

# 航空予報の定量的表示\*

## (晴天乱気流と着氷について)

渡 辺 明\*\*

### 要旨

Colscen の C.A.T index, Roach の D.L.R index および icing index を日本付近のデータに適用して電計算処理を行なった結果、従来のものより精度のよいことがわかった。

### 1. はじめに

電算器機の発達と導入によってデータ処理と複雑な計算が容易にできるようになった。特に、じん速な情報が強く要求される航空予報では、電算機の使用は益々重要となる。そこで、晴天乱気流 (C.A.T) の定量的な表示として開発された“C.A.T インデックス”や“D.L.R インデックス (仮称)”を、また、着氷については“icing インデックス\*\*\* (仮称)”を電算機で計算し、乱気流、着氷などの観測報告との関係を調査したところ、これらのインデックスは定量的な予報因子として適合性があることがわかった。

### 2. 各種のインデックスについて

#### a) C.A.T インデックス

乱気流の強度が乱流エネルギーに比例することから C.A.T インデックス  $[I]$  は次式で示めされる。

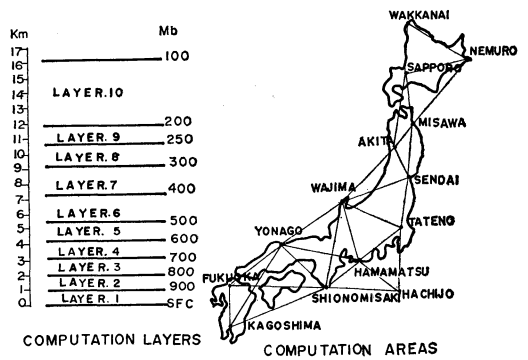
$$I = (\Delta V)^2 (1 - Ri / Ri. crit) \quad (1)$$

$\Delta V$ : 鉛直シャー

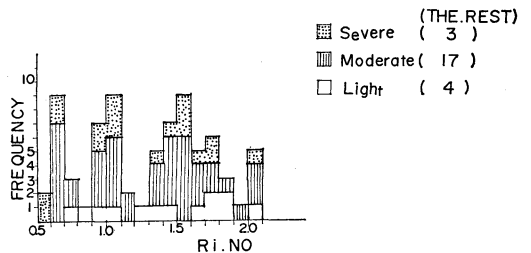
Ri: リチャードソン数

Ri. crit: 臨界リチャードソン数

臨界リチャードソン数は理論的には0.25であるが、(1)式において Ri. crit を0.25にすると、一般の大気中では後に述べる方法によって計算すると0.25以下になることは非常にまれで、晴天乱気流の予想領域を表わしにくい。そこで理論的の矛盾の起こらない限り、予想域をより表示する値を統計的に求めることが必要になり、ここで



第1図 計算層と計算領域



第2図 リチャードソン数と C.A.T. 頻度

は0.75を用いた。

#### b) D.L.R インデックス

晴天乱気流は shear やのび変形により風と気温の内部の不連続形成に関連があるとして、これがリチャードソン数の傾きの対数変化比であらわされるとすることから D.L.R インデックス  $[D]$  は次式で示される。

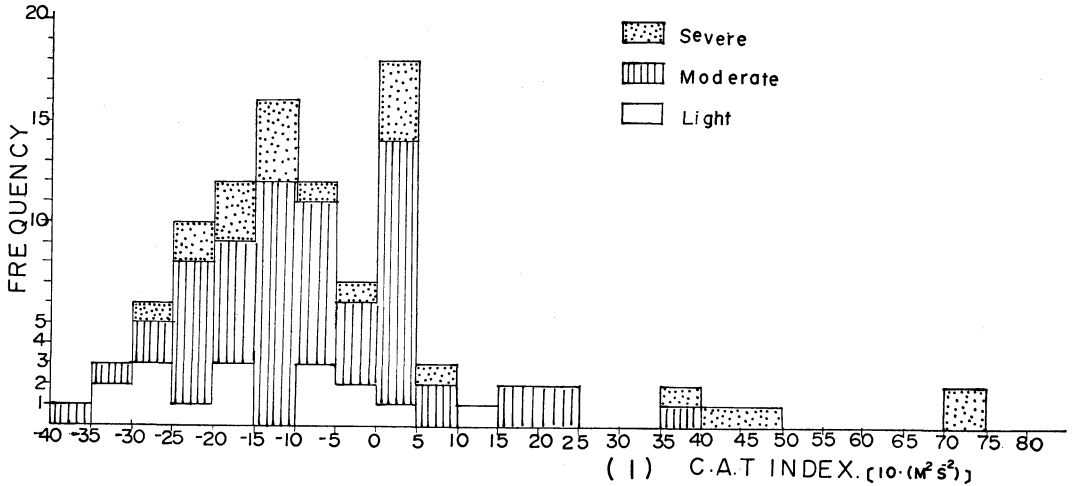
$$D = -(\Delta V)^2 D / Dt \ln Ri \quad (2)$$

ただし

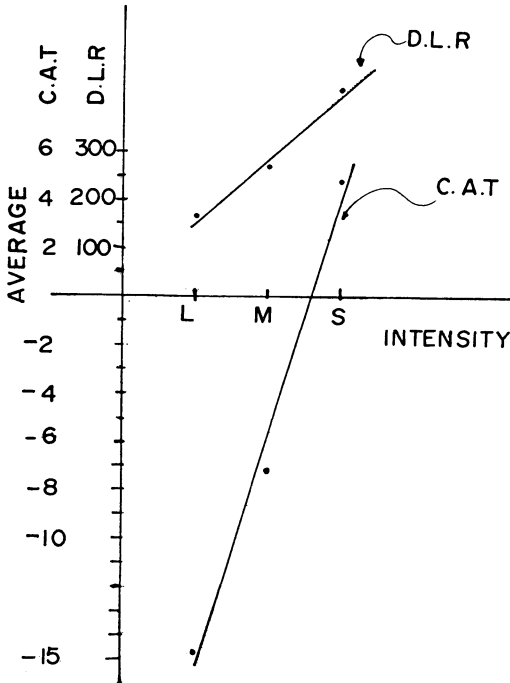
\* Quantitative Indication for Flight Forecast with Clear Air Turbulence and Icing.

