

### 3. 航空の立場から見たリリモートセンシングのあり方

中山 章\*

#### 1. 運航にとって危険な気象現象

現代の航空機の安全を害する主なものは第1表の左側の現象と考えてよく、これらを発生させる気象現象は雲頂が高くエコー強度の強い積乱雲、強い晴天乱気流、強い低層の風の鉛直シャー、それに種類は異なるが視認できにくくさせる気象状況である。

積乱雲については機上レーダーが既に実用化されて問題は主に利用上の技術にあるので、ここでの話題は晴天乱気流 (clear air turbulence, CAT) と、低層の風の鉛直シャー (low level vertical wind shear) の探知に限定する。これら2つの現象はこれから先、一層要求がきびしくなる。なぜなら、これから先も航空機は更に高速化、大型化が進むからである (中口, 1973)。

#### 2. 晴天乱気流

CAT は密度の異なる境界面に発生したケルビン・ヘルムホルツ波 (K-H波) が不安定になった時に起こる。Browning-Watkins (1970) のレーダー観測によると (第1図)、初め 800 m の安定層の中に厚さ 150 m 以下の単層のエコーがあったが、不安定になり始めてから約5分後に最盛期の "Braided structure" となり2~3分続いた。その後、エコーは2つに分れ、この状態は観測を中止するまで約2時間も続いた。このように K-H 波が不安定になるのはごく短い時間である。

一方、発生域 (第2図) はせいぜい  $10^2 \sim 20^2 \text{ km}^2$  の大きさである (Boucher, 1972)。これは浪雲の不安定になる波数ともおよそ一致する (Ludlam, 1967)。仮りに、10 km の拡りとすると現在の航空機がここを通過するに要する時間は約50秒であり、この値は商業航空機が強いCATに遭遇する時間と大体一致する。上に述べたように、強いCATのじゅ命は短いので全く同じところを飛んでも severe turbulence に遭遇する航空機は少ない。

昭和46年11月22日にB-727型機が仙台付近の高度

第1表 運航の障害になる気象現象

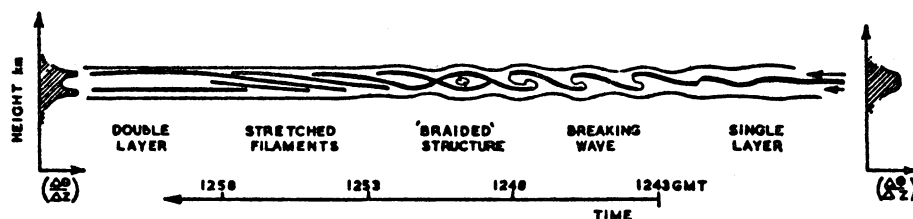
|                  | 航空機の安全を害する現象         | 左の現象を伴う気象現象                                 |
|------------------|----------------------|---------------------------------------------|
| 巡<br>航<br>中      | severe turbulence    | (a) 強い積乱雲の中および周辺<br>(b) 晴天乱気流<br>(c) 著しい山岳波 |
|                  | lightning stroke     | 電荷をもっている対流雲 (雲頂高度が高く強いエコーの Cb)              |
|                  | hail                 | 雲頂高度が高く強いエコーの Cb                            |
|                  | icing                | 過冷却した状態にある雲 (定期旅客機では対流性の雲の上部の他は問題は少ない)      |
| 離<br>着<br>陸<br>時 | poor visibility      | 霧                                           |
|                  | low ceiling          | ある種の雲                                       |
|                  | vertical wind shear  | ガスト・フロント、ある種の前線                             |
|                  | その他、「巡航中」の欄に示した現象も含む |                                             |

31,000 ft (9,343 m) で突然 "ドカーン" という音と同時に失速し 8,000 ft (2,424 m) 落とされた例があるが、この時の解析では航空機はジェット気流の風の極大域に近づくにつれて対気速度は増加し突然 buffeting speed を越え失速したと考えられる。この例の buffeting speed は計算によると 0.88 Mach であるが、速度計は瞬間的には 0.93 Mach ぐらいに達したとパイロットは報告している。

