

HFC 134 a 高性能単段ターボ冷凍機の開発

HFC134a Highly Efficient Single-Stage Centrifugal Chiller Developed

高砂製作所 関 亘^{*1} 山本 義人^{*1}
技術本部 枅 谷 穰^{*2} 入谷 陽一郎^{*3}
吉田 善一^{*4}

ターボ冷凍機は大容量の空調設備として広く使用されており、その冷媒ガスはオゾン層を破壊しない HFC 134 a が HCFC 123 に代って広く使われるようになってきた。本報では小型・コンパクト化と高性能化を目指して、HFC 134 a 高性能単段ターボ冷凍機を開発した過程と結果を紹介する。

Centrifugal chillers are widely used in large air-conditioning systems and process cooling. The refrigerant HFC134a is beginning to replace HCFC123 because it is potentially less damaging to the earth's ozone layer. This paper reports the development and results of a compact, highly efficient HFC134a single-stage centrifugal chiller.

1. ま え が き

HFC 134 a ターボ冷凍機はオゾン層を破壊しない冷媒を使用しており、発売以来順調に売上げを伸ばしており、将来的に全廃の決っている HCFC 123 より今後ますますの需要増大が予想される。そこで、当社従来の 2 段型ターボ冷凍機を更新し、性能、重量面で優れた品質の HFC 134 a 単段ターボ冷凍機を小容量空調用として開発した。以下にその開発の概略を紹介する。

2. コンセプトと開発手法

ターボ冷凍機は図 1 に示すように圧縮機と蒸発器、凝縮器等の熱交換器が主要構成要素である。まず圧縮機であるが、当社の HFC 134 a 冷媒用の従来圧縮機は、図 1 (a) に示す 2 個の羽根車を

持つ 2 段圧縮型であった。これを本開発では図 1 (b) に示す単段型とし、部品点数の低減を実現し、かつ 2 段型と同等以上の性能を実現することをねらった。また羽根車軸の高回転数化に伴い、軸振動問題を起さぬように回転軸系の設計にも注意を払った。次に熱交換器はその体積が冷凍機全体の設置スペースを決めるので、従来型より 20 % コンパクト化し、かつ従来型と同等以上の伝熱性能を実現することをねらった。以下にその開発コンセプトと開発手法を述べる。

2.1 圧縮機空力特性の改善

従来の 2 段型で圧縮していたものを単段にするということは、1 個の羽根車で圧力比が 2 倍になるということである。これを実現するためには、羽根車の外径周速を約 $\sqrt{2}$ 倍にする、すなわち回転数を約 $\sqrt{2}$ 倍にしなければならない。回転数を上昇すると羽根車

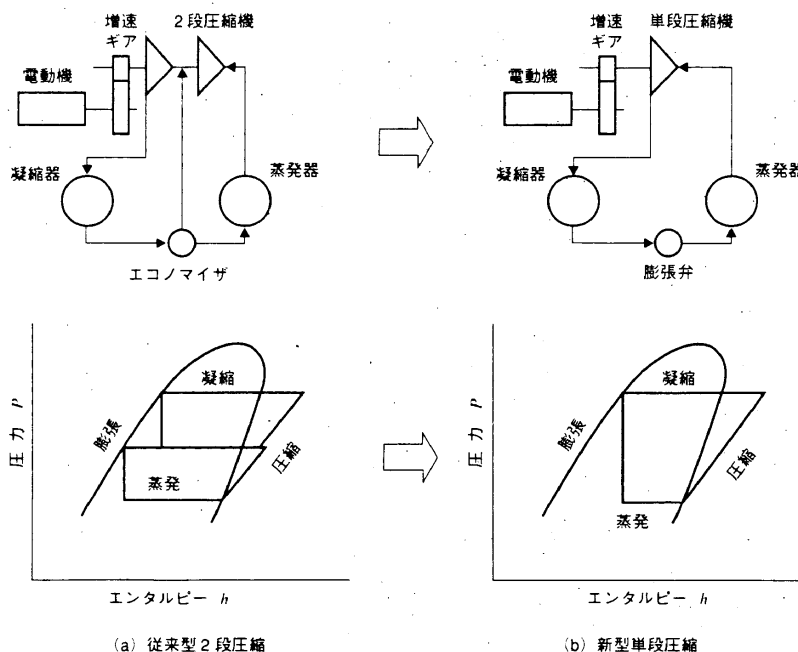


図 1 ターボ冷凍機のシステム構成 従来型 2 段圧縮と新型単段圧縮の冷凍システムの相違比較を示す。
Refrigeration system of turbo chiller

