大気環境実験用風洞について.

環境庁公害研究所　小川　靖
〃　　溝口　次夫

1. はじめに.

大気中における汚染物質の物理的な諸現象，すなわち，滞流，移流，拡散等の現象はまだ十分に解明されていない。 単一排出源および複数排出源による汚染物質が環境におよぼす影響を精度よく推定することが大気汚染制御の上から極めて重要なことはいうまでもない。 現在，これらの現象解析は平坦，かつ，均一な場における理論に基づいた拡散方程式および同様な条件によって求められた拡散パラメーターによってコンピューターシュミレーションが行われている。 しかし，複雑な場におけるシュミレーションは精度が問題であり，そのため風洞実験によるシュミレーションがしばしば用いられている。 風洞内での気流と大気中での風の流れは，風洞の壁面の影響のため異なる。 したがって，相似則の適用等についてはこれらの条件を十分考慮して判断しなければならない。 国立公害研究所では来年度末完成を目途に以上の事柄を考慮して大気拡散風洞を設計したが，その概要について報告する。

2. 風洞による大気拡散実験の問題点.

大気の流れは垂直，水平方向に自由な空間を持つが，風洞内の気流は天井，床，側壁等によって区切られた空間内の流れである。 このため大気乱流の渦スケールは観測時間と共に増加するのに対して，風洞での渦スケールはその風洞の大きさによって決まってしまう。

Fig. 1 に大気中における長時間の風速のスペクトラムを示す。 大気中ではこの様に数ヶ所の周波数でピークを持つスペクトラムであるが，風洞気流中で観測されるのは通常右側の高周波領域のみである。 従って風洞内で観測される乱流現象は乱れの周期の短い，渦のスケールの小さい現象である。

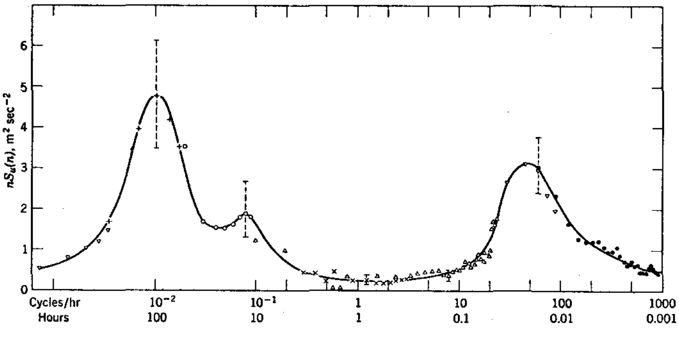


Fig. 1. Schematic spectrum of wind speed near the ground estimated from a study of Van der Hoven (1957).

又，大気中での風速のスペクトラムの型は大気の安定度によっても異なる。
Fig. 2 には観測時間を1時間とした時の大気中における流れ方向の風速成分の基準化されたスペクトラムを示す。 横軸はやはり基準化された周波数を使っている。 大気の安定度が安定から不安定になるに従って，周波数の小さい（渦の大きい）乱れを含む領域が大きくなる。
大気中での拡散現象は乱れの大きさ，強さに関係があるから，大気の安定度は拡散現象の重要な要素である事は言うまでもない。 しかしながら従来の風洞実験ではこれらの大気の安定度や地表面の温度分布などの影響を考えずに実験がなされてきている。 Fig. 2に示される様に安定度が異なれば乱れの様子が異なり，拡散現象はその拡散パラメーターや濃度分布に影響が現れるわけで，熱的な乱れに起因する拡散現象を無視出来ない。

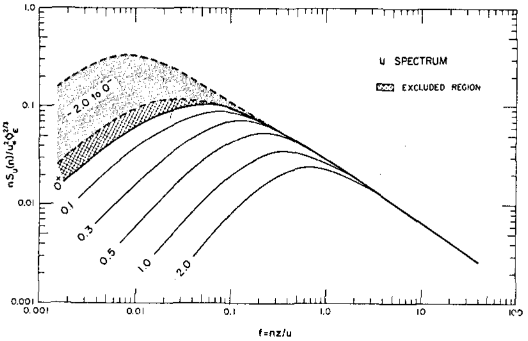
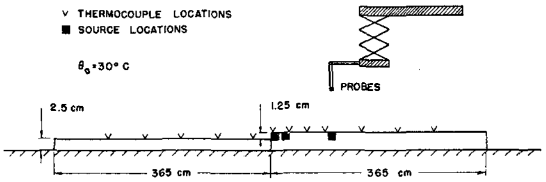


FIG. 2 Longitudinal velocity spectra (Kaimal *et al.*, 1972). The numbers in the figure are values of z/L.



