

スクロール圧縮機の圧縮過程での熱流体挙動解析

河村雷人* 達脇浩平***
岩竹 渉*
清水瑞穂**

Analysis of Thermal Fluid Behavior during Compression Process of Scroll Compressor

Raito Kawamura, Wataru Iwatake, Mizuho Shimizu, Kohei Tatsuwaki

要 旨

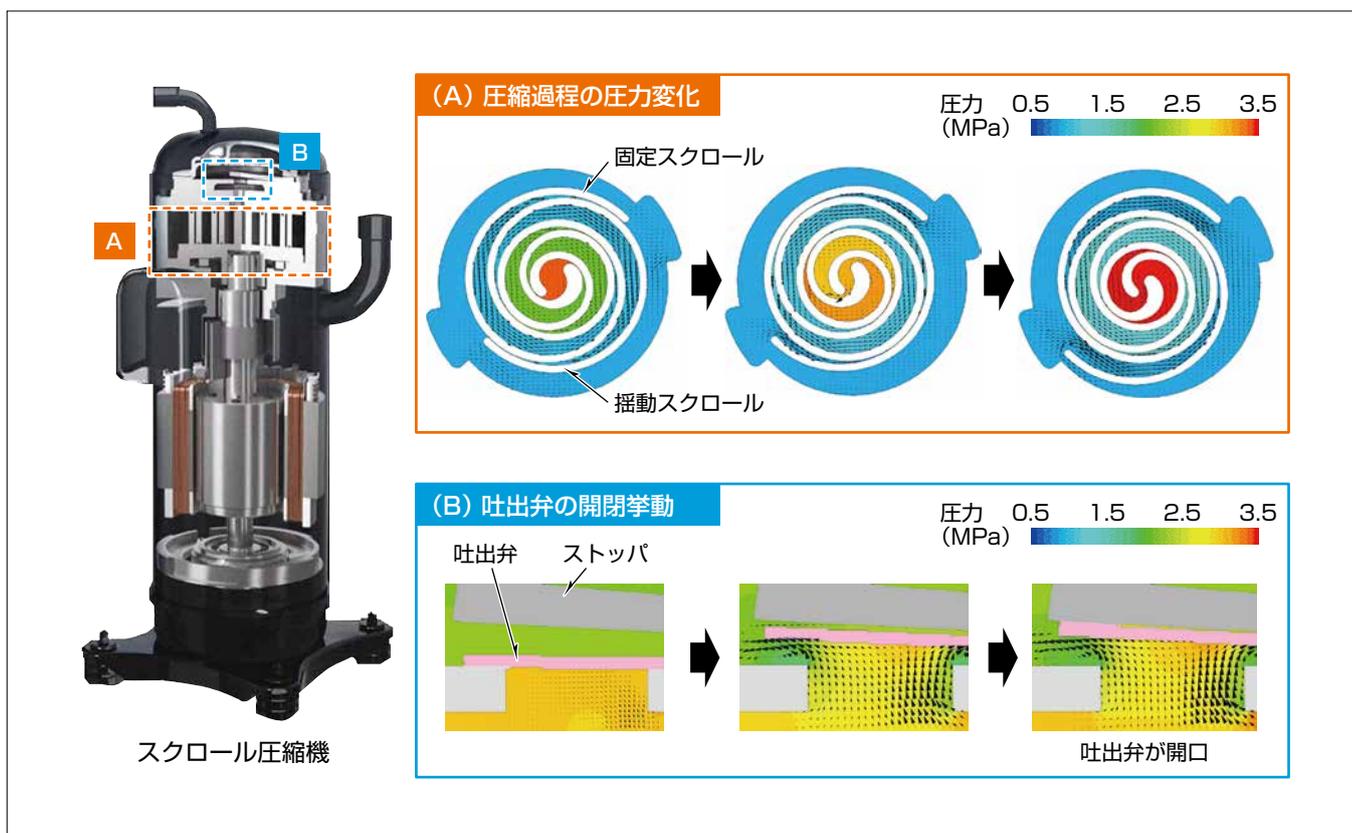
ビル用マルチエアコンやパッケージエアコンに搭載されるスクロール圧縮機を対象に、圧縮過程の複雑な熱流体挙動を解明するための流体解析技術を開発している。従来の圧縮過程での三次元流動解析技術の動向として、簡易な幾何形状で構成されるレシプロ型やロータリ型に関する報告は数多くあるが、複雑な幾何形状を持つスクロール型に関する報告は少なかった⁽¹⁾⁽²⁾。

