

室内実験におけるダウンバーストの定性的観察

宮腰聖子*¹・南しずか*²・小林 修*³

Qualitative Observation of Downburst in Laboratory Experiment

by

Satoko MIYAKOSHI, Shizuka MINAMI and Osamu KOBAYASHI

(received on Mar. 29, 2002 & accepted on Jul. 10, 2002)

Abstract

The strong downdraft, which sometimes causes a serious wind calamity and an airplane accident, may occur from cumulonimbus clouds. This downdraft is called "downburst". In this study, visualization experiments by means of dry ice was conducted to reproduce the same phenomenon as a downburst in a laboratory and to obtain the information necessary for improving the downburst model used in the simulation analysis of aircraft motion. The qualitative results of these experiments suggested that a downburst model is not almost a pure vortex-ring model but should take the gravity current characteristics and the generation of multiple vortex-rings into consideration.

Keywords: Downburst, Microburst, Laboratory experiment

1. はじめに

積乱雲からときに甚大な風災害や航空機事故を引き起こす強い下降気流が発生することがある。この下降気流をダウンバーストという (Fig.1 参照)。また、発散域の直径によりさらに分類される。直径 4km 以上のものをマクロバースト、直径 4km 以下のものをマイクロバーストとしている。積乱雲の中で下降気流が強められる要因として、力学的要因と熱力学的要因の 2 つが主要なものと考えられている。前者は、積乱雲の中で生成された雨滴が落下する際周囲の空気を引きずり降ろすことにより下降気流を強めるものであり、後者は積乱雲の中で雨滴が落下する際、蒸発により周囲の空気塊より潜熱を奪って冷やされ重くなって下降気流が強められるのである。

アメリカ合衆国では、ダウンバーストによるウインドシアにより 70 年代から 80 年代にかけて、少なくとも 11 件の民間航空機事故が発生し、500 人以上の死傷者が出ている²⁾。このように、航空機の安全な運航にとってダウンバーストの解明および予測は重要な課題の一つとなっている。

航空機の運動にとってダウンバースト現象がどのような影響を及ぼすかということに関して、シミュレーション解析による研究がいくつか行われている³⁾。この際、従来用いられてきたダウンバーストモデルは渦輪 (Vortex-Ring) モデルが主流である。地面付近の流れ場をドーナツ状渦輪の流れに置き換えたものである。このモデルは、平板付近の渦輪によって生成される流れ場

の仮定から導かれる⁴⁻⁶⁾。そして、地表面の上にある主像とそれと等距離の地表面下にある鏡像から成る (Fig.2 参照)。鏡像は、地表面を通過する流れがないという境界条件を満足するためのものである。なお、両渦輪とも大きさと位置は変化せず一定である。

このような Vortex-Ring モデルは、扱いが簡単であるため、ダウンバースト中を飛行する航空機の運動を大まかに把握するには適当であるかもしれない。しかし、本来時間変化するダウンバーストの水平発散場の広がりや、ウインドシアの変化など動的な変化を扱うには修正が必要である。

さらに実際のダウンバーストがどのような時間と場所で発生するかは予測ができないので、その現象を詳しく調べるには実験室での模擬的な再現実験が欠かせない。しかし、過去の研究においてダウンバースト観察を直接意図した室内実験の例として、A. Alahyari 他⁷⁾あるいは長田他⁸⁾の実験研究があるが、いずれも密度差のある液体を用いている。ダウンバースト模擬としては空気を用いた室内実験が望まれる。

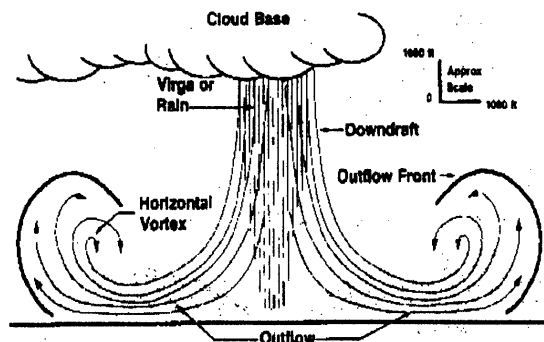


Fig.1 Downburst¹⁾.