	θ_s °C	θ_l °C
NEUTRAL	30°	30°
UNSTABLE	30°	60°
STABLE	15°	UNHEATED, 28° TO 30°
ELEVATED INVERSION	15°	45°

Fig. 3 Schematic of the model. The vertical scale is exaggerated to show the step. A summary of the boundary temperature conditions is given beneath the sketch.

熱的な影響を考えた風洞実験の1例として海風の拡散におよぼす影響の結果を示す。使用した風洞はNew York大学の1.1×2.2×10m（高さ×幅×長さ）の測定部を持つ吹込型の環境用風洞で，実験の概略図をFig. 3に示す。風洞内の気流温度 $\theta_a = 30°C$ とし，床面の温度を変化させる事により，Neutral, Unstable, Stable, Elevated Inversionの状態を作った。実験では陸側が海側より1.25 cmだけ高さが高くなっている。海岸線それより25 cm，100 cmの所に3ヶ所地表面源を設けている。海側の365 cm，陸側の365 cmを冷却したり加熱したりして各種のコンデションを作ったが，Fig. 3中にその温度条件を示してある。平均風速，温度，乱れ成分，ストレス成分などの流れ場の測定の他，各地表面源からのトレーサーガスの濃度の測定もおこなっている。濃度の水平，垂直分布より σ_y，σ_z が計算より求まるから，それを大気中で観測されたPasquillの線図との比較をおこなってみた。

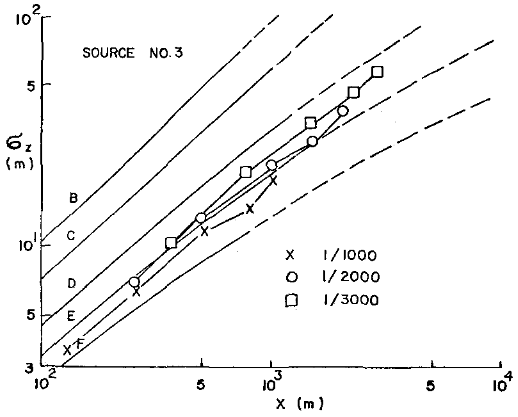


Fig. 4 Variation of σ_z with Scale Ratio (Neutral)

Fig. 4 にはNeutralの条件でSource NO. 3（海岸線より100 cm風下にある地表面源）からの測定された σ_z を，実測値との比較のために風洞実験での縮率を 1/3000，1/2000，1/1000 としてPasquillの線図にプロットしたものを示す。縮率が 1/1000 の場合，風洞実験値はPasquillのカテゴリー E～F の間，1/2000 の場合は略々E，1/3000 の時は D～E の間になる。この様に風洞実験での縮率を変える事により，風洞内での大気の状態をある程度は変えられるが，その範囲は小さい。

大気中での渦のスケールは観測時間を長くすれば大きくなり，渦のスケールと代表長さとの比は観測時間によって異なる。これに対し風洞内での渦のスケールは，通常の観測時間では固定されてしまう。風洞内での渦のスケールを大きくするために，床面に大きな粗度を置き，乱れを大きくし，拡散の状態を不安定側に寄せる方法もあるが，通常は粗度形成物の大きさが縮率をかけると大きくなり，不都合な面が多い。縮率をさらに大きく変化させる事により，渦スケールと代表長さの比を変化させる事も出来るが，縮率が大きくなりすぎると実験は無理になる。渦のスケールの相似の問題は特に横方向の拡散が，風洞の壁により制限を受け，むずかしい。

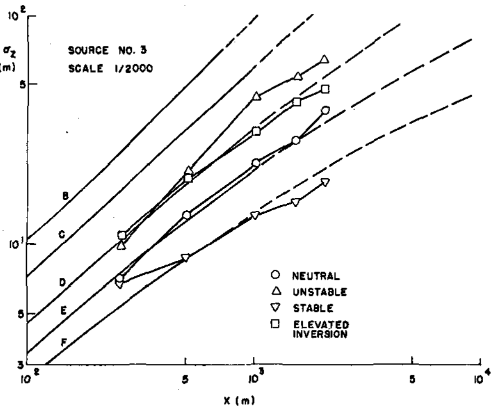


Fig. 5 Comparison of wind-tunnel results for σ_z with Pasquill's curves. The wind-tunnel data have been multiplied by a scale ratio of 2000:1, as explained in the text.

