



風 洞 実 験

佐 藤 浩*

1. はじめに

われわれを取り巻く謎に満ちた大気の様子を小さな風洞中に映し出すことを夢みる人々は、久遠の女性を抱きよせるようなわくわくする期待と、その不遜な企てが成功するはずはないという絶望との間をゆきつもどりつしている。そして、風洞の中のおもちゃのような風の中で何かがわかったとしてもそれは広い大気の中の本当の現象とは何の関係もないと呟く実測屋の冷たい視線をいつも背中に感じないわけにはいかない。その上、経験からすれば一目置かざるを得ない飛行機屋からは大気屋は粗いと悪口を言われ、最後に、羽振りのよい計算屋からはモデルさえできればお前たちには用は無いと突き放される。

こうなると、大気風洞屋は四面を楚の歌で囲まれて滅亡を待ただけなのだろうか、いや決してそんなことはない。われわれの剣は鋭く、われわれの馬は勇んでいる。われわれが囲みを破って中原を制する日は必ず来るであろう。しかし、それを実現するためには戦略を練らねばならない。戦いは次の三つの方面で盛んである。まず、風洞の風を限りなく大気に近づけること。次に、それを高い精度で測定し、またデータを適切に処理すること。そして最後に、大気との対比の議論をしっかりと土台の上に築くことである。ではその戦略がどのように展開されるかを見よう。

2. 大気への接近

まず、風洞でどんな実験ができるかを考えてみよう。風洞の大きさは1mの程度だから、縮尺比を 10^2 とするとビルや家のまわりの風となり、 10^3 とするとある街区や小高い丘ぐらいの実験がやれる。 10^4 になると富士山や都市を含むことになる。 10^5 で関東地方が、 10^6 で日本全土がという勘定になるが、このあたりになると風洞の高さが1mとしても対応する高さは10km, 1000kmとなつて、とてもまともな実験とは言えなくなる。高さの方

は水平の方と別の縮尺でよいという説もあるがその根拠は薄い。結局、無難なところは $10^2 \sim 10^4$ ぐらいの縮尺であろう。

何をやるかが決まったところで風洞を作る段取りとなる。風洞と名の付くものがあれば何でもやれると思うのは大きな間違いである。ここで欲しくなるのは手頃な入門書である。これはあまり多くない。日本語では、谷・小橋・佐藤(1977) ぐらいのもので、Pope・Harper (1966) はやや航空色が強いが悪くはない。風洞実験をどう考えればよいかということについては、Cermak (1971), Sundaram・Ludwig・Skinner (1972) などがある。ヨーロッパ各国が持っている装置を詳しく紹介したのが、Hunt・Fernholz (1975) である。また、Bradshaw・Pankhurst (1964) は風洞の設計に役立つ。大気に限りなく近づくのに必要なステップを表に示した。このすべ

表

- | |
|----------------|
| 1. 風速の垂直分布 |
| 2. 乱れの強さ |
| 3. 乱れのスペクトル |
| 4. 密度(温度)の垂直分布 |
| 5. 遠心力 |
| 6. コリオリの力 |

てを征服するのがわれわれの野望なのだが、5と6は回転系に固有なものでこれを実現するのに風洞が適当かどうかはわからない。瓜生(1978)の解説もあることだしここでは省いておこう。

まず第1段階の風速分布についていえば、大気境界層の対数分布やベキ分布を作る技術はでき上ったと思ってよい。いろいろな粗さを地面に置いたり、上流に間隔や太さの違う格子を設けたりする方法がある(Rose, 1966; Cook, 1973; Counihan, 1973; 菅原・北林・横山, 1978), しかし、風はいつでも対数分布となるとは限らないから

* H. Sato, 東京大学宇宙航空研究所.

本当は任意の分布を作ることが望ましいわけで、そのためには、“破れ障子”の方式が便利である(佐藤・恩田, 1974)。

乱れの強さは風速分布に対応している訳だが、一般に大気の中に比べると風洞の中の乱れは弱い。また、スペクトルを測ってみると風洞の中では $-5/3$ 乗則に従う波数範囲が狭い。これをひろげて大気に似せるには低周波変動を増強しなければならない。このことはまた、全体の乱れを強くすることにもなり、両方が解決する。粗雑な風洞では乱れがどこにもなく作られて強い乱れとなることもあるが、実験の考え方としてはまず風洞固有の乱れをできるだけ弱くして、そのあとで特性のよくわかった乱れを作るという作戦をとるべきである。