*1 機械技術部冷熱装置設計課

*3 高砂研究所燃焼・伝熱研究室主務

*2 高砂研究所ターボ機械研究推進室主務

*4 高砂研究所機器・自動化装置研究室主務

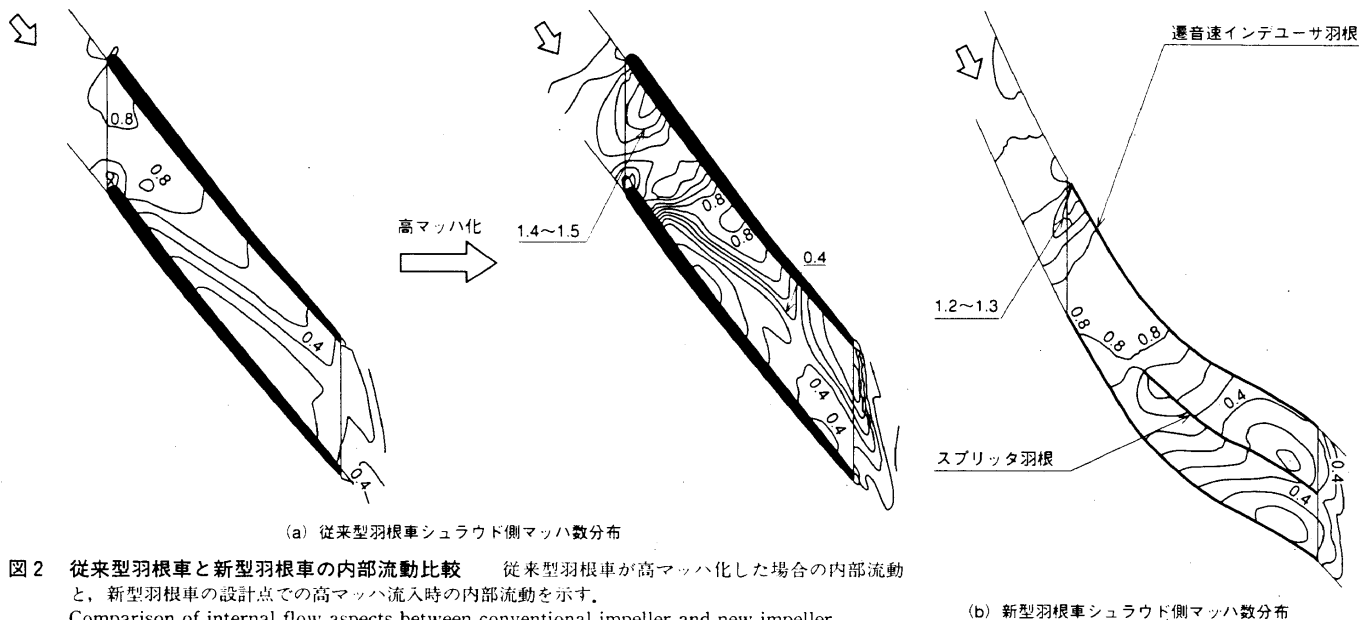


図2 従来型羽根車と新型羽根車の内部流動比較 従来型羽根車が高マッハ化した場合の内部流動と、新型羽根車の設計点での高マッハ流入時の内部流動を示す。
Comparison of internal flow aspects between conventional impeller and new impeller

