

CAT (晴天乱流) と航空機の運航について*

石 崎 秀 夫**

1. はし が き

ジェット機が商業航空に登場して航空運送事業は急速に発達し、高速、大量輸送が可能となったが、今までに経験しなかったような大事故が起り始めた。

航空機事故の原因には、人的因子、機材因子によるものもあるが、環境因子(空間状態¹⁾の悪かったことが、直接、間接の原因となったもの)によるものも多い。

航空機の離発着はじめ、飛行のすべては、空気力学で説明され、350トンにもおよぶジャンボジェット機(Boeing 747)も計算通りの性能を示し、軽々と離着し、マッハ0.88の高速で巡航することができるが、航空機の性能計算などに際し取扱う大気は静止大気または層流という仮定のもとづくものである。

しかし実際にわれわれが飛ぶ空の状態は千変万化で、航空界で使われる標準大気状態(I.S.A.)²⁾の空は勿論存在せず、層流ばかりの空の日も全くない。

1972年、新春早々の新聞紙上に、アメリカにおいて、Boeing 747 が、CAT に遭遇し、20数名の負傷者が出たことが報じられた。

空港でみるあの豪華船を思わせるような超大型ジェット機でも、空間状態が悪くなれば、木の葉が風に舞うように、自然の力に弄ばれてしまうのである。

* The Influence of CAT on the Navigation of Aircraft

** H. Ishizaki 全日空前任機長

- 1) 気象条件を含み、乱気流(CAT, 低層の風シャワーに伴う)、空中静電気等など考慮した大気の状態を仮称
- 2) 日常の運航時、性能計算(離陸滑走路長、上昇時間、距離、巡航速度、燃料消費量など)に用いる基礎になる大気でICAO大気である。

—1972年5月31日受理—

航空の発達をふり返ってみると、航空機の設計者、気象専門家、パイロットの三者の密接な協同研究、協同態勢が欠けていたように思われる。これは船舶の歴史に見られる状態と似ている。始めに船を作り、次第に遠洋を航海するようになり、時に無風状態に悩まされたり、思わぬ嵐に遭遇し、あるいは難破し、それらの苦い経験から気象学の必要を知り、気象学が生れ、次第に解明されて現在に到っているが、それでも未だ何万トンという大型船が、突然、真二つに折れて沈没するというような大事故が時に起っている。

太平洋を数時間で横断できる大型ジェット機も不運にして強烈なCATに遭遇すれば、1966年3月、富士山麓に空中分解して墜落したBOAC機(1966)の例の如く、あえない最後をとげてしまう。

40~50年前の、飛行機が始めて飛び始めたころなら止むを得ないが、人類が月までも飛んで行ける現在では、もっと空の状態が究明されて然るべきと考える。

航空機製造会社は、次々に新しい機体を作り出し、パイロットはその与えられた機体を如何に運用するかに窮々とし、何か大きい事故でも起らなければ、積極的に空間状態を解明することをしない現状では、航空事故は絶滅しないやの危惧感を抱くのは筆者の杞憂であろうか。

気象専門家が先づ空のあらゆる状態を究明し、パイロットは空での諸種の状態を気象専門家と設計者に充分説明し、その上で、どんな飛行機を作り、更にどんな装備をなすべきかも検討の上試作され、実際に飛んで試験し改良し、実用化して行くべきである。現在でも一応その形態はとられていると思うが、われわれの欲する雷探知機、完全避雷装置、完全放電装置、CAT探知機すら装備されていない現状から考えると、まだ3者の協同研究

はおかれているとしかいえないであろう。

航空気象は歴史が浅く、空間状態がすべて解明されたとはいえない。

しかし既に500人乗りの超大型ジェット機は実用化され、SSTも試験飛行を行なっている。早急に3者の協同研究の実をあげなければ恐しい大事故は跡を絶たないであろう。

今後、大型ジェット機、SST等の運航時に起る可能性のある事故の原因として考えられる環境因子は、空間状態の悪い次の3つである。

(1) 雷に関する気象状態

雷雲中の擾乱、落雷、降雹等。

(2) CAT

台風、ハリケーン等の強風下のウインドシャーも含む

(3) 超低層のウインドシャー

50~100 Ft 以下におけるもので、離発着時に悪影響を与えるもの。

これらについて、若干説明を加える。

(1) 雷に関する気象状態下での飛行は、単独にそびえ立つ積乱雲は遠望が可能であり、機上レーダーの装備により、雲中でも雷雲のセルを回避して飛行することができるのである程度安全となり、飛び方も容易となってきた。

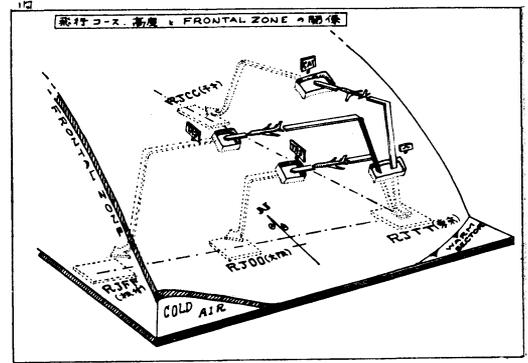
(2) CATに関しては、未だ探知装置はなく、レーダーは無効で、予報が困難な上に雷雲のように目視による判断もつかず、パイロットにとって、空の脅威として、毎日、空の何処かでわれわれを悩ませている。

その上、不運にして強烈なCATに遭遇すれば、操縦不能、操縦困難、乗客、乗員の負傷、機体一部の損傷、機材寿命の短縮等大きな被害をこうむる。

CATのうちBOAC機の事故原因のように、山岳波によるものも、山岳の多い本邦においてははかなり問題であるが、発生頻度からみれば、ジェット気流付近および polar frontal zone, subtropical frontal zone³⁾ 内におけるCATの方がより大きい問題であろう。

秋から春先までジェット気流がほぼ本邦付近上空にあることと、polar frontal zone, subtropical frontal zone がしばしば本邦上空に存在すること、また日本の地形から見てこれらと平行かまたは何処かでこれらを突ききって飛ぶコースが多いという宿命がある。このため航空機の運航高度の低かったプロペラ機時代には余り問題にな

3) 断面図に見られる転移層



第1図 飛行コース、高度と frontal zone の関係

らなかったCATが重要な問題となってきた。

毎年冬季にはどのパイロットも、何回かCATに遭遇して苦勞し、CATによる機上での負傷者のニュースが必ず報じられている。

全日空における最近の例では、1971年11月22日、千歳発の66便(Boeing 727)が、東京への帰途、高度31,000Ftで飛行中、太子(茨城県太子町)の北70湍付近で、極度に激しいCATに遭遇した。その時のレポートによれば、約10秒間(あるいはそれよりも短い時間)で、28,000Ftまで、操縦不能の状態で落下し、その後も操縦不能、あるいは困難な状態が続き、24,000Ftまで落下し、突入後約70秒で、CATの空域から離脱した。