* 1 工学研究科航空宇宙学専攻博士課程前期修了
(現在：日産自動車株式会社)
* 2 工学部航空宇宙学科卒業
* 3 工学部航空宇宙学科教授

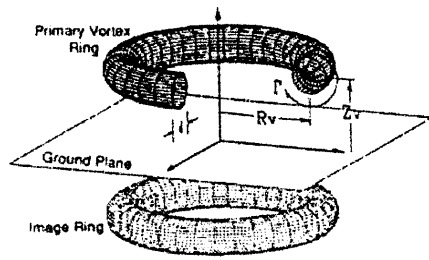


Fig.2 Vortex-Ring model (Primary ring and image ring)³⁾.

そこで,本研究ではその第一ステップとして,ドライアイスのミスト(白煙)を用い,空気との密度差により駆動される下降気流の可視化を行った.この室内実験によりダウンバーストのモデル化に関する情報取得を行った.本論文では,実験により,実際のダウンバーストとの類似性,Vortex-Ringモデルとの類似点および修正を必要とされるべき相違点について定性的な結果が得られたことを報告する.

2. 実験概要

2.1 室内実験

一般に,大気現象は野外の自然現象なので実験室で再現することは困難なことが多いが,部分的には気象現象と似た自然現象を実験室内で発生させそれについての知見から野外の自然現象の理解を深めることは可能である.これを室内実験(laboratory experiment)という⁹⁾.

本研究では,ドライアイス・ミストを用いた室内実験により流れの可視化を行った.

ドライアイスは,温水中(40~50℃が最適)に浸すと激しい昇華作用が生じ,濃度の高いミストが得られる.このミストは炭酸ガスと水滴でできており,無害無臭で,光散乱特性もよい¹⁰⁾.二酸化炭素(気体)の密度は0℃かつ1,013hPa(1atm)の標準状態で1.977kg/m³と空気(1.293 kg/m³)より大きく¹¹⁾,ミストの温度も低いのでダウンバースト現象のような重力によって駆動される流れには最適であると考え本研究ではドライアイス・ミストを用いた.

2.2 実験装置

Fig.3 に実験装置の概要を示す.底面をアクリル板で押さえた円筒に低温・高密度気体としてドライアイス・ミストを入れ,板を取り除くことにより低密度気体(室内空気)中に落下し,下面の水平板に衝突するようになっている.デジタルビデオカメラを用いて,前方,上方または側方から撮影を行った.また,二次元鉛直断面の様子を観察するために,実験装置前方にアクリル板を設置した.

実験手順の詳細を以下に示す.

- (1) 粉砕したドライアイスを150g用意し,水温45℃に設定した水 300gに入れる.この際,発生したドライアイス・ミストを発砲スチロール製の容器に溜める.
- (2) 開始から15秒間は,容器下部に設置したアクリル製の円筒の底を開放しておく.
- (3) 開始から15秒経過したら,アクリル製の板を用いて円筒の底を閉じる.

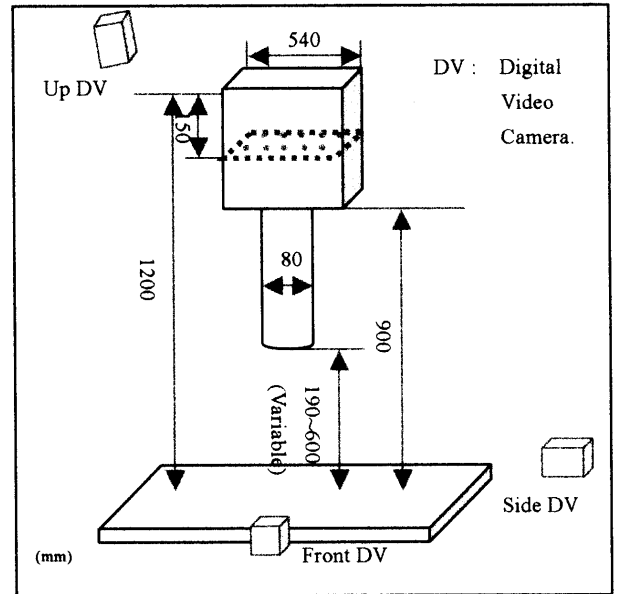


Fig.3 Experimental device.

