立体写真測量を用いた風の観測法

Development of Wind Observation System Utilizing Stereo Photogrammetry

小泉 俊雄*

Toshio KOIZUMI

Abstract: The objectives of the study are to develop a system to measure the data of wind flow in both the horizontal and vertical directions utilizing stereo photogrammetry, and to establish the methodology for three dimensional measurement on site of wind flow near the ground surface.

This system uses two cigar-shaped kite balloons equipped with a 35mm still camera or four 35mm still cameras set on the ground, which stereophotograph a third balloon released as a tracer, thereby three-dimensionally analysing the third balloon's path of particle.

As the results of the experimental study on the campus of Chiba Institute of Technology and Kamogawa, Chiba, paths of particles of wind flowing over buildings and mountainous regions were successfully observed.

1. はじめに

現地において地表付近の風の流れの様子を面的な3次元で、しかも定量的にとらえることは、風の研究において極めて重要なことである。現地における地表付近の風の観測は風向風速計を用いて行なわれているのが一般的である。このほか発煙筒を用いて観測するといった方法なども時に行なわれている。風向風速計での観測は点における2次元観測であり、発煙筒などの方法は概況を把握するといった事が主なものである。

本研究は風の観測法としての写真測量手法の構築を目標としたものであり、立体写真測量を用いて水平方向と鉛直方向の風の流れを測定するシステムを開発した。この方法は空気と同じ比重にした風船（ノンリフトバルーン）をトレーサーとして風上より放流し、その動きをステレオ撮影し風船の軌跡を3次的に解析するものである。風船の軌跡は流跡線とよばれるものであり、風の流れの指標となる。ステレオ撮影にはカイト気球を用いた空中写真による方法と、地上にてカ

メラを手にとって撮影する地上写真測量による方法を用いた。

千葉工業大学において行なった建物周辺気流の測定と、千葉県鴨川で行なった山間部での気流の測定の実験では、風の面的な3次元観測手法として有効であることが確認された。

気流の流れの解析は、通常は流跡線解析で行われる¹⁾。本研究に関する既往の研究として、現地にてノンリフトバルーンや立体写真測量法で気流を観測した代表的な例として、相馬の富士山の乱気流の観測がある。これは1966年3月5日、英国海外航空会社（BOAC）のB-707型機が、富士山風下の御殿場上空において突然破壊し、乗客乗員合わせて124名が死亡するという事故があり、この原因を解明するために行われたものである。観測方法は、パラシュートに吊るされたフラッシュ筒を測量用カメラ（ウィルド P-30）による立体写真測量法によって撮影し、それから気流を求める方法と、富士山頂からノンリフトバルーンを飛ばし、それをトラッキングレーダーで追跡して気流を求める方法である。ここで使用されたノンリフトバルーンはレーダー電波の反射効率を高めるためにポリエステル膜の表面にアルミニウムコーティングされた直径80cmの球形気球であり、トラッキングレーダーは迫撃砲弾を

* 千葉工業大学土木工学科

「写真測量とリモートセンシング」Vol. 33, No. 3, 1994

索敵するレーダーで、自衛隊の協力の基で行われた。フラッシュ筒と立体写真測量法による方法は富士山風下の広範囲における風を一挙に観測する事が出来、無浮力気球の方法は飛ばし経路における気流の細かい挙動、つまり乱気流を求める事が出来た。この研究は風洞実験とも合わせて5年間にわたり行われ、富士山風下の乱気流の実体を明らかにした²⁾。D.H. PackらはLos Angeles Basinの水面近くの気流の流れをテトロン製のノンリフトバルーンを用いて観測した。バルーンの位置はレーダーおよびトランスポンダを用い、平面的に約100キロ四方について観測した³⁾。太田正治らは高度200mから900mを対象に、ノンリフトバルーンとしてのスーパープレッシア気球(定容積気球)の性能テストの結果をビニール製のものと比較し、スーパープレッシア気球が拡散研究に有効である事を述べている⁴⁾。

