

プロセスガス遠心圧縮機的设计・製造の技術革新

深 作 善 郎* 許 斐 真* 長谷川 直 幸*

Innovative Design and Manufacture of Process Gas Centrifugal Compressors

by Yoshiro FUKASAKU, Shin KONOMI, & Naoyuki HASEGAWA

The Elliott Group supplies process gas centrifugal compressors to meet diverse market needs in industries ranging from oil refining, to petrochemical production, to the oil & gas industry and even to the production of liquefied natural gas. To meet the growing customer demand for improved compressor performance and reliability and to shorten delivery process, the company has developed and marketed new compressor models since the late 1990s. The Elliott Group seeks to systematically integrate already developed and established components into these new models. However, newly developed compressor components, which address current market needs, have also been introduced. Innovative manufacturing techniques, based mainly on machining, rather than on casting and welding, have been actively pursued.

Keywords: Centrifugal compressors, New compressor models, High speed, Plant capacity increase, Manufacturing technologies, Machining, Market expansion, Petrochemical industry

1. はじめに

世界的な経済発展に伴うエネルギー消費増大に対応すべく、風力や太陽光等の再生可能エネルギーの開発が進められつつあるが、石油や天然ガス等に代表される炭化水素が今後も重要なエネルギー源であり続けることには変わりはない。そこでは、井戸元（油田、ガス田）での原油、天然ガスの生産から、その精製、そして石油化学製品等の最終製品に至る過程の各種プラントにおいて、プロセスガス遠心圧縮機はプラントの基幹部分を担うため、その性能及び信頼性がプラント全体に大きな影響を及ぼす。

荏原製作所は米国エリオット社と技術提携をして1970年にプロセスガス圧縮機を納入して以来、世界各地にプロセスガス圧縮機及び蒸気タービンを供給してきた（写真1）。その後、荏原製作所の圧縮機・蒸気タービン事業は2002年に荏原エリオットとして独立し、2011年にエリオット・グループとして米国エリオット社と統合経営を開始し



12-108 01/237

写真1 遠心圧縮機の工場連結機能試験

Photo 1 Functional test of centrifugal compressors connected at factory

た。現在は日米の両製造拠点を軸に、全世界にグローバルサービス・ネットワークを展開して、世界のエネルギー供給に貢献すべく、プロセスガス圧縮機・蒸気タービンの製造及びサービスの提供を続けている（技術提携先であった米国エリオット社は2010年に荏原製作所より一足早く創業100周年を迎えた）。

本稿では、近年の多様化するプロセスガス圧縮機へのニーズに対し、1990年代後半からエリオット・グループ

* (株)荏原エリオット

ターボ機械 第40巻 第9号に掲載されたものを、(一社)ターボ機械協会の許諾を得て、一部加筆・修正した。

が行ってきた、最新のコンピュータ技術活用によるプロセスガス遠心圧縮機的设计技術及び製造技術の革新を紹介する。

2. プロセスガス遠心圧縮機への市場からの要求

近年のプロセスガス遠心圧縮機への要求は、プラントの大型化に伴う大流量化への対応に加えて、性能・機能への要求も更に高くなってきている。例えば、エネルギー多様化の必要性から注目を浴びている液化天然ガス(LNG)プラントで、エリオット・グループはその黎明期から冷凍圧縮機を供給しており、1963年にアルジェリアの液化基地向けに納入した冷凍圧縮機は、1系列のLNGプラントあたりの必要動力が23 MW程度であった。それが近年運転開始された世界最大のLNGプラントでは、1系列の必要動力が270 MWまでに大型化してきている¹⁾。同様に主要納入先であるエチレンプラントにおいても、荏原製作所が米国エリオット社と提携を開始した1970年代には年産30万トン程度であったプラント規模が、最新のプラントでは年産150万トンを超える生産能力まで拡大してきている。

