

## 話題提供 旅客機開発と高レイノルズ数風洞試験

柴田 眞 (JAXA 風洞技術開発センター客員研究員)

**High Reynolds Number Wind Tunnel Testing for Development of Airliners  
Makoto Shibata (JAXA Wind Tunnel Technology Center)**

## ・ なぜ高レイノルズ数風洞試験が必要か

航空機の開発に、なぜ高レイノルズ数の風洞試験が必要なのかと聞かれたとき、どう答えるべきでしょうか。多くの人員と莫大な費用がかかるようになって、新しい航空機を開発する機会は、これからますます少なくなっていくと思います。この貴重な機会を生かすためには、「最善の開発試験をして最高の製品を作り出す」というのが開発の基本方針でなければなりません。とりあえずこのように答えることにして、今日は、このことの技術的背景について話題提供をしたいと思います。

## ・ 初飛行前に高レイノルズ数風試を実施した A380

いちばん新しい旅客機は 2005 年 4 月 27 日に初飛行した A380-800 で、いま型式証明を取得するための飛行試験中です。史上最大の旅客機エアバス A380 は、基本設計には間に合わなかったものの、初飛行前に高レイノルズ数の風洞試験を実施した最初の機体になりました。ETW(European Transonic Windtunnel)の建設、Initial Operation Phase、そして Client Testing Phase が何とか時期的に整合して、全機風試と半裁風試を実施することが出来たのです。1/50 模型の全機風試は巡航形態の試験、1/33 模型の半裁風試は離着陸形態の低速試験です。

## ・ 写真で見る A380 の細部空力形状

基本設計には間に合わなかったわけですから、設計への反映は細部形状になります。雑誌を買ってきて A380 の写真を眺めていると、なかなか興味深い細部形状に気がしますが、ETW における風洞試験が役立っているのかもしれません。この件に関しては旅客機が成熟した工業製品であって、基礎形そのものは 36 年も前の 1969 年に初飛行した B747 と変わらないという技術的背景があります。旅客機的设计はいまや tweak の世界だと表現した人がいます。口語の tweak は、人の耳や鼻などをちょいとひねったり、つねったりすることですが、ボーイング B707 とエアバス A340 の三面図を持ってきて、平面形を重ねてみて下さい。両者には初飛行で 34 年の開きがあります。

- ・ 低温の高レイノルズ数風洞の原理

低温風洞にはふつう液体窒素を用います。窒素の液化温度は 77K ですが、ふつうは 105K ぐらいが低温側の運転限界と思ってよいでしょう。気体は低温になると粘性係数が小さくなり、かつ密度も大きくなるので、サラサラ流れるようになります。でもこれだけでは不十分なので、風洞をかなり高压化してやる必要があります。低温だと音速が下がるので、あるマッハ数に対する実際の風速は遅くて済み、風洞動力が常温の風洞より小さいもので成立するという特長があります。

- ・ B777 の風洞試験の実施例

航空機は実機が完成して量産段階に入っても、いろいろな風洞試験を実施し、改良や発展の道を探るのがふつうです。たとえばボーイング B777 は初飛行して 3 年後の 1997 年に、NASA との共同研究として NTF(National Transonic Facility)で風試を実施しています。この共同研究の目的は **How much Reynolds number is enough?** という質問に答えることだと表現されています。それでどうだったの? と聞かれると、こんばん徹夜しても終わらないことになるでしょう。ここでは一番重要なこと、すなわち十分な風試レイノルズ数というのは、空力現象ごとに、そして機体ごとに違うとだけお答えしておきます。複数の風洞試験の結果を総合し、そして最近では CFD の結果も加えてどう判断するか、これが空力設計者の腕の見せ所だと思います。

- ・ 巡航時と離着陸時のレイノルズ数

レイノルズ数は飛行速度の一次関数です。でもその勾配が巡航高度と航空機が離着陸する低空とでは大きく違います。たとえば対流圏界面 36089ft に対して Sea Level では、勾配が 3 倍にもなってしまいます。これはある風洞を想定すると、離着陸形態用の模型は巡航形態用の模型の 3 倍の大きさにする必要があることを意味します。半裁にして模型縮尺を倍にして対応できる程度を越えていますし、さらに半裁模型は試験技術上の制約もあって、必ずしも全機模型の倍の縮尺に出来るとは限りません。この意味においては、半裁模型に過大な期待をかけないほうが良いでしょう。

