

晴天乱気流解析のための DFDR の利用*

中山 章** 土屋 昭夫***

要 旨

晴天乱気流 (Clear Air Turbulence—CAT—) はスケールが小さく、寿命も短いので CAT が高層観測地点で、しかも観測時間に発生することは極めて少ない。従って CAT の発生した時の詳しい気象条件は知りにくい。本文では大型商業航空機に搭載されている DFDR (Digital Flight Data Recorder) の風・気温・航空機の受けた加速度などを用いて CAT の発生した気象条件を解析した。

その結果、風の鉛直シャー、リチャードソン数、航空機の受けた加速度を参考にして前線面を検出することにより、CAT の発生するおそれのある地域を天気図だけよりもキメ細かく知り得た。DFDR を搭載した航空機はかなりの数あるので、これらの資料を電算機によりすべて解析すれば、強い CAT の発生する条件と、その時の天気図上の特長を知るための基礎資料となる。更に磁気テープの取出しに改良が加えられて自由に取り出せるようになれば、航空会社のオンライン・システムを利用することにより、航空会社の運航中では日本国内のタービュレンス分布を即時的に正確に把握でき、CAT 看視にとっても極めて有効となり得る。

1. はじめに

晴天乱気流の探知器は実用化されていないので、航空機は予告なしに CAT に遭遇し乗客が怪我をしたり、極めて稀には機体が破壊されることがある。CAT の最も有力な原因とされている ケルビン・ヘルムホルツ波 (K-H 波) の解明はレーダー観測が可能になってから過去10年余の間に急速に進んだ(たとえば、Browning and Watkins, 1970; Browning, 1971; Boucher, 1973)。それによると強い CAT は K-H 波の振幅が大きくなった時に起こり、それは狭い領域に ($10^2 \sim 20^2 \text{ km}^2$)、ごく短い時間 (数分)、ごくうすい厚さ (数 100 m) に発生することが多い。

このため、航空機が CAT に遭遇する確率は非常に小さく、Dutton (1979) がヨーロッパ地区を $100 \text{ km} \times 100 \text{ km}$ の面積で高さが 300 m の空間に分割し、その中で並～強の CAT の遭遇率を調べたところ 1.6~2.2% (CAT の予報されている地域では 2.8%) であった (統

計資料 4378 例)。それ故、CAT があるか、ないかだけの予報は利用しにくいので、次のことが重要になる。

(1) 運航に危険な程の強い CAT の発生条件を明らかにすること。

(2) CAT のおそれのある地域 (K-H 波の発生域) を通過する時にはパイロットは乗客に座席ベルトを着用させて CAT に対処すること (亘理, 1981)。

しかし (2) 項の有効性は飛行の種類による。たとえば、長距離飛行ではジェット気流のように CAT が発生し易い地域は飛行コース全体から見れば狭いので (2) 項の有効性は大きく従来予報でも情報価値がある。一方、寒候期の日本付近には何時もジェット気流があり、CAT が発生しやすい訳だが、実際には先にのべた Dutton (1979) の統計が示すような発現頻度なので飛行距離が短い国内飛行では (2) 項の有効性は小さい。(1)、(2) の問題を有効に解決するために本文では大型航空機に搭載されている DFDR を用いることの有効性を解析を通して提案する。

2. DFDR の利用上の注意

DFDR は飛行中の数 10 種類の飛行状況を磁気テープに収録したものである。この解析で用いた要素は、1 秒ごとの飛行高度、気温、風向、風速、真対気速度、2 秒

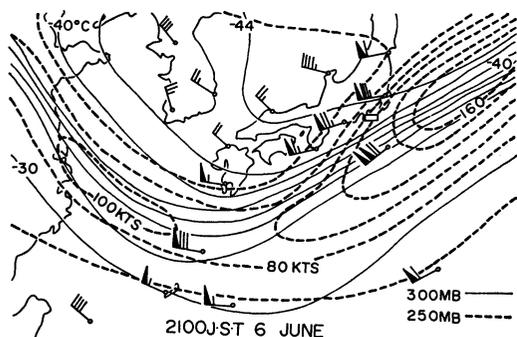
* Use of DFDR (Digital Flight Data Recorder) for analysis of clear air turbulence.

