

# 特集 ここまでできる車室内環境数値シミュレーション\*

## The Latest CAE of Cabin Environment

浅野秀夫

Hideo ASANO

This paper describes recent works and research in CAE techniques of the vehicle cabin environment. Regarding the cabin environment controlled by the air conditioning, the key factors that affect passenger comfort are; air conditioning performance, cabin-airflow noise, and other transient characteristics. In order to improve these factors, a CAE technique has been developed to establish an analysis method for objects from air conditioning components, and system, to whole air-conditioning environment including the cabin-environment and passengers, and also, to expand the application to larger-scale systems/environments, region requiring more precise modeling and accuracy, and the diversified objects of analyses. The development of CAE is largely attributed to the advancement of computer technology.

**Key words:** Air conditioning, Vibration, Noise, CAE, CFD, Thermal comfort, Noise reduction, Transient characteristic

### 1. はじめに

真夏に窓を閉め切っている冷房車が羨望の的であった時代は今から30年も昔のことであり、現在カーエアコンは常識を超えて空気のような存在<sup>1)</sup>となっている。自動車は、走る・曲がる・止まるの基本機能に快適利便を図る装置として、自動変速機・パワーステアリング・ABS (Antilock Brake System) がほぼ標準装備されているように、第4の基本機能と自認する、冷やす暖めるエアコン機能についても、さまざまな快適利便装置が付くようになった。

エアコンシステムの最新技術については、別稿に譲るとして、本稿では、この快適利便なエアコンシステムの数値シミュレーション、すなわちCAE (Computer Aided Engineering) 技術の最新動向と、どのように製品開発に活用しているかを紹介する。

なお、本稿は、各種学会論文、企業発行技術情報、ソフト/ハードウェア開発企業資料から最近の動向をまとめたものであることを予め断っておく。

### 2. 空調性能の計算技術動向

温熱的快適性は、車室内が建物と違い、僅か3 m<sup>2</sup>にも満たない空間の中であり、乗員にとって快適な温湿度分布を作り出すことは結構難しいことであり、快適感を増すことで、運転作業への集中度を高められる。この章では、カーエアコンシステム及び車室内の空調状態に関するシミュレーションとそれによる乗員の温熱感覚に関する快適性のシミュレーションの現状について紹介する。

#### 2.1 デフロスタ、空調機器

フロントガラス内面の曇り除去について、池田ら<sup>2)</sup>は表面風速分布との相関を見出して、CFD (Computational Fluid Dynamics) 解析による晴れパターン予測技術を開発した。計算規模は、デフロスタダクトと車室内モデルで54,200要素であった。また佐藤ら<sup>3)</sup>の研究でガラス温度分布と晴れパターンの相関がより高いことを見出している。いずれも流れは定常計算手法であったが、実際の非定常現象により近づける応用研究が継続されている。

曇り現象について、ガラス面と空間領域の間に水滴モデルを設定し、CFD計算と熱収支計算から半球状水滴半径 $r$ を計算し、水滴の蒸発、凝縮過程を精度良く解く手法を開発した事例<sup>4)</sup>や、ガラス面への水滴の接触角を考慮に入れた計算を実施した研究例<sup>5)</sup>がある。基礎モデル形状であるが、要素数は1,286,337であり、蒸発、凝縮の初期段階の晴れパターン形状の計算精度向上が図られてきた。

車両開発の構想段階でガラス面を均一かつ急速に晴らすためのデフロスタ最適設計のために、前述のCAE技術は既に活用されている。しかし、実用的な精度で作業工数を短縮するために、車室内モデル、メッシュ構成、計算手法に工夫を加え、従来手法からおおよそ半減を達成した<sup>6)</sup>と言う報告もある (Fig. 1)。

空調機器HVAC (Heating, Ventilating, and Air Conditioning) は、ダッシュボード内に設置され、常に小型・高性能化が要求される。基本機能として送風の温度制御、風量制御と吹き出し口切り替え制御を満足するために、ブロウ、ユニット本体に内蔵されるエバポレータ、ヒータコア、

\* (社)自動車技術会の了解を得て、自動車技術会誌 Vol. 62, No.5, p. 53「車室内環境に関するシミュレーション技術」より、一部加筆し、改題して転載

エアミックスドア、モードドア、及び空調ダクト、吹き出し口レジスタで構成されている。空調ダクト、レジスタは、室内各所に配置するため、圧力損失の低減が望まれているが、複雑な三次元形状であり、圧力損失の計算精度を確保したCFD 計算を行うため、解適合格子を使う工夫が設計プロセスで活用されている<sup>7)</sup>。

