

# 最近の大容量プロセス用遠心圧縮機

## Recent Large Capacity Centrifugal Compressors for Various Kinds of Processes

プラントの巨大化、天然ガス液化装置の普及に伴い、これらに用いられる遠心圧縮機も大容量化、大形化を遂げつつある。

本稿は、大容量プロセス用遠心圧縮機の技術的問題点の解決と、品質の安定化のための方法として、NC加工と連結した自動設計システムの紹介、及び溶接構造ケーシングの試作試験の結果について述べる。自動設計システムは、流体力学的最適設計、有限要素法による応力解析などを含んでいる。また、溶接構造ケーシングのひずみ測定、閉回路性能試験などを行ない、満足すべき結果と実用化への確信が得られた。

なお、内圧による応力解析法として有限要素法が有用であることが分かった。

金木 忠\* Kaneki Tadashi  
横山英二\* Yokoyama Eiji  
若土信彦\*\* Wakatsuchi Nobuhiko  
安部 毅\*\* Abe Takeshi

### 1 緒言

クリーンエネルギーとしての天然ガス液化装置の普及に加え、エチレン分離、メタノール、アンモニア、尿素合成などの既存のプロセスの大形化に伴い、これらに用いられている遠心圧縮機も、一部は高圧化の要求も満たしながら、大容量化を遂げつつある。

大容量化という観点から、プロセス用遠心圧縮機の問題点を列挙すると、

#### (1) 性能面

二次元高 $N_s$ (比速度)羽根車、又は三次元羽根車の採用と羽根車入口流路の流れの解析、及びガス性状の正確な把握。

#### (2) 強度面

羽根車については、一般に大容量化により側板の傾き角(図2の $\alpha$ )が大きくなり、遠心応力の増大をもたらすので有限要素法などによる綿密な応力計算の必要性和、ダイアフラムやケーシングなどの静止部についても大形化に伴う変形量のチェックの必要がある。

#### (3) 生産能力

大形化による工場設備能力、試験設備能力と運搬の方法や手段

#### (4) 信頼性

過去の実績の範囲を超えるような場合が想定されるので、設計、製作、検査などに細心の注意が必要である。

これらの問題点の解決の方法として、本稿では次の二つを紹介する。すなわち、

(1) 性能面における豊富な実績の解析に基づく最適設計と、強度面における有限要素法の適用。更にこれらの設計計算と、軸受ばね定数を考慮したロータの危険速度、アンバランス応答などの計算をすべて含み、数値制御(以下、NCと略す)加工と連結した、遠心圧縮機の自動設計システムの紹介。

(2) 大形化に伴い、納期、品質の安定化、輸送などの面からメリットが大きいと思われる溶接構造ケーシングの試作試験の結果の報告。

以下、性能面からの、特に羽根車の最適設計の必要性、強度面への有限要素法の適用例などとともに、自動設計システム、溶接構造ケーシングの順に述べる。

### 2 プロセス用遠心圧縮機の技術的問題点

#### 2.1 性能面からみた羽根車の標準化と最適設計

一般にプロセス用遠心圧縮機は注文生産品であり、ユーザー側の購入仕様に基づく機種を選択から設計業務が始まる。

この種の圧縮機は信頼性が第一であり、大容量化、高圧化、取扱いガスの相違などの要因から、メーカー側としては類似の既作品の設計をそのまま用いることが信頼性の確保につながる、といった考え方が生まれやすい。すなわち、最近の方向として、プロセス用遠心圧縮機の、羽根車を含めた機器すべてを標準化し、これらの標準化された部品の選択、組合せだけにより、製品を作り上げようとする流れがあり、極端な場合は一切の新設計を行なわない、とする場合もある。

羽根車やダイアフラムなど、流体性能に関係する部品の標準化と、軸受やオイルフィルムシールなど、機構部分に関係する部品の標準化とは自ずとその性格が異なるので、特に羽根車の標準化に際しては広い意味の標準化の考え方が必要となる。

一般に注文生産である遠心圧縮機は、流体性能に関して既作品と全く同一であることはまずありえない。混合ガスの組成、吸込温度、取扱い流量など、若干なりとも類似の既作品とは異なっている。また、この分野での技術の進捗状況からみて、今後どのメーカーも実績のない、新しいガス、新しい用途の遠心圧縮機が必要となる事態も想像される。

このようなとき、従来の意味で標準化された羽根車を適用する場合、例えば外径、羽根出口幅など、標準羽根車の寸法を一部変更せざるを得なくなる。寸法変更の際、その流体力学的意味を正しく把握していれば問題は少ないが、多段圧縮機では、途中のある段の羽根車の設計にわずかなミスがあってもそれ以降の段の運転点が図1に示すように、徐々に大きくなって全体としては所定の圧力が得られなかったり、サージ点への余裕が少なくなったりして、使用不能となる可能性がある。

また、寸法を変更することにより、厳密には羽根車の入口、出口の流れの状況、羽根車内の相対速度の変化過程など、流体性能を支配する主因子の値が異なってしまい、所定の性能が得られなくなる可能性がある。すなわち、もっと広い意味

