

遠心圧縮機の入口案内翼による管内旋回流のふれ回り流れ

馬場利秋*・深尾吉照*・西川世洋**・柴田俊久***

*機械事業部・開発部 **機械事業部・回転機技術部 ***神鋼テクノ㈱

Swirl Flow in a Centrifugal Compressor Suction Pipe with Inlet Guide Vanes

Toshiaki Baba・Yoshiteru Fukao・Toshihiro Nishikawa・Toshihisa Shibata

The swirl flow in a suction pipe with inlet guide vanes was experimentally studied. Periodical pressure and velocity oscillations were found to occur when the guide vane angle was set at the middle opening in pipes with a disk inserted downstream from the inlet guide vanes. This phenomenon was believed to be induced by spiral vortices. A similar phenomenon occurred also in centrifugal compressor suction pipes. Countermeasures to suppress rotor whirling vibration were successful when the inlet guide vanes were set adjacent to the compressor impeller.

まえがき = 入口案内翼は遠心圧縮機の有効な流量制御手段として実用に供されており、当社の製品にも数多くの使用実績がある。機械的信頼性向上のため当社では入口案内翼下流の流動状態を把握すること、さらにはその流れが圧縮機ロータに及ぼす影響およびその制御対策についても研究開発を実施している。このような研究開発では、入口案内翼付きの遠心圧縮機において入口案内翼を中間開度としたときに、圧縮機のロータの振動成分に全開時には認められなかったロータ回転数と非同期のふれ回り振動成分が生じることを経験した¹⁾(第1図)。この振動は入口案内翼の開度が中間開度以外では認められなかったため、管内流における旋回流のふれ回りとの深い関係があると考えた。

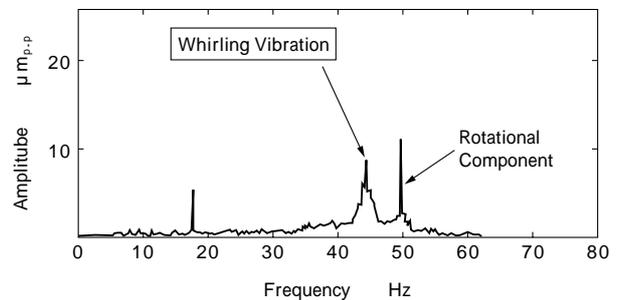
そこで、まず入口案内翼付きの遠心圧縮機の吸込管を模擬した風洞を製作して流れの特性を調査した²⁾³⁾。その結果、入口案内翼下流に円板を挿入して入口案内翼を中間開度にするると、案内翼下流の管内流には壁面圧力に周期的な変動を生ずるとともに、旋回流がふれ回りと思われる挙動を示していることが観測された。続いて遠心圧縮機の実機をもちいた試験をおこない吸込管内の流れを調べたところ、入口案内翼の開度を中間開度にするると、風洞試験と同様の流動特性が観測された。さらに、ふれ回り流れの抑制策を遠心圧縮機に施して運転試験を実施

