

冷熱空調家電でのCFD活用による 省エネルギー上流設計・検証解析技術

小林 孝* 濱田慎悟**
中津哲史** 児玉拓也**
衛藤 浩**

Energy Saving Design and Verification Method for Home Appliances Products using CFD

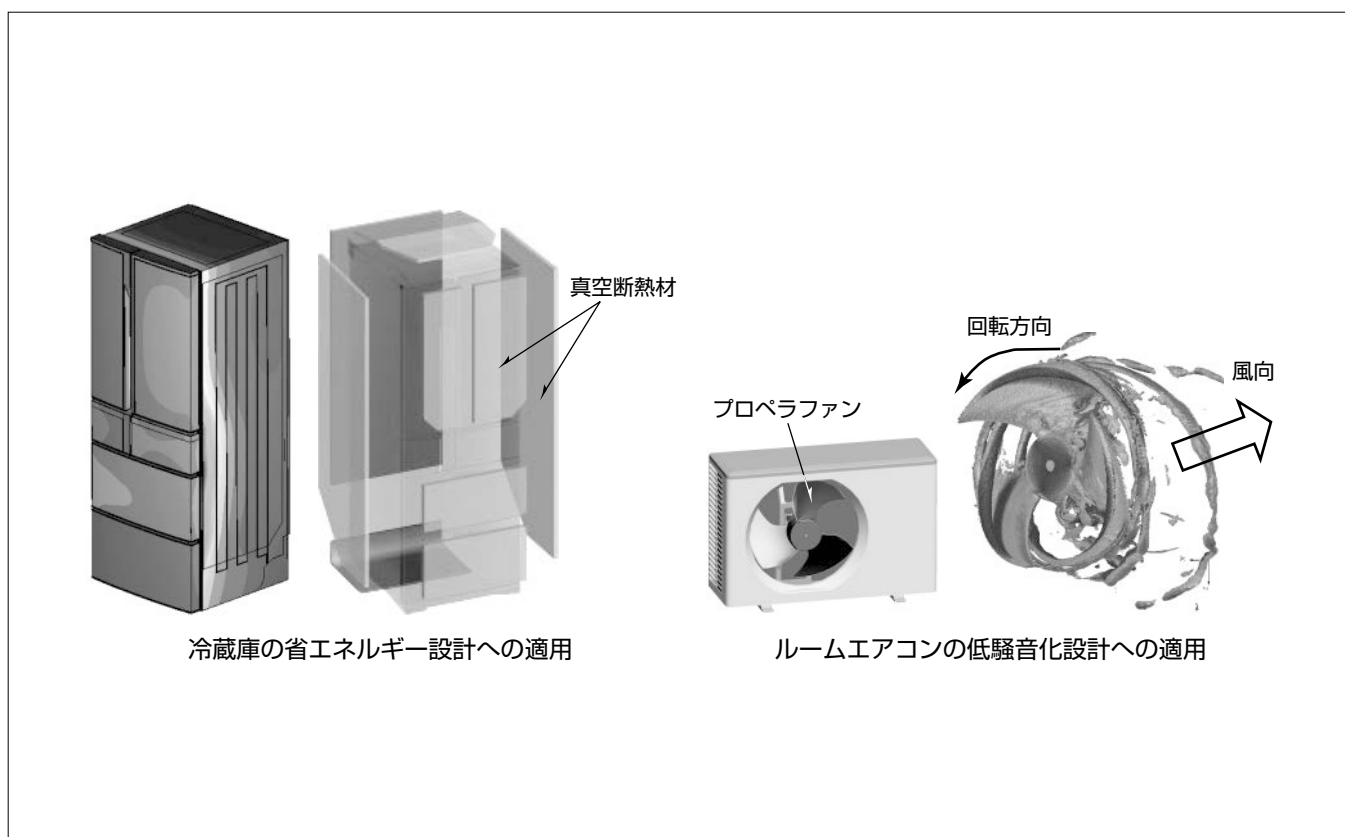
Takashi Kobayashi, Satoshi Nakatsu, Hiroshi Eto, Shingo Hamada, Takuya Kodama