落下が止った24,000Ft付近の空間状態が良かったため、過荷重による機体の損傷もなかったことは幸運であったが、もし、その空域に強い上昇気流が存在していたら、どんな事態に到ったかわからない。

70~80トン近い機体が、秒速250m近い速度で飛行中、突然操縦不能となって落ちて行く様子を想像すると身の毛のよだつ思いがする。

(3) 超低層のウインドシャー(50~100Ft以下におけるもの)滑走路50~100Ft以内の非常に低い層に数メートル/秒のウインドシャーがあると、離発着の航空機が危険な状態に陥ることがある。着陸時のオーバーシュート、アンダーシュートの原因は主として、この超低層のシャーによるものである。

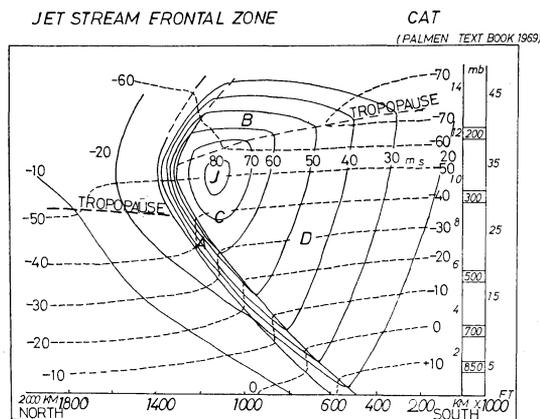
今後航空機は更に大きく、速くなって行くであろうが以上のような航空機の運航に支障を及ぼす空間状態を究明し、その観測、通報、予報を確立し、また今後の航空機にはそれらに対する探知装置、警報装置、回避装置に

到るまでの装備を早急に完成の要があると考え。

2. ジェット気流付近および polar frontal zone, subtropical frontal zone 付近の立体構造と CAT の概要

(1) ジェット気流, frontal zone 付近の立体構造と CAT の分布

第2図は Palmén (1969) が示したジェット気流と frontal zone の立体構造 (南北断面) に A, B, C, D, を風の鉛直シヤーの大きい順に付したものである。一応風の鉛直シヤーの大きい順に CAT が激しいものと考え



第2図 ジェット気流, frontal zone 付近の立体構造と CAT wind shear の大きい順に A, B, C, D を付した

られるので, A の区域である frontal zone では CAT がもっとも激しい。4 節に示す全日空機が激しい CAT に遭遇した事例もすべてこの A の区域におけるものである。

本邦上空付近においては冬季, ジェット気流の極大値は 200knot を超えることがしばしばあるので, 第2図のモデルの変形したものを考えなければならない。

B の区域でもかなり強い CAT の存在が考えられるが, ジェット軸の高さ・および位置と商業用ジェット機の常用飛行高度 (概ね 35,000feet 以下) との関連から見て, この B 空域は余り飛行する機会がないので問題にはならない。従って日常の運航に際しては, A, C 空域の空間状態を充分に解析し把握する必要がある。

断面図解析を行なうと, 第2図のように典型的なものも稀にはあるが, 多くの場合, ジェット気流が 2 本あるもの, また frontal zone も 2~3 本あって複雑な状態を示す。しかし共通していることはジェット core の北側から core の下を通り南に伸びる frontal zone を伴うこ

と, 等風速線が zone 内に集中しており, 言い換えれば wind shear⁴⁾ が存在することである。

第1表 frontal zone と横断に要する時間

| 厚さ(feet) | 傾 斜 | 水平距離 (哩) | 所要時間 (分) |
|----------|-------|----------|----------|
| 5000 | 1/100 | 83 | 10.5 |
| | 1/150 | 124 | 10 |
| 8000 | 1/100 | 133 | 17 |
| | 1/150 | 200 | 25 |

また00Z と 12Z 等 12 時間毎に断面図を作って見ると, 極大風の値の変化, ジェット core, frontal zone の移動はかなり早いことがわかる。Reiter によればジェット core の移動速度は 20knot にも及ぶ。

(2) frontal zone の傾斜と厚さ

a. frontal zone の傾斜角は概ね 1/100~1/150 のものが多い。また zone の鉛直断面の厚さは 5,000~8,000feet 位のものが多い。

b. frontal zone の水平断面の長さ (飛行に際して同一高度で frontal zone を突ききるときに水平距離) と現用のジェット機 (巡航速度 0.82マッハと仮定) で横断する所要時間の関係を第1表に示す。

(3) frontal zone 内の wind shear

a. 風の鉛直シヤー

これはシヤーを算出するさいの二面に挟まれた中間面における温度の水平傾度と流跡線の曲率およびその上下の差に依存する。またこれら三者の空間分布がジェット流の強さに反映する。

一般にはジェット core の風速が大きく, frontal zone の厚さが薄い程 wind shear が大きく, CAT は激しい。frontal zone の微細構造, その変化についての研究はないが, wind shear, 安定度は一様ではないようである。CAT は理論的には風の鉛直シヤー, 安定度により算出される リチャードソン数が 0.25 以下の区域におけるとされているが, これは波動が不安定になって崩れる条件である。大気中でそのような条件下においてのみおこるか否かは分らないが, wind shear, 安定度とも, 空間・時間とともに変動を示すと考えられる。Reiter (1969) によれば, 乱気流がおこるとその層内では風シヤーが小さくなり, また温度減率が乾燥断熱に近づく。そうする

4) 航空関係者は風の鉛直シヤーならびに水平シヤー - wind shear を総称している。

とこの層の上部ないしはその上部、または下部に新に風の鉛直シャーの大きい層が生成され、そこに CAT が発生するとしている。

日常われわれの運航において、さ程全般のパターンが変らないと予想するような日でも、同じ飛行コースを10～20分位の時間差でしかも同じ飛行高度を飛び、一方は激しい CAT に遭遇し、他方は弱～中程度の CAT しか経験しないということ、また一方は20分間以上も CAT にもまれるが、他方は僅か数分で CAT の区域から脱してしまう例が非常に多いことから上記のことが考えられる。

第2表 風シャーと乱気流

| 空域 | 鉛直シャー (knot/feet) | 乱気流の強さ |
|------------------|-------------------|-----------------|
| frontal zone (A) | 15/1000 | strong~extreme |
| 圏界面上方 (B) | 10/1000 | strong |
| jet core 付近 (C) | 6~10/1000 | moderate~strong |
| (D) | 2/1000 | なし~light |

風の鉛直シャーは数枚の等圧面天気図から求めたものが提供されている。これらは平均的なものであり、特異点の資料、航空機観測報告も併せて作った断面図の方が実情に近い wind shear が求められる。

