

風船の飛行調査が示したもの*

後藤 隆雄**

1. はじめに

近年地球規模の大気汚染として広域な酸性雨被害等が社会問題化している(佐々木ほか, 1986). 特に環境機器分析技術の進歩の結果, 中国からの飛来と思われる硫酸酸化物等が同位体分析等を用いて解明され(向井ほか, 1999), 日本への影響評価も行われ始めている. また日本においても高度経済成長期以降火力発電所等の高煙突化が行われ, 近年赤城山や南アルプス乗鞍岳等での酸性雨被害が明確になり始めている.

近年環境アセスメントの実施に当たっては拡散計算による結果だけでなく, 風洞実験によって裏付けを行う手法(森口ほか, 1990)が行われてきているが, 必ずしも十分とは言えないように思う.

我々は, 神戸市東部の六甲アイランドに隣接する地域での70万KWのボイラー2機の石炭火力発電所計画に対して市民の立場からの環境アセスメントの必要性が訴えられたのを契機として, 以下の3つの調査を行った. 1つ目は計画発電所から半径4kmの14地点でカプセルを用いた二酸化窒素調査を毎日一年間市民協力のもとで実施した(後藤, 1998). また第2段としては, 夏期, 秋期, 冬期でのヒートアイランド調査を実施した(後藤, 1999).

第3段として行ったのが, ここに紹介する風船による飛行調査である. 風船の大気拡散・移流が実際の火力発電所排煙の移流や拡散と完全に一致するとは期待できないが, 少なくとも風船による飛行調査結果が汚染物質の移流や拡散の傾向を見るユニークなデータとなることは間違いないと思われる.

2. 調査の概要と調査当日の気象条件

2.1 調査の概要

放球地点は, 上述した石炭火力発電所建設予定下にある現煙突(建設時には150m)から西方へ200mの公園用地であった. 当地は南面を大阪湾に面し, 北側背後の約5kmには六甲山(標高932m)系が位置している. 放球は47リットル用ヘリウムボンベを持ち込み, 子供用玩具の12インチゴム風船にヘリウムガスを充填した. この風船の質量や引っ張り強度のばらつきは20%以下である. 風船の下に“落下地点での場所と特徴, 風船を発見した時間帯等”を記入する返信用の葉書をビニール袋に入れて取り付けた. なおゴム風船は3か月で土に還元する天然ゴム製とした. 持参した風船は150個であったが, 操作時に破損したものを, さらに充填開始から放球時刻(11時35分)までの25分間に縮んでしまったもの等を除くと実際に放球できた風船は約130個であった. 風船の大きさの80%は規定の大きさ12インチ(直径約30cm)で, 他は一般的にそれよりも直径にして約20%小さいものであった.

2.2 調査当日の気象条件

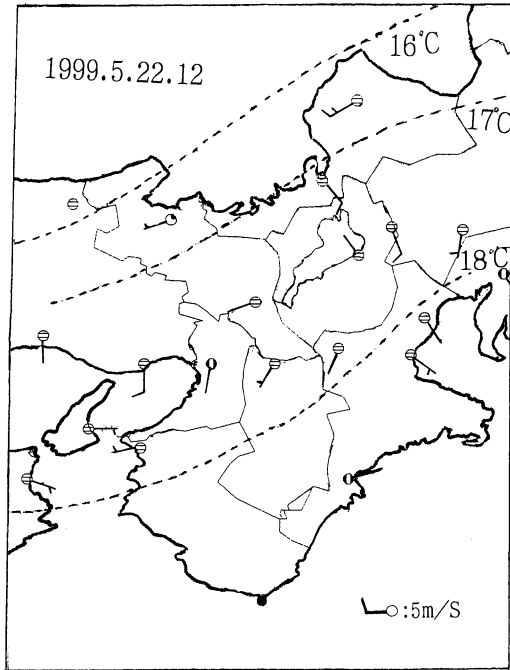
調査当日の1999年5月22日は, 太平洋から東シナ海に張り出す高気圧に覆われ, 一日中晴天が続いた. 神戸海洋気象台での気温は, 最高気温26°C, 最低気温18°Cで, 共に平年値よりも高かった.

第1図は, 放球時刻11時35分に最も近い12時の地上局地天気図である. 神戸海洋気象台では約5m/sの南風であったが, 飛行状況からすると調査地点での実際の風向は, 大阪管区気象台での測定結果と同じく南南西であると思われる. 図中の丸印の横棒は雲量を示し, 黒の面積の多いほど雲量が多いことを示している.