要 旨

近年の家電製品開発では性能向上、コスト削減、期間短縮における改善ニーズがますます高まっている。一見、三律背反とも思われるQCD(Quality, Cost, Delivery)のバランスを最適に成立させる設計方法論が求められている。特に冷蔵庫やエアコン製品では開発サイクルが短い中で、高い省エネルギー目標に応える必要がある。省エネルギー設計に重要な熱流体現象は目に見えないため、高精度な物理解析モデルを用いた可視化が有効である。

CFD(Computational Fluid Dynamics)を活用した三次元解析技術による現象の定量化・見える化から製品に対する理解度を深め、試作前段階で合理的・創造的に製品仕様を決定することが効果的である。

本稿では、家電製品設計に適した三次元解析手法を開発し、冷蔵庫での省エネルギー構造の構想と、エアコン室外機ファンの空力騒音源を特定した事例について述べる。熱流体・湿度・空力騒音を始めとするエネルギー移動、力学的現象は目に見えず、詳細な計測も困難であるため、高度な解析技術が有効である。その一方で、解析インフラは、数値計算の手段であり、製品開発で効果を創出するには利用技術の更なる向上や技術者育成が不可欠である。今後とも、新価値創造(アイデア考案型の攻めのCAE)から、品質保証(検証型の守りのCAE)までの広範な製品開発にこの手法を適用拡大し、持続可能な省エネルギー社会・地球環境の保全に貢献していく。



冷熱空調家電における三次元熱流体解析手法の適用事例

冷蔵庫全体の温度・熱流分布を三次元解析で可視化し、容量アップと省エネルギー性能を両立した“新・薄型断熱構造SMART CUBE”を実現した例(左)。

エアコン室外機プロペラファンの騒音要因となる渦度(流体要素の自転運動の強さ)($\omega = \text{rot}U$)の等値面を可視化した解析例(右)。

1. ま え が き

近年の家電製品開発では性能向上、コスト削減、期間短縮における改善ニーズがますます高まっている。一見、三律背反とも思われるQCDのバランスを最適に成立させる設計方法論が求められている。特に冷蔵庫やエアコン製品では開発サイクルが短い中で、高い省エネルギー要求目標に応える必要がある。省エネルギー設計に重要な熱流体現象は目に見えないため、設計上流段階に高精度な物理モデルを導入することが有効である。近年ではCFDを活用した三次元解析技術が有力な設計支援ツールとなっており、現象の定量化・見える化から製品の理解度を深め、試作前段階に合理的・創造的に製品仕様を決定することが期待できる。

2. 熱流体解析による現象見える化・省エネルギー設計法⁽¹⁾

製品設計とは、仮説立案と性能検証を繰り返し、限られた時間内に製品を具現化する創造的プロセスである。設計過程では、自ら設計検討モデルを構想し、設計仕様を満足するまで仮説構築と検証を繰り返して機能・形状を実体化していく。具体的には、図1に示す段階的詳細化(Stepwise refinement)ループを回して、限られた開発期間とリソースの中で製品のQCDを作りこむ。

設計上流でのオーダー計算モデルで製品構想の方向性を絞り込み、有望案の三次元解析から高精度な設計検証と発想アイデアの充実化をはかる。大規模解析から得られる現象情報は豊富であり、設計者の発想支援に創造的ブレイクスルーを起こす可能性がある。これらの解析ツールやITの解析結果から得られる解の有効性は設計者が設定するモデル品質次第であり、次の2つの能力が決め手となる(図2)。

(1) モデル化力(適切な設計モデルを構築する能力)

最新の並列計算環境(High Performance Computing : HPC)上で熱流体解析を行えば、数mm単位の空間解像度、数msオーダーの時間分解能で物理現象が解像できる。つまり、実験データ情報をしのぐ製品丸ごとの物理現象の見える化が実現されつつある。その一方で、例えば空力騒音現象を支配する物理現象スケールは数mPaの圧力変動や数μm程度の渦スケールであり、適切な簡略化や乱流モデルの導入が必要となる(モデルリダクション)。つまり、利用者自身