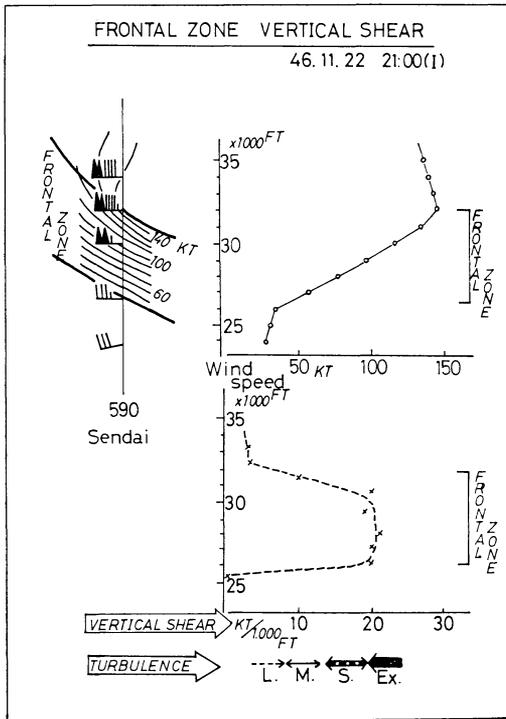
次に多くの研究を総合し第2図の各区域における風の鉛直シャーと乱気流の関係を第2表に示す。

はしがきに述べたように1971年11月22日全日空機が激しい CAT に遭遇した。この日の12Z の断面図解析(東経140°線に沿う)によると、frontal zone 内に強い風の鉛直シャーが見られる。この断面図の時刻は CAT に遭遇した時間の3時間位後であるが、00Z の断面図も参照してみると遭遇当時には12Z と同様な wind shear があったものと考えられる。この断面図から得られた値を第3図に示す。それによると、25,000feet~31,000feet 間の鉛直シャーはほぼ20knot/1,000feet の値を示している。

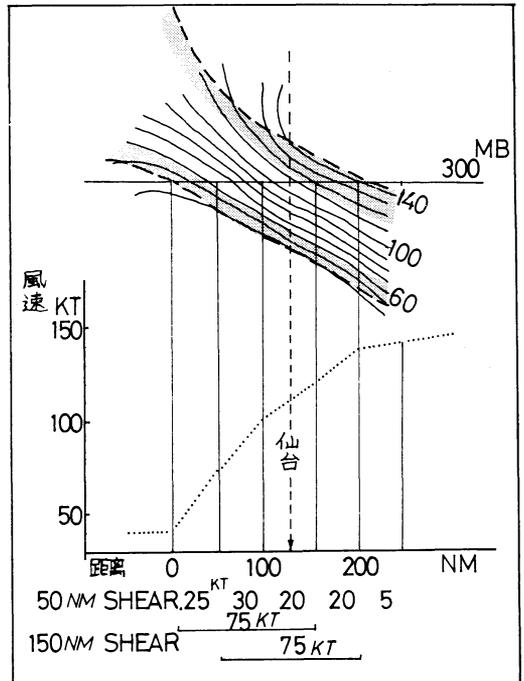
b. 風の水平シャー

これは鉛直シャー程乱気流に影響しないが、150哩につき、40~50knot のシャーがあると、中程度以上の乱気流が存在することが多い。

さきの1971年11月22日12Z の断面図から、水平シャー



第3図 frontal zone 近傍の風の鉛直シャー 1971年11月22日 12Z (仙台付近上空) 下図は風の鉛直シャーと乱気流度の対照を示す。



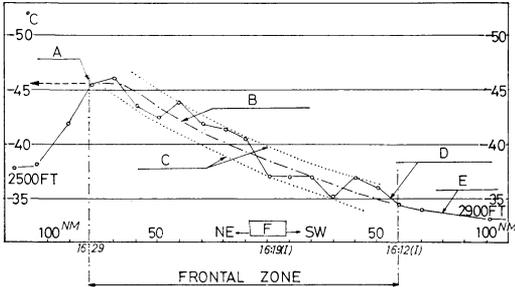
第4図 仙台付近上空 300mb 面における水平の風シャー 1971年11月22日 12Z 東経140度に沿う断面図から抽出

を計算した結果を第4図に示す。

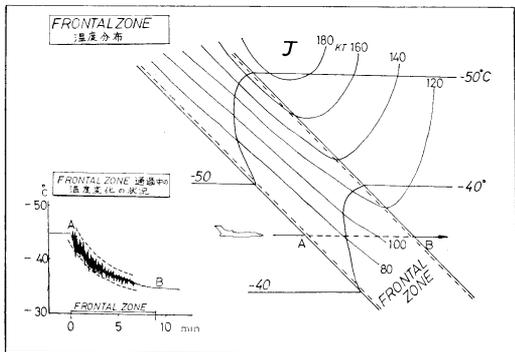
(4) frontal zone 内の温度分布

顕著な転移層内で激しい CAT があるとき、僅か100 哩位の水平距離で温度が7~10 度違うこともある。

同一高度で frontal zone を突ききるときの温度変化の様子を詳細に調べると、zone に突入する2~3 分前(20 ~30 哩) から温度変化が始まる。また温度は2°~4° 位の振幅で変化率は0.1°C/sec 位で上昇・下降を繰り返し



第5図 frontal zone 内の温度変化 1972年2月9日 激しい CAT に遭遇 (A: 降下開始, B: 温度変化平均値, C: 温度変化の幅, D: 激しい変化開始, E: 気温徐々に下降, F: 鹿児島)



第6図 激しい CAT に遭遇した時の平均的な温度の変化のモデル

ながら反対側気団の温度に近づいて行く(第5図)。この例は筆者が香港—大阪便 JA8334 (ボーイング 727—200 型) に搭乗したさい、距離は DME (自動距離測定器) を使い、10 哩間隔で観測したものである。そして平均温度の変化は直線的ではなく第6 図に示すように若干カーブしている。なお巨視的には温度傾度の大きい寒暖両気塊間の転移層ないしは frontal zone と wind shear の大きい層は同じであるが、厳密には一致しない。パイロットや運航管理者は、航空機の運航にさいし、情報を提供または取得する場合、frontal zone を wind shear の大

きい層の同義語として使っている。第6 図では frontal zone をこのような慣例に従って定義している。

平均温度変化の状況は、寒気側で変化率が大きく、暖気側に近づくに従って小さくなる。前線強度が大で frontal zone 内における風の鉛直シヤーが大きい程その傾向は大きい。

(5) frontal zone 内の乱気流 (渦流)

