参 考 文 献

- 1) 釜口展宏, 坂田弘: 吊橋の耐風性に関する基礎研究, 航空学会誌 Vol. 13, No. 133 号.
- 2) 釜口展宏, 坂田弘: 吊橋の耐風性に関する基礎研究 (続報), 航空学会誌, Vol. 14, No. 145 号.
- 3) 坂田弘: 薄翼の失速域における非定常空気力に関する一考察, 航空学会誌, Vol. 18, No. 193 号.
- 4) N. UKEGUCHI, H. SAKATA, H. TANAKA: Oscillation of Cylindrical Structure IABSE International Association 9th Congress.
- 5) H. TANAKA, S. TAKAHARA: Study on Unsteady Aerodynamic Forces acting on an Oscillating Cylinder. Proc. 19th Japan Cong. for Applied Mech. 1969.
- 6) 釜口展宏, 坂田弘: パイプ・アーチ橋の風圧抵抗に関する風洞実験, 三菱テクニカル・ブリテン MTB 010022.
- 7) 三菱重工技報 (橋梁特集号) 第 3 巻, 第 6 号.
- 8) 三菱重工技報 (橋梁特集号) 第 7 巻, 第 7 号.
- 9) UKEGUCHI, N., SAKATA, H., OKAMOTO, H. and Y. IDE, 1967: Study on Stack Gas Diffusion, Mitsubishi Technical Bulletin, No. 56, MHI.
- 10) 釜口展宏: 1967, 煙拡散に関する風洞実験, 航空学会誌, 15 巻 167 号, 417-425.
- 11) UKEGUCHI, N., SAKATA, H. and Y. IDE: 1968: Turbulent Diffusion in a Turbulent Boundary Layer. 10th Midwestern Mechanics Conference (1967/8), Developments in Mechanics Vol. 4.
- 12) 釜口展宏, 坂田弘, 井手増雄, 1968: 乱流境界層を考慮した乱流拡散, 航空学会誌, 16 巻, 168 号 16-22.
- 13) UKEGUCHI, N. and Y. IDE, 1968: Turbulent Diffusion in a Turbulent Boundary Layer, Proc. 18th Japan Nat. Cong. App. mech. 145-153.
- 14) 釜口展宏, 倉崎六夫, 松本考良: 建物の乱流域低減法, 三菱重工技報, Vol. 3, No. 4.
- 15) UKEGUCHI, N. and Y. IDE, 1970: Structure for Atmospheric Diffusion and Ground Level Concentration, Proc. 19th Japan Nat. Cong App. Mech. 157-162.
- 16) UKEGUCHI, J., OKAMOTO, H. and Y. IDE 1970: Wind Tunnel Experiments on Exhausted Gas Diffusion with Thermal Elevation, Second Int. Clean Air Cong. Int. Union. Air Poll. Cont. Ass. (Dec).
- 17) 釜口展宏, 岡本汎貴, 1971: 煙拡散風洞による地上濃度予測法の開発, 三菱重工技報, Vol. 18, No. 2, 179-187.
- 17) 釜口展宏, 1971: 工場排ガスの拡散について, 機械学会誌, 74 巻 626 号, 28-34.

農 業 と 風 洞 実 験*

Agriculture and Wind Tunnel Experiment

井 上 栄 一**
Eiichi INOUE

農業は風の中で行なわれている。風の吹かない密室の中では植物は生育することができないであろう。そこで作物の生育と風との関係を調べることが農業気象学という学問の中の一つの大きな分野となっていて、作物の風洞実験ということがしばしば行なわれる。

航空機や建築物などちがって一般に作物は模型に作るというわけにはいかない。なぜならば作物は生きているからである。しかし幸いにも作物はそれほど大きくもないしそれに当たる風の速さもせいぜい毎秒数十メートルの程度であるから、作物を入れて風を吹かせる風洞はできないことではない。

問題になるのは風洞の中の気流が自然の風と同じものであるかどうかということ、風洞の大きさの制限によって僅かな数しか入れられない作物の風洞気流に対する応答が広い田圃や畑に育っている作物の自然の風に対する応答と同じものであるとは言えないことである。

私は東大の航空学科で教育を受け、風洞実験についての初めての教えを受けた。Reynolds 数ということ

も教わった。もはや 30 年以上も前のことである。

そのころには流体力学の相似法則というものがある、風洞実験をやるときにはその現象についての Reynolds 数を同じにしなければならないというふうに教わった。つまり同じ空気の中で起こる現象を風洞の中の模型で再現するためには、模型の大きさを 10 分の 1 にしたならば空気の流れる速さを 10 倍にしなければいけないということである。

こんなことをいうようになったのは、流れが層流から乱流に移り変るときに Reynolds 数が一定であるという知識があったからである。Reynolds 数 R というのは周知のごとく

$$R = UL/\nu$$

で定義されている。 U は速さ、 L は長さ、 ν は流体の分子動粘性係数である。同じ空気という流体ならばその動粘性係数の ν には変わりはないであろうから、翼幅 10 m の飛行機という L のものが毎秒 100 m という速さで大気の中を飛ぶ様子を 10 分の 1 の大きさの 10 cm という L を持った模型を風洞の中の気流に入れて調べるためには風洞気流の U を毎秒 100 m の 10 倍、つまり毎秒 10,000 m にしなければいけないとい

* 昭和 49 年 3 月 5 日原稿受理

** 農業技術研究所 気象科

うことになる。

まあ100分の1くらいの模型ならばなんとかごまかせるけれども、3,000 mもある高さの富士山の周りの大気の動きを30cmしかない模型を使って風洞実験しようとしたらどうなるであろうか？ L の比は10,000倍であるから、 U の比もまた10,000倍でなければならないことになる。たとえば富士山に10 m/secの風が当たっている現象を30cmの模型で風洞実験をしようとするならば U は10 m/secの1万倍、つまり10万 m/secでなければならないことになる。これはおかしい。

