

## ウインドシア

古川 武彦\*

### 1. はじめに

2009年3月23日朝、成田国際空港に着陸しようとしていた貨物機が着陸に失敗、炎上し2名の乗員が犠牲となった事故は未だ記憶に新しい。特に、事故の一部始終が空港に設置されているテレビ局の定点カメラなどを通じて放映され、茶の間にも大きなショックを与えた。翌24日の新聞は事故を招いた原因は「ウインドシア」であると一斉に報じた。ウインドシアについての記述ぶりを見てみよう。ウインドシアの概念に直接触れた記事部分のみを抜粋し、『 』内に示した。

#### (1) 朝日新聞

『…ウインドシアが高度600メートル以下で起きている…』との記述があり、「キーワード」欄にはウインドシアを取り上げて、『乱気流の一種で、風速や風向きに急激な差が起きる状態を指す。シアとは「ずれ」といった意味。前線の境目や上空のジェット気流周囲で発生しやすいとされる。……』と解説している。

#### (2) 毎日新聞

『…着陸失敗事故は、「ウインドシア」と呼ばれる気象が影響したとの見方がある一方で、…』との記述が見られ、『ウインドシアは、風の強さや方向が急激に変化する気象現象』と解説している。また「余録」欄には、『事故当時、空港周辺では最大毎秒20メートルの突風が観測され、風向きや風速の急変する「ウインドシア」という現象の報道もあった。』と書いている。

#### (3) 読売新聞

『…、成田航空地方気象台はウインド・シア（気流の乱れ）が発生するとの気象情報を出して注意を呼び

かけていた…』、『…空港周辺に発生していたウインド・シア（気流の乱れ）が事故につながった…』、『…成田航空気象台が空港周辺でウインド・シアが発生していると注意を呼びかけており、…』と報じている。

これらの報道を見ると、ウインドシアがあたかも竜巻やダウンバーストのように、固有のメカニズムと時間・空間スケールを持つ気象現象の一つと理解され、それが大気中を独立的に移動しているかのごとく報道されている。また、ウインドシア自身が乱気流あるいは気流の乱れと理解されていた点も見受けられる。さらに、一部のメディアでは事故の原因をダウンバーストの概念を用いて解説していた。

一方、最近、ある新聞で「地球温暖化によって乱気流の発生が多くなる」との報道があり、実際の論文(Williams and Joshi 2013)を見ると、晴天乱気流の要因の一つは鉛直ウインドシア(ケルビン・ヘルムホルツ)不安定とみなし、こうした乱気流の増加は温暖化に伴うジェット気流の北偏が関係しているという趣旨であった。

ウインドシアという言葉は、このように航空機が着陸に失敗した場合や乱気流に遭遇した場合にたびたび現れる一種の航空気象用語となっている。しかしながら、気象現象を眺めてみれば、高・低気圧や寒冷・温暖前線を始め、海陸風や山岳波、積乱雲、ダウンバーストや竜巻などは、それぞれ固有の風の場を伴っているので、当然、ウインドシアも存在する。

本稿ではウインドシアを気象用語の一つとして広くとらえ、その一族と関わりを持つ用語や現象を出来るだけ網羅し、また幾つかの事例を示しながら、その意義などについて考察したい。なお、ウインドシアについては、すでに「天気」2010年4月号の「新用語解説」に、「ウインドシア」と題する簡明な解説がなされ

\* Takehiko FURUKAWA, 気象コンパス.

takefuru@eos.ocn.ne.jp

© 2013 日本気象学会

ているので (田畑・藤部 2010), 合わせて見ていただきたい。

## 2. ウインドシアの「シア」

気圧や温度のような物理量は座標を指定すればただ一つの値が対応する。このような量はスカラーと呼ばれる。その空間変化の割合あるいは変化率は、傾度あるいはグラディエントと呼ばれる。気圧傾度や温度傾度は身近な例である。スカラー量を $\psi$ とすれば、その傾度は $\text{grad}\psi$ と表記され、次のように三つの成分を持つベクトルで表現され、傾度が最大の方向も定まる。

$$\text{grad}\psi = \partial\psi/\partial x\mathbf{i} + \partial\psi/\partial y\mathbf{j} + \partial\psi/\partial z\mathbf{k} \quad (1)$$

ここで $\mathbf{i}$ ,  $\mathbf{j}$ ,  $\mathbf{k}$ は、それぞれ $x$  (東向き),  $y$  (北向き),  $z$  (鉛直上向き) 方向の直交座標上の単位ベクトルである。「傾度」あるいは「グラディエント」は「gradient」の和訳である。

次に対象が風のようなベクトル量である場合は、ベクトルが三つの成分を持っているので、風の傾度は9つの成分を持つテンソルで表現される。すなわち、風ベクトルを $\mathbf{V}(u, v, w)$ とすれば、傾度は次のように表現される。

$$\begin{aligned} \text{grad}\mathbf{V} = & (\partial u/\partial x, \partial v/\partial x, \partial w/\partial x) \mathbf{i} \\ & + (\partial u/\partial y, \partial v/\partial y, \partial w/\partial y) \mathbf{j} \\ & + (\partial u/\partial z, \partial v/\partial z, \partial w/\partial z) \mathbf{k} \quad (2) \end{aligned}$$