\*\* A. Watanabe: 気象庁予報部電子計算室

—1973年8月14日受理—



第3図 C.A.T. インデックスと C.A.T. 頻度



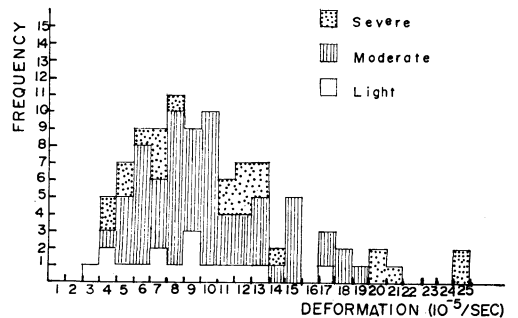
第4図 インデックスの平均値と乱流強度との関係

$$D/Dt \ln Ri = (2Ri - 1) \frac{\partial \mathbf{V}}{\partial P} \cdot \mathbf{V}_\theta P + \left( \frac{\partial v}{\partial y} \right)_P - \left( \frac{\partial u}{\partial x} \right)_P \quad (3)$$

右辺第1項：(1)式と比較すると、この項は容易に(1)式の C.A.T. インデックスに相当することがわか

第1表 インデックスの平均値と乱流強度

C.A.T. Intensity	Severe	Moderate	Light
Frequency	22	6	16
Richardson number	1.4	2.1	2.1
Deformation ( $10^{-5}/s$ )	11.9	10.0	8.4
C.A.T. Index ( $10^4 \cdot M^2 S^{-2}$ )	4.8	-7.2	-14.7
D.L.R. Index ( $10^{-5} \cdot M^2 S^{-3}$ )	429.5	271.3	171.8



