

最近の化学プラント用圧縮機の動向

Recent Trend of Compressors for Chemical Plant Applications

横山英二* Yokoyama Eiji

各種のプラントで、ガスの昇圧、循環、圧送などに用いられる圧縮機は、各種産業の急速な発展と大容量化及び合理化によって、過去十数年間にその生産実績を著しく伸ばしてきた。中でも遠心圧縮機の高圧化、大容量化、高効率化などの技術の進歩により、往復圧縮機の伸びを抑えて顕著な伸びを示した。

本稿は、統計的資料や文献を基に、圧縮機の用途、高圧化、大容量化の推移をまとめ、また日立製作所の圧縮機に対する研究開発の成果や、その設計、製作及び検査の各段階に電算機を有効に活用した品質管理など、最新の技術について紹介する。

1 緒言

各種の化学プラントで、ガスの昇圧、循環、圧送などに用いられる各種のプロセス用圧縮機は、石油や化学業界の発展とともに過去十数年間に技術的に著しい進歩を遂げ、着実に生産実績を伸ばしてきた。

図1に、過去十年間に日本国内で生産されたプロセス用の各種圧縮機の台数の構成比率を示す。遠心圧縮機が全体の70%を占めており、次いで往復圧縮機が16%、軸流圧縮機が10%、それに回転式圧縮機が4%の順となっている。

このうち、軸流圧縮機以外は、ほとんどがなんらかのプロセスに用いられている。

遠心圧縮機は、この間に最も急速に実績を伸ばしており、1969年までの国内生産台数は、年間二十数台であったが、1970年には82台、1971年には106台となり、その後も毎年80~100台程度が生産されている。これは信頼性が高く、運転保守が

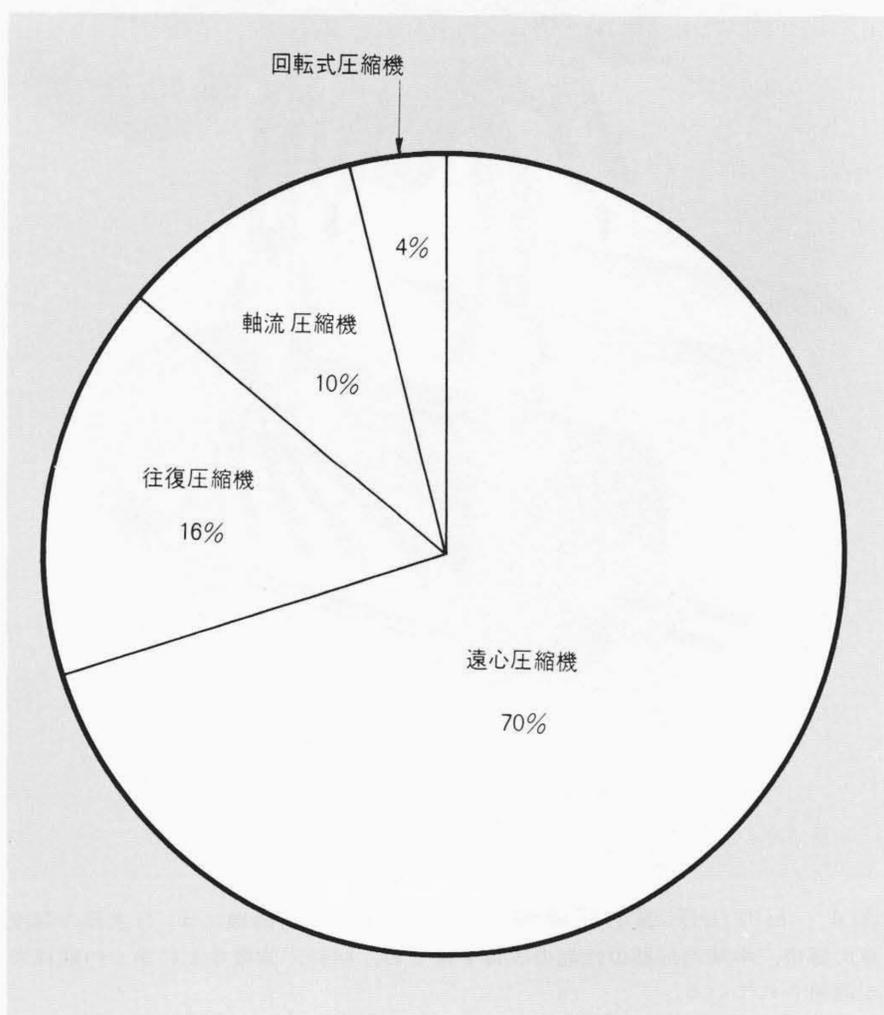


図1 各種圧縮機の構成比率 過去10年間に、国内で生産された各種圧縮機の台数構成比率を示す。

表1 遠心圧縮機の用途 近年急速な需要の伸びを示した遠心圧縮機の用いられている分野、プラントの種類及び圧縮機の用途を示す。

産業分野	プラント	種類
石油精製	接触分解	空気圧縮機 ガス圧縮機
	接触改質	ガス循環機
	接触脱硫	ガス循環機
石油化学	潤滑油	フルーガス圧縮機 プロパン冷凍機
	エチレン分離	分解ガス圧縮機 プロピレン冷凍機 エチレン冷凍機
	酸化エチレン	空気圧縮機 ガス圧縮機
合成化学	ブタジエン	ガス圧縮機
	アンモニア	空気圧縮機 天然ガス圧縮機 合成ガス圧縮機、合成ガス循環機 アンモニア冷凍機
	尿素	炭素ガス圧縮機
天然ガス	メタノール	合成ガス圧縮機 合成ガス循環機
	L N G 液化	プロパン冷凍機、エチレン冷凍機 混合冷媒圧縮機
	L N G 受入	ボイルオフガス圧縮機
	ガス圧送	パイプライン圧縮機
その他	リインジェクション ガスリフト	天然ガス圧縮機
	酸素分離	空気圧縮機、酸素圧縮機 窒素ガス昇圧機
	作業用空気源	空気圧縮機