\* 日立製作所土浦工場 \*\* 日立製作所機電事業本部

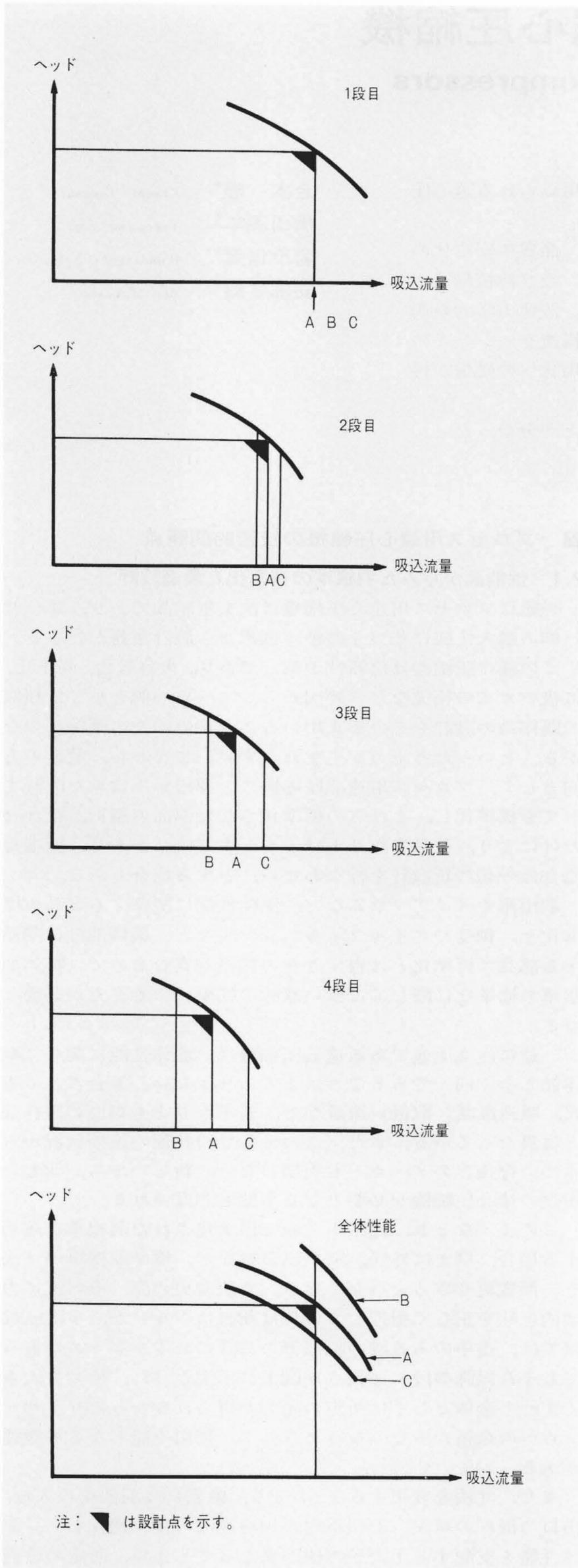


図1 全体性能に及ぼす設計点のずれの影響 4段の遠心圧縮機で、2段目の設計点のずれが全体に及ぼす影響を示す。図中のAは正しい例を、Bは小流量側で作動した例を、またCは大流量側で作動した例を示す。後段のずれが徐々に大きくなり、全体性能では予想と大きく食い違うことが分かる。

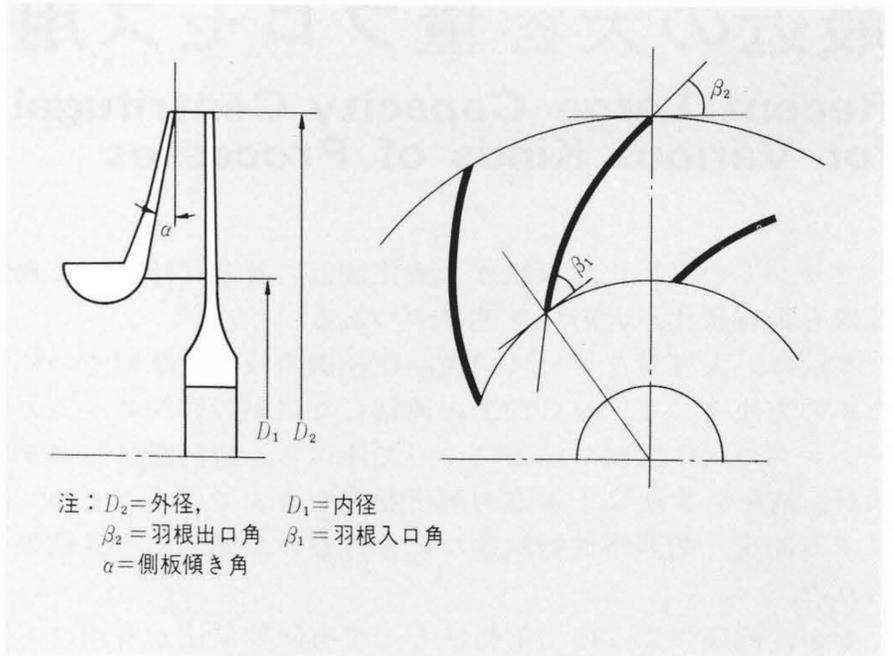


図2 羽根車の代表的寸法の例 例えば、 $D_2$ 、 $\beta_2$ が既知とすると、可変寸法は $D_1$ 、 $\beta_1$ 、 $\alpha$ の三つある。

の標準化、換言すれば最適設計が必要となる。

例えば、羽根車の外径、及び羽根出口角度が既に決まっているとして、二次元羽根車の性能に関する主な幾何学的寸法を図2に示す。仮にこれらの数値にそれぞれ10とおりずつの変化を許すとすれば、羽根車の総数は1,000種類となる。この1,000種類の組合せのうち、一つの組合せを選択する要因は基本的には羽根車の入口、出口の速度三角形と、羽根車内相対速度の変化過程を従来の実績と一致させることにある。すなわち、羽根車の標準化とは、幾何学的寸法の標準化ではなく、流体力学的標準化であり、幾何学的寸法はその結果として表示されるにすぎないことになる。

このような流体力学的標準化の正当性の根拠は、工場試験結果や現地試験結果の綿密な解析にある。一般に、多段圧縮機の全体性能から各段の性能を求めることは不可能であるが、各段が流体力学的に相似であれば、全体性能から各段の性能を繰り返し近似によって求め得る。筆者らは、過去のデータを電子計算機プログラムを用いて解析し、最適設計システムに発展させた。本設計システムは2.3で紹介するが、その根拠となっているものの一つは流体力学的標準化と、試験結果の解析によるフィードバックであり、すべての試験結果が本設計システムの実績となっている。

流体力学的標準化により、設計の際は前述のように1,000種類を超える羽根車のすべての性能比較を漏れなく行なう必要があり、製作の際は一つ一つ幾何学的寸法の異なる羽根車を製作する必要がある。この煩雑さの解決のために電子計算機による綿密な自動設計システムと、それと連結したNCによる加工が必要となる。

## 2.2 機構的検討

機構構成部品については、従来の意味の実績のある部品の標準化を進めることが、品質の安定に寄与することはもちろんである。

次に、大容量化という点で二、三の特記すべき事項に触れておく。

### (1) 危険速度とカップリング

大容量化により、羽根車間ピッチが増大し、特にロータの一次危険速度の低下をもたらすので、軸受のオイルホイップを避けるため、テイルティングパッド形軸受を用いることが好ましい。

また、特に高圧化を伴う場合、大きなトルクを伝達するた

め、カップリングや軸の厳密な強度チェックが必要となる。カップリングと軸のはめあい部をキーなしの油圧ばめとする方法は一つの有効な方法である。カップリングは、ギヤカップリングを用いるのが普通であるが、リジッドカップリングの検討も考えている。いずれにせよ、大きなトルク伝達のため、重量の大きなカップリングを用いると特に二次危険速度が低下するので、カップリングの軽量化が当面の課題でもある。

危険速度は軸受のばね定数を考慮して決められるが、軸受箱自体がケーシングにボルトなどで締結される構造の場合は、この部分が一つのばねとなり危険速度を下げることもある。