したところ、ロータのふれ回り振動が抑制されることも確認した。

本稿では入口案内翼による管内旋回流のふれ回り流れに着目し、その流動特性さらにはふれ回り流れが遠心圧縮機ロータに及ぼす影響について報告する。

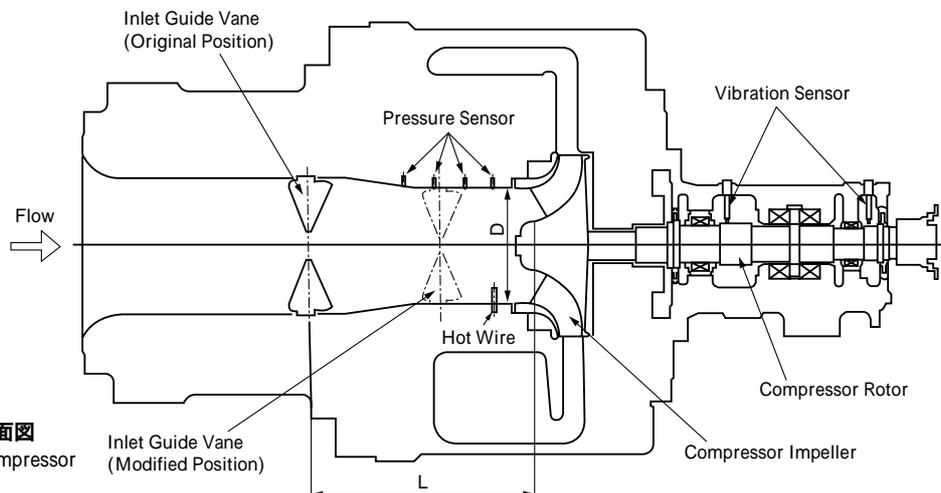
1. 風洞試験装置および方法

本研究の対象とした入口案内翼付きの遠心圧縮機の断面図を第2図に示す。流体は図の左側から圧縮機吸込管内に流入し、入口案内翼によって円周方向に旋回を与えられてから圧縮機インペラに吸い込まれる。圧縮機イ



第1図 圧縮機ロータのふれ回り振動分析結果 (入口案内翼初期設定位置)

Fig. 1 Compressor rotor whirling vibration with original IGV position



第2図 入口案内翼付き遠心圧縮機断面図

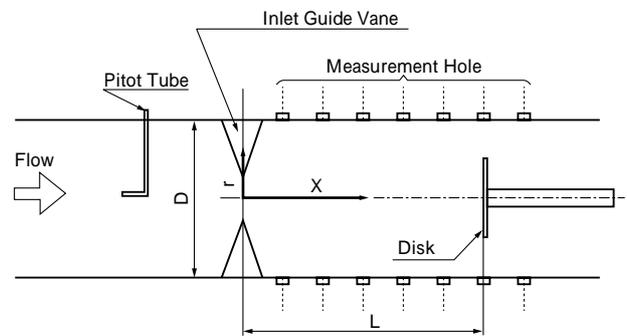
Fig. 2 Cross section of centrifugal compressor with inlet guide vane

ンペラは、モータの動力を軸を介して伝達することにより駆動される。入口案内翼は圧縮機インペラの上流の実線で図示した位置に設置されている。

この遠心圧縮機の吸込管を模擬して内部の旋回流の測定をおこなうために製作した風洞試験装置の概略を第3図に示す。風洞はアクリル製の円管で、その内部に円周方向に等間隔に設けられた9枚の入口案内翼を設けた。入口案内翼の下流には図に示したように、圧縮機のインペラを模擬した円板を管路中心に管軸方向と垂直に入口案内翼下流の任意の軸方向位置に挿入して試験をおこなった。その結果、旋回流のふれ回りと思われる現象が観測された。