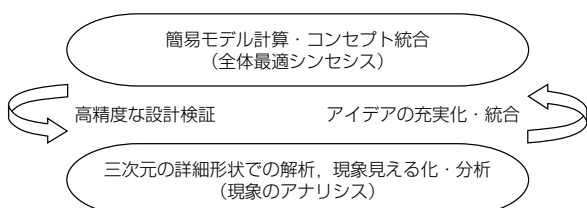


図1. 段階的詳細化設計ループ

が対象の本質を理解し、適正な支配方程式や計算アルゴリズム、離散化スキーム、乱流モデルを選定し、適切な計算格子や境界条件、時間ステップを決定して、モデルを構築する必要がある。

(2) 気づき・発想力(膨大な解析結果から読み取る能力)

近年のHPC環境では複数の物理量について、数千万から数億格子点での空間分解能で、μs単位の時間分解能の非定常挙動を計算できる。したがって、よりリアルな“設計モデル”が構築できれば、人間の想像力を超えた製品理解と発想支援が期待できる(Inputの質・量がかわれば、Outputの質も変わる)。しかしながら、得られた数値解は単なる数字の羅列である。その解析結果をどこまで信頼し、膨大な三次元情報(一種のビッグデータ)をどんな切り口(物理量、座標軸、時間軸・・・)で分析して発案に結びつけるかは利用者のセンスや経験量に強く依存する。つまり、膨大な解析結果(Information)を効果的に設計知識(Knowledge)、設計革新への英知(Wisdom)へと昇華・価値化させる利用者側での洞察力・創造力(Intelligence)が不可欠である。

3. 空調冷暖機器への適用事例

この章では、三次元熱流体解析を省エネルギー冷蔵庫や、エアコン室外機の低騒音化の開発に適用した設計事例について述べる。

3.1 冷蔵庫の省エネルギー設計への適用事例⁽²⁾⁽³⁾

3.1.1 薄型断熱箱設計への活用

低消費電力の省エネルギー冷蔵庫を実現するには、ヒートポンプの負荷となる外部からの熱浸入量を減少させる箱の断熱設計が鍵となる。壁を経由した庫内への熱流束 q_x の合計熱量 Q_{total} [W]は式(1)、式(2)でオーダー試算できる。

$$Q_{total} = \iint_A q_x dA = \iint_A K_x \cdot (T_{\text{外気温度}} - T_{\text{庫内温度}}) dA \dots\dots\dots(1)$$

$$K_x = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_o} + \sum \frac{t_{solid}}{\lambda_{solid}} + \frac{1}{\alpha_i}} \dots\dots\dots(2)$$

設計センス=妥当な設計モデルの構築・分析・創造力!

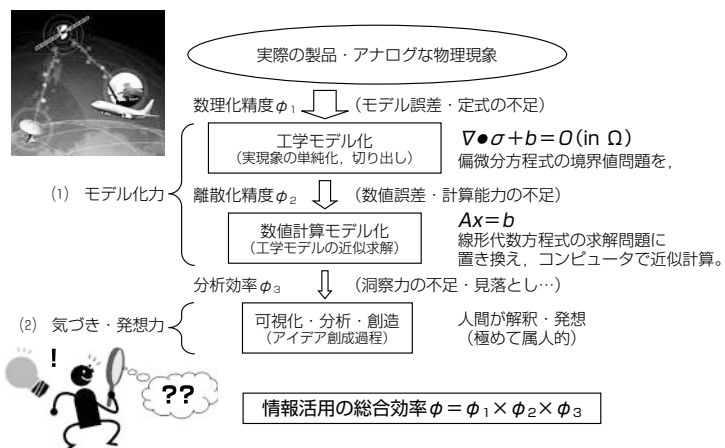


図2. デジタル手法利用における情報欠損・要因過程

- α_o : 庫外熱伝達率 [W/m²K]
- α_i : 庫内熱伝達率 [W/m²K]
- λ : 壁の熱伝導率 [W/mK]
- t : 固体壁厚さ [m]
- K_x : 局所壁熱通過率 [W/m²K]