ノンリフトバルーンではないが気球を用いた風の観測として、気象庁でのラジオゾンデの観測は一般的である。伊藤らはパイロットバルーンによって得られた上層の風向、風速の調査結果と、地上の大気汚染常時測定局の風向、風速のデーターを基にし、東京湾沿岸の海陸風の動態を推定した。パイロットバルーンの位置は測風経緯度儀(セオドライト)にて行われた⁵⁾。若松伸司らは地上における風と汚染物質濃度の観測局、パイロットバルーンによる風の観測、測定機器搭載の航空機による観測を組み合わせた観測システムを開発し、関東地方の光化学スモッグの生成機構を解明するための研究を行った⁶⁾。西村純はその著書の中で気球を用いた多くの観測例を述べている⁷⁾。

トレーサースガスを放流し気流を調べる方法も多く行われている。宇田川満らは、東京湾周辺の汚染物質の移流のメカニズムを解明するために、トレーサースガス(六フッ化イオウ、フロン13B1)を放流し解析した⁸⁾。岡本真一らは、複雑地形上における煙の拡散に影響を及ぼす気象条件を把握するために、栃木地区において、パイロットバルーン、低層ゾンデなどによる気象観測及びエアートレーサー拡散実験を実施した。この結果より、山谷風の発生時などの風速と気温の鉛直分布、山風中でのトレーサースの拡散幅などを検討した⁹⁾。

石崎健二は、2地点より非測定用の35mmカメラを用いて、煙突から出た煙の三次元的運動を測定し、その有効性を検討するとともに、煙塊の運動について検討した。この方法の写真測量というよりは写真を

用いた測定の分野に属するものである⁹⁾。

この他トレーサー法によって風の流跡線を求める方法にはいくつかのものがある^{10),11)}。

風の流れの場を研究するには現地観測のみでなく、風洞実験、数値解析といった方法があるが、佐藤浩らはその論文の中で現地において立体的な気流場を観測する事は実際上の問題として難しく、また、観測が可能だとしてもかなり労力を要し時間もかかる。いきおい風洞実験や数値実験で行わざるを得ない状況にある。風洞実験は相似律の面、数値実験は多くの仮定が入るなど問題が多いと述べている¹²⁾。簡素化された現地観測システムが必要であることが分かる。

上述のように、既往の研究として多くのものがあるが、これらの研究を概観するに、かなり大がかりな観測である事、またラジオゾンデ、パイロットバルーンによる方法は風を立体的な面で一挙に観測する事は難しく、トレーサースガスによる方法も気流の細かい挙動の観測は困難である。煙による方法は手軽ではあるが、煙の濃度が観測精度に大きく影響するほか、煙が途中で見えなくなるなど流跡線を描くには問題が多い。本研究は局所地域の地表付近の風の流跡線観測に限定して、写真測量とノンリフトバルーンを用いる事により、簡単にしかも立体的な面で風を一挙に観測する事が出来、気流の細かい挙動も観測できる方法を目指したものである。

2. 空中写真測量を用いた観測法

(1)観測システム

本方法は35ミリスティルカメラを搭載した2個のカイト気球を用いて行なうものである。

本システムは図2-1に示すように、観測地域上空にモニター用のV.T.Rカメラと、撮影用のスティルカメラを搭載した2個の係留気球をある距離離して飛ばさせる。そして、観測地域の風上から大気と同じ比重にした風船を放流し、その流れる様子を一定時間ごとに上空の2台のスティルカメラで同時に撮影し、ステレオ写真として解析するものである。その結果風船の3次元的な流跡線図が得られる。図2-2に撮影から流跡線図を得るまでのフローを示し、図2-3にシステムの装置を示す。

カイト気球による空中写真撮影装置は、著者が以前より測量調査の目的で開発を進めてきたものである

が^{(13),(14)}、今回この装置を風の観測用（移動物体のステレオ撮影）のために次の点を重点に改良を加えた。すなわち、(i) 2 台同時にシャッターが切れること。(ii) カメラの方向制御のしやすさ、(iii) カメラを搭載している空中プラットホームが、強風により撮影に不利な動きやトラブルが発生しないための強風安定性の向上。

その結果、(i) の同時シャッターについては、図2-4の送受信システム図に示すように、シャッター制御用を別回線として独立させた。すなわち一つの送信機（ここでは 2 号機操作用の送信機）のシャッター用のレバーを操作すると、その信号が送信されて双方の受信機に同時に受信され、シャッター用のサーボが作動して 2 台同時にシャッターが切れるようにした。

