

# 遠心圧縮機の高速小形化

## Size Reduction of Centrifugal Compressors by Speed Increase

近年、遠心圧縮機は高速化による小形軽量化が急ピッチで進んでいる。高速化を推進するためには性能、材料、強度、各分野からの総合的な技術開発が必要であり、新技術として性能では流体力学的設計解析法、材料では精密鋳造法、強度では有限要素法及び破壊力学を適用した強度評価法などが挙げられる。これらの新技術を主として羽根車、冷却器に適用した場合の検討結果について述べる。最終的には日立DH型遠心圧縮機に適用して良好な試験結果が得られ、大幅な小形軽量化を達成することができた。

三階春夫\* *Mishina Haruo*  
 森本庄吾\* *Morimoto Shôgo*  
 河合末男\* *Kawai Sueo*  
 刑部一郎\*\* *Gyôbu Ichirô*

### 1 緒言

空気分離装置、作業空気源、化学プラントなどに広く使用されている遠心圧縮機は、近年、省資源、据付面積の低減、据付及び保守の容易さなどから高速化による小形軽量化が進められている。高速化を推進するに当たり、省エネルギー、信頼性確保が不可欠であるから、性能、材料、強度などの各分野からの総合的な技術開発が必要である。そこで、性能では流体力学的設計解析法、材料では精密鋳造法、強度では有限要素法及び破壊力学を適用した強度評価法などの新手法を導入して、理論解析と模型試験とにより検討を重ね、種々の新技術を確立することができた。この論文では遠心圧縮機の主要構成要素である羽根車と冷却器についての検討結果と、実機への適用結果とについて述べる。

### 2 遠心圧縮機の構成と使用条件

図1に遠心圧縮機の代表的機種である日立DH型遠心圧縮機を示す。日立DH型遠心圧縮機は、電動機、増速機、圧縮機、冷却器及び空気配管により構成されていて、4段圧縮で各段の間に冷却器を持ち、圧力比5~10を達成するものである。

各段のうち、1段目圧縮機の羽根車が最も大形で高周速であり、周速は最高350m/sにも達する。使用条件としては作業空気源の場合が最も起動停止の頻度が高く、いずれの場合も後段では空気の相対湿度が高いので強い腐食環境になる。また、設置場所によっては空気自身が著しく汚染されているので、いっそう強い腐食環境になる。

### 3 性能に関する技術開発

#### 3.1 圧縮機の小形化

圧縮機の性能を低下させることなく、これを小形化するには周速をほぼ一定にして羽根車を高速にし、高比速度化することが広く行なわれている。しかし、従来の二次元羽根車を高比速度にすると、羽根車の流路が全体に広くなり、羽根車出入口幅が相対的に大きくなる。図2に従来の実績値を超えて高比速度にした場合の羽根車入口の子午面速度を示す。側板側と心板側で子午面速度が著しく変わって、流れ角度と羽根角度が大幅に異なったり、羽根のない軸対称流路で子午面速度が大幅に減速して流れがはく離して性能が低下する。そこで、二次元羽根車を軸対称流路がなく、流れに合った羽根

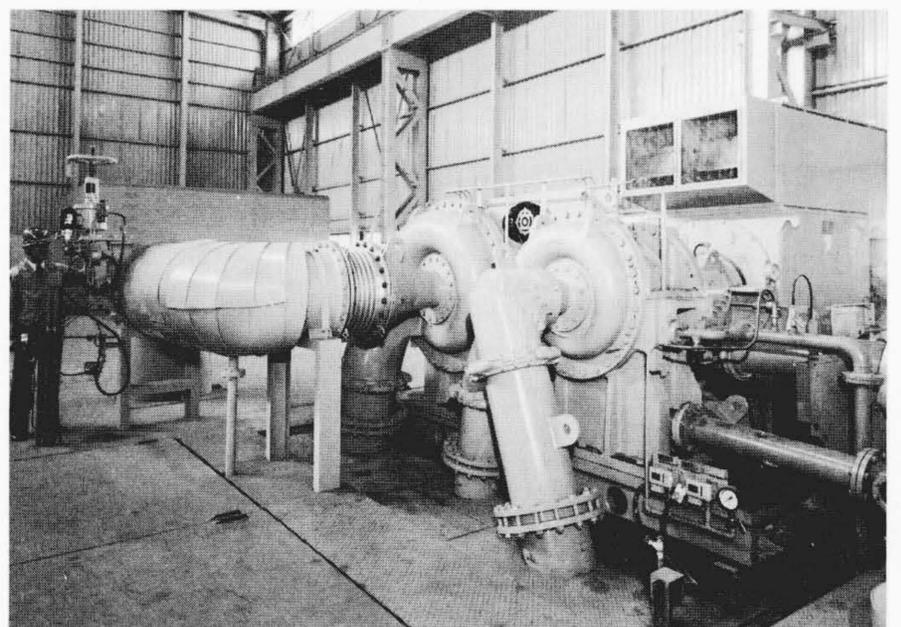


図1 新型日立DH型遠心圧縮機 電動機出力1,500kWの新型機種で、冷却器は地下に設置されていて本図では見えない。

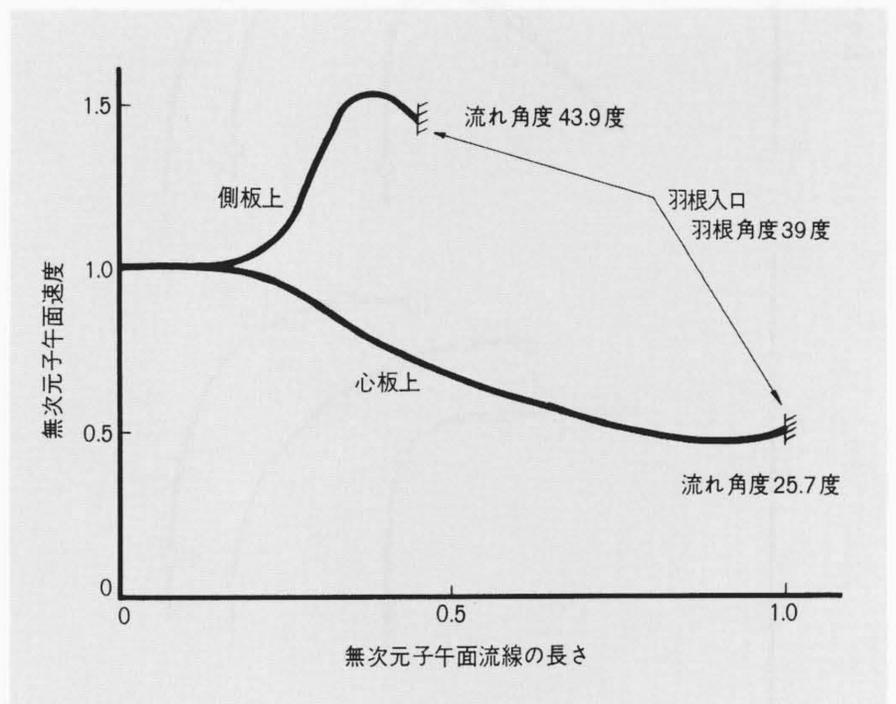


図2 羽根車入口の子午面速度と流れ角度 側板側での子午面速度は、いったん増速後急に減速をしているが、心板側では緩やかに減速している。このように、側板側と心板側で流れが異なり、羽根入口での流れ角度が大幅に異なっている。

