

# JAXA6.5m × 5.5m 低速風洞の気流特性について

青木 良尚、伊藤 健、星野 秀雄、室田 勝一、野中 修 (JAXA)  
真城 仁、遠藤 亮 (HRI)

## Flow Characteristic of the JAXA 6.5- by 5.5-m Low Speed Wind Tunnel

Aoki yoshihisa, Ito takeshi, Hoshino hideo, Murota katsuichi, Nonaka osamu (JAXA)  
Mashiro jin, Endo ryo (HRI)

### 概 要

JAXA6.5m × 5.5m 低速風洞標準模型試験で、ゼロ横滑り角において有意な横揺れモーメントが発生した。この原因として測定部に非一様な迎角方向の気流偏流分布が存在することが疑われた。5孔ピトー管を使って測定部の迎角方向気流偏流分布を測定したところ、風洞中心水平面に非一様な迎角方向気流偏流分布を確認し、この偏流分布の原因の一つが送風機で発生した旋回流と第4コーナーベーンとの相互作用であることが分かった。

#### 1. 初めに

JAXA6.5m × 5.5m 低速風洞標準模型試験で、ゼロ横滑り角において有意な横揺れモーメントが発生した。この原因として測定部に非一様な気流偏流分布が存在することが疑われた。支持装置が必要であるが X 型熱線風速計などと比較して取り扱いが容易な 5 孔ピトー管を使い、気流偏流角の絶対値を測定する方法<sup>1)</sup>を応用して測定部の迎角方向気流偏流分布（以降、迎角方向を省略）を測定してこれを確認した。また、この非一様な偏流分布の原因について検討を行ったので報告する。

#### 2. 気流偏流角測定方法

##### 2. 1 5 孔ピトー管による気流偏流角測定

ある角度を基準とした気流偏流角絶対値を測定する方法<sup>1)</sup>を用いて気流偏流角を測定すると同時に 5 孔ピトー管の校正を行い、気流偏流角絶対値と 5 孔ピトー管上下圧力孔出力圧に関する校正式を導き、この式から気流偏流角を計算した。

5 孔ピトー管を、順方向で一様流方向に対して迎角を  $\alpha_s$  だけ傾けた状態を図 1 に示す。ここで、 $\alpha_d$  を 5 孔ピトー管迎角  $0^\circ$  に対する一様流の気流偏流角、 $\alpha_p$  を 5 孔ピトー管のオフセットと 5 孔ピトー管中心軸方向との成す角とする。図 1 より、順方向での 5 孔ピトー管で実際に観測される角度  $\alpha_+$  は、

$$\alpha_+ = \alpha_p + \alpha_s + \alpha_d \quad \text{式 (1)}$$

同様に、順方向からロール角を  $180^\circ$  回転した逆方向での 5 孔ピトー管で実際に観測される角度  $\alpha_-$  は、図 2 より、

$$\alpha_- = -\alpha_p + \alpha_s + \alpha_d \quad \text{式 (2)}$$

次に、圧力孔 1 の圧力を 5 孔ピトー管で測定された動圧で無次元化した値を  $P_1$ 、圧力孔 2 の圧力を圧力孔 1 と同様に無次元化した値を  $P_2$  とすると、 $P_2 - P_1$  は  $\alpha_+$  あるいは  $\alpha_-$  に比例する。したがって、順方向での出力  $P_+ = P_2 - P_1$  は、

$$P_+ = \alpha_+ A_+ = (\alpha_p + \alpha_s + \alpha_d) A_+ \quad \text{式 (3)}$$

となる。ここで、 $A_+$  は比例定数である。同様に、

$$P_- = \alpha_- A_- = (-\alpha_p + \alpha_s + \alpha_d) A_- \quad \text{式 (4)}$$

となる。ここで、 $P_+$  を 0 とする  $\alpha_s$  を  $\alpha_{s+}$ 、 $P_-$  を 0 とする  $\alpha_s$  を  $\alpha_{s-}$  とすると、式 (3)、式 (4) より、

$$\alpha_{s+} = -\alpha_p - \alpha_d \quad \text{式 (5)}$$

$$\alpha_{s-} = \alpha_p - \alpha_d \quad \text{式 (6)}$$

となる。したがって、式 (5)、式 (6) より、5 孔ピトー管オフセット角  $\alpha_p$  と気流偏流角  $\alpha_d$  に関する連立方程式