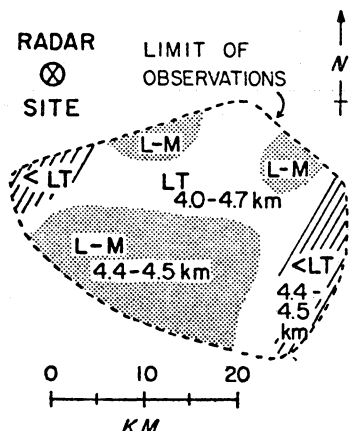
総観スケールの立場からみると、該当地点はジェット前線内にあつてCATの起こりやすい条件になっている。しかし、実際に強いCATに遭遇したのは朝の1回とこの航空機だけである (この強いCATの後は低い高度を運航した)。

CAT の特別観測によると風の変動にはメソ・スケールのものや (Boucher, 1972)、乱流スケールのもの

\* Akira Nakayama, 東京航空地方気象台。



第1図 基地レーダーによる K-H 波の観測例 (Browning・Watkins)



第2図 F-86 のタービュレンス報告の分布. 高度は4.0~4.7km, 時間は1532~1558までの26分間 (Boucher).

(Axford, 1973) があることは知られているが、この場合にどのような風の構造であったかは分らない。

第2表はヨーロッパでの現業予報について行なったCATの検証だが、この結果では気象学的には意味があるとしてもパイロットは利用しにくい (Dutton, 1979)。このような結果になるのはCATそのものの特質である。従って、総観的手法によるCATの予報はあくまで発現のポテンシャルを示したものでパイロットにとっては第1近似の情報としかならない。このため、パイロットは飛行中独自の方法で回避に努めているが効果的なものではなく航空機に搭載できる探知測器の開発が望まれている。

### 3. 低層の風の鉛直シャー

小型機は重量、着陸速度とも小さいので慣性は小さい。このため、風が急変しても早く流れにのる。ところが最近の大型機は重量が200~300tを越え、失速々度

第2表 晴天乱気流(並~強)が予報されている場合と予報されていない場合とでのCATの遭遇率(ヨーロッパ地区での4,378例の調査; Dutton, 1979).

| 遭遇率                | 種類 | 飛行距離  | 回数    |
|--------------------|----|-------|-------|
| CATの遭遇率(全体)        |    | 1.26% | 1.68% |
| CATの予報されている領域での遭遇率 |    | 2.06  | 2.83  |
| Nil 予報域でのCATの遭遇率   |    | 1.03  | 1.38  |

も約250~300km/hrと大きいので着陸する直前でも大きな慣性を持っている。更にエンジンの出力を増してから揚力が増すまでに時間の遅れがあるため低層で風の鉛直シャーが大きいと危険になる。すなわち——慣性の大きい航空機は風の鉛直シャーの大きいところを通過する場合でも瞬間的には対地速度は維持されるので翼のまわりを流れる空気の流れは風が急変すると直ちに変る。揚力は迎え角が一定ならば翼のまわりを流れる速度の2乗に比例するから、たとえば最初は向い風だったものが追風になると急激な揚力減少が起こる。

重要なのは高さが300m以下に風の鉛直シャーの大きい境界面が存在する場合である。何故なら、この付近では着陸のため失速々度に近い値で飛んでいるので風の急変により揚力を急激に失なうと回復するだけの高度に余裕がないからである。

上のような条件は雷雲下のガスト・フロント、特殊な構造の前線、局地的な寒気の上に暖気の流入が著しくなっている地域などに見られる。このような条件の時に何時でも着陸に危険な程の風の鉛直シャーがあるのなら、上の状況が存在した時は着陸しなければ良いので問題解決は簡単だが、着陸できない程のものは極めて小さい頻度でしか発生しないので常時シャーの大きさを測定して着陸可能かどうかを判定する必要がある。