また、安定した軸系であることを確認するためには、軸系のアンバランス応答計算、ねじり振動計算をしておくことも必要である。

## (2) 羽根車の遠心力による応力と変形

大容量羽根車は概して側板の傾き角(図1の $\alpha$ )が大きくなるため、遠心応力の綿密なチェックが必要である。更に、回転中の伸びにより、入口側のラビリンスが接触しないようにしておかねばならない。図3に有限要素法による計算結果の一例を示す。

## (3) ダイアフラムの変形とスラスト力の変化

遠心圧縮機の大形化に伴い、ダイアフラムの差圧による軸方向の変形のチェックが必要となる。特に背中合せの配列の場合、中間のダイアフラムには大きな差圧がかかることになる。また、背中合せの配列の場合、運転点の変化による残留スラスト力の変化が大きいため、特に注意する必要がある。

## 2.3 自動設計システムの例

以上述べてきたように、遠心圧縮機の大容量化、大形化に代表される技術の見直しにより、従来にも増してきめ細かい設計上、製作上の技術が必要となってきた。2.1で述べたように、数千種類の羽根車寸法の組合せから一つの最適形状を選択することが必要になり、従来の比較的単純な計算手法に代

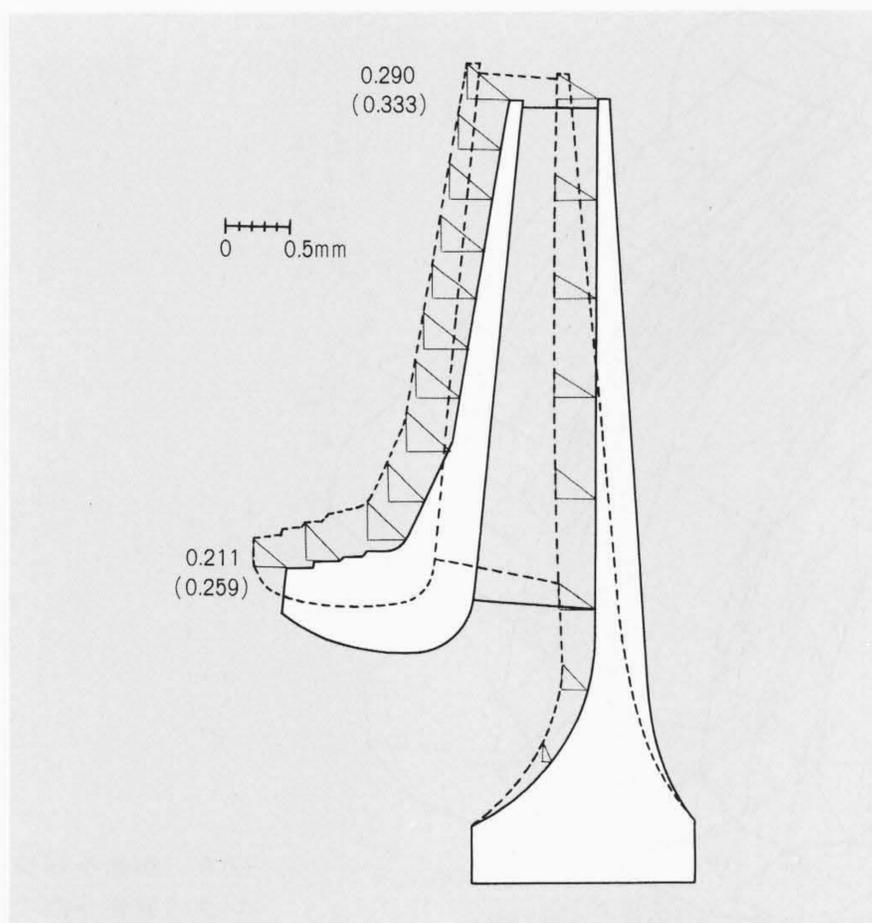


図3 羽根車の遠心力による変形計算結果(有限要素法) 羽根車外径450 $\phi$ 、周速300m/sのときの計算結果を示す。上段の数字は径方向変位量(mm)、括弧内は軸方向変位量(mm)である。