* 日立製作所土浦工場

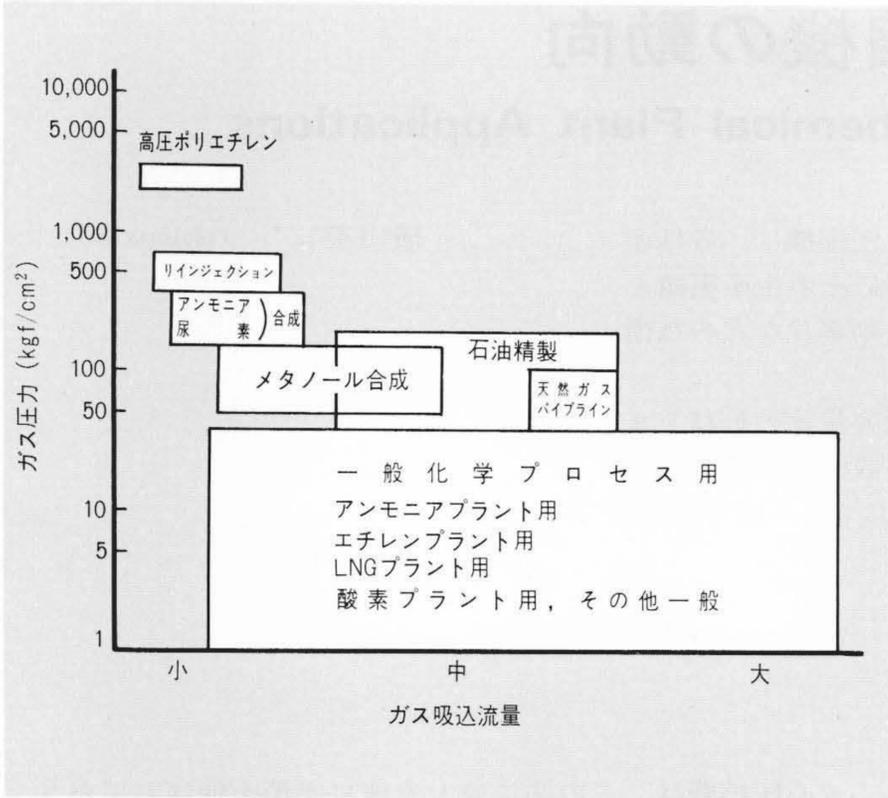


図2 各種圧縮機の用途別適用範囲 各種のプラントが要求する圧縮機の風量と吐出し圧力の範囲を示す。

容易であるという遠心圧縮機本来の特長に加えて、高圧化と大容量化に適応する技術の進歩が、プラントの要求と合致したことによるものと思われる。現在遠心圧縮機が採用されている産業分野は、石油精製、石油化学、合成化学、天然ガス関連、酸素分離、その他非常に広範囲の分野にわたっている。表1に遠心圧縮機が使われているプラント、及び圧縮機の用途をまとめて示す。

一方、往復圧縮機は、運転保守の面で遠心圧縮機に劣るが、小容量に適していること、効率がよいこと、広範囲の容量制御が効率よく行なえること、高圧に適していること、ガスの組成が変わり分子量が変化しても性能に大きな影響を及ぼさないことなど多数の特長をもっており、過去十年間の国内の生産台数は、ほぼ横ばいの状態を保っている。

軸流圧縮機の過去の需要は、大部分が高炉送風用であったが、最近になって化学プロセス用に数台が採用されている。

図2に各種用途に対して圧縮機に要求される風量と圧力の範囲を示す。

各種のプラントは、近年大容量化と合理化の方向に進み、プラントに採用される圧縮機については、大容量化、高圧化、高効率化、高速・小形化、信頼性の向上、運転及び保守の簡略化などの要求を満足すべく努力が続けられている。次にこれらの技術的動向と最近の成果について概説する。

2 圧縮機の大容量化

図3は、国内で生産された軸流圧縮機、遠心圧縮機及び往復圧縮機の大容量化の傾向を動力(MW)で示したものである。往復圧縮機では、1970年まではアンモニア合成用が、1970年以後はポリエチレンプラント用超高压エチレン圧縮機が動力においてリードしている。

遠心圧縮機では、1968年までは酸素プラント用の原料空気圧縮機であったが、1969年以後は、エチレンプラント、アンモニアプラント、LNG(液化天然ガス)プラントなどが動力の記録を更新してきた。