#### 4. 晴天乱気流と低層の風の鉛直シヤーの条件下における操縦

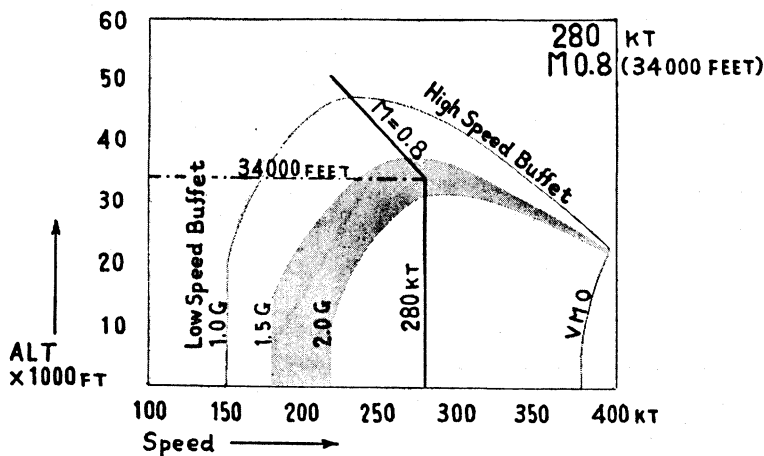
上に述べた2つの現象を操縦上の立場からみると、CATは高速における衝撃波失速に、低層の風の鉛直シヤーは低速失速に関係する(第3図)。

理論的臨界マッハ数は翼型によって異なるが、現在の実用機では0.85 Mach ぐらいになると翼の上面に、更に0.95 Mach ぐらいになると翼の上・下面に衝撃波が発生し揚力を著しく減少させ、昇降舵の効きも非常に悪くなり操縦不能になることもある。

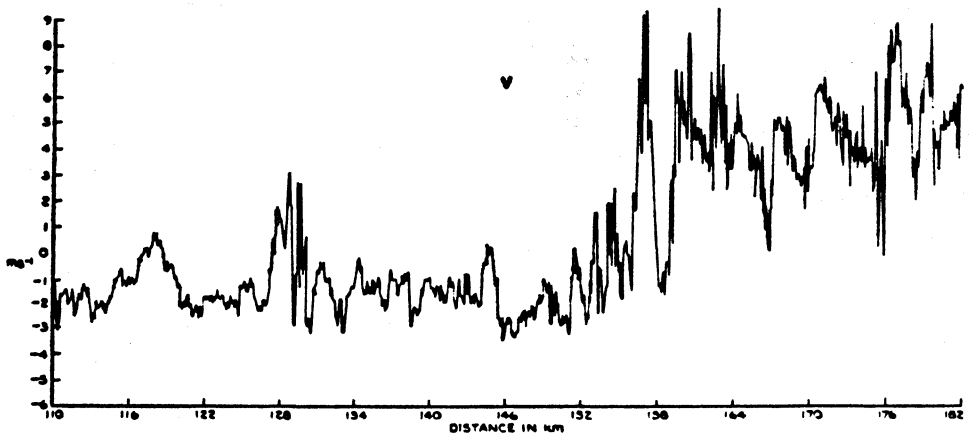
現在用いられている大きさの商業航空機のタービュレンスに最もよくレスポンスするのは10~数100mの波長

のうずである。第4図は圏界面に発生したK-H波の中の風速変動の一部だが、この中には2~3kmの間に10m/sec以上も大きく変化しているところがある。このような条件下では航空機の動揺は勿論のことだが、更に臨界マッハ数に近い速度で飛行していると衝撃波失速を起こすきっかけにもなりうる。当然のことだが、CATの領域内では航空機は加速度を受けるので操縦上安定な領域は第3図のように一層狭くなる。上述の理由のためCATは亜音速機にとって重要となる。

一方、着陸態勢にある場合には失速々度に近いので第3節で述べたような大きな風の鉛直シヤーがあると慣性の大きい航空機は突然揚力を失ない着陸の障害になる。



第3図 High speed buffet と Low speed buffet を示す模図。操縦はこれら2つの buffet 領域に囲まれたところで安定である。安定領域は加速度が大きくなると狭められる。