しかしながら、風の場合は「風の傾度」や「風のグラディエント」という言い方は一般にされず、慣用的に「ウインドシア」という用語が用いられる。ウインドシアはwindshearあるいはwind shearの和訳である。ウインドシアにおける「シア」は、このshearから発している。

広義で言えば、(2)のそれぞれの成分がウインドシアということになるが、本稿で取り上げているウインドシアの観点から見れば、風の水平成分 $u, v$ の鉛直傾度である $\partial u/\partial z$ と $\partial v/\partial z$ が鉛直ウインドシアとして、また $u, v$ の水平傾度である $\partial u/\partial y$ と $\partial v/\partial x$ が興味のある中心である。すなわち考えている面に直交する面に平行な風に関心がある。局所的な風向 $U$ に直交する座標軸を $n$ とすれば、ウインドシアは $\partial U/\partial n$ と表現される。

ちなみに、shearは切断するという意味を持つ。ある面を横切って流れにシアが存在する場合、面に平行

な力が働く。今、東西南北という座標系を離れて、平板から単に $y$ 離れた平面に沿って流れる流体 $U(y)$ を考えると、 $y$ での単位平面に働く応力( $\tau$ )は、

$$\tau(y) = \mu \partial U / \partial y$$

のように表現される。 $\mu$ は動粘性係数である。 $\tau$ はシアストレス(剪断応力)と呼ばれる。 $U$ の変化率(シア)が大きいほどストレスも大きくなり、シアがゼロであれば応力もゼロである。

## 3. ウインドシアの定義

ウインドシアに関する定義を列挙してみよう。

(1) 気象科学事典(気象学会編集:東京書籍, 1998)では、ウインド・シア/wind shearの項で、「大気の任意の2点における風のベクトル差。水平方向に並んだ2点間の差を水平シア、鉛直方向に並んだ2点間の差を鉛直シアという。風向に直交する方向に水平シアが極値を持つ場合には、順圧不安定が発生することがある。総観スケールで見るとジェット気流付近や熱帯収束帯ではこのような条件が満たされやすい。地衡風の鉛直シアは、風向に直交する方向の水平気温勾配に比例する(温度風の関係)。鉛直シアが大きい場合には、ケルビン・ヘルムホルツ不安定が生じる。高高度で航空機がしばしば遭遇する晴天乱気流は、ケルビン・ヘルムホルツ不安定が成長して気流が乱された状態であるとされている。大気の収束・発散もウインド・シアの一形態である。ガストフロントは収束性の、ダウンバーストは発散性の強いウインド・シアを地面付近にもたらす(低層ウインド・シア)。いずれも航空機事故の原因となる現象である。大型ジェット機の場合、その性能上、着陸時に毎秒1.5 m/s程度以上の対気速度の変化を受け続けると安全運航が脅かされる」となっている。

(2) オックスフォード気象辞典(朝倉書店, 2005)では、風のシア/wind shearで、「隣り合う点での風速差。以下の3つの場合がある。風速(の水平成分)が鉛直方向に変わる鉛直シア(vertical wind shear)。風速が水平距離とともに変わる水平シア(horizontal wind shear)またはlateral wind shear)。風の鉛直成分が水平距離で変わる、上昇気流あるいは下降気流シア。鉛直シアは晴天乱(気)流や波雲の形成、ケルビン-ヘルムホルツ波の生成に関係している。水平シアは例えばジェット気流の近傍で大きい。鉛直運動で引き起こされるシアはダウンバーストやトルネードの重

要な因子である」となっている。

上記の二つの説明では、ウインドシアが微分的な概念より、有限距離というむしろ実用的な立場である。

(3) 米国の National Science Digital Library では、極めて簡潔に「It is a difference in wind speed or direction between two wind currents in the atmosphere.」と述べている。

(4) Glossary of Meteorology (アメリカ気象学会) では、wind shear を和訳すると「風ベクトルあるいはその成分の与えられた方向の局所の変化」、また「鉛直シアは高度に  $z$  を用いると  $\partial V/\partial z$ 、また気圧高度  $p$  を用いると  $\partial V/\partial p$  のように表現される。風が地衡風である場合は、鉛直シアは温度風方程式で与えられる。ある点におけるウインドシアは、その点における風ベクトルからシアベクトルへの回転の仕方によって、低気圧性あるいは高気圧性と呼ばれる」と定義されている。

上記 (3), (4) は、より流体力学的・気象学的な立場である。

ウインドシアの定義については、上記の説明でできていると考えられるが、いずれも時間を固定した空間の場として議論されている。しかしながら、航空機の側で認識(観測)されるウインドシアや乱気流などは、風の場とそこを通過する航空機との相対関係の中で起きるため、時間軸が入り込む。したがって、「ウインドシアー」(前出)でも述べられているように、航空でのウインドシアは、気象における見る方向に直角な方向の風成分の変化のみならず、見る方向と平行な成分や上昇・下降流も考慮される必要がある。さらに、航空機の種類・重量・形状・速度(飛行状態)にも依存する。さらに、ウインドシアの定義も気象と航空分野では異なっており、航空分野では「航空機が単位時間に受ける風ベクトルの変化量 ( $m/s^2$ )」で定義されている。したがって、その次元も気象におけるウインドシアの  $s^{-1}$  と異なる。なお、興味のある方は「飛行機と気象」(中山 2010)を一読願いたい。