2. 風洞試験結果および考察

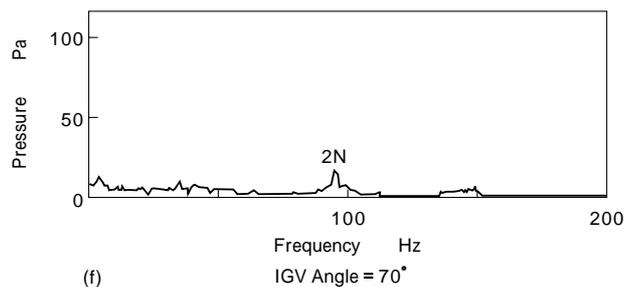
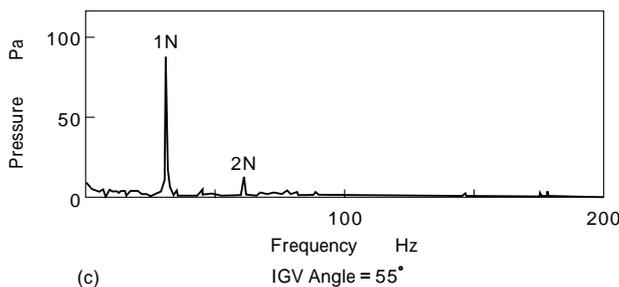
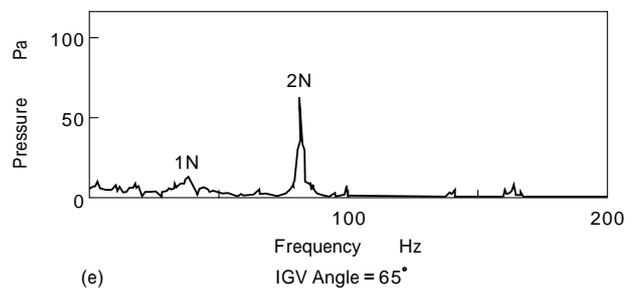
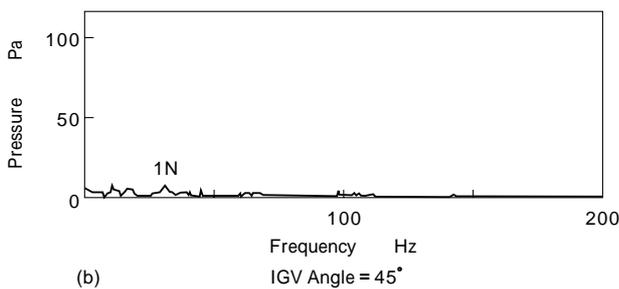
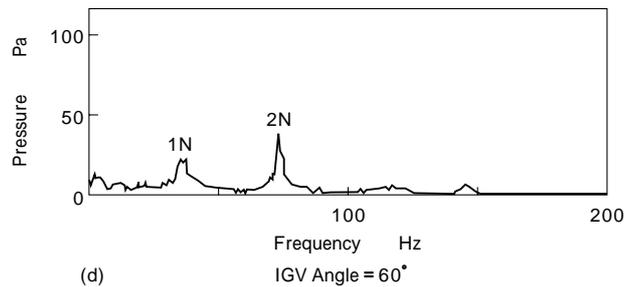
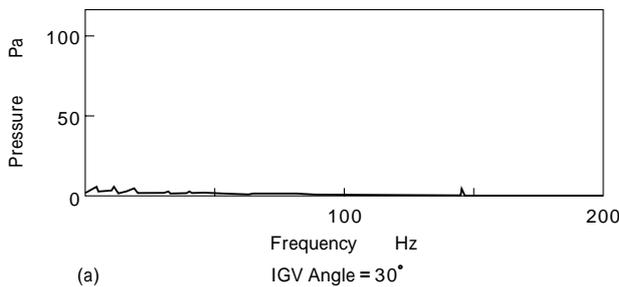
風洞内部の入口案内翼下流に円板を挿入して入口案内翼角度を実機にてロータに非同期の振動成分が認められた中間開度とすると、入口案内翼と円板との間の壁面圧力に周期的な圧力変動が観測された。第4図には入口案内翼の角度を変化させたときの壁面圧力変動のFFTによる周波数分析結果を示している。入口案内翼(IGV)の角度が小さく(軸方向より 30°)旋回が弱い場合にはピークを示す圧力変動成分は認められない(第4図(a))。入口案内翼角度を増やし軸方向より 45° とすると圧力変動にピークを示す圧力変動成分が発生しはじめる(第4図(b))。そして入口案内翼の角度が 55° (第4図(c))



第3図 旋回流風洞試験装置
Fig. 3 Test equipment for swirling flow measurement

となると圧力変動のピークを顕著に示すようになりその変動振幅が大きく成長していることがわかる。便宜上、この周波数帯の圧力変動成分を1N成分と呼ぶことにする。さらに入口案内翼の角度を 60° と大きくすると第4図(c)でピークが認められた周波数帯に加えてその2倍の周波数帯にもピークが認められることがわかる(第4図(d))。この1N成分の2倍の周波数帯の圧力変動成分を2N成分と呼ぶことにする。

入口案内翼の角度が 65° となると第4図(c)でピークが認められた1N成分の振幅は減衰し、いっぽうその2倍の周波数の2N成分が際だってくる(第4図(e))。そして 70° となるとこの2N成分も大きく減衰している(第4図(f))。入口案内翼角度を $45^\circ \sim 60^\circ$ の中間開度



第4図 壁面圧力変動周波数分析結果
Fig. 4 Power spectrum of wall pressure oscillation of swirling flow on various IGV angle

としても円板を挿入しない場合にはこのようなピークを示す圧力変動成分は認められなかった。

上述の入口案内翼の角度と壁面圧力変動成分にピークを示した周波数の関係を調べたものを第5図に示す。図中の円の中心位置が入口案内翼角度とピークを示した壁面圧力の周波数の関係を、円の直径がその周波数成分の壁面圧力変動の大きさを示している。1N成分は入口案内翼の角度45°となると認められるようになり、さらに角度が増えた50°~55°の間で最大となる。そしてこれ以降は角度の増加とともに減衰し70°以上となると他の周波数帯の低レベルの成分と判別できなくなる。