温度制御は基本的に冷風と暖風の混合割合の調節で行っており、温度混合現象の計算精度がキーポイントである。内部流れが複雑であり計算安定化のために、基本的な計算手法(式(1)～(4))は、移流項を一次風上差分、 $k-\varepsilon$ 乱流モデル、乱流プラントル数  $Pr_t 0.9$ 、また、ブロワファンはマルチフレーム、熱交換器モデルは通風抵抗をポラスメディア、熱量を等価伝熱係数を用いる場合が多いが、全体としてHVAC内の温度混合現象を十分に表現しているとは言い難い<sup>8)</sup>と報告もある。

気流温度の計算精度を格段に上げるために、乱流挙動に対して、応力方程式モデルやLES (Large Eddy

Simulation) を用いる方法や熱拡散については乱流プラントル数を補正する方法<sup>9)</sup>などが提案され、また熱交換器モデルは管内分配や冷媒過熱度も考慮する方法が提案<sup>10)</sup>され、計算手法の高度化が進められている (Fig. 2)。

$$\frac{\partial U_i}{\partial \tau} + U_j \frac{\partial U_i}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \nu \frac{\partial U_i}{\partial x_j} - \overline{u_i u_j} \right) \dots (1)$$

$$-\overline{u_i u_j} = \nu_t \left( \frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} \delta_{ij} k \dots (2)$$

$$\frac{\partial T}{\partial \tau} + U_j \frac{\partial T}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left( a \frac{\partial T}{\partial x_j} - \overline{u_j T} \right) \dots (3)$$

$$-\overline{u_j T} = a_t \frac{\partial T}{\partial x_j} \dots (4)$$

ここで、 $U_i$ : 流速、 $T$ : 温度、 $k$ : 乱流エネルギー  
 $\nu_t$ : 渦動粘性係数、 $a_t$ : 渦温度伝導率 ( $= \nu_t / Pr_t$ )