以下、本稿ではいくつかの事例を引き合いに、ウインドシアについての理解を深めたい。

#### 4. ウインドシアと関連図

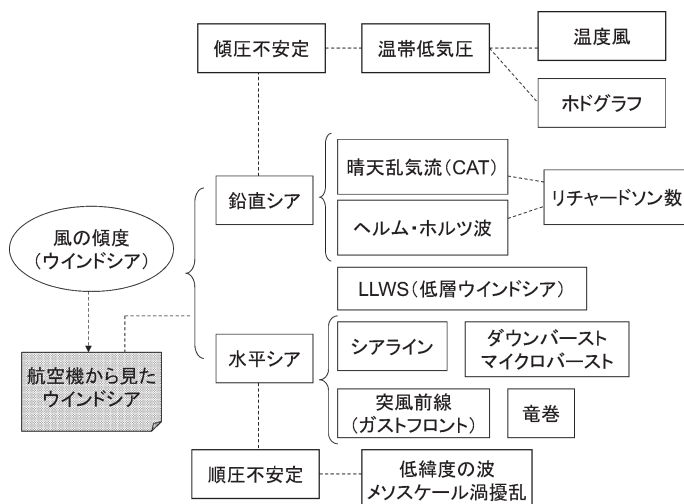
ウインドシアは三つの視点で見ることができる。一つは種々の現象を風の場の空間変化として認識・解釈する診断的な立場である。ウインドシアという物差しで大気の状態を眺めると、前線などの対象とする現象や識別・仕組みがよく分かる。また予報作業の面では、実況の診断や予測について種々の情報を与えてくれる。二つは基本場を不安定化させて種々の現象を発生・発達させるという視点である。三つは上述の航空機で認識される視点である。

第1図はウインドシアー族と、それらの相対的關係を示したものである。図中の点線は単につながりを示す。このような仕分けはあくまでも筆者による便宜的なものである。各事項は必ずしも他と独立ではないが、ウインドシアを議論する場合、鉛直ウインドシアと水平ウインドシアに分けて見ると理解しやすい。突風前線やダウンバースト、竜巻は鉛直ウインドシアも持つが、ここでは水平ウインドシアの方に置いた。

なお、一般に種々の現象は上昇流 ( $w$ ) を持ち、その空間傾度も存在するが、議論の簡便のため、本稿を通して風は基本的に水平風と考える。

##### 4.1 風の鉛直シア (vertical wind shear)

第1図に示したように、鉛直シアは傾圧不安定の議論と晴天乱気流などを議論する二つの立場がある。前者は主としてシノプティック(総観規模)で、後者は局所的なものである。



第1図 ウインドシアと現象などの関連図。

大規模場の鉛直シア

第1図の傾圧不安定(波)の部分は、偏西風のような大規模な流れの鉛直シアと密接な関係にあり、手短かに言えば、基本場が持つ鉛直シアに応じて、擾乱の発達率および波長などが得られる。発達のエネルギー源は、基本場の位置エネルギーのうち他に転換可能なエネルギーである有効位置エネルギーである。以下に示すような低気圧は傾圧不安定(波)の好例である。

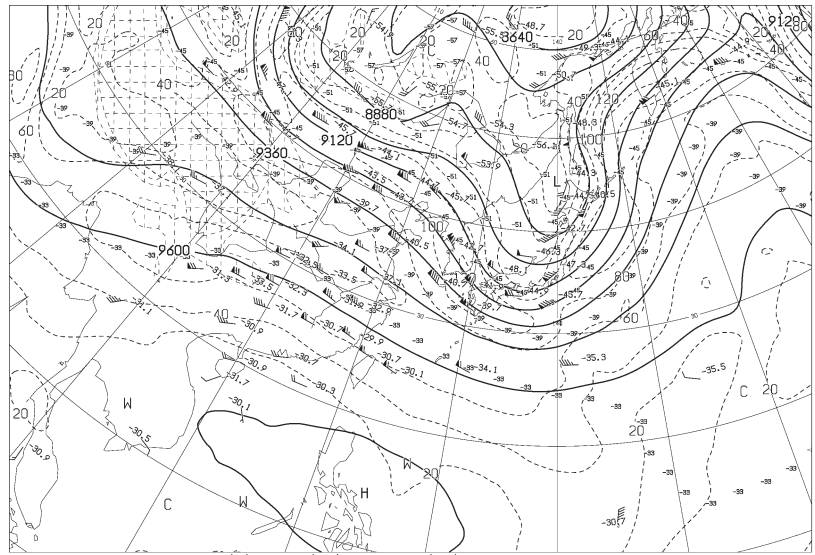
第2図は、ある日の500 hPa および300 hPa の高層天気図である。日本列島付近は深い気圧の谷にある。500 hPa で見ると、強風域が朝鮮半島を縦断して日本海に南東に伸び、日本付近で大きく蛇行して、北東方向に向かっている。館野では65 kt (1 kt=0.51 m/s) の風が吹いている。300 hPa でも、流れのパターンは500 hPa と同様であるが、全体に風が強くなっており、鹿児島では100 kt である。ちなみに、3節の(4)で触れられている低気圧性/高気圧性の関連で言えば、日本付近の上空では風が北に向かって減少しているの、流れは低気圧性と認識される。