断面図解析により frontal zone を調べ、また実際に内を飛行して温度変化の状況、乱気流などを調べてみると次のことが考えられる。

zone 内でしばしば温度の逆転があり、大きい逆転を示すときは、zone 内の寒気の2000~3000feet 上方に、3~5°C も暖い空気が存在する場合がある。さらにその暖気側で風速が大きいという条件が加わるので、寒暖両気塊の境目に波動が生ずると思われる。このことは zone 内の空気が湿っていると波状雲ができることから明らかである。

温度の条件とシヤーの関係が適当であれば、この波動は発達する。Rosenhead は最初の波動が不安定化し、最終段階において波が砕ける状態を解析的に求めた。このことばかりでなく、乱気流の生成に関する基準の理論的根拠については多くの文献にあるが、一応 Brunt (1932) を参照されたい。ここで参考のためにシヤーが大きくなって波動が不規則な渦に分裂する状態を模式的に第7 図 a, b に示す。

3. CAT の飛行におよぼす影響

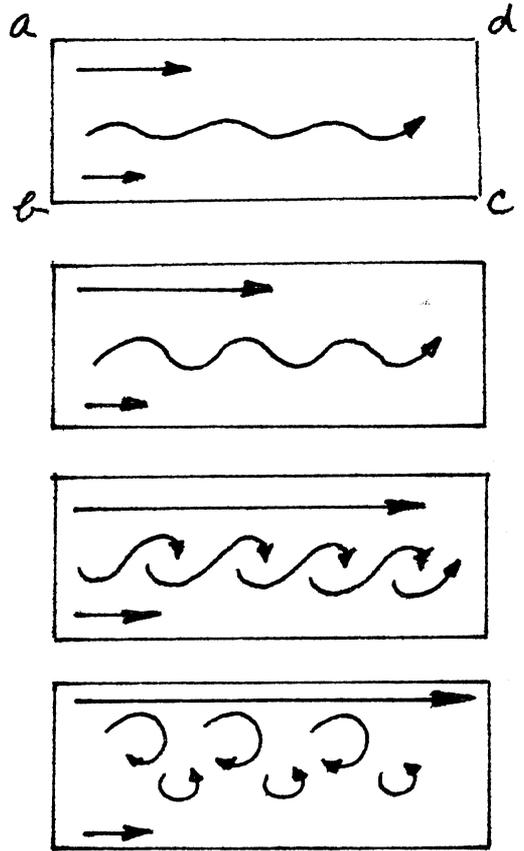
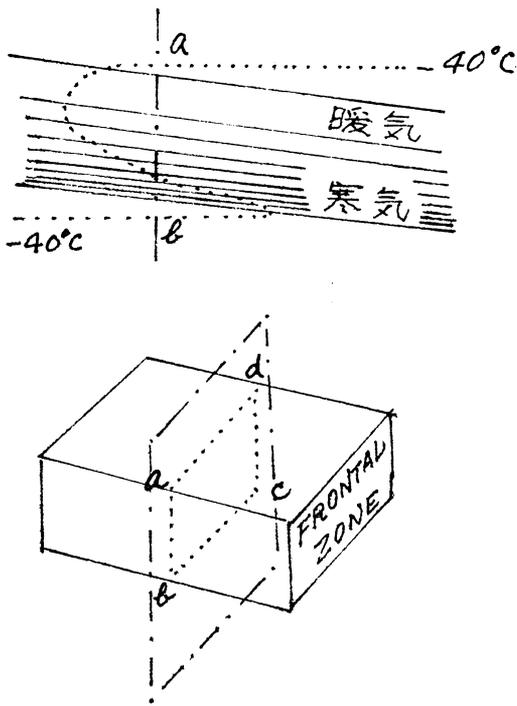
弱い CAT の空域でも、5~10 分とその空域を飛行すると乗客には不快感を与え、不馴れの乗客は不安を覚える。

CAT が激しくなると、操縦困難となり機体に強い繰返し+、-荷重がかかる。

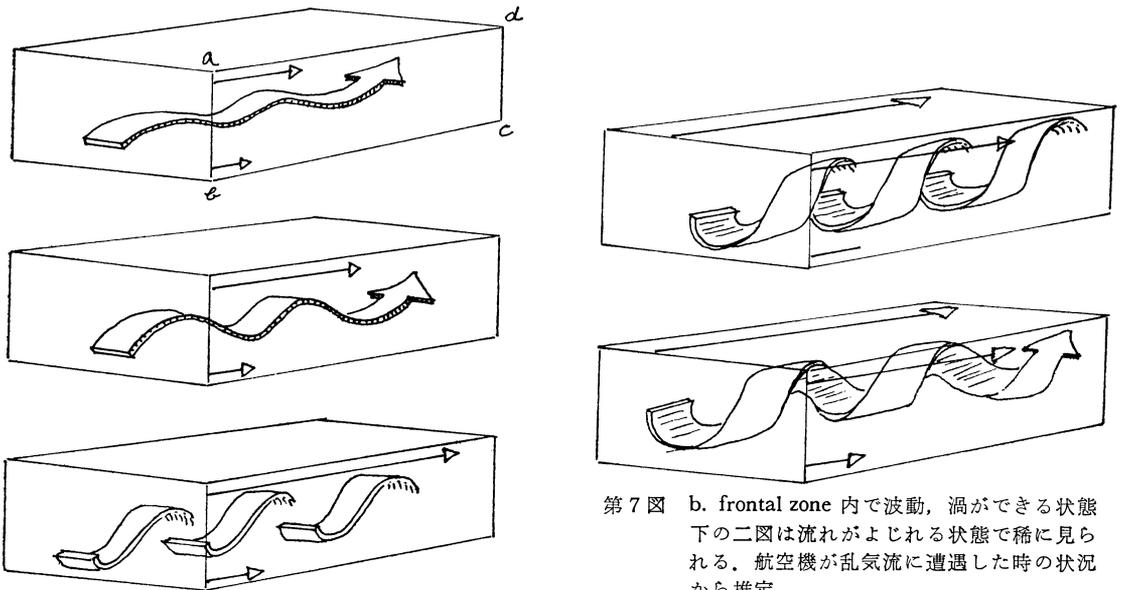
CAT の空域内の渦流は不規則で、又激しい上昇気流、下降気流も存在するので機体は急に落下 (-G がかかる) したり持ち上げられたり (+G がかかる) する。水平方向の渦(垂直軸のまわりの渦)に入ったり、左右の翼が上昇、下降気流を別々に受けると、偏揺れ (yawing) や、横揺れ (rolling) を起す。

-G がかかるときは、機内の乗客、荷物等は天井の方にほうり上げられ、次に-G が止り +G になるとき床にたたきつけられる形になる。CAT に遭遇したとき乗客に負傷者がでるのはこのためである。

CAT の空域で、激しい偏揺れ (yawing) を経験したパイロットのレポートに、「約2~3 秒で右へ90° 近く機



第7図 a. frontal zone 内の乱気流の発生状態
 ad は転移層の上面で、前線面および水平面に直交する断面で切った線、bc は転移層の下面で前述と同様な断面で切った線、風の鉛直シャーが大きくなると共に波動から渦となる。