この大流量化へ対応するためには、圧縮機ケーシングの大型化が必要であるが、それには大型圧力ケーシングの設計手法とその製造技術が必要となる。一方で、プラント機器への信頼性向上及び初期投資額抑制ニーズにより、同一能力のプロセスガス圧縮機においては、いかに小型化及び軽量化が図れるかが、一つの開発課題となっている。

また最近の技術革新によって、従来では開発できなかった油田やガス田の開発が進みつつある。アップストリームと呼ばれる油田・ガス田開発は技術の進歩とともに深度化しており、インジェクション用もしくはEOR (Enhanced Oil Recovery) 用などで高圧対応の遠心圧縮機の用途が広がってきている。エリオット・グループでは1970年代にガスインジェクション用の遠心式圧縮機を北海油田に納入した実績²⁾がある。そこでは、低圧のガス原油分離器から分離された18 psia (絶対圧力0.12 MPa) のメタン主成分の炭化水素ガスを、4ケーシングで昇圧し9200 psig (ゲージ圧力63.4 MPa) で油井へ注入した。インジェクション用の特徴として、圧力容器としてのケーシングの設計手法及び製造技術の確立だけでなく、高密度のプロセスガスを取り扱うことによるロータの安定性に対する解析及び設計技術が不可欠となる。

更に、機器の信頼性という点からも、遠心圧縮機のトラブルはプラントの稼働率 (すなわちプラント生産量)

に多大な影響を及ぼすことから、顧客からは高性能、高信頼性を要求されていることに加え、近年は、プラントの早期稼働の観点から、短納期要求が増加している。

3. 新シリーズ・エリオット圧縮機のコネプト

以上に述べたような市場の変化に対応するために、エリオット・グループではEDGE (Evolutionary Developments for Growth and Enhancement) 圧縮機開発プロジェクトを推進し、コンピュータ技術の活用及び製造技術の革新による新たな圧縮機シリーズを1990年代後半から市場に投入し世界各地のプラントへ納入してきた。この新シリーズはこれまでの要素開発実績を体系的に統合・シリーズ化したもので、よりフレキシブルに最適な圧縮機を選定できるように、従来からのフレームラインアップ及び羽根車ラインアップを充実させた。また小型化、軽量化への要求に対しては、羽根車など回転体部品の形状を最適化し、ロータの高速化を図った。製造法においても、熟練作業に依存する鋳造品及び溶接構造品主体から、機械加工を主体とした構造に切替えて、納期短縮と生産性の向上により、遠心圧縮機需要の増加に対応できるコンセプトとした。

3-1 フレームサイズの多様化

これまでの納入実績及び今後の市場の要求を見据えて、16フレームから28フレーム (水平分割15フレーム、垂直分割13フレーム) へとフレームサイズの充実を図った。用途及び圧力レベルに応じて、水平分割型と垂直分割型の標準ケーシングを準備した。これにより、要求仕様に応じて、最適な圧縮機ケーシングの選定及び設計が容易に行えるようになった。新シリーズ・エリオット圧縮機を展開するにあたり、まず基準フレームである38 M/MBで主要要素の開発を行い、その後比例設計を採用し、効率的にシリーズ展開を行った。

3-2 羽根車ラインアップの充実

プラントの規模や用途に応じて仕様が多様化してきているため、段落選定の詳細な調整や広い流量範囲の羽根車ラインアップによる対応が必要である。新シリーズ圧縮機では各フレームサイズにおいて、羽根車にもスケール設計を導入し連続的な詳細調整を可能とした。更に大流量側には、従来から採用していたセミインデューサ付3次元羽根車シリーズに加えて、より大流量係数をカバーする高効率フルインデューサ付3次元羽根車シリーズを導入した。小流量側には、従来では遠心圧縮機での対応が困難だった極小流量係数領域の羽根車をシリーズ化し、より信頼性の高い遠心圧縮機の供給範囲を広げた。