第2図に, 調査当日の9時及び21時における館野, 浜松, 輪島, 潮岬, 米子の高層気象観測による風向および風速の大きさを示す. どちらの時刻も一般的傾向としては高度が高いほど西風成分が大きくなり, 風速

* Some results from a diffusion experiment using buoyant balloons.

** Takao Gotoh, 神戸大学工学部.
© 2000 日本気象学会



第1図 1999年5月22日12時の地上局天気図。
○印の中身は雲量の度合いを表し、黒い部分が多いほど雲量が多い。

も増加している。

放球後の風船は、直径の小さく上昇速度が小さいものは地表近くの風の影響を強く受け、直径の大きいものは地表近くの風の影響は最初の僅かな時間だけで、後は上層の風の影響を受けると考えられる。

直径の大きい風船や小さい風船がそれぞれ何処まで上昇するかの情報を得ることは容易でないが、第2図から分かるように上層ほど西風成分が大きく、風速も大きいので、風船の落下地点と落下時刻（移流速度）からある程度推定することはできる。さらに以下の追跡調査によっても若干の情報が得られると期待できる。

3. 追跡調査

風船の飛行後に、1) ゴム風船の規格等の調査、2) 風船の引っ張り強度の実測、3) 風船飛行調査の追跡調査、4) 落下地点情報の電話調査を実施した。

1) 販売元の小川ゴム商会によると風船ゴムの重量のばらつきや引っ張り強度のばらつきは20%以下とのことであった。風船の色も調査したが、これは色の濃いものは太陽光吸収が大きいと考えられるためであ

る。

2) ゴム風船がどれほどの膨張で破裂するのかを実測した。12インチの風船は半径15.4 cmに相当するが、5個の風船に糸を巻いて実測した結果、すべて16 cm台であった。この5個の風船を破裂するまで膨張させるとすべて体積が3割増加すると破裂した。

風船の上昇に伴う変化はゴムの熱伝導等によって完全な断熱変化であるとは思えないが、断熱変化であるとして計算すると、 $P_1 \cdot V_1^\gamma = P_2 \cdot V_2^\gamma$ （ヘリウムの γ 値1.66）で表され、 $V_2/V_1 = 1.3$ で破壊するとなると、風船が破裂する気圧は650 hPaであることが分かった。第2図の4000 m高度（気圧は約600 hPa）では多くの風船が破壊したであろうことが推定できる。