** Akira Nakayama, 新東京航空地方気象台。

*** Akio Tsuchiya, 東京航空地方気象台。

——1981年12月18日受領——

——1982年2月25日受理——



第1図 1981年6月6日21時(J.S.T.)高層天気図。実線は300mbの等温線(2°C間隔), 太い破線は250mbの等風速線(20KTS間隔), 矢羽根は250mbの値, 関東南部の矩形は解析領域を示す。

ごとの対地速度, 機首方位, 偏流角, 0.25秒ごとの航空機の受けた鉛直加速度である。

DFDR を用いる場合には次のことを考慮に入れる必要がある。

(1) 測定値は同一地点の鉛直分布ではない。

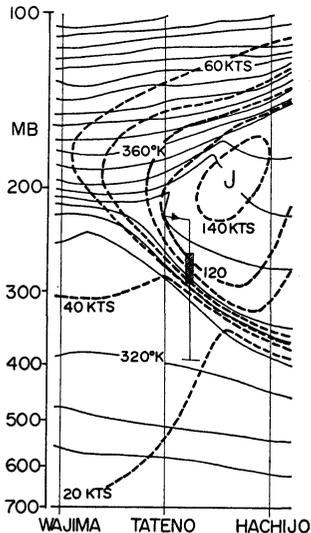
ラジオゾンデは350~450 m/min で風に流されながら上昇するが, 普通の強さの風では同一地点の鉛直分布を測定していると考えてよい。しかし, 航空機は上昇・降下フェーズでも水平移動に比べ鉛直変位が小さいので, 気象要素の水平傾度の大きい地域(たとえば前線帯)ではDFDRの測定値は同一地点の鉛直分布とは見なし難い。

(2) K-H波付近の気象要素の変動の影響が複雑に現われ易い

Browning *et al.* (1973) が K-H 波付近を0.25秒(この場合の機速では50 m に対応) ごとに航空機で測定した結果によると K-H 波による風・気温の変化が明瞭に認められるが, この解析では測定は1秒ごとで, 1秒は314 m から 208 m ごとでの測定(解析の始めと終わりでは機速が異っているため)に対応するので波長が1~2 km の K-H 波の状況は忠実に表現していない。さらに, Reed *et al.* (1972) によれば K-H 波面は傾いていることもあり, このような地域を航空機が降下(上昇)して測定した値は一層複雑になるが, この補正はむずかしい。

3. 解析

解析は1981年6月6日の19時41分から51分まで, 伊豆1982年5月



第2図 八丈島から輪島間の断面図(1981年6月6日21時 J.S.T.)。

細い実線は温位線(5°K 間隔), 太い破線は等風速線, 細い実線は解析を行った高度, 矩形の斜線域は0.5G以上の加速度を受けたところ, 航空機観測の場所の表示はおおよそのものである。

大島の南西域の高度11.2 km から6.3 km の間の120 km の領域について行った。この領域は航空機が水平飛行から降下に移ったところであり, 対地速度は解析の始めは18.8 km/min (314 m/sec) だが, 次第に減速し解析の終わり頃は12.5 km/min (208 m/sec) であった。

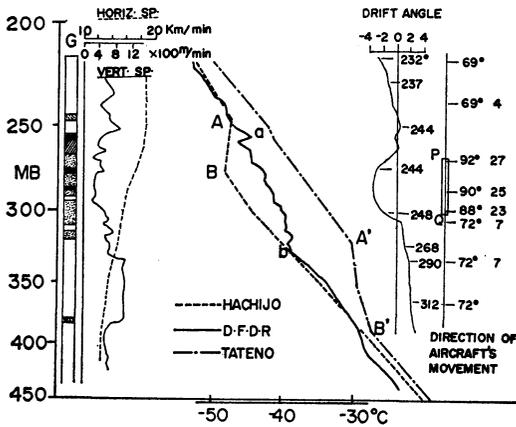
CAT を観測した領域(第1図)は地上天気図では高気圧の南西部にあたり特長はないが, 航空機が0.5G(Gは重力単位)以上の加速度を受けた場所は亜熱帯ジェット前線内に対応している(第2図も参照)。

天気図から求めた300 mb 面のジェット前線は走向が245度から65度, 平均温度傾向は4°C/100 km, 傾斜は館野と八丈島の間で1/165である。なお, ジェット前線は250 mb より下で著しい。

DFDR には2章で述べたような小スケールの変動があるので, 小変動を消去するため60 m (200 ft) ごと的高度差で分割し, この中の1秒ごとの測定値の算術平均値をその区間の中心の値としてエマグラムに図示した(第3図 a, b)。60 m の高度差に含まれる1秒ごとの観測値の数は航空機の降下(上昇)率により異なるが, この例では5箇から15箇ぐらいである。なお, 航空機がタービュレンスを受けていないところでは風・気温の短期の変動はない。

第1表 ジェット前線の特性 (1981年6月6日21時 J.S.T.)

