耐風安定, 拡散等に対する風洞の利用について*

On Application of a Wind Tunnel to Aerodynamic Stability and Diffusion

筈 口 展 宏**

Nobuhiro UKEGUCHI

最近, 経済の高度成長により生産設備の巨大化, 交通機関の高速化等が行われ, また反面その歪みとして各種公害問題が深刻化して来た. このような社会的背景の中で安全, 信頼性, 無公害等の要求が高まって来たため最近これらの諸問題の解決のために風洞を用いる研究が多方面で行われることになって来た. この中で我々が風洞を利用して研究を行っている代表的例をご紹介します.

1. 耐風安定

1.1 構造物の耐風安定性と風洞利用 自然風の中で影響を受ける構造物は多種多様であり, 耐風安定の問題点もそれぞれの構造物によって異なってくる. しかし基本的な研究の流れは変わらず, 一般的に第1図に示す流れに従って研究を進めている.

静的風荷重は構造物の基本的な風荷重であるからほとんどの構造物で計測している. 非定常空気力は構造物が振動状態において作用する風荷重であり, 振動の源になる重要な風荷重である. これは構造物の模型を外部より加振させて強制振動状態で模型に作用する空気力を計測している. 模型が静止状態にあってもカルマン渦等により振動的な空気力が生ずるが, これを振動空気力と考えて模型に加わる空気力を計測している. 構造物に乱れた風が作用すると乱れによる空気力も生ずる. これに関しては風洞中に翼列を設置し, 正弦波変動風を作成して空気力を計測している.

以上が構造物に加わる空気力であるが, これらを基にして構造物の振動応答特性による振動性状を計算し, 一方では振動性状試験を行い理論と実験の比較検

討を行っている. また構造物全体の振動の場合は振動にも空気力にも空間的な広がりがあるので空間モードを考慮した理論計算を行い, 一方では全体の弾性模型を用いて振動性状試験を行い, 比較検討を行って実機への応用を計っている.

振動性状試験では構造物の振動特性と空気力の相似則を満足させる必要があるが, 中にはどうしても相似則を満たすことが出来ない場合がある. (例えば吊橋の架設中等) このような場合は模型の振動特性を使って理論と実験の比較を行い, 理論のチェックをした後実機の振動特性を使って理論推定を行い, 実機への応用を計っている.

前述のように構造は多種であるから物によって多少問題のポイントが異なる場合もある. 以下それぞれの構造物における研究について記述する.

1.2 煙突 円柱の細長い構造物であるから暴風時の静的な風荷重と季節風等で起こるカルマン渦による振動が主な問題となる. 自然風は地表面からの高さにより速度が異なるので, 煙突の設計にあたってはそれぞれの高さによる風荷重を求める必要が生ずる. したがって煙突の場合の静的な風荷重は煙突の一部を切り出した部分模型により各高さの部分に作用する空気力を計測している. またカルマン渦による振動はカルマン渦の空間相関が問題となるので出来る限り全体模型で振動実験を行なっている. 第2図に示す模型は全体の剛体模型で基部をピン支持にし, 上部より吊り下げて端部をスプリングで支持して振動系を構成し, 風洞実験を行った例である. 煙突関係で一ぱん問題になるのが R_n 数の影響である. 何本か組み合わせた集合煙

第1図 耐風安定性の研究フロー・チャート

* 昭和49年3月5日原稿受理

** 三菱重工業株式会社長崎研究所

第2図 振動試験用煙突模型

第3図 振動試験用クレーン模型

突では R_z 数の影響は比較的に少いようであるが、高 R_z 数領域では未知の面が多い。これに関しては実機の煙突を対象に研究を進めていく予定である。なおカルマン渦による振動の模型実験では出来る限り亜臨界 R_z 数領域で研究を進めている。

1.3 クレーン 各風向における静的6分力風荷重とカルマン渦による振動が問題となる。静的風荷重は剛体模型を使用し、6分力試験を行い、カルマン渦による振動は部分模型による空気力の計測、振動性状試験を行い理論検討を行うと同時に全体の空弾模型（第3図）による振動性状試験を行った。またクレーンの