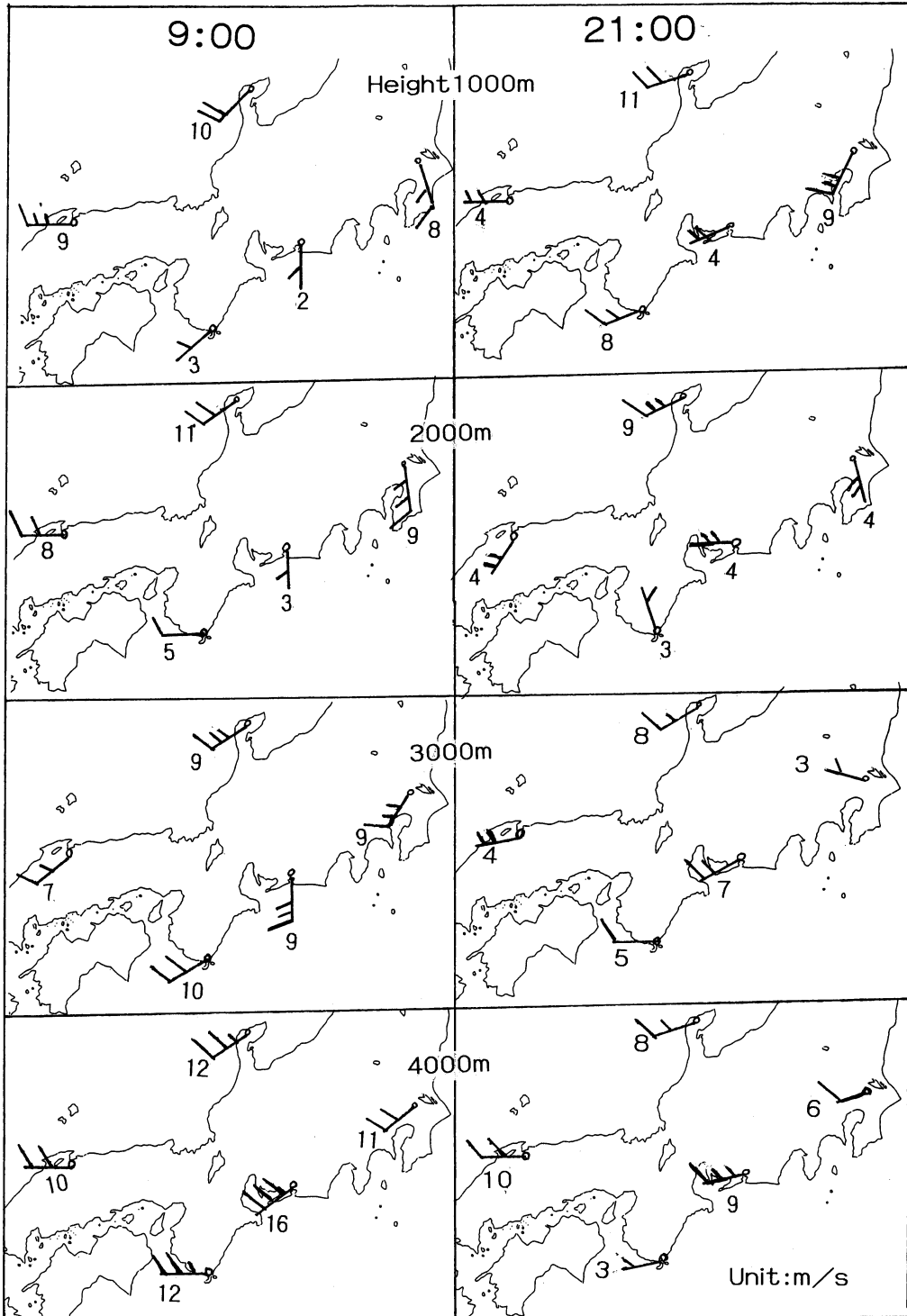
3) 調査時より若干高い気温（25°C）時の1999年9月24日夕刻に上記小川ゴム商会にて12インチ風船にヘリウムガスを充填し、重量を自由に可変できる糸ハンダを用いて浮力を測定した。風船と糸の重さ2.5 gを考慮すると、普通の大きさのもので浮力8.0 g重、やや小さく充填したもので6.0 g重であった。空気中のヘリウムの浮力から風船の体積を計算すると、前者は6.6リットルに対して、後者は5.0リットルとなった。充填した風船は約30分の距離にある自宅まで持ち帰り、調査日に用いた葉書とビニール袋の重量に当たる2.5 gの糸ハンダを取り付け、無風の室温25°Cの部屋に放置したところ4時間後に落下した。1時間当たりの体積の減衰は約11%であった。

4) 落下地点に対する電話調査は、返信された葉書20通のうち、電話番号の記載のあった15通について行った。調査は①風船の落下状況を目撃したかの有無、落下した場所の特徴（山林、都市部、海岸線など）、②落下風船の状態、割れていたのかどうか、③落下時間の確認方法等について行った。