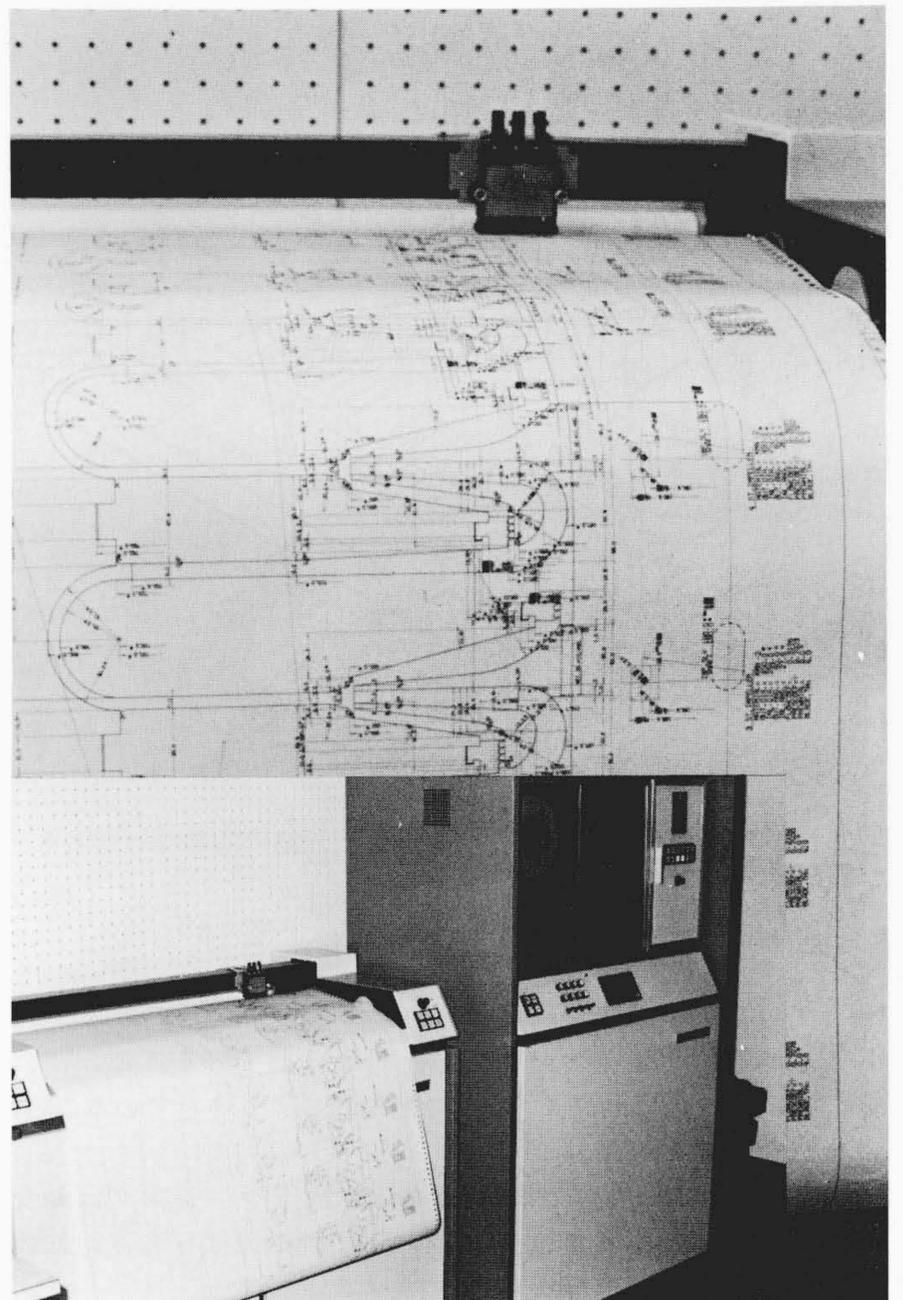


図4 自動設計による計画図の作画 XYプロッタによるバレル形遠心圧縮機の作画例を示す。

わって応力計算などに有限要素法が用いられるようになった。製作の際は、一品生産の加工精度向上や生産性の面からNC加工が必要となった。

筆者らは数年前よりこれらの点に着目し、重要部品がNCと直接結合された自動設計システムの開発を進めてきた。本システムの詳細は別の機会に報告する考えであるが、今まで述べてきた技術的検討による品質の安定化に、本システムが前提となっていることは論をまたない。図4に本システムによる設計、自動作画中の計画図の一例を示す。

## 3 溶接構造ケーシングの試作

遠心圧縮機の大形化により、従来の鋳造ケーシングに対する見直しの気運が高まってきた。すなわち、鋳造設備、納期的問題、輸送問題、更には大形化による鋳造欠陥の問題などが遠心圧縮機製作上のネックになりつつある。これらのネック打開のための一つの方法としては、従来の水平分割形鋳造ケーシングを溶接構造化することが考えられる。このため、筆者らは溶接構造ケーシングの試作を行ない、内圧下でのケーシングのひずみ測定と有限要素法による解析との比較、従来の鋳造ケーシングと試作溶接構造ケーシングの両方による、閉回路性能試験結果の比較などを行ない、試作溶接構造ケーシングについて満足すべき結果を得たので次に紹介する。

### 3.1 溶接構造ケーシングの設計

鋳造ケーシングの溶接構造化に当たっては、

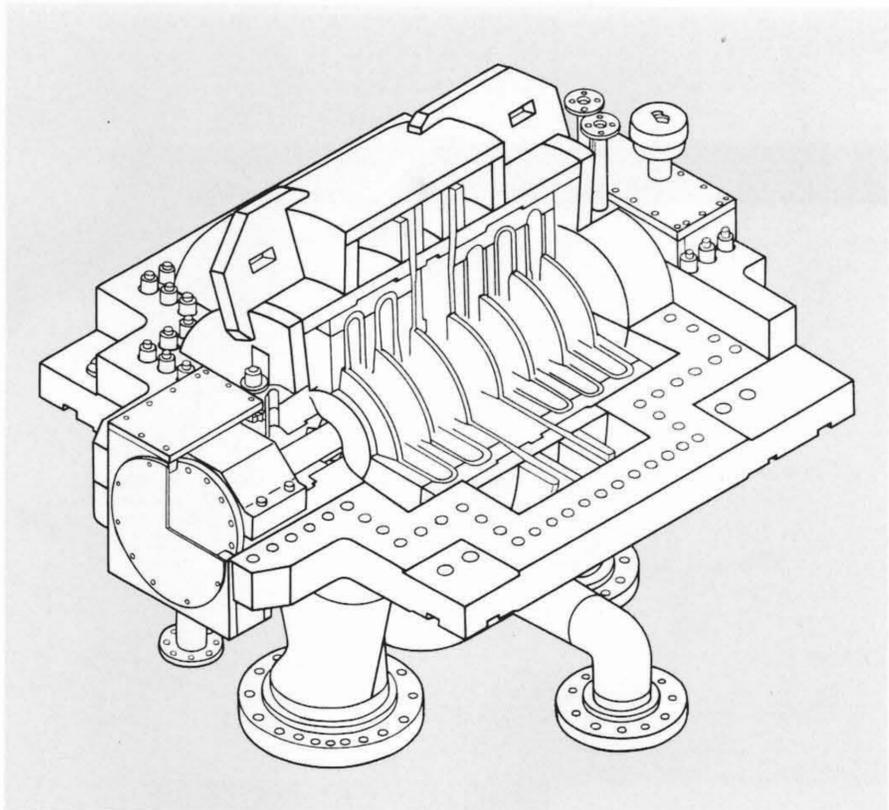


図5 試作溶接構造ケーシング構造図 設計圧力40kg/cm<sup>2</sup>Gの水平分割形ケーシングとその内部構造を示す。

- (1) ケーシング強度が鋳造ケーシングと同等以上であること。
  - (2) 流体性能が鋳造ケーシングと同等以上であること。
  - (3) 経済的に合理的であり、かつ納期短縮がなされていること。
- の3点を目標とした。

図5に試作ケーシングの構造を示す。下ケーシングは軸受箱と一体構造となっており、2.2の(1)で述べたように、回転体の振動に対しても十分な剛性を持っている。

試作ケーシングの肉厚、リブの位置・大きさなどは有限要素法による計算により決められた。従来の鋳造ケーシングと試作溶接構造ケーシングの有限要素法による応力解析の例を図6、7に示す。

### 3.2 溶接構造ケーシングの製作

試作ケーシングの製作過程を、写真により図8(a)~(d)に示す。

### 3.3 溶接構造ケーシングの試験

試作ケーシングに対し、次の試験を行なった。

- (1) 40気圧~60気圧の内圧下でのケーシング各部のひずみ測定と有限要素法による解析との比較
- (2) オイルフィルムシールを装着して、窒素ガスによる閉回路試験を行ない、鋳造ケーシングの場合との性能比較

上記(1)のひずみ測定は約600枚のひずみゲージを用い、水圧により内圧を60kg/cm<sup>2</sup>Gまで上げて、20kg/cm<sup>2</sup>G、40kg/cm<sup>2</sup>G、60kg/cm<sup>2</sup>Gのときの各データを図9に示すように自動読取機により採取した。40kg/cm<sup>2</sup>G時の測定値と計算値の比較を図10に示す。測定値と計算値はよく一致しており、有限要素法による解析の精度の良さが裏付けられた。