次に第3図は、同じ時刻で見た風の東西成分( $u$ )の南北断面図である。気象庁では東経130度と140度に沿った二つの断面図を作成・公開している。この図は130度のもので、下に観測ポイントが記されている。日本付近では上空に行くほど強まっており、福岡の上空に偏西風の強風帯(ジェット気流)の極大が見られ、約140 kt の風が吹いている。温位分布から分かる

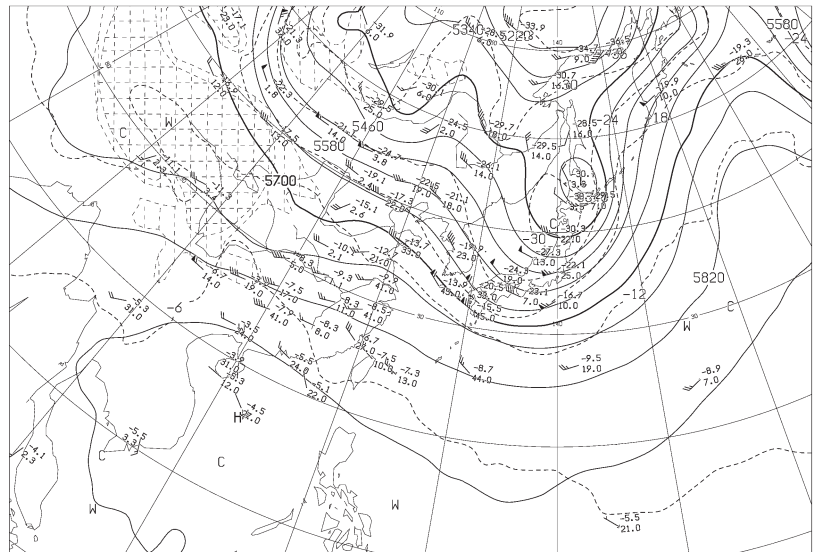
ようにジェット気流は対流圏界面の直下付近に位置している。

なお、この断面図の高度500 hPa および300 hPa 面の風の南北分布は、第2図の高層天気図の東経130度上に沿った風の場に対応している。

第2図に示した事例の場合、4月としてはかなり大きな鉛直シアを持っており、北緯30度から40度付近に



ANALYSIS 300hPa: HEIGHT(M), TEMP(°C), ISOTACH(KT)

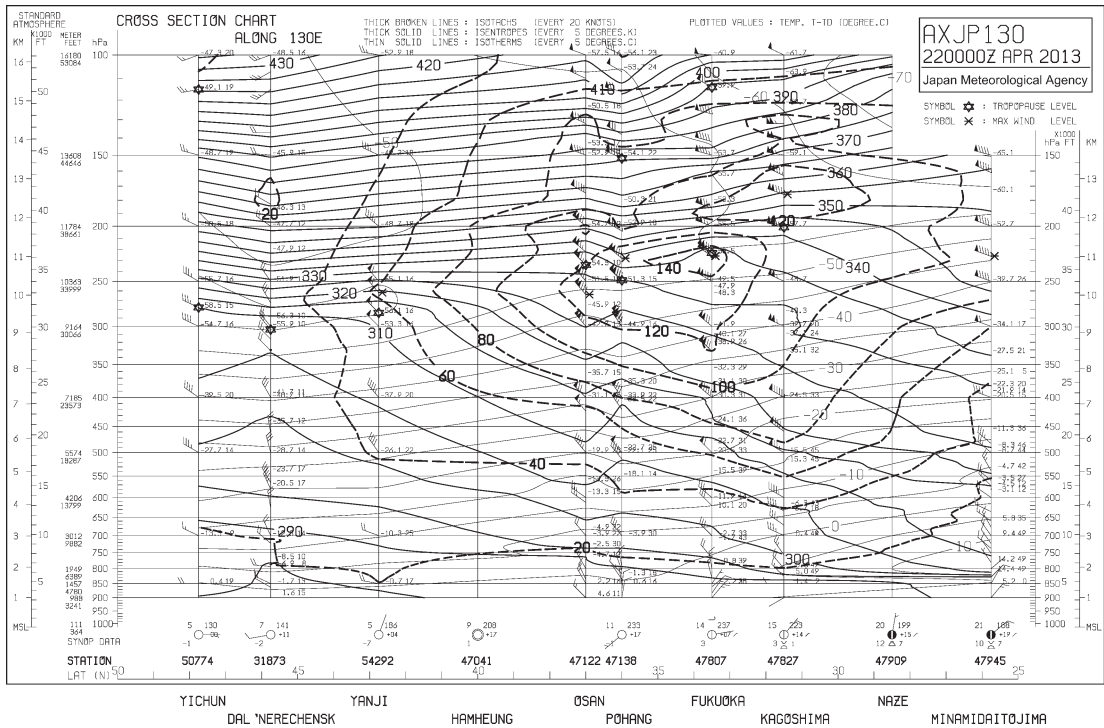


ANALYSIS 500hPa: HEIGHT(M), TEMP(°C)