\* 日立製作所機械研究所 \*\* 日立製作所土浦工場

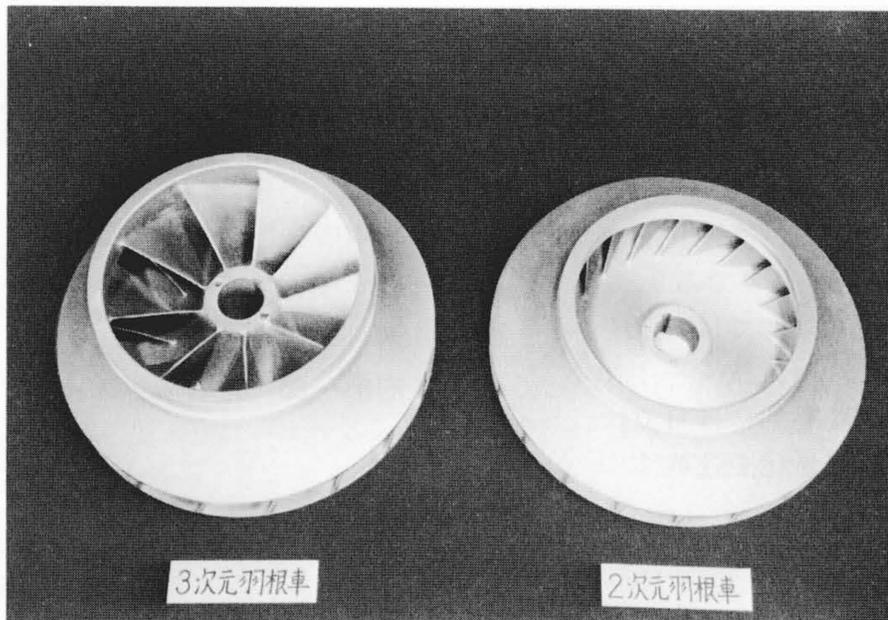


図3 三次元羽根車(A)と二次元羽根車 左に直径480mmの三次元羽根車(A)を、右に二次元羽根車を示す。

形状を持つ三次元羽根車に変えることにより、更に高比速度化できることを明らかにした。図3左に三次元羽根車(A)を、右に二次元羽根車を示す。また、図4に直径480mmの二次元羽根車と三次元羽根車の性能比較を示す。二次元羽根車は断熱効率の低下は小さいが、性能曲線が急で作動範囲が狭い。三次元羽根車(A)は二次元羽根車に比べて圧力係数、断熱効率、

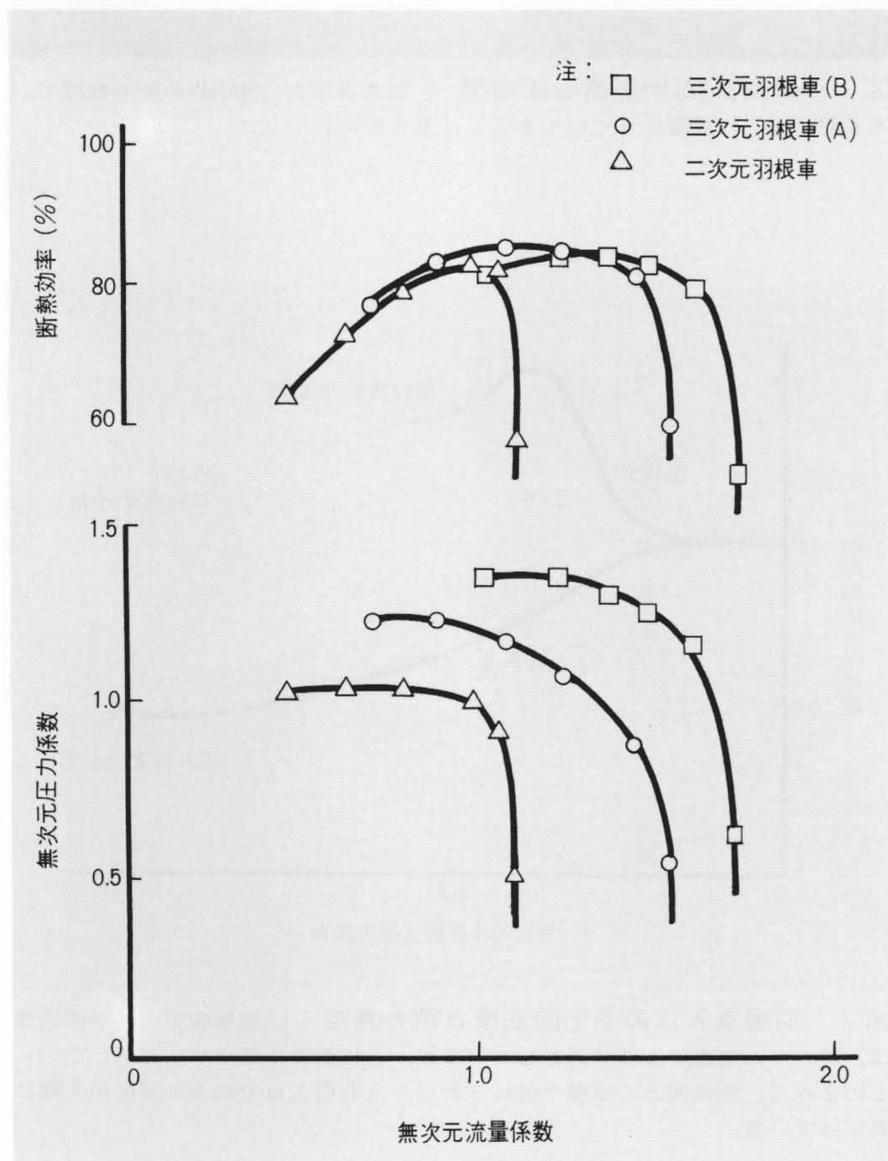


図4 二次元羽根車と三次元羽根車の性能比較 三次元羽根車は二次元羽根車に比べて、圧力係数、断熱効率ともに高く、作動範囲も広くて性能が優れており、小形化に適している。