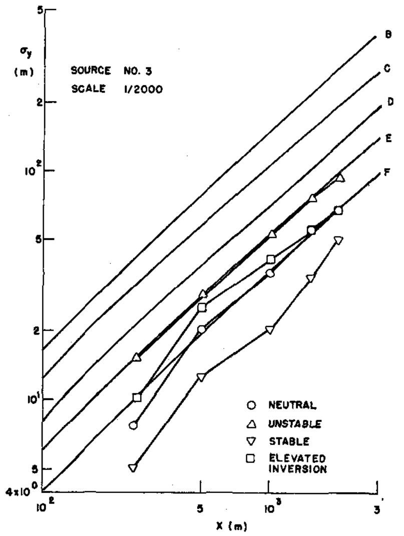


Fig. 6 Comparison of wind-tunnel results for σ_y with Pasquill's curves. The wind-tunnel data have been multiplied by a scale ratio of 2000:1, as explained in the text.

Fig. 5, 6 に前述した各種の実験条件での結果を Pasquill の線図にプロットしてみた。Fig. 5 の σ_z を見ると Stable の条件での結果は Pasquill のカテゴリー F に、Neutral は E に Unstable は C～D の間になり，風洞実験は略々1階級安定側に寄っている。

Fig. 6 の σ_y については Unstable がカテゴリー E に，Neutral が F，Stable は F よりも安定側に寄って，略々2階級安定側に位置する。

この風洞実験での σ_y を Pasquill の線図に一致させるためには σ_y を 2.5 倍すると，Unstable は B～C の間，Neutral は C～D の間，そして Stable は D～E の間におさまる。Pasquill の線図が10分間の観測時間をもとにして作られたものであるから，もし σ_y が観測時間の $1/2$ 乗で大きくなるとすれば，今回の風洞実験の結果は 1.6分の大気中での観測時間の現象を再現している。この様に風洞内で観測出来る現象は風洞という区切られた空間によって生ずる制限された渦による現象であり，従って限られた観測時間での現象がシミュレートされるのに止まる。しかしこれは風洞の大型化や風向の変動を適当な方法でシミュレートする事により，解決は可能であると考えられる。

問題は現象のスケールが大きくなると大気中ではコリオリの転向力による影響を考えなくてはならなくなるが，この様な地球の回転に伴う現象は通常の風洞ではシミュレーションは困難である。従ってもしコリオリの力を考慮しなくてはならないのならば，風洞実験でシミュレート出来るスケールの範囲にも限度がある事になる。

3. 国立公害研究所大気環境実験用風洞について

3-1 風洞設計の基本的な考え方

オ2章に示した様な風洞実験の問題点をふまえて，公害研究所では次の様な点に留意して風洞のデザインをおこなった。

(a) 風洞側壁の影響を小さくするため，風洞測定部の断面の大きさを極力大きくする。

(b) 風下方向への Zero Pressure Gradient を満足する様に，測定部の天井高さは可変とする。

(c) 風洞内気流温度，測定部床面温度，および垂直気流温度分布の，それぞれ独立したコントロール機構。

(d) 風洞内風速，および測定部の垂直風速分布の，それぞれ独立したコントロール機構。

(e) (c)，および(d)の機構の独立，および連動機構によって広範囲な大気の安定度がシミュレート出来る機構。

(f) 流れ場，および濃度場の測定を短時間に精度良く出来るための総合システム。

(g) 測定部を出来るだけ有効に使うために，壁面から発達する境界層の除去。しかし，境界層を吸込む場合，吸込み空気量が大きく温度コントロールを乱すため，当風洞ではおこなわない。