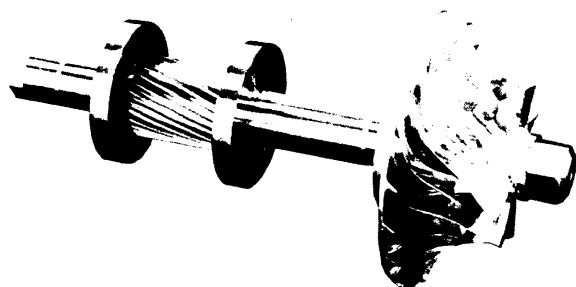


図3 新型羽根車形状 新型羽根車を羽根車軸（増速ギヤの高速軸）に組込んだ状態を示す。
New impeller

入口と羽根車出口すなわちディフューザ入口のマッハ数が上昇し、音速に近い値となる（羽根車入口のマッハ数は従来型で約0.73が新型の単段型では約1.0となる）ので、そのままでは羽根面に高マッハ化による急激な増減速が現われ、圧縮機の効率低下する。本開発では、この効率低下を防ぎ、更に向上させるために以下の空力設計を行った。

(1) 遷音速羽根車設計

図2に従来型の羽根車で高マッハ流入化した場合に起る流動上の問題と、新型羽根車の流動を示す。図2は羽根車シュラウド側の羽根間マッハ数分布である。従来型の羽根車は側板付きの羽根車であり、シュラウド側でも羽根厚みの大きな形状をしている。この羽根形状で、従来型の定格点流入マッハ数が0.7の条件では、入口から出口へ向けて緩やかな減速をしているのみである。しかし回転数を上げ、流入マッハ数が単段型と同等の1.0の状態では、急激な流動の凹凸が現われてくる。すなわち、羽根入口負圧面側でマッハ数が急激に増大し、1.4~1.5に上昇すると、その下流では衝撃波を引起こして、急激に減速する。また入口のスロット付近では、スロットの面積不足のため、流れがチョークし、これがまた衝撃波を強くする原因にもなっている。

この従来型の羽根車の高マッハ流動に対し、新型の単段羽根車は、高マッハ流入に適合する遷音速空力設計となっている。すなわち、羽根車入口部では、羽根枚数が少なく反りが小さく、

シュラウド側で羽根厚の薄い遷音速インデューサ羽根を採用しており、この結果、羽根前方負圧面側でのマッハ数増は1.2~1.3に抑えられ、スロット面積も確保できた。また圧力比の増大に伴い、羽根車後半部で負荷（羽根間の圧力差、マッハ数差）が増大するが、これに対し羽根車後半部での負荷軽減のため短羽根（スプリッタ羽根）を入れている。従来型の側板付き羽根車に対し、新型は、シュラウド側で羽根厚を薄くでき、かつ流路表面仕上げも容易になるように、羽根車は側板なしのオープン羽根車としている。図3に本開発の羽根車形状を示す。

(2) ディフューザ設計

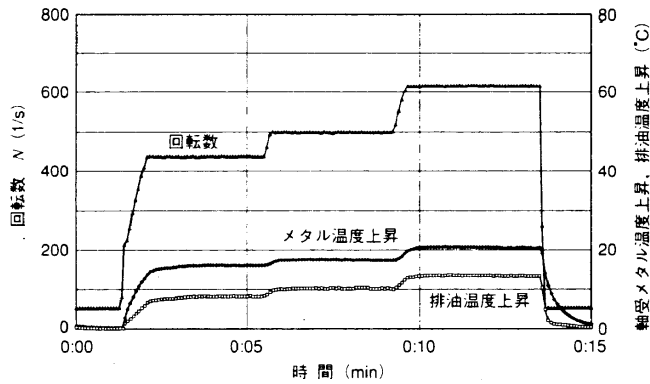
従来のディフューザはベーンレスディフューザであったが、本開発では、ディフューザに小弦節比ディフューザベーンを採用した。小弦節比ベーンとはベーン弦長に対して節長の大きい弦長/節長が1.0以下のベーン翼列であり、ベーンレスディフューザよりは効率を高くでき、サージ点からチョーク点までの流量作動範囲がベーンレスディフューザとはほぼ同程度の特性を持つものである。