AUPQ35 220000UTC APR 2013

Japan Meteorological Agency

第2図 高層天気図(2013年4月22日00UTC; 上段300 hPa, 下段500 hPa)(気象庁資料)。



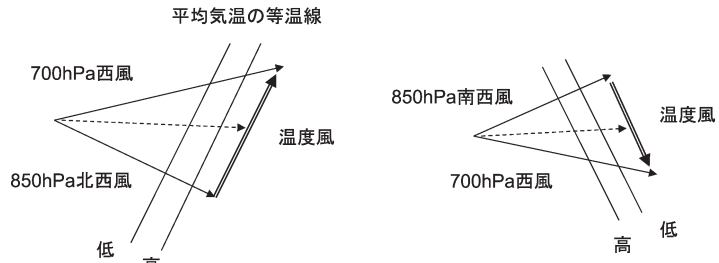
第3図 風の東西成分の南北断面図 (2013年4月22日00UTC) (気象庁資料)。

かけて見られる偏西風帯が傾圧不安定を起し、低気圧が発生したと考えられる。

温度風

第1図中の温度風は、対象としている風 (V) が地衡風の場合に、鉛直シア  $\partial V / \partial z$  で定義されるベクトルである。もちろん、温度風 (ベクトル) は仮想的な風であって、温度風という風は実際には吹いていない。温度風はよく知られているよう

に地衡風の式と静力学平衡の式から導かれ、風向に直角方向の水平温度傾度に比例する。温度風の走向は考えている層の平均温度の等温線に平行となる。したがって、温度風が等高線の方向 (風向) とある角度を持っている場合は、寒気あるいは暖気の移流があることになる。また温度風は、各高度の風ベクトルを水平面に投影した hodograph という図で簡単に見積もることができるので、天気予報作業などで着目される。第4図は hodograph と温度風、寒気・暖気移流の関係を示した概念図である。寒気移流では上空に向かうにつ



第4図 温度風と移流の概念図 (点線は850 hPaと700 hPaの平均風、高・低は温度の相対値)。

れて風向が反時計回りに変化しており、暖気移流の場合では逆に時計回りに変化する。

ちなみに、発達中の低気圧では、下層を中心に、西側 (後面) で寒気移流が、東側 (前面) で暖気移流が見られる。なお、第2図のような上層では、500 hPaと300 hPa間で温度風ベクトルは等高線とほとんど平行になっており、移流はほとんどゼロであることが分かる。

4.2 局所的なウインドシア

第1図には、局所的な鉛直シアと関連して、晴天乱



第5図 ケルビン・ヘルムホルツ波の例 (米国大気科学研究所 (NCAR) の Benjamin Foster による)。

気流, ケルビン・ヘルムホルツ波, リチャードソン数を掲げた。

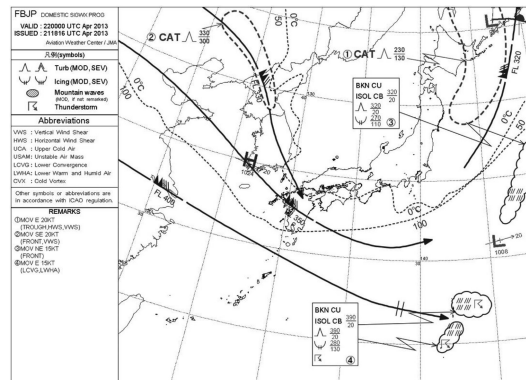
#### 晴天乱気流, ケルビン・ヘルムホルツ波

晴天乱気流は CAT (Clear Air Turbulence) とも呼ばれ, 航空機が CAT に遭遇すると機体が揺れ, 激しい場合は乗客にけが人が出て, 緊急着陸を余儀なくされる場合もある。一般に CAT は風の場に局所的な鉛直シアが存在する領域で発生すると信じられている。したがって, ジェット気流の核の近傍 (第2図の福岡の上空10 km 付近) は CAT 発生の有効な環境にある。CAT は文字通り, 雲がない晴天時に起きることから, そのメカニズムは必ずしも解明されていないが, 前述のようにケルビン・ヘルムホルツ波が原因と考えられている。この波は風の鉛直シアの他に大気の安定度 (温度の鉛直傾度) との相対関係で発生するものである。実験室や数値シミュレーションではきれいに再現できる。

ケルビン・ヘルムホルツ波は, 流れの鉛直シアを持つ不安定化作用が成層の持つ安定化作用に打ち勝って不安定化し, 層状の流れが不安定化し波動となるものである。第5図はケルビン・ヘルムホルツ波の写真で米国大気科学研究所 (NCAR) の Foster による。下の山はロッキー山脈の一部である。この場合は波動が雲によって可視化されている。