密度の分布を作るには、密度の違う2種類の気体を使うことが考えられる。空気とフロンとの組み合わせはその一例である(相馬・江口, 1970)。これは、強い密度勾配を作るのに便利であるが風洞の中を回流する間に分布が変わってくる心配がある。そこで、同じ気体で温度を変える方式の方がよく使われる(Arya・Plate, 1969)。このとき、流れ自体を暖めたり冷したりするほかに地面の温度も変えていろいろな密度分布を作る。安定形の分布には問題がないが、不安定形の場合は大規模な不安定性によって2次元性が崩れることがある。その崩れ方は風洞によって違っているから何を実験しているのかわからなくなる心配がある。

雲や雨の実験は今のところは相似の実験というより相変化の基礎実験の段階であるが、霧箱のように空気ほとんど動かないものと、雨滴の成長過程を長時間にわたって調べるために下から上に向けて風の吹き上げている垂直風洞を使うものがある(Hoffer・Mallen, 1968; Spengler・Gokhale, 1972)。また、風洞の中で光化学反応までやろうという野心的な考えが、Hoffer・Hoydysh・Hameed・Lebedeff (1975) に紹介されている。

最後に、模型について述べよう。風洞の中に入れる地形や樹木や建物を縮小するには正確なほどよいと考えられているが、ときには正確さがかえってあだになることもある。それは、模型があまりに微に入り細をうがつとレイノルズ数が小さくなって粘性の影響が強くなり現われ、実際のものとはひどく違う場合である。細かいところは適当にならしてしまおう方がよい。

3. 測定とデータ処理

風洞の中で風速を測るための基礎的な計器はピトー静圧管である。基準としての標準ピトー静止管については

谷・小橋・佐藤(1977)に詳しい。ピトー静圧管の方向特性を利用すると風向と風速を同時に知ることもできる。境界層の中で使うピトー管は1 mm以下の細いものである。直径についてとったレイノルズ数が小さくなると粘性の影響が現われるので補正が必要となる。また、速度勾配が急なところでは必ずしもピトー管を置いた点における風速を示さない。この場合には場所の補正を施す。これらの補正については、谷・小橋・佐藤(1977)の中に述べられている。風速が2 m/s以下になると動圧が小さくてピトー静圧管ではとても測れなくなる。

0.2~2 m/s ぐらいの低風速の範囲を測定するための一つの方法は、円柱から放出される渦の周波数を測ること(Roshko, 1954)であり、もう一つは、2本または3本の熱線を使って上流の線から放出される周期的な熱塊を下流でつかまえてその飛行時間から風速を求める方法である(斎藤・五町, 1978)。実験には、これらによって熱線風速計を較正し、それを風の中に入れることになる。

風速の時間的変動を測定するのに最もよく使われるのは熱線風速計である。形が小さいこと、どこへでも持っていけること、適当な電気回路を使えば良い周波数特性が得られるなどは大きな強味であるが、一面、必ず較正が、それもしばしば必要なこと、出力が流速に比例しないこと、線が細いので切れ易いことなどの欠点がある。しかしこれらは改良されつつある。熱線風速計についての解説は、Bradshaw(1964), Kovaszny(1968), Comte-Bellot(1976)などがある。熱線風速計は増幅器や線形化器などとセットとして売られているが、これらを自作することも簡単である(斎藤, 1975; 高木・斎藤・斎藤, 1977)。2本の熱線風速計をX型に使うと、 v , w という流れに垂直な変動成分が測れる。また、たくさんの熱線の流れの中に並べると点情報でなく場の情報が得られる(Paizis・Schwarz, 1974)。熱線は、そのままでは流れの向きを区別することはできないが少し改良すればそれをやらすこともできる(村上・小峯, 1978)。温度と速度の両方が分布し、変動しているときその両方を分離測定する技術も発達しつつある(Chevray・Tutu, 1972; Sakao, 1973; Ali, 1975; 菱田・長野・田代, 1977)。サーミスター風速計は、熱線風速計の変種であるが受感部が球状であるので方向性が無く、速度の大きさだけわかればよいときに便利である。

風速測定法の新顔はレーザー流速計である。これは、レーザー光が流れの中の粒子によって散乱するときのド

ップラー効果を利用するもので、ドップラー周波数は流速に正確に比例するから絶対測定が可能である。また、流れの中にプローブを入れないでよいことも大きな利点である。流体としては水でも空気でもよいが、散乱すべき微粒子が含まれている必要がある。空気の場合は線香の煙がよく使われる。

全般的な解説としては、小橋(1974)、Durst・Melling・Whitelaw(1976)があり、空気の中での使用例として、中村・中村・末広・坪井・内田(1977)などがある。風速の時間的平均に関する限り測定できる範囲も広く、さしたる問題点は無い。しかし、変動を対象とすると粒子からの散乱信号がとぎれとぎれのものであることが周波数の測定を難しくし、変動のスペクトルまでも精度よく決めることは容易ではない。これは、流れの中で測定点を簡単に移すことができないこと、今のところかなり高価なことなどと共に将来解決さるべき課題である。