この研究では、スクロール圧縮機での熱流体現象の高精度予測技術を構築するために、CD-adapco社の三次元汎用熱流体解析ソフトウェアSTAR-CCM+(Ver.10.02.010)を用い、①スクロールの揺動運動に伴う冷媒ガスの吸入・圧縮・吐出挙動と、②内部流体の状態量変化に伴う吐出弁の開閉挙動を模擬した高精度な流体解析

技術を開発し、実機での測定結果と比較することで解析結果の妥当性を検証した。解析と実験によって得られた知見は次のとおりである。

- (1) 圧力波形は実測結果と定性的によく一致し、定量的にも圧縮過程での圧力変化が誤差10%以内で、吐出過程での圧力最大値が誤差5%以内で一致することを確認した。
- (2) 吐出弁の開閉挙動は実測結果と定性的によく一致し、定量的にも最大リフト量が誤差6%以内で一致することを確認した。

この研究によって、スクロール圧縮機の圧縮過程での熱流体現象の高精度予測技術を確立し、空調冷熱機器の高性能化に貢献した。



圧縮過程での熱流体挙動解析

ビル用マルチエアコンやパッケージエアコンに搭載されるスクロール圧縮機を対象に、圧縮過程の複雑な熱流体挙動を解明するために①スクロールの揺動運動に伴う冷媒ガスの吸入・圧縮・吐出挙動と、②内部流体の状態量変化に伴う吐出弁の開閉挙動を模擬した流体解析技術を開発した。

1. ま え が き

ビル用マルチエアコンやパッケージエアコンに搭載されるスクロール圧縮機を対象に、圧縮過程の複雑な熱流体挙動を解明するための流体解析技術を開発している。従来の圧縮過程での三次元流動解析技術の動向として、簡易な幾何形状で構成されるレシプロ型やロータリ型に関する報告⁽¹⁾⁽²⁾は数多くあるが、複雑な幾何形状を持つスクロール型に関する報告は少なかった。

この研究では、スクロール圧縮機での熱流体現象の高精度予測技術を構築するために、三次元汎用熱流体解析ソフトウェアSTAR-CCM+(Ver.10.02.010)を用い、①スクロールの揺動運動に伴う冷媒ガスの吸入・圧縮・吐出挙動と、②内部流体の状態量変化に伴う吐出弁の開閉挙動を模擬した高精度な流体解析技術を開発した。

本稿では、その流体解析技術の解析方法及び実機での測定結果と比較した結果について述べる。

2. 解析方法

2.1 スクロール圧縮機の構造

図1に、スクロール圧縮機の全体構成を示す。この圧縮機は、シェル内のガス空間が低压冷媒によって構成される低压シェル方式を採用しており、圧縮機構をシェル内の上側に、モータをシェル内の下側にそれぞれ配置している。吸入管から流入した冷媒の流れについて述べる。シェル側面の吸入管から圧縮機内部へ吸い込まれた低压の冷媒は、シェル空間上部のフレームに形成した2か所の連通口(以下“フレーム連通口”という。)を通過し、フレーム空間へ流入する。フレーム空間に流入した冷媒は、フレーム空間に設置した一対のスクロールで構成される圧縮機構に流入し、スクロールの回転動作に伴って低压から高压まで圧縮され、スクロール中央部に設置した吐出ポートから吐出マフラ内へ吐出する。その後、吐出マフラの連通口を通過し、シェル上面に設置した吐出管から圧縮機外部へ流出する。この研究では、このうちフレーム連通口から吐出管までの空間