タイムラグの減少については、バッテリーのロスを抑えるために、シャッター専用のバッテリーを付けた。またシャッター用サーボの回転角度をできるだけ小さくし、しかも回転速度（作動速度）の速いフタバ社製 S9601 型サーボを使用した。これにより、2 台のシャッターのタイムラグを 1/24 秒以内にすることができた。

この 1/24 秒のタイムラグが測定精度にどの程度影響をおよぼすかを考察する。風速をカイト気球の飛揚制限である 6 m/s とすると、放流された風船が完全に水平移動したとして、1/24 秒間に風船は水平距離で 25cm 移動することになる。解析に用いた六つ切り写真上での縮尺は約 1/1000 であるから、25cm の移動距離は写真上に 0.25mm の誤差として現れる。この 0.25mm を写真座標の測定誤差として考えて、地上写真の水平方向の位置 (X, Y) と鉛直方向の位置 (Z) の誤差は次の

式で計算する。

$$\sigma_x = \sigma_y = \frac{H}{f} \sigma_p$$

$$\sigma_z = \frac{H}{f} \frac{H}{B} \sigma_p$$

ここで f：カメラの画面距離

H：撮影距離

B：撮影基線長

σ_x, σ_y ：水平方向の誤差

σ_z ：鉛直方向の誤差

σ_p ：写真座標の測定誤差

計算の結果、 $\sigma_x = \sigma_y = \sigma_z = 25\text{cm}$ となり十分観測に耐えうるものであることが分かる。

どの位タイムラグがあるかについては次の実験を行って確認した。すなわち、パソコンのモニター上に 1～1000 までの数字を順次出力するプログラムを作成し、このモニターの前に気球に搭載するスティルカメラを 2 台設置し、製作した同時シャッター制御装置を用いて 36 枚連続写真撮影を行なった。その結果、2 台のカメラで撮影された写真上でのモニターの数字のズレは、最大 3 であった。ここでパソコンのモニターが 1 を出力してから 1000 を出力し終わるまでの時間を、ストップウォッチで計測した結果 13.8 秒であったので、 $(13.8/1000) \times 3$ で計算すると 0.0414 秒 (1/24.15 秒) となる。このことよりシャッターのタイムラグの最大を 1/24 秒とした。なお本タイムラグ計測の実験にあたっては、実際の使用時の電池の消耗を考え、フィルム 2 本分 (72 枚) のシャッターを切った後の状態の

図2-1 空中写真測定法のシステムの概要

図2-2 写真測量法による流跡線観測のフロー

電池を使用した。

(ii)のカメラの方向制御については、スティルカメラと V.T.R カメラの一体化およびカメラの回転制御範囲の拡大を計り（水平回転360°以上、鉛直回転±90°以上）、下半球全域にすばやくカメラを向けることができるようにした。

(iii)の強風安定性については、カメラの入っている空中プラットフォームを、流線型により近いものに変え、また、尾翼をプラットフォームの重心からできるだけ離れた位置に付けるなどの改良を行った。

これらにより気球が風により撮影中に多少移動しても問題なく撮影が可能になった。

撮影・解析装置の仕様を表2-1に示す。なお、本研究に用いた気球は地上風速が8 m/s以上になると安定性がなくなり、また係留索の破断も予想されるため地上風速が0 m/sから5～6 m/s程度までが適当と考えられる。

(2)建物周辺気流の流跡線測定への適用

本システムを建物を越える風の流跡線の測定に適用させた。

表2-1 撮影・解析装置の仕様

(a) カイト気球	
形 状	飛行船形（流線型）
材 質	ポリウレタン
大 き さ	7m ² （長さ6.6m，最大直径1.8m） 4.25m ³ （長さ5.2m，最大直径1.5m）
	ヘリウムガス：7m ³ ，4.25m ³
搭載重量	5.0kg，3.0kg
上昇高度	800m
支持方式	ひも（2本支持，ケルビンひも）
(b) スティルカメラ	
形 式	35ミリ自動巻き（オリンパス OM-1，キャノン T70）
重 量	1.5kg（OM-1），0.7kg（T70）
シャッター	無線操作
2個のカメラのシャッターのタイムラグ：0.04秒以下	
焦点距離：28ミリ	
フィルム：カラーフィルム	
(c) モニターおよび V.T.R カメラ	
V.T.R カメラ	ペンタックス PC-K1200（カラー） 890g
ソニー CCD（白黒）	400g
レミッター	ST84U 220g
送信方式：無線（UHF）	
送信距離：1000m	
バッテリー	800mA 320g
八木アンテナ	
ブースター	
モニターテレビおよび録画装置	
(d) 姿勢制御装置	
制御方式：サーボ2個を用いた無線操作	
回転範囲：水平角360度，鉛直角0～±90度（水平10度，鉛直5度ずつ制御可能）	
制御範囲：約1000m	
(e) 解析装置	
デジタイザー：分解能 0.025mm	
パソコン：NEC9801VX	