流れを目で見ることができれば理解の大きな助けになる。そのために特に作られた煙風洞というものもある。流れにつけるマークとしては、煙や小さな水の粒、あるいは放電による放射光などがある(Merzkirch, 1974; 坂上・種子田, 1975; 浅沼, 1977)。流れが層流のときは煙の糸は流線を見わけていて明快であるが、乱流になると写真を撮ったときの露出時間によって流線が見えたり、条線が見えたりする。また、煙の無いところにはたいしたことは起きていないように思いがちだから、煙の写真から結論を出すときには十分な検討が必要である。

データ処理の技術は最近になって飛躍的に進歩した。まず、計測器の位置、風速、圧力、温度などの出力は一度アナログテープに記録されてから再生され処理されることが多い。判断を伴う制御と計測には実時間処理が要求されるが、このときでも記録をとっておくべきである。アナログ処理は、スピードが速いという利点があるが複雑なことはできない。デジタル化されたデータは、どのようにも取り扱うことができるがデータ量が多いと巨大な記憶装置が必要となる。理想的な処理装置は対象に応じた両方の併用装置であろう。計算機としてはミニコンピュータの程度でほとんどの処理が可能である。処理のやっかいなのはやはり熱線風速計からの巨大な量のデータであろう。それについては、谷・小橋・佐藤(1977)、Van Atta(1974)の解説がある。データの処理を初めから終わりまですべて計算機にまかすことは考えものである。研究的な実験では、データを処理する過程で重要な発見のあることが少なくないからである。

4. 風洞実験のねうち

風洞で何かデータがとれたからといって鬼の首をとったように喜ぶのは早すぎる。データはただの材料なのだからそれをどう味つけするかが料理人の腕の見せどころである。まず第1に、生煮えのものを出してはならない。大気屋は粗いと悪口を言われる原因は結論を急ぎすぎる点にある。だいたいの手を取り早く知ろうという態度はよくない。飛行機の開発の為の風洞実験に10年の歳月と1,000億円の金をかける人たちに大気の風洞実験が粗いと見られても仕方がないであろう。しかも、大気は飛行機よりもずっと複雑なのだ。じっくりと腰を落ちつけて材料をことごと煮込むことが肝要である。

次に、風洞実験はやっている人の楽しみで、ほんもの大気と何も関係がないという非難に対する返返しをしよう。このときに持ち出すのがいわゆる相似則で、いろいろな流れでいろいろな無次元数をつくってそれを合わせる努力をする。しかし、これでは勝目がない。早い話がレイノルズ数を合わせることは絶対にできない。いや、乱流レイノルズ数が合えばよいと抗弁してみても本当にそうかと念を押されると腰がぐくだけてしまう。実測は貴重だが条件がうまく設定できないし、データには一般性が無い。風洞の方は条件はきちんとしており再現性もある。しかし、風洞の中で見られることがすべて大気の中でも起きるとは限らない。すなわち、材料の中にも食えるものと食えないものがある。それを見分けるのは経験である。風洞実験と実測を比較しながら地道にやっていくほかはない。また、材料は多いほどよい。風洞では、大気の中では起きないようなことまで実現することができる。この多彩な材料を取捨して、味をつければすばらしい御馳走にすることができるに違いない。

最後に、計算機実験屋に一矢を報いよう。風洞実験は発見的であって、今までに全く知られていない現象にぶつかる可能性がある。これは大気的神秘さに通じるわけだが、それに比べて計算の味気なさはどうだろう。たしかにそれで満腹はするかもしれないが、とんでもないところでびっくりするほどの美味を見出すという楽しみは全くない。

このように、われわれの戦いはいまがさかりである。戦略はでき上っている。最後の勝利を目指して頑張る強い味方がたくさん欲しいものである。

文献

Ali, S.F., 1975: Hot-wire anemometry in moderately heated flow, Rev. Sci. Instr., 46, 185-191.