を解くと、

$$\alpha_p = -\frac{\alpha_{s+} - \alpha_{s-}}{2} \quad \text{式 (7)}$$

$$\alpha_d = -\frac{\alpha_{s+} + \alpha_{s-}}{2} \quad \text{式 (8)}$$

となる。以上より、図3のようになる。式(7)、式(8)から5孔ピトー管迎角 $0^\circ$ に対する気流偏流角を測定するための5孔ピトー管校正式を作る。例えば $P_+ = P_2 - P_1$ と5孔ピトー管迎角との関係式が、

$$P_+ = \alpha_s A_+ + B_+ \quad \text{式 (9)}$$

と得られたとする。この時、実際に測定を行ったときの5孔ピトー管迎角 $0^\circ$ に対する一様流の気流偏流角絶対値を $\tilde{\alpha}$ 、その時の5孔ピトー管迎角測定値を $\alpha$ として式(9)と対応させると、

$$\alpha_s = \tilde{\alpha} - \alpha_d + \alpha \quad \text{式 (10)}$$

したがって、

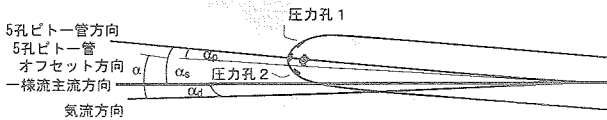


図1 順方向での角度の関係

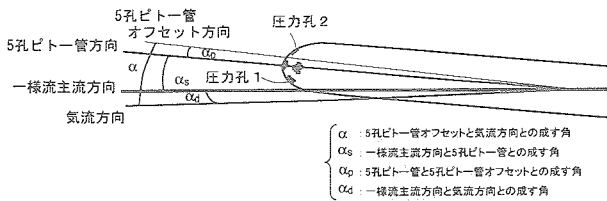


図2 逆方向での角度の関係

- $\alpha$  : 5孔ピトー管オフセットと気流方向との成す角
- $\alpha_s$  : 一様主流方向と5孔ピトー管との成す角
- $\alpha_p$  : 5孔ピトー管と5孔ピトー管オフセットとの成す角
- $\alpha_d$  : 一様主流方向と気流方向との成す角

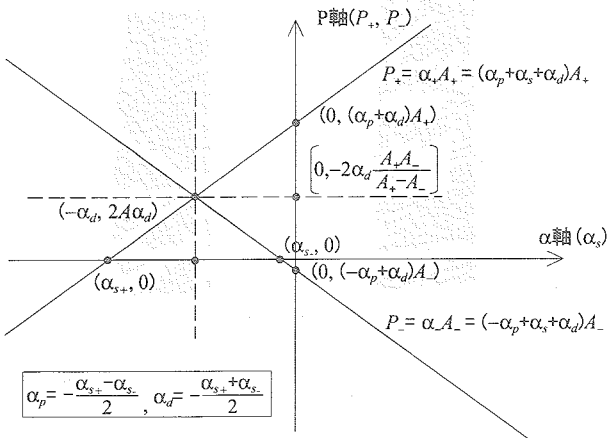


図3  $\alpha_s$ を変化させた時の $P_+$ 、 $P_-$ のグラフ

$$P_+ = (\tilde{\alpha} - \alpha_d + \alpha) A_+ + B_+ \quad \text{式 (11)}$$

式(11)より、校正時の気流偏流角 $\alpha_d$ と、偏流角測定時に5孔ピトー管上下圧力孔出力圧測定値から求めた圧力係数の差 $P_+$ から、5孔ピトー管迎角 $0^\circ$ に対する一様流の気流偏流角絶対値 $\tilde{\alpha}$ を以下の式のように求めることが出来る。

$$\tilde{\alpha} = \frac{P_+ - B_+}{A_+} + \alpha_d - \alpha \quad \text{式 (12)}$$

同様にして $P_-$ の場合は、

$$P_- = (\tilde{\alpha} - \alpha_d + \alpha) A_- + B_- \quad \text{式 (13)}$$

$$\tilde{\alpha} = \frac{P_- - B_-}{A_-} + \alpha_d - \alpha \quad \text{式 (14)}$$

