

# 日本付近における高々度乱れの特性\*

## 東京航空地方気象台\*\*

**要旨:** ICAO 計画の高々度乱れ報告の資料を用い、特に日本付近の上空における高々度乱れの特性について、解析を試みた。その結果、

a) 地域分布の特性としてはジェットの地域的変動の影響が大きい、山岳の風下側にあたる太平洋側に、いくらか発生率の高い場所がみられること。

b) 気象要素とはよい対応を示すが、実際の予報に利用できるのはこれらの観測時より約6時間後までであること、

c) ジェットストリームに対しては、その北側 200km と南側 100km 位にやや高い発生率を示すことと、接近したジェットの間領域、彎曲したジェットの北側等に他より発生率の高くなることがわかった。

### 1. はしがき

ICAO の計画により、1964年12月、1965年3月、6月および9月の4回にわたり、各月の5日間ずつ高々度乱れ (High Level Turbulence, 以下略して HLT と呼ぶ) の飛行機観測が地球上の全地域を対象に行なわれた。これは地球を9地区に分け、上記の期間中に 20,000 ft 以上を飛行したジェット機は、すべて IATA 本部または9地区の解析センターへ、乱れの有無に関する報告を行なうよう計画したものであった。

日本はその北太平洋地区を分担して解析センターとなつたので、4期間を合せて約3,500通の報告が東京航空地方気象台へよせられた。そのうちわけは、日本航空、全日本空輸、国内航空および外国民間航空の各社の定期飛行の外、自衛隊、米海軍航空機等の不定期飛行であった。

これらの報告のうち日本上空の資料は半数以上に達したので、ICAO で定められている全地域の調査とは別に特に日本付近のものみの特性を詳細に調べ、結果を報告する。なおクリア・エヤータービュレンスをたてまえとし、乱気流を観測したとき、周辺に塔状積雲や雷の存在する場合は、Colson D. (1963)<sup>1)</sup> の行なったように調査資料から除外されている (ただし絹雲内の乱気流は含

まれる)。

### 2. 地域分布

まず日本付近の調査対象範囲として、東経 125 度と 145 度および北緯 25 度と 45 度の四つの線で囲まれた地域を定めた (第1図の範囲)。地域分布はこの範囲内をさらに緯度と経度の1度間隔に細分し、各小区域毎の乱気流の観測率を求めた。これは航空路に資料が集中して、航空路にそって乱気流の観測数が多く出るのを防ぐため、小区域毎にその中を通過した全飛行回数で、そのうちの乱気流を観測した飛行回数を割って百分率にしたわけである。なお乱気流の強度は、パイロットに対する手引として第1表のような基準が設けられた。この表では

第1表 乱気流の強度を評価する手引  
(ICAO 計画の高々度乱れの報告用)

乱れの強度		評価の手引
微弱	very light	わずかに認められる程度
弱	light	わずかに不快な程度
並	moderate	歩行困難となる程度
強	severe	固定していない物体が移動する程度
激	extreme	飛行機が激しく翻弄される程度

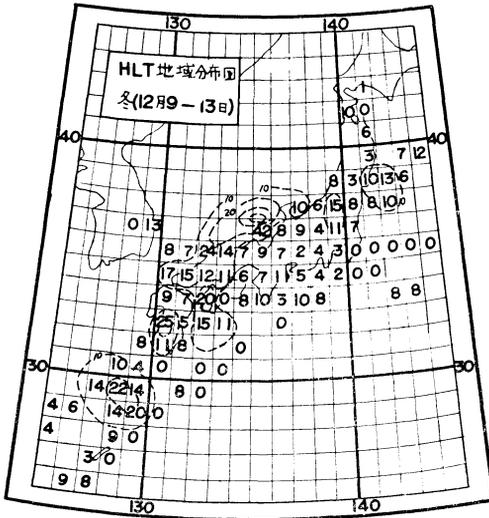
一般に使用されている弱、並、強の3階級のほかに微弱と激の二つが加えられている。しかし微弱は一般には、乱気流なしの部に入るもので、この調査でも統計ではすべて「無し」と同様に扱った。激は強のうちの特に強いものと考えて差支えない。

第1図の数字は、その弱以上の全強度に対する発生率で、飛行回数が10回未満のものは省略したが、10%毎の

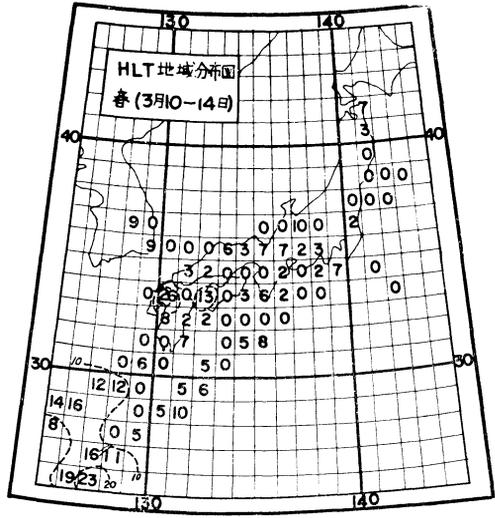
\* Some Characteristics of High Level Turbulence over Japan and Adjacent Ocean Areas.