- (4) その後,10秒間筒の中にドライアイス・ミストを溜めて,アクリル板を引く.
- (5) 開放された円筒の底から,ドライアイス・ミストが流れ落ち,水平板にあたり,周囲に広がってゆく様子を2台(正面・上または正面・横)のデジタルビデオカメラで撮影する.

3. 実験結果

実際のダウンバースト現象との定性的な比較を行った.可視化された流体现象を録画したデジタルビデオデータを静止画像に変換し,下面の水平板に下降流体が衝突する際の2次元鉛直断面の連続写真を作成した(Fig.4参照).実際に1978年,アメリカ合衆国カンザス州で観測されたダウンバーストを(Fig.5参照)に示す.雲底から伸びる流れ,タッチダウン後の渦輪の挙動など,非常に類似した点が多いことがわかる.

なお,本研究では下降気流の地面付近での流れ速度を変更するために雲底高度に対応する円筒下部の高さをパラメータとして実験を行っているが,実験結果に特徴ある違いが見られなかったため,以下,主として高さ0.19mのときの結果を用いて説明する.

3.1 渦輪

Fig.6は,円筒の底の高さ0.19mの時の落下開始直後の写真である.先端は船の錨型をしており,ドップラーレーダー観測により得られた,実現象の状態(Fig.7参照)によく一致していることがわかる.さらに,落下開始からしばらくたった写真(Fig.8参照)では,錨型の先端が連続してとらえられている.これは,円筒からドライアイス・ミストが脈動しながら落下するために起こると考えられる.

このように見ると,タッチダウン以前からドライアイス・ミストの落下にともなって,周囲の空気との摩擦により次々と連続的にリング形状が形成されていると考えることができる.

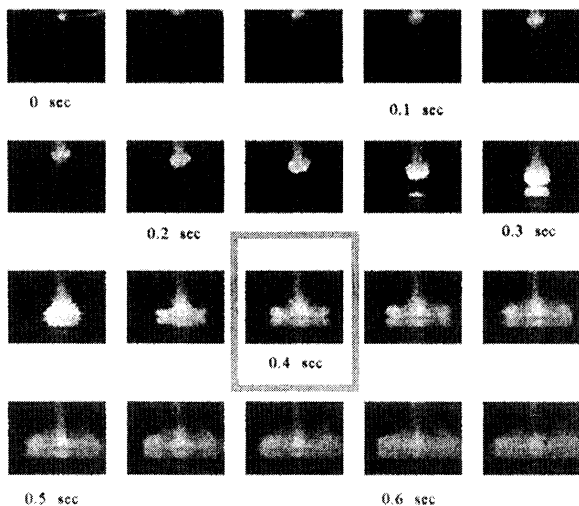


Fig. 4 Serial photos of down-draft (0~0.6sec).

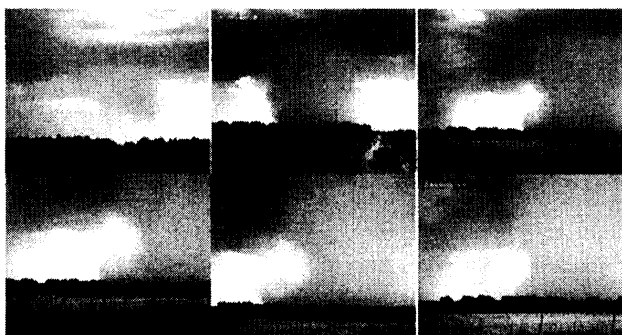


Fig.5 Midsummer wet microburst photographed on 1 July 1978 west of Wichita, Kansas (looking south)¹²⁾.



Fig.6 Tip of anchor type.

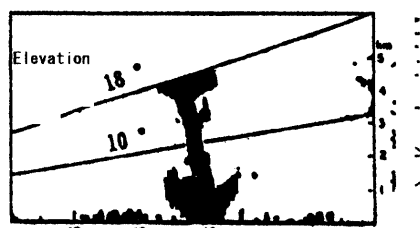


Fig. 7 Downburst by Doppler radar observation at 1982¹³⁾.

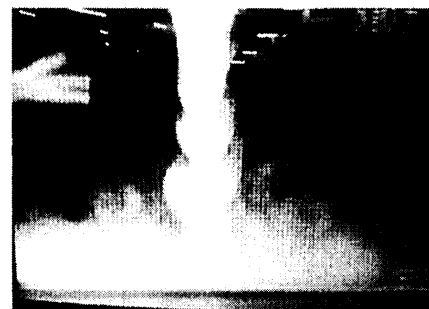


Fig. 8 Tip of continued anchor type.