となる。

## 2.2 迎角調整機能追加アダプタ

前記の方法によって気流偏流角を測定するためには、校正時に5孔ピトー管の迎角を調整し、その時のある基準角に対する迎角の値を測定できなくてはならない。図4に示すトラバース装置には迎角の調整や迎角を測定する機能は付いていないので、これらの機能を追加するためのアダプタを作成した(図5)。このアダプタを用いると迎角を連続的に調整する機能や迎角を測定する機能を追加できるほか、内部に傾斜計を搭載しているため支持装置のたわみによる迎角測定値の誤差の影響を小さくできるという利点がある。今回の気流偏流角測定はこのアダプタに5孔ピトー管を取り付け、これを支持装置に取り付けて行った。

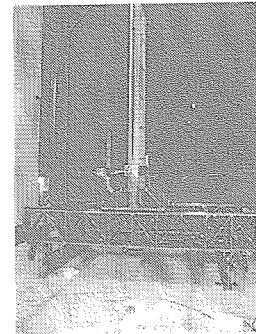


図4 トラバース装置

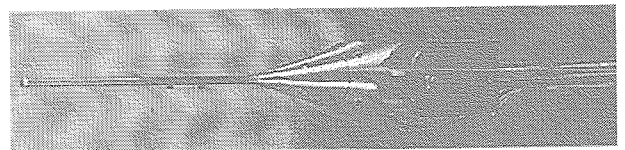


図5 迎角調整機能追加アダプタ

### 3. 測定精度

#### 3.1 トラバース装置が気流に与える影響

今回の試験で使用したトラバース装置は台座部分がトラス構造ではあるが大きく、このブロッケージによって測定部の気流偏流角が変化してしまうこと懸念された。この影響を確認するために、トラバース装置と比較して気流に与える影響が小さい移動支柱(図6)に迎角調整機能追加アダプタと5孔ピトー管を取り付けて測定を行い、同位置での気流偏流角測定値を比較した。

測定位置は、主流方向はターンテーブル中心位置、横方向は風洞中心位置にあたる0mmと下流側から見て測定部幅の右4分の1位置にあたる875mmの位置、高さは風洞底面から1800mmの位置である。風速が40m/sにおける比較結果を図7に示す。結果から、これらの位置ではトラバース装置のブロッケージによって0.2°程度の向上きの気流偏流が生じることが分かった。他の高さでは0.2°程度という値とは異なった影響が生じている可能性もあるが、水平面に関しては気流偏流角の変化量はほぼ一定であるので、水平面に関しては相対的な比較が可能であることが分かった。以上より、トラバース装置により測定部気流偏流角測定値に誤差を与えることがわかったが、同一水平面での相対的な比較は可能であるので、測定効率を考えてトラバース装置に5孔ピトー管を取り付けて測定する方法を採用した。

#### 3.2 計測系やデータ処理による影響

計測系やデータ処理による影響を検討するために、不確かさの解析<sup>[2,3]</sup>を使用した。不確かさの解析とは、計測値が正規分布を取ると仮定して95%の確率で計測値の真値が入ると予想される範囲を統計学的に推算する解析方法である。また、この時の範囲を95%信頼度区間と言う。

この試験で考慮した誤差要因は以下のとおりである。

圧力計測に関する誤差要因：

1. センサの校正誤差
2. 校正圧力発生器の校正圧誤差
3. 圧力測定値のばらつき

角度計測に関する誤差要因：

1. センサの校正誤差
2. 傾斜計校正装置の設定角度誤差
3. 角度測定値のばらつき

気流偏流角計算に関する誤差要因：

1. 5孔ピトー管校正誤差

以上の誤差要因を考慮して気流偏流角の測定精度を計算し、全測定点における測定精度を風速毎に平均した値を表1に示す。圧力センサの測定精度に対して測定圧力が高くなるので、風速が高くなるにつれて偏流角の測定精度も向上するという妥当な結果が得られた。また、風速40m/sで±0.126°程度の測定精度があるという結果から、このオーダーで測定部気流偏流角の分布を議論できることが分かった。