ただし、実際の冷蔵庫では断熱が弱い壁部位や板金フランジを経由して壁内を三次元的に熱流が回り込むが、実験的な把握が難しい。そこで図3に示す箱全体での三次元解析モデルを開発し、壁内の熱流経路のビジブル化・特定を可能とした。この手法を設計上流段階で適用し、断熱の基本となる真空断熱材のレイアウト、扉、外壁の壁厚を最適化して、容量アップと省エネルギー性能を両立させた“新・薄型断熱構造SMART CUBE”を実現した。

3.1.2 プレ着霜冷却器開発への活用

庫内の狭空間の気流や温度、湿度分布は目に見えない現象であり、多点実測が困難である。そこで、冷却器周辺の高温多湿の空気の流動分布を解析的に可視化した。冷蔵室から戻る高温多湿空気は循環経路内で上向きに曲がる際の遠心力で背面側(図4の右壁側)に集中することがわかった。そこで、高温空気が冷却器本体に触れる前に効果的に除湿する“プレ着霜冷却器”(図5)を考案した。冷却器の風上に設けたプレ着霜フィン部を通過した空気は除湿状態で冷却器本体に流入するため、冷却器本体への霜付着が軽減できる。その結果、従来品に対して同一の着霜量での冷却能力維持時間を30%延長でき、外気温度が高い季節の除霜運転周期

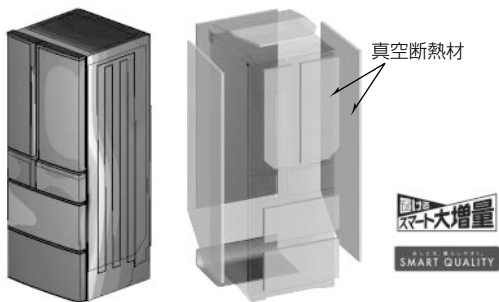


図3. 冷蔵庫の熱現象可視化例と考案した新薄型断熱箱

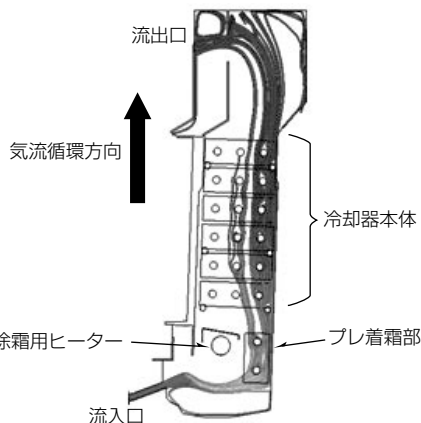


図4. 冷蔵室からの多湿空気流動の解析的把握

を24時間から48時間に1回に低減できた。また、集中着霜設計の思想も奏功して除霜のためのヒーター印加時間も従来比で半減し、年間消費電力量を大幅に低減できた。

3.2 ルームエアコンへの適用事例⁽⁴⁾

3.2.1 室外機プロペラファンの低騒音化設計への活用

快適居住性を訴求価値とする白物家電では、省エネルギー性能とともに低騒音化も重要な設計テーマである。エアコン室外機で熱交換性能を増大するには、ファン回転数の増加が有効である。しかし、風量はファンの回転数に比例するのに対し、空力騒音は回転数の5~6乗に比例して増大する(図6)。

3.2.2 プロペラファンの空力騒音解析技術の開発

回転翼によって空気塊が流動すると、空気の弾性と慣性作用から渦の収縮・拡大に伴う微小な圧力変動が起こる。回転翼は観測者に対して加速度運動する移動音源となり、伝播(でんぱ)した粗密波(騒音)は次式に示すSPL(音圧レベル)値[dB]として評価される。

$$SPL = 10 \times \log \left(\frac{P^2}{P_0^2} \right) = 20 \times \log \left(\frac{P}{P_0} \right) \dots\dots\dots(3)$$