- Arya, S.P.S., E.J. Plate, 1969: Modeling of the stably stratified atmospheric boundary layer, *J. Atmos. Sci.*, **26**, 656-665.
- 浅沼 強編, 1977: 流れの可視化ハンドブック, 朝倉書店.
- Bradshaw, P., 1971: *An Introduction to Turbulence and Its Measurement*, Pergamon Press.
- and R.C. Pankhurst, 1964: The design of low-speed wind tunnels, *Progress in Aeronautical Science*, **5**.
- Cermak, J.E., 1971: Laboratory simulation of the atmospheric boundary layer, *AIAA J.*, **9**, 1746-1754.
- Chevray, R. and N. K. Tutu, 1972: Simultaneous measurements of temperature and velocity in heated flows, *Rev. Sci. Instr.*, **43**, 1417-1421.
- Comte-Bellot, G., 1976: Hot-wire anemometry, *Ann. Rev. Fluid Mech.*, **8**, 209-231.
- Cook, N.J., 1973: On simulating the lower third of the urban adiabatic boundary layer in a wind tunnel, *Atmos. Environ.*, **7**, 691-705.
- Counihan, J., 1973: Simulation of an adiabatic urban boundary layer in a wind tunnel, *Atmos. Environ.*, **7**, 673-689.
- Durst, F. and A. Melling, J. H. Whitelaw, 1976: *Principles and Practice of Laser-Doppler Anemometry*, Academic Press.
- 菱田幹雄, 長野靖尚, 田代真一郎, 1977: 速度変動と温度変動の同時測定, *日本機械学会論文集*, **43**, 225-232.
- Hoffer, T.E., S.C. Mallen, 1968: A vertical wind tunnel for small droplet studies, *J. Atmos. Sci.*, **7**, 290-292.
- Hoffer, M., W. G. Hoydysh, S. Hameed and S. A. Lebedeff, 1975: Laboratory simulation of photochemically reacting atmospheric boundary layers: a feasibility study, *Atmos. Environ.*, **9**, 33-48.
- Hunt, J.C.R. and H. Fernholz, 1975: Wind-tunnel simulation of the atmospheric boundary layer: a report on Euromech 50, *J. Fluid Mech.*, **70**, 543-559.
- 小橋安次郎, 1974: レーザーによる流速の測定, *日本機械学会誌*, **77**, 297-303.
- Kovaszny, L.S.G. (斉藤博之助訳), 1968: 熱線風速計, *東京大学宇宙航空研究所報告*, **4**, 1-17.
- Merzkirch, W., 1974: *Flow Visualization*, Academic Press.
- 村上周三, 小峯裕己, 1978: タンデム型熱線風速計による変動風速の三次元的な測定, *生産研究*, **30**, 295-301.
- 中村佳朗, 中村治夫, 末広文雄, 坪井 淳, 内田茂男, 1977: レーザー流速計による管内旋回流の崩壊に関する実験, *日本航空宇宙学会誌*, **25**, 588-593.
- Paizis, S.T., W.H. Schwarz, 1974: An investigation of the topography and motion of the turbulent interface, *J. Fluid Mech.*, **63**, 315-343.
- Pope, A. and J.J. Harper, 1966: *Low-Speed Wind Tunnel Testing*, John Wiley.
- Rose, W.G., 1966: Results of an attempt to generate a homogeneous turbulent shear flow, *J. Fluid Mech.*, **25**, 97-120.
- Roshko, A., 1954: On the development of turbulent wakes from vortex streets, *NACA Tech. Rep.*, No. 1191.
- 坂上治郎, 種子田定俊, 1975: 流れの可視化法, *気象研究ノート*, **124**.
- Sakao, F., 1973: Constant temperature hot wires for determining velocity fluctuations in an air flow accompanied by temperature fluctuations, *J. Phys. E.*, **6**, 913-916.
- 斉藤隆雄, 1975: 定温度型熱線風速計の試作, *東京大学宇宙航空研究所報告*, **11**, 10-34.
- , 五町善雄, 1978: 熱後流を用いて微風速を測定する方法, *空気調和, 衛生工学会論文集*, **7**, 63-70.
- 佐藤 浩, 恩田善雄, 1974: 富士山周辺の流れの風洞実験, *気象研究ノート*, **118**.
- 相馬清二, 江口 博, 1970: 成層風洞について, *気象学会秋期大会講演予稿集*, **224**.
- Spengler, J.D. and N.R. Gokhale, 1972: Freezing of freely suspended, supercooled water drops in a large vertical wind tunnel, *J. Appl. Met.*, **11**, 1101-1107.
- 菅原 清, 北林興二, 横山長之, 1978: 中立大気境界層の風洞によるシミュレーション (第1報), *公害*, **13**, 321-329.
- Sundaram, T.R., G.R. Ludwig and G.T. Skinner, 1972: Modeling of the turbulence structure of the atmospheric surface layer, *AIAA J.*, **10**, 743-750.
- 高木正平, 斉藤博之助, 斉藤隆雄, 1977: 定温度熱線風速計の製作, *トランジスタ技術*, **14**, **8**, 265-275.
- 谷 一郎, 小橋安次郎, 佐藤 浩編, 1977: *流体力学実験法*, 岩波書店.
- 瓜生道也, 1978: 実験気象学, **2**, 室内実験, *天気*, **25**, 744-748.
- Van Atta, C. W., 1974: Sampling techniques in turbulence measurements, *Ann. Rev. Fluid Mech.*, **6**, 75-91.