- ・ 加圧型の大型低速風洞の原理

高揚力装置の局所流速はかなり高いので、離着陸形態の試験でもマッハ数を合わせなければならぬことはよく知られています。離着陸形態の高レイノルズ数試験は、低温風洞で実施する場合（ふつう半裁模型を用いる）と、加圧型の大型低速風洞で実施する

場合とがあります。B777 では研究的に NTF における半裁風試と Ames 12ft における全機風試と両方を実施しています。このところ旅客機の高揚力装置設計においては、空力性能だけでなく音響特性も非常に重要な設計要素となってきました。しかし静粛化した加圧型の大型低速風洞は、世の中に存在しないようです。これから計画するのであれば静粛化することが必要で、そのためには **How much back-ground-noise dB is enough?** という問いに答えなければなりません。

- ・ これからの旅客機開発と風洞

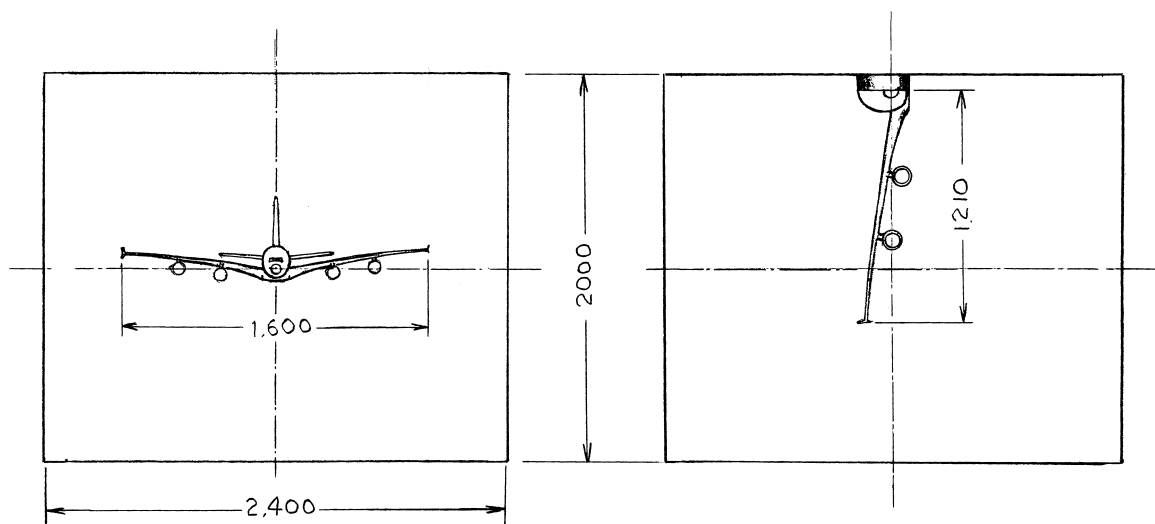
ボーイング B787 およびエアバス A350 は、基本設計段階から高レイノルズ数風試を実施した最初の例になるでしょう。残念ながら現時点では、わが国は具体的なことを知る立場にありませんが、旅客機の開発手法そのものに影響するようなことが出てくるかもしれません。風洞を中心として技術者や研究者が集まっているということが、大型設備としての風洞の特徴です。風洞と彼らこそが航空機の最も重要な基盤技術といえるでしょう。必要ならば外国の風洞を使えば良いという問題ではありません。「わが国がこれからも航空機開発を志すのであれば、高レイノルズ数風洞を保有することは必須である」ことを強調して、本日の話題提供とします。みな様方の活発なご議論をお願いしたいと思います。

- ・ 参考資料

- 1) AIAA-2000-4220, “High Reynolds Number Studies of a Boeing 777-200 High Lift Configuration in the NASA ARC 12’ Pressure Tunnel and NASA LaRC National Transonic Facility”, F. M. Payne, et al.
- 2) AIAA-2001-0909, “Reynolds Number Effects on a Subsonic Transport at Transonic Conditions”, D.Om, et al.
- 3) AIAA-2002-0420, “Investigation of Transonic Reynolds Number Scaling on a Twin-Engine Transport (Invited)”, M. M. Curtin et al.
- 4) 「高レイノルズ数低温風洞について」澤田、青木 航空宇宙学会誌 1994 年 1 月