軸流圧縮機は、我が国の鉄鋼業の成長に伴い、高炉送風用として図3に示すように大容量化の道をたどってきたが、化学プロセス用としての実績はまだ数えるほどしかない。

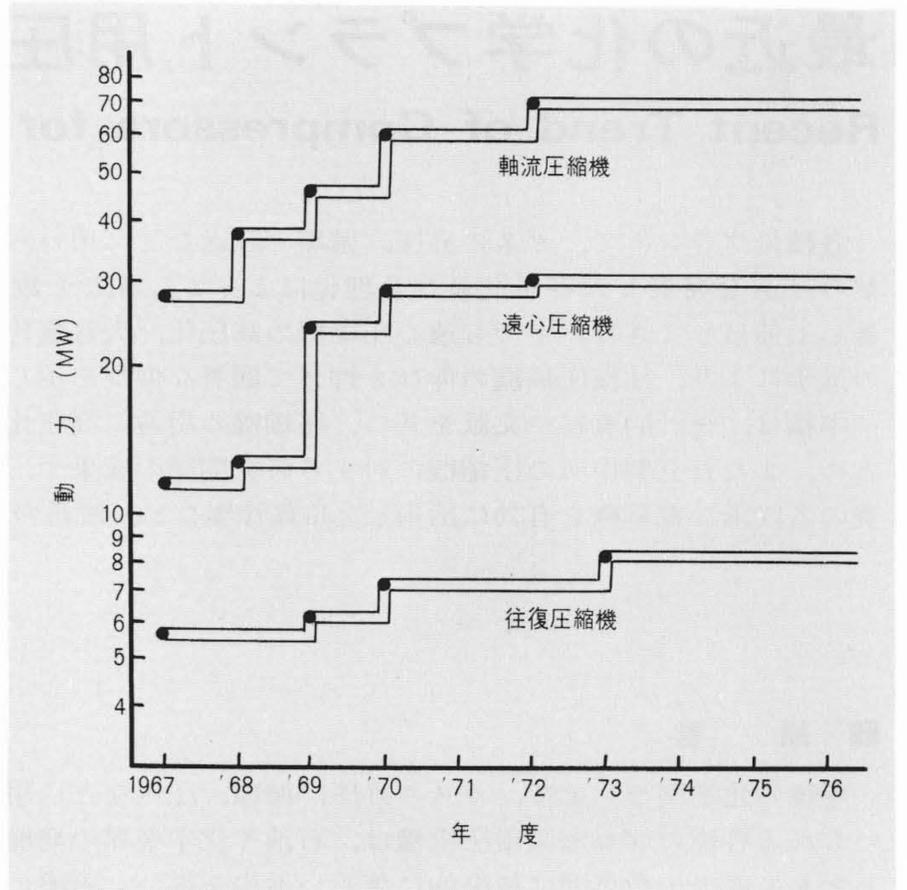


図3 圧縮機の大容量化の推移 軸流圧縮機、遠心圧縮機及び往復圧縮機の大容量化の傾向を、圧縮機の単機当たりの動力で示す。

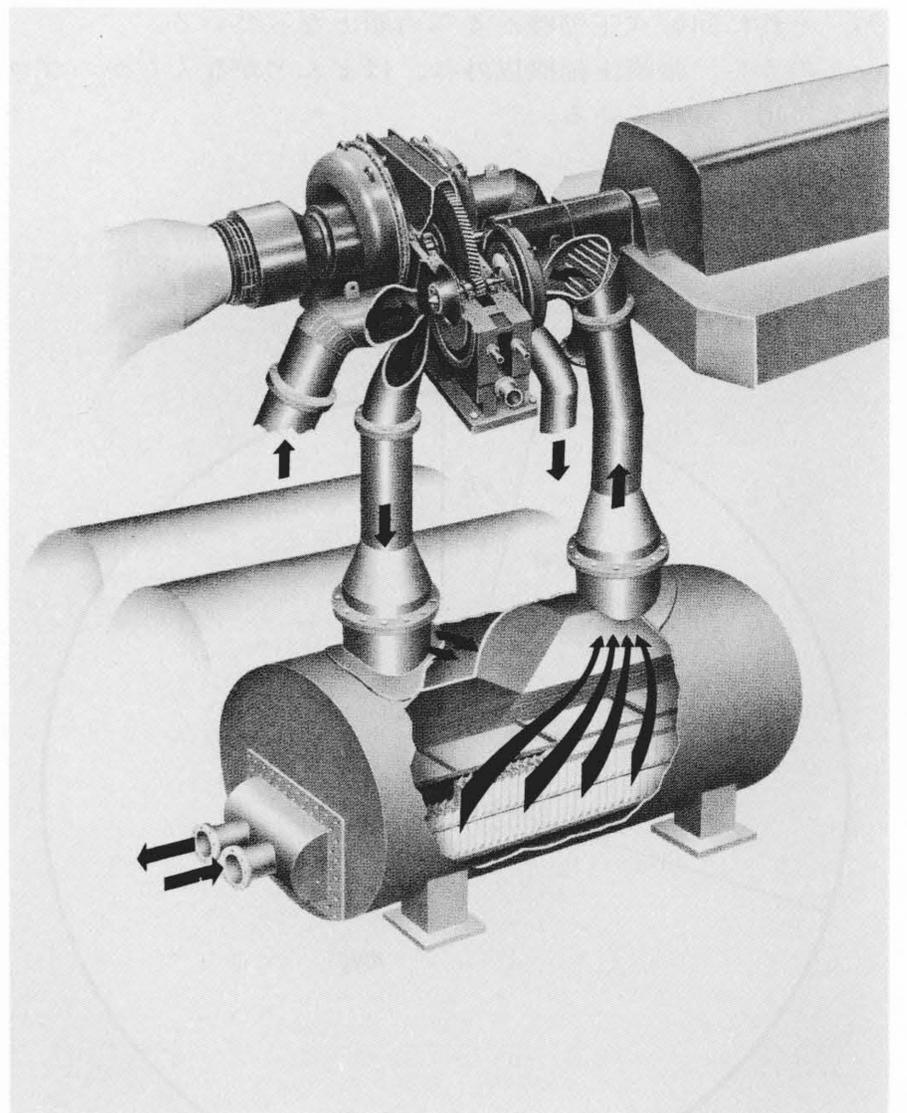


図4 日立DH形遠心圧縮機 日立DH形遠心圧縮機には、3次元の羽根車の採用、中間冷却器の性能の改善をはじめ、材料、強度などに多くの新技術が適用されている。

図3は、動力の実績であるが、圧縮機の吸込風量で見ると大気圧の空気を吸い込む空気圧縮機の大風量化が著しく、大容量酸素プラント用原料空気圧縮機の例では、図4に示す日

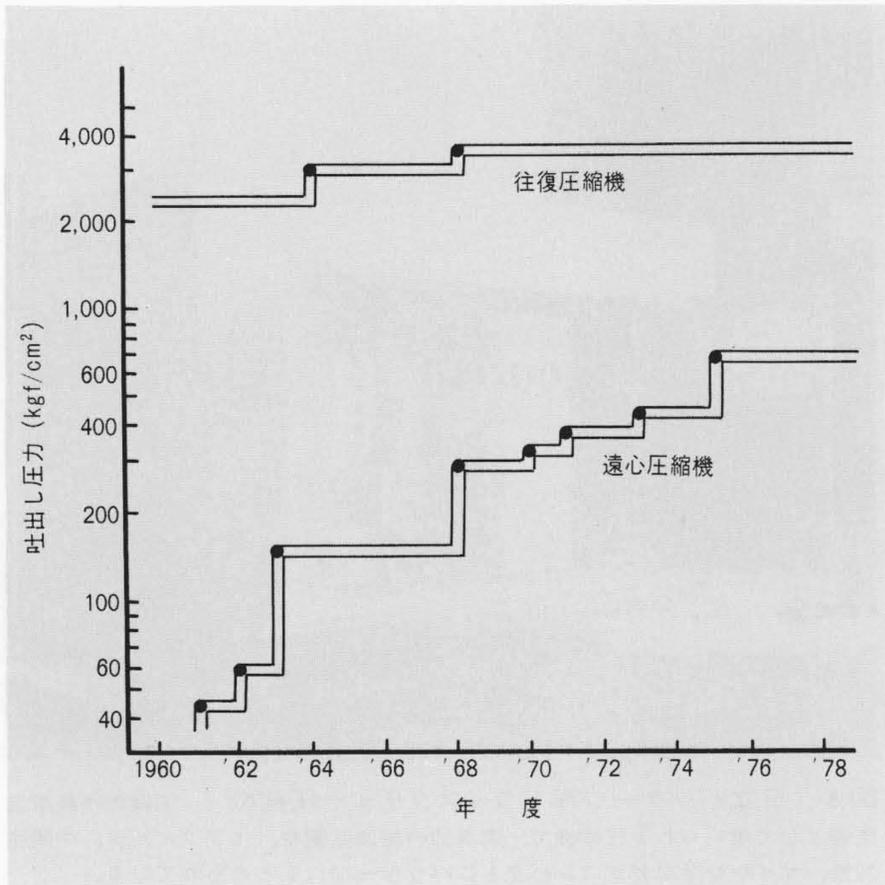


図5 圧縮機の高圧化の推移 世界での往復圧縮機及び遠心圧縮機の高圧化の推移を示す。

立DH形遠心圧縮機がある。十数年前には、 $50,000\sim 60,000\text{ Nm}^3/\text{h}$ 程度の風量に対しては軸流圧縮機が有利とされていたが、現在では既に $160,000\text{ Nm}^3/\text{h}$ を超えるものまで等温圧縮機で軸流圧縮機に匹敵する効率の実績を得ている。なお、この種の空気圧縮機については、既に $300,000\text{ Nm}^3/\text{h}$ のものまでシリーズ化が完了している¹⁾。