第4図 翼列と吊橋模型

第5図 吊橋タワー

振動は風の乱れが大きな要因になることが判ったのでクレーン建設地形模型により風速分布と乱れを計測し、乱れによる振動性状試験も合わせて行った。

1.4 橋梁 橋梁関係ではフラッター、乱れによるバフェッチング、カルマン渦による振動等多種の振動が起こる。この中でフラッターに関しては非定常空気力の計測、二次元、三次元振動性状試験と理論計算を比較して研究を進めている。カルマン渦による振動も同様な方法で研究を進めているが、この種の振動では特に構造減衰率をかせ振動性状試験を行い、空気力の非線形性を重点に研究を進めている。変動風（乱れ）による振動も大きな問題となっており、この種の研究では風洞中に翼列（第4図）を設置し、正弦波変動風を作成して変動空気力の計測、理論計算、変動風中の振動性状試験（第4図）を行い、振動現象を究明している。

1.5 吊橋タワー カルマン渦による振動が主な問

第6図 パラボラ・アンテナ

第7図 高層住宅

題であるので、二次元剛体模型による空気力の計測と全体の空弾模型による振動性状試験により、本問題を究明している。カルマン渦によって生ずる空気力は構造物の振動振幅に対し必ずしも線形の関係にないので、振動性状試験では特に構造減衰量を変えて振動性状の変化を重点に研究を進めている。また防振装置も重要な課題の一つであるが、これについては主塔の囲りにカウリングを取付けて防振を計る方法を見出した。

1.6 パラボラ・アンテナ 静的な風荷重では6分力の静的風荷重、鏡面内の圧力分布、振動関係ではパラボラ鏡面内のパネル振動が問題となる。パネル振動に関しては変動圧力ピックアップにより振動的な圧力をパラボラ表面および裏面で計測し、スペクトル解析

により究明している。

1.7 高層住宅 静的な転倒モーメント、各部の風圧力、周辺気流等の問題がある。このために静的6分力の試験、圧力分布計測を行なっているが、特に周辺気流の問題では糸の流れによる可視化、煙の流れによる可視化を中心に研究を進めている。

1.8 電波中継塔 上半身が海上に、下半身が海中に浸る構造物で風および海流による漂流、およびカルマン渦による振動が考えられる。したがって海上部および海中部に分け荷重計測および振動性状の試験を行っている。

1.9 ドック上屋 ドック上に取付けられる移動式の建屋で静的6分力の風荷重と屋根部に働く圧力が問題となる。特に屋根下に建造ブロックがある場合、な

第8図 電波中継塔

第9図 ドック上屋

い場合についての風荷重を究明している。

1.10 船舶 漂水の浅い船舶では風荷重が安定性、操縦性に大きな影響を与える。したがって各風向から受ける静的6分力を計測して問題を究明している。

2. 拡 散

2.1 大気汚染と風洞利用 産業と都市の著しい発展にともない、大気汚染は深刻な社会問題となっている。この大気汚染の防止には、①燃料中の汚染質の除去、②排ガス中の汚染質の除去、③燃焼法の改善、等を実施して大気中に汚染質を全く排出しないことが理

想的であろうが、現実的には不可能である。したがって、④汚染質の大気拡散法の改善、⑤既設、新設を含めた産業・都市立地の見直し、等をも含めた広範多岐にわたる検討の中から、環境汚染濃度が許容レベル以下になるような対策を組立てるのが現実的な考え方となる。そのために、大気中に排出された汚染質の挙動と環境汚染濃度を把握（予測）することが是非とも必要になる。この汚染予測による大気汚染防止の進め方の概略は、(1)現状分析、(2)将来予測、(3)改善、(4)アフター・ケアの順序によって行うことになる。

(1) 現状分析 当該地域における過去何年間かの

相
図
第10

SO₂ および気象実測データを分類し、高濃度出現時の気象条件（危険風向、危険風速）を統計的に求め、別途調査した煙源条件を用いて、この場合の現状予測を行う。この予測のために一般に風洞実験が実施される。現状予測結果と実測値との比較により、予測結果の妥当性を吟味して、予測手法の正合性を確認する。これにより発生源（煙源）の変更による将来予測と改善予測が可能となる。すなわち予測手段としての風洞実験が利用できることになる。

(2) 将来予測 将来の工場ごとの最終設備計画（最終の煙源条件）および当該地区における工場配置計画を全て調査し、将来煙源条件を決め（工場進出未定地区があれば、モデル・プラント案を立てる）、現状予測を行ったと同様にして、将来予測（風洞実験）を行う。