第7図 b. frontal zone 内で波動、渦ができる状態
 下の二図は流れがよじれる状態で見られる。航空機が乱気流に遭遇した時の状況から推定。

首を振り、次の瞬間には反対方向に同じく90°近く振りまわされた。体が左右に強く押しつけられ計器も読みとれず、水平線をたよりに機の安定に努めた。」とあるが、60~70トンの機体が250m/s近い速度で飛行中、このような運動を起すことは、機体をすっぽり包む位の大きさの左右の渦が連らなっていることを物語る。左右の偏揺れの繰返し時には垂直安定板に大きい荷重がかかる。(アメリカでB-52の垂直安定板が半分位もぎとられた例がある。)

更にCATが激しいと操縦不能に陥ってしまう。筆者も29年前、CATの空域ではなかったが、雷雲中で数十分操縦不能の状態にさらされ九死に一生を得た経験があるが、多くの乗客の生命をあづかって飛ぶ定期航空の運航の途中、それが短時間であっても、どのようなものであるか想像することができる。

本邦では幸い frontal zone 内の CAT により墜落した例はないが、何時、何処にわれわれが考えているより遙かに強烈な CAT がひそんでいるかわからないので充分な警戒が必要である。

降水域や塔状積雲中の擾乱空域を突破するときは、レーダーを利用してそのおおよその範囲や、何分位後には擾乱空域から脱出できるかを知ることができるが、CATの場合は、その後激しくなるものか、その空域がどこまで続いているか等見当をつけるのが難しい。

4. frontal zone 内で激しい CAT に遭遇した実例

冬季本邦付近上空で、frontal zone 内の CAT に遭遇する例はかなり多い。筆者自身が経験した2例と、全日空で経験した中で最も強烈であった他の1例を次に示す

a. 1971年2月13日

09:30頃 鹿児島南方 100~180哩
飛行高度 28,000Ft

b. 1972年 2月9日

16:15頃 鹿児島南々西 50哩より
鹿児島北東 80哩付近まで
飛行高度 29,000Ft

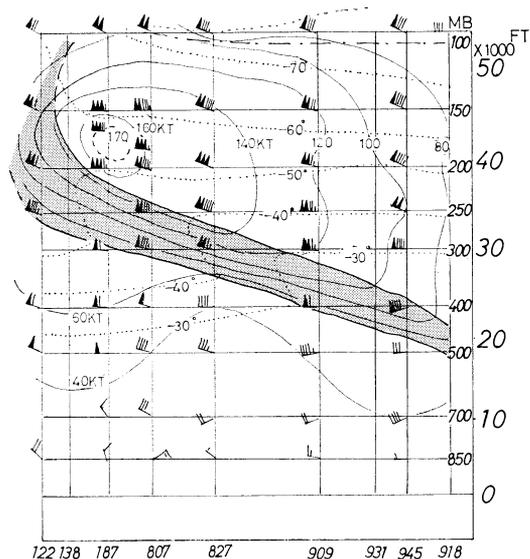
c. 1971年11月22日

14:47頃 太子の北 70哩付近
飛行高度 31,000Ft

上記3例はいずれも frontal zone 内において強又は強烈な CAT に遭遇したものである。断面図解析は観測回数都合で00Zと12Zの2回しかできないため、多少時間的ずれはあるが、以下断面解析によりそのときの空間状態を説明する。

a. 1971年2月13日 鹿児島南方の例(第8図)。

この例は Palmén のモデルに示されたような典型的なパターンで、jet core は板付の北方にあって、極大値は170KTである。frontal zone は1本で、明瞭であり等風速線は zone 内に集中し、寒気・暖気の温度差も大きい。



第8図 東経130°に沿う高層断面図 1971年2月13日0000GMT 点線:等温線 実線:等風線
地点番区122:王山 138:捕項 187:斉州島
807:福岡 909:名瀬 931:嘉手納 945:
南大東島 918:石垣島

b. 1972年2月9日 鹿児島付近の例(第9図, a, b, c)。

出発前、2月8日(12Z)の断面図解析から、鹿児島付近上空でCATを予想したが、ホンコンへの往航では弱い揺れがあっただけであった(第9図b参照)。

復航時警戒していたが、鹿児島南西50哩付近から激しいCATに遭遇し、鹿児島の北東80哩付近まで続いた。

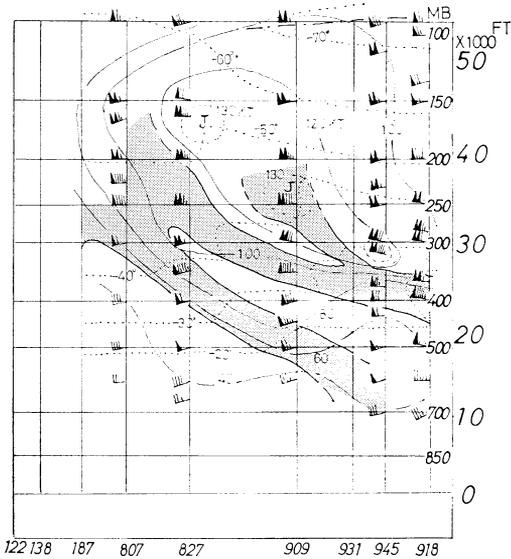
第9図a, b, cを比較しjet core, frontal zoneの動きをみると、jet coreは北上しながら合流し、極大値は大きくなっており、しかもcoreの高さは低くなっている。

また frontal zone は2本あったものが9日12Zでは合流したjetの北から南へ伸びる1本の frontal zone となりつつある。合流した付近では鉛直シャー、温度差共にかなり大きいことがわかる。(第5図参照)

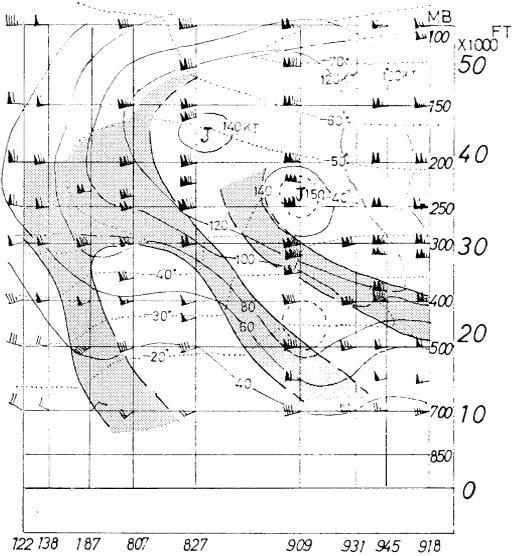
c. 1971年11月22日 太子北方の例、(第10図a, b)