\*\* Tokyo International Airport Aviation Weather Service, J.M.A. (この報告は橋場善也によりまとめられた)

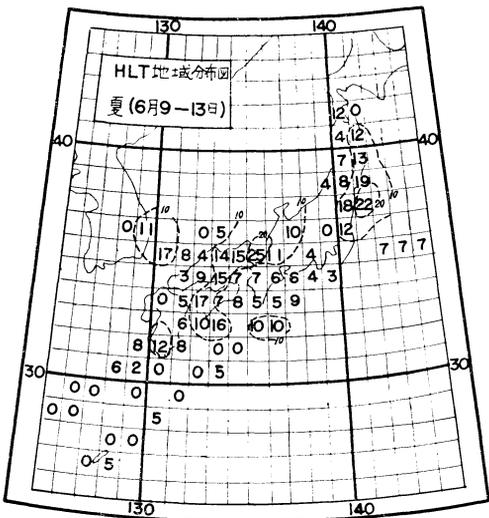
—1966年9月19日受理—



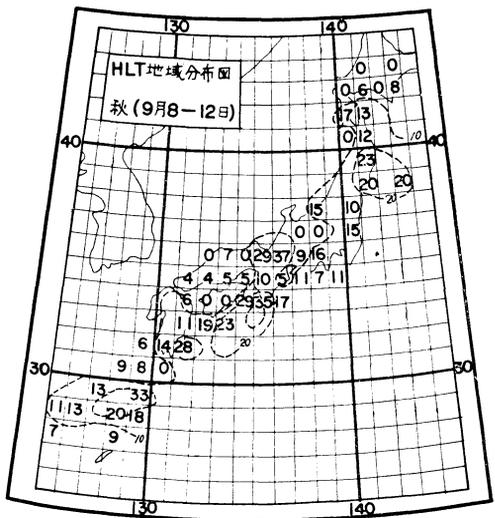
d, 冬期(才1回)



b, 春期(才2回)



c, 夏期(才3回)



d, 秋期(才4回)

第1図 季節別の高々度乱れ(HLT)観測率の分布図(全強度)  
数字は飛行回数10回以上のもののみ。等値線は10%毎にひいてある。

等値線は(乱れの多いところは)それらを多少参考にした部分もある。

特性として

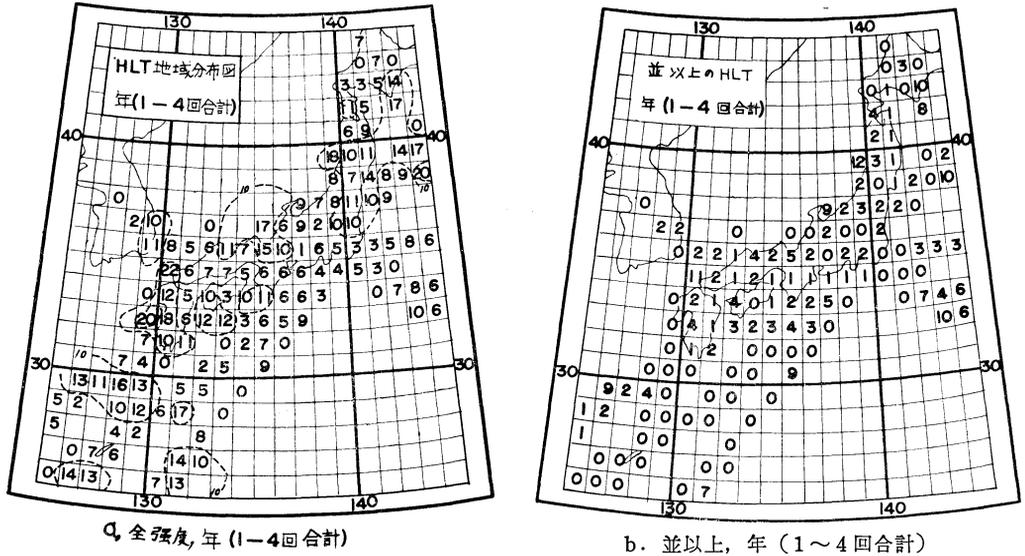
- (a) 地域的に発生率の高い場所は、三陸沖、四国沿岸、若狭湾等に見られ、
- (b) 季節的には春(3月10~14日)が少ないのは、本邦付近を通るジェットストリームの位置が南下しているのと(北日本で特に HLT の発生率が小さ