第5図 変形量と C.A.T. 頻度

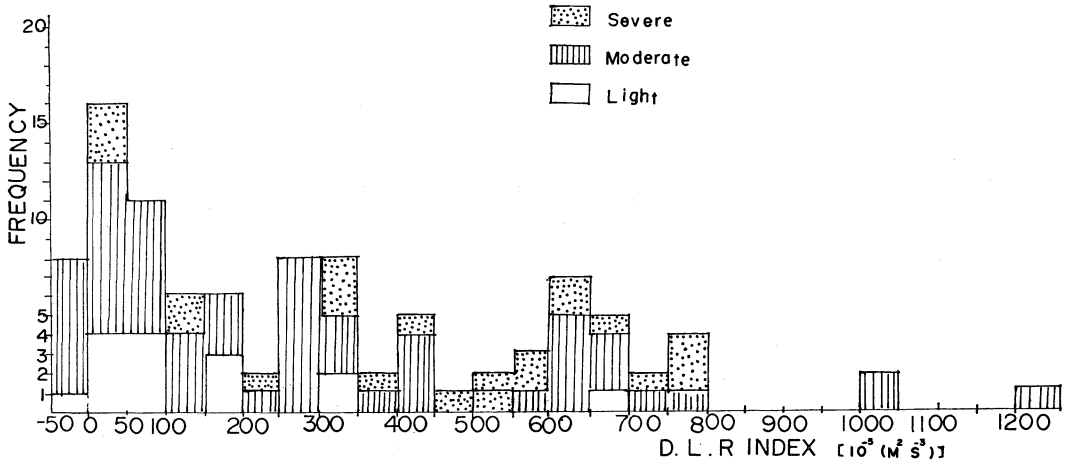
る。

第2項：等圧面上における水平方向の伸縮による流れの変形 (Stretch deformation) を示す。

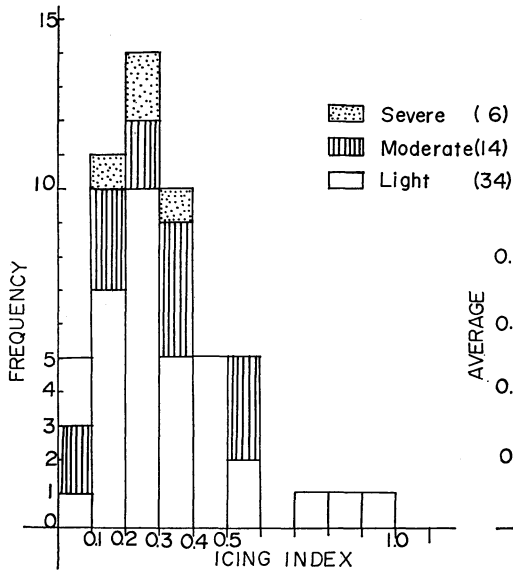
c) Icing インデックス

着氷に関する  $-8D$  を用い、Icing インデックス  $[\pi]$  を次式のように定義すると、

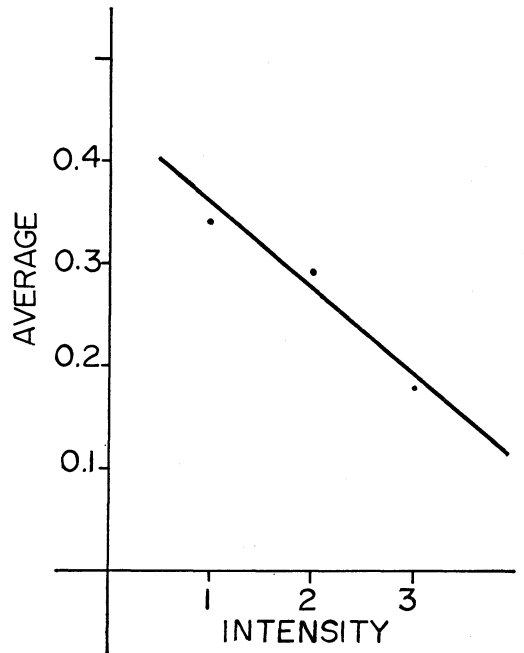
$$\pi = -8D/T \quad (4)$$



第6図 D.L.R. インデックスと C.A.T 頻度



第7図 Icing インデックスと Icing 頻度



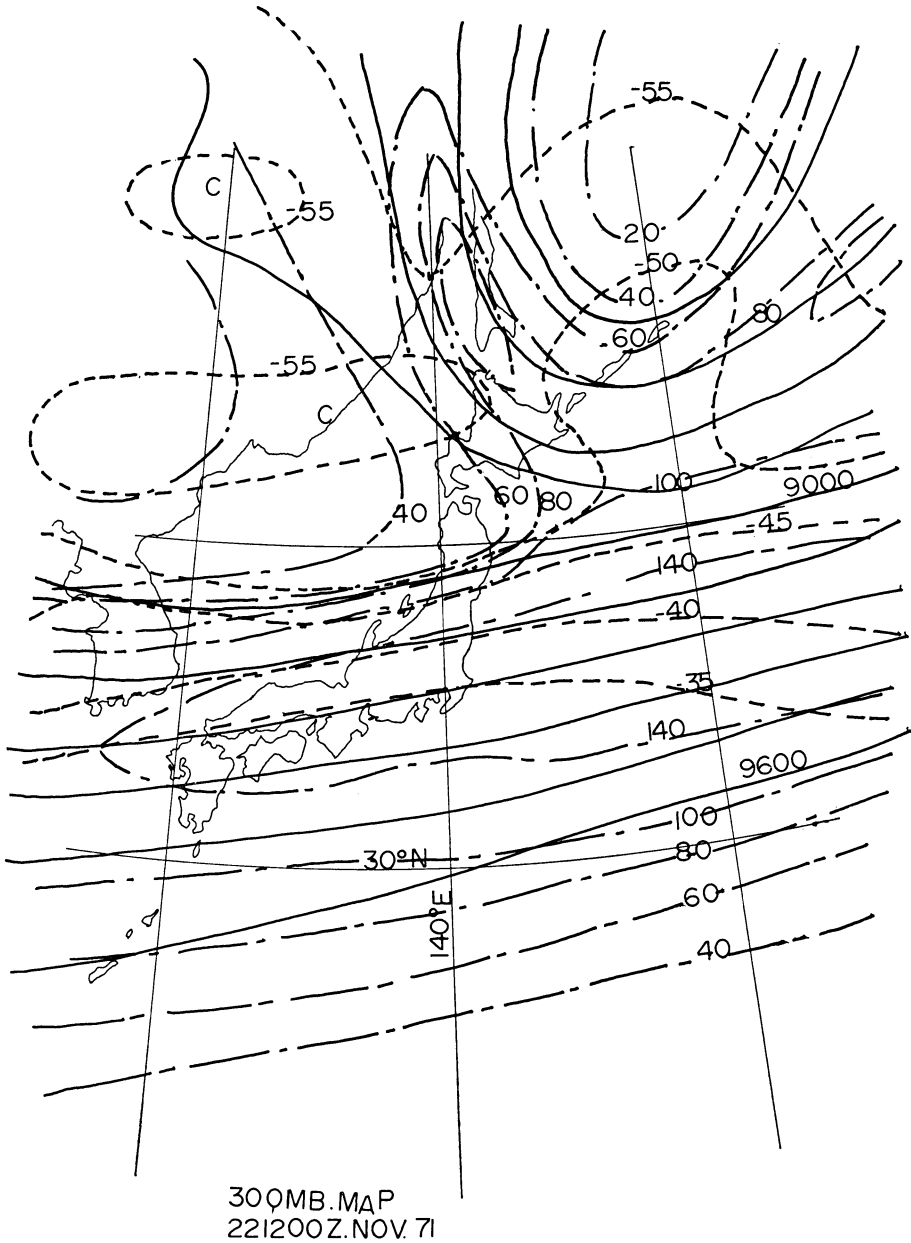
第8図 Icing インデックスの平均値と Icing 強度との関係

ただし、 $D$  は気温と露点温度差、 $T$  は気温。  
 $T < 0$  のとき、 $\pi$  が常に  $0 \leq \pi < 1$  の値をとり領域が  $-8D$  法による着氷領域（氷面に対する過飽和域）に一致する。

3. 方法

上にのべたインデックスを計算する際、高層観測資料の特異点の観測値を使用し、C.A.T, D.L.R. インデックスは第1図に示めされた10層についての層間について、また、同図に示された三角形について計算を行なった。なお、三角形の面積の違いから値があまり影響されない

