の火災と気象	熊本	古閑 賢一 吉住 孝行
15. 巖原の北東風について (1)	巖原	生駒 進
16. 種子島の気象特性	種子島	品川 昌平

17. 名瀬, 沖永良部および徳之島の天気について	名瀬	福田 一世
18. 低気圧と寒冷前線による熊本の降水の始終について	熊本	坂本 暢哉
19. 緑川上流の降雨特性	〃	保田井 勳
20. 菊池川の洪水予報	〃	古閑 賢一 吉住 孝行
21. 不安定線を生ずる気塊の特性	〃	木下 正時
22. 500mbの日高度平年偏差と天気ベース	下関	中島 輝之
23. 有明海における高潮調査	佐賀	東島 茂 早田 正美
24. 台風および低気圧の寿命について	福岡	黒木 義秋
25. 台風圏内における気象要素の数値的分布 (統報)	〃	富高 四郎
26. 種子島地方における台風の特性	鹿児島	中尾 広次
27. 九州西方海上における寒気の吹きだしに伴う不安定について	鹿児島 福岡	竹永 一雄 植村 八郎
28. 梅雨の予想法(その2, その3)	福岡	香原 信義
29. 冬の寒暖予想法 (その1)	〃	〃
30. 九州における降雨量の長期変動と予想	〃	〃 村田 芳幸
31. 死亡と気象との関係 (3)	宮崎	安井 豊 高橋 岩夫 藤井 文雄
32. 日向灘の気象による海難の調査	〃	〃 菊地 重信 荒木 一好