い)、風の場合、安定等に起因するものと思われる。

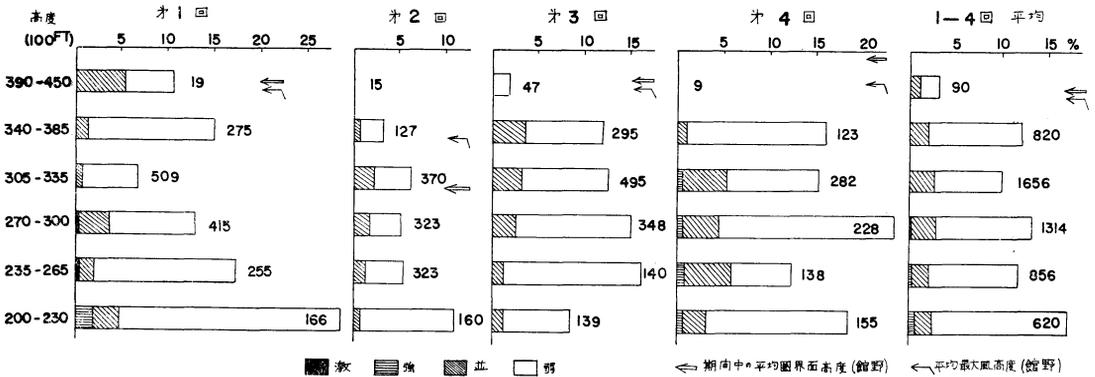
第2図は4回の合計による全強度(弱以上)と、並以上のそれぞれの発生率を示すものである。これらの図から直ちに地形の影響を読みとるのは困難であり、それには豊富な資料を用いた詳細な調査が必要である。

### 3. 高度分布

調査の都合上、地域を緯度と経度の2.5度区画にわけ、その中を飛行したときの乱気流の有無を一単位とし



第2図 全期間(1~4回合計)における全強度および並以上の HLT 観測率(%)の分布図  
 数字は飛行回数10以上のもののみ



第3図 日本付近上空における各高度層毎の HLT 観測率  
 (図中の数字は統計に使用された各層毎の飛行回数)

て、各飛行高度毎に分類し、HLT の観測率を調べた(第3図)。飛行高度層の分け方は、450mb から 150mb にいたるところの 50mb 毎の高度間隔に大体対応するものである。高度による飛行回数がかなり不ぞろいであるので、図中に参考として統計に使用した各層の飛行回数を示してある(3,900ft 以上は特に資料が少ない)。結論として、

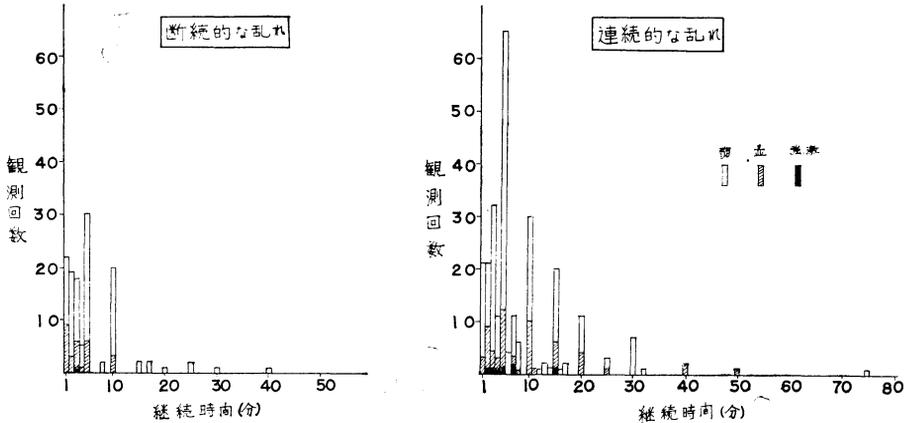
- (a) 20,000ft 以上 38,500ft 以下では、特に高度による HLT 発生率の差は現れていない。
- (b) 境界面や最大風高度の上になる 40,000ft 以上の飛行では HLT 観測率が小さくなるが、このこと

に関しては後節にゆずる。

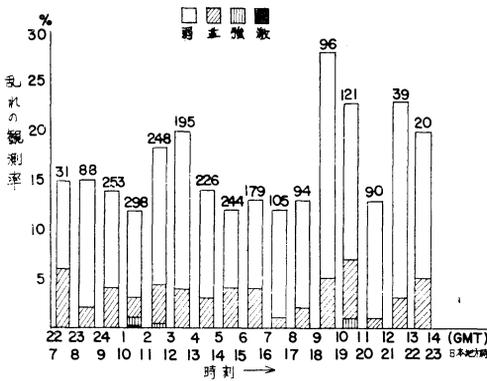
4. 継続時間

国内線および自衛隊機の報告で、HLT の継続時間の頻度を調べると第4図のようになる。断続性、連続性とも 1~5分のものが大部分であり、5分のものが最多頻度を占めている。調査に用いた飛行機の平均速度を約 300 ノットとすると、乱気流の範囲は約 25 マイルのものが最も多かったことになる。この断続性と連続性の区別は、パイロットの主観によるわけであるが、強い HLT は連続性の中に多く入っている傾向がある。

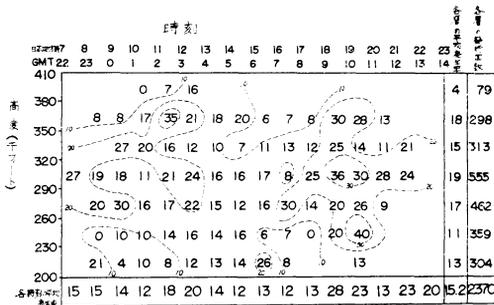
5. 発生時刻



第4図 日本上空の国内飛行で観測した HLT の継続時間の頻度



第5図 時刻による HLT の観測率 (日本代近)  
(数字は統計に使用された各時間帯の飛行回数)