3-2 風洞の概略

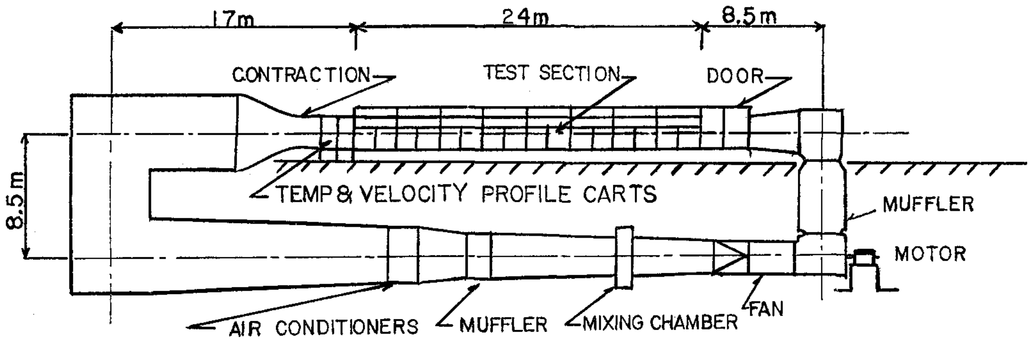


Fig. 7 Side View of the Wind Tunnel

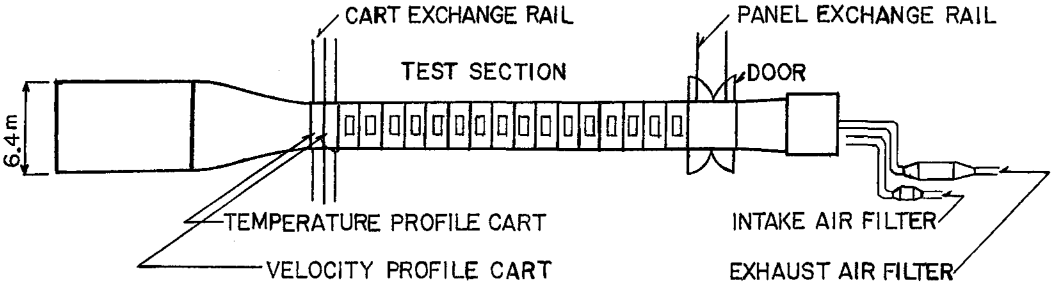


Fig. 8 Top View of the Wind Tunnel

Fig. 7，8 に風洞の側面と立面図を示す。風洞は室内回流型で，測定部上位置の垂直型になっている。回流部を地下に設けたのは，騒音のレベルを下げるためと，風洞内気流の温度コントロールを良くするためである。風洞全体の一般的なデザインについて述べると：

(a) 騒音レベルを測定室で 60 フォン以下にするため，送風機の入口部と下流に消音器が内蔵されている。

(b) 送風機は後置静翼単段軸流式，口径 2,200 mmφ，軸長 3,000 mm，回転数 720 RPM，伝達軸を介して直流電動機（定格出力 70 KW）に直結。電動機はサイリスターレオナードコントロールとする。

(c) 測定部で作られた温度分布や濃度分布を回流部で一様にするため，撹はん機を内蔵している。

(d) 風洞内気流の温度は温度調節器によってコントロールされる。これには 113°C の温水を使い最大 2.47×10^5 Kcal の温水コイルと 7°C の冷水で最大 5.4×10^5 Kcal の冷却能力を持つコイルによっておこなわれる。

気流温度のコントロールは，コイル内の流量を一定とし，流水の温度を変化させる。測定部気流速度 5m/sec の時，気温を 15°c ～ 87°c まで変化させる能力を持っている。

(e) 拡大部での拡がり角は 7度以下で，又，縮流比は 5：1 とする。

(f) 測定部内での温度の垂直分布は床面の加熱，冷却と温度成層用カートによっておこなわれる。

(g) 測定部内での風速の垂直分布は床面の粗度の変化と速度成層用カートによって作られる。

(h) 実験により汚染された空気は活性炭フィルターにより浄化されたのち放出される。

3-3. 測定部

o 測定部の大きさは $2^m \times 3^m \times 24^m$（高さ×幅×長さ）で，$3^m$ 毎のセクション 8 枚から成っている。片側の側面は $1.3^m \times 1.4^m$（高さ×幅）の2重ガラスの 16 枚のパネルよりなり，全長にわたり観測用窓が設けられている。反対側は中央部の 8パネルが観測窓になっている。

o 天井面は測定部風速が 5m/sec の時に生ずる境界層の影響を緩和するための曲線を予じめ持つが，さらにそれよりも ±20cm の範囲で高さ可変となっている。このため天井面は 16 の 1.5m のセクションから成り，そのヒンジ点で上から釣り下げられており，モーターの駆動により高さを変化させられる。

o 測定部に設けられたトラバース装置は X軸 20m，Y軸 中心より±1.1m，Z軸 床面より 1.3^m の範囲で動く。手動の他コンピューターによって位置決めもおこなえるものとする。

o 測定部の床面は様々な実験条件に対応出来る様に 5種類の交換可能なパネルによって成っている。1枚のパネルの大きさは $3^m \times 3^m$。以下に 5種類のパネルを示す。