3 圧縮機の高圧化

圧縮機の高圧化の技術でも、近年急速な進歩の跡がみられる。図5に世界での遠心圧縮機及び往復圧縮機の高圧化の推移を示す。

往復圧縮機は、高圧ポリエチレン重合プロセスに使用される超高压エチレンガス圧縮機が常に高圧力の記録を保持している。

一方、遠心圧縮機では、高圧での軸封の技術の進歩、 $10,000\text{ rpm}$ を超える高速ロータ軸系の動的設計技術の進歩と、小流量用高性能羽根車の設計及び生産技術の確立により、図5にみられる高圧化を成し遂げた。当初、石油精製プラントのガソリン改質プロセス用のガスの循環機として採用され、1963年には米国で150気圧の遠心圧縮機がアンモニア合成用に採用され、その後圧縮機の高圧技術の進歩とともに合成圧力も上がり、290気圧、320気圧と順次記録を更新してきたが、1971年ごろから天然ガスのリインジェクション用として遠心圧縮機が採用され、1975年には吐出し圧力が650気圧のものが完成している²⁾。

日立製作所は、スイスのBurckhardt社との技術提携で、高圧ポリエチレン用超高压圧縮機を生産しており、既に15台の実績をもち、国内での超高压圧縮機の唯一のメーカーである。超高压圧縮機の詳細については、この特集論文のp.17に掲載の「高圧ポリエチレンプラント用ガス圧縮機」を参照されたい。

遠心圧縮機については、イタリアのNuovo Pignone社との技術提携で、各種用途向けに納入し実績を積んできた。石油精製では、1969年に重油直接脱硫プロセス用のガス循環圧縮

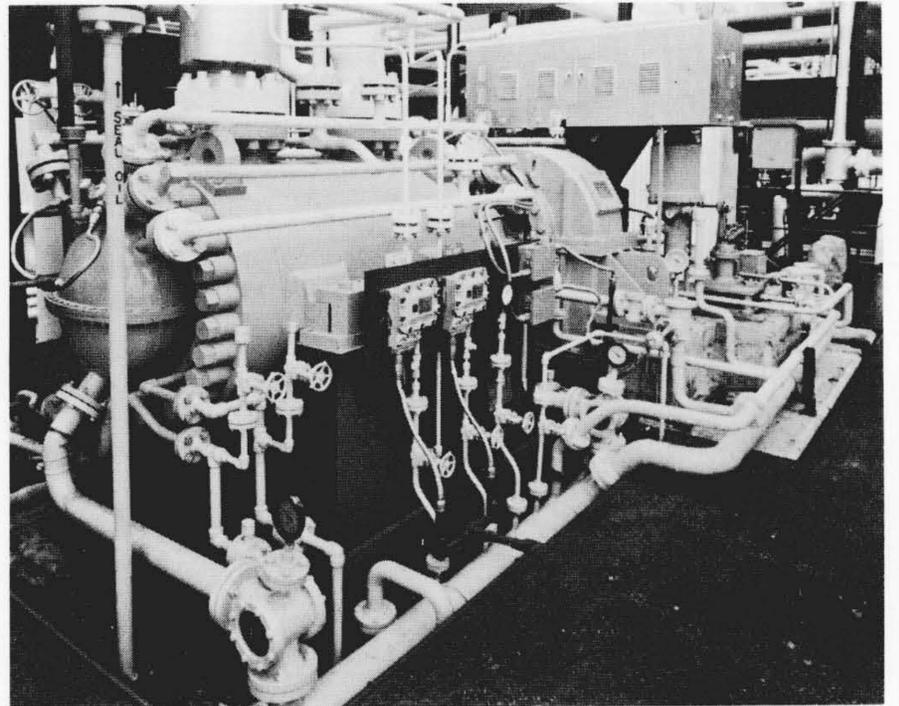


図6 重油直接脱硫用高压遠心圧縮機 1975年に、丸善石油株式会社に納入した吐出し圧力150気圧、 $3,000\text{ kW}$ 、 $10,700\text{ rpm}$ のガス循環用圧縮機を示す。

機を日本鉱業株式会社水島製油所に納入して以来、吐出し圧力160~180気圧の高圧バレル形圧縮機を7台製作した。図6は丸善石油株式会社に納入した $3,000\text{ kW}$ 吐出し圧力 $150\text{ kgf/cm}^2\text{ a}$ の高圧ガス循環圧縮機を示す。また1973年には、東洋エンジニアリング株式会社から受注したインド向けの重水プラント用の吐出し圧力 $247\text{ kgf/cm}^2\text{ a}$ の循環圧縮機を完成し、昭和53年1月には、同じく東洋エンジニアリング株式会社から受注したソ連向け尿素プラント用の吐出し圧力 $260\text{ kgf/cm}^2\text{ a}$ の炭酸ガス圧縮機が工場で完成した。これの詳細については、本誌p.7に掲載の「尿素合成用遠心二酸化炭素ガス圧縮機」を参照されたい。

これらの高圧圧縮機では、高圧での軸封機構の信頼性に関する要素試験や、小流量用として放電加工により製作された羽根車の性能試験、硫化水素の腐食雰囲気での羽根車の強度やオイルフィルムシールのフロートリングのライニング材の比較試験結果³⁾など、基礎的研究の成果が製品に適用されている。

4 圧縮機の高効率化

従来から圧縮機の効率は、運転費を下げ、プラントの製品の原価を下げるのに重要な因子であるが、特に石油ショック以来、世界的に省エネルギーが重視されるようになってきた。電動機駆動の圧縮機では、特に省エネルギーの要請が強い。日立製作所では、従来より大容量酸素プラントの原料空気圧縮機や、工場の作業用空気を供給する圧縮機として、図4に示すようなDH形等温圧縮機を多数生産しているが、最近省資源、省エネルギーの見地から総合的に見直し、流体力学、熱力学的性能の解析、有限要素法による羽根車やケーシングの応力解析、運転中に回転体に生ずる実働応力の把握、耐食性高強度羽根車材の開発などにより新技術を確立し、高Ns3次元羽根車の採用や高性能プレートフィン熱交換器の採用により、軸流を前段に、遠心を後段に組み合わせた、いわゆる複合圧縮機に匹敵する世界最高効率の小形化された等温圧縮機の新シリーズを完成した^{1),4)}。

図7に新シリーズによる効率の向上と、それによる年間動力費の節減を示す。なおこのような技術は、DH形圧縮機ばかりでなく他のすべての遠心圧縮機にも適用されていることは言うまでもない。