第6図 時刻および高度に関する HLT の発生率  
(数字は飛行回数10回以上のものを百分率で示す)

1 時間毎の時間帯に分けて HLT の観測率を調べてみると、太陽の南中頃と日没から夜半にかけて大きい傾向がみられる (第5図)。しかし並以上についてはこの傾向が認められない。また夜半から早朝にかけての変化は、飛行資料が少なく不明である。これを第6図に示す

ように 3,000ft 毎の高度層に区分すると、さらにこの傾向が顕著になる。すなわち塔状積雲や積乱雲の周辺に存在する場合は除外されているにもかかわらず、対流高度の上層部と考えられる約 30,000ft 位のところに、日没頃 HLT の極大が見られるのは興味がある。

6. 圏界面および最大風高度

圏界面付近で CAT が多く観測されることは、Balzer and Harrison (1959)<sup>2)</sup> や Rustenbeck (1963)<sup>3)</sup> によって報告されている。しかしこれらの調査では飛行高度の分布の問題と、圏界面よりジェットストリームによる付随現象であるかが明確でない。

そこで本邦におけるラジオゾンデ観測所のうち、三沢、仙台、館野、浜松、潮岬、米子および鹿児島島の7地点を選び、これらの上空を通過した航空機の HLT の有無を、その観測所の最も近い時刻の高層資料における圏界面高度および最大風高度と比較した (館野は航空機が上昇または下降過程にある場合が多いので、飛行高度の明確なときのみが選ばれている) 各ゾンデで報じられる圏界面高度と最大風高度は、鉛直断面図解析により周辺の資料との関連がチェックされた。また飛行機の資料は上記の地点の 50km 以内 (大部分真上) を通過したものを選び、その地点を含む前後 75 km の範囲の HLT の発生の有無を調べた。

第2表によると圏界面と最大風高度の何れの場合もその下方の発生率が高く、それらを離れるほど大きくなっている。しかし季節により、圏界面や最大風をはさんでの資料の分布が一様であるかどうかが問題である。実際には本邦上空では夏季の圏界面高度が他の季節より高く、飛行機観測が圏界面や最大風高度の下に偏在してい

るから、夏季の HLT の平均発生率が他の季節より大であると仮定すれば、第2表の下層における HLT の発生率を高くするおそれがある。そこで圏界面高度が比較的 low、資料が圏界面高度の上下に分布している第1回(12月)と第2回(3月)のみを総合したものが第3表である。これを見ると、圏界面のすぐ上と最大風高度のすぐ下で、HLT の発生頻度の極大が明確に現れている。この期間の本州上空には中緯度圏界面が卓越しており、その付近の特色を物語るものであろう。

第2表 圏界面と最大風高度に対応する飛行位置(5,000ft 毎の高度差で表わす)の HLT 発生率(%). (飛行回数10以上、ただしカッコを付したものは5~9回を参考のためかかげた)

圏界面	上 ← → 最大風高度の下 (1,000 ft)					平均	資料数
	5	0	5	10	15		
上 ↑ 圏界面の上 (1,000 ft)	10~5	(0)				0.0	12
	5~0	(0)	4	8	13	6.6	87
下 ↓ 圏界面の下 (1,000 ft)	0~5	(13)	5	6	3	(0)	5.0
	5~10	(0)	14	20	10	22	14.1
	10~15	(0)	22	24	24	(0)	21.8
	15~20		21	12	32	27	23.8
平均	6.3	11.3	12.9	19.8	20.0	15.1	657
資料数	32	97	254	217	50	(総平均)	(総計)

第3表 第1期(12月)と第2期(3月)における圏界面と最大風高度に対応する飛行位置(5,000ft 毎の高度差で表わす)の HLT 発生率(%), (詳細は第2表と同じ)

圏界面	上 ← → 最大風高度の下 (1,000 ft)					平均	資料数
	5	0	5	10	15		
上 ↑ 圏界面の上 (1,000 ft)	10~5	(0)				0.0	12
	5~0	(0)	4	8	13	6.9	87
下 ↓ 圏界面の下 (1,000 ft)	0~5	(17)	0	3	0	(0)	2.5
	5~10	(0)	(20)	(0)	10	(0)	6.4
	10~15	(0)	23	6	9	(0)	10.9
	15~20		(25)	4	18	10	11.1
平均	4.0	10.7	4.5	8.3	3.8	6.5	384
資料数	25	75	156	97	26	(総平均)	(総計)

1967年5月

7. 気象要素との対応

7.1 CAT の予報に用いられる気象要素

クリアエヤータービュレンス(CAT)の発生と関係をもつ気象要素としては、風のシアー、リチャードソン示数等があり、多くの人々によりその賛否と相関の程度などが論じられてきた。なお参考のため、これらの判定基準をごく簡単に述べると、

(a) 風の水平シアー (Horizontal wind shear)

水平シアーは、二つのコンポーネントとに分けて、

$$\frac{\Delta V}{\Delta n} = \left[ \left( \frac{\Delta u}{\Delta n} \right)^2 + \left( \frac{\Delta v}{\Delta n} \right)^2 \right]^{1/2} \quad (\Delta n \text{ は距離の増分})$$