ここで $P_0 (= 2 \times 10^{-5} \text{ [Pa]})$ は基準値となる1,000Hzでの人間の標準的最小可聴音圧である。高速な回転体から生じる微小な圧力の伝播現象を実験的に計測して音源部位を特定することは困難である。近年では、表1に示す空力騒音解析手法の適用が有望である。

今回の適用対象では音源へのフィードバック現象は小さいため、計算負荷が軽減できる分離解法を適用した。最初に、非圧縮性流れを仮定して800rpmでファンを回転させ

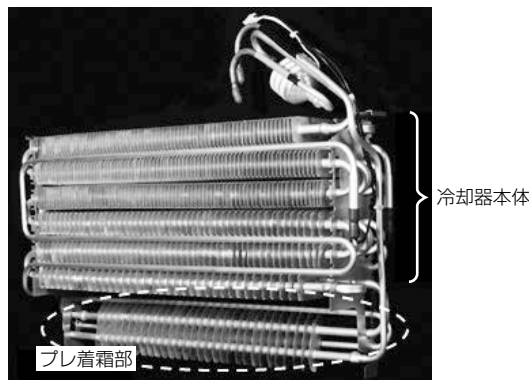


図5. プレ着霜フィン付き新型冷却器

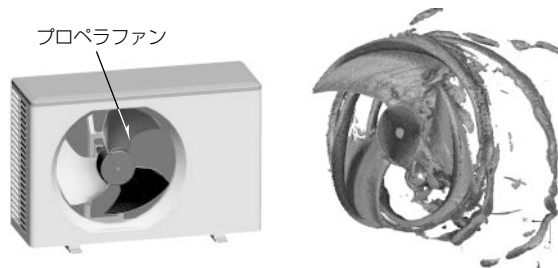


図6. エアコン室外機(左)とファン周囲の渦度 ω 等値面(右)

表1. 空力騒音解析手法の分類

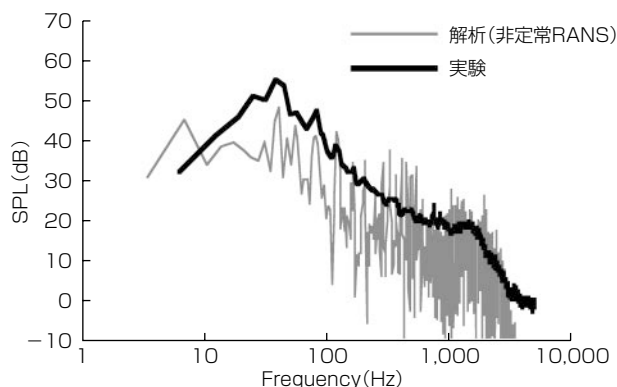
手法	特徴
(1) 直接解法 (CAA)	Lighthill方程式を直接計算し、圧縮性流体解析での密度変化から粗密波の伝播を直接に求める。伝播する音波の干渉やフィードバックを考慮できるが、波長の1/10程度の格子分解能や、小さな圧力変動を計算可能な高次な精度スキーム、時間分解能が必要で、計算負荷が膨大である。
(2) 分離解法	非圧縮性流体解析で音源部位の圧力変動を計算した後に、音響伝播を別途計算する。音源へのフィードバックを考慮できないものの、直接解法に比べて大幅に計算負荷を削減できる利点がある。