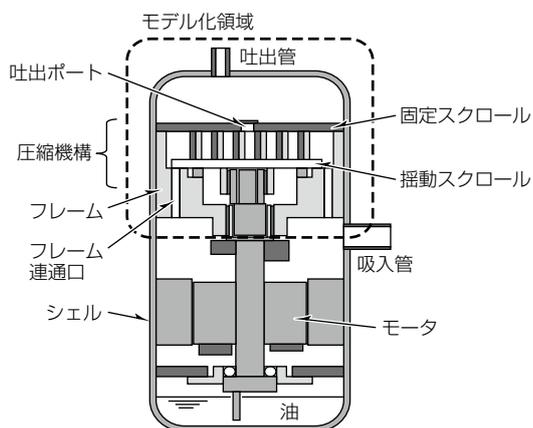


図1. スクロール圧縮機の全体構成

をモデル化した。すなわち、フレーム連通口から圧縮機構へ流入した低压冷媒をスクロールの回転動作によって高压まで圧縮し、吐出弁の開閉挙動によって吐出マフラ空間へ吐出され、吐出管から圧縮機外部へと流出する冷媒の流れを模擬した解析を実施した。

2.2 解析フロー

この研究では、三次元汎用熱流体解析ソフトウェアSTAR-CCM+(Ver.10.02.010)を活用し、スクロール圧縮機の圧縮機構部での流れ解析を実施した。圧縮機構部の内部では、冷媒を圧縮機構の旋回運動によって圧縮し、圧力が一定値以上になると吐出弁から開放される。この現象を模擬するために、圧縮室の形状変化を模擬したモーフィング、リメッシュの設定と、吐出弁の開閉運動を模擬したオーバーセットメッシュ及び剛体運動の設定が必要になるが、計算負荷が増大するため、解が安定するまでに時間がかかる課題がある。このため、まずは①吐出弁の開閉挙動をバッフル境界で簡易的に模擬したモデル(以下“バッフル境界モデル”という。)を用い、次に②吐出弁の剛体運動を考慮したモデル(以下“剛体運動モデル”という。)を用いることで、手順を2段階に分割し、計算時間を短縮した。

この手法では、1段階目のバッフル境界モデルの解析値を、2段階目の剛体運動モデルの初期値としてマッピングする。また、吐出弁の運動は吐出弁に剛体運動の設定をし、吐出弁周辺にはオーバーセットメッシュを作成する。さらに、揺動スクロールの旋回動作を模擬するため、時々刻々でメッシュが変形するモーフィングと、モーフィングによって歪(ゆが)んだメッシュのリメッシュを繰り返し実施する。なお、メッシュ作成及び計算にはJava^(注1)マクロを使用した。また、固定スクロールと揺動スクロール間のメッシュエラーを回避するため、揺動半径を0.15mm縮小し、スクロール側面に0.15mmの隙間を形成してモデル化した。これに伴い、圧縮過程での冷媒漏れが実運転条件よりも増えないように、先に述べた隙間では流体の粘性係数を大きく設定した。