いっぽう、2N成分は1N成分よりやや遅れて現れ、入口案内翼の角度が55°以下では小さく、60°~65°に達すると大きく成長する。そしてこの2N成分もこの領域を過ぎると減衰している。いずれの入口案内翼角度においても2N成分の周波数は1N成分のそれのほぼ2倍であった。入口案内翼の角度が50°~55°の間では1N成分の振幅が2N成分のそれより大きく、60°~65°では逆になっている。また1N, 2N成分ともに入口案内翼の角度が増えて旋回が強くなると周波数も増加傾向にあることがわかる。

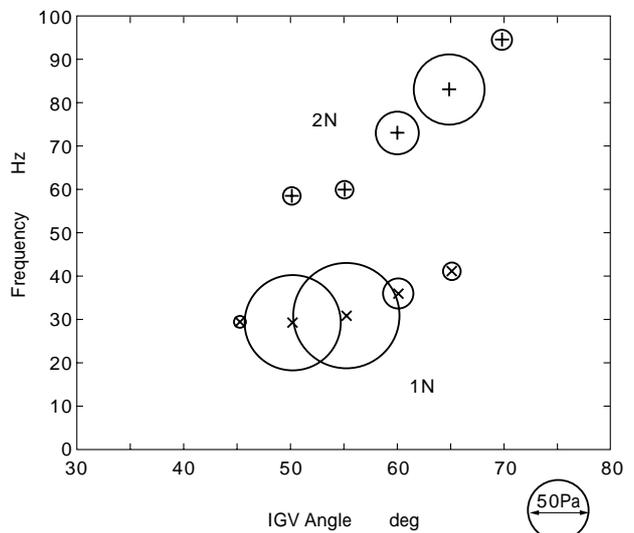
3. 実機試験結果

第2図に示した遠心圧縮機の実機においても風洞試験と同様の試験をおこなった。圧縮機の吸込み配管の入口案内翼と圧縮機羽根車の間には、風洞試験と同様に壁面圧力測定孔および熱線流速計による流速測定孔を設け、圧力センサおよび熱線流速計を取付けた。これらの測定孔の軸方向位置は圧縮機羽根車から上流に向かって0.25Dピッチで図示したように設けた。圧縮機の軸振動は図示したように軸振動計を2カ所に取り付けて計測した。

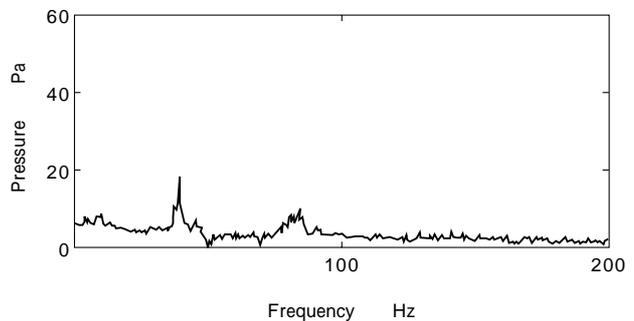
なお、作動流体は流動測定時には計測の都合上空気をもちい、吸込みは大気開放として吸込み管内の圧力はほぼ大気圧としておこなった。いっぽう、ロータのふれ回り振動の測定試験では実機の運転状態を想定して圧縮機の吸込配管を吐出配管とつなげて閉ループとして吸込配管内の圧力を1.5MPa程度に保って試験をおこなった。この試験では作動流体にはCO₂をもちい、軸振動のみを計測した。

入口案内翼角度を中間開度としたときの壁面圧力変動のFFT分析結果を第6図に示す。実機の吸込管内においても第4図(c)に示した風洞試験の結果と同様に鋭いピークが認められ、旋回流のふれ回りが生じていることを示唆しているものと考えられる。第7図にはピークを示した圧力変動周波数成分のうち1N成分の変動振幅と入口案内翼角度の関係を示す。第6図に見られたような圧力変動に顕著な周波数成分のピークが認められたのは入口案内翼の角度が中間開度である45°~60°のときであり、配管内の平均軸方向速度の増加とともに圧力変動振幅も増大する傾向にあることがわかる。