風洞実験の相似法則として Reynolds 数などを使わないことにしようと言いだしたのは建築屋である。高さ10 mの建物を造るのに10 cmの模型を風洞に入れてそれにかかる風力を調べたいというのが建築屋の狙いであったのに、流体力学屋は Reynolds 数を持ちだして風洞気流の速さを100倍にしなければ気流は相似にならないという、こんなことを信用してはとも風洞実験はできないし、そんなことを信用しなくて風の速さと風洞模型の気流の速さを同じ程度にしても大して変わりがないということが判ってしまったのである。そこで Reynolds 数には無関係であるという作業仮説が建築屋にはびこってしまった。

富士山やマッターホルンにかかる雲の形を風洞実験で調べようという気象屋はまた別の考え方をすることになった。富士山などに吹く風は大気の流れであり、模型に当たる風洞の気流は空気の流れであると考えられるようになったのである。つまり大気と空気とはちがうというわけである。あるいは大気の動きである風と風洞の中を流れる風洞気流とはちがうということである。

大気と気流とのちがいをそれらの動粘性係数のちがいで表現しようとしたのは随分と古いことのようにである。もし台風の動きが空気の動きであったとするならば、その運動エネルギーを消耗するためには数1,000年もかかるということが古くからいわれていた。台風は空気の動きと考えるよりも、それよりもっと粘性の大きい大気の動きと考えた方がよいのであって、事実台風は数日という時間で消耗するのである。

空気と大気、あるいは空気力学と大気力学とのちがいははっきり示したのは Lewis RICHARDSON のようである。彼は空気というのは大気の一つの極限であるということが大気の動粘性係数 K によって示した。彼の表現によれば大気では

$$K = 0.2 L^{4/3} \text{ cm}^2/\text{sec}$$

となる。 L はcmで表わされる量であり、これは空間の長さを意味する。大きな空間を占める大気はその

長さの $4/3$ 乗に比例して動粘性係数が大きくなるというわけであり、 $0.15 \text{ cm}^2/\text{sec}$ という一定の動粘性係数を持つ空気とは全くちがう。大気は空気の集りではあるのだが性質のちがう流体のように見える。ここで空気力学と大気力学とがわかれてしまった。

RICHARDSON の経験法則はやがて KOLMOGOROFF や OBOUKHOV によって理論的に裏づけられるようになった。それは1941年のことであつた。彼らは乱流場の中にはいろんな大きさ L を持った乱子があって、それが運動する際単位時間と単位質量について失なうエネルギー

$$\varepsilon = V^3/L$$

が L に無関係であるということを直観的に導入したのである。ここに V は乱子運動の速さである。一方、動粘性係数の方は大きさ L と速さ V の積であり、

$$K = LV$$

であるという。そこで

$$K = \varepsilon^{1/3} L^{4/3}$$

となつて見事に RICHARDSON の式が出てきてしまった。大気が空気とちがう流体ならば大気運動の相似法則としても空気の動粘性係数の代わりに大気のそれを使ったらどうであろうかという考え方が出て来ても不思議ではない。3,000 m という高さを持つ富士山をとりまく大気の動粘性係数はべらぼうに大きくて、Reynolds 数を

$$R = UL/K$$

とすればその値は案外低くなる。

風洞気流もまた空気の乱流であるから、Reynolds 数の中に入る動粘性係数として一定な空気のそれを使う代わりにその乱流状態に応じた K を使ったらどうであろう。都合のよいことに風洞気流の K は風速 U に比例するから、Reynolds 数は風速に無関係ということになって建築屋の作業仮説ももっともだということになる。

いよいよ本題の農作物の風洞実験に入ろう。一口に田圃の上に風が吹くといってもその風速は高さ Z によって変わっていて、作物の高さ H より上では

$$U = \frac{V_* \ln \frac{Z-d}{Z_0}}{\kappa}, \quad Z > H$$

という対数分布となり、作物群落の中では

$$U = U_H \exp \left\{ -\alpha \left(1 - \frac{Z}{H} \right) \right\}, \quad Z < H$$

という指数型の分布となる。二つの式の中の d や z_0 や α という量が作物の繁茂の度合や風によって生ずる穂波の模様によってちがってくるから建築物よりも始末が悪い。第1図は見事な穂波の写真であるが、こういう現象を風洞の中で起こそうとしてもそれは無理で

第1図 蘭草（イグサ）畑の穂波の跡（鈴木清太郎氏の好意による）

第2図 田圃の上につくられた風洞（武田友四郎氏の好意による）

ある。

風速の高度分布は運動量の乱流輸送によって理解されるが、同じような輸送は熱量、水蒸気、炭酸ガスな

第3図 送風機をついた田圃風洞の内部（第2図に同じ）

どについても起こる。これらの諸量はいずれも作物の生育にとっては大事なものである。とくに炭酸ガスは作物の同化作用に関係している。

作物を箱に入れて育ててそれに風をあて、作物がどれだけ炭酸ガスを吸って同化作用をしているかということ調べる方法がある。これも一種の風洞実験である。ところがそのような箱の中を吹く風の速さは前に述べた対数分布や指数分布とはほど遠いものである。したがって箱で求めた作物の同化量が本物の田圃に植えられている稲の群落のそれと同じものであるとはいきれない。

なるべく箱を大きくしようとした試みを第2図と3図に示した。もっと箱あるいは風洞を大きくしたいというのが作物屋の願いであって、屋内野球場くらいに大きな箱が作りたいなどという話もきこえている。

農作物の風洞実験という問題にはまだまだ未解決なことが沢山ある。だから面白いのである。