2.2 軸系の健全性評価

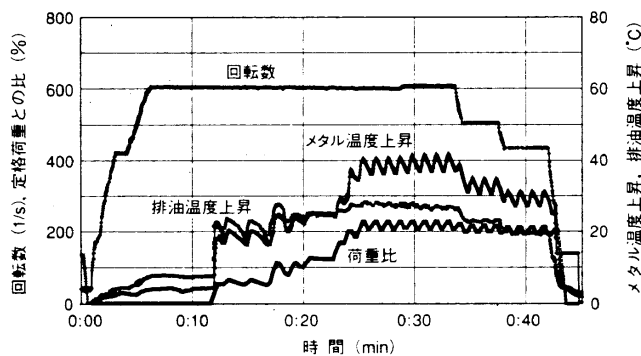
羽根車軸はモータ軸から歯車を介して動力を伝達されるとともに、回転数がモータ軸の約10倍に増加している。このため、軸系の設計に当ってはそれぞれの軸に対し、以下の解析評価により健全性の確認を実施した。

- (1) 自重及び歯車荷重による静たわみ計算で軸系の剛性を評価し、歯車のかみ合い精度及びインペラチップ部のすきまを確保。
- (2) 危険速度線図により曲げ1次モードでの共振回避を評価。
- (3) 定格負荷運転時及びフリーラン時の軸受特性を考慮した固有値解析で共振回避を評価。
- (4) 応答解析による許容アンバランス量の評価。
- (5) モータで発生するねじり加振力に対する固有値解析で共振回避を評価。
- (6) 起動時の過大トルクに対する過渡応答解析で軸及び歯車の強度を評価。

特に羽根車軸は軸受スパンが狭く、軸端に羽根車がオーバハングした構造のため、上記解析に加えモデル軸による振動特性試験を行い解析の妥当性を評価した。最終的には試験機で、軸振動及



(a) ジャーナル軸受試験結果



(b) スラスト軸受試験結果

図4 軸受の要素試験結果例 (a)ジャーナル軸受試験を行い、定格条件で作動中の軸受温度の上昇は小さく、軸受の作動の健全性を確認した。(b)スラスト軸受試験を行い、定格の2倍の荷重を作用させたときの作動中の軸受温度の上昇は小さく、軸受の作動の健全性を確認した。

Verification result of bearing reliability

びケーシング振動をモニタし、サージングも含めたあらゆる運転状況下で異常振動のないことを確認した。

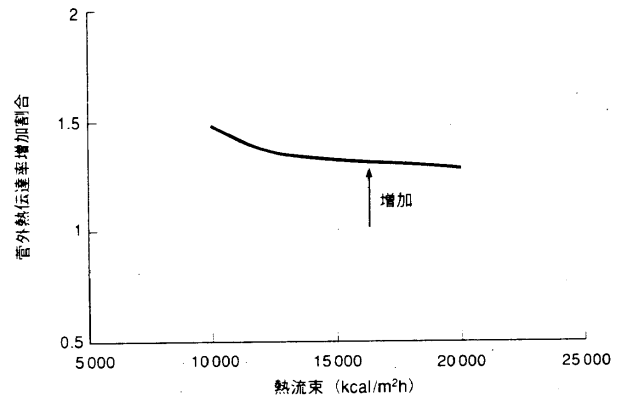
2.3 軸受の機械損失低減

軸受の機械損失低減のために、モータ軸の軸受に転がり軸受を採用するとともに、羽根車軸の軸受には軸振動特性を考慮し滑り軸受を採用した。この滑り軸受は、低荷重、高回転条件で使用するため、低偏心率で軸受剛性、減衰の大きい2円弧オフセット軸受⁽¹⁾を採用するとともに、オフセット張角を小さくして機械損失の低減を図った。また、スラスト軸受については、テーパランド型軸受を用いるとともに、しゅう動面積を小さくし、損失低減を図った。図4にジャーナル軸受及びスラスト軸受の特性試験結果を示す。ジャーナル軸受では、定格荷重を作用させ、回転数を変化させたときの軸受メタル温度及び、軸受排油温度の計測結果から求めた給油温度からの温度上昇を示す。最高回転数条件でいずれの温度上昇度も約21℃と小さい。また、スラスト軸受については、定格の200%の荷重まで作用させ試験を実施した。軸受メタル温度上昇は最大40℃を計測したが、試験後のしゅう動面には損傷はなかった。いずれの軸受も軸受のコンパクト化を図るとともに、直接潤滑型軸受を採用することにより、高速回転時の軸受部損失の低減を図った。