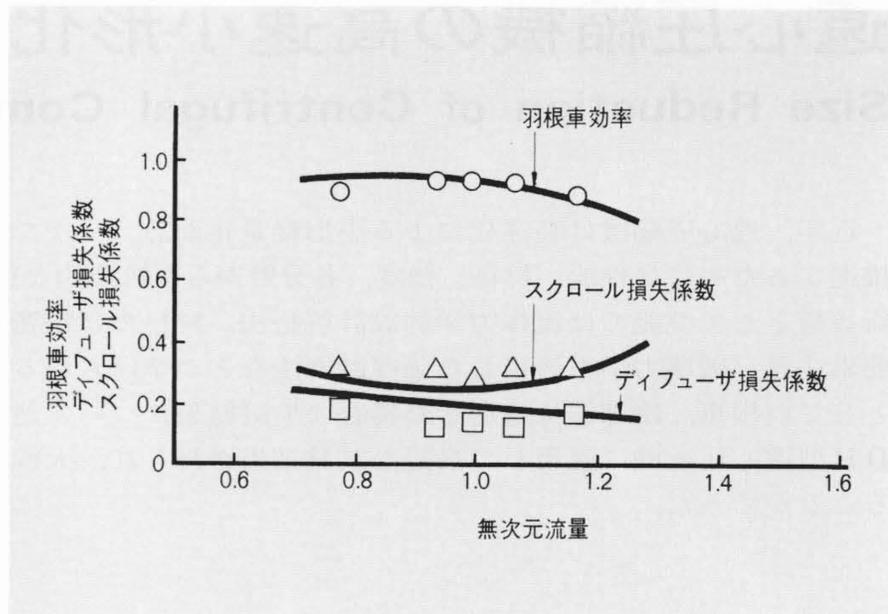


図5 圧縮機各要素の性能計算値と実測値との比較 圧縮機各要素の性能計算値と実測値とが比較的良好一致しており、性能予測が可能となった。

作動範囲ともに著しく優れている。また、同図中には更に圧縮機の小型化を進めるために、高圧力係数化を図った直径560mmの三次元羽根車(B)の性能を示した。作動範囲は若干低下するが断熱効率はほぼ同じで、圧力係数が更に高くなった。このように、三次元羽根車(B)を用いることにより、性能を低下させることなく、圧縮機を約30%小型化することができた。

近年、電子計算機による計算技術の向上により、複雑な形状を持つ三次元羽根車をはじめ、圧縮機各要素の内部流れを解析することが可能となったので、流体力学的設計解析法を開発した<sup>1)</sup>。この手法を用いて、圧縮機各要素の形状を流体力学的に最良にし、流れの機構に応じた損失分析を行なって圧縮機の性能予想をし圧縮機主要諸元の最適化を図った。図5に三次元羽根車(B)を用いた圧縮機の羽根車、ディフューザ、スクロールなど各要素の性能計算値と実測値との比較を示す。圧縮機の性能はもちろんのこと、各要素の性能についても計算値と実測値とが比較的良好一致していて、流体力学的設計解析法が非常に有効であることが分かる。

### 3.2 冷却器

高速化により圧縮機の小型化を達成することができたので、冷却器の小型化も同時に行なう必要がある。そこで、伝熱管群とドレンセパレータ、冷却器胴を含む冷却器全体の構造、配置を総合的に検討して小型化を図った。伝熱管群を従来のハイフィン付から体積当たりの伝熱面積の著しく大きなプレートフィン付に変え、また冷却器胴を従来の角形胴から压力容器として最適な円筒胴に変えた。プレートフィンの寸法形状、冷却器の流路構造、出入口管径などと伝熱性能の関係を調べて冷却器全体の最適化を図った<sup>2)</sup>。図6にプレートフィン付冷却器とハイフィン付冷却器との性能比較を示す。性能を低下させることなく、約40%の小型化が達成できた。

## 4 材料に関する技術開発

羽根車が大幅に小型化し、羽根形状が三次元になると、小径の羽根車では溶接による製作が困難となり、精密鋳造法が必要となってくる。

図7は鋳鋼の精密鋳造法を羽根車に適用する場合の手順を示したもので、鋳型と材料に大別される。

### 4.1 精密鋳造用鋳型

精密鋳造法では精密な鋳型が必要であり、特に側板付羽根

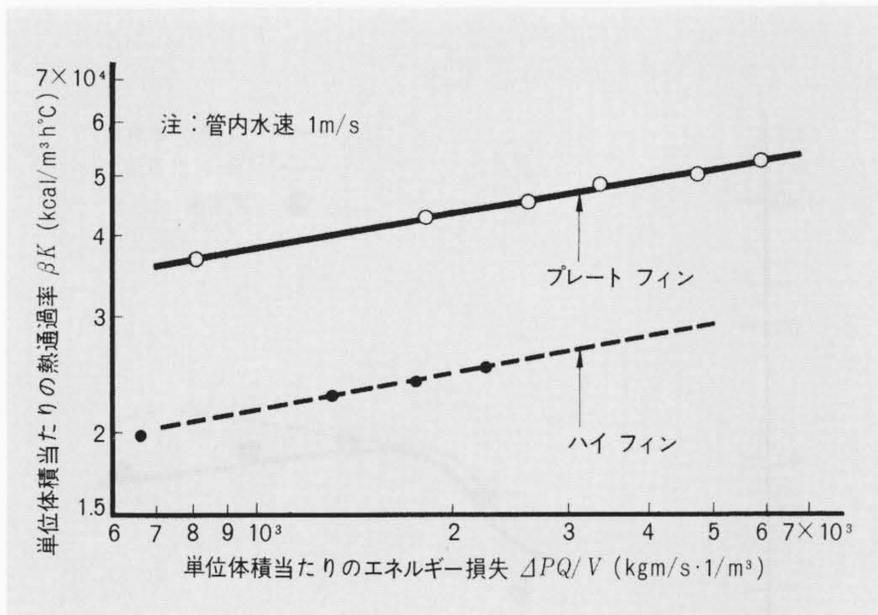


図6 プレートフィン付冷却器とハイフィン付冷却器の性能比較 プレートフィン付冷却器は、体積当たりの熱通過率が約1.7倍大きい。すなわち、同一放熱量に対して40%小形化されている。