#### リチャードソン数

ケルビン・ヘルムホルツ波のような波動の発達を支配する具体的な指標がリチャードソン数と呼ばれるパラメータである。リチャードソン数 ( $Ri$ ) は  $Ri = N^2 / (\partial U / \partial z)^2$  と表される。 $U$  は風,  $N$  はプラントバイサラ振動数と呼ばれ, 安定度の指標である。 $N$



第6図 国内悪天予想図 (太破線は, CAT が予想される領域を表す) (気象庁資料)。

は温位  $\theta$  を用いると,  $N = (g / \theta \times \partial \theta / \partial z)^{1/2}$  と表現される。 $g$  は重力加速度,  $\theta$  は  $\theta$  の平均値である。

リチャードソン数を見ると, 鉛直シア ( $\partial U / \partial z$ ) が分母になっているので, 鉛直シアが大きいかほど値が小さくなる。この値が  $1/4$  以下になると, ケルビン・ヘルムホルツ波が発生すると言われており, したがってジェット気流の核の下部付近は CAT も発生しやすい環境にある。

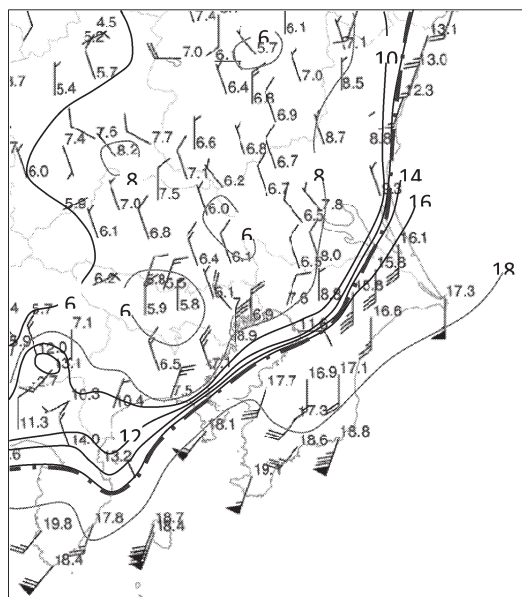
第6図は「国内悪天予想図」で気象庁が作成しているものである。予測に対応する時刻は前述の第2図および第3図と同じである。朝鮮半島の北部付近と北海道の東に太い破線で CAT の予想領域が表されている。CAT の予測はリチャードソン数など考慮して行われている。この CAT の領域は第2図, 第3図を見ると, 実際に風の鉛直シアが大きく, したがってリチャードソン数も小さくなっていることがわかる。実況では, 0520Z に130E 付近の宮崎の東35マイル38000 ft (1マイル=1852 m, 1ft=0.3 m) で並の乱気流が報告されている。また, 140E 付近には00Z 前後に複数の並の乱気流の報告がなされていた。

## 5. 風の水平シア

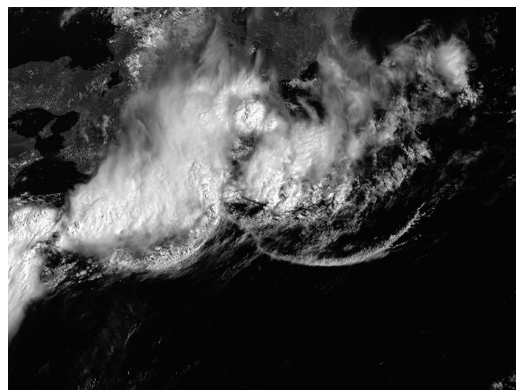
風の変化を水平方向で見たのが水平ウインドシアであり, 先の第1図中に種々の現象との関連を示す。

### 5.1 シアライン

シアラインは, その線を境に風向や風速が不連続となっている線を意味する。温暖前線および寒冷前線, 関東地方の沿岸部などでよく見られる沿岸前線, さらに海陸風も, 一般にシアラインを伴っている。シアラインは, 一般に風が収束している場であり, 雲や降水



第7図 沿岸前線のメソ解析例 (2012年11月26日16時) (永沢義嗣・原 基氏による)。小数点表示の数字は気温、風は長矢羽根が2 m/s, 短矢羽根が1 m/sで表示、実線は等温線で2°C間隔。



第9図 気象衛星「ひまわり」で見られる積乱雲群から吹き出したガストフロント (気象庁資料, 入田 央氏提供)。

を横断して伊豆半島に達している。このラインの南側では強い南西風が吹いており、北側では北風となっている。第8図はこの時の地上天気図であるが、房総半島付近に温暖前線が伸びている。このシアラインの温暖前線が接近するずっと以前から形成され、停滞していたが、この時刻ではシアラインの一部は温暖前線と一体となっている。