以上

$$\text{半裁/全機} = 1210 \times 2 / 1600 = 1.51$$



$$\frac{1600}{2400} = 0.67$$

全機風試 1/50 模型

$$\frac{1210}{2000} = 0.605$$

半裁風試 1/33 模型

図1 A380 風試 実施例 — ETW

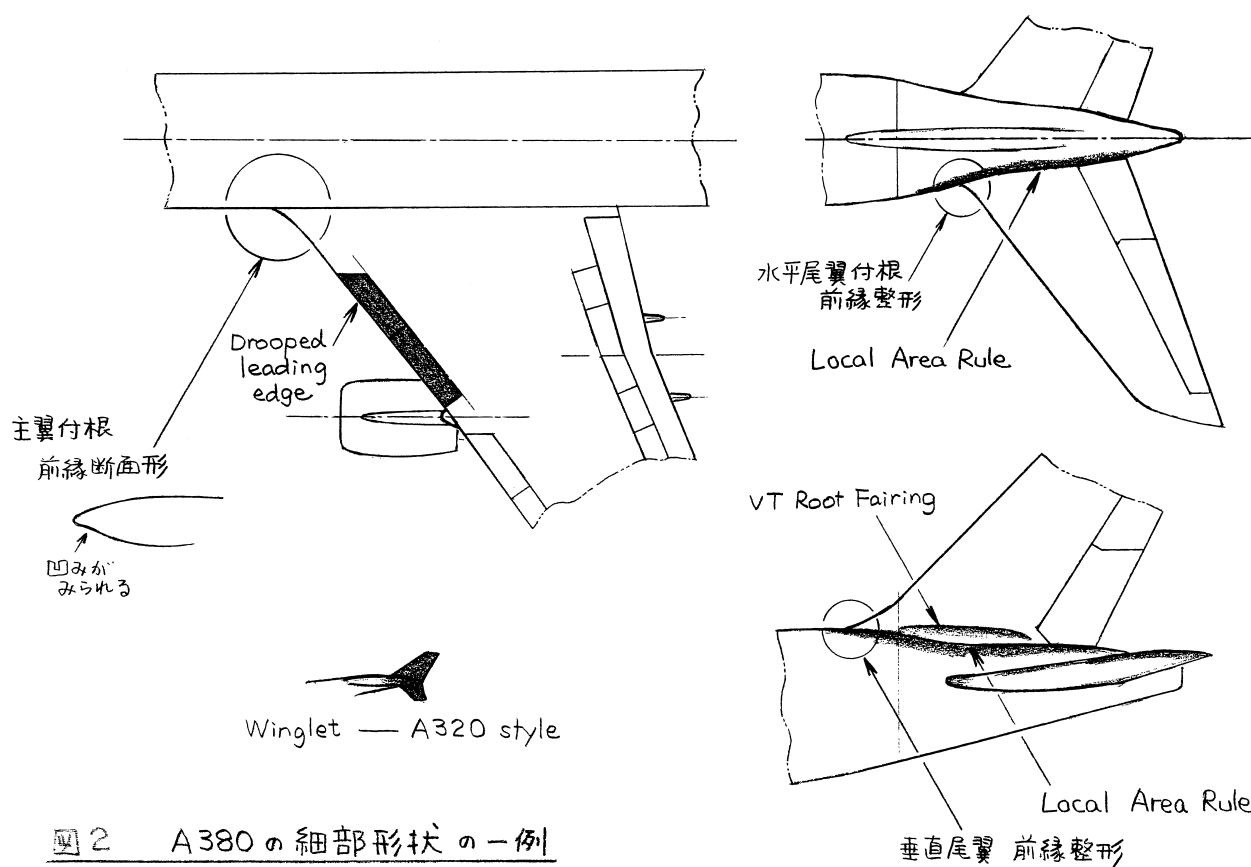


図2 A380 の細部形状 の一例

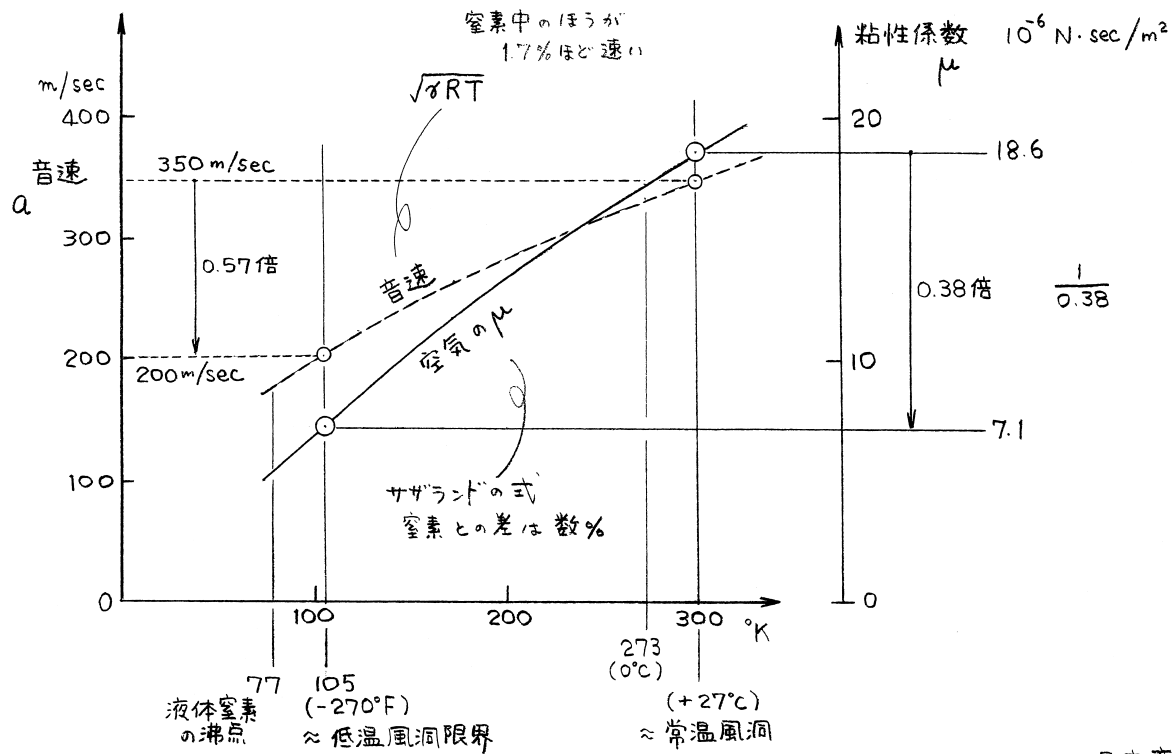


図3  $\mu$  と  $a$  の温度変化