観測地点	要素	ジェット前線上面高度(温位)	ジェット前線下面高度(温位)	ジェット前線内の平均気温減率
八丈島		320 mb (336°K)	389 mb (322°K)	-0.23°C/100 m
浜松		243 mb (337°K)	284 mb (325°K)	-0.19°C/100 m
館野		248 mb (336°K)	277 mb (325°K)	+0.13°C/100 m
DFDR (大島)		255 mb (336°K)	321 mb (323°K)	-0.16°C/100 m



第3図a DFDR から得られた状態曲線(ラジオ・ゾンデは6日21時, DFDR は19時41分から51分までのもの)。

左から航空機の受けた加速度(強度表示は第3図b), その右の細い実線は航空機の降下速度(m/min), 破線は航空機の対地速度(km/min), 図の中央の太い線は下方に地点表示のある場所の状態曲線, その右は偏流角の変化(横の数字は度単位で表示した風向), 一番右は航空機の移動方向を示す(左側の数字は航空機の進行方向, 右側の数字は300 mbの前線と航空機の移動方向の差を度単位で示したもの)。

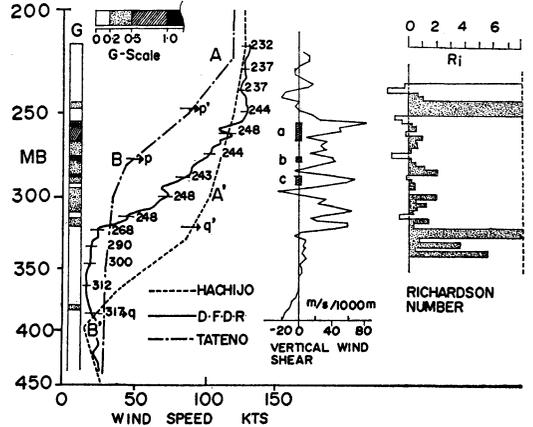
3.1. DFDR による状態曲線

DFDR とラジオ・ゾンデによる状態曲線との間には次の特長がある(第3図a)。

(1) ジェット前線の上面と下面の温位は八丈島, 館野, 浜松, DFDR (場所は大島付近)とも殆ど同じである(第1表)。

(2) ラジオ・ゾンデによる状態曲線と DFDR のそれと比べると, DFDR の前線面は幾分不明瞭である。

この理由は航空機が温度傾度の大きい地域を横切っているからである。すなわち, 航空機の移動方向は P 点より少し高い所では 300 mb の前線帯の走向と角度にして 4 度しかずれていないが, 19時44分30秒から 2 分 3 秒間は約 25 度の角度で前線帯を横切っている(第3図aの



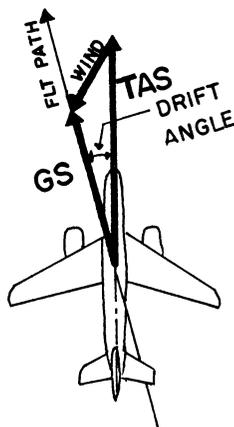
第3図b 風の鉛直分布と鉛直シャー, リチャードソン数(時間は3図aと同じ)。

DFDR の風速曲線の横の数字は風向, 真中の細い実線は 60 m ごとに求めた風の鉛直シャー, (m/s / 1,000 m), 0 線上の斜線域は 0.5 G 以上の加速度を受けたところ, 右側はリチャードソン数を示す。負の値のあるのは航空機はゆっくりと降下しているので, 同一地点の値ではないため見かけ上の絶対不安定ができるからである。

PQ). これによって生じた温度変化は $16.0(\text{km/min}) \times 2 - \frac{3}{60}(\text{min}) \times \frac{4}{100}(\text{°C/km}) \times \sin 25^\circ = 0.6^\circ\text{C}$ となる。

それ故, もしも航空機が温度傾度の大きい地域(前線帯)を横切っていなければ, 第3図aの PQ の付近では DFDR の温度減率をもっと小さくなり館野の状態曲線に近づく筈である。