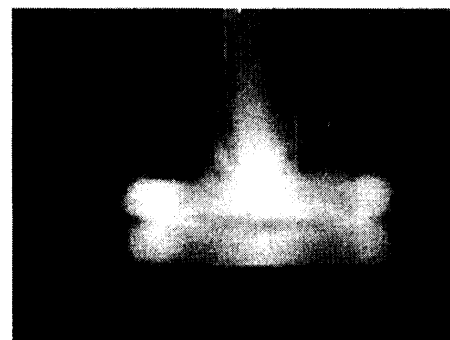


Fig. 9 Snapshot at 0.4sec in Fig. 4.

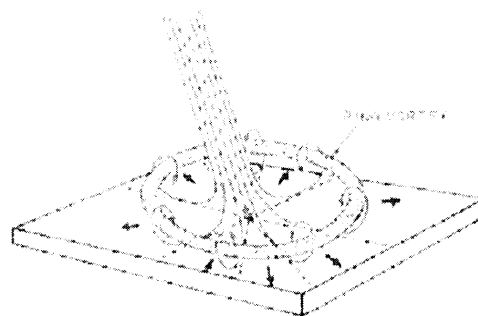


Fig.10 Vortex-Ring model¹⁾.

3.2 渦輪

次に,Vortex-Ring モデルとの類似点・相違点に着目してみたい。Fig.9は円筒の底の高さ 0.19mの時の落下開始から 0.4 秒(タッチダウン直後)の写真である (Fig.4 の静止画より)。(なお、写真中のリングが二重に重なっているように見えるのは、地面に見立てたアクリル板にリングの像が写っているためである。) これをみると、下向きの直線的な流れの中に付随した形で円形の流れが見てとれる。これは、Vortex-Ring モデルの渦輪の部分 (Fig.10 参照) に形状がよく一致している。

3.3 重力流の性質

Fig.11 は円筒の底の高さ 0.19mの時の 10 フレーム (約 0.34 秒) ごとの連続写真である。流れの先端には重力流の性質がかなりはっきりと見て取れる。