これらの羽根車ラインアップの拡充, 改善には, コンピュータ処理能力の進歩によって, CFDを活用した開発を行っている。しかしながら絶対値の厳密な評価や実績のない領域へ踏み込む場合などには, 実験による検証が欠かせない。エリオット・グループでは閉ループ実験装置にて基本データの収集を行い, CFD結果の評価を行っている。

3-3 ロータの高速化

同一能力のプロセスガス遠心圧縮機においては, ロータを高速化して羽根車周速度を上げ, 空力的により大流量のプロセスガスを処理できれば, 結果としてフレームサイズを抑え, 小型化することが可能である。新シリーズ圧縮機では, 全面的な羽根車形状の最適化により機械的強度を向上させ, 高速化を可能にした。

また高速化のためには, 回転体部品の機械的強度に加えて, ロータダイナミクス性能の向上が必須である。すなわち危険速度に対するセパレーションマージンの十分な確保とともに, 流体力不安定振動に対するロータ安定性を確保することが, 圧縮機の信頼性を確保するためには不可欠となる。ロータ設計基準に関しては, Pettinatoら³⁾がまとめたように, API 617 7th Edition (2002年)でロータ安定性評価の導入, 規定が大きな転機ではあったが, エリオット・グループでは1970年代からロータ安定性に対する課題に取り組んできた。

図1に示されるように, ロータ軸径を従来のシリーズと比較して拡大した新シリーズを全面的に導入し, ロータの基本的な剛性を高め, 更に, ジャーナル軸受の径, 幅のラインアップの充実を図った。

特にロータ安定性の要求が厳しい場合, 例えばオフショア向け天然ガス用途などに用いられる高圧圧縮機では, 羽根車の高圧ラビリンスシールで発生する流体不安定化力が振動を起こす原因となることが知られている²⁾。

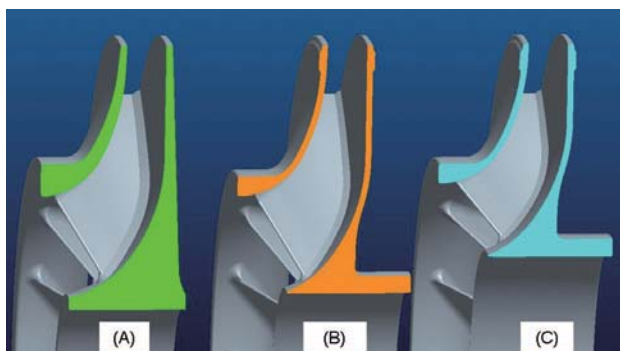


図1 羽根車形状の比較 (A) 従来羽根車, (B) 新シリーズ羽根車, (C) 新シリーズ大軸径羽根車
Fig. 1 Comparison of impeller shapes (A) Conventional impeller, (B) New impeller, (C) New impeller for large shaft diameter

そこで流体不安定化力を軽減, 減衰させるために, 1990年代前半から, 厳しい仕様の高圧圧縮機はセンターシール部分にダンパーシールを採用し, 多くの実績で良好な結果を得ている。

3-4 高精度な製造方法による圧縮機性能の向上

従来の圧縮機はその製造方法においては熟練技能に依存する鋳造及び溶接構造部品が主体であったので, エリオット・グループでは新たな圧縮機を開発するにあたり, 機械加工を主体とした製造方法に移行した。これには, 機械加工を主体とすることで製造精度の向上や安定化を図り, 空力効率及び性能信頼性を大きく向上させる効果も見込んでいた。

例えば, 流路形状や面粗度が圧縮機の空力性能へ大きな影響を及ぼすダイヤフラム (ディフューザと戻り流路の総称) は, 従来は鋳造で製造していたが, 戻り流路のガイドベーン部分を鋼材から機械加工で削り出す製造方法へ変更した (写真2)。機械加工では, 設計値どおりのプロセスガスの流路を実現できるので, 石油精製プロセスでの水素リサイクル用小型圧縮機などにおいて, 段落効率とそのばらつき抑制に大きな改善があった。また, 多くの実績があるサイドロード冷凍圧縮機におけるサイ