また、(2)の性能試験の設計値を表1に示す。試験はオイルフィルムシールを用い、窒素ガスにより設計値どおりの運転を行ない、データを採取した。性能試験状況を図11に、測定値の鋳造ケーシング時との比較を図12に示す。溶接構造ケーシングの場合、図5で見られるように、スクロール部分が角形であるため、設計時若干の性能低下が予想されたので、スクロール部分の面積を円周方向に沿ってガスの流れ量の増加分に正確に見合う構造とし、更に静圧回収のため、鋳造ケーシングのスクロール面積より大きくしたため、鋳造ケーシングと同等の性能が得られたものと思われる。

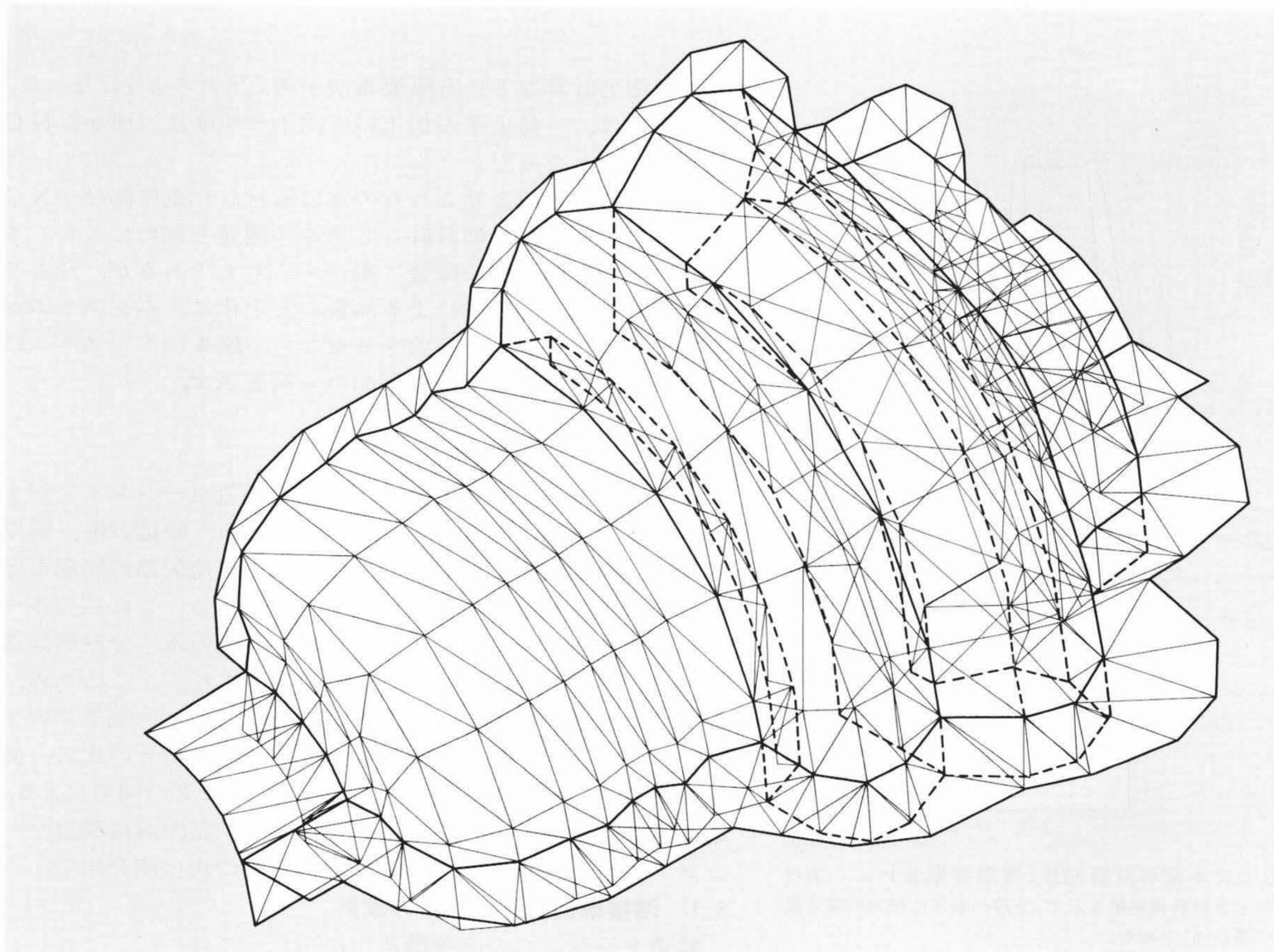