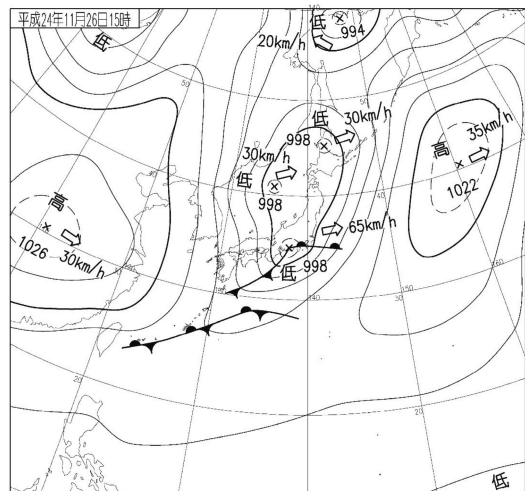
### 5.2 突風前線

激しい積乱雲の地表付近では、上空からの冷たい下降気流が周囲に広がり、その先端部には前線が形成される場合が多い。前線の通過時には突風を伴うことから突風前線あるいはガストフロントと呼ばれている。前線を境に大きな水平シア (一般に風向の変化) を持つのでシアラインとなる。また、ガストフロントの進行前面では、冷たい気流が前方の空気の下に潜り込んで押し上げるので、帯状の雲が形成される場合がある。第9図は積乱雲群から生じたガストフロントの衛星画像を示す。中央左側の積乱雲群の南東象限に円弧状のガストフロントの雲が見える。

なお、このようなガストフロントやシアラインが滑走路付近に存在すると、着陸および離陸しようとする飛行機は横風などを受けやすいことから、気象庁では「飛行場気象情報」の一つとして「ウインドシア」を発表している。その発表基準は「飛行場9 km以内で、原則として (1600 ft) 500 m以下に、ウインドシアー、低層乱気流、シアライン等が観測または予想される場合」となっている。

### 5.3 LLWS (低層ウインドシア)

この用語は優れて航空気象用語である。本稿では



第8図 地上天気図 (2012年11月26日15時) (気象庁資料)。

をもたらす場合が多い。第7図は沿岸前線をアメダスの資料を用いてメソ解析した事例である (永沢義嗣および原 基氏の解析による)。太い破線で示すシアラインが関東北部の太平洋沿岸から南西に伸び、東京湾

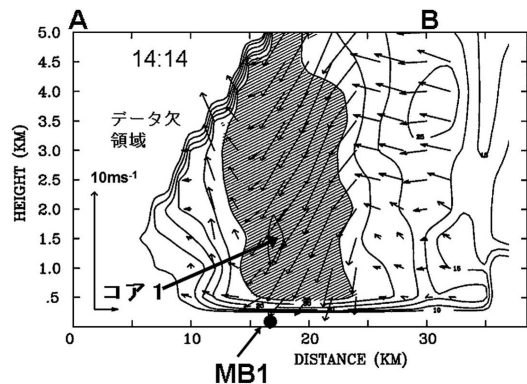
LLWSを水平ウインドシアに分類したが、以下に見るように鉛直ウインドシアも伴う。LLWSはICAO(国際民間航空機関)の技術マニュアルでも詳しく触れられており、航空気象での意義などが、おおよそ次のように記されている。この記述は3節でも触れたウインドシアに関する航空機からの視点を良く表している。

「LLWSは雷雨、海陸風、下層ジェット、山岳波、前線系を含む多様な現象に伴う。ウインドシアに対する航空機の一番の重要性は、その操縦性に影響を与えることから、飛行の安全への潜在的な悪影響も持つ。ウインドシアはどの高度でも起きうるが、地表から約500 m (1600 ft) のものが航空機の離発着に特に重要である。離陸後の上昇および着陸へのアプローチ段階では、航空機のスピードと高度は臨界点に近いので、不都合なウインドシアは、航空機にとって特に感受性を与えることになる。航空機のウインドシアに対する応答は極めて複雑であり、機種、飛行段階、機体のサイズとそれに作用するウインドシアのスケール、遭遇したウインドシアの強度と持続時間に依存する。」

ちなみに、気象庁は成田・羽田・関西などの主要空港にドップラー気象レーダーを設置して、LLWSの監視を行っており、その結果は上述の飛行場気象情報の「ウインドシア」にも反映されている。なお、米国気象局の航空気象センター(AWC: Aviation Weather Center)では、LLWSは、対流を除いて、風ベクトルが二つのポイントで100 ftあたり10 kt以上の場合と定義し、運用している。

#### 5.4 ダウンバースト/マイクロバースト

ダウンバーストは上空から冷たい空気塊が噴流のように地表まで下降し、激しい強風が急激に周囲に広がる現象である。下降噴流などとも呼ばれる。ダウンバーストのうち、影響を及ぼす領域の直径が4 km未満のものはマイクロバーストに分類される。第10図は、石原ほか(2009)が関西空港付近で発生したマイクロバーストを、空港ドップラー気象レーダーを用いて観測・解析した風の鉛直断面図の一部である。ドップラー気象レーダーは、空気中の雨滴やゴミなどから反射される電波のドップラー効果を利用して風の場を観測している。ダウンバーストの構造は目で見ることは困難であるが、このような風の場を媒介に把握できる。図中のコア1がマイクロバーストの核で地表の中心はMB1である。中心から地表に沿って周囲に強風が吹き出しており、先端部では強い水平ウインドシア