写真2 機械加工で製造されたダイヤフラム (上) と削り出し戻り流路 (下)

Photo 2 Diaphragm fabricated by machining (above) and machined return channel (below)

12-108 02/237

ドロード合流部の流路形状も同様に製造精度が向上し、仕様どおりの許容幅でプロセス圧力を容易に達成できるようになった。更に、流路面粗度の改善により、プロセスガスの重合物の付着に対する耐性も向上した。

遠心圧縮機の最も重要な部品である羽根車に関しては、新シリーズの導入とともに従来はプレス羽根板を主板、側板にそれぞれ溶接する3ピース構造から、**図2**に示すように、羽根板を主板又は側板から削り出し、溶接で結合する2ピース構造に変更した。これにより、羽根板のプレス成型誤差の解消及び主板、側板への溶接による変形の低減によって実際の流路形状と設計形状との誤差が改善され、性能予測の精度が大幅に向上した。また、溶接の困難な極小流路出口幅の羽根車においては、高度な溶接技術を要するスロット溶接構造からブレイジング技術を積極的に導入し、安定した性能品質が達成できるようになった。

また、羽根車への機械加工導入と溶接箇所の削減、及び各部品公差の詳細な再検討を通じて、ロータ構成部品のアンバランス量の大幅な改善を実現した。この結果、ロータ単体のバランス修正のリードタイムを短縮し、かつ機能試験においても規定振動値を容易に満足できるようになった。

これら構成部品の寸法精度向上の結果として、同一ケーシングで複数ロータ、もしくは複数台口の圧縮機で工場性能試験を実施した場合、それぞれで仕様を満足することは当然であるが、性能曲線全域で安定してほぼ同一性能が得られ、高い信頼性を実証することができた。**図3**に2本のロータで実施した性能試験の結果を一例として示す。

3-5 コンピュータ能力向上による設計業務の改善

コンピュータの処理能力の目覚ましい進歩によって、容量の大きなデータを取り扱えるようになり、2次元への投影ではなく、直接立体形状を扱う3次元CADへの移行や、従来よりも設計レベルでの解析が通常の業務と

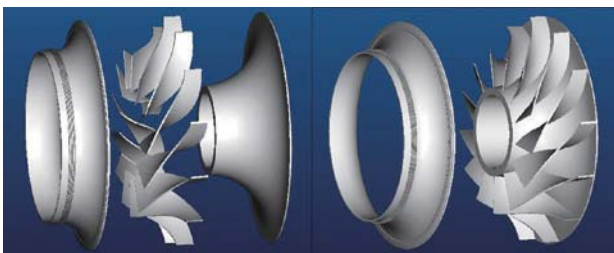


図2 3ピース構造 (左) と2ピース構造 (右)

Fig. 2 Three-piece structure (left) and two-piece structure (right)

なっている。3次元CADの利点としては、設計指針のプログラム化機能、3次元モデルと2次元図面の連動機能を活用し、所要スペックを入力するだけで、ほぼ3次元モデリングと同時に製作図面を作成できる点などによって、均一化された図面品質と図面作成時間の削減に結びついている。また3次元形状を扱うので、設計者が製品モデルからNCプログラミング、FEA、CFD用の各種データを作成し、データ変換の手順が単純化され、各種解析ソフトとの連携によって、従来は限られた研究開発用のツールであったFEAやCFDが設計ツールとして用いられるようになってきている (**図4**)。

4. 製造技術の革新

エリオット・グループでは、製造面では機械加工部品の増加に対応するために、新たな工作機械や加工方法を導入し、また溶接作業においても作業効率改善が可能な新技術や、熟練技能の定量化、データ化が可能な新設備を導入するなどの変革を進めてきた。

4-1 5軸複合加工機によるダイヤフラム加工

前述したように、鋳造から機械加工に製造方法を変更した戻り流路ガイドベーンは、旋削加工、ミーリング加工、穴加工などの複数の工程を経て完成する部品である。そこで、素材を同一段取りの状態ですべて旋削加工と5軸ミー