第4図 圏界面上に発生したK-H波による風速変動の南北成分。152~158 kmの間で風速は急変している(Axford)。

風の鉛直シャーの大きさは短い時間で変動するものなので、その大きさを常時測定して自動処理しないと離発着の多い空港では十分な機能を果たせない。

## 5. 測器の条件

上に述べた晴天乱気流と低層の風の鉛直シャーの探知測器の条件を要約すると次のようになる。

### 5.1. 機上装備とするか地上装備とするか

CAT の場合、じゅ命、出現領域とも狭いので機上に装備することが必要である。一方、低層の風の鉛直シャーは離着陸時に用いられるので管制上の制約をうける。従って、地上に装備しその情報を速かに伝達することである。

### 5.2. 装備する場合の制限条件

CAT の場合は現用の 3.2 cm 波レーダーでは探知は不可能であり、探知できるような高出力の波長の長いレーダーは大型化して搭載できないので別のことを考える必要がある。

低層の風の鉛直シャーの測定器は飛行場に設置するので、(イ)騒音、(ロ)着陸に障害にならないような構造、であることが条件である。

### 5.3. 測定の条件

いずれの場合も強度の強いものしか実際には問題とならないので強いものが測定できればよい。勿論、絶対値が測定できることは望ましいが相対値であっても利用できる道はある。低層の風の鉛直シャーの測定は 500m 以下で十分である。

### 5.4. 観測値の処理

#### 5.4.1. 低層の風の鉛直シャー

低層の風の鉛直シャーについては輻輳している空港では風の鉛直シャーの小さい時を見はからって着陸することが必要なので、(イ)風を測定しシャーを計算する、(ロ)着陸する航空機に対して鉛直シャーのレスポンスを計算する、(ハ)その空港に着陸するかどうかを決定する。上の(イ)から(ハ)までを数秒以内に処理して常時、この状況が発表されているような warning system が必

要である (McCarthy, 1979)。なお、この処理は技術的に可能であるが、問題は測定にある。

#### 5.4.2. 晴天乱気流

CAT の探知は K-H 波の波形が探知できれば最も有効であるが、(イ)風の鉛直シャーが大きいか、(ロ)密度の異なる境界があるか、だけでも有効である。何故ならパイロットは事前にタービュレンス域を通り抜けるのに最適な機速にセットすることができるからである。

### 5.5. 情報の伝達

CAT については機上装備なので表示装置となるが、低層の風の鉛直シャーの場合には測器は地上に設置するので 4 項で述べたデーター処理のあと、速かに伝達する必要がある。この場合、観測者、管制官には連続した記録としパイロットには符号で送ることが望ましい。

最後に、操縦上の問題について教えていただいた全日空 KK の渡部機長にお礼申上げる。

## 文 献

- 中口 博, 1973: 飛行機—その将来と課題一, 東京大学公開講座“空”, 東大出版会。  
 Browning, K.A. and C.D. Watkins, 1970: Observations of clear air turbulence by high power radar, *Nature*, 227, 260-263.  
 Boucher, R. J., 1972: Mesoscale history of a small patch of clear air turbulence, *J. Appl. Met.*, 12, 814-821.  
 Ludlam, F. H., 1967: Characteristics of billow clouds and their relation to clear air turbulence, *Quart. J. Roy. Met. Soc.*, 93, 419-435.  
 Axford, D.N., 1973: On an observation of turbulence waves on the tropopause surface, *Quart. J. Roy. Met. Soc.*, 99, 439-449.  
 Dutton, M. J. O., 1979: Performance of conventional operational forecasts of clear air turbulence during 1976 turbulence survey, *The Met. Mag.*, No. 1280, 108, 61-76.  
 McCarthy, J. and E.F. Blick, 1979: An airport wind shear detection and warning system, WMO Technical Conference on Aviation Meteorology, Geneva, 5-9 Nov. 1979.