天気図による等温線が分らない場合にはジェット前線の近くでは風向とジェット前線の走向が大きくずれることは少ないことを利用して偏流角(第4図参照)の変化から上述の関係を見つかることができる。たとえば, 200 mb 付近では風向と航空機の進行方向との差は 17 度で負の大きい偏流角だが, 250 mb 付近では差は 5 度と小さく, 偏流角も小さい。しかし, PQ では差が 25 度あるので大きな負の偏流角となっている。更に Q 点より



第4図

下では風は北成分をもっているので正の偏流角となっている。この関係は4章で述べる視覚技術に役立たせることができる。

3.2. 風の鉛直シアー、リチャードソン数とタービュレンスとの関係

航空機の受けた加速度が0.5G以上のところは第3図bのa, b, c, で、これと鉛直シアー、リチャードソン数とを比べると多少の関係は認められるが、Browning *et al.* (1973) のように良い対応はない。

しかし、箇々の変化ではなく、全体的に見ると、安定層、風の鉛直シアー、リチャードソン数はいずれも良い対応をしている。ところがラジオ・ゾンデ観測値では、館野は風の鉛直シアーが AB なのに安定層は pp' とずれているが、八丈島では $A'B'$ と qq' とは良い関係がある。これらがジェット前線の構造なのか測定誤差に起因するものかを議論するだけの材料はないが、DFDRの資料はラジオ・ゾンデ以上に良い対応をしている。

4. 結論—DFDR の利用—

小野等 (1981) は DFDR のデータ電子計算機により解析し、タービュレンス領域の大きさ、分布、飛行フェーズなどとの関係を求めた。この方法を拡大して危険な程の大きい加速度を受けた時の風の鉛直シアー、リチャードソン数などの量的な関係を求め、それがどのような気象条件下で発生したかを調べることは、CAT対策上最も基本的なことで、これにはこの解析から理解できるように DFDR が最も有効である。この解析結果は、将来 CAT 探知器が開発された時点でも飛行計画に必要である。

一方、現業では CAT 監視に自動化による情報の即時処理が必要である。なぜなら、Dutton (1979)によれば、 $100\text{ km} \times 100\text{ km} \times 100\text{ mbar}$ (厚さ)の空間内で前の航空機が並〜強のタービュレンスを受けた領域を次の1時間以内に別の航空機が通過した時に同じ強さのタービュレンスを受ける確率は、その空間内の平均値の7.11倍だが、3時間たつと2倍となり、情報価値は時間と共に急激に減ずるからである。

現在、用いられている DFDR のデータを取り出しやすくしている QAR (Quick Access Recorder)は50時間ぐらいたたないとカセット・テープを取外せないが(小野・他, 1978), 目的地に到着するたびに飛行中の記録(テープ)を航空会社のオンライン・システムにより3章で述べた方法により運航中樞の計算機で処理すれば日本国内の CAT の発現状況は自動的にしかも即時に知りうる。

ただし、これだけでは CAT 対策としての“CAT 監視”は実用的に十分ではない。それは第1章で述べたように CAT の発現頻度は極めて小さいので、K-H 波を発生させやすい前線構造を把握し、CAT の発生しそうな前線を通過する時には CAT 存在の観測事実の有無に関係なくパイロットはそこに CAT が存在するものと考えて1章(2)項のように対処する必要がある。CAT 存在の観測事実が発現の確度を与えてくれるものと理解すべきである。

終りに DFDR の資料を貸していただいた全日本空輸 KK にお礼申しあげる。

文 献

- Boucher, R.J., 1973: Mesoscale history of a small patch of clear air turbulence, *J. Appl. Met.*, 12, 814-821.
- Browning, K.A. and C.D. Watkins, 1970: Observation of clear air turbulence by high power radar, *Nature*, 227, 260-263.
- Browning, K.A., 1971: Structure of the atmosphere in the vicinity of large-amplitude Kelvin-Helmholtz billows, *Quart. J.R. Met. Soc.*, 97, 283-299.
- , G.W. Bryant, J.R. Starr, and D.N. Axford, 1973: Air motion within Kelvin-Helmholtz billows determined from simultaneous doppler radar and aircraft measurements, *Quart. J.R. Met. Soc.*, 99, 608-618.
- Dutton, M.J.O., 1979: Prediction of clear-air turbulence (CAT) towards probability forecasts based on numerical model output, W.M.O.

Technical Conference on Aviation Meteorology
[TECAM], Geneva, 5-9 Nov. 1979.

小野幸一, 山根皓三郎, 外崎得雄, 竹内和之, 1981:
定期運航旅客機により収集した突風資料の評価,
航空宇宙技術研究所報告, NAL TR-652.