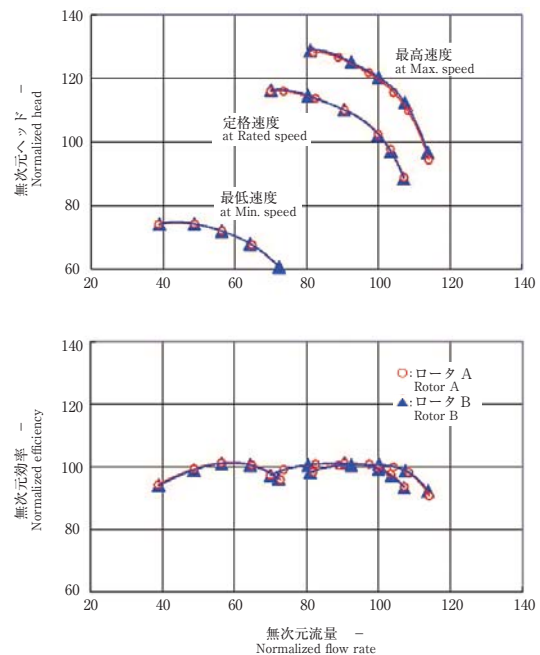


図3 同一仕様ロータの性能比較

Fig. 3 Performance comparison between two rotors with the same specifications

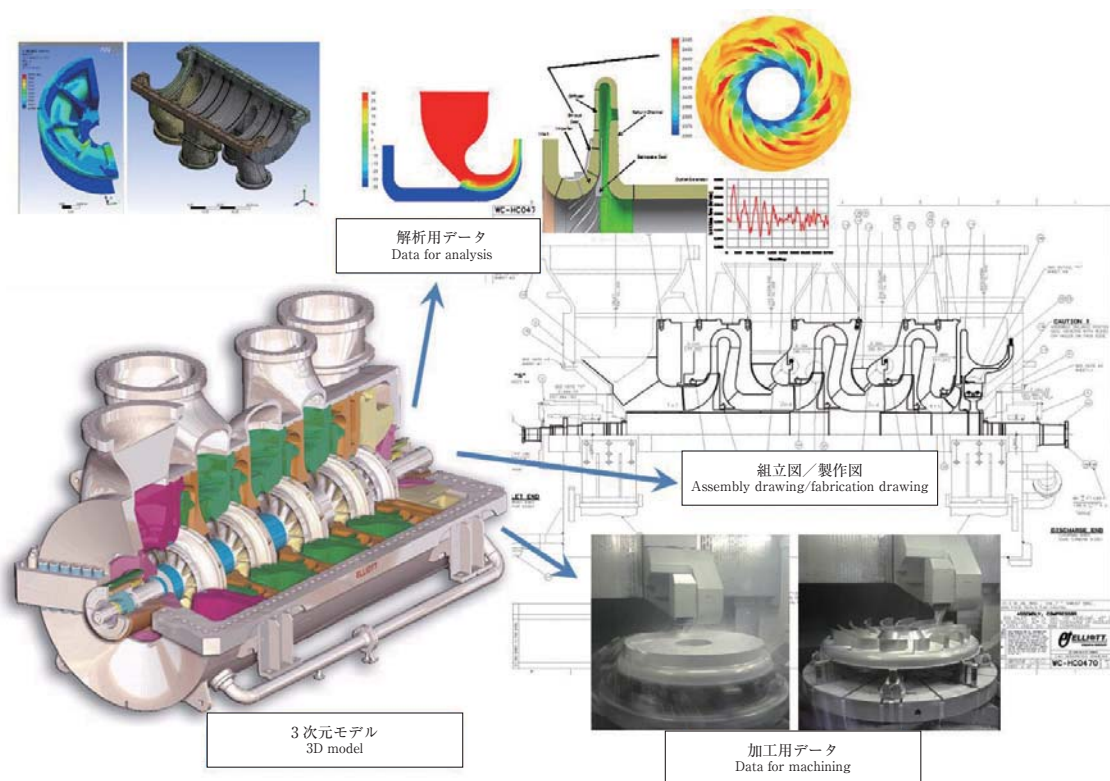


図4 3次元モデルからの展開
Fig.4 Development from a 3D model

リング加工が実施できる5軸複合加工機を導入し、一台の機械に加工を集約することにより生産効率の向上を実現した。更に従来は旋削加工で行っていた粗加工をミールリング加工で実施することにより切粉の絡まりや詰まりの問題が解消され、無人加工時間を拡大することが可能となりダイヤモンド加工のリードタイムを大幅に短縮することができた。

4-2 羽根車の5軸加工

エリオット・グループ袖ヶ浦工場では、35年前より5軸マシニングセンターによる高速ブロウ用羽根車を加工してきた実績があるため、圧縮機用羽根車の羽根板を削り出し構造とする5軸加工への製造方法の移行についても円滑に対応が可能であった。また、2次元形状、3次元形状、フルインデューサ付き3次元形状など多様な羽根車に対して3次元CADとの連携などCAM技術を発展させてきたことにより生産性が高い5軸加工を実現している(写真3)。

4-3 大型製品への生産設備の対応

近年の大型化した圧縮機の生産に対応するため、各種の製造設備や製造方法の革新を進めている。圧縮機ケーシングを加工するためには大型プラノミラーを導入し、



12-108 03/237

写真3 羽根車の5軸加工の様子
Photo 3 Five-axis machining of an impeller

ロータの大型化には機械加工、溶接、熱処理に関する一連の羽根車製造設備の増強や、バランス試験設備の拡張などで対応している。その他、大径羽根車用の検査設備の更新、工場試験用大型モータの導入、クレーン搬送容量の増大など、数々の生産設備の増強を実施している。

4-4 羽根車のロボット溶接

羽根車は都度形状が異なる多品種少量生産であるた