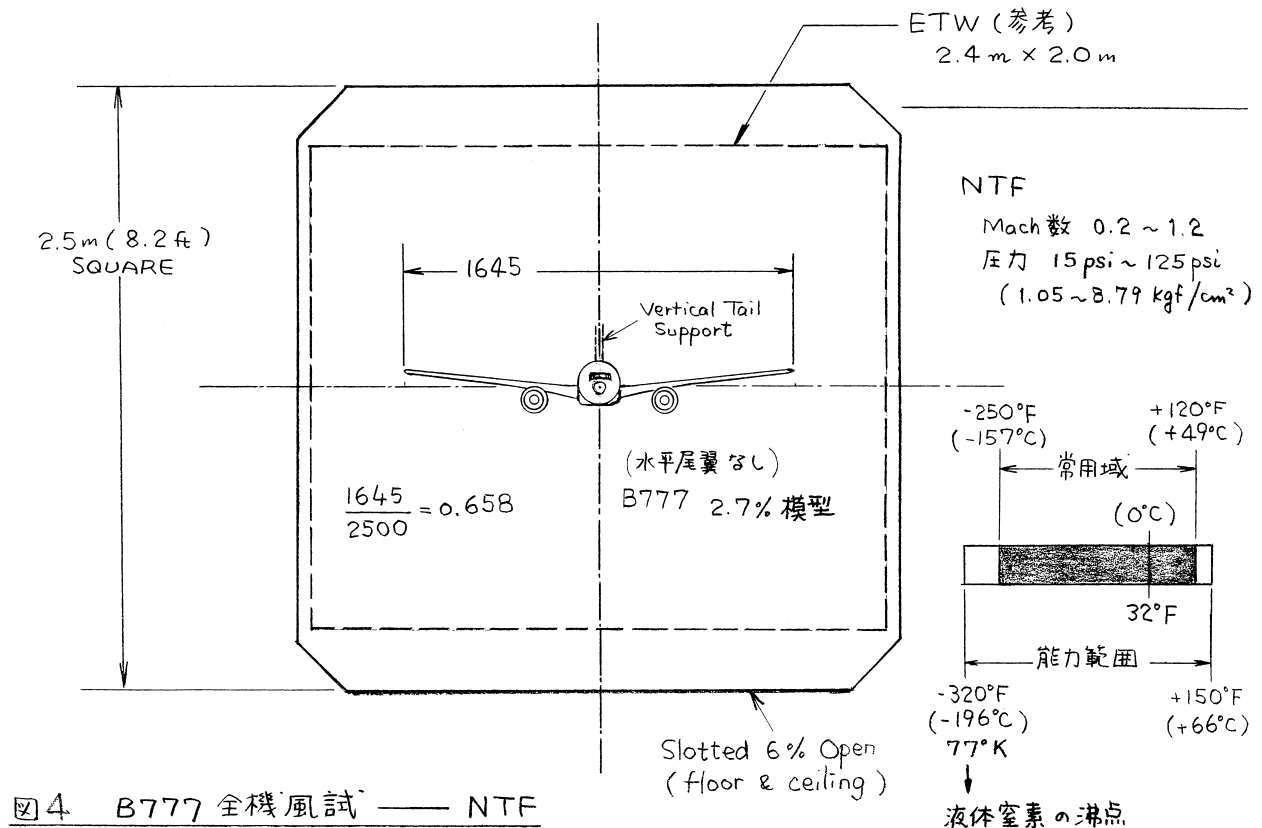


図4 B777 全機風試 — NTF

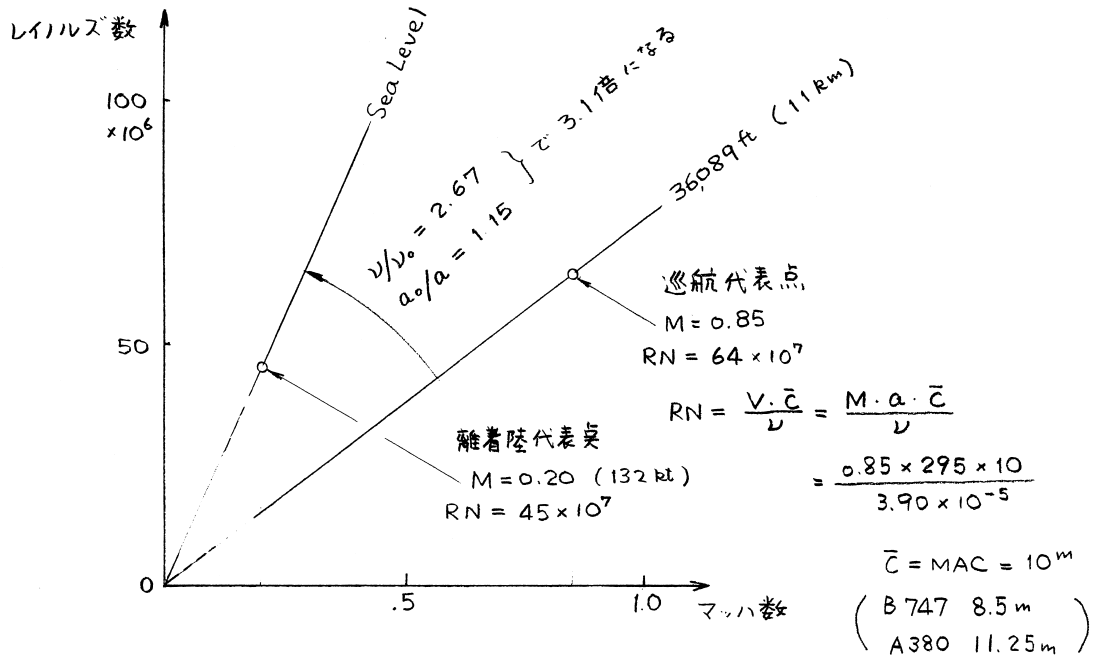
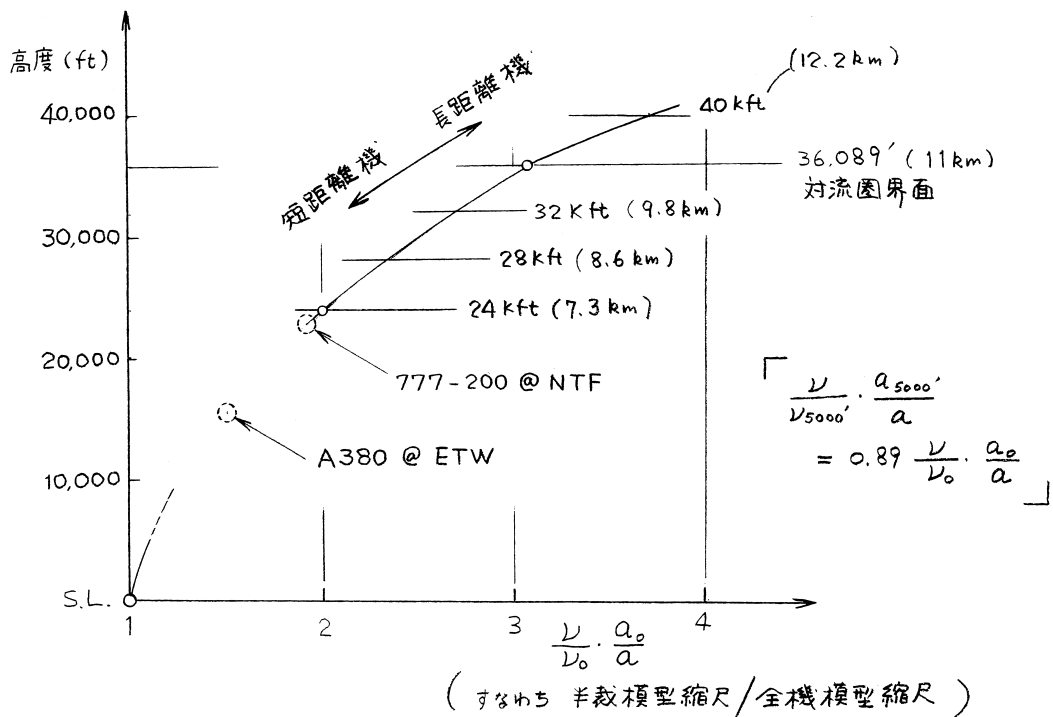