で表わされるもので、Harrison や George らにより重要であるといわれている。CAT の予報に用いる基準として両氏は、

300mb 上で	150 カイリにつき	50 kt
----------	------------	-------

をあげ、これにジェットストリームに対する位置や次の鉛直シアーを組み合わせて予報手段としている。

(b) 風の鉛直シアー (Vertical wind shear)

有力な気象要素の一つとされ、予報基準として、

Mook	5 kt/1000 ft 以上の所
Anderson	6 kt/1000 ft 以上の所

をあげている。なお府中の米国気象隊が、並以上の CAT の地域を予報する判定に使用している基準は次のようである。

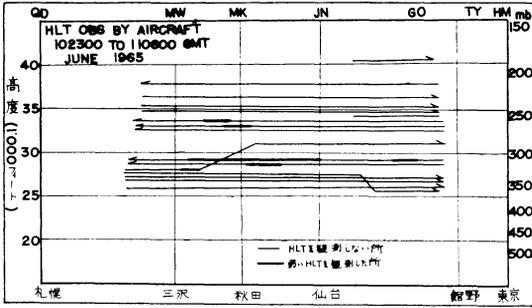
水平のシアー	50 kt/90 NM 以上の所か
鉛直のシアー	10 kt/1000 ft 以上の所

(c) リチャードソン示数 (Richardson number)

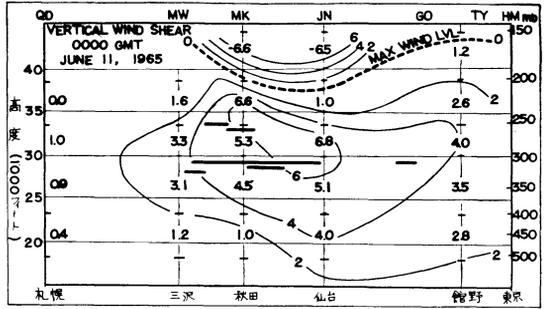
最も論議の多い要素で、

$$R_i = \frac{g \Delta \theta}{\Delta z} / \overline{\theta} \left( \frac{\Delta u}{\Delta z} \right)^2 \quad (g \text{ は重力の加速度, } \theta \text{ は温位, } \Delta u / \Delta z \text{ は鉛直の風のシアー})$$

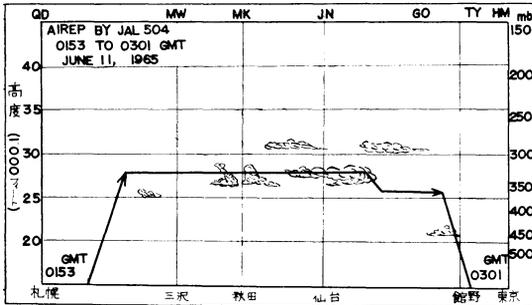
で表わされる。R<sub>i</sub> の有効性に関しては、Brundige, Lake 等は否定し、Bannon, Pinus, Keitz, Colson 等は有用としている。これはしかし元来が小規模な空間に対して考えられるものであるから、Anderson 等のように薄い層(たとえば 1000 ft)について有効であり、厚い層を対称とすると相関性が薄らぐ場合が多い。しかし乍ら今度の ICAO 計画の調査では、現実的な便利さから指定等圧面間の値との対応が調べられた。薄い層を対象とするときは、通常 R<sub>i</sub> < 1 が 1つの判定基準とさ



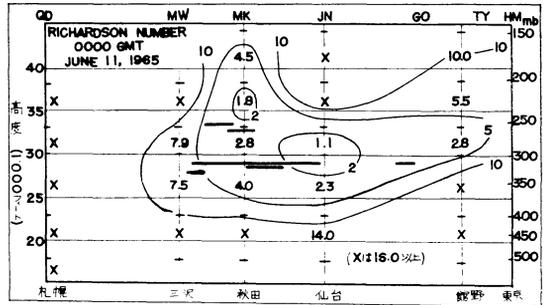
d) 東京 札幌間の各飛行高度における実際のHLT観測資料



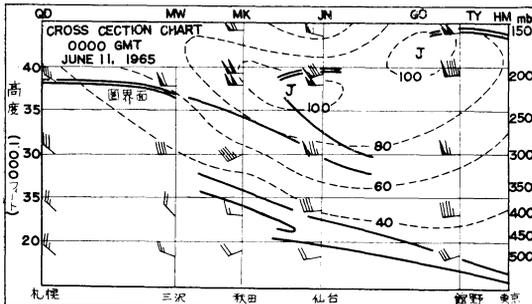
d) 風の鉛直シャー図 (KT/1000 FT)



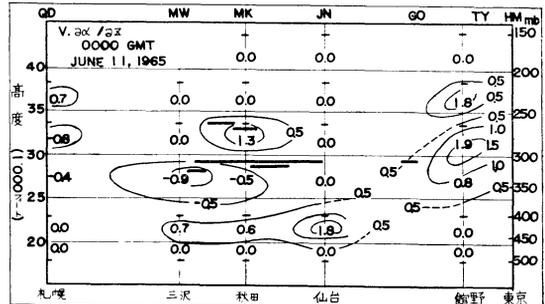
b) JAL 504 機のパイロットが観測した雲の図



e) リチャードソン示数図



c) 鉛直断面図 (破線はノットにおける等風速線)



f)  $V \cdot \partial\alpha / \partial z$  の図 (KT · DEG/1000 FT X 10)