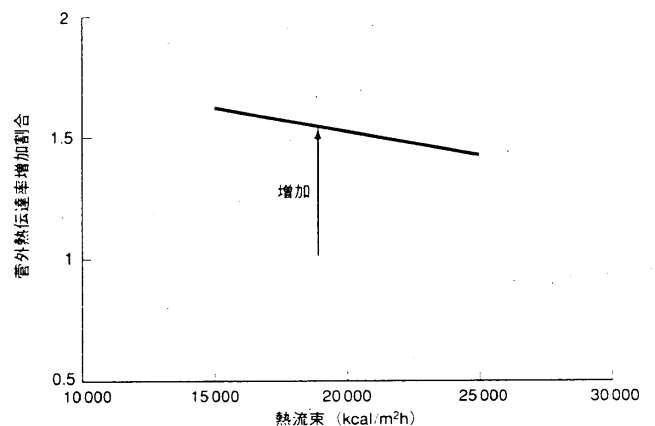
2.4 熱交換器の高性能化とコンパクト化

(1) 蒸発器

蒸発器では高性能伝熱管の採用及び伝熱管配置の適正化により伝熱性能の向上を図った。高性能伝熱管としては、伝熱管表面にリエントラントキャビティと呼ばれる末広りの微細くぼ



(a) 蒸発器



(b) 凝縮器

図5 熱交換器の性能検証テスト結果 熱交換器(蒸発器と凝縮器)の伝熱性能を100 USRT 実証テスト設備で検証テストした結果を示す。

Verification result of heat exchanger performance

みを設けた核沸騰促進管を用いている。この微細くぼみにより、気泡核が安定し、ペ管用やフィン管に比べて発泡点密度が飛躍的に増大し、高い沸騰熱伝達率が得られる。また、伝熱管内面にはらせん状突起を設けて内部を流れる冷水の乱れを促進して、高い対流熱伝達率を得ている。これら伝熱管の内外面の熱伝達率の向上によって、伝熱管の伝熱性能の向上を図っている。

さらに、蒸発器の伝熱管の配置の適正化により、蒸発器内の冷媒の沸騰二相流れを制御して、管群全体での伝熱性能の向上を図っている。伝熱管表面で蒸発した冷媒ガスが管群内から外部に流出しやすくするため、管群の伝熱管密度を粗密に構成するとともに、全域での冷媒の再循環流れを促進して、伝熱管外表面での強制対流沸騰熱伝達率の促進を図っている。

以上による伝熱性能の向上により、100 USRT クラスの蒸発器では従来型に比べて20%の伝熱管本数の削減によるコンパクト化を図った。

(2) 凝縮器

凝縮器では高性能伝熱管の採用及び凝縮液膜の除去により、伝熱性能の向上を図った。高性能伝熱管としては、伝熱管表面に三次元微細突起を有する針状フィン管を用いている。この三次元微細突起により、凝縮液膜が伝熱管表面で滞留することなくスムーズに除去され、フィン管に比べて凝縮液膜除去が向上し、高い凝縮熱伝達率が得られる。また、伝熱管内面にはらせん状突起を設けて内部を流れる冷却水の乱れを促進して、高い