表1 風速毎の全測定点 95%信頼度区間平均値

風速 [m/s]	95%信頼度区間の平均値 [deg]
20	0.423
40	0.126
50	0.117

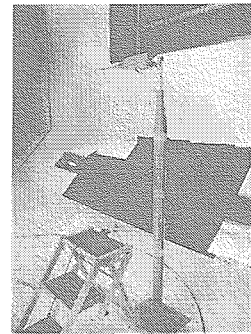


図6 移動支柱

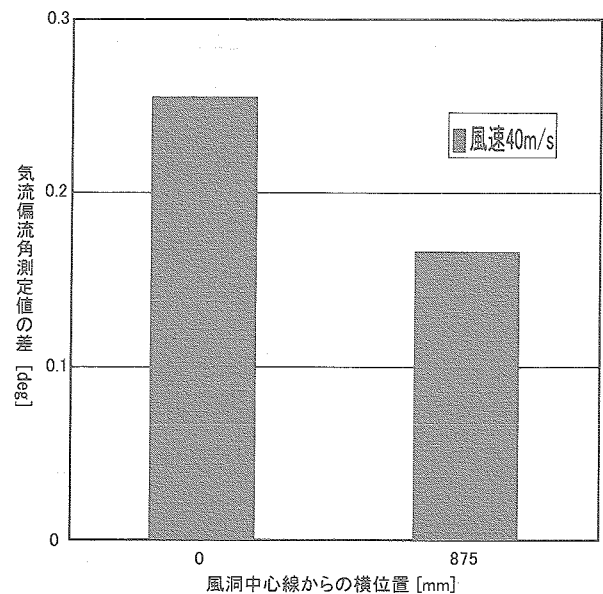


図7 トラバース装置による偏流計測値への影響 (トラバース装置計測値－移動支柱計測値)

#### 4. 測定部気流偏流分布測定結果

測定部の気流偏流分布を確認するために、風速40m/sにおいて気流偏流角の測定を行った。測定位置は、主流方向はターンテーブル中心位置、横方向は風洞中心から±1000mmの範囲を50mmおき、高さは風洞中心に当たる風洞底面から3250mmの位置である。測定範囲を図8に、平均値を基準とした測定結果を図9に示す。図9における縦の直線はエラーバーと呼ばれ、95%信頼度区間を表す。

図9から、この測定範囲には分布の幅としては小さいが測定誤差以上の非一様な気流偏流角分布が存在することを確認できた。この原因として考えられるのは、風洞本体のどこかで気流偏流を生む要因があり、これが測定部の気流偏流分布に影響を与えている可能性がある。これについての検討は5章で行った。また、下流側から見て風洞中心から右側の平均偏流角の平均値は $-0.154^\circ$ 、

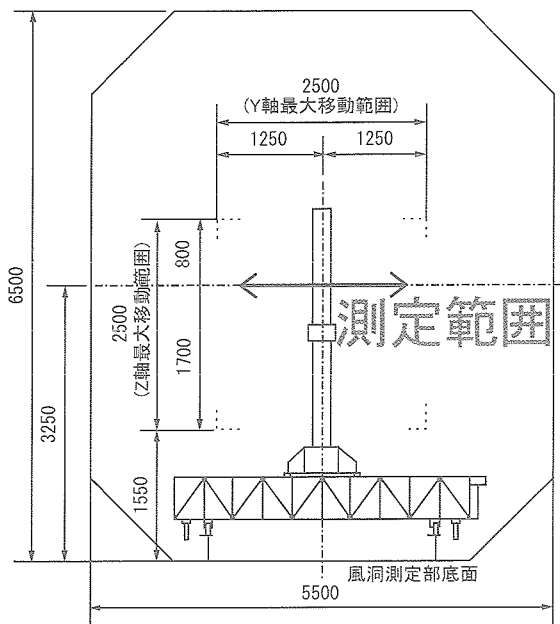


図8 測定部気流偏流の水平分布測定範囲

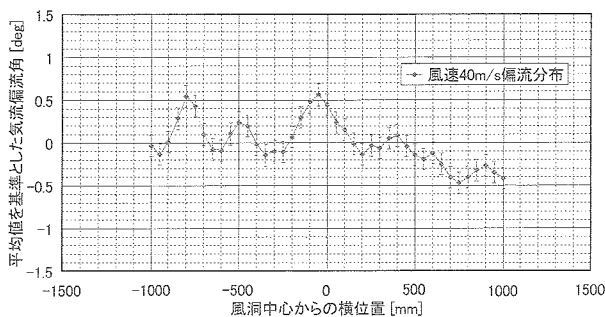


図9 平均値を基準とする迎角方向測定部気流偏流分布測定結果

左側では $0.132^\circ$ となるため、1章で述べた標準模型のゼロ横滑り角におけるローリングモーメントの方向と一致し、この平均値を用いたローリングモーメント係数概算値ともオーダーが一致するので、気流偏流角分布の非一様性が原因の一つである可能性が高い。ただ、模型形状の非一様性に関するデータの取得は行っておらず、トラス装置による影響も確定していないため、この測定における偏流分布の非一様性が単純に全機6分力測定値に影響を与えるかどうかは定かではなく、このような概算が有効であるかどうかを含めて今後の検討課題である。