小野幸一, 山根皓三郎, 1978: 突風荷重データの収
集および解析, 日本航空宇宙学会誌, 26, No 290,

127-132.

Reed, R.J. and K.R. Hardy, 1972: A case study
of persist, intense, clear air turbulence in an
upper level frontal zone, J. Appl. Met., 11,
541-549.

亙理宣夫, 1981: 航空力学Ⅱ—ジェット輸送機編—,
日本航空技術協会, 104-106.



富山地学会 編

豪雪——五六豪雪と
三八豪雪——

古今書院, 1982, 257頁, 2,000円

本書は昭和56年1月24日, 富山市立科学文化センター
で開催された「雪のシンポジウム」が契機となって生れ
たものである。評者の知る限りでは, 五六豪雪を中心と
したシンポジウムを, 日本気象学会はじめ, いくつかの
学協会が開いたが, このようなまとまった形で結果を公
刊したのはこの富山地学会が初めてではなからうか。

本書の特色は次の点にまとめられる。(i) 北陸を対
象にし, 特に富山県を中心にまとめあげた。(ii) 雪の
自然科学的側面ばかりでなく人間社会へのかかわり合い
を画きだした。(iii) 自然面でも気象学・気候学・雪氷
学ばかりでなく, 植物学などの問題もとらえている。
(iv) 人間社会面でも, 建物・生活・産業など従来かなり
論じられて来たことだけでなく, 教育・文化・高齢化
社会・除雪・消雪パイプ・新幹線や高速道路などの新し
い問題を画きだした。(v) 残雪の民俗学的視点, 雪の
利用にまで言及した。

このように, 「雪に関するすべて」を新しく総合的に
把握した点, まことに有益な書物である。しかも, 教科
書的な固さがなく, やわらかく読み通すことができるの
は, 執筆者が現地でもって多年の雪の生活を体験し,
その基盤の上に築いた学問をかみくだいて書いている
からであろう。本書のたくさんある成果の中で, 特に
重要なことがらば, あとがきに書いてある“シンポジウ
ムの討論ででてきた次のような共通認識”ではなからう
か。すなわち,

1. 北陸地方の雪は湿っていて, 降雪量は年によって
非常に異なる。したがって除排雪に難点が多く, 利用す
るにも問題がある。

2. 五六豪雪被害は, かつて雪に備えた生活の知恵が

忘れられ, “合理化”一辺倒に走ったためである。また
高齢化社会の到来と雪対策を考えなければならない。

3. 雪を利用する研究を推進しなければならない。そ
のため, 研究所などを設立する必要がある。

評者が特に興味を持った点を2~3記すと次の通りで
ある。(i) ユキツバキとヤブツバキがあることはこれ
まで知っていた。しかし, 富山県では海岸近くはヤブツ
バキで, 標高約500mから1200mくらいまでがユキ
ツバキで, その中間にユキバツバキというのがあるこ
と。(ii) いわゆる五六豪雪は4回の大きな山場があ
ったこと。それは, 55年12月12~15日の前ぶれ寒波, 55年
12月26~30日の年末寒波, 56年1月2~8日の正月寒
波, 56年1月10~17日の中旬寒波である。(iii) 三八豪
雪とこの4つの山場の日付は異なるが, このようなサイ
クルはシノプティック気候学からみて, よくあるのでは
なからうか。今後の研究が待たれる。(iv) 福井県・石
川県に豪雪になる場合と, 富山県・新潟県に豪雪とな
るときがある。上空の風向だけでは説明できないのでは
なからうか。(v) 大雪の長期変動の研究が意外におくれ
ていること。(vi) 屋敷林の詳細な調査が非常ににおし
ろい。特に112~126ページの記述は本書の中で有益で
ある。(vii) 雪の生気候学ともいうべき, 傷病と年齢との
関係, 事故との関係などのオリジナルな表は雪国の学者
ならではあげられなかったろう。(viii) 交通問題では,
機械除雪の成果が上がったが, 一方, 市街地ではロータ
リー除雪機などが使えない路線が増加し, かえって人力
に頼らざるをえない箇所がでて, ここでの労働力の確保
が問題となった。(ix) 通学区が拡大してきて, 雪の影
響がひどくなった。

以上の通りである。雪の多い他府県の研究者ばかりで
なく, わが国の気候学・気象学者はぜひ一読されること
を望みたい。とにかく, 本書は近來の雪に関する書物
の中でも, 金メダルものと思われる。(吉野正敏)