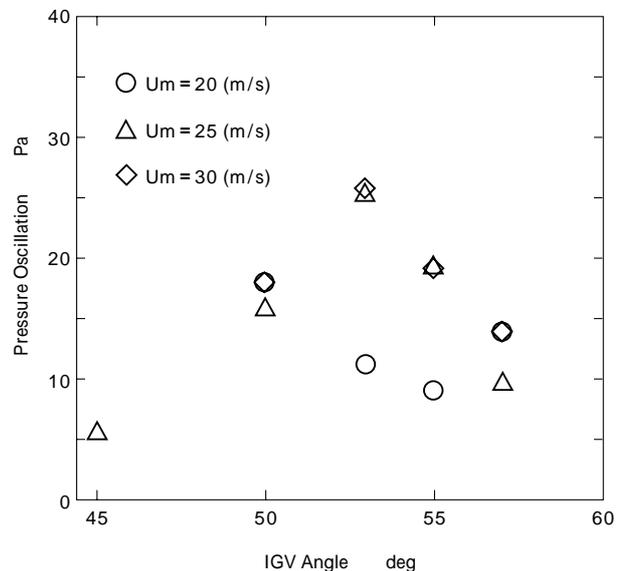
圧縮機羽根車直前における吸込管内の軸方向流速と壁面圧力の波形を第8図に示す。これらの波形はいずれ



第5図 入口案内翼角度と壁面圧力変動
Fig. 5 Wall pressure oscillation of swirling flow vs. IGV angle



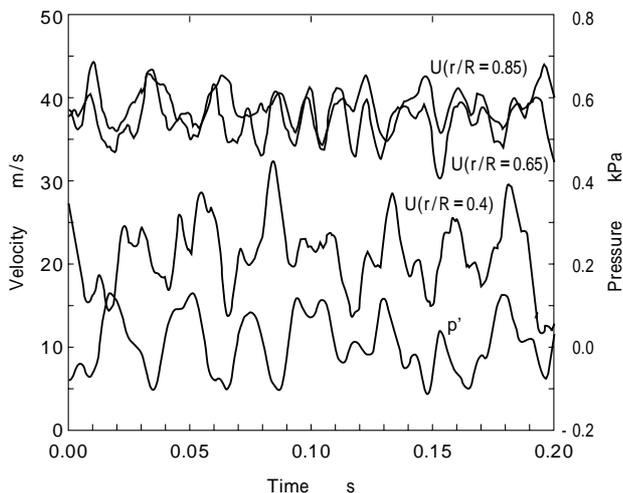
第6図 圧縮機吸込管における壁面圧力変動周波数分析結果
Fig. 6 Power spectrum of wall pressure oscillation in compressor suction pipe



第7図 圧縮機吸込管における壁面圧力変動と入口案内翼角度
Fig. 7 Wall pressure oscillation in compressor suction pipe vs. IGV angle

も第6図に示した壁面圧力変動が鋭いピークを示した周波数とほぼ同じ周波数を示している。流速変動は管中央域($r/R=0.4$)とそれを取巻く外環域($r/R=0.65, 0.85$)で逆位相となっている。

第9図に吸込管内軸方向平均流速とピークを示した



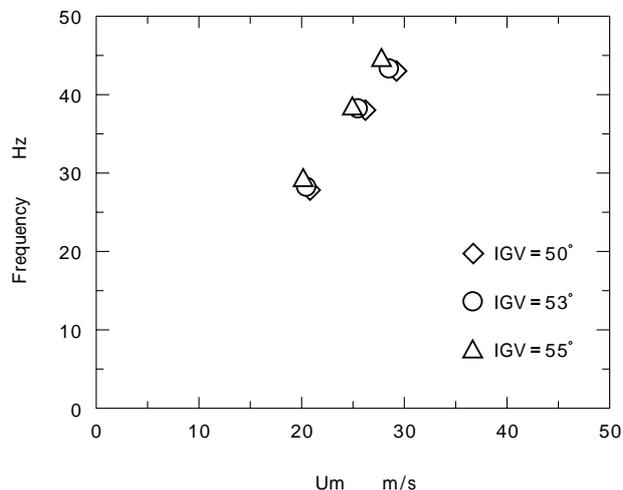
第 8 図 圧縮機吸込管の速度変動と壁面圧力変動
Fig. 8 Velocity and wall pressure oscillation in compressor suction pipe