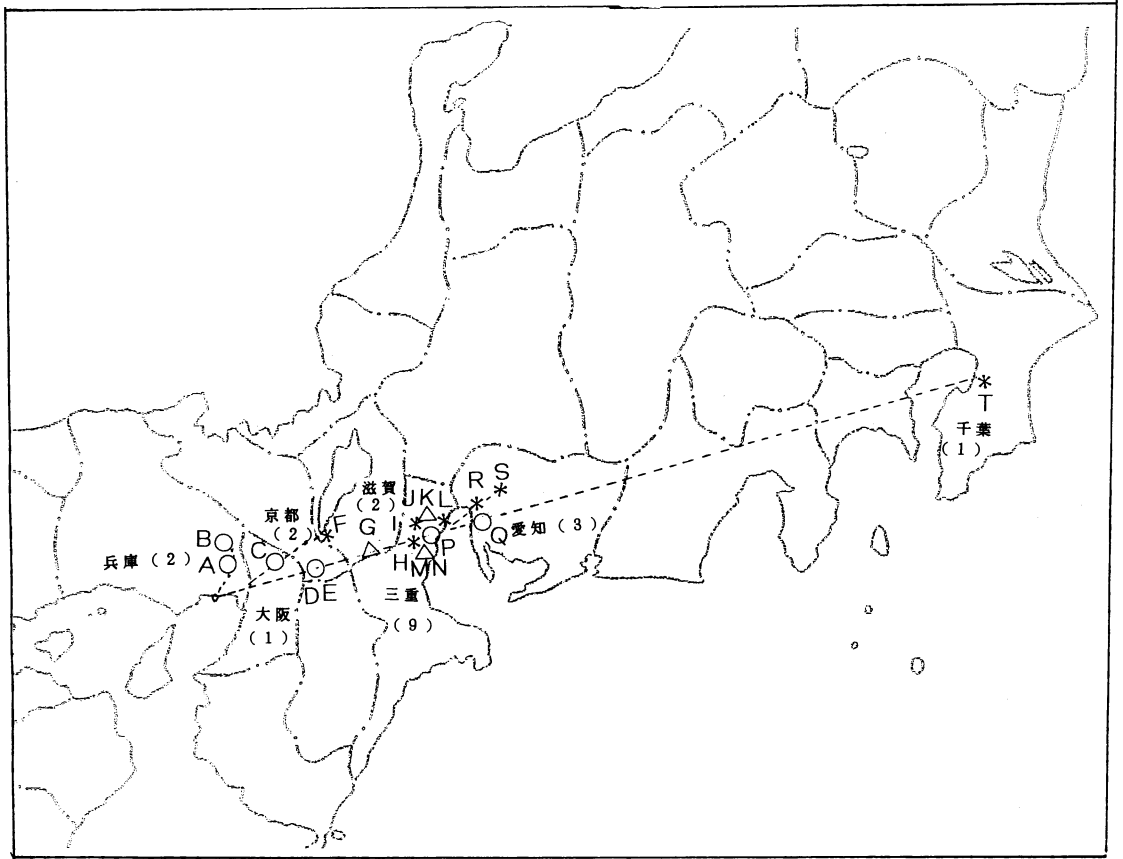
4. 調査結果と考察

上述のように約130個の放球に対して3週間以内に20通の返信（返信率15%）があった。これは予想外の高い数値で、地球環境や大気環境問題に対する関心がかつてなく高まって来ているためと思われる。

第3図は、返信葉書により風船の落下場所等の連絡があった地点と落下した風船の状態を示したものである。図中のA, B, C…は第1表に示した各風船の地点に対応している。落下地点から推定された風船の飛行経路（点線）は主として4つに大別される。(1) 伊丹市・宝塚市方面、(2) 高槻市・大津市方面、(3) 東海



第2図 1999年5月22日9時および21時における高度1000, 2000, 3000, 及び4000 mでの風向および風速の大きさを示す。風速の長い矢羽根は5.0 m/s, 短い矢羽根は2.0 m/sを表す。



第3図 1999年5月22日11時35分神戸市東部人工島から飛行させたヘリウム風船の落下地点。○は破裂していなかったもの、*は破裂していたもの、△は破損状態が不明のものを示す。府県名での()中の数はその府県に落下した風船の数を表す。

市・豊田市方面と(4)千葉県方面である。これらの分岐は風船の大きさ、ヘリウムガスの注入量の違いに起因する風船の上昇速度や最高到達高度に関係したものであると思われる。

第3図を見ると、割れた風船はF地点の津市より近くにはなく、割れなかった風船はQ地点の愛知県知多市に遠くにはなかった。これは風船の大きさの違いによる限界高度の差によると思われる。すなわち、規定より小さい風船(地上で浮力6.0g重)は、割れる限界高度に達する以前に、1時間当たり11%のガス漏洩のため実質浮力が零となり、落下したと推定できる。

次に飛行径路については、上昇過程、移流過程、下降過程の3過程について検討を行う。まず上昇過程では、海風の影響の強い海岸線で飛行し始めた風船は、風船の浮力差によって上昇速度が異なり、主として4

方向に進んだ(第3図)。全体の8割である規定の大きさの風船に比べ、浮力の小さな風船は上昇速度が小さいため海風の影響をより長く受け続けた。その間にガスの漏洩によって浮力の減少を受けたと推定される。A地点とB地点に落下した風船は上昇から下降まで、ほとんど境界層風の影響下であった。前者は伊丹市内市街部の4階ビル屋上で落下してくるのを捕獲された。後者は宝塚市内北東部のゴルフ場でプレーの最中に落下するのを捕獲された。特に後者は大阪方面からの飛来であり、90度近く進路が異なっていることが述べられている。これは同じ境界層下でもわずかな時間差や高度差でも風向が変わり、影響を受けたのではないと思われる。

上昇過程の進路分離はA、B地点が最も低層部で起こり、次に、C、F地点方向への分離が起こった。C、

第1表 風船落下地点の地名と落下した風船の状態.