#### 5. 偏流分布の原因の検討

##### 5.1 概要

4章で確認した気流偏流分布の非一様性から、風洞本体が気流に対して何らかの影響を与えていることが予想された。この風洞は送風機で風を起し、ここで生じた旋回流を静翼で押さえ、コーナーベーンを通過、流れの遅い整流胴内において整流格子と整流金網で整流し、さらに縮流胴で整流するとともに風速を上げて測定部に流す。従って、一般的には整流格子以前に生じた偏流分布はこれらを通する間に一様な分布となるはずであるので、測定部における偏流分布の原因は整流格子の形状の非一様性や整流金網の目詰まり、縮流胴で生じた流れの剥離が測定部の気流に影響を与えていることなどが考えられた。しかし、送風機旋回流や回流式風路、コーナーベーンの影響のような整流格子以前に生じた偏流が影響を与えている可能性もあるので、これらも非一様な偏流分布が生じる原因となり得る。今回は、金網の目詰まりの影響と整流格子以前に生じた偏流の影響について検討するための試験を行い、非一様な偏流分布の原因について検討した。金網の目詰まりの影響を5.2節で、整流格子以前に生じた偏流の影響を5.3節で、4章の測定位置における偏流分布の原因に関する検討を5.4節で述べる。

##### 5.2 整流金網の目詰まりの影響

整流金網は時間が経つにつれて送風機から漏れた油や空気中の埃、様々なゴミが付着するために気流の流れやすさに非一様な分布が生じ、気流偏流角が生じる原因となる可能性がある。今回、整流金網の清掃を行い金網清掃前後で風速40m/s、同位置における気流偏流角のデータを取得し、この影響を検討した。比較のための測定位置は、主流方向はターンテーブル中心位置、横方向は風洞中心を原点として下流側から見て右側を正とした時に0mm、±400mm、±875mm、±1100mmの位置、高さは風洞中心に当たる風洞底面から3250mmと3348mmの位置である。金網清掃前後での偏流角の比較を図10に示す。

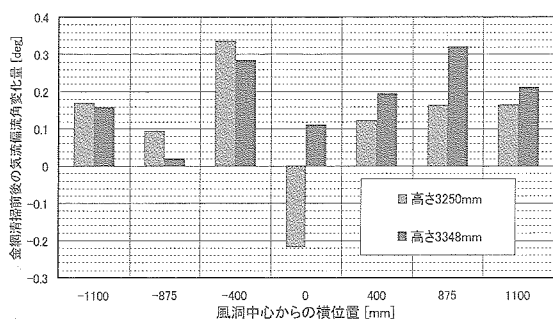


図10 金網清掃前後での偏流角比較 (金網清掃前-金網清掃後)

図10から整流金網の目詰まりは気流偏流角が上向きの方向に影響を与える傾向があることがわかった。これは、重力の影響で整流金網の下側に埃などが集まりやすく、これがブロッケージとなるためであると考えられる。水平面での偏流角の変化量も高さ3250mmの測定結果では横位置0mmを除いて大きな違いはないため、左右半分のデータから計算した偏流角平均値の違いの原因ではないと言える。高さ3250mm、横位置0mmでの偏流角変化量が他の変化量と比べて傾向の違いが目立つが、測定値の再現性も確認できており、この原因については不明である。以上より、整流金網の目詰まりは測定部偏流角が生じる原因となるため、定期的にこの清掃を行わなくてはならないことが分かった。偏流角補正や整流金網の清掃を行うタイミングを決めるために、定期的に気流偏流分布を測定してデータを蓄積していく必要がある。