また、先端の移動はほぼ等速度運動に近づいていることがわかる。これにより、重力流が広がる際比較的安定した流れを形成していることが推測できる。

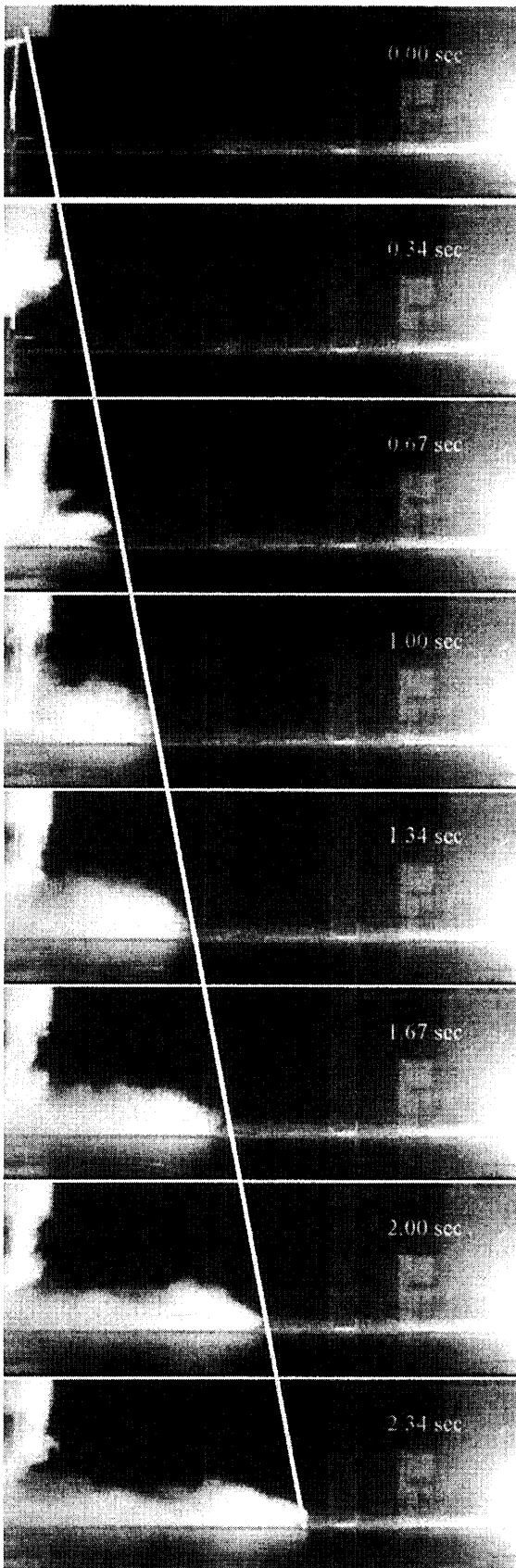


Fig. 11 Serial photos of gravity current nose.



Fig. 12 Gust front photographed in the South Florida¹²⁾.

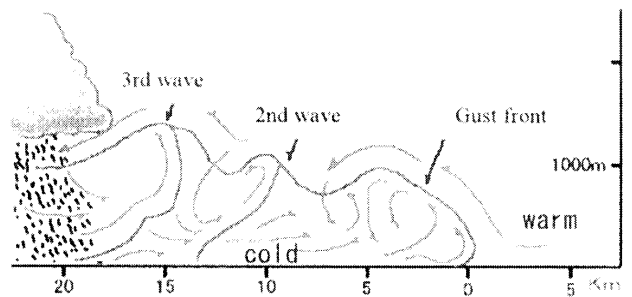


Fig. 13 Outflow of downburst¹⁵⁾.

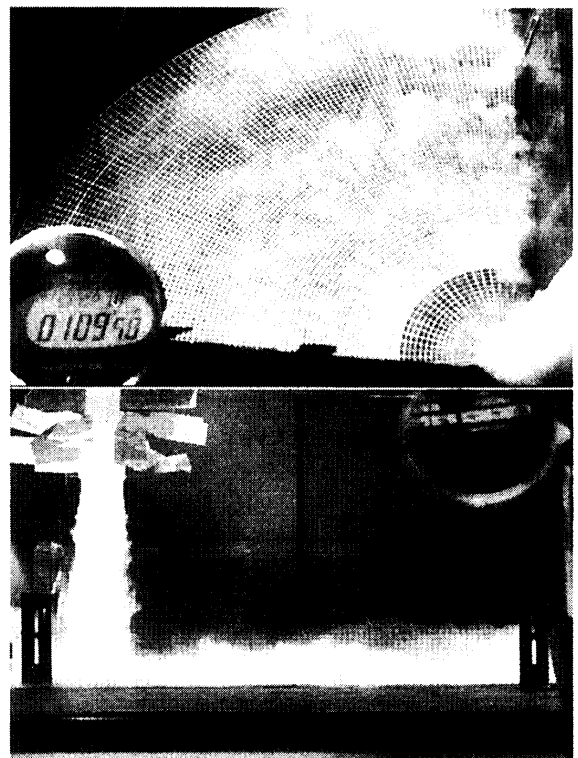


Fig. 14 (Top) View from upside,
(Bottom) View from frontside.

Fig.12 はサウスフロリダで観測されたガストフロントの先端の写真である。本実験で見られた重力流の性質と類似した形状が自然界にも見られた例である。ちなみに、ガストフロントは、雷雨から流れ出して周囲へと広がる冷気の先端で、突風を伴う。大気現象は多重スケール構造を持っており、100km 程度のガストフロントの中に 10km 程度のダウンバーストが含まれていることがある¹²⁾。

3.4 外出流の広がる様子

Fig.13 は外出流が広がってゆく様子の模式図である。広がるにつれて、先端以外にも渦が形成され、第1波、第2波、第3波・・・と続いている。今回の実験結果からもこのような様子が観察された (Fig.14 参照)。これにより、外出流の内部の気流はかなり複雑であることが推測できる。実際のダウンバースト現象の水平発散場においてもこのような流れが存在していることが考えられる。よって、ダウンバーストモデル構築の際には、リングの多重性を考慮する必要があると考えられる。