図6 鋳造ケーシングの要素分割  
従来形鋳造ケーシングの要素分割を示す。分割要素数は約600要素である。

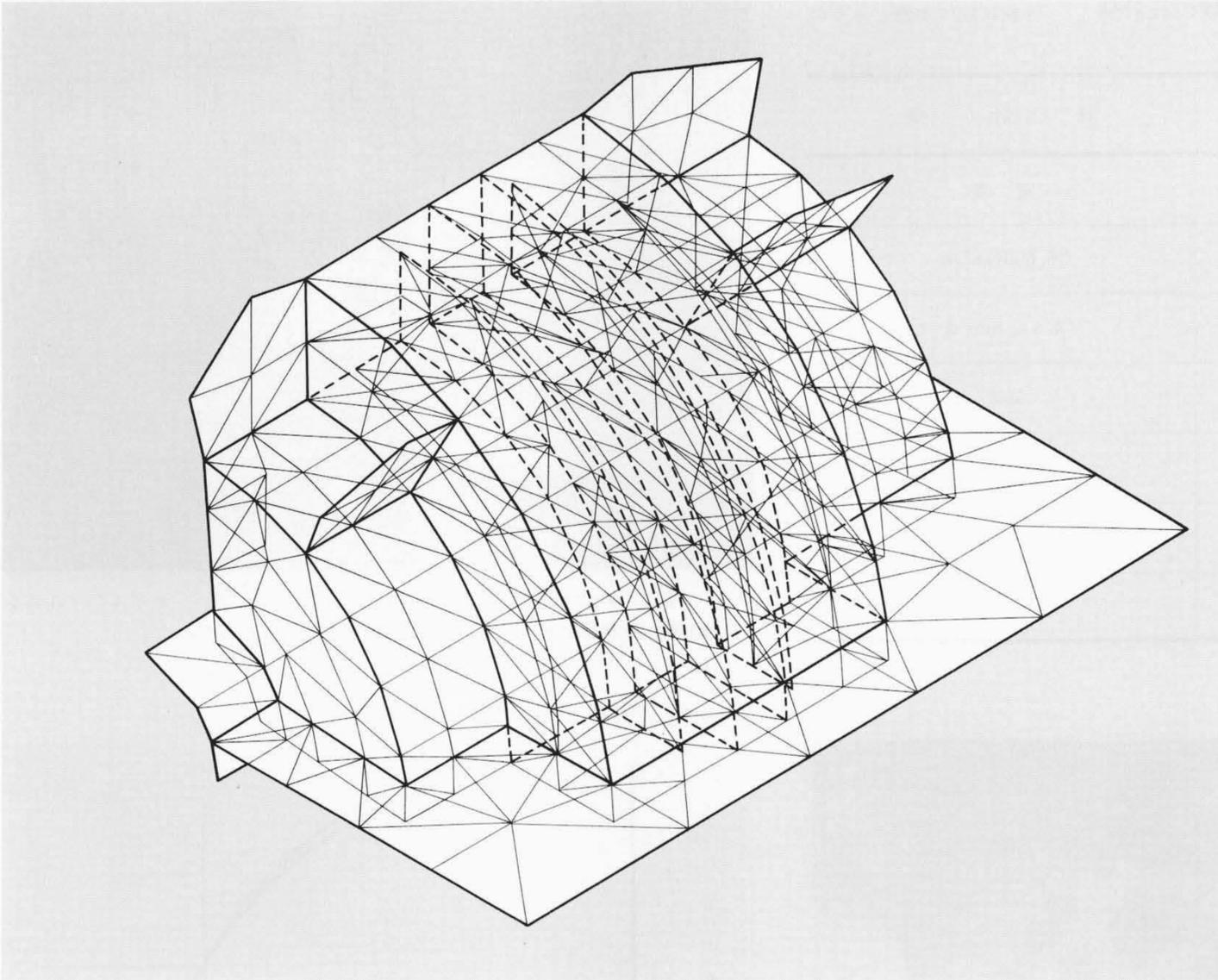
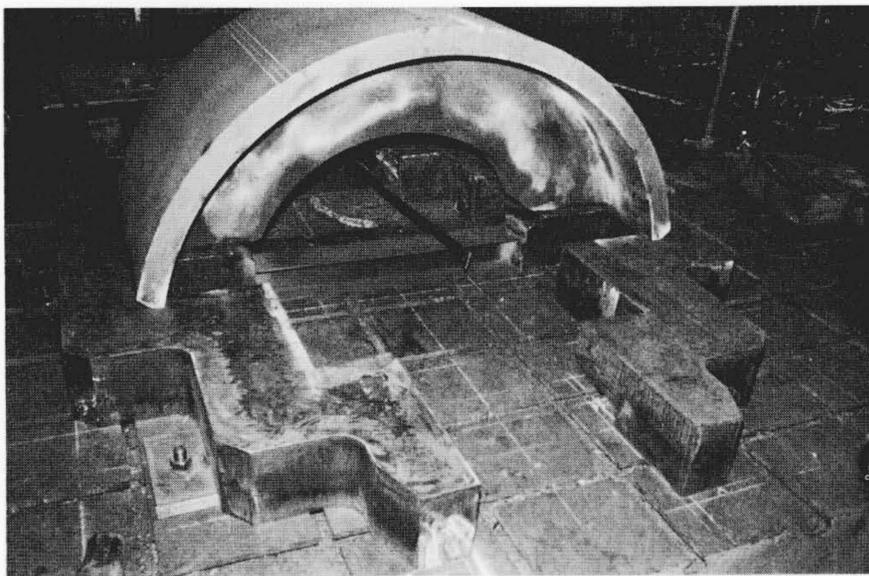
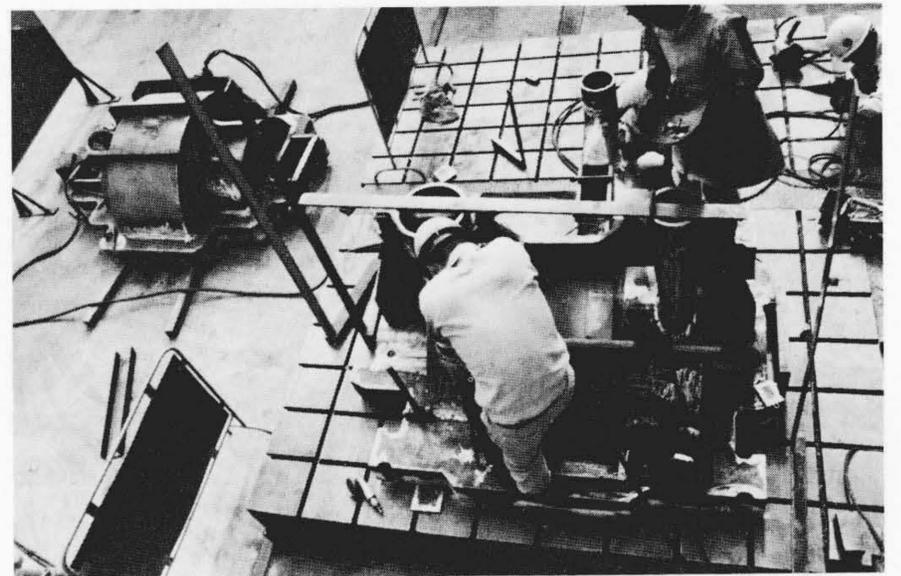


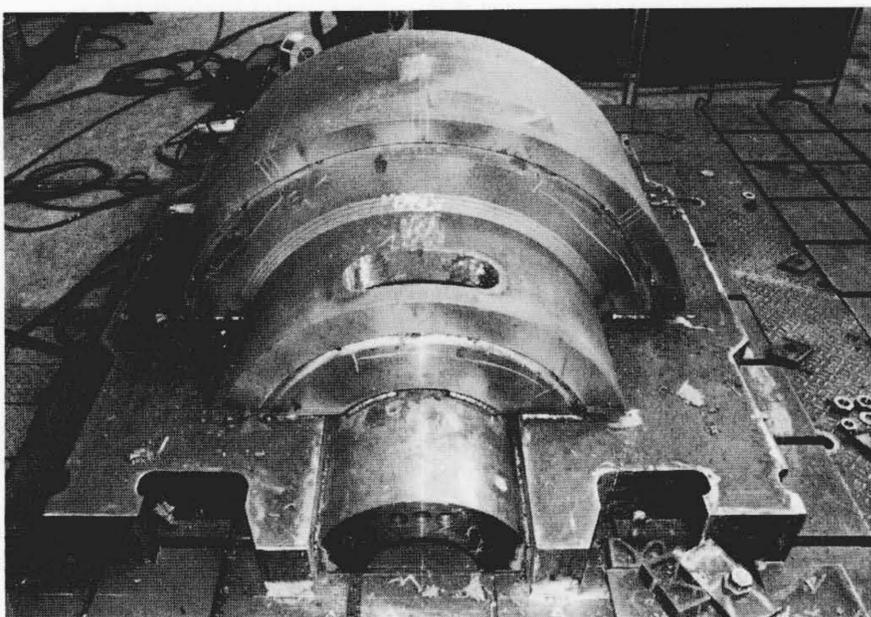
図7 試作ケーシングの要素分割 図5に示す試作ケーシングの有限要素法計算用要素分割図を示す。要素数は図6とほぼ同じである。