5. 3 整流格子以前に生じた偏流の影響

整流格子以前に生じた偏流が測定部の偏流分布に与える影響を検討するために、送風機で生じる旋回流が測定部偏流分布へ与える影響を確認する試験を行った。この低速風洞の風速設定は、送風機の回転数と動翼ピッチの2つのパラメータを調節して行うため、同じ風速でも様々な組み合わせができる。また、送風機で生じる旋回流による流れ場は一般的にプロペラ後流の流れ場の相似パラメータとして使われる進行比で決まる。進行比とはプロペラ回転数を進行速度で割った値である。ここでは、進行比として送風機の回転数を測定部風速で割ったものを用い、風速40m/sで進行比0.21、0.27、0.33、風速50m/sで進行比0.27の条件で主流方向はターンテーブル中心位置、横方向は風洞中心から±500mmの範囲を100mmおき、高さは風洞中心に当たる風洞底面から1600mmから2050mmの位置を50mmおきに2次元偏流分布の測定を行い、測定値の相関係数をとり進行比の違いが偏流分布に影響を与えるかどうかを確認した。また、4章と同様

の位置を風速40m/sの上記の条件において偏流分布の測定を行った。図11に2次元偏流分布測定結果を、表2に測定値の相関係数を、図12に偏流分布の測定結果を、表3に上記の条件で取得した全偏流角測定値の平均値を基準とした各偏流分布の平均値と風洞中心を基準とした左右の偏流分布平均値の差を示す。

図11より、左の3つの2次元偏流分布は同じ風速であるが傾向が異なり、進行比0.27の左から2番目の図と右端の図は風速が異なるが傾向は非常に似ていることが分かる。実際にこれらの測定値の相関係数をとると、表2より、最も相関係数が高いのは風速40m/s、進行比0.27のデータと風速50m/s、進行比0.27のデータであることが言える。したがって、異なる風速でも進行比が一致すると測定部の偏流分布は一致し、同じ風速でも進行比が異なると測定部の偏流分布も異なることから、整流格子以前に生じた偏流分布は測定部の偏流分布に影響を与えていることが分かった。但し、ここでは測定データ同士の相関係数を用いたが、厳密に言うと偏流分布は進行比に対して相関を持っていて、先の2つの条件における測定データ同士が相関を持つわけではない。これを統計学的には偽の相関と呼ぶがここでは厳密な意味は考えず、相関係数を偏流分布の類似性の度合いを表す値として用いた。

図12、表3より、水平方向の偏流分布は進行比が小さくなるほど全体の凹凸の振幅は小さく、左右の平均値の差は小さくなるために非一様性は改善されるが、凹凸形状は変化しないことが分かった。また、進行比が変わっても全スパンの平均値の変化は誤差の範囲であり、この測定精度では有意な変化は見られないことが分かった。

表2 測定値の相関係数

(風速、進行比)	(40,0.21)	(40,0.27)	(40,0.33)	(50,0.27)
(40,0.21)	1.00	0.85	0.70	0.85
(40,0.27)	—	1.00	0.82	0.97
(40,0.33)	—	—	1.00	0.81
(50,0.27)	—	—	—	1.00

表3 風洞中心水平方向の偏流分布平均値

進行比	平均値基準平均値 [deg]	左右平均値の差 [deg]
0.33	0.10	0.43
0.27	-0.03	0.29
0.21	-0.07	0.21

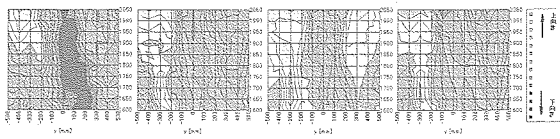


図11 2次元偏流分布測定結果

((風速, 進行比)=(40,0.21),(40,0.27),(40,0.33),(50,0.27) (図同順))

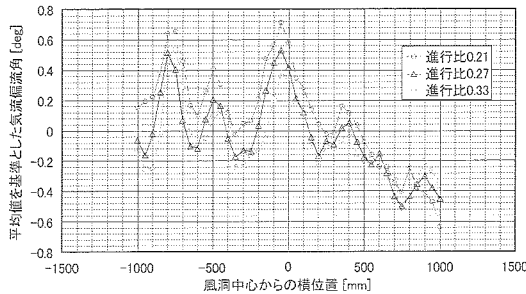


図12 風速40m/sにおける偏流分布測定結果

#### 5. 4 風洞中心高さにおける水平偏流分布の原因

5. 3節の結果から、測定部の偏流分布は整流格子以前に生じた偏流分布の影響も受けていることが分かった。4章で確認された偏流分布で特徴的な周期的な凹凸は、同じく周期的な風洞内部の構造物が原因であることが推測できる。風洞内部の周期的な構造物は、整流格子の継ぎ目と整流格子上流側の第4コーナーベーンを挙げることができる。4章の測定位置における偏流分布と、測定部においてこれらの位置が対応する位置を重ねた図を図13に示す。