4. 考察とまとめ

本研究で行った室内実験により、下記のような特徴を定性的に確認することができた。

(1) ダウンバーストの実観測データとの第一の類似点として、下降気流が地表面にタッチダウンする前に早くも渦輪が発生し、それによって気流先端部分が錨型の形状となることが確認された。第二に、タッチダウン後の水平拡散部の先端は実際のダウンバースト先端と同様に重力流に見られる先端形状とよく似ていることが確認された。これらの類似性の確認は本室内実験での気流現象と実際のダウンバースト現象との相似性を定性的に示すもの材料であるといえる。

(2) 渦輪型モデルと一致する気流状態も室内実験において認められたが、この状態の発生時間は下降気流のタッチダウン直後の僅かな時間においてのみであった。このことは実際のダウンバーストにおいても渦輪型モデルに相当する気流状態が現れるのはその一生のうちの一部に過ぎないことを示唆しており、ダウンバーストの気流状態の変化を含むモデルの構築が望まれることを暗示している。

(3) ダウンバーストの渦輪型モデルからの改良する際に考慮に入れるべき現象としてまず、タッチダウン前の下降気流中から渦輪が次々と連続的に発生して、タッチダウン後の水平発散場が多重の渦輪の広がりによって形成されることである。次に、その水平発散場の広がり最終的には減衰するものの、少な

くともタッチダウン直後の水平拡散部先端はほぼ等速度で移動していることが確認された。

以上が本研究で確認された興味深い現象であるが、これらをダウンバーストのモデル化に具体的に反映するには定量的な観測データを得ることが今後の課題となる。その際には、レイノルズ数やフルード数などによって表される流れの相似則についての考察だけでなく、さらにはダウンバースト現象についてのドップラーレーダー観測データとの定量的な比較に基づいて検証を行うことも重要となると考えられる。

参考文献

- 1) Brief Description of Microbursts/Downbursts. Aopa. 16 March 2000, <http://www.nwsjax.noaa.gov/events/windshear.html>
- 2) Proctor, F.H. : Numerical simulation of an isolated microburst. Part I : Dynamics and structure, Journal of Atmospheric Sciences, Vol.45, pp. 3137-3160, 1988
- 3) Ivan, M. : A Ring-Vortex Downburst Model for Flight Simulations, Journal of Aircraft, Vol.23, No.3, pp. 232-236, 1986
- 4) Zhu, S. and Etkin, B.E. : Fluid-Dynamic Model of a Downburst, University of Toronto, UTIAS Rept. 271, April 1983
- 5) Lamb, H. : Hydrodynamics, 6th Ed., Dover Publications, Newyork, 1932, pp.236-237
- 6) Vicroy, D.D. : Assessment of Microburst Model for Downdraft Estimation, Journal of Aircraft, Vol.29, No.6, pp.1043-1048, 1992
- 7) Alahyari, A. and Longmire, K. L. : Dynamic of Experimentally Simulated Microbursts, AIAA Journal, Vol.35, pp.2128-2136, 1995.
- 8) 長田泰一, 益田重明, 小尾晋之介 : 平板に衝突する渦輪の挙動 (平板面内の速度場), 日本機械学会論文集 B 編, 第 66 巻, pp.990-996, 2000.
- 9) 朝倉 正 他 : 新版 気象ハンドブック, 朝倉書店, 1995
- 10) 可視化情報学会 : 可視化技術の手ほどき, 朝倉書店, 1998
- 11) 国立天文台 : 理科年表 2001 平成 13 年, 丸善, 2000
- 12) Caracena, F., Holle, R.L. and Doswell, C.A. : Microbursts A Handbook for Visual Identification, 14 June 2001 <http://www.nssl.noaa.gov/~doswell/microbursts/Handbook.html>
- 13) Fujita, T. T. and Wakimoto, R.M. : JAWS microbursts revealed by triple Doppler radar ,aircraft, and PAM data. Preprints, 13th Conf. On Severe Local Storms, Tulsa, American. Meteorology. Society, pp. 97-100, 1983
- 14) 大野久雄 : 雷雨とメソ気象, 東京堂出版, 2001
- 15) Kobayashi, H. : 滑空飛行 by ParaGlider, 1998 <http://homepage3.nifty.com/hisyou/weather/2weth.htm>