ように、なるべく等しい面積の三角形を用いた。Icing インデックスは観測点ごとに計算できるため、各特異点についてインデックスを計算した。このように求められた各層の C.A.T, D.L.R. インデックスのうちの最大値を、Icing インデックスは各層のうちの最小値を各地区、各地点の値として等値線解析を行ない、乱気流は1971年の15日、99個、着氷は1973年の10日、54個の報告について



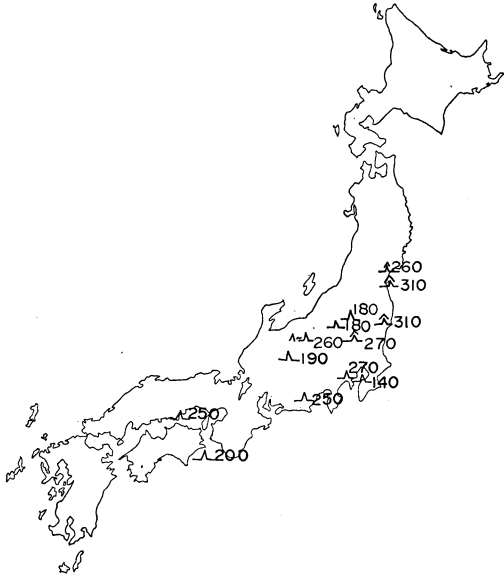
第9図 ——等高線, ---等風速線, .....等温線

て、各インデックスとの相関を調べた。なお、ここで対称にした乱気流は 15,000ft 以上で雲中で報告されていないものとし、時間は乱気流、着氷とも高層観測時刻の前後6時間内に報告されたものとした。

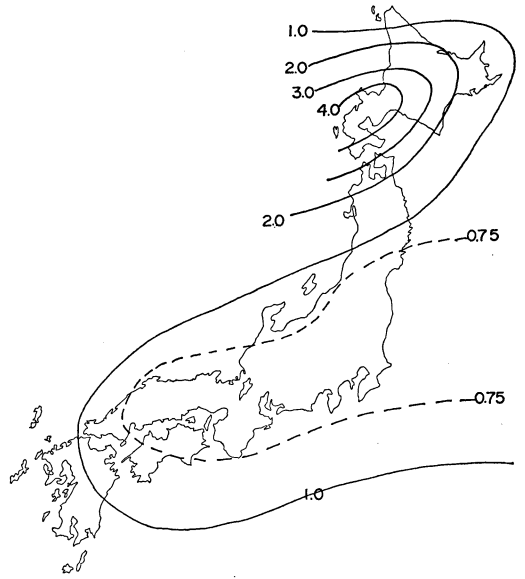
#### 4. 乱気流および着氷と各インデックスとの関係

##### a) リチャードソン数と乱気流の関係

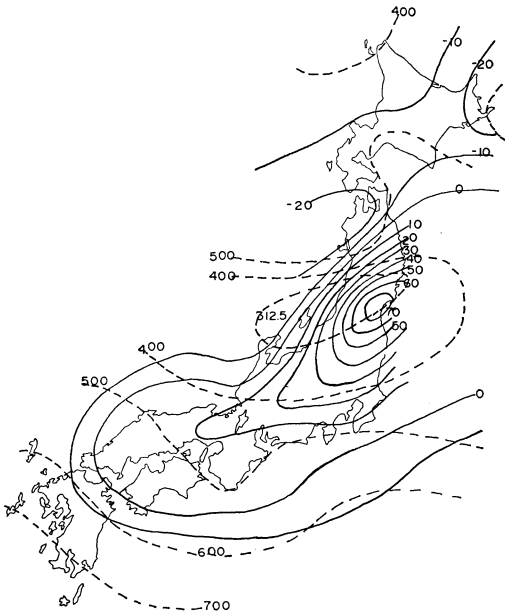
一般に大気の流れが発達するかどうかの目安に、リチャードソン数が使われるが、リチャードソン数は乱流の



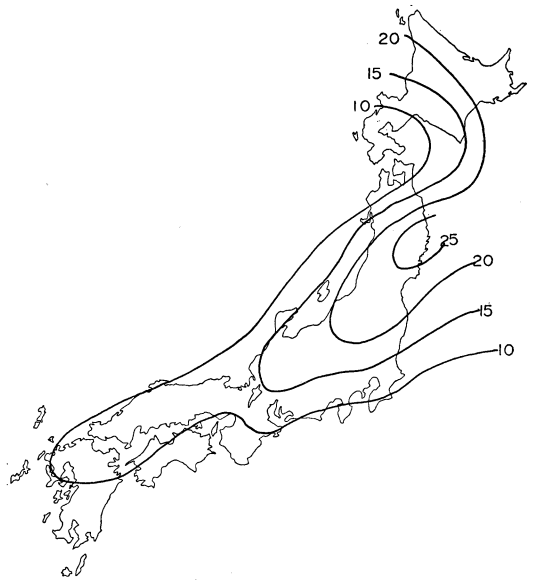
第10図 C.A.T. 発現分布図, ▲: 強, △: 中, △: 弱, 右側の数字は高度を表わす (100 feet 単位)



第11図 リチャードソン数等値線



第12図 C.A.T. インデックス等値線, — C.A.T. インデックス  $[10 \cdot M^2 / \text{sec}^2]$ , ..... 高度 (mb)



第13図 変形量等値線 ( $10^{-5} / \text{sec}$ )