(3) 改善 一般に将来予測された汚染濃度は環境基準で許容されるレベル以上のものが多いので、これを許容レベルに下げる必要がある。許容レベルを下まわるように各社公平に1社当たりの割当濃度を定め、各社は、割当濃度以下になるように煙源の改善を行い、改善案についての予測（風洞実験）を行って、環境基準の満足を確認し、最終案を決定する。

(4) アフター・ケア 各社毎に経年計画（煙源）に基づき、達成すべき期間内はもちろんのこと、それ以後においても環境基準を満足できるまで、経年予測（風洞実験）を行って経年計画を改良して行く。一方モニターリング・システムを完備し、経年予測と比較して多少の見直しが必要であれば補正を行うと同時に、異常気象には予報警報システムとの組み合わせにより、大気汚染防止に万全を期す。

以上のように大気汚染防止のための予測を行うに当たって風洞実験が利用され、作業段階に応じてその利用の目的も異っている。

2.2 煙突排ガス風洞実験 予測のために用いられている煙拡散風洞の一つを下図に示す。

煙突排ガスの大気拡散を風洞内に再現するので、この種の風洞の測定室は風下はかなり長いのが特徴であり、風洞気流の乱流条件と風速分布（境界層）を制御する装置が付いている。予測実験を行うために相似側に関する基礎研究を初めとして、乱流制御、乱流境界層、排煙上昇、排煙拡散等に関する種々の基礎研究が予め必要となる。このために風洞実験で排煙の挙動および拡散を調査する次のような実験が行われている。

(1)煙流実験、(2)乱流域観測実験、(3)流線観測実験、(4)糸流実験、(5)気流乱れ計測実験、(6)定性(変色)実験、(7)定量実験、(1)～(4)は拡散現象の補助的観測法、(5)は拡散現象の解析上必要な資料の測定法であり、最も有

第 11 図

風 洞 要 目
 風洞測定部長さ 25m 送風機型 式1段直流流型 電動機型 式分巻直流電動機 (シリコン PC440V)
 測定部断面 2m×3m 最大風量 90ms 出力 200kW
 測定部風速 02~15m/s 風量調整回転数制御 回転数 10~850rpm
 制御方式静止レオナード制御

第12図 定量実験サンプリング法

用なものは(6), (7)の方法である。予測に用いられるものは、特に(7)であり、地上および空中濃度を定量的に測定するもので、概略を次図に示す。煙突一本の地上濃度分布を C_i とすると、工場Aの n 本による地上濃度分布の重合、つまりA工場の地上濃度分布は

$$\sum_{A\text{工場}}^n C_i$$

となる。このようにして、当該地域全体の全工場数 N による全重合濃度分布は、

$$\sum_{\text{地域}}^N \sum_{A\text{工場}}^n C_i$$

となる。この結果が予測結果であり試験時の煙源が現状煙源であれば、現状予測となる。なお、煙突については、ダウン・ウォッシュ、ダウン・ドラフトの防止、および煙突排煙間の干渉問題、吐出口の改善、集煙法についての試験も行われている。風洞実験法と実験結果の詳細については、参考文献を参照願いたい。

2.3 その他の風洞実験 大気中へガス状廃棄物を放出する設備は煙突のほかにもいろいろな設備があ

る。これらの対象に応じて風洞実験内容は少々変わってくるが、拡散風洞の利用法の概略は、2.11 で述べたのとはほぼ同じであるので、主なる応用事例について以下まとめた。

(1)道路上における自動車排出ガスの拡散……自動車排出ガスによる道路周辺の汚染状況の調査、特に道路構造と周辺の地形・地物との干渉による排気ガスの拡散調査に風洞実験が利用されている。

(2)クーリングタワー排気拡散……温排水公害を防止するためにクーリング・タワーが採用される傾向にある。このクーリング・タワーから排出される温排気の地上影響、周辺建物、特に煙突（排煙）との干渉、吸排気の自己再循環、複数クーリング・タワーがある場合の相互干渉等が調査問題となる。

(3)原子力設備から排出される放射性物質の拡散

(4) トンネル坑口、または排気塔からの排ガス拡散ならびに吸排気問題の検討

(5)ビル暖房等による煙害の検討

(6)船用煙突による煙害・排煙ガス熱害等の検討

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