地点	落下地点の地名	落下の状態, 風船破 (×) 無 (○)	色	経過時間 (Hr)	飛行距離 (km)	平均速度 (m/s)
A	兵庫県伊丹市内, 市街地, 4 F 屋上	落下状態の観測,	○ 赤	1:00	20	5.6
B	兵庫県宝塚市内, ゴルフ場	落下状態の観測,	○ 赤	1:20	30	6.3
C	大阪府高槻市内	落下済み,	○ 青		40	
D	京都府京田辺市, 田んぼ	落下済み,	○ 緑	2:25	49	5.7
E	京都府京田辺市, 田んぼ	落下済み,	○ 赤		49	
F	滋賀県大津市, 藪の中	落下済み,	× 緑		85	
G	滋賀県土山町, 田んぼ	落下済み,	不明		110	
H	三重県亀山市石水溪, 森林	落下済み,	× 青		120	
I	三重県鈴鹿市, 茶畑	落下済み,	× 青		125	
J	三重県四日市市, 茶畑	落下済み,	不明	5:25	130	6.7
K	四日市市, 茶畑	落下済み,	不明		130	
L	四日市市, ゴルフ場	落下済み,	不明		130	
M	四日市市, 市街地	落下済み,	○ 緑		135	
N	四日市市, 市街地	落下済み,	× 黄		135	
O	四日市市, 市街地	落下済み,	× 赤		135	
P	四日市市, 海岸線	落下済み,	不明		140	
Q	愛知県知多市, 市街地	落下済み,	○ 黄	5:55	155	7.3
R	愛知県東海市, 市街地	落下済み,	× 桃	5:35	160	8.0
S	愛知県豊田市, 市街地	落下済み,	× 黄		175	
T	千葉県平川町, ゴルフ場	落下済み,	× 黄		420	

F 地点への風船は大阪湾海風の影響を受けて内陸部へ進行していることから、これが分離した地点での高度は、1000 m 以下であった筈で、この分離地点からさらに海風の影響を受けながら、上空へ上昇したと考えられる。C 地点で落下した風船は割れていないことから、この風船の到達高度は規定大きさの風船の到達高度よりも低いと思われる。一方、F 地点での風船が割れていることから、日中発達した海風に沿って上昇と移流を続け、F 地点の上空で限界高度に達し、割れて落下したと考えられる。F 地点に落下した風船が三重県や愛知県への経路に何故入らなかったかは不明であるが、初期のわずかな浮力の差、風船の色の違いによる太陽光の吸収の違い、境界層の乱流による移流の差異などにより、上昇、移流過程に差異が生じたものと思われる。

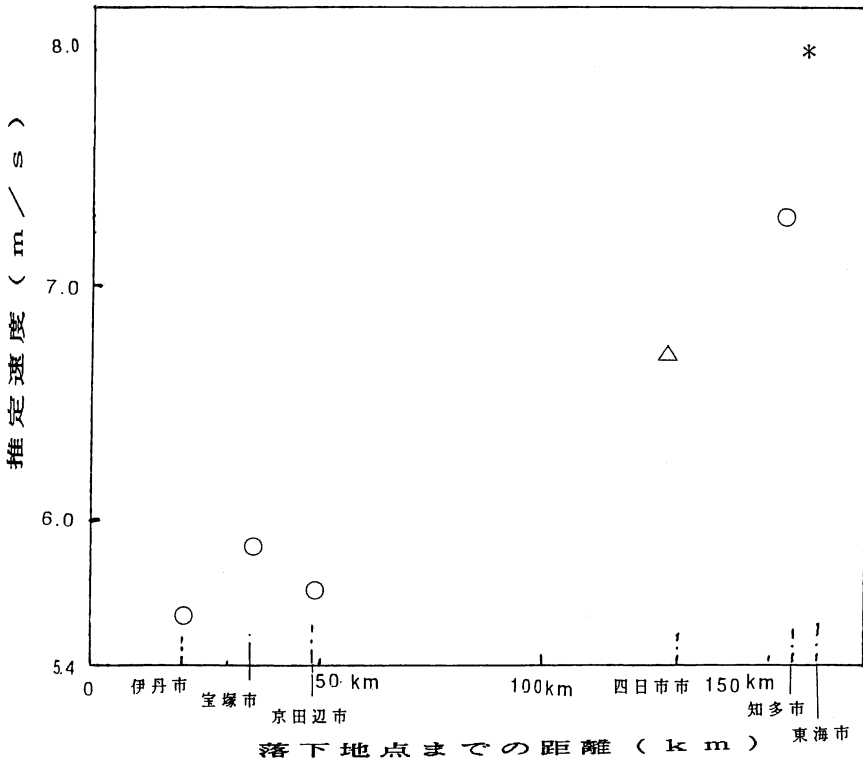
最も大量に落下した地点は第1表のように三重県四日市市周辺で20個中9個に及んでいる。風船が散らばって3個落下していたなど、9個の落下地点は前後5 km の範囲におさまっている。統計的にはこの地点の上空で風船が割れる限界高度に達したと推定できる。ここでも割れていない風船が三重県を越えて、愛知県まで到達したことも前述したような種類の要因による上昇および移流過程の差異を考えなければならないであろう。ちなみに、最遠の T 地点、その前の S 地点および割れないで落下した Q 地点はすべて黄色の風船