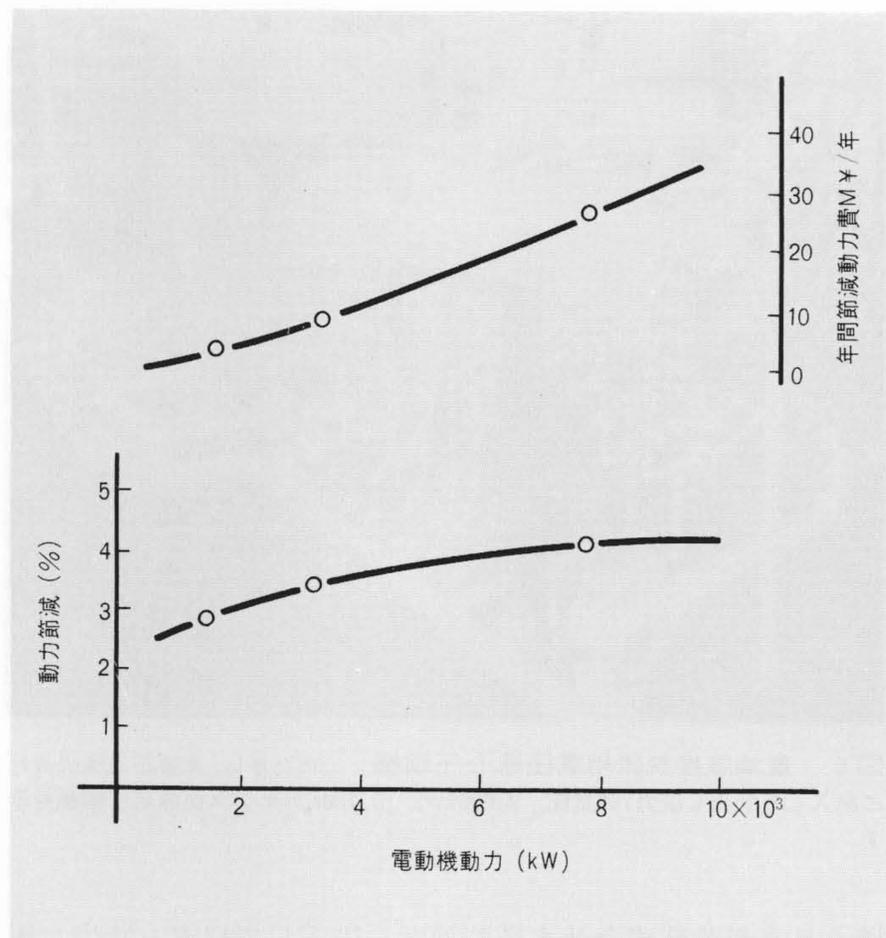


図7 日立DH形遠心圧縮機の新シリーズによる動力費節減 高性能3次元羽根車の開発、中間冷却器の効率向上などにより、世界最高の効率を達成した。動力費10¥/kWとしての年間動力の節減を示す。

5 高速・小形化及びパッケージ化

圧縮機を小形化することは、圧縮機本体だけでなく、基礎や建屋の小形化、運搬費の節減など、総合的に省資源、省エネルギー、諸経費の節減につながる。大容量機でも、容量の増加に伴う機器の大形化を少しでも抑える意味で高速・小形化が必要であるが、特に、中、小容量の空気圧縮機でその要請が大きい。圧縮機を小形化し、一つの枠組みの上に冷却器や潤滑油の給油装置などを取り付け、いわゆるパッケージ形とし、運搬、現地据付、配管施工などの作業を極力減らせるよう配慮された遠心圧縮機や回転圧縮機⁵⁾がプラントや工場の作業用空気源としてその実績を伸ばしている。

図8に日立パッケージ形ドライスクリー圧縮機の外観を示す。

図9はパッケージ化のもう一つの例として、天然ガス圧送用のガスタービン駆動のパイプライン圧縮機を示すものであるが、これらの圧縮機が据え付けられる地域は、広大な砂漠や草原が多く、信頼性が高いこと、輸送や据付けが容易なことが第一条件となる。同図はソ連のパイプラインステーションに据え付けられる9,580kW、吐出し圧力75kgf/cm² aガス流量665,000Nm³/hのガスタービン駆動パイプライン圧縮機である。

高速・小形化の傾向は、空気圧縮機だけでなく、各種の圧縮機に共通の技術的動向であり、遠心圧縮機では、動バランス調整の技術の確立、高性能軸受の開発、設計時での軸系の振動解析と動的最適設計法の確立により、回転数数万rpmの遠心圧縮機が実用化されている。

小形化の別の面では、遠心圧縮機の適用範囲を小流量側に広げるための努力がなされており、放電加工技術により、高性能の小容量羽根車の実現した。放電加工により羽根車の幅の狭い流路が高精度に形成され、更に特殊ホーニングにより

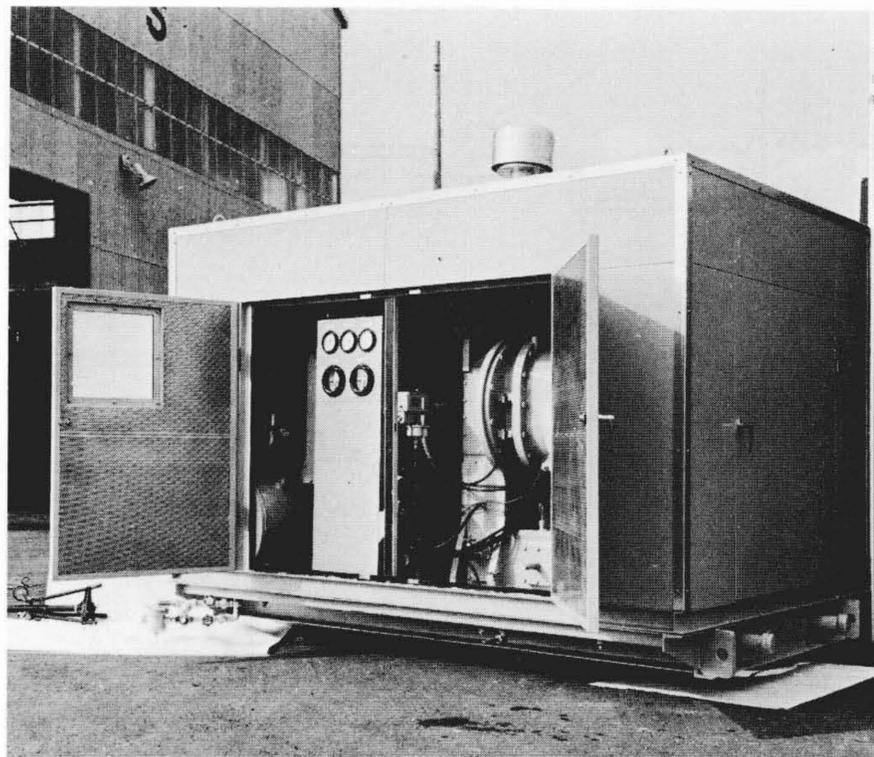


図8 日立パッケージ形ドライスクリー圧縮機 工場の作業用空気源として用いられる圧縮機で、潤滑油の給油装置や、エアフィルタ、中間冷却器、サイレンサなどがコンパクトにパッケージにまとめられている。