①実験

実験は図2-5に示す千葉工業大学芝園校地において、建物周辺気流の流跡線の測定を行なった。芝園校地は約520m×240mの敷地である。校内は平坦であるが、図2-5の*部分に、高さ3.5m程の築山がある。

撮影は2個の気球を約200m離して、4号館と7号館の上空200mほどに係留し、2号館、3号館、5号館、7号館、築山を見る形で撮影を行なった。

実験の対象区域は図2-6に示すように3号館、5号館および築山を結ぶルートとして行った。

トレーサーとして放流する風船は、写真判読に必要な大きさを有すること、判別に有利な色が数種そろっていること、また、風船の中につめるヘリウムガスが漏れにくい事などの条件が必要である。今回はこれらの条件のうち一つの風船で写真判読に必要な大きさのものが得られなかったため、やむを得ず直径約50cm

(a) カイト気球

(b) 35ミリスティルカメラと VTR カメラおよび姿勢制御装置

(c) モニターと地上受信システム

(d) 写真解析装置

図2-3 空中写真撮影・解析システム

のものを3個組み合わせて1組として使用し、6mのポールに上から1mおきに4組風船を取り付けいっせいに放流した。通常、浮子による流速観測などでは複数個投入し、そのばらつき値から流れの場の流速値等の代表性を評価するが本実験ではそのようなことはせずに、1組ごとの風船を気流の代表値とした。

撮影時の風速は、図2-5の*印の場所に立てた地上高6mの鉄塔に風向風速計を設置し測定した。

風船の放流時における風向、風速を表2-2に示す。第1回目の放流は図2-6に示す築山から行い、第2回目の

放流は2号館と3号館の間の中庭より放流した。第3回目は5号館屋上よりおこなった。なお第3回目は、ポールを用いずに風船を手を持った状態で放流した。撮影は1回目30枚、2回目33枚、3回目27枚撮影した。

解析は撮影された写真を六切りサイズ(16.5cm×24.5cm)に引き延ばし、デジタイザーとパソコンを用いて風船の座標を算出した。算出には(株)日本写真測量学会の「一般カメラによる3次元座標計測プログラムPGMAN」を用いた。内部標定にあたっては、主点の位置のずれおよび画面距離のみの要素を考慮し、レン

送受信システム図

図2-4 送受信システム図

図2-5 実験現場

ここで (x_p, y_p) : 写真中心と主点のずれ

f : 画面距離

(x, y) : 写真中心を原点とする指標座標

(X_0, Y_0, Z_0) : 投影中心

(X, Y, Z) : 対称物の地上座標

$\{a_{ij}\}$: 回転行列

$$\begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\omega & -\sin\omega \\ 0 & \sin\omega & \cos\omega \end{pmatrix}$$

$$\begin{pmatrix} \cos\varphi & 0 & \sin\varphi \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin\varphi & 0 & \cos\varphi \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cos\kappa & -\sin\kappa & 0 \\ \sin\kappa & \cos\kappa & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

ω : X 軸まわりの回転

φ : Y 軸まわりの回転

κ : Z 軸まわりの回転

上式において未知変量は (X_0, Y_0, Z_0) , $(\omega, \varphi, \kappa)$ の 6 つの外部標定要素のほかに, (x_p, y_p, f) の 3 つの内部標

ズディストーション, フィルム平面度, フィルムの伸縮, デジタイザーの歪, 大気屈折の補正は行わなかった。用いられた基本式は以下のとおりである^{15), 16)}。

$$x = -f \frac{a_{11}(X-X_0) + a_{12}(Y-Y_0) + a_{13}(Z-Z_0)}{a_{31}(X-X_0) + a_{32}(Y-Y_0) + a_{33}(Z-Z_0)} + x_p$$

$$y = -f \frac{a_{21}(X-X_0) + a_{22}(Y-Y_0) + a_{23}(Z-Z_0)}{a_{31}(X-X_0) + a_{32}(Y-Y_0) + a_{33}(Z-Z_0)} + y_p$$