22日 00Zの断面図をみると、jet core は本邦南岸付近にあって、その極大値は190KTと大きい。

frontal zone はこの jet の主流の北側から1本と、他の弱い秋田付近を通る jet core から1本あって、共にかなり明瞭で、等風速線が zone 内に集中している。(当日この zone を突破した航空機から弱～中の擾乱のレポートがあった。)

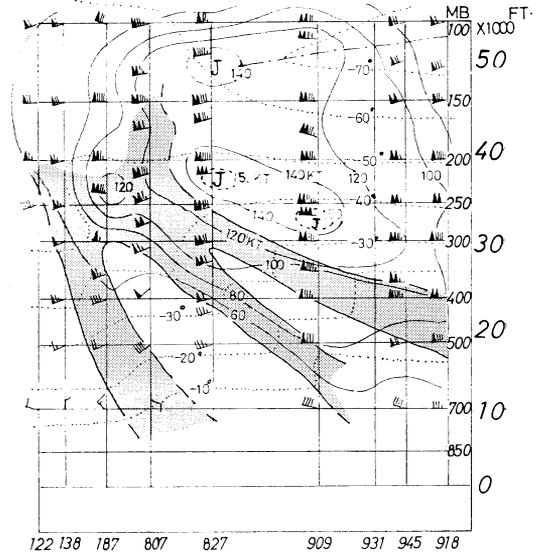


第9図 a. 第8図におなじ、ただし1972年2月8日 1200GMT.

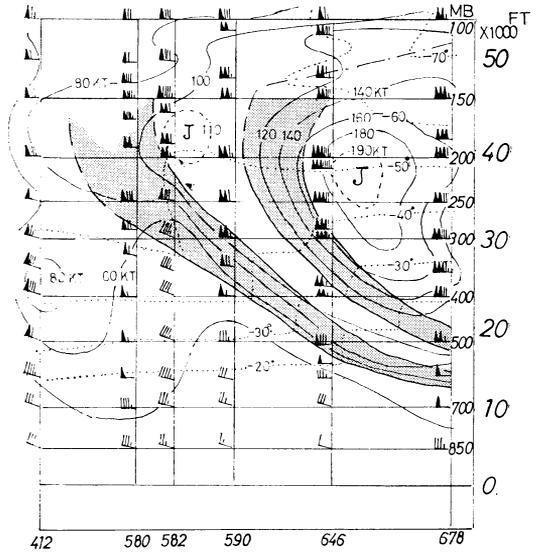


第9図 b. 第8図におなじ、ただし1972年2月9日 0000GMT

激しいCATに遭遇した時刻(17時47分頃)の断面図は資料の都合で作成できないが、12Zの断面図をみると、jet core は北上して、ほぼ館野の上空付近にある。

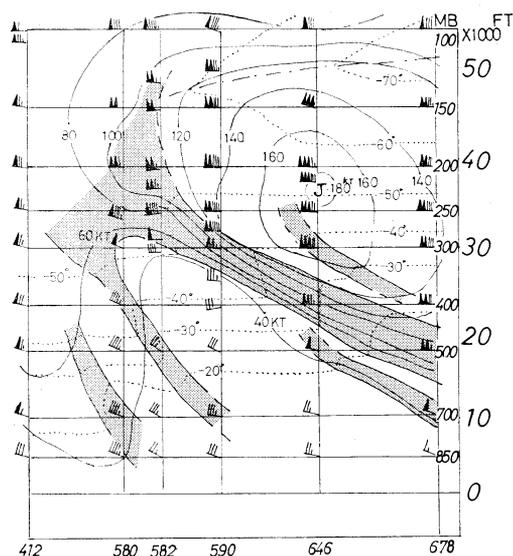


第9図 c. 第8図におなじ、但し1972年2月9日 1200GMT.



第10図 a. 東経140°に沿う高層断面図 1971年11月22日 0000GMT 点線:等温線 実線:等風速線 590:地点番号 412:札幌 580:三沢 582:秋田 590:仙台 646:館野 678:八丈島

て、極大値は 10kt 低くなったが尚 180kt を示している。そして、南側にあった frontal zone はほとんど消滅し、強風域の広がった jet core に沿う 1 本の強い frontal zone となっており、この zone 内にはまれにみるような鉛直シアーがある。



第10図 b. 第10図aにおなじ、ただし1971年11月22日 1200GMT.

本例の機長が提出したパイロットレポートの要約を次に示す。

- 往航 F 65 は 29,000feet の高度を飛行したがじょう乱はなかった。
- 復航 F 66 は 31,000feet で飛行を計画した (気象データ急変なしの会社運航管理者の情報を受けた.)。
- 松島付近までは smooth air, 上層風西 70knot 位、CAT に遭遇する少し前から西風が急に強くなってきた。
- 31,000feet, 0.82マッハ (315knot IAS) で飛行中、太子 DME 70 湊付近で突然「ドカン」という音がして操縦困難となった。(空中衝突ではないかと思った.)
- その時 350knot IAS⁵⁾ (≒0.96マッハ) を示した。(Turbulence penetration speed まで減速)
- 激しい CAT と判断したが、動揺は大きく操縦不能で、約10秒間に 31,000feet から 28,000feet まで落ちる

5) indicated air speed (指示計器速度)

6) visual flight rule (有視界飛行方式)

1972年7月

ように落下した。

○ 揺れ方は始めは上下に振り廻されるようであった。

○ 機体の動揺は上下は少なくなったが、左右は大きく、感じでは90°位左右に機首を振り計器も見えず VFR⁶⁾ で機の姿勢の維持につとめた。ダッチロールのような感じで、高度も保持できず、24,000feet まで下った頃、やっと操縦の自由をとりもどした。

○ 最初落ち初めた時はコックピット (操縦室) 内のカバンその他品物が全部浮き上がった。

○ ダッチロールのようになった時には、体を強く左右に押しつけられ、体を支えるのがやっとであった。

フライトレコーダー解析

- 落下し始め約1分10秒で24,000feet に達している。
- 最初速度は約360 IASを示している。
- その後の降下中の速度記録は明瞭でない。

5. Frontal zone における CAT の予想と、遭遇時の処置

(1) 出発前に frontal zone の CAT を予想する方法 断面図解析を、00Z, 12Z の2回行ない jet stream の動き、極大値および frontal zone の状況を把握する。jet core の下部 (C の空域)、および frontal zone 内 (A の空域) については風シアー、jet の maximum 値の変化、jet core の位置、変化の傾向、frontal zone の移動速度、等を調べ、飛行コース、希望飛行高度との関連を考える。