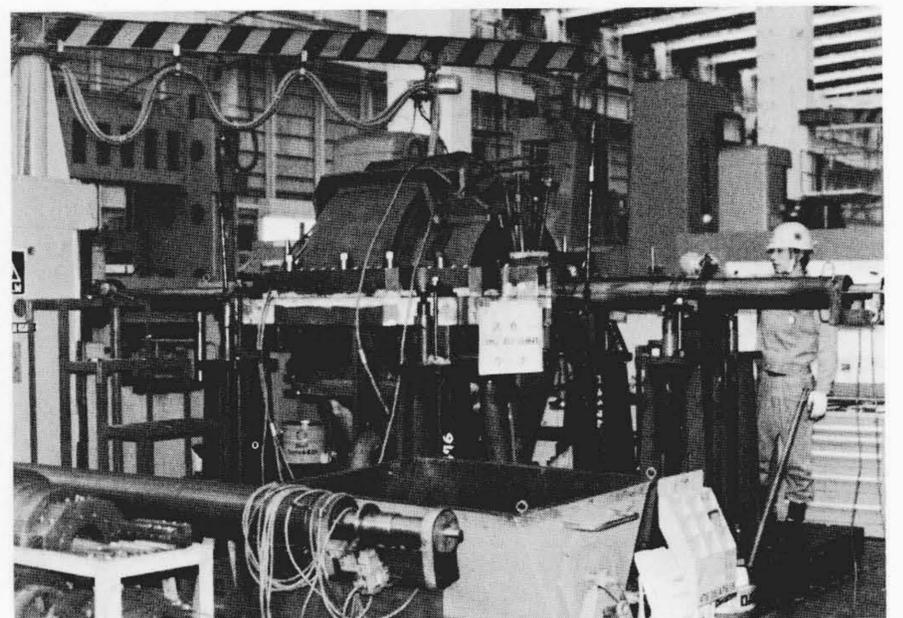
(a) 上ケーシング



(c) 下ケーシングにノズルを取付(左側に上ケーシングが見える)



(b) 下ケーシング



(d) ボーリング

図8 試作溶接構造ケーシングの製作過程 主な製缶作業、機械作業を4枚の写真で示す。

表1 試作ケーシング性能試験の設計値 性能試験は本表とおりの条件で行なわれた。

項目	設計値
取扱いガス	窒素
流量	35,600Nm <sup>3</sup> /h
吸込圧力	4.5kg/cm <sup>2</sup> G
吸込温度	35°C
吐出し圧力	33kg/cm <sup>2</sup> G
回転速度	11,780rpm
軸動力	3,640kW