(1) 冷却・加熱用パネル．8枚のパネルはそれぞれ独立に熱交換器を持ち，加圧温水（113°c）と冷水（6°c）を使う事により，表面温度を 7°c ～ 112°c の範囲で変化出来る機能を有する。但し，測定部風速 5m/sec 気流温度 32°c ～ 87°c の範囲とする。

(2) 地表面粗度変化パネル．このパネルは約 400（20行×20列）の千鳥状に配列されたフィンの風に対する角度を変化させて任意の地表面粗度を得られる様にする。

(3) 地表面ソースパネル．このパネルは風に対して直角に長さ 250cm，幅が 0 ～ 5cm の間で任意に開ける地表面源を持っている。又，風下中心線上に 46点の地表面濃度測定用の穴を有し，2次元的な拡散実験に使われる。

(4) 拡散実験用パネル．これは 6ヶ所よりトレーサーガス放出用の接合部を持ち，又，1000点以上のサンプリングチューブを持っている。

(5) ターンテーブル用パネル．直径 250cm のターンテーブルを持つパネルで外部よりの信号でモーター駆動され，その角度を 200度の範囲で変化出来る。

3-4. 風洞の熱的性能

風洞内の気流温度および温度の垂直分布は温度調節器，測定部の床面の冷却・加熱および温度成層用カート（後述）をそれぞれ独立，又は連動させる事により任意のものが得られる。Fig. 9 に代表的な温度の概略を示す。但し，T_a：Ambient Temperature，T_f：Surface Temperature，$\Delta T = T_a - T_f$

Case 1．$T_a = 87°c$，$T_f = 7°c$，従って $\Delta T = 80°$（最大温度差）

Case 2．$T_a = 32°c$，$T_f = 112°c$，従って $\Delta T = -80°$（最小温度差）。この場合 T_a は 15°c まで必要に応じて下げられる。

Case 3．Case 1 と 2 の中間の様な case で，床面パネルの内 4枚が 7°c に残りの 4枚が 112°c に保たれている状態で，T_a は 15° ～ 87°c の任意の温度が選べる。

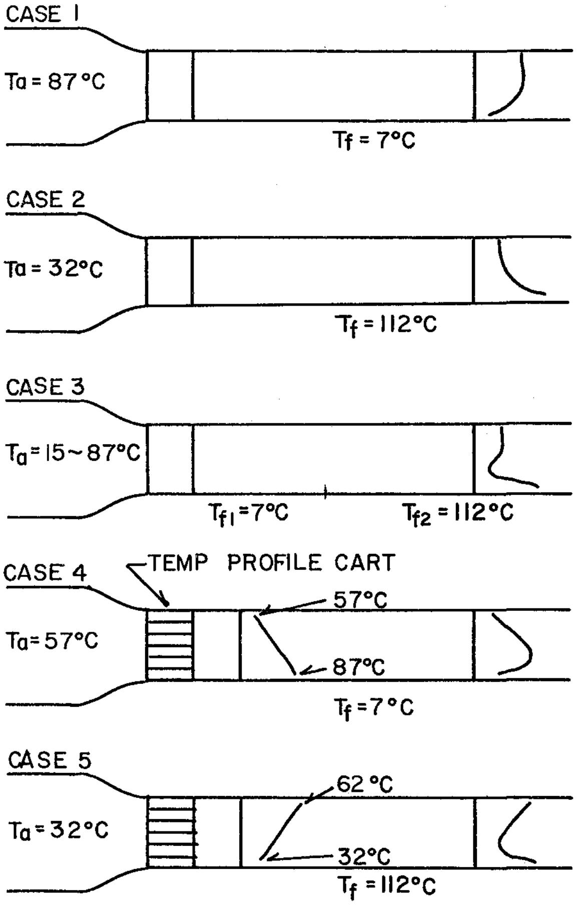


Fig. 9. Temperature Design Specifications

Case 4. 温度成層用カートを使用する。これにより ±30°C/3m の温度差が作れる。このcaseでは不安定成層を作ったもので $T_f = 7°C$ として $\Delta T = 80°C$ に保っている。

Case 5 カートにより安定成層を作った場合で，$T_f = 112°C$ $\Delta T = -80°C$ に保ってある。

<u>温度成層用カート</u>

安定，不安定およびそれらの混合された温度成層を作るために，2m×3m×1.2m（高さ×幅×長さ）の温度成層用カートが必要に応じて測定部入口に設けられる。カートは10cm間隔で20段に分割され，各段には43本の12mmφのヒーズヒーターと，水平方向の温度差補正用の12本のヒーズヒーターが内蔵されている。風速が5m/secの時に気流温度を30°Cだけ上昇出来る機能を持っており，各段はサイリスターにより温度のコントロールが可能である。このカートは坂上教授によりデザインされ，成功をおさめている。