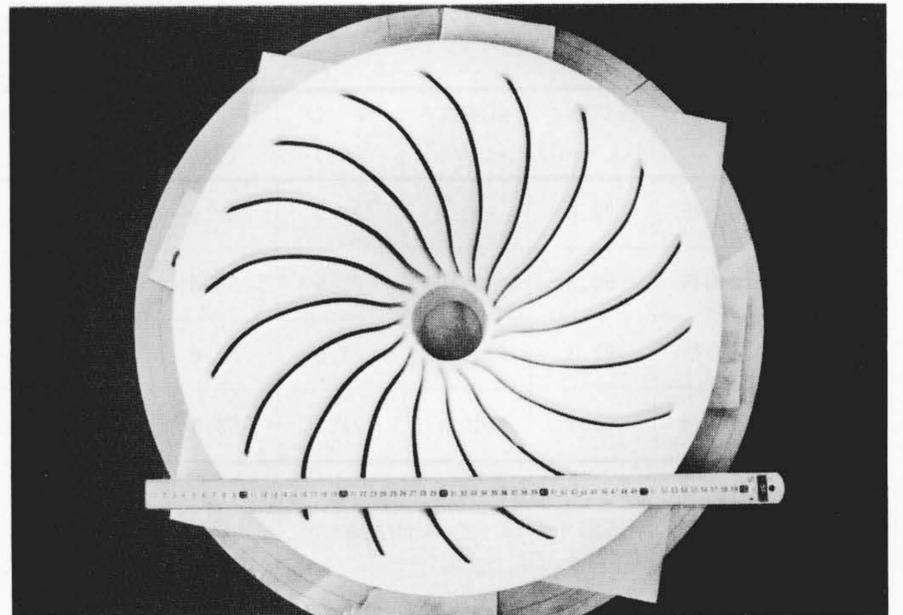


図8 精密铸造用一体中子 寸法精度、型はだとも良好な一体中子の一例を示す。

車では中子が重要である。鑄型の具備すべき条件は次のようである。

- (1) 寸法精度が高く、型はだが平滑であること。
- (2) 高温での強度が溶湯の圧力に耐えること。
- (3) 溶湯と接した際にガスの発生のないこと。

そこで、従来のセラミック鑄型を流し込み成形の鑄型に変えて、羽根部分には消失模型を適用することにより、寸法精度、型はだとも良好な中子を一体で製作することができた<sup>3),4)</sup>。

図8に一体中子の一例を示す。鑄型の機械的性質などについては省略するが、ロストワックス鑄造法と同様に焼成状態で注湯するので、高温での強度と熱膨張について特に留意した。

#### 4.2 羽根車材料

羽根車材料については強度、耐食性を考慮して、13Cr鑄鋼を採用した。前述の鑄型を用いて鑄造する場合、13Cr鑄鋼の湯流れ性、肉厚感受性、ひけ特性などを事前に明らかにすることにより、鑄造方案に必要な鑄型の設定温度、押湯比などを決めた。細部については数回にわたる鑄造試作を行ない、作業性をも含めて作業基準を確立した。更に、拡散焼鈍、調

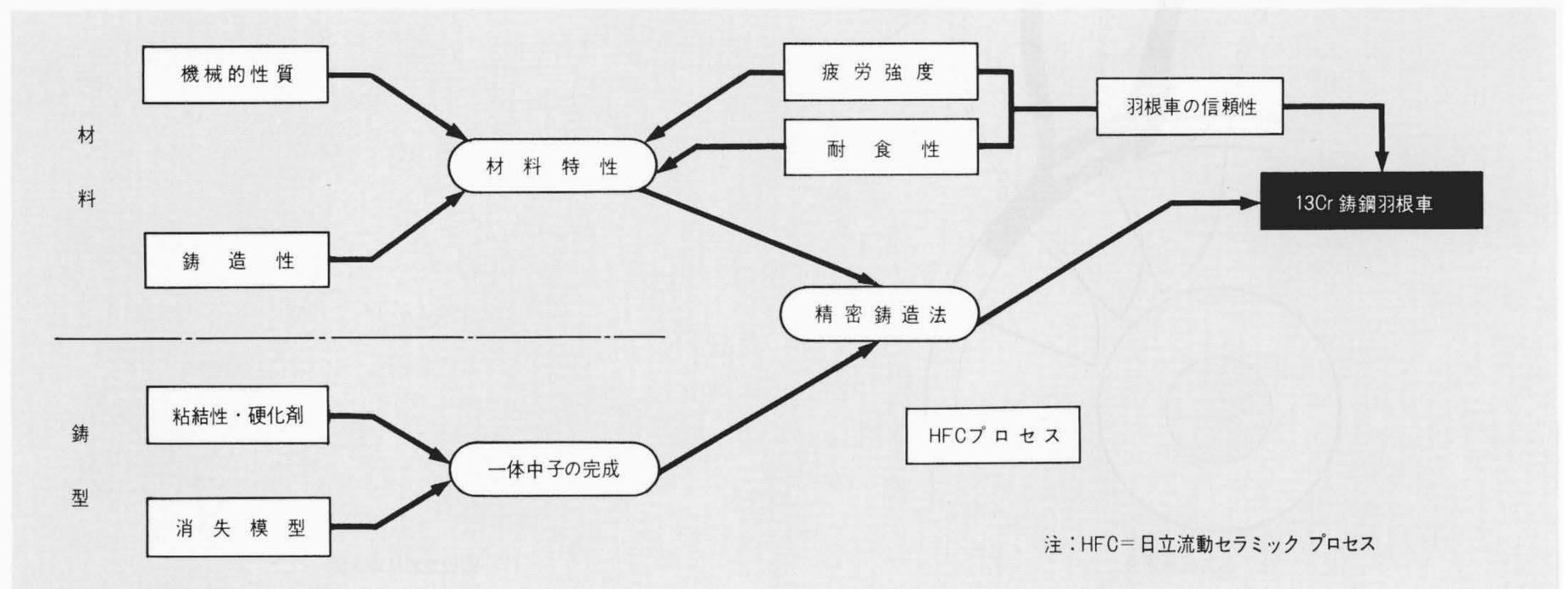
質条件などの熱処理特性を把握し、また最終熱処理した羽根車の環境を模擬した加速腐食試験、疲労試験を行なって材料の信頼性を確認した。試作した羽根車については鑄造応力の測定、過速度試験を行なうとともに、寸法検査、磁気探傷検査、染色探傷検査、放射線検査、実体強度試験などを総合的に行ない検査基準を確立した。表1に実体強度試験結果の一例を記す。降伏強さ、衝撃値ともに仕様を十分満足している。寸法精度は出口幅、羽根厚さについて±0.2mm、羽根ピッチについて±0.7mmが得られ、鑄はだのあらさもロストワックス鑄造品に匹敵する10~15Sが達成できた。