(注1) Javaは、Oracle America, Inc.の登録商標である。

2.3 解析モデル

図2に、解析モデルの部品形状を示す。この研究ではモ

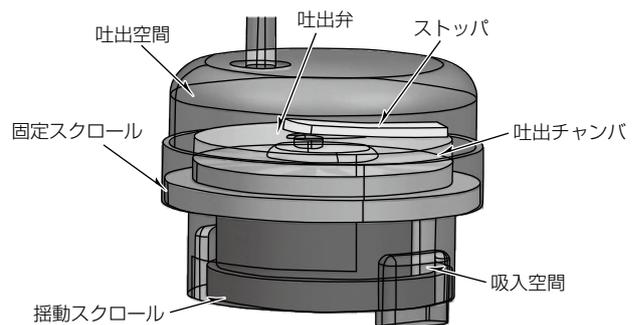


図2. 解析モデルの部品形状

デル化領域を①吐出空間、②吐出弁、③ストッパ、④吐出チャンバ、⑤固定スクロール、⑥揺動スクロール、⑦吸入空間(フレーム連通口+スクロール設置空間)によって構成した。このうち、⑥揺動スクロールの揺動運動と②吐出弁の開閉挙動を考慮したことがこの解析の主な特徴である。フレーム連通口の入口を流入境界として設定し、吐出管の出口を流出境界として設定した。また、バッフル境界モデルでは吐出ポート出口をバッフル境界として設定し、剛体運動モデルでは吐出弁の移動領域をオーバーセット領域とした。剛体運動モデルでは、吐出弁を剛体とし、一次元の線形ばねモデルによって吐出弁のリフト量を推定した。

2.4 解析条件

物性値のテーブルデータとして、密度、比熱、熱伝導率、粘性係数は冷媒物性表RefProp⁽³⁾から算出した値を用いた。なお、圧縮室間の冷媒漏れ挙動が実現と乖離(かいり)しないように、壁面距離0.15mm以下の領域では粘性係数を大きく設定した。また、圧力条件は凝縮温度/蒸発温度=52/5℃、吸入過熱度=10℃とし、回転速度は60rpsとした。なお、タイムステップは0.5°刻みとし、リメッシュ間隔は5°刻みとした。全メッシュ数は約2,000,000セルとし、圧縮機構部(スクロール内部)の側面隙間部ではメッシュサイズを最小0.06mmまで、吐出ポート周辺のオーバーセット領域ではメッシュサイズを最小0.16mmまで細分化した。

3. 解析結果

3.1 圧縮過程の熱流体挙動

図3に、回転位相ごとの圧縮機構部の静圧分布と流速ベクトル図を示す。図4、図5に図3中の領域A、Bの拡大図を示す。図に示すとおり、この解析では揺動スクロールの揺動運動による流体領域の幾何形状変化に伴い、吸入過

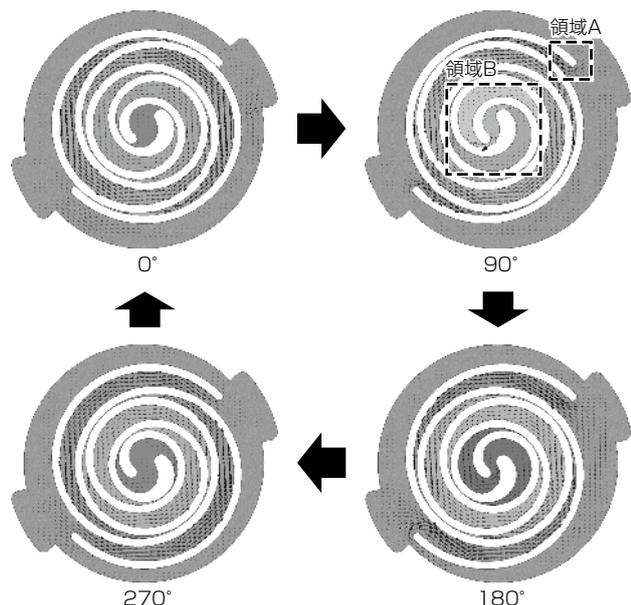


図3. 圧縮機構部の静圧分布と流速ベクトル図

程→圧縮過程→吐出過程での状態量変化や流動状態を表しており、三次元流動解析のメリットとして、スクロールの巻終わり付近(=圧縮室の入口)での冷媒吸入現象や、最内室での混合流動現象など、複雑な流動現象を確認できる。

図6に、圧縮室の圧力波形の実測結果と解析結果を示す。実測結果については、圧縮室に設置した複数の変動圧センサ(5011A, KISTLER社製)を用いて、解析条件と同等の運転条件での変動圧力データを取得した。なお、スクロール圧縮機では圧縮室を複数構成するため、圧力測定ポイントを複数設定し(実測: 4か所, 解析: 30か所)、複数の