であった。また R 地点はピンクの風船であった。

最後に風船の移流速度と風船の落下距離との関係について考察する。第4図は、返信用葉書で報告のあった風船の拾得時間のうちで調査当日のものを距離別に並べ、最も短時間と思われる経過時間から移流速度を推定したものである。第2図での高度1000 m での西風の風速は約7.0 m/s で、一方1000 m 以下では、第1図のように南あるいは南南西で、5.0 m/s であった。第2図のように高度が増すと西風成分とその風速が大きくなっていることから、ここで推定された5.6~8.0 m/s の移流速度はこれらの風船がどのような高度で移流したかの目安を示している。つまり、愛知県まで飛行した風船は高度2000 m 以上の層を移流したと思われるのに対して、伊丹市や宝塚市に落下した風船は高度1000 m にも達せずに移流したと推定される。また前述したように B 地点の宝塚市ゴルフ場に落下した風船は約90度異なった川西市方面から飛来してきたとの報告から飛来距離は直線距離ではなく、迂回距離30 km として表したものである。

5. まとめ

神戸市東部の臨海部に140万 KW の石炭火力発電所の建設計画が持ち上がり、高煙突化・広拡散化を採るということで、市民の側でも風船を用いた飛行調査を



第4図 風船の推定移流速度と飛行距離との関係。記号の意味は第3図と同じ。

実施するに至った。

調査日の1999年5月22日は移動性高気圧に覆われて快晴であった。風船には落下地点とその特徴や目撃時刻などを記入できる返信用葉書を取り付けて飛行させた。

1) 最近傍地点は兵庫県伊丹市市街地(A)および宝塚市ゴルフ場(B)で、いずれも割れないで落下してきた風船を目撃している。最遠の飛行地点は千葉県の平川ゴルフ場(T)で、飛行距離は400 km以上にも及んだ。

2) 追加調査の結果、飛行距離60 kmの大津市(F)より手前の地点では風船は割れないで落下していた。一方四日市市周辺には全体20個中9個が落下したことから規定大きさの風船は四日市市の上空で風船が割れる限界高度に達したと推定された。

3) 落下風船の目撃時間から推定した飛行時間と飛行距離から移流速度を算出した。その結果、割れない

で落下目撃された風船の移流速度は6.0 m/s以下であったのに対して、100 km以遠へ飛行した風船は7.0 m/sあるいはそれ以上であった。

参考文献

- 後藤隆雄, 1999: 神戸市東部地域で測定した熱汚染の調査結果と考察, 安全工学, 38(4), 235-241.
- 後藤隆雄, 1999: 居住地14地点においてTEAカプセル法で1年間測定した二酸化窒素濃度の特徴, 日本環境学会予稿集, 45-48.
- 向井人史, 田中 敦, 藤井敏博, 1999: 降雪中の鉛同位体比と汚染の長距離輸送との関係, 大気環境学会誌, 34(2), 84-102.
- 佐々木一敏, 栗田秀実, 村野健太郎, 水落元之, 植田洋匡, 1986: 大気汚染物質の長距離輸送時における硫酸塩, 硝酸塩等の挙動, 大気汚染学会誌, 21, 216-225.
- 森口 実, 千秋鋭夫, 小川 弘, 1990: 環境汚染と気象, 朝倉書房, 161-203.