図5 巡航時と離着陸時のレイノルズ数

図6 巡航高度による  $\frac{v}{v_0} \cdot \frac{a_0}{a}$  の変化

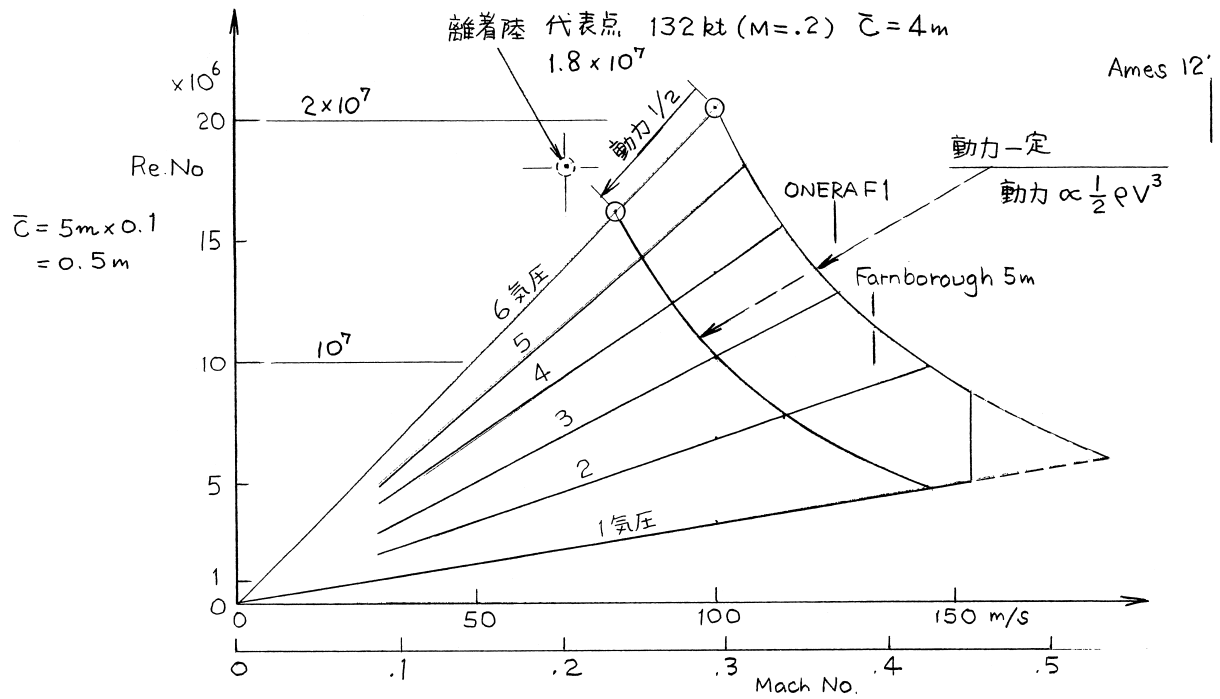