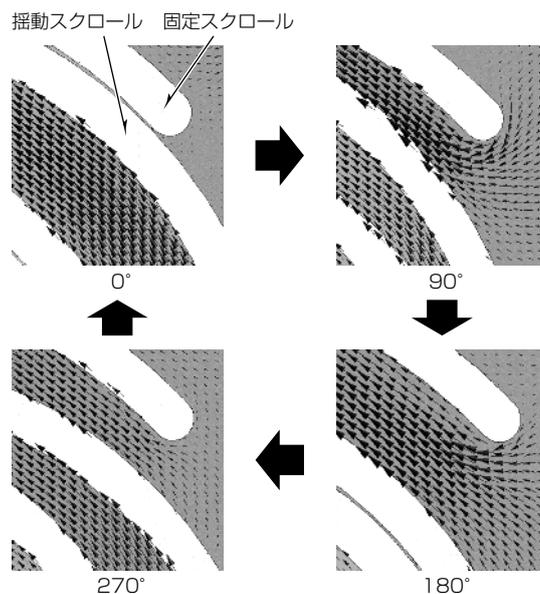


図4. 巻き終わり付近での冷媒吸入現象(図3中の領域A)

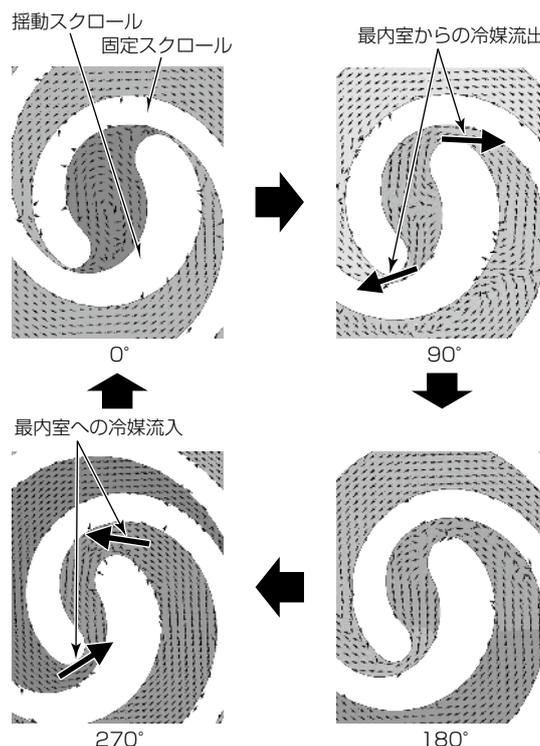


図5. 最内室での混合流動現象(図3中の領域B)

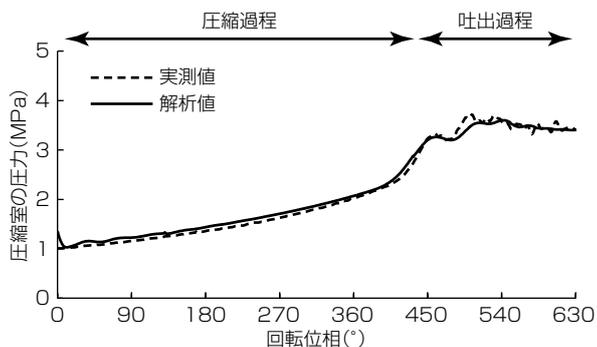


図6. 圧縮室の圧力波形

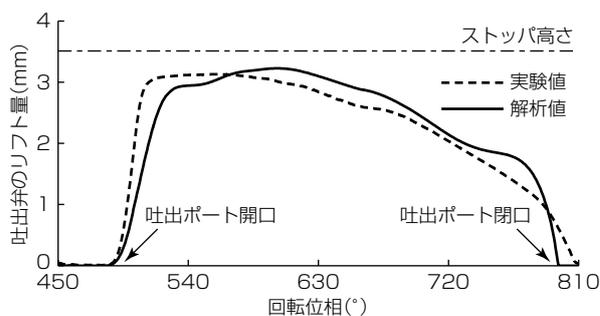


図8. 弁リフト量の解析値と実測値の比較

図8に、回転位相ごとの弁リフト量の解析値と実測値を比較して示す。なお、実機での弁リフト量は、弁の側面に設置したギャップセンサ(PU-05, 株式会社電子応用)によって測定した。吐出ポート開口直後にリフト量は急激に増加し、開口中のリフト量は緩やかに低下し、閉口時のリフト量は急激に低下するという一連の弁挙動が実測結果と定性的によく一致し、定量的にも最大リフト量が誤差6%以内で一致することを確認した。