3-5 流体力学的性能

測定部内での風速は送風機の回転数とダンパーの開度の制御により，0.1m/sec～10.0m/secまで連続可変とする。但し速度成層，温度成層用カートが使用されている場合は最高風速は5.0m/secとする。測定部入口での速度分布の一様性は1%以内の誤差とし，乱流強度は0.5m/sec以上の風速で0.5%以下とする。外部からの空気の侵入を防げるため，測定部は正の圧力を持つものとする。

<u>速度成層用カート</u>

各種の速度分布が必要な場合，速度成層用カートを測定部入口に設ける。その大きさは2m×3m×1.2m（高さ×幅×長さ）で，温度成層用カートと連動して使われる場合は，温度成層カートの後部に位置する。カートは10cm間隔で20段にわかれ，各段には3枚の9.2mm×300mmのプレートにそれぞれ20cmのスリットが10cmの間隔で切ってあるものを内蔵する。このプレートの内2枚をすりあわせる様に動かし，気流の通過断面積を変化させる事により流速を変える。各段は外部より独立にコントロールされ，直線，対数，指数のジェットなどの風速分布が得られる。この方式は佐藤浩教授により開発され，さらに同時に温度成層用カートも使って各種の安定度を持つ速度，温度分布が作られている。

3-6. 計測機器

当風洞には計測機器として,風速,圧力,温度,湿度,トレーサーガスの濃度を測定する機器を備えつける。

速度場の測定

(1) 温度補償型の超音波風速計(測定部風速のモニター用) (2) ピトー管とバラトロン

(3) 熱線風速計 3セット (DISA) (4) 2カラー レーザ流速計 (DISA) (5) 振動式微風速計 (DISA)

温度場の測定

気流の温度の測定には熱線風速計を Cold Wire として使う。床面の温度分布や温度成層用カート下流での鉛直温度分布はサーモカップルと多点データー集録システム (リニアライザー, A-D変換器内蔵) によって集録される。

濃度測定

トレーサーガスとしてエタンガスを使う場合には2台の全炭化水素計 (ベックマン社) を使う。その他にガス質量分析計 (多重イオン検出器付き) により SF_6, CF_4, および2種類のフレオンガスの4種類のトレーサーガス濃度の同時観測がおこなえる。

3-7 データー解析

データーの解析はミニコンピューター, 相関確率器, スペクトラム アナライザー によっておこなわれる。温度成層内での流れ場の測定のために, 高速入力用として 34チャンネル以上, 10^{-4} sec, 同時刻の取り込みと, 通常入力用として 40チャンネル, 10^{-3} sec 以上の取り込みの2系統を持っている。ミニコンピューター 32KW, ディスク2台 M.T. 1台, 紙テープ入・出力, タイプライター, カラーディスプレー, X-Y プロッター 等のシステムにより, 出来るだけ実験, 測定, 解析が自動化される様になっている。

4. まとめ

国立公害研究所では従来の風洞実験での結果を参考にして,新たに大型の大気環境実験用風洞をデザインした。多様な大気中での拡散現象を再現するためには,風洞に要求される性能は多く,全てを満足する事は出来ない。今回の風洞は特に *Thermal Stratification* の影響を考慮してデザインされた。しかしながら,例えば成層カート後の乱れ,攪はん器の性能,さらに成層の作り方等まだまだ解決しなくてはならない問題は残されている。

おわりにあたり当風洞のあり方について3年にわたり調査.研究をしていただきました 坂上治郎, 佐藤浩, 井上力太, 竹内清秀, 小橋安次郎, 長州秀夫, 岡本哲史, 小沢行雄, 恩田善雄, 遠藤浩 先生方に感謝いたします。

J. C. Kaimal, J. C. Wyngaard, Y. Izumi and O. R. Coté, "Spectral Characteristics of Surface Layer Turbulence" Quat. J. Roy. Meteor. Soc., 98, 1972, 563-589.

日本気象協会 "大型大気環境実験施設に関する調査研究 最終報告書" 1969

Y. Ogawa, R. Griffiths, and W. G. Hoydysh, "A Wind Tunnel Study of Sea Breeze Effects" Boundary-Layer Meteorology 8, 1975, PP. 141-161.