#### 5 強度に関する技術開発

##### 5.1 羽根車の遠心応力解析と実測値

近年、遠心応力解析は各種の計算技術の進歩により飛躍的に発展した。解析法としては次の二通りの方法を開発した<sup>5)</sup>。

- (1) 側板、心板を多数のリングに分割して変形を解析解により求め、一方、羽根を多数の短冊形要素に分割し、羽根の変形は側板と心板の伸び差によって生じると考える。この場合



注：HFC=日立流動セラミックプロセス

図7 鑄鋼羽根車の開発手順 羽根車の製造は各種技術の総合であるが、その流れを大別すると、材料と鑄型の製造とに分けられる。

表1 羽根車の実体強さ 実羽根車の各部から採取した鋳鋼の機械的性質を示す。

試験片位置		降伏強さ (kg/mm <sup>2</sup> )	引張強さ (kg/mm <sup>2</sup> )	伸び (%)	絞り (%)	衝撃値 (kg-m/cm <sup>2</sup> )
A 羽根車	心板	92.6	99.2	21.2	52.9	11.96
	側板	90.5	97.6	21.5	56.4	11.56
B 羽根車	心板	92.3	98.6	23.6	57.6	12.05
	側板	93.7	100.1	21.7	58.8	12.83

注：調質状態  
引張試験片は、平行部 6 mmφ, 22.5mm長さ  
衝撃試験は、2 mm Uノッチ, 20°C

の変形模型は、はしご形ラーメン構造として応力を求める。  
(2) 羽根車を多数の三角形平板要素に分割し、有限要素法によって面内応力と面外曲げ応力とを求める。

前者のプログラムを“R-1”，後者のプログラムを“STAR”と呼ぶ。“STAR”を用いる場合には節点の座標値を必要とするが、羽根車のように複雑な形状ではこれらを求めるのが容易ではないので、羽根車の形状より自動的に座標値を計算できるようにした。更に、応力の計算結果を電子計算機により直接表示できるようにした。図9に側板についての表示例を示すが、これにより側板の応力分布が一見して分かる。

応力の計算値と実測値との比較をするために、直径 1,500

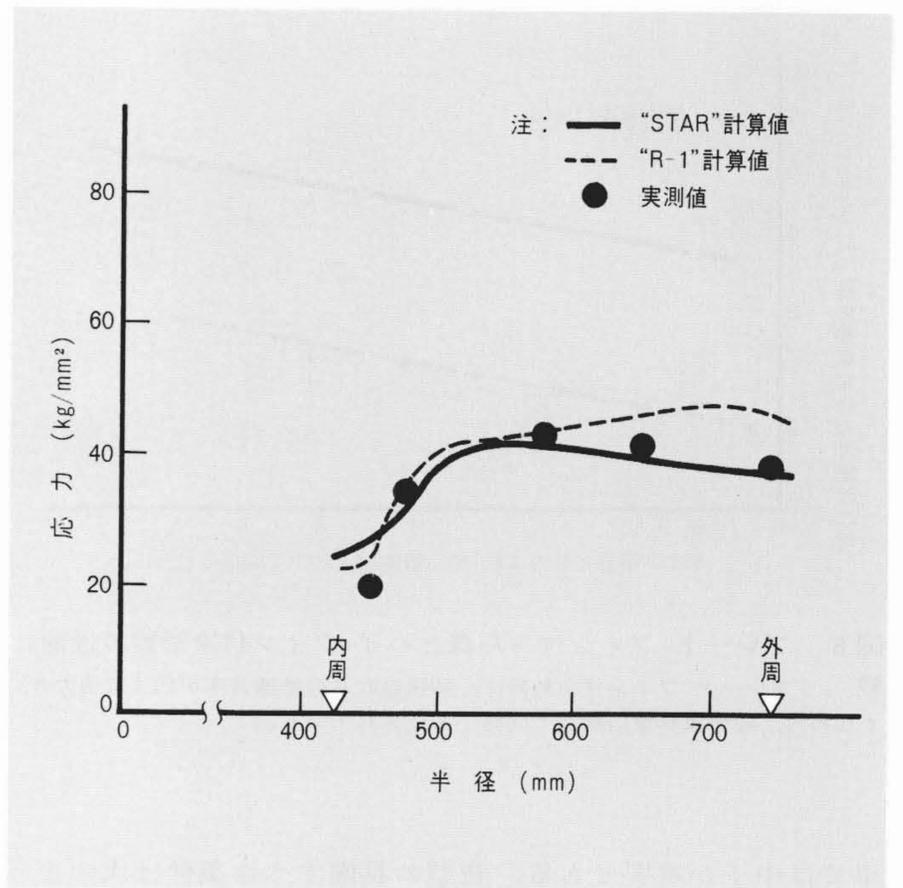


図10 側板での遠心応力の計算値と実測値の比較 反流路面, 羽根間中心の円周応力であり, “STAR”による計算値と実測値は良く一致している。

mmの実機羽根車についてひずみゲージと電子スイッチ回路付多点スリップリングにより応力測定を行なった。図10に二通りの方法による応力の計算値と実測値との比較を示す。“STAR”による計算値は実測値と良く一致しているが、“R-1”に