4. むすび

三次元汎用熱流体解析ソフトウェアSTAR-CCM+を用い、①スクロールの揺動運動に伴う冷媒ガスの吸入・圧縮・吐出挙動と、②内部流体の状態量変化に伴う吐出弁の開閉挙動を模擬した流体解析技術を開発し、実測結果と比較した。得られた知見は次のとおりである。

- (1) 圧力波形は実測結果と定性的によく一致し、定量的にも圧縮過程での圧力変化が誤差10%以内で、吐出過程での圧力最大値が誤差5%以内で一致することを確認した。
- (2) 吐出弁の開閉挙動は実測結果と定性的によく一致し、定量的にも最大リフト量が誤差6%以内で一致することを確認した。

この研究によって、スクロール圧縮機の圧縮過程での熱流体現象の高精度予測技術を確立し、空調冷熱機器の高性能化に貢献した。

参考文献

- (1) 堀 和貴：流体・構造連成解析を用いた空調用圧縮機の流体挙動分析, 冷凍, 84, No.981, 597~603 (2009)
- (2) 中嶋 進：コンプレッサー開発ツールとしてのCFDの機能, 冷凍空調学会講演論文集, D235 (2009)
- (3) Lemmon, E. W., et al.: Reference Fluid Thermodynamic and Transport Properties, NIST Ref. Database 23 (2002)

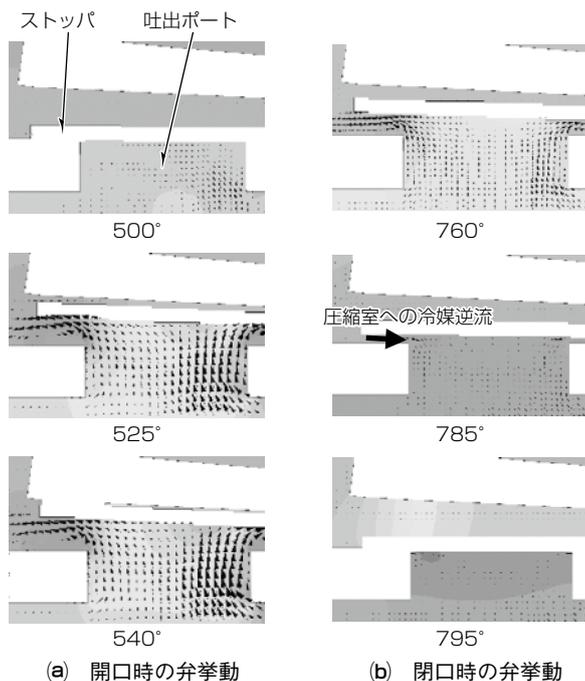


図7. 吐出ポート近傍の静圧分布と流速ベクトル図

波形を連結することで圧縮過程全域での圧力波形特性を比較した。どの運転条件でも、解析値と実測値が定性的によく一致しており、定量的にも圧縮過程での圧力変化が誤差10%以内で、吐出過程での圧力最大値が誤差5%以内で一致することを確認した。

3.2 吐出弁挙動

この手法では、吐出弁の剛体運動モデルを採用しており、圧縮室内部の圧力変化に伴う吐出弁の開閉挙動を模擬している。図7に、回転位相ごとの吐出ポート近傍の静圧分布と流速ベクトル図を示す。図7(a)は開口時の弁挙動を、図7(b)は閉口時の弁挙動をそれぞれ示している。図に示すように、開口時のリフト量拡大に伴い吐出流路の抵抗が減少し、圧縮室内部での過圧縮を緩和していく様子や、閉口時の圧縮室圧力の急激な低下に伴う冷媒の逆流現象が確認できる。