図2-6 風船の放流ルート

表2-2 撮影時の風向，風速

実 験	風 向	風 速 (m/s)
1	SW	2.1
2	ENE	3.7
3	NNE (10分前)	3.3 (10分前)

定要素である。

なお、風船の座標測定精度がどの程度であるかの目安とするために、地上に設置した座標値が既知の対空標識（基準点）を写真上より計測し比較した。その結果を表2-3に示す。これによると写真上より計測した座標値と既知の座標値（地上測量によって定められた座標値）との差，すなわち誤差は水平方向で $\pm 18.5\text{cm}$ ，鉛直方向で $\pm 24.34\text{cm}$ となった。この程度の誤差は本研究においては問題ないと考えられる。

(2)実験結果

①実験 1 について

解析の結果得られた風船の流跡線図を図2-7に示す。これは1秒毎に撮影し解析したものである。図2-7の(a)

図は鉛直方向移動経路図であり、縦軸を高さ、横軸を水平距離としている。(b)図は水平方向移動経路図でX, Y座標を表したものである。これらの図は両軸の縮尺が異っているので注意されたい。

これによると風船の最低移動速度は 0.4m/s で、その位置は校舎の手前地上高 5.5m のところである。最高速度は 6.5m/s で、その位置は校舎（5号館）の風上側軒の上 3m ，地上高 16.5m のところであることが分かる。

②実験 2 について

解析結果を図2-8に示す。放流地点は風向に対して高さ 12.5m の3号館の背面にあたる。放流時の風は東北東の風 3.7m/s である。放流された風船のうち、地上付近より放流されたものは地上付近にどんでしまう。地上高さ 3m より放流された△印の風船は、放流後すぐに上昇するが、5号館手前で下降した後、再び上昇し5号館を越えて、その後は水平に流れる。5号館の風上側軒の上では△印の間隔が大きくなっており、かつ盛り上がりを示している。このことは軒部の剥離流によるものと考えられる。□印の風船は鉛直方向の動

表2-3 写真の解析精度 [cm]

	基準点番号	dx	dy	dxy	dz
実験 1	3001	20.8	4.9	21.37	36.0
	3005	24.5	2.4	24.62	39.7
	3011	6.7	7.8	10.28	4.0
	3021	3.1	12.5	12.88	37.0
	3031	8.3	21.6	23.14	9.6
標準偏差				±21.38	±32.97
実験 2	3001	3.7	5.4	6.55	9.5
	3005	1.6	12.0	12.11	19.2
	3011	8.0	6.9	10.56	21.6
	3021	10.1	7.3	12.46	2.5
	3031	16.0	21.4	26.72	9.6
標準偏差				±17.10	±16.00
実験 3	3001	3.2	14.4	14.75	6.2
	3005	0.8	23.0	23.01	23.3
	3011	9.3	2.0	9.51	25.4
	3021	4.5	21.4	21.87	25.9
	3031	20.2	5.1	20.83	32.0
標準偏差				±20.91	±27.02
全体の標準偏差				±18.50	±24.34

計算式 水平方向 X の誤差 $dx = |X-x|$
Y の誤差 $dy = |Y-y|$
XY の誤差 $dxy = (dx)^2 + (dy)^2$
高さ方向 Z の誤差 $dz = |Z-z|$

水平方向の誤差の標準偏差 $= \pm \sqrt{\frac{\sum (dxy)^2}{N-1}}$

鉛直方向の誤差の標準偏差 $= \pm \sqrt{\frac{\sum (dz)^2}{N-1}}$

X, Y, Z: 地上測量値

x, y, z: 写真より測定した値

N: 基準点の数

きはほぼ△印の風船と同じであるが、図2-8(b)によると5号館手前で△印の風船とは違った方向へそれ、その後上昇し5号館の上を抜ける。地上高4mより放流された+印の風船は5号館手前で下降することなく建物を越えるが、大きな振幅を持つ状態で建物を越えている。なお、図中の流跡線図に於て、線で結んでいないところは、風船の判読が不可能であったところである。