強度とはあまり関連はなく、乱流の存在を定性的に見分けるにすぎない。このことは、第1表の乱気流\*の強度に対するリチャードソン数の平均値の値から両者の間に相関関係があまりないこと、および第2図のリチャードソン数の値に対する各強度の頻度数がほとんど等しいことからわかる。この調査では浮力項がシャー項よりも大きく、したがってリチャードソン数が全体的に大きくあらわれ、1.0以下で乱気流があらわれた頻度は全体の22%にすぎなかった。また、強の乱気流に注目すると、1.0以下で、強の占める割合は32%、1.0以上では16%であった。リチャードソン数が全体的に大きくでたことは、計算層のとりかたに原因があると考えられる。

#### b) C.A.T インデックスと乱気流との関係

第3図の C.A.T インデックス  $[I]$  に対する乱気流の頻度分布図で、 $[I]>0$  のとき乱気流があらわれた頻度は全体の32%にすぎない。強の乱気流に注目すると、強の占める割合は  $[I]>0$  のとき26%、 $[I]<0$  のとき18%である。 $[I]$  の定義から、 $[I]<0$ 、すなわち、乱流のエネルギーが負の値で乱気流が起こることは物理的に矛盾するが、この調査では乱気流の報告された付近でもリチャードソン数  $Ri>1$  の場合が多かったため、当然このことは式(1)から容易にわかる。しかし、第1表や第4図から  $[I]$  の値と乱気流強度との間に正相関があることから、この矛盾は(1)式に正の常数項を加えるなど操作してなくすことができるので、多少物理的な意味を失ってもインデックスとして使用可能である。

#### c) “Deformation (変形)” と乱気流との関係

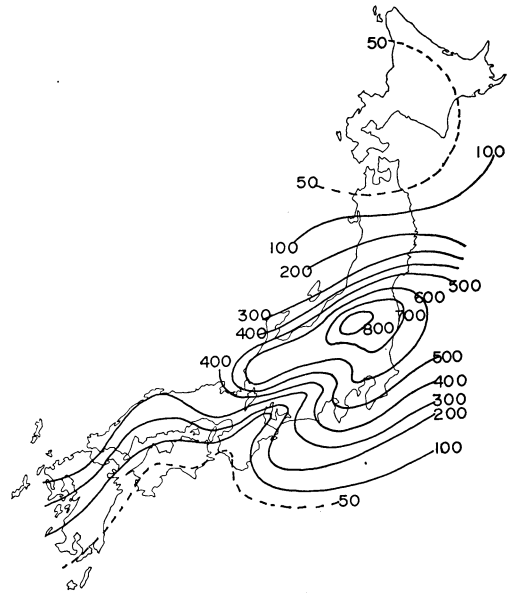
(2) 式の D.L.R インデックスは C.A.T インデックスと流れの水平方向の伸縮による変形を組合せたようなものである。

そこで、流れの水平方向の変形のみについて、乱気流との関係について調べてみる。水平方向の変形は次式で示めされる。

$$\left[ \left( \frac{\partial u}{\partial x} - \frac{\partial v}{\partial y} \right)^2 + \left( \frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y} \right)^2 \right]^{1/2}$$

ただし、上式の第2項はずり (shearing) による変形。

第5図の変形の値に対する乱気流の頻度分布からまわると第1表の変形の平均値と乱気流の強度との間に正の



第14図 D.L.R. インデックス等値線 ( $10^{-5}M^2/sec^2$ )

相関があることはわかる。

水平シャーの航空機に乱気流を与えるメカニズムはわからないが、Harrison (1959) や荒川<sup>2)</sup> は水平シャーがある値を越えるようなとき、ジェット気流の北側に、特に前者は谷の中に C.A.T の出現頻度が集中することを示した。ジェット気流の北側は、また、第13図で示すが、変形も大きなところである。