図7 加圧型 大型低速風洞のレイノルズ数

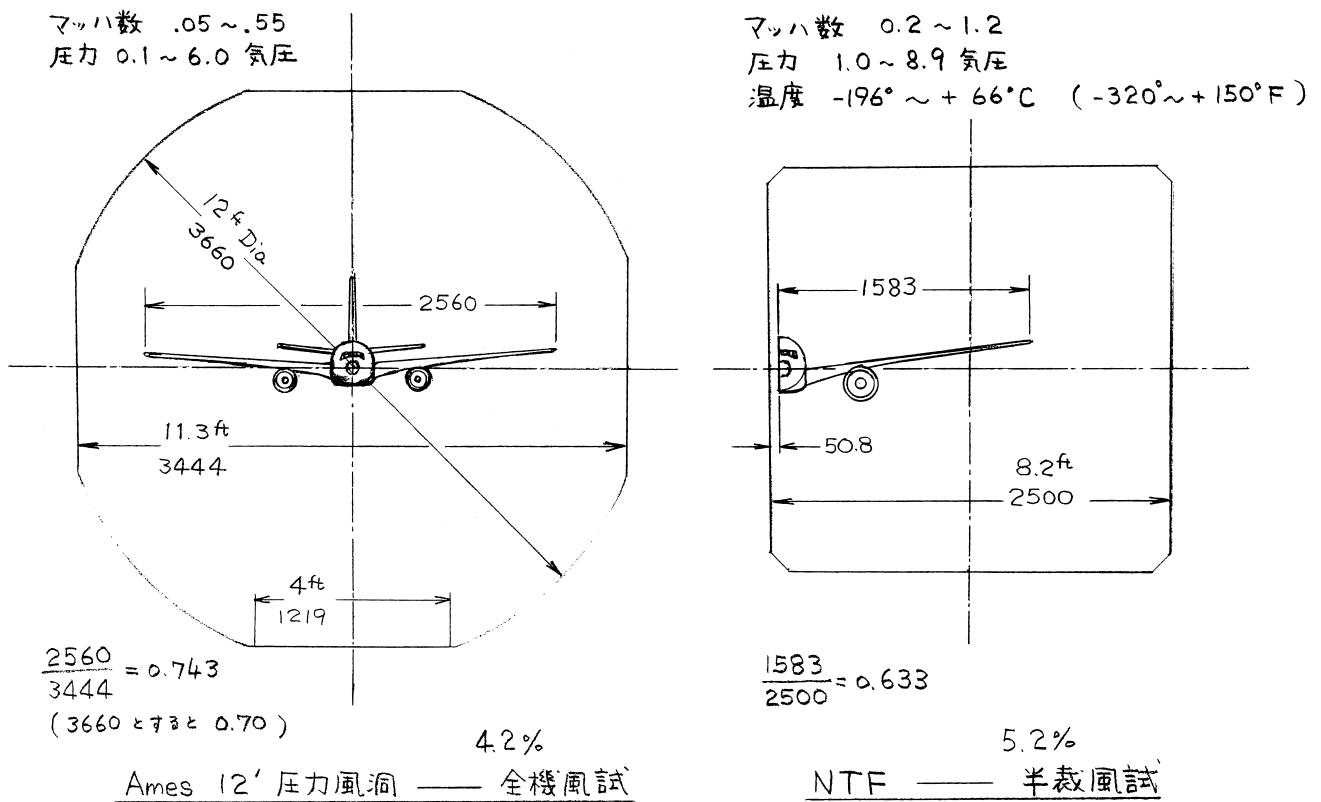


図8 B777 離着陸形態 風試実施例