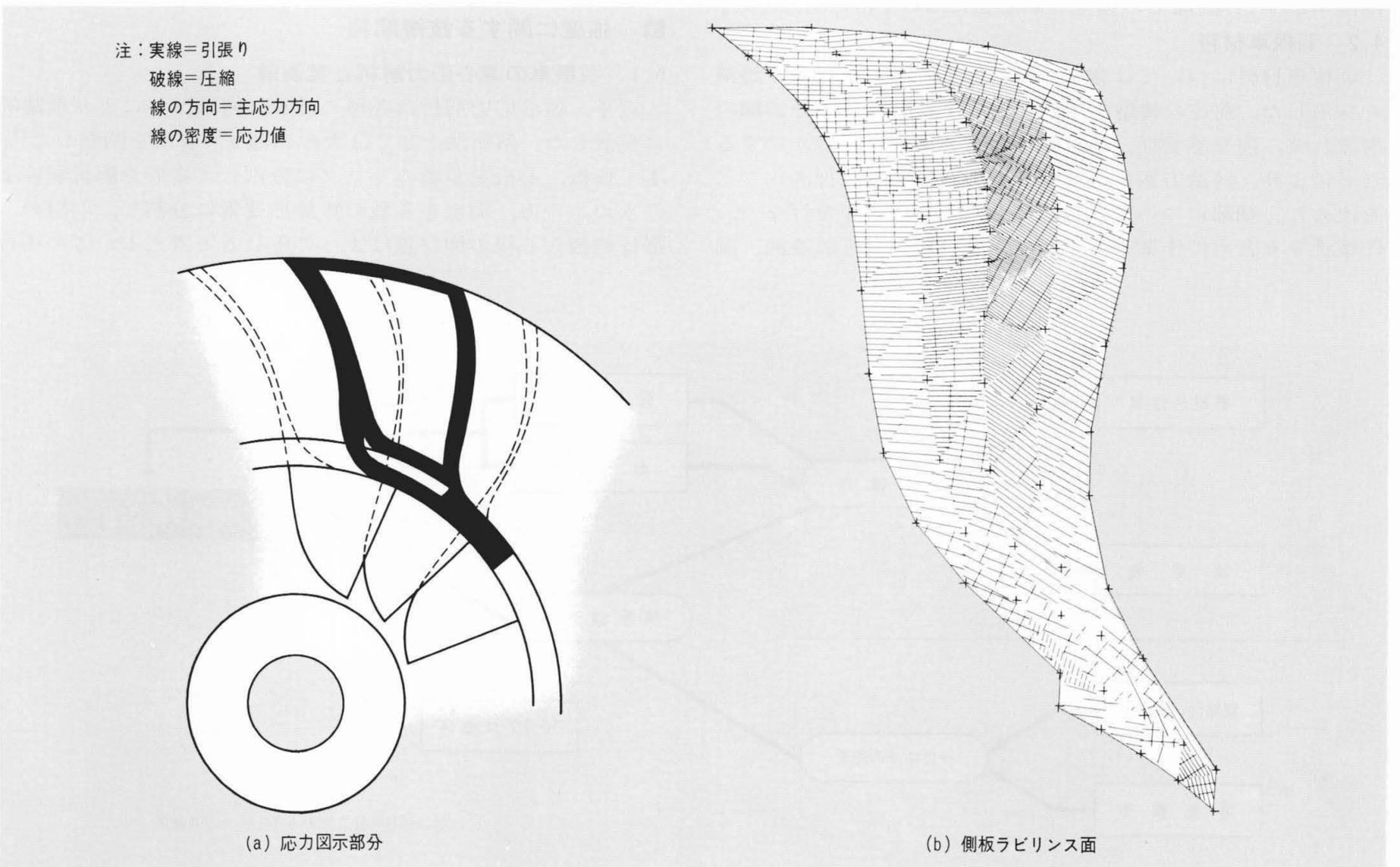


図9 側板の応力分布の表示例 線の密度が応力値を、線の方向が主応力方向を示すもので、この例では羽根付根の外周近くの応力が高いことが一見して分かる。

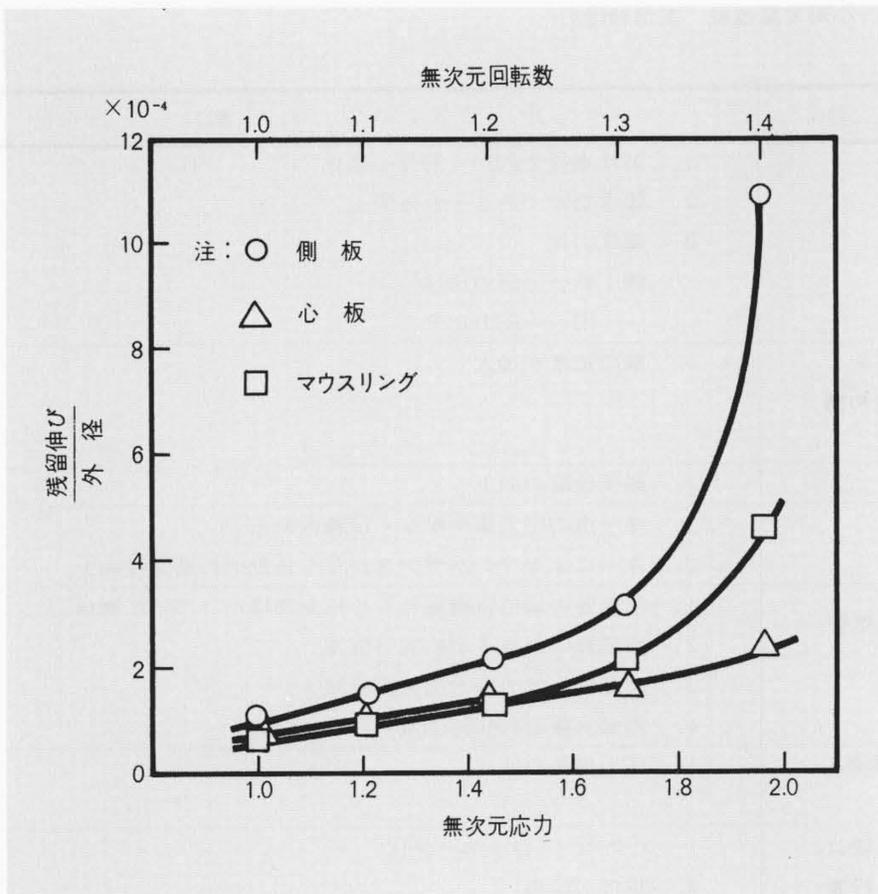


図11 羽根車の変形 無次元回転数が1.3から1.4の間で側板にマクロな変形が急激に増大している。

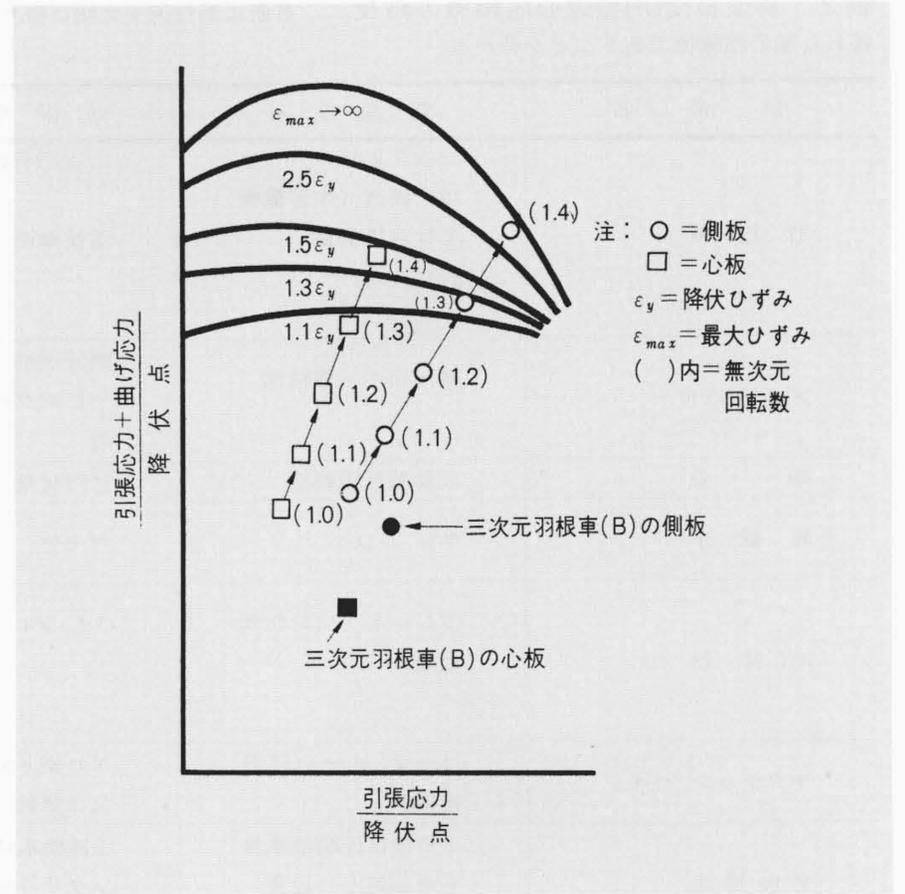


図12 計算値より推定した羽根車の変形 側板のひずみは、無次元回転数が1.3から1.4の間で急激に増大して、図11の実測結果と良く一致している。

よる計算値は若干精度が低い。しかし、“R-1”は“STAR”に比較して計算時間が $\frac{1}{5} \sim \frac{1}{10}$ と少ないので、初期設計の段階で主として使用している。

### 5.2 遠心強度の評価

羽根車の破壊進行過程としてはマクロな変形を起こした後延性破壊に至るが、欠陥があると脆性破壊、腐食環境では遅れ破壊が生じ、また起動停止の頻度が高いと疲労破壊も問題となってくる。このうち、特に重要なマクロな変形、疲労に対する評価法について検討する。まず、マクロな変形条件を求めるために、直径 800mm の羽根車を用いて実測した側板、心板、及びマウスリング外径の残留変形を図11に示す。無次

元回転数が 1.4 になると、側板、マウスリング外径がマクロな変形を起こし始めている。一方、応力解析結果からマクロな変形条件を求めてみた。図12に側板、心板での最大応力点の計算値をその発生原因によって引張りと曲げ応力に分類し、側板、心板の変形過程との関連を示した。これより側板の最大応力は、無次元回転数が 1.3 の場合には降伏ひずみの 1.2 倍であるのに対して、無次元回転数が 1.4 の場合には 2.5 倍以上と急激に変形が増大し、図11の実測結果と良く一致している。このように、側板、心板のマクロな変形は最大応力点の計算値を用いることによりほぼ推定することが可能であることが分かった。なお、同図中には前述した三次元羽根車(B)