③実験3について

解析結果を図2-9に示す。このときの風は北の風4m/s程度と推定される。この図より放流後5号館中庭に流下した△印の風船が再び上昇し、建物を出たところで今度は勢いよく上昇しているのが目立つ。しかしながら、他の風船は大きく波を打つ格好で5号館上空をぬける。◇印の風船は5号館の風下直後でいったん下降し地表に沿って流れる。

図2-7 流跡線図 (実験1)

図2-8 流跡線図 (実験2)

図2-9 流跡線図 (実験3)

3. 地上写真測量を用いた観測法

(1) 観測システム

本方法は地上にてカメラを手にとって撮影する方法である。本システムは図3-1に示すように、観測地域周辺の地上に4台のスティルカメラをある距離離して設置する。これらをインターバロメーターにつなぎ、一定時間ごとに同時シャッターが切れるようにする。観測地域の風上から空気と同じ比重の風船を放流し、その流れる様子を一定時間ごとに4台のスティルカメラで追跡し同時に撮影する。撮影された写真をステレオ写真として解析し風船の3次元座標を求めるものである。

図3-1 地上写真測定法のシステムの概要

表3-1 撮影・解析装置の仕様

- (a) 写真撮影器材
カメラ：35ミリ一眼レフカメラ・モータードライブ内蔵
型 ニコン F-801
レンズ：28mm f2.8 (トキナー社製)
シャッター：インターバロメーター使用によるリリースでの作動
フィルム：Fujicolor Super G ASA100
- (b) インターバロメーター
形式：ニコン MT-2
遠隔操作：リモートコントロールコードとスイッチにより離れた所から電源のON/OFFが可能
- (c) デジタイザー
形式：SUMMAGRID (武藤工業株式会社製)
分解能：0.025mm
- (d) コンピュータ：NEC PC9801VX

図3-2 使用したカメラとインターバロメーター

る。ここで、4台のカメラを用いたのは、風船の流れをより広い範囲でステレオ写真撮影を行うためである。撮影器材の仕様を表3-1に示し、使用したカメラとインターバロメータを図3-2に示す。

(2) 山間部での気流の流跡線測定への適用

① 実験

1990年12月、千葉県鴨川市に竜巻が発生し多くの被害が生じた。この竜巻の発生地点は、図3-3に示す鴨川と和田町の境の山間部である。竜巻のルートは地形に影響されて谷間を通過した。実験は竜巻のルートを知るための資料収集の一環としても行われた。実験を行った地域は東西に延びる谷と北西に延びる谷の交差しているところで、特に東西方向の谷は西側に標高129mの峠があり、風の流れに地形が大きく影響する場所と推定される。撮影は図3-4に示すように観測地域周辺の地上に、三脚を使用せず手に持った4台の35mm小型スティルカメラをある距離離して配置し風上から放流した風船を追跡し同時に撮影した。撮影間隔は風船放流後8秒おきとした。

標定点については、観測地域が広範囲にわたるため、観測地付近の電柱などを標定点として利用した。しかしそれだけでは標定点が偏ってしまうため測量用の

1:25,000

凡例

風向: WSW

風速: 2.46m/s

● 風向風速

観測地点

→ 風船のルート

図3-3 実験地と実験結果

図3-4 撮影条件

図3-5 解析に用いた写真
撮影地点: カメラ3

(注) 矢印は解析に用いた風船の位置を示すだけのもの
右端の4個重なっている風船は解析対象外

図3-6 解析に用いた写真
撮影地点: カメラ4

(注) 矢印は解析に用いた風船の位置を示すだけのもの
右端の4個重なっている風船は解析対象外

の色は赤, 青, ピンク, 緑, オレンジの5種類である。風船は手に持っていっせいに放流した。解析は撮影した写真をサービス版 (11.9cm×8.3cm) に引き伸ばし, デジタイザーとパソコンを用いて風船の座標を算出した。使用した写真は放流後32秒後, 1分12秒後, 1分52秒後, 2分32秒後, 3分12秒後のものである。図3-5, 図3-6に風船放流32秒後の解析に用いた写真を示す。

②実験結果

解析の結果得られた風船の流跡線に関して図3-7に水平方向移動経路図(X-Y面)を, 図3-8に鉛直方向移動経路図(X-Z面)を, 図3-9に鉛直方向移動経路図(Y-Z面)を示す。図3-3の流跡線図は図3-7の結果を地形図にプロットしたものである。これによると放流された風船が西南西の風によって谷筋に沿って流れている