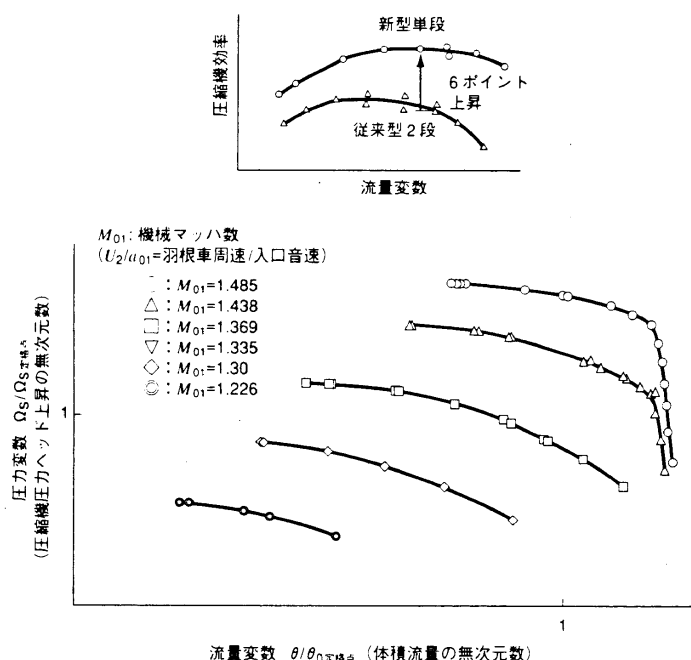


図6 圧縮機の性能検証テスト結果 圧縮機の性能を100 USRT 実証テスト設備で検証した結果を示す。
Verification result of compressor performance

対流熱伝達率を得ている。これら伝熱管の内外面の熱伝達率の向上によって、伝熱管の伝熱性能の向上を図っている。

以上による伝熱性能向上により、100 USRT クラスの凝縮器では従来型に比べて20%の伝熱管本数の削減によるコンパクト化を図った。図5に熱交換器の性能検証テスト結果例を示す。

3. 検証・耐久試験

(1) 性能検証試験

計画最小容量の100 USRT 機のサイズで実証テスト設備を作り、システム全体性能（冷凍能力、動力、COP: Coefficient of Performance）と各コンポーネント性能（圧縮機性能、軸受、ギヤのメカロス等）を実測した。システム全体の性能は100 USRT 機において計画値を約5%上回り、高性能が実証できた。また各コンポーネント性能も計画値以上の性能であることを確認した。またコンパクト型の熱交換器も従来型熱交換器に入替えて計測を行い、性能低下のないことを確認できた（2.4節参照）。図6に圧縮機性能 Map の実測例を示す。また表1にシリーズ展開機の従来型からのシステム性能向上量を示す。

(2) 耐久試験

上記性能テストで合計250hの運転を行ったが、更に厳しい使用条件を考え、全電圧起動試験107回、連続サージ試験（連続

表1 従来型からの冷凍機性能向上量

Performance improvement of new single-stage centrifugal chiller from conventional type

冷凍能力 (USRT)	150	250	500	800
新型電動機入力	0.91	0.94	0.93	0.92
従来型電動機入力				

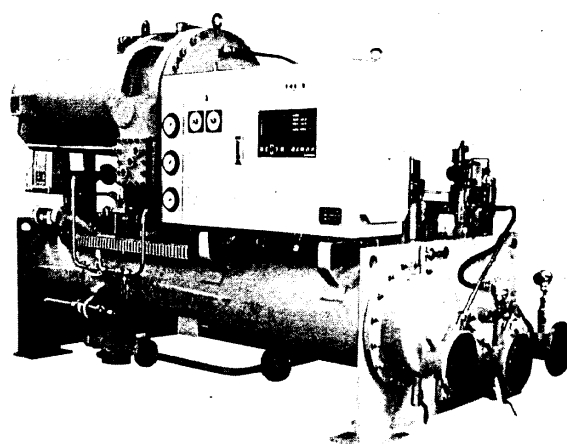


図7 新開発 HFC 134 a 単段ターボ冷凍機 本開発で完成した単段ターボ冷凍機の外観を示す。
New HFC 134 a single-stage centrifugal chiller

7 h, 700 回以上のサージ突入)、全電源喪失試験17回を行った。各々軸系の耐久性、圧縮機各部（羽根車、歯車、軸受、シールリング）の耐久性、軸受潤滑油系統の健全性の確認がねらいである。上記耐久試験後、圧縮機の全分解点検を行い各部異常ないことが確認でき、本開発機の高い信頼性も実証できた。以上の開発設計と検証試験を経て完成した単段ターボ冷凍機を図7に示す。

4. あとがき

HFC 134 a 単段ターボ冷凍機の小型・コンパクト化と高性能化開発の概略を述べた。

ターボ冷凍機の開発はイニシャルコスト、エネルギー消費量、設置スペースの低減を常に追求めることであり、今後もより優れた特性の製品を開発し続けていく所存である。

参考文献

- (1) 吉田ほか、部分オフセット軸受の特性、トライボロジー学会トライボロジー会議予稿集 '98.5