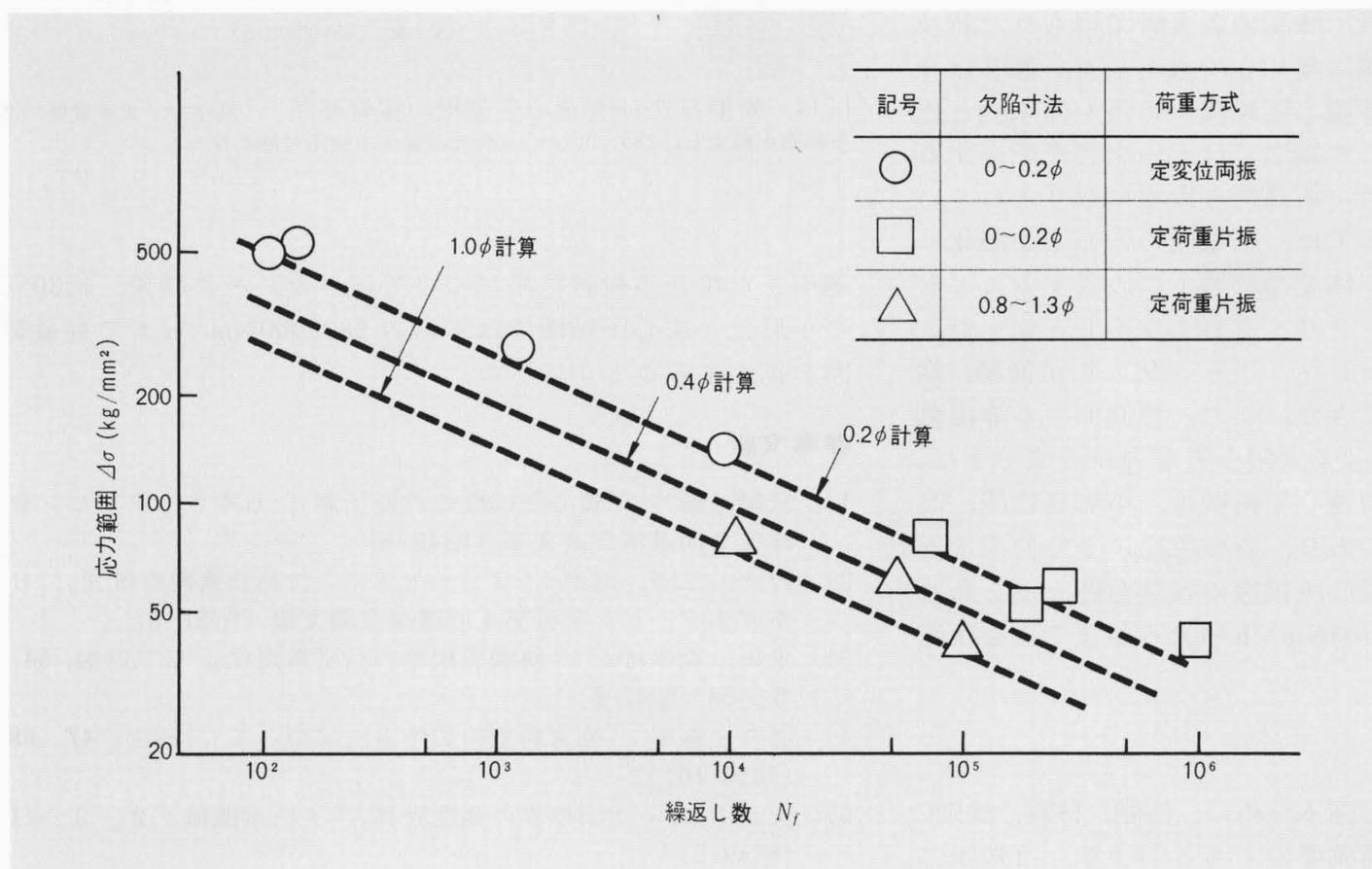


図13 13Cr 鋳鋼の疲労強度 13Cr 鋳鋼の疲労強度は破壊力学的な整理法でよく説明できる。

表2 新型日立DH型遠心圧縮機の特長 各所に新技術を大幅に取り入れ、小形で高性能、高信頼性の優れた遠心圧縮機であることが分かる。

部 品 名	新 型 D H	従 来 型 D H	比 較
羽 根 車	三次元羽根車 精密鑄造（大容量機 では溶接構造）	二次元羽根車  溶接構造	1. 羽根車径で約20～30%小形化 2. 等温効率で約2～5%向上 3. 高圧力比 例：新……圧力比10 旧……圧力比9
メ イン ギ ヤ	浸炭研削一体構造	調質研削（又はシェーピング）焼ばめ構造	1. 歯の強度が増大
軸 受	改良型だ円軸受	だ円軸受	1. 軸受性能の向上
軸 継 手	キーレス	キー付	1. キー道の応力集中がなく信頼性向上 2. キーによるアンバランスがなく振動的に安定性向上
冷 却 器	プレートフィン付伝熱管	ハイフィン付伝熱管	1. 伝熱管の単位体積当たりの伝熱面積が1.5倍に増加 2. 冷却器の大きさが約30%低減 3. 冷却器全体の圧力損失が低減 4. 冷却水量が約40%低減
サ ク シ ョ ン バ イ プ	コーナベーン付溶接構造	エビ継ぎ溶接構造、又は鑄鉄	1. 圧力損失の低減
全 体 構 造	小形機は圧縮機本体を冷却器上に設置	圧縮機本体は基礎コンクリート上に設置	1. 小形セミパッケージ化 2. 据付が容易 3. 据付面積の低減

の設計回転数における側板、心板の最大応力の計算値を記入したが、十分余裕があることが分かる。

羽根車の起動停止の頻度が高い場合には、低サイクル疲労を考慮する必要がある。図13に疲労強度と欠陥寸法との関係を示す。疲労強度のばらつきは大きいですが、破面に現われた初期欠陥の寸法をパラメータとすると、破壊力学的に整理することができる。そこで、遠心応力と起動停止の頻度が与えられると、疲労破壊を起こさない許容欠陥寸法が求まるので、それ以上の欠陥を除去することにより、羽根車の信頼性を確保することができた。このほかに、腐食疲労強度、振動強度などについても十分検討して信頼性確保を図っている。

### 6 新型日立DH型遠心圧縮機

以上述べてきた性能、材料、強度の各分野で得られた新技術を、日立DH型遠心圧縮機に集約して適用した。表2は今回製品化した新型日立DH型遠心圧縮機の特長を従来機と比較して記したものである。この論文ではその全容を紹介することができなかったが、各所に新技術を大幅に取り入れている。まず、構造的な特長としては、圧縮機の大幅な小形化により、小容量機では圧縮機本体を冷却器上に設置することができたので、従来の基礎コンクリートわくが不要となった。それゆえに、遠心圧縮機のセミパッケージ化と据付面積、据付工程の大幅な低減が達成できた。また、性能面でも等温効率の向上、冷却水量の低減による大幅な省電力が達成できた。このように、新型日立DH型遠心圧縮機は、小形高性能、高信頼性の優れた遠心圧縮機であり、各種用途に十分使用できる。図14は新型日立DH型遠心圧縮機の容量範囲を示したもので、国内外で最大の280,000Nm<sup>3</sup>/hの大容量まで遠心圧縮機の適用範囲が拡大した。

### 7 結 言

遠心圧縮機の高速小形化を図るために、性能、材料、強度、各分野からの新技術を主要構成要素である羽根車、冷却器に

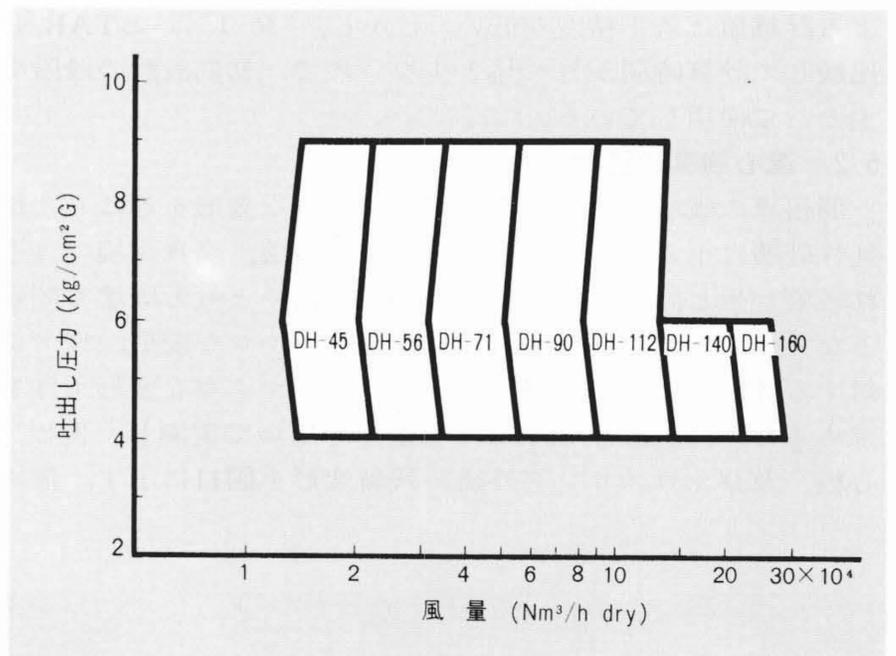


図14 新型日立DH型遠心圧縮機の容量範囲 高圧力、大容量側に適用範囲が拡大し、280,000Nm<sup>3</sup>/hの大容量まで使用可能となった。

適用した場合の検討結果について述べた。その結果、約30%の小形化と遠心圧縮機では未踏の280,000Nm<sup>3</sup>/hまで容量範囲を拡大することができた。

### 参考文献

- 1) 三階, 新井:「遠心圧縮機の性能予測」, 日本ガスタービン会議第2回講演会論文集 (昭49-6)
- 2) 吉永, 三階, 田中:「プレートフィン付熱交換器の研究」, 日本ガスタービン学会第4回講演会論文集 (昭51-6)
- 3) 上田, 森本ほか:「鑄鋼羽根車の精密鑄造化」, 日立評論, 54, 5, 58 (昭47-5)
- 4) 酒井, 森本:「焼成鑄型の製作方法について」, 鑄物, 47, 68 (昭50-10)
- 5) 大西:「ターボ羽根車の強度計算」, ターボ機械, 2, 2, 11 (昭49-5)