ポールを用いて新たに標定点を設置した。トレーサーとしての風船はすべて直径40cmの球形である。風船

ことがわかる。このルートは竜巻の通過ルートとほぼ一致するルートである。

4. 風船の追従性について

本論文では空気と同じ比重の風船（ノンリフトバルーン）をトレーサーとして放流し気流の流れを測定したが、この風船がどの程度気流の動きに追従しているかの問題がある。桑名は高層風観測気球の追従性について流体力学の理論の面より検討している¹⁷⁾。ここで述べられている内容が地表風にそのまま適用されるとは言い難いが、高層風のみに適応されるだけの内容ではなく、地表風にも適応可能と考えられるので、この論文を基に検討してみる。

風船の運動方程式を立てる際の仮定として、風船の形状は球とし、懸垂物についてはその質量だけを考慮する。気球に対する空気の抵抗は、気球の空気に対する相対速度の自乗に比例する。気球は一定の風速 v_0 の気流に流されれるとする。

運動方程式を(1)式のように立てる。

$$M' \frac{dv}{dt} = k(v_0 - v)^2 \dots\dots\dots(1)$$

ただし $v_0 > v > 0$

ここで

M' ：風船系の仮想質量

v ：風船の速度

t ：時間

k ：速度 v の風船の受ける空気抵抗と風速との関係式の比例常数。

v_0 ：風速

図3-7 流跡線図（水平方向移動経路図，X-Y 面）

図3-8 流跡線図（鉛直方向移動経路図，X-Z 面）

図3-9 流跡線図（鉛直方向移動経路図，Y-Z 面）

この運動方程式を $t = 0$ で $v = 0$ として解くと(2)式になる。

$$v = v_0 - \frac{1}{\frac{1}{v_0} + \frac{k}{M'}t} \quad \dots\dots\dots(2)$$

次に風船を一定の風速 v_0 の気流中に放した場合の風船の速度について風船の追隨の遅れ時間（追隨性）を求めるため $v = nv_0$ （ただし $1 > n > 0$ ）になる時間を τ_n とすれば(2)式により

$$nv_0 = v_0 - \frac{1}{\frac{1}{v_0} + \frac{k}{M'}\tau_n}$$

これより τ_n を求めると(3)式となる。

$$\tau_n = \frac{n}{1-n} \frac{M'}{kv_0} \quad \dots\dots\dots(3)$$

τ_n は任意の n を取ったときの遅れ時間である。

ここで $n = 0.5$ とした $\tau_{0.5}$ を求めると(4)式となる。

$$\tau_{0.5} = \frac{M'}{kv_0} \quad \dots\dots\dots(4)$$

(4)式をもとに本論文において風速に対して 5 割に追隨するまでの時間を，第 2 章のビル風の実験および第 3 章の山間部での実験で概算するとそれぞれ 1.3 秒，0.3 秒となる。

(3)式，(4)式から分かるように，遅れ時間は風船が小さいほど，また風速が大きいくほど小さくなる。

風船やその他のトレーサーについての追隨性については，このほかいくつかの論文の中にも触れられているが理論的，実験的に検討したものは少ない。それらの論文^{1), 11), 18)~23)}や他の研究者の話より，この問題は厳

密に考えた場合には多くの問題があり，未だ十分には解決されていないのが現状である。しかしながらトレーサー法は広く一般的に使用されており有効な方法である。この方法により今まで分からなかった事が分かるようになる。追隨性については更なる研究が必要である。

5. 結 論

本研究の結果次の結論を得た。

- (1) 本方法は現地において気流の流跡線を従来のものに比べ簡単に，しかも立体的な面で一挙に細かい挙動まで観測できることが実験により確かめられた。風船の追隨性に関しては十分に解明できなかったが，今まで困難であった流跡線測定を簡素化した意義は大きいと考える。
- (2) 定性的観測とともに，定量的に観測できる方法として有効であることが明らかになった。
- (3) 空中写真による方法は視野が広く，広い範囲の観測に有効である。地上写真による方法は視野は狭くなるが，手軽で装置や費用も少なく，気球による空中写真撮影の困難な足場の悪い場所や強風時での観測には有効である。空中写真測量と地上写真測量の双方の特徴を生かしての風の観測システムが構築された。
- (4) ビル風や山間部での風の観測といった小地域での観測に有効であることが明らかになった。
- (5) 観測精度についても十分な結果が得られた。
- (6) 今後の課題として①カイト気球を用いる方法は，風速 6 m/s 以下という制限がある。これは風の観測シス