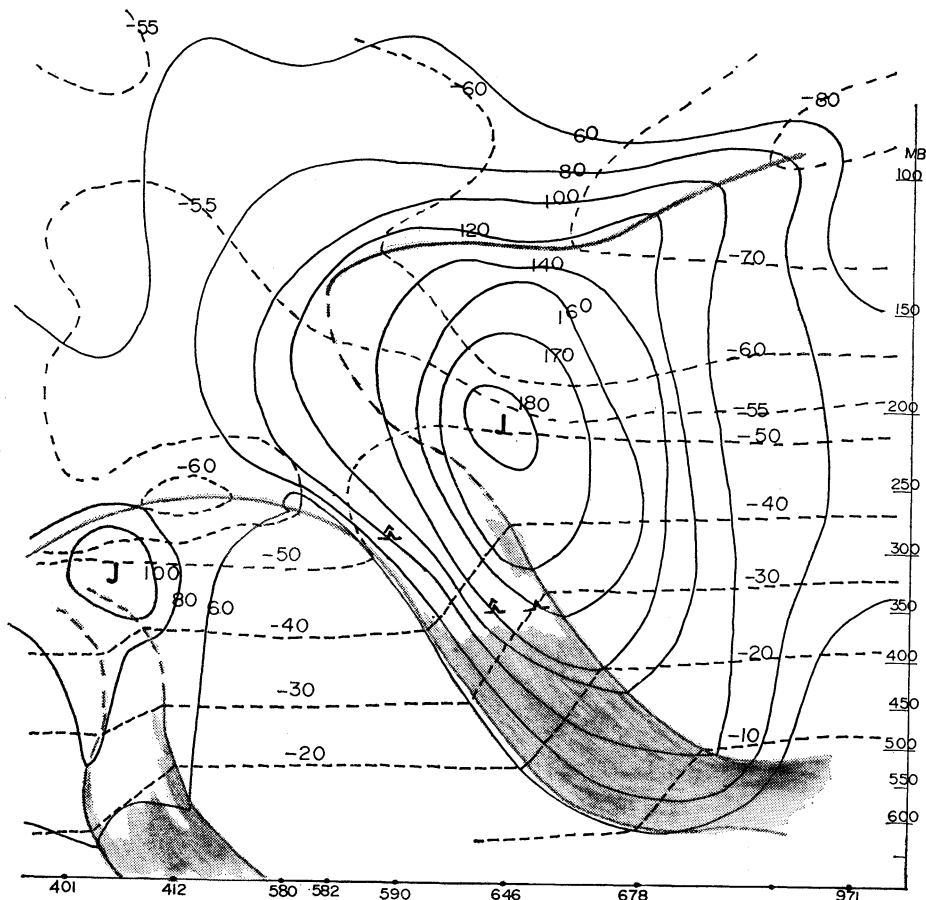
#### d) D.L.R. インデックスと乱気流の関係

第6図は D.L.R. インデックスに対する乱気流の頻度分布図である。ここで負の領域であらわれている乱気流は全体の8%で C.A.T インデックスのように物理的な意味で矛盾は少ない。また、D.L.R. インデックスの平均値と乱気流の強度との間に正の相関があることがわかる。

#### e) “Icing インデックス” と着氷の関係

(4) 式で求めた “Icing インデックス” の値に対する報告された着氷の頻度との関係を示すと第7図のようになる。これをみると、 $\pi<0.5$  で全体の83%が現われている。また、これらの平均値と強度との関係をとってみると、第8図のようにインデックスとの間に負の相関があることがわかる。

\* 乱気流とは大気の流れにより航空機に受ける動揺をいう。aircraft turbulence の訳



CROSS SECTION ALONG 140°E  
 ——— WIND SPEED ISOLINES (kts)  
 - - - - - TEMPERATURE ISOLINES

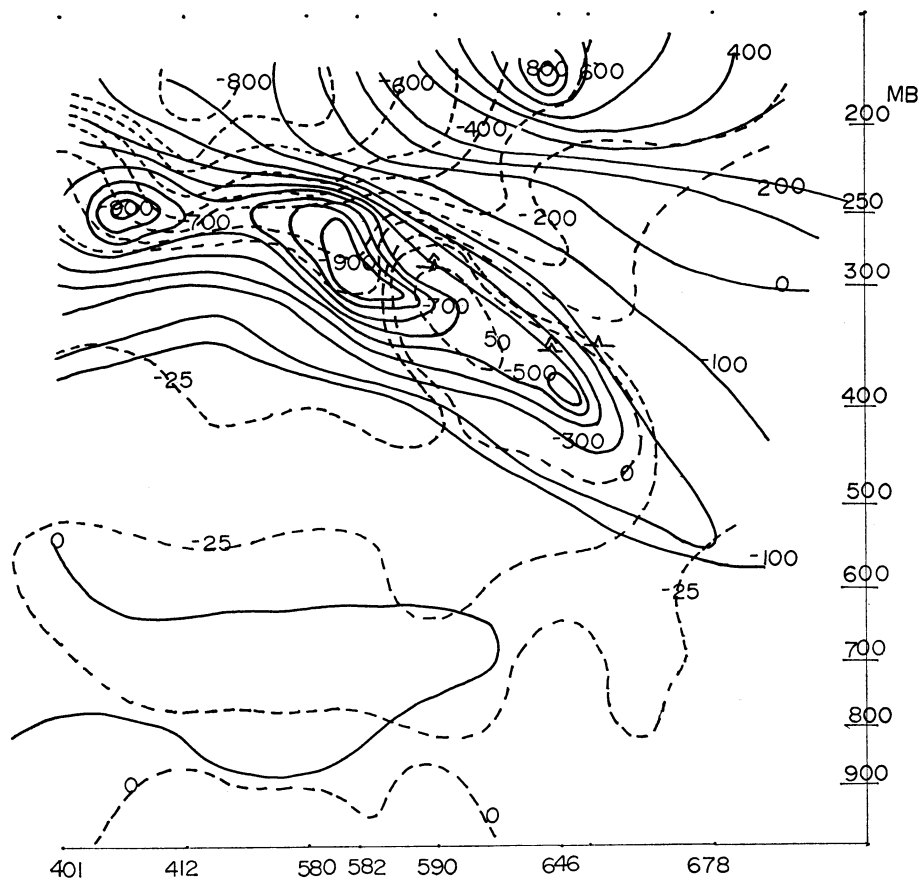
第15図 断面図 (下部数字は地点番号)

5. 示例

乱気流に関する解析の一例として1971年11月22日12zの場合を示す。この時の300mb天気図を第9図に示す。300mb天気図では気圧の谷がぬけきらず、樺太東岸の低気圧から北海道東岸を通して三沢、秋田、朝鮮半島と気圧の谷がのびている。これに伴って強風軸に米子、館野を結ぶ線上に160ノットほどのジェット気流が観測されている。

この日の12zから前後6時間内に発生した乱気流の発生場所を第10図に示めてある。前述の手法により計算されたリチャードソン数の最小値の分布を第11図に、C.A.Tインデックスの分布を第12図に示す。これによると乱気流強度、高度はC.A.Tインデックスとほぼ一