第10図 マイクロバーストの観測例(石原ほか2009)。

を伴っている(注:この場合のウインドシアは線に平行な風の線方向の傾度であり、発散的である)。また吹き出している層が地表の極めて薄い層に限られていることから、その上端付近では強い鉛直シアを伴っている。

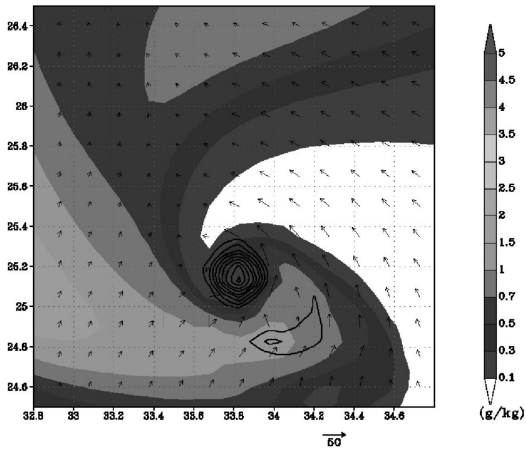
ダウンバーストが空港付近で発生すると航空機の離発着に危険を及ぼすことから、気象庁は当初、主要空港に空港ドップラー気象レーダーを配置していたが、現在は全国約20か所の一般気象レーダーでも、降水域以外に、このようなダウンバーストも観測できるようになっている。もちろん、前述のガストフロントやシアラインも観測可能である。

#### 5.5 竜巻

竜巻の風(水平成分)は「旋衡風」で近似され、理論的には左巻き、右巻きの何れも可能であるが、実際は北半球では左巻きが多く見られる。竜巻は回転運動が卓越していることから、ウインドシアの様子も上述の諸現象とは明らかに異なっており、ウインドシアというよりは、むしろ渦の強さの方に関心が置かれている。また、竜巻はその発生回数が少なく、水平スケールが小さく、寿命も短いことから、ときどきドップラー気象レーダーなどで観測されるが、アメダスなどの地上観測網では捉えにくく、竜巻か否かの判定も写真のほか、草木などの倒れ方や飛散物を媒介に行われている。一方では、竜巻の数値シミュレーションが行われている。

第11図は、2006年9月17日に延岡を含む九州東岸で発生した竜巻についての坪木和久氏による数値シミュレーションの一部で、地表付近の風の場と雨水混合比の分布を示す。このシミュレーションは、予報実験と





第11図 2006年台風13号の降雨帯に発生したスーパーセルの南端部のフック構造部に形成された竜巻の結果。高度20 mの雨水混合比(グレーレベル; g/kg), 渦度(等値線; 0.1/s 毎)及び水平風ベクトル(矢印)の分布。時刻は2006年9月17日05UTCに対応する。坪木和久氏(名古屋大学地球水循環研究センター)の提供による。

して、気象庁 MSM を初期値 (2006年9月17日00UTC) として500 m 解像度の雲解像モデル (CReSS) を実行し、その結果を初期値・境界値として、さらに解像度75 m のモデルをネスティングして行われたシミュレーションで、スーパーセルとその南端部に発生した実際の竜巻がモデルのなかで自然に発生している。

5.6 順圧不安定/水平ウインドシア不安定

一般に風は上空に向かうにつれて強くなっており、温度は北に向かうほど低くなっているが、風速が高さ

方向には変わらず、水平方向 (例えば南北方向) のみ変化しているような場を考えることができる。このような場は順圧大気、その流れは順圧流と呼ばれ、各高度面で温度は一樣である。このような順圧流では、絶対渦度=地球惑星渦度 ( $f = 2 \omega \sin \phi$ ;  $\omega$  は地球の自転角速度,  $\phi$  は緯度) + 相対渦度 ( $= \partial v / \partial x - \partial u / \partial y$ ) がどこかで極大値を持つ場合、流れが不安定化することから、シア不安定あるいは順圧不安定と呼ばれる。擾乱が発達するためのエネルギー源は水平シアを持つ基本場の運動エネルギーである。ジェット気流の軸付近などではこの条件が満たされ易いので、シア不安定が生じやすいことが分かる。実際は鉛直シアも存在するので、純粋な順圧不安定を見出すことは困難である。低緯度地方では  $f$  が小さいことから、水平シアに依存して不安定波を起こす可能性がある。他方、冬季に日本海に見られる渦性の擾乱は、シア不安定と見られている。

参考文献

石原正人, 藤吉康志, 新井健一郎, 吉本直弘, 小西啓之, 2009: 関西空港付近に発生したマイクロバーストの形態と構造—空港気象ドップラーレーダー単独による自動検出とデュアル解析の比較—. 天気, 56, 727-742.  
 中山 章, 2010: 飛行機と気象. 成山堂書店, 176pp.  
 田畑 明, 藤部文昭, 2010: ウインドシア—. 天気, 57, 245-246.  
 Williams, P. D. and M. M. Joshi, 2013: Intensification of winter transatlantic aviation turbulence in response to climate change. Nature Clim. Change, doi:10.1038/nclimate1866.