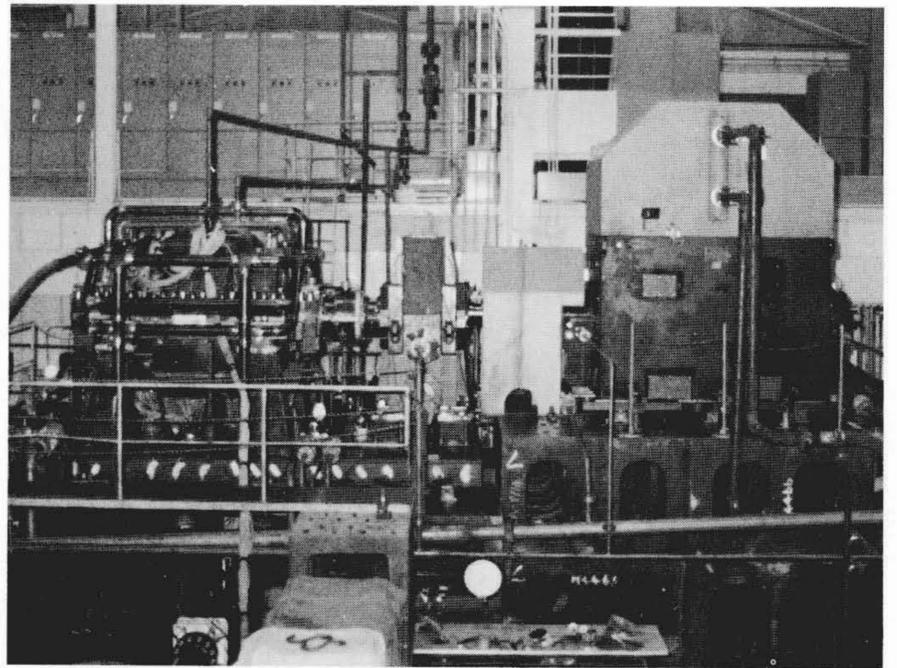


図11 試作ケーシングを用いた閉回路性能試験 オイルフィルムシール機構を装着し、表1に示す諸設計値で性能試験を行なった。

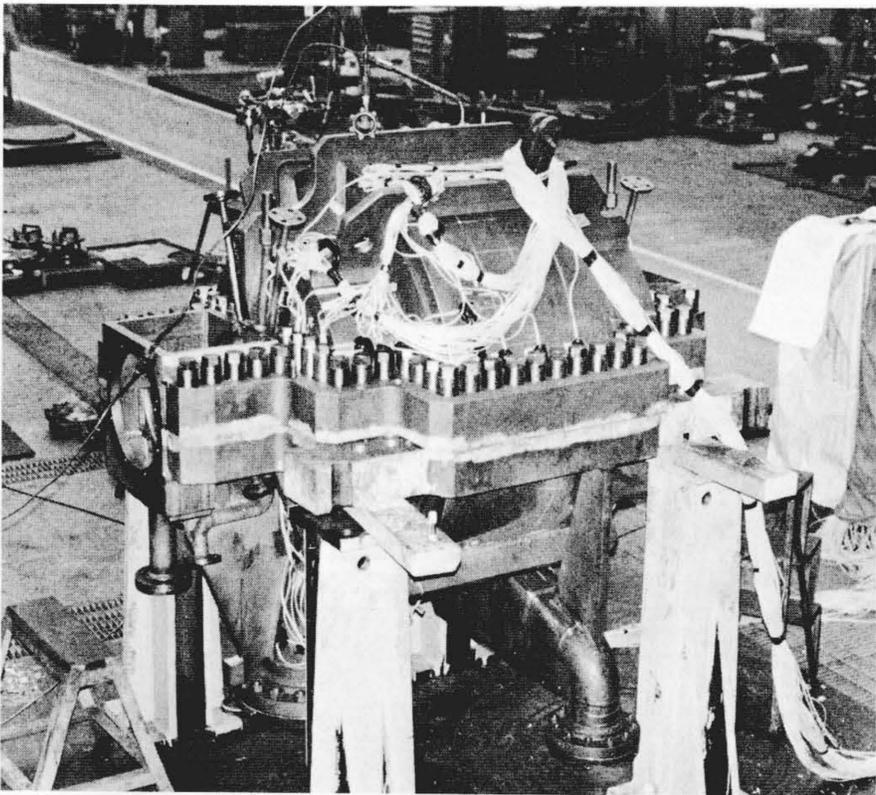


図9 溶接構造ケーシングの内圧下でのひずみ試験 約600枚のひずみゲージをはり付け、水圧下で各部のひずみを測定した。

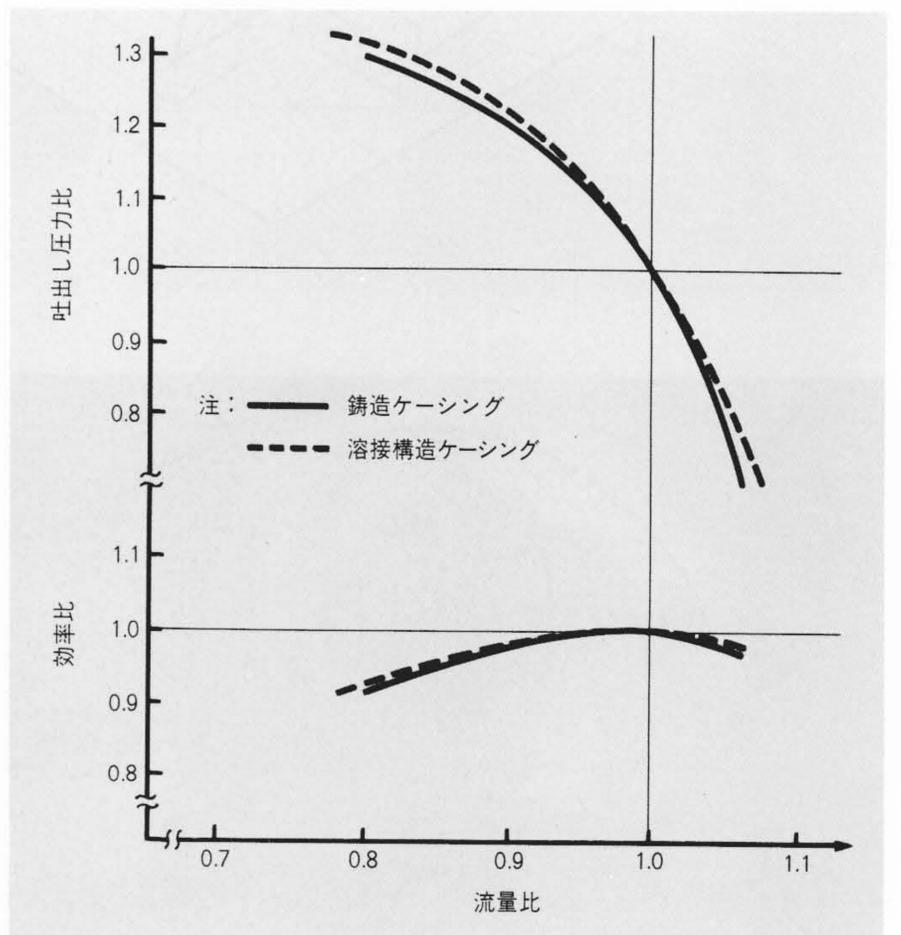


図12 実ガスによる閉回路性能試験結果の比較 鑄造ケーシングと溶接構造ケーシングで性能に及ぼす差異がほとんどないことが分かる。

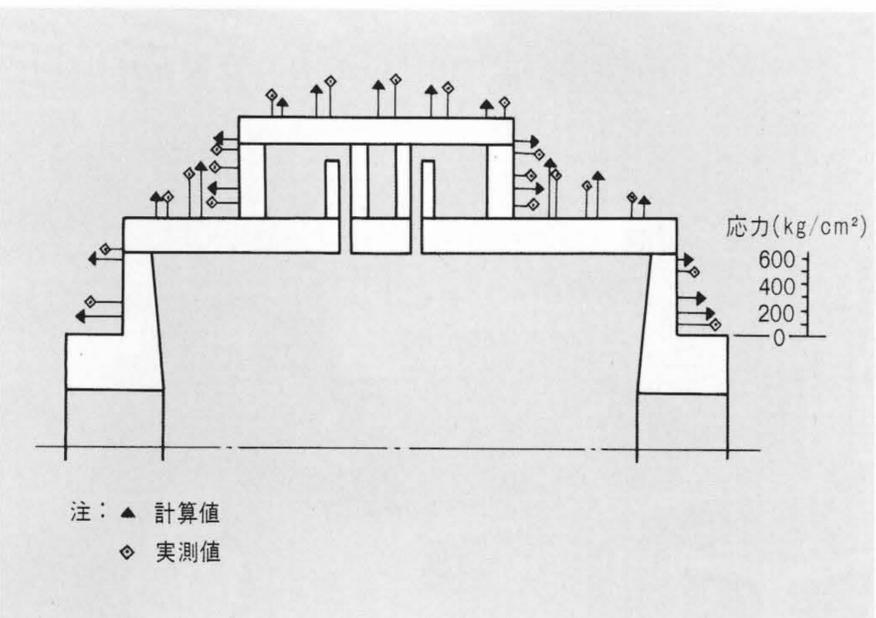


図10 試作ケーシングの内圧によるひずみ 内圧40kg/cm<sup>2</sup>Gでの計算値との比較を示す。

#### 4 結 言

以上、大容量プロセス用遠心圧縮機に対する技術的問題点の解決と、品質の安定化のための方法として、

- (1) 流体力学的標準化、有限要素法、危険速度、アンバランス応答の計算など、すべての設計計算を含み、NC加工とも連結した自動設計システムの完成。
- (2) 大形化に伴うネック打開のための溶接構造ケーシングの試作の結果、強度、性能など、あらゆる面から従来の鑄造ケーシングと同等以上の結論が得られ、十分実用に供し得る確信が得られた。
- (3) ケーシングの応力解析の手法として、有限要素法は十分な精度があり、有用であることが分かった。