第7図 東京一札幌間で昭和40年6月11日の8～15時の間に飛行機で観測された HLT の位置と9時における気象要素の鉛直断面図 (3～8時の飛行機観測資料はない)

れている。

(d) 風速と風向の鉛直変化との積

Endlich (1964)<sup>4)</sup> は二つの高度間の風向変化量  $(\frac{\partial\alpha}{\partial z})$  と、その層の平均風速 ( $V$ ) との積、すなわち  $V \cdot \frac{\partial\alpha}{\partial z}$  が CAT とよく対応すると述べた。そして Endlich and McLean (1965)<sup>5)</sup> は、その絶対値  $|V \cdot (\frac{\partial\alpha}{\partial z})|$  が鉛直シャーや  $R_i$  よりも CAT との相関ですぐれているとした。

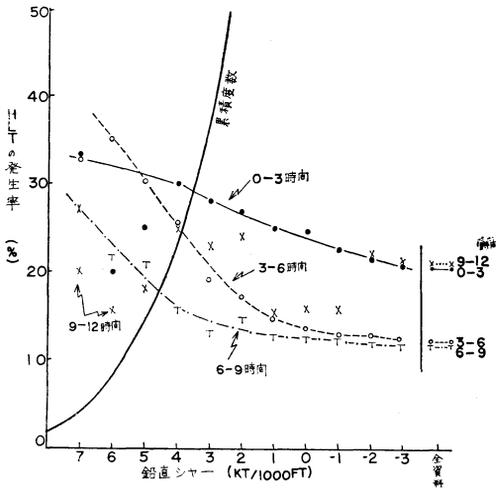
7.2 実際の対応例

第7図は、1965年6月11日の8時より15時までに飛行した 20,000 ft 以上の航空機の羽田一千歳間の HLT の観測資料 (7図 a) と、9時における上記の7.1節における (b)～(d) の気象要素との対応例である。この例では並以上の HLT は観測されていないが、各高度の飛行機の資料が多く得られたので選んでみた。7図 bはそのうちの JAL 504 便のパイロットが画いた雲のスケッチで、地上観測では何れも  $C_i$  または  $C_s$  となっているが、秋田上空の雲がやや塔状化している点が注目される。7図 c は鉛直断面図、7図 d, e および f は、それ

ぞれ鉛直シャー、 $R_i$  および  $V \cdot \partial d / \partial z$  の図である。7 図 d~f の値は 500, 400, 300, 250, 200 および 150 mb の指定等圧面の値のほかは、圏界面と最大風高度の値のみを加えて求められた。これらを見ると前節の(b)~(d)の気象要素は HLT と大体対応しており、これらの解析図または計算値が速かに得られるものと仮定すれば、HLT の発生場所を予報するのにかなり役立つことがわかる。ただ本邦上空のような風向変化の少ない所では、 $V \cdot (\partial \alpha / \partial z)$  の値は  $\alpha$  が 0 の場合が多く、10~20度の小さな風向変化量を問題としなければならない点に疑問があり、利用にあたっては時と場所を選ぶ必要がある。

8. 鉛直シャーとリチャードソン示数の有効時間

鉛直シャーや  $R_i$  が HLT の発生場所をよく説明するとしても、その値の予報が困難な限り、持続性がなければ予報に有効な要素とはいえない。実際に HLT 自身も永続性の短いものとされており、両者の対応に関して有効時間を吟味しておく必要がある。



第8図 観測された風の鉛直シャーより大きな値に対する HLT の発生率

8.1 時間差を考慮した鉛直シャーと HLT の発生率

第8図は指定等圧面間の計算された風の鉛直シャーと同じ飛行高度の HLT の観測の有無を、両者の観測時間の差を3時間毎に分けて調べてみたものである。HLT の発生率は、対応する鉛直シャーより大きな値すべてに対するものである。たとえば鉛直シャー4以上を基準にすれば、3時間以内では HLT の発生率は30%となる。

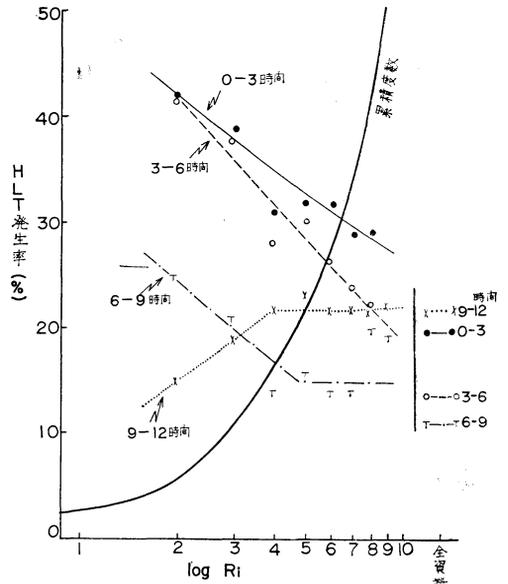
(a) 当然のことながら観測時間の差が小さい程、あ

るいは鉛直シャーの値が大きい程、HLT の高い発生率を示している(しかし鉛直シャー5以上の0~3時間と3~6時間の両者は、逆の傾向を示しているが、これは資料数の少ないことにも起因すると思われる)。