壁面圧力変動周波数の関係を入口案内翼角度をパラメータとして示す。変動周波数は流速に比例する傾向にあることがわかる。圧縮機インペラの回転数は一定であったことを考慮すると、変動周波数は主として管内の流速に支配されるものと考えられる。また入口案内翼角度が大きくなるにつれて変動周波数が増加していることから、変動周波数はとくに旋回方向速度の依存性が高いことが推察される。

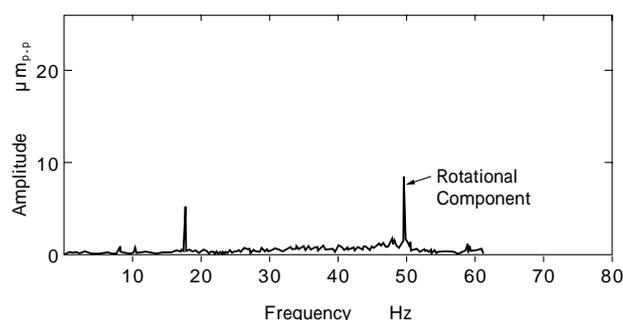
第 1 図に示した圧縮機軸振動の FFT 解析結果は圧縮機配管を閉ループとして管路内に CO₂ を充填し、入口案内翼の角度を中間開度として運転したときのものである。このときの圧縮機吸込管内の圧力は約 1.5MPa である。軸振動のふれ回り成分は入口案内翼の開度が中間開度のときのみ認められた。第 1 図の軸振動のふれ回り成分の周波数と第 6 図に示した壁面圧力変動の周波数はほぼ一致している。このことは圧縮機吸込管内の旋回流のふれ回りによる流体力が圧縮機インペラに作用して圧縮機の軸を振動させていることを示唆しているものと思われる。

圧縮機ロータのふれ回り振動が圧縮機吸込管内の旋回流のふれ回りによる流体力に起因するものとすれば、旋回流のふれ回りを抑制することができればロータのふれ回り振動を減少させることが期待できる。風洞試験において入口案内翼と円板の距離を小さくすると、入口案内翼の開度が中間開度のときの壁面圧力変動のふれ回り成分の振幅が小さくなるという知見がえられており、管内の旋回流のふれ回りも抑制できると考えることができる。

そこで実機において入口案内翼を第 2 図で実線で示した位置から点線で示したところまで移動し、入口案内翼の角度を変化させて軸振動を測定した。入口案内翼の角度を中間開度としたときの軸振動の測定結果を第 10 図に示す。入口案内翼の開度を中間開度としても第 1 図に見られたような非同期の軸振動成分は認められなくなった。これは本抑制策により実機においても風洞試験のと



第 9 図 圧縮機吸込管内平均速度と壁面圧力変動周波数
Fig. 9 Wall pressure oscillation frequency vs. mean velocity of compressor suction pipe



第10図 入口案内翼取付位置改善後の圧縮機ロータ振動分析結果
Fig. 10 Power spectrum of compressor rotor vibration (modified IGW position)

きと同様に旋回流のふれ回りが抑制されて、その結果としてインペラに作用する流体力が減少してロータへの加振力が減少したことによるものと推察される。

むすび = 入口案内翼付きの風洞および遠心圧縮機の実機の吸込配管内の旋回流について研究をおこない、以下の知見をえた。

- (1) 入口案内翼下流に円板を挿入すると、入口案内翼の中間開度でその下流の吸込管内には旋回流のふれ回りと考えられる現象が生じる。
- (2) この現象は圧縮機の吸込配管内部流れにも認められ、管の中央に円板や圧縮機インペラ軸のような流れの障害となるものがある流体系に特有な現象である可能性が高い。
- (3) 入口案内翼を中間開度としたときに認められた圧縮機ロータの回転数と非同期のふれ回り振動の抑制には入口案内翼と遠心圧縮機インペラの距離を縮めることが有効であった。

参考文献

- 1) 馬場利秋ほか, 機講論, No.96-1 (1996), p.45.
- 2) 馬場利秋ほか, 機講論, No.940-53 (1994), p.39.
- 3) 馬場利秋ほか, 機講論, No.984-1 (1998), p.7.