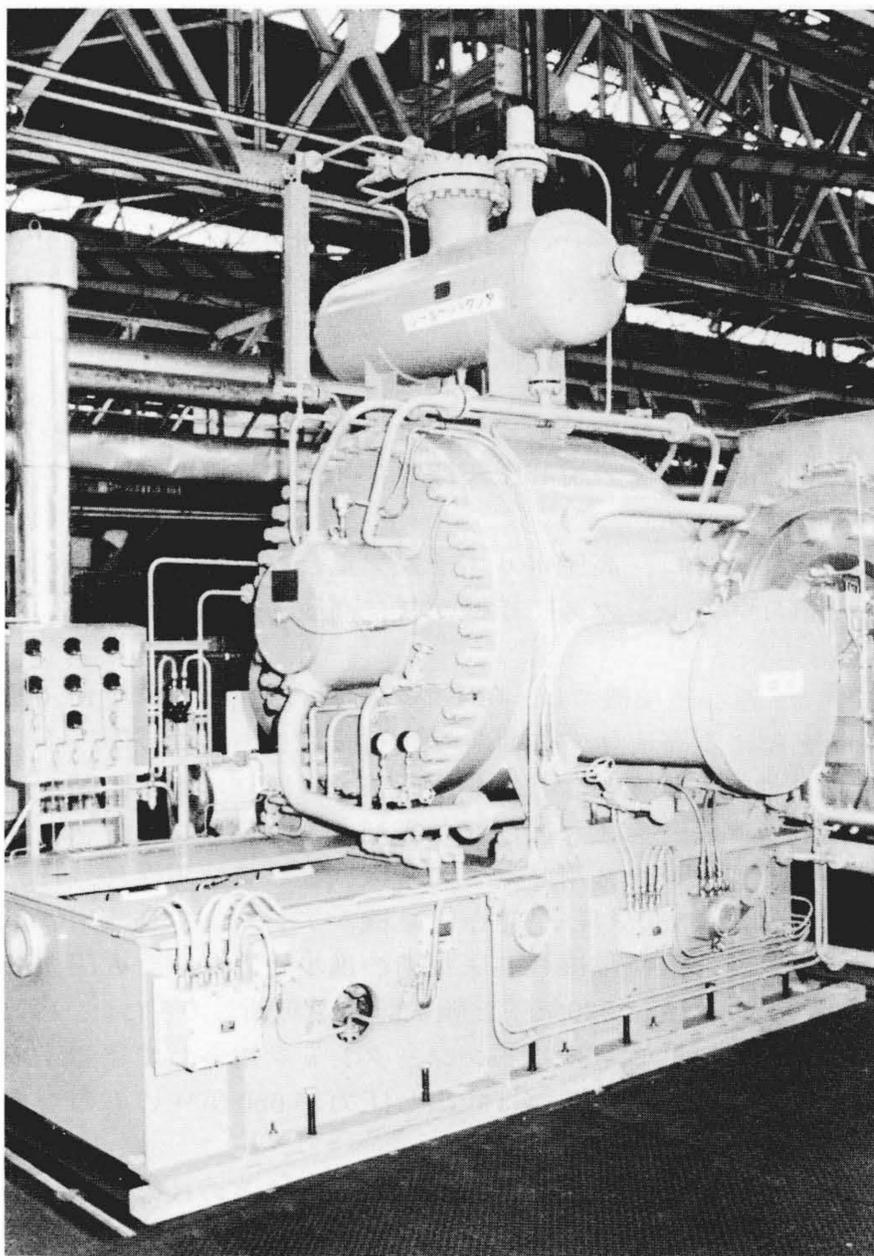


図9 天然ガスパイプライン用圧縮機 パイプライン用圧縮機は、概して交通の不便な砂漠や草原に設置される場合が多く、パッケージ化が要求される。

流路表面の加工硬化層が能率よく除去され平滑に仕上げられる。このようにして製作される羽根車によると、最小80m³/hの吸込流量の圧縮機まで製作が可能である。

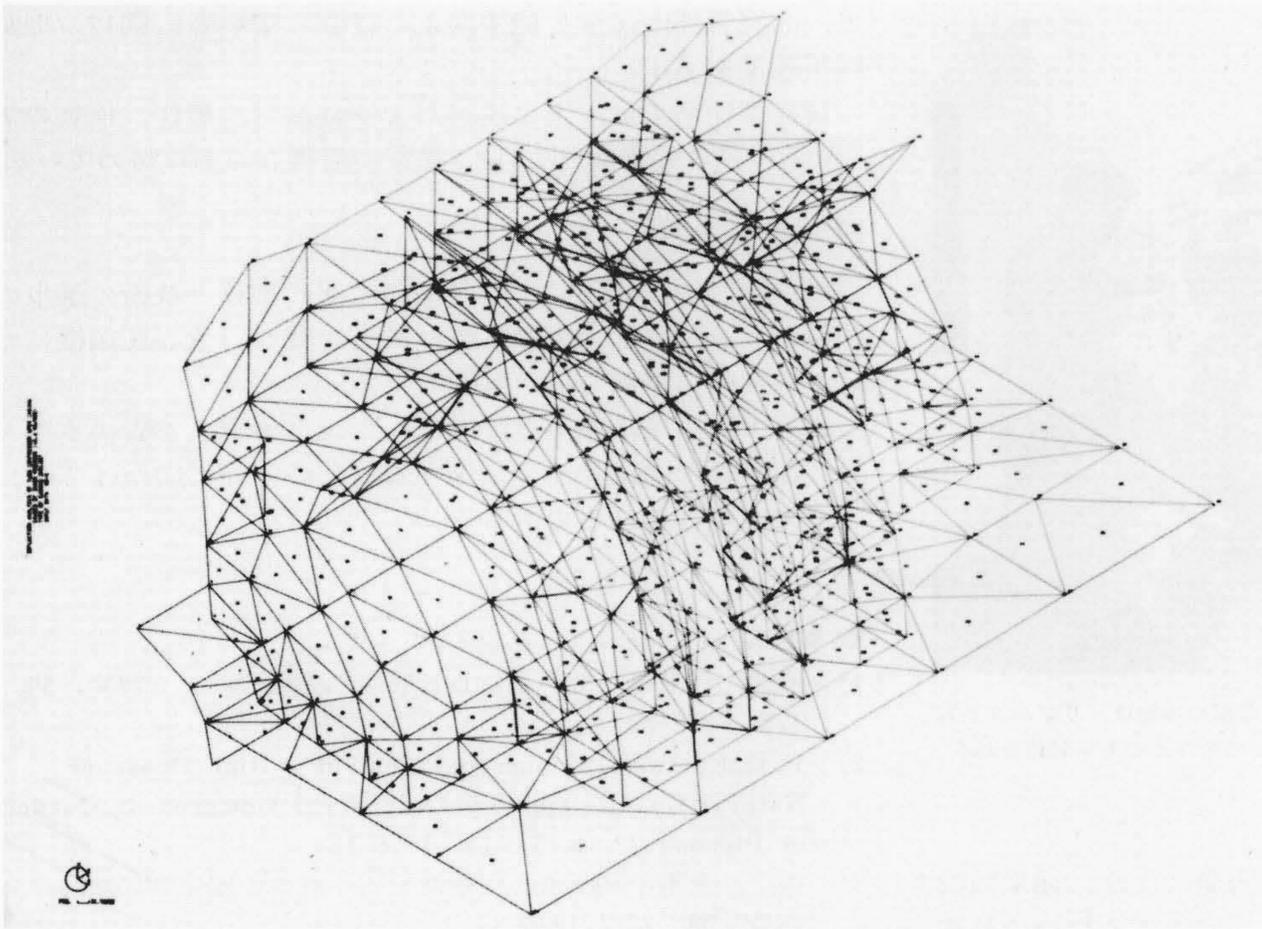


図10 有限要素法による遠心圧縮機ケーシング応力解析 羽根車、ダイヤフラム、ケーシングなどの応力は、有限要素法により高精度に求められる。

6 信頼性の向上

各種の化学プロセスで、圧縮機はガスを昇圧、循環あるいは圧送する際に用いられ、プラントを人体にたとえるならば、圧縮機はその心臓に相当する重要な器官である。したがって、信頼性の高いことが、プロセス用圧縮機の第一条件である。日立製作所では、耐食性の優れた高周速用の羽根車材や溶接棒の開発、運転中の羽根車の各部に生ずる応力を高精度に予測するプログラムの開発、実際の羽根車に生ずる遠心応力及び機械的あるいは流体的な加振により各部に生ずる応力の実測、並びに高速弾性軸系用の軸受の開発と軸受特性の把握、ガス用遠心圧縮機の軸封部の過酷試験に基づく材質、構造の改良など、数々の研究の成果を実機に適用して信頼性をよりいっそう高めるためたゆまぬ努力を続けている。図10に有限要素法によるケーシングの応力解析の一例を示す。

7 CAD, CAM及びCATによる品質管理

近年の電算機の普及により、日立製作所では、圧縮機的设计、製作、検査のあらゆる段階に電算機を導入して、品質の向上と納期の短縮に大きな効果を上げている⁶⁾。設計では、電算機の助けを借りた設計Computer Aided Design(CAD)よりも更に一歩進んだ完全自動設計プログラムを開発した。これは圧縮機に要求される仕様やすべての運転点を電算機に入力することにより、機種を選定、流体力学及び熱力学的設計計算、各部の応力計算、軸受や軸封の性能の計算、軸系の振動解析など、すべての設計計算を一貫して進め、最適化を行ない、結果はプリントアウトされる一方、X-Yプロッタにより圧縮機の断面計画図が画かれる。図11はその一例を示すものである。また、羽根車やダイヤフラムなど、NC(数値制御)機により機械加工される部品については、NC機に入力するテープのためのデータが設計計算の結果とともにアウトプットされる。これらの計算は、約半日の間に遂行される⁷⁾。