テムとして大きな問題点である。強風時には風を用いる等の方法が必要であろう。また、ステレオ写真による方法はトレーサーの追跡の容易さに問題点もある。単写真を用いての方法の開発も必要である。②風船の追従性については放流後1秒たらずで風速の約5割に達する事が推定されたが、この問題は今後更なる検討が必要である。

6. 謝 辞

本研究は千葉工業大学建築学科の羽倉弘人教授、同土木工学科の足立一郎教授の多大な御協力のもとで行ったものであり、ここに心より厚く御礼申し上げます。

相馬清二氏には富士山風下の乱気流の研究に関し、また桑名十郎氏には風船の追従性について論文の提供と有益な御教示をいただきました。ここに心から感謝の意を表します。

(受付1993.11.26, 受理1994.5.20)

参 考 文 献

- 1) 宇田川 満ほか：東京湾周辺における気流・汚染物質調査—トレーサー実験—, 東京都公害研究所年報, 1985年.
- 2) 相馬清二：富士山風下における乱気流の研究, 科学技術庁特別研究促進調整費並びに気象研究所特別研究費による研究, 1988年.
- 3) D.H. Pack and J.K. Angell: Preliminary Study of Air Trajectories in the Los Angeles Basin as Derived from Tetroon Flights, Monthly Weather Review, 1963.
- 4) 太田正治ほか：スーパープレッシア気球の拡散研究への応用, 天気, 16(1), 1969年.
- 5) 伊藤政志ほか：東京湾周辺における気流・汚染物質調査—風の立体構造—, 東京都公害研究所年報, 1985年.
- 6) 若松伸司ほか：航空機を用いた汚染気塊のラグランジュ的観測, 国立公害研究所研究報告, 第61号, 1984年.
- 7) 西村純：気球をとばす, 岩波書店, 1975年.
- 8) 岡本真一ほか：複雑地形上におけるエアトレーサー拡散実験と山谷風の観測, 天気, 31.5, 1984年.
- 9) 石崎健二：煙突から出た煙の三次元的運動の二点写真法による観測, 天気, 30.12, 1983年.
- 10) 坂上治郎：流れの可視化法, 気象研究ノート, 第124号, 1975年.
- 11) 流れの可視化学会：新版流れの可視化ハンドブック, 朝倉書店, 1986年.
- 12) 佐藤浩ほか：富士山周辺の流れの風洞実験, 気象研究ノート, No.118, 1974年.
- 13) 村井俊治, 奥田勉, 小泉俊雄, 榎本歳勝：カイト気球を用いた空中写真測量とリモートセンシング, 写真測量とリモートセンシング, Vol.21, No.2, 1982年.
- 14) 小泉俊雄, 村井俊治, 小池俊雄, 真鍋弘道：カイト気球を用いた空中写真撮影システムとその応用, 写真測量とリモートセンシング, Vol.25, No.2, 1986年.
- 15) 村井俊治ほか：非測定用カメラを用いた解析的写真測量に関する研究, 東京大学生産技術研究所報告, Vol.129, No.6 (No.191), 1982年.
- 16) 日本写真測量学会：解析写真測量(改訂版), 1989年.
- 17) 桑名十郎：高層風観測気球の追従性について, 技術時報 No.57, 札幌管区气象台, 1967年.
- 18) 伊勢貞夫：ラジオゾンデ用気球の放球に関する一考察, 研究時報29巻, 札幌管区气象台, 1977年.
- 19) 角俊治：気球の上昇速度について, 高層气象台彙報, 第6巻, 第2号.
- 20) 今井一郎：気球の上昇速度について, 気象集誌, Vol.32, 1957年.
- 21) 気象庁：高層気象観測指針, 1973年.
- 22) 相馬清二：富士山風下の乱気流, 富士山
- 23) 早川満ほか：光化学オキシダント高濃度汚染日の流跡線解析, 東京都公害研究所年報, 1982年.