このときCATを予想する尺度は2節(3)に示した wind shear の値を参考とし、更に下記の点に注意を払う。

- frontal zone の鉛直方向の厚さが薄く、寒気暖気の温度差が大きいとき。
- jet stream の極大値が大きいとき、また極大値が更に増大しつつあるとき。
- 等風速線が frontal zone に集中し、鉛直 shear が大きいとき。
- jet core が2つあって、それぞれの core の北側から伸びる frontal zone が2つあり、夫々が次第に合流する傾向にあるとき。
- jet 軸の水平方向の曲りが大きいとき (300mb 天気図参照)。
- 寒気、あるいは暖気、または両者共優勢であるとき。
- jet 軸の南北方向の移動が早いとき。

次に断面図解析の追跡と修正について述べる。

断面図解析にはかなりの時間を要し、断面図ができ上がった時、それは既に3時間あるいはそれ以上前の空間状

態を示すものであることを考えねばならない。従って最も新しい空間状態を知り、更にその後の空間状態の予想をするためには、その時点で飛行中および帰着後のパイロットからのレポートにより、刻々に断面図を修正追跡して行く必要がある。

断面図を作るさい経度線に沿った地点上の各飛行高度における上層風、気温、CATの状態、雲形、雲の発生範囲等は簡単に入手でき、且つ frontal zone の位置、強度、移動等を追跡するのに効果的である。

(2) 飛行中 CAT を予知する方法

断面図解析、パイロットレポート等の資料による追跡等により、frontal zone に CAT が予想されるときは、その空域を突破するような飛行計画はできる限り立てないが、長距離を飛行するときはジェット機の性能上（高々度を飛ぶと速度が出て、燃料消費量が減ずる）あるいは ATC（航空交通管制）の都合で止むを得ず突破しなければならぬ場合もある。

飛行中 frontal zone の CAT を予知するには次のことを参考にすると効果的である。

a. 雲 (Ci, Cc, Cs) による予知

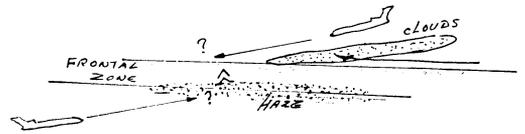
上層大気が湿潤であると frontal zone 内の擾乱により雲ができる。上部 frontal zone 内にできる雲は次のものが多い。

- 毛状絹雲 (Ci fib)
- かぎ状絹雲 (Ci unc)
- ふさ状絹雲 (Ci flo)
- もつれ絹雲 (Ci in)
- 房状絹積雲 (Cc flo)
- 波状絹積雲 (Cc un)
- 蜂の巣状絹積雲 (Cc la)
- 波状絹層雲 (Cs un)

frontal zone 前面（上方）にできる雲は frontal zone 上面の上昇流によるもので、Cs の場合が多く、front 面に平行に長く帯状にできることが多い。その発生高度、範囲により frontal zone への接近を知ることができる。第11図にその様子を示す。又上昇流が盛んであるとこの部分に、塔状絹雲 (Ci cas)、塔状絹積雲 (Cc Cas) などが発生することもある。

b. haze

上層大気が湿潤なときは上述のように、雲の発生を見るが、乾燥しているときは haze ができることが多い。haze のできる層は frontal zone の進行前面上方の Cs のできる層と、frontal zone の寒気側当りが多く、この



第11図 haze が frontal zone の下限付近に存在しその上限に CAT がある状況図

haze 層の上限付近で CAT に遭遇する。その模様は第11図に示されている。

c. 上層風の変化

対地速度および偏流角の変化から上層風の変化を算出し、出発前の断面図解析と比較しジェット流、frontal zone への接近を予知する。

d. 温度変化

frontal zone に近づくと、CAT に遭遇する前（20～30哩位前、即ちジェット機で運航時、2～3分位前）に温度変化が始まる。寒気側あるいは暖気側を同一高度で飛行するときの指示外気温度は、殆んど変化しないが、その示度（少数点以下1位まで読める digital 式のもの）に上昇下降という変化が現れ始め、変化率が毎秒 0.1°C 位になると frontal zone に近づいたと判断してよい。

e. 上昇気流の存在

frontal zone 前面には上昇気流のあることが多いので、暖気側から frontal zone に近づく場合、同一出力・同一高度で飛行している航空機の速度が急に増加し始める。通常 $0.02\sim 0.03$ マッハの増加を見ると zone に近づいたと判断してよい。

(3) frontal zone の CAT に遭遇時の処置

frontal zone に CAT があることを予測したときは、(2)に示したような諸現象に注意し、frontal zone に接近する数分前には出力を減じ、その機種により定められた乱気流空域進入速度に減じ、座席ベルト着用を指示し、要すれば自動操縦装置を“OFF”とし手動による操縦を行なう。弱い CAT の空域に入ったら、上層風および気温から jet core の下部の“Cの空域”のCATか、frontal zone の“Aの空域”のCATか判定する。

“Cの空域”のCATであれば、やがて frontal zone の“Aの空域”のCATに遭遇する可能性があるので警戒しなければならない。

frontal zone 内のCATは、激しい温度変化があるため判断しやすい。frontal zone 内のCATに遭遇したときは、上層風向が自分の航路と平行に近ければ、左また

は右に変針し、上層風向と航路が直角に近ければ、外気温度が上昇を示すとき(寒気側から暖気側へ飛行のとき)は高度を上げ、外気温度が下降を示すとき(暖気側から寒気側へ飛行のとき)は高度を下げると、理論的には早く frontal zone から離脱できる。ただしジェット core 北側の圏界面を南に向かって飛ぶときは状況が違うので注意を要する。

CAT を避けるためには以上のような方法も考えられるが、現在本邦における飛行では航空交通量が多く、ATC の許可が得られるかどうかという問題がある。すなわち実際にはコース、高度の変更も自由にはできず、ATC 機関にその変更を要求しても、交通量の関係で許可されないことが多い。従って減速という処置だけで、揺れるにまかせて frontal zone を突破する以外に方法はないというのが現状である。しかし強烈な CAT に遭遇すると操縦不能または困難となり、高度の変更、コースの変更を云々するより、何とか機体を墜落、あるいは空中分解から守るのが精一杯で処置なしというのが本当かも知れない。唯一つ警戒しなければならないのは、地震にたとえるなら、マグニチュード7~8以上の地震が何時あるかも知れないということである。

6. CAT 探知装置、警報装置の必要性

VFR (有視界飛行状態)での飛行を主体とした時代には気象レーダーも不要であり、当時の航空機は機構も簡単であったので僅かな計器類を監視するだけで飛行が可能であった。しかし現在では特別な悪天候のときを除いては殆ど飛行するようになり、航空機も非常に機構が複雑となってきた。現用の多くの機種は操縦席には100個以上の計器、100個以上のレバーやスイッチ類、それに100個以上の警報灯(油圧や空気圧等が規定の値よりも低下したとき知らせる赤ランプの類)が用意されている。