致し、 $[I]=30(\times 10(m/s)^2)$ 程度で強い乱気流域を、また、 $[I]>0$ で乱気流域をとらえている。ただ東北地方でindexが大きいのになら乱気流の出現がないのは遭遇率の問題で乱気流の報告がないものと解せられる(この時刻のflightはこの地方で、ほとんどない)。第13図はこのときの変形(deformation)の最大値の分布を解析したものである。これもC.A.Tインデックスやリチャードソン数と同じパターンを示し、乱気流の発生に何んらかの形で寄与していることがわかる。このときのD.L.Rインデックスの分布を第14図に示す。前出の第10図の乱気流発生域と比べると、約 $[D]>600(60cm^2/sec^2)$ の領域で乱気流発生域をとらえている。また、このときの鉛直構造は第15図に示してある。館野上



第16図 断面図 (下部数字は地点番号), —D.L.R. インデックス, .....C.A.T. インデックス

空 200mb 付近に約 180 ノットの亜熱帯ジェット核があり、その北側からかなり顕著に転位層が 500mb まで伸びている。また、極前線ジェット核は札幌上空 300mb 付近にあり 100 ノットの風がある。このような状況下で乱気流は 350mb~250mb 付近の転移層中に発現している。このときの D.L.R. インデックスと C.A.T. インデックスの鉛直分布を第16図に示した。C.A.T. インデックスはほぼ高さも一致し、乱気流の起っている転移層で最大値を示している。しかし、D.L.R. インデックスは C.A.T. インデックスの最大値の上方、第15図の亜熱帯ジェット核の北側に極大値があらわれていて、高度的に乱気流をとらえていない。これは C.A.T. インデックスに比べて D.L.R. インデックスが“変形”に大きく左右されるためであると考えられる。

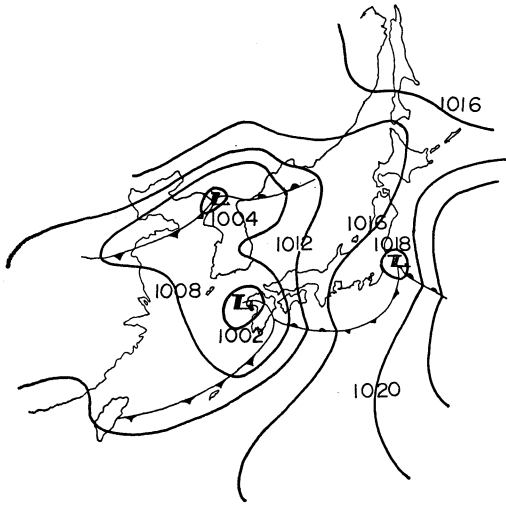
つぎに、Icing インデックスの例として 1973年 2月 22日 00z を示す。第17図はこのときの地上天気図である。

航空予報図に、報告された着氷、乱気流と Icing インデックスを記入してみた (第18図)。これをみると、 $[\pi] < 0.5$  で着氷域をとらえている。また、高度との関連を表示するために断面図によって示したのが第19図 a, b である。これらはほぼよい一致を示している。また、同時刻の C.A.T. インデックス分布図を付加しておく (第20図参照)。

## 6. 結果

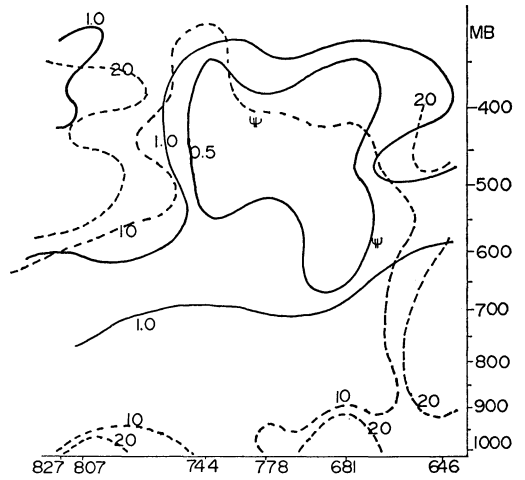
晴天乱気流と着氷に関する定量的予想表示を目的として、C.A.T. インデックス、D.L.R. インデックス、Icing インデックスの三つを考えた。特に乱気流を与える乱流のスケールは時間的にも空間的にも小さく、総観的な観測網や時間間隔の観測値から、とても都合よくとらえることはできない。しかし、何んらかの方法でこれらの現象を表示しなければならず、乱気流の発生しやすい大気内部の風、気温の不連続がある程度持続するものと仮定