(b) 各時間毎に鉛直シャーの全資料に対する平均発生率(図の右端)を参考にし、鉛直シャーが大きくなるにつれての発生率の増加を考えると、予報に有効と思われる範囲(全資料の平均値より若干大きな鉛直シャーの値を示すところ)は次のとおりである。

0~3時間では	鉛直シャーが -1 以上
3~6 "	" " 1 "
6~9 "	" " 4 "
9~12 "	すべての鉛直シャーの値に対して無意味

(c) また全資料の累積度数曲線を考慮すると、例数が50%に達するのは鉛直シャーが2.5値に対してであり、時間差が6時間を過ぎると予報には役立たないことになる。



第9図 観測されたリチャードソン示数より小さな値に対する HLT の発生率

8.2 時間差を考慮した  $R_i$  と HLT の発生率

第9図は前節の8.1と同じことを  $R_i$  について行なったもので、 $R_i$  の値は対数目盛りで表してある( $R_i$  自身より  $\log R_i$ ; または  $1/R_i$  が CAT とよい相関を示すことは Endlick and McLean<sup>4)</sup> によって述べられてい

る)。

(a) 0~3時間および3~6時間の時間差では、 $R_i=10$ 以下の値に対してよい対応を示している(10以上の値の例数は50%位あり、全例の平均発生率は低い)。

(b)  $R_i$ の比較的大きな値(4~10)に対しても発生率が高くでるのは使用した層が厚いため(5,000ft前後)で、もっと薄い層(1,000ft以下)をとれば、これらの $R_i$ の大きい値に対しては発生率が低くなり、 $R_i$ の小さな値がもっと多く現れて明確な対応を示すであろう。

(c) 9~12時間では2と3の $R_i$ の値に対して負の相関がみられる。資料がやや少ないが、 $R_i$ の低い値は永続性がなく、10時間位たつと逆に大きくなる傾向があるのかも知れない。

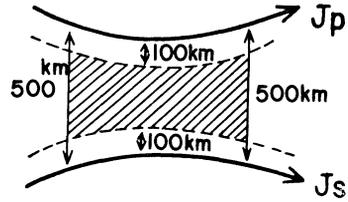
以上結論的には、鉛直シャー、 $R_i$ ともそのままの値をその場所を飛行する航空機の HLT の有無に役立たせるには観測時後6時間以内までである。したがってゾンデ観測から高層天気図の記入までに数時間を要する地方気象官署の現状では、予報への利用価値がなく、観測資料の送信のスピード化と共に等圧面天気図上で、パターンの動きと共に鉛直シャーや $R_i$ の基準値の移動、消長を追跡する研究が今後必要な問題となる。

9. ジェットストリームとの関係

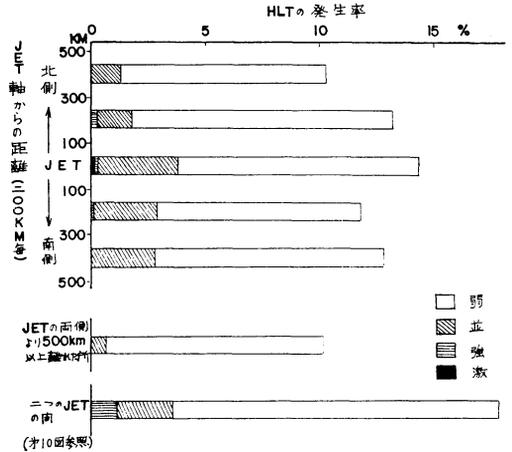
9.1 ジェットストリームの位置に対する HLT

ジェット(jet stream を以下ジェットと略称する)の近くに CAT の発生率が高いことは、多くの調査でよく知られている(たとえば Harrison H.T. (1959)<sup>6)</sup>)。本邦上空は特に寒帯ジェットおよび(または)亜熱帯ジェットの走行する場合が多いので、これらの付近における HLT の発生率を求めてみた。

まずジェットの軸から 100km 以内と、ジェットの南側(下流に向い右側)および北側(同じく左側)のそれぞれ 100~300km, 300~500km の五つに分ける。さらにジェットから 500km 以外の全区域と、二つのジェット(通常、寒帯 [ $J_p$ ] と亜熱帯 [ $J_s$ ] の両ジェット)が 500 km 以内に接近した場合の間の区域におけるジェットから 100km 以上離れた所(第10図の斜線をほどこした区域。なおこの場合のジェットから 100km 以内の所は前述の最初のカテゴリに入れる)の合計七つの場所に分け、各場所における HLT の強弱別の発生数をその区域の全飛行回数に対する百分率で求めた。なおジェットに平行に飛ぶ場合は、直角に飛ぶ場合に比べて飛行距離が長くなるので、実際には上述のジェットに対する 200km 毎の



第10図 二つのジェットストリームの間の調査区○を示す(斜線の部分)