人間は飛行しながら100個以上の計器をくまなく監視することは出来ないで、不具合な点があれば警報してくれる装置で、そのためわれわれは安心して飛べるわけである。

気象に関しては IFR (計器飛行状態)での飛行が主体となり、雲中、雨中の飛行を行なうため気象レーダーが開発され、雷雲回避や、強雨域、擾乱空域の回避に非常に役立っている。

しかし、雷雲同様、あるいはそれ以上に警戒する必要がある CAT に対してわれわれは全く何の探知装置も、警報装置も持たないのが現状である。経験を重ねれば Ci や haze が存在するときは CAT の空域をある程度予知

することができるが、夜間は全くどうにもならない。

CAT に遭遇したとき機体に及ぼす荷重は速度に比例して大きくなる。将来航空機は高速化し、また大型化することは必定で、CAT に対しては増々条件が悪くなる。瞬間的な荷重および繰返し荷重に対しては機体を丈夫に作ればよいのであるが、商業航空に使用する航空機は、ペイロード(有償搭載量)の都合で軍用戦闘機のように丈夫には作れない。もし採算性を無視して丈夫に作ったとしても、前述したような激しい CAT に突入すれば操縦不能に陥ることに変わりはないのである。どうしても CAT の空域は早期に発見して(予知して)回避する以外に身を守る方法はない。この空の何処かに激しく渦巻く CAT が存在することを知らずに、何の探知装置もなく警報装置もなく毎日地球上を何千機かの航空機が乗客を乗せて飛んでいることは(筆者もその1人であるが)恐ろしいことである。sea fog のかかった海を警笛を鳴らしながら、レーダーもなく高速で航海する大型船のような危険性もっている。

人工衛星を飛ばし、月へ飛んで行ける現代の科学技術をもってすれば、CAT 探知装置ぐらい容易に作れるのではなからうか。

7. CAT と現用ジェット機の性能、ATC 上の問題との関連について、

ジェット機は周知のように、高々度を飛行するように設計されており、30,000~35,000Ft 位の高度において高速巡航速度と、少い燃料消費を得られる。しかしこのジェット機の常用巡航高度に frontal zone の CAT, ジェット気流 core 付近の CAT が存在するという皮肉な関係がある。

飛行計画の段階で、CAT を予想し、それを避けて飛ぶように巡航高度を決定して飛行計画書を提出しても、最近では「他の航空機がその高度を占有している」という理由で、希望した高度を指示されず、CAT を予想しながらその高度を飛ばざるを得ないということが多い。

飛行中も同様に、「CAT に遭遇しているから高度の変更を要求する」と ATC 機関に連絡しても、ほとんどの場合これも「過密」が理由で許可されない。このように過密な空における航空交通管制的の問題があるため、前項に述べた CAT の探知装置、警報装置が完備しても予知した CAT の空域を機長独自の意志により回避して飛ぶわけには行かない。

この問題を解決するには国内線において全航路をレーダー管制下に入ればある程度解決できると思われる

が、国際線における洋上等では全域をレーダー管制下におくことは恐らく不可能であろう。

残された手段は、激しいCATの空域を予知し、あるいは既にその空域に突入したときは見張り警戒用レーダー（この装置も現用航空機には装備されていないが）により、機長の責任において他機を警戒しながら、その空域を回避し、その後元の指定された航路、高度に復帰し、ATC機関に連絡するというような方法のみである。

DC-8, B-707, B-727クラスのジェット機の運航は既にかなり長期にわたるので、各航空会社、パイロット達はある程度の経験を積んできたが、運航し始めたばかりの、しかも桁はずれに大型化したB-747や、現在テスト飛行を実施中のコンコルド等にはまだ多くの問題が残されていると考えられる。

コンコルドは、マッハ2以上の巡航速度をねらっており、常用巡航高度も60,000~70,000FTと、2項で説明したtropopause上方のBの空域を飛ぶことが多くなる。またその高度まで上昇する途中に、A, およびCの空域があり、降下の際もその空域を通らざるを得ない。この種のSST（超音速機）は主として北半球中緯度地方を飛ぶものと予想されるので、かなり精度の高いCAT

(388頁よりつづく)

5. 沖縄復帰のセレモニーについて、沖縄と打合せたところ、現地からの出席は困難とのことであったが気象庁からの赴任者に出席してもらえば行なうことができる。

〔会計〕 3月分会計報告

大気放射国際会議寄付金募金状況報告（内諾額101万円入金額213万円）を承認

〔講演企画〕 大山勝通会員から学会賞受賞のため、帰国すると連絡があったので各受賞者に春季大会で受賞記念講演をしてもらう。

議 題

1. 総会準備について

理事長挨拶（案）

昭和46年度事業経過報告（案）

昭和47年度事業計画（案）

沖縄復帰に伴う案件成立後の
理事長挨拶要綱（案）

了承

昭和46年度決算書

外国文献集刊行費を含めたものに改め、監事の会計監査を受けること。

昭和47年度予算（案）

の予報を必要とするであろう。

以上「CATと航空機の運航」について述べたが、気象関係の方々のご参考になれば幸甚である。

CATについて気象協会関西本部宮本正明氏の教を受けたことを感謝します。

文 献

- 1) カナダ太平洋航空機およびBOAC航空機事故技術調査団(1966): 航空機事故調査報告書BOAC B-707, 昭和43年3月4日.
- 2) E.R. Reiter (1969): The nature of clear air turbulence: A review, Clear air turbulence and its detection, Plenum Press.
- 3) E. Palmén and C.W. Newton (1969): Atmospheric circulation systems, p. 176, Academic Press.
- 4) 杉本 豊 (1967): 高々度気象解析, 気象研究ノート vol. 94. 1-133.
- 5) Brunt (1932): Physical and dynamic meteorology, 237-243
- 6) 石崎秀夫 (1970): 雲 全日空.
- 7) E.R. Reiter (1963): Jet stream meteorology, The University of Chicago Press.

次のことを検討し、修正案を作成すること

- (1) 外国文献集および正野記念論文集刊行経費の分を計上すること
- (2) 予稿集の分を改訂すること
- (3) 昭和48年度繰越運転資金を計上すること
- (4) 文部交付金の配分は、支部の意見を聞いて行なうこと。

上記の各案は、次回の理事会に提出すること

2. その他

- (1) 夏期大学のテキストについて

第16期第15回の常任理事会で夏期大学に気象研究ノート No. 107 をテキストとして活用することを議決したが、講演企画委員会から、いつものとおりテキストを発行して行ないたいと要望が出たので審議の結果、これを承認する。

- (2) 予稿集は、増頁のため、頒布価を600円(送料を含む)とすることを承認する。

- (3) 日本気象学会長期計画委員長の経過報告案
経過報告は印刷して総会出席者に配付することを了承する。

新入会員 中島康晃外21名の入会を承認する。