図13より、コーナーベーンの位置と風洞中心から左側偏流分布の谷の位置、コーナーベーンの位置と風洞中心から右側偏流分布の山の位置がほぼ一致していることが分かった。風洞中心から右側と左側でコーナーベーンの位置に対する偏流分布の凸凹形状の山と谷の位置が変わるのは、送風機で生じた旋回流が左側では上向き、右側では下向きとなるからであると考えられる(図14)。したがって、この位置における偏流分布の凸凹形状の原因は、

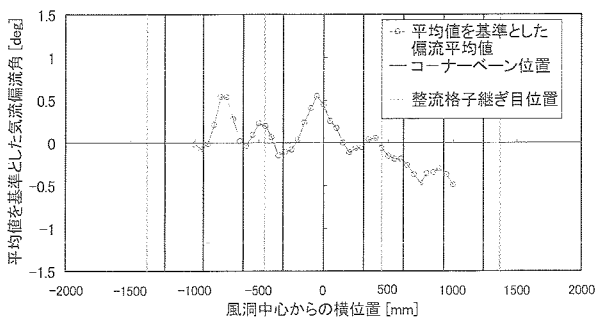


図13 偏流分布と風洞内部構造物対応図

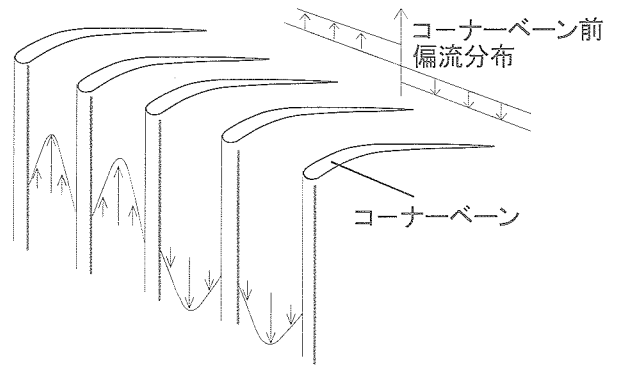


図14 送風機旋回流とコーナーベーンの相互作用

送風機で生じた旋回流とコーナーベーンによる粘性抵抗による相互作用が原因の一つであることが分かった。

### 6. まとめ

以上より、以下の4点が明らかになった。

- トラバース装置の空力干渉により、偏流測定値に誤差が存在するが、測定部中央水平面に迎角方向偏流角の非一様な分布の存在を確認した。
- 整流金網が汚れると迎角方向の偏流角が増加することが分かった。
- 同一風速で送風機進行比が小さいと迎角方向の偏流角の非一様性は小さくなることが分かった。
- 迎角方向の偏流角非一様性は送風機による旋回流とコーナーベーンの相互作用が原因の一つであることが分かった。

### 7. 今後の課題

今後の課題として以下の5点が挙げられる。

- 今回の試験で使用したトラバース装置は偏流に影響するので、正確な偏流角を測定する方法を検討することが必要である。
- 今後定期的に整流金網の汚れの偏流角への影響を確認する。
- コーナーベーン形状が偏流角へ与える影響を検討する。
- 整流格子など他の場所には問題がないか確認する必要がある。
- 具体的な偏流分布改善案を検討する必要がある。

### 8. 謝辞

不確かさの解析について勉強会を通じて様々な助言を頂いたJAXA 超音速風洞永井伸治チームリーダーと、全体の試験計画や試験方法、試験の要所で様々な助言を頂いたJAXA 小型旅客機ユニット空力研究チーム森田義郎チームリーダー(低速風洞チーム主任研究員併任)に感

謝いたします。

#### 参考文献

- 1) E.L. Clark, "Calibration of Hemispherical-Head Flow Angularity Probes", AIAA 92-4005
- 2) 日本機械学会誌、米国家規格・米規格協会・機械学会性能試験規約 ANSI/ASME PTC19.1-1985 「計測の不確かさ」
- 3) "Assessment of Experimental Uncertainty with Application to Wind Tunnel Testing", AIAA S-071A-1999