第11図 ジェットストリームの位置に対する HLT の発生率

平行線と、それに直角な経度2.5度(約200km)の線で囲まれる四角形の範囲毎に発生率を算出した。この場合ジェットの直角方向の区分に経度線の間隔を用いたのは調査を簡便にするためで、地域による多少の経度線間隔の誤差は発生率で求めるときはあまり重要でないと考えたからである。

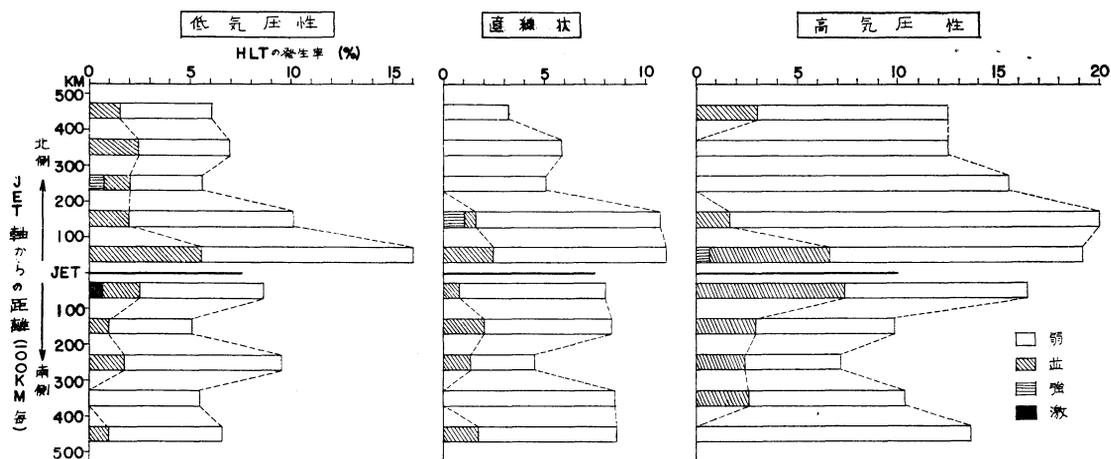
結果は第11図に見られるとおりで

(a) 弱以上の HLT は、二つのジェットの近接した場合の間の地域が、ジェットから 500km 以上離れた場所に比べて2倍近く大きな発生率を示すことのほかは、それ程大きな特色は見られない。

(b) しかし並以上、特に強の HLT は二つのジェットの近接地域か、ジェットのすぐ近くに多く発生する傾向がよく現れている。

9.2 ジェットストリームの彎曲に対する HLT

次にジェットの曲率に対しては、低気圧性の彎曲をもったジェットの北側に CAT が多いといわれているが(たとえば Harrison H.T. 1959<sup>6)</sup>)、この点についてジェットの彎曲を低気圧性、高気圧性、直線状の三つに分



第12図 低気圧性や高気圧性のわん曲および直線状をなすジェットストリームの位置に対する HLT の発生率

けて調査した。なお三つの型における特色を見るため、周辺の資料が少なく彎曲の不明確な部分(約1/3)は割愛した。またこの調査ではジェットに対して100kmの距離で算出した関係上、直角方向の区画線も100km毎に設け、縦横100kmの区画毎に発生率を集計した。

結果は第12図のとおりであり、次のような傾向がよくうかがわれる。

(a) 低気圧性の曲率を持ったジェットの北側では、確かに並以上の HLT の発生率が大きい。しかし

(b) 高気圧性の曲率を持ったジェットの方が、この調査ではずっと大きい発生率を示した(特に弱以上の発生率)。

(c) ジェット軸近傍で発生率のやや高い所は、南側の約100km、北側の約200km以内で、それ以上は特に大きな発生率の差は認められない。

ジェット軸近くに発生する HLT の分布の問題は上記の水平方向の他に、さらに鉛直方向の問題もあるが、これ以上の論議は別の機会にゆずることとする。

## 10. あとがき

この調査は東京航空地方気象台予報課が気象研究所の研究費により行なっている「航空気象のための高高度の気象の研究」の一部である。今回の ICAO 計画に積極的に参加され、貴重な資料を提供して下さった各航空

会社、自衛隊及びアメリカ海空軍などに厚く感謝します。

## 参考文献

- 1) Colson D.(1963): Analysis of Clear Air Turbulence Data for March 1962, Monthly Weather Review, Vol. 91, No. 2, 73~82.
- 2) Balzer M.E. and Harrison H.T. (1959): The Nature of High Level Clear-Air Turbulence, UAL Met. Circular, No. 48, 1959.
- 3) Rustenbeck J.D. (1963): The Association of Richardson's Criterion with High Level Turbulence, Monthly Weather Review, Vol. 91, No. 4, 193~198.
- 4) Endlich R.M.(1964): The Mesoscale Structure of Some Regions of Clear-Air Turbulence, Journal of Applied Met. Vol. 3, No. 3, 261~276.
- 5) Endlich R.M. and McLean G.S. (1965): Empirical Relationships Between Gust Intensity in Clear-Air Turbulence and Certain Meteorological Quantities, Journal of Applied Met. Vol. 4, No. 2, 222~227.
- 6) Harrison H.T.(1959): The Use of Horizontal Wind Shear in Forecasting High Level Clear-Air Turbulence, UAL Met. Circular, No. 49, 1959.