CAA : Computational Aero Acoustics

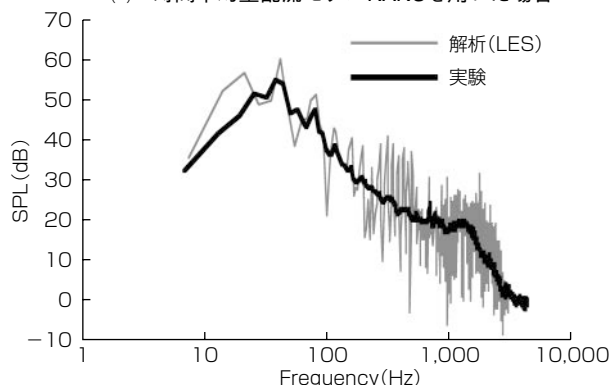
た非定常乱流解析を行った。解析領域の格子分割数は約3,500万で、空間離散化には2次精度MUSCL (Monotone Upstream-centered Scheme for Conservation Laws)スキームを用い、ファン1回転あたり360タイムステップの時間分解能(4.8kHz)とした(翼枚数と回転数で決まるBPF (Blade Passing Frequency)の1次NZ成分(40Hz)の120倍に相当)。次に、流体解析から得られた圧力変動を音源情報として音響解析の入力条件とした。音響アナロジー解析では、流れ中の移動物体の音圧伝播モデルとして導かれたFfowcs-Williams and Hawkings (FW-H)の波動方程式を解き、ファン回転運動と翼やベルマウス表面の圧力変動に伴う空力騒音を評価した。実験値と解析値は、ファンから風上に0.7m離れた観測点での音圧スペクトルで比較した。流体解析での乱流モデルは、最初に非定常RANS (Reynolds Averaged Navier-Stokes equation)を用いたが、実験値に対して音圧レベルが過小評価された(図7(a))。ここで、非定常RANSで導入されるレイノルズ応力は、非定常流を時間平均的(定常流)に類推するみかけの力である(乱流運動エネルギー k と乱流エネルギー散逸率 ϵ の関係から流れの非定常性や局所的な変動を時間平均化したモデルである)。したがって、音源となる微小渦の圧力変動も時間平均化されて過小評価されてしまう。次に用いた空間平均型乱流モデルLES (Large Eddy Simulation)では、非定常性や局所的な離は一切モデル化せず、格子サイズ以下のエネルギー伝達だけがモデル化される。モデルの原理的にLESは、RANSが苦手とする大規模はく離や乱流の非定常再現に優れ、解析値は実測値とよく一致した(図7(b))。また渦度等値面による空力騒音源の空間分布の特定・可視化も可能となった。

4. む す び

家電製品を対象とした高精度な熱流体解析モデルを開発し、冷蔵庫での省エネルギー構造の考案や、エアコン室外機ファンの空力騒音源を特定した事例について述べた。熱流体・湿度・空力騒音を始めとするエネルギー移動、力学現象は目に見えず、場の物理量の詳細計測も困難であるため、高精度な解析技術が有効である。この手法を効果的に



(a) 時間平均型乱流モデルRANSを用いた場合



(b) 空間平均型乱流モデルLESを用いた場合

図7. ファン空力騒音における実験値と解析値の比較

用いられ、限られた時間制約の中で製品価値を高めつつ、技術合理的なコスト低減(製品ムダ取りVE)も可能となる。その一方で解析インフラは、数値計算の手段であり、製品開発で効果を出すには、創造的な利用技術の開発や技術者育成が不可欠である。今後とも、新価値創造(アイデア考案型の攻めのCAE)から、品質保証(検証型の守りのCAE)までの広範な製品開発にこの手法を適用し、持続可能な省エネルギー社会・地球環境の保全に貢献していく。

参 考 文 献

- (1) 小林 孝: Digital Engineering 2.0の必要性: 日本製造業におけるプロセス革新アーキテクトの必要性, 日本機械学会 設計工学・システム部門講演会講演論文集, 315~318 (2007)
- (2) Kobayashi, T., et al.: An Integrated Design method for Refrigerator using Thermal-Fluid-Refrigeration cycle Coupled Analysis, The Seventh JSME-KSME Thermal and Fluids Engineering Conference 2008 (2008)
- (3) 大和康成, ほか: 節電アシスト機能搭載冷蔵庫“RXシリーズ”の節電・省エネルギー技術, 三菱電機技報, **86**, No.10, 564~567 (2012)
- (4) Jeon, W. H., Kobayashi, T., et al.: Study on the CFD method for noise source identification and aeroacoustic analysis of an axial fan, Inter Noise 2011 (2011)