12-108 04/237

写真4 羽根車のロボット溶接
Photo 4 Robot welding of an impeller

め、エリオット・グループではロボット溶接を積極的に採用し、生産性の向上を図っている。羽根車の3次元モデルからロボット溶接用の動作データを自動生成するオフライン教示システムの導入により短時間でロボット動作の教示が可能となった。これらの技術を活用することで、フルインデューサ翼のように複雑で施工難易度の高い羽根車溶接についても信頼性の高いロボット溶接で製造することを可能としている（写真4）。

5. おわりに

今後も増え続けるエネルギー需要に対応するため世界各地で盛んに油田、ガス田開発が進められているのに加えて、シェールガスに代表される非在来型とされるエネルギーや、石炭を源とする石炭化学も開発が積極的に進められている。それら多様化する市場に対応するために、エリオット・グループは技術開発に取り組んできた。本稿で紹介した新シリーズ・エリオット圧縮機は、これまでに500ケーシング以上が日本袖ヶ浦工場及び米国ジュネット工場の両拠点から出荷され、世界中の様々なプラントで稼働している。他方、競争という点では、従来の先進国のメーカーとの競争に加えて、中国やインドなどの新興国メーカーが技術力をつけて参入しつつあり、グローバルな競争が激化してきている。このような変化の激しい時代においても、エリオット・グループは更なる設計及び製造技術の開発・革新を行っていき、市場の要望に応えていきたいと考えている。

参考文献

- 1) World's largest LNG Compressors designed, tested for Qatargas II, The Oil & Gas Journal, Aug 6, 2007.
- 2) New-generation Compressors Injecting Gas at Ekofisk, The Oil and Gas Journal, May 10, 1976.
- 3) B. C. Petinatto 他2名：コンプレッサ振動規格（API617）の発展と動向，ターボ機械，39-5，2011年5月号。