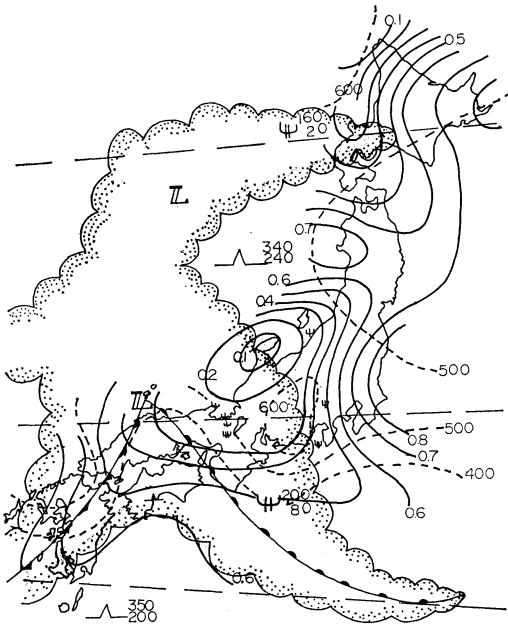


SURFACE MAP  
220000Z FEB.73

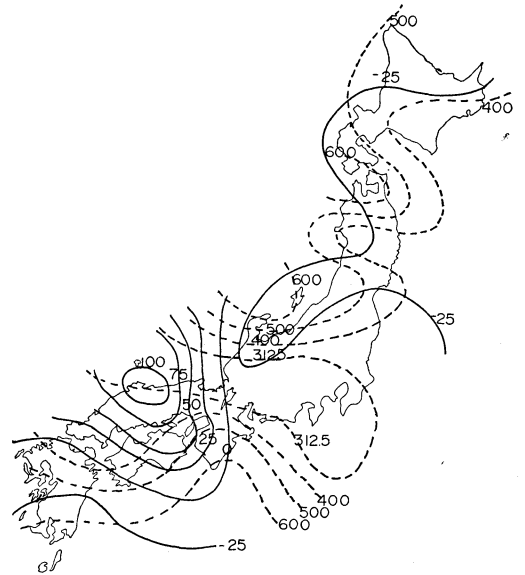
第17図 地上天気図



第19図 a 断面図 (下部数字は地点番号) —— Icing  
インデックス等値線, ..... 8D 等値線



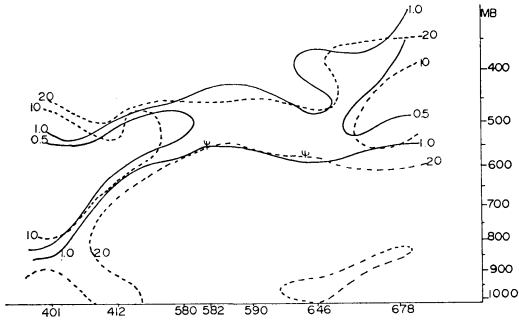
第18図 国内航空予想図と Icing, C.A.T の分布と  
Icing インデックス等値線



第20図 C.A.T インデックス等値線, —— C.A.T  
インデック ( $10M^2/S^2$ ), ..... 高度 (mb)

し前出の調査を行なった結果これらのインデックスはその初期段階として使用可能なものと考えられる。より詳細な調査をするにも報告そのものに個人差があること、

C.A.T index の方法によれば発現して当然の所でも遭遇率の問題によって Index が不適当に解釈される場合と (ex. Fig. 12 東北地方), 実際に Index が不適当である場合の判断が事実上不可能であること, また, これらの現象の頻度分布を作ってみると, 現象の強度の強いものが出現しているところでは, 強いもののみが存在しているのではなく, その近傍では, さまざまな強度の



第19図 b 断面図 (下部数字は地点番号) ——Icing インデックス等値線, .....-8D 等値線

ものが存在しているのではないかと考えられることより、インデックスにおいて、強の現象が起こる可能性のところが弱の現象があるのはこうした解釈ができる。今回の調査では乱気流領域を決める場合、C.A.T インデックスでは  $[I] > 0$ 、D.L.R インデックスでは  $[D] > 300$ 、着氷領域を決める場合  $[\pi] < 0.5$  という値が妥当であると思われる。

終りに今回の調査に便宜を計らって下さった東京航空地方気象台添田次長、橋場予報課長をはじめ直接ご指導戴いた森子報官、気象庁気象衛星課神子調査官、計算に

際してご指導を戴いた東京管区気象台調査課 巽、青木両技官に対して謝意を申し上げます。

## 文 献

- 1) K.L. Calder, 1949: The criterion of turbulence in a fluid of variable density with particular reference to conditions in the atmosphere. *Q.J. Roy. Met. Soc.* **75**, p 71-88.
- 2) 森 俊入, 1956: 着氷の予報, *研究時報*, **8**, p 443-449.
- 3) 荒川秀俊, 1958: Clear-air turbulence, 気象研究ノート, **58**, p 2-7.
- 4) D. Colson, H.A. Panofsky, 1965: An index of clear air turbulence, *Q.J. Roy. Met. Soc.* **91**, p 507-513.
- 5) H.A. Panofsky, I.A. Singer, 1965: Vertical structure of turbulence **91**, p 339-344.
- 6) 森 俊入, 柴田 宣, 1970: 本邦における C.A.T インデックスと遭遇率, 航空気象業務打合せ会資料, p 57-64.
- 7) W.T. Roach, 1970: On the influence of synoptic development on the production of high level turbulence, *Q. J. Roy. Met. Soc.* **96**, p 413-429.

## 昭和49年度朝日学術奨励金および第15回 藤原賞受賞候補者の推薦について

朝日新聞社及び藤原科学財団より下のように候補者推薦の依頼がありました。推薦を希望する会員はいずれも**2月2日(土)**迄に、氏名、連絡先および研究題目を明記して、担当理事、北川信一郎(〒338 浦和市下大久保255 埼玉大学理工学部 電話 0488-52-2111)に申出下さい。

### 朝日学術奨励金

1. 対象は自然科学および人文科学の研究に従事する個人、グループまたは団体とする。いくつかの学問領域にまたがるいわゆる「学際研究」を歓迎す

る。

2. 奨励金の希望金額に制限はないが、昨年度は6研究に対し合計753万6千円でした。

### 藤原賞(藤原銀次郎翁の基金による学術賞)

1. 自然科学の分野で科学技術の発展に卓越した貢献をした研究者1件を推薦する。
2. 被推薦者は原則として1人とし、共同研究者をあげねばならないときはその理由を明記する。
3. 賞状、賞牌および副賞1千円2件以内が贈呈される。