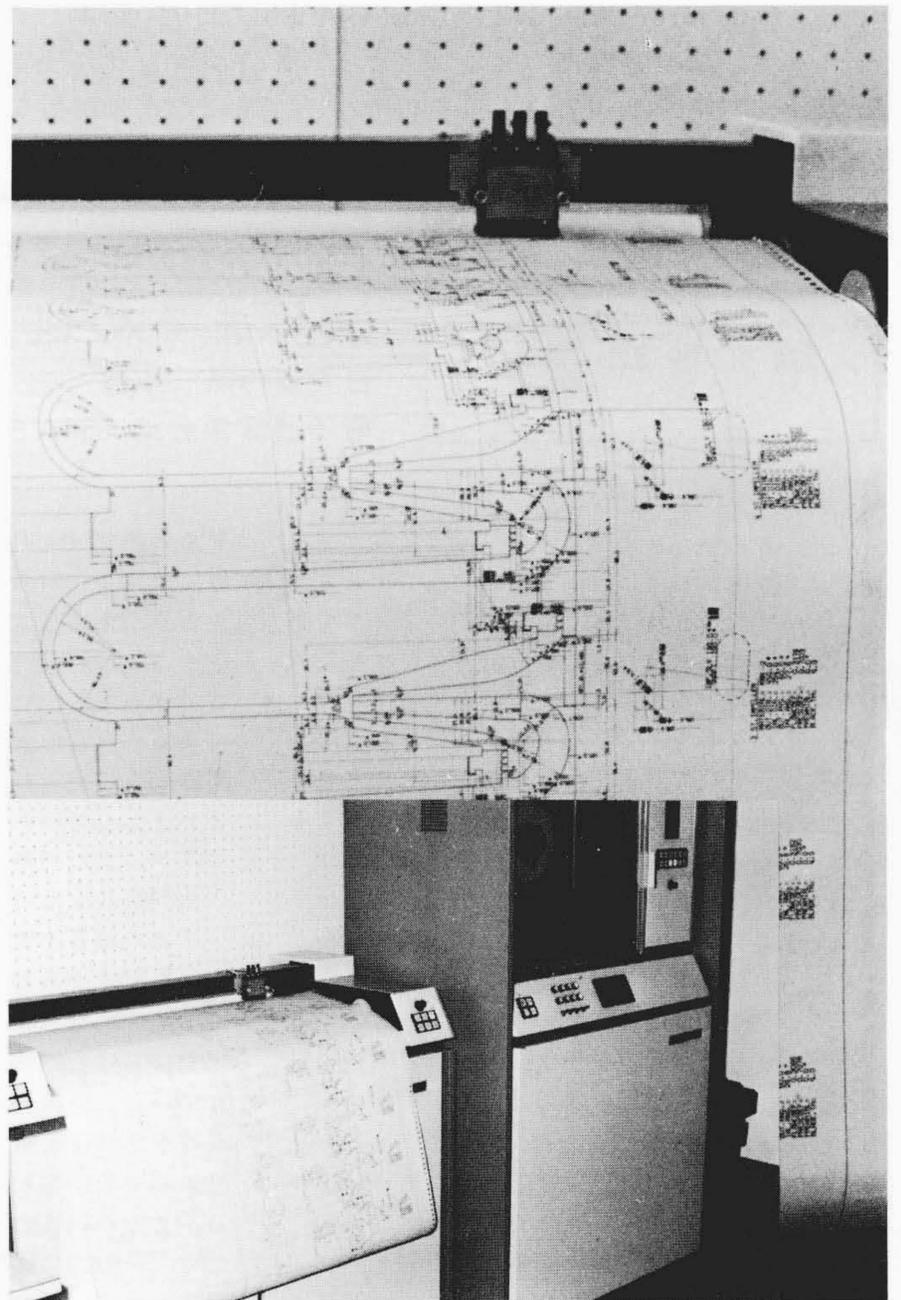


図11 圧縮機断面の自動製図 遠心圧縮機的设计は完全に電算化され、要求仕様を入力すると流体力学、熱力学、強度計算、振動解析など最適化設計計算が行なわれ、最終的には断面図がX-Yプロッタにより作図される。



図12 振動解析装置 圧縮機の工場試験で各部の振動は、リアルタイムアナライザにより分析され、また、圧力や温度などの条件とともに記録される。

このような完全自動設計プログラムの開発により、従来の設計法では設計者の判断の個人差が製品に反映するための品質のばらつきや、設計者のいわゆる「ぼんやりミス」を完全に防止でき、常に設計の段階で最高の品質が確保される。

加工の面でも、Computer Aided Manufacturing (CAM) が機械工場や製缶工場で各段階に導入され、また検査、試験でも、Computer Aided Testing (CAT) により、計測、データ処理、試験報告書のタイプアウト、X-Yプロッタによる性能曲線の作図、リアルタイムアナライザによる振動解析な

ど、品質管理と試験の能率向上に役立っている。図12に振動解析装置を示す。

日立製作所では、上に述べたように設計、製作、検査のあらゆる段階に電算機を活用し、品質の管理と向上に努めている。

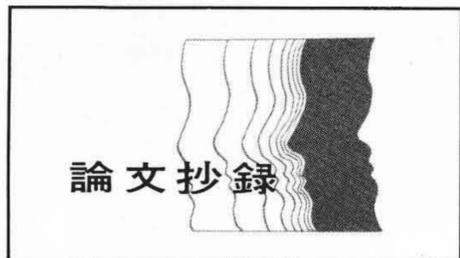
8 結 言

以上は、過去10年間の圧縮機需要の推移と技術の進歩の跡をふり返り、その中でも特に成長の著しい遠心圧縮機についての動向に重点を置き解説した。

プロセス用圧縮機分野では、今後、ますます省エネルギー、信頼性の向上及び運転保守省力化の方向に向かって改良の努力が続けられるであろう。

参考文献

- 1) 刑部, 三階ほか2名: 新DH形遠心圧縮機, 日立評論, 59, 423 (昭52-5)
- 2) P. L. Ferrara: Design and Test of a High Pressure Natural Gas ReInjection Centrifugal Compressor, Quader-ni Pignone 22, p. 5~14 (1976-12)
- 3) 横山, 金木: 高圧遠心圧縮機シール機構の安定性試験, 日立評論, 58, 237 (1976-3)
- 4) 横山, 刑部ほか2名: 遠心圧縮機の高効率小形化, 機学会講演論文集, No. 780-1, (1978-1)
- 5) 新井, 高橋: 日立パッケージドライスクリュ圧縮機 産業機械 (昭52-1)
- 6) James B. Pond: On the Road to CAD/CAM, Iron Age 37~44 March 28 (1977)
- 7) 金木: 遠心圧縮機の自動設計, ターボ機械, 5, 9, 36~43 (1977-9)



再帰形デジタルフィルタの係数量子化誤差と演算まるめ雑音の関係

日立製作所 小杉 宏

電子通信学会誌 59A-11, 977 (昭51-11)

デジタル集積回路の進歩によりデジタル信号処理は、従来もっぱらアナログ回路で行われてきた信号処理の多くの分野に使われようとしている。デジタル信号処理の中で最も重要な役割を果たすデジタルフィルタでは、データと係数が有限のビット数で表現されるため、いわゆる量子化誤差が生ずる。量子化誤差を小さくするためにはビット数を大きくすればよいが、経済性の面からはビット数をできるだけ小さくする必要があり、量子化誤差の研究がデジタルフィルタでは重要になる。

この量子化誤差を発生源から分類すると、(a) 入力信号の量子化、(b) 乗算係数の量子化、(c) 演算の際のまるめ誤差に分けられる。

入力信号の量子化はアナログデジタル変換の際に起こるものである。乗算係数の量子化は極と零点の変動をもたらす、フィルタの周波数特性が変わってくる。演算の

まるめ誤差は入力信号の量子化に似ているが、フィルタ内のいろいろなところで発生する点が相違しており、この誤差によって生ずる「まるめ雑音」は入力量子化による雑音に比べずっと大きくなるのが普通である。

まるめ雑音の大きさと性質は演算方法と回路構成によって変わる。通常実用的なフィルタとしては演算方法としては固定小数点法が、また回路構成としては標準形二次の直列接続が用いられる。

まるめ雑音の値を厳密に求めることは一般に不可能であるが、一般に確率的な近似モデルで解析され、これによってフィルタ出力における雑音の分散を求める式が得られている。係数のビット数については、それが小さいほど極と零点のずれが大きくなり、周波数特性が理想のものからずれてくる。まるめ雑音の研究が進んでいるのに対して、一般的に係数の量子化を考慮した設計法の研究は進んでいない。したがって、

データのビット数と係数のビット数を総合的に考えた研究も進んでいない。

本論文は最もよく使用される固定小数点法の標準形二次のフィルタについて係数とデータのビット数の関係を検討したものである。まず通過域の正弦波を加えたときの係数の量子化誤差による出力変動量を、利得の係数に対する感度から求める。次にこれをダイナミック・レンジを考慮してまるめ雑音の分散と対比する。この方法により極、零点の位置とダイナミック・レンジから適正な係数とデータのビット数の差を求める式を導いた。

これにより係数とデータのビット数を、それぞれ適当に仮定して、周波数特性のずれとそれに重畳する形になるまるめ雑音を計算し、その結果が大きい場合は係数、データをそれぞれ何ビットか増やして再び計算するというような試行錯誤を繰り返さずにビット数を決定できる簡単な規準が得られた。