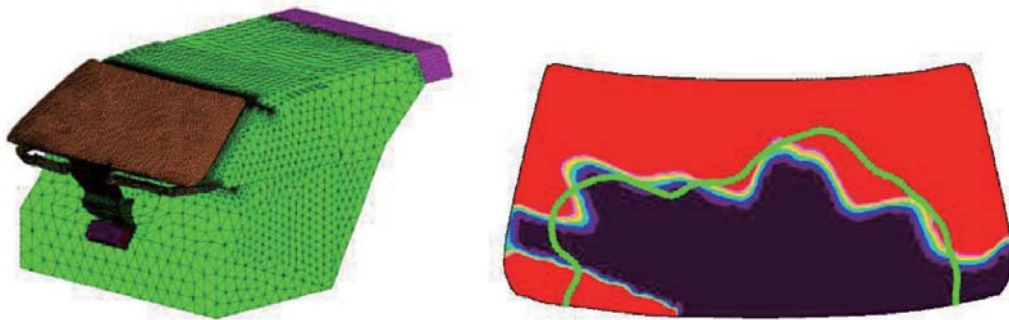


Fig. 1 Tetrahedral mesh and CAE result of defrosting pattern<sup>4)</sup>

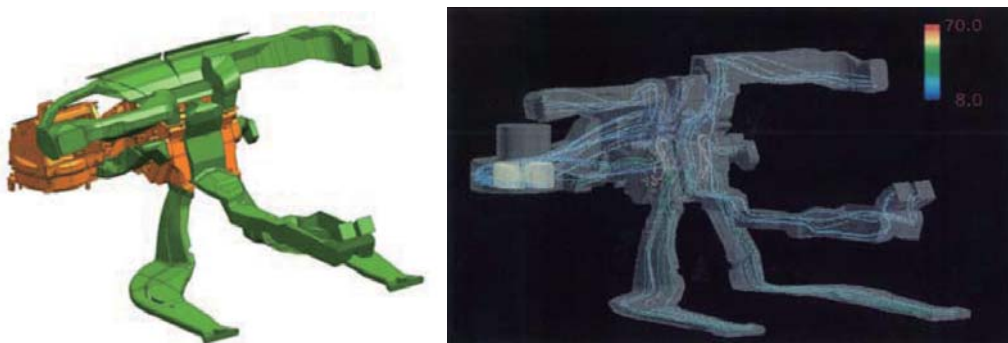


Fig. 2 Airflow simulation in HVAC (color scaling: temperature)<sup>9)</sup>

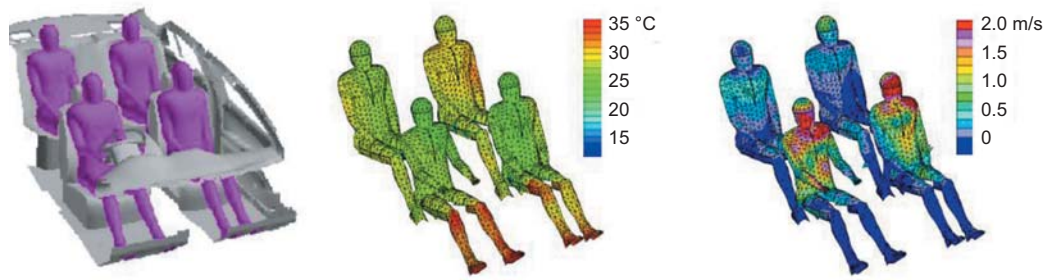


Fig. 3 Airflow distribution in cabin (left: CAE model, center: temperature, right: velocity)<sup>14)</sup>

## 2.2 車室内空調

室内全体を急速冷暖房する時代から、現在では、乗員の必要な部位にいかにか快適な温湿度環境を提供して温熱感を向上させるか、に空調技術が向かっている。これは、省エネルギーと快適性を高次元で両立させる方法である。そのためには、カーエアコンが如何に正確に狙った温湿度、気流分布を車室内に作り出せるかを予測できなければならない<sup>11)</sup>。

車室内形状を三次元 CAD (Computer Aided Design) データから、忠実に再現した計算モデルをさらに乗員モデルを組合わせて、テトラメッシュ (四面体格子) で、数 100 万要素に分割し、室内気流流れ及び、気流温度分布を CFD 計算し<sup>12)</sup>、さらに温度計算精度を向上させるため、乱流プラントル数  $Pr_t$  を従来の定数から  $y^+$  (壁からの距離) の関数とした研究例もあり<sup>13)</sup>、乗員への影響度を解析できる手法が確立されている。室内気流に合わせて、空気質特に花粉の流れと除去の挙動について、CFD 解析を用いた例もある。計算により、花粉除去効果の高い空調モードの設定を見出すなどの活用<sup>14)</sup>が進められている (Figs. 3 & 4)。

冷房立上り (クールダウン) 時の乗員周りの温度、風速分布を計算し、4 席乗員各々において、温度分布の違いと同様、風速分布の偏差が大きく、これが、4 席乗員各々の温熱感覚に差異を発生していると推測される<sup>15)</sup>との報告もある。このため、人体温熱学からのアプローチが必要である。

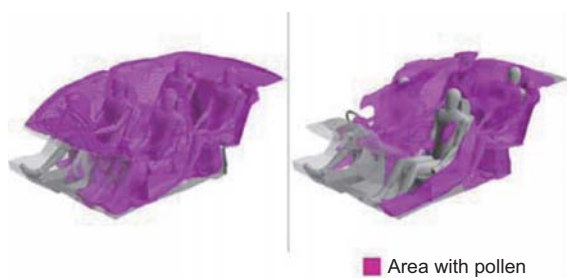


Fig. 4 Pollen distribution (left: Normal, right: De-pollen mode)<sup>14)</sup>

## 2.3 温熱的快適性

車室内快適性として、車室内空間の温熱環境が乗員の温熱的快適性に強く影響する。このため、従来、Gagge らが提唱した新標準有効温度 SET\* (Standard new Effective Temperature) を車室内環境評価指標として活用できないか検討されてきた。

片岡ら<sup>15)</sup>は、16 分割 2 層人体熱モデルを開発し、冷房立ち上がり時の皮膚温度変化を再現可能として、これにより計算される SET\* と 9 段階温冷感申告値の相関と推定方法を見出している。また、小森谷<sup>16)</sup>は、同様の人体熱モデルを車室内形状モデルに組合わせて、乗員周りの温度、風速分布の CFD 計算と人体熱モデル計算を連結した乗員皮膚温度から温冷感予測技術を確立している。さらに、これを利用して、運転者と乗客に左右独立空調制御を行うことで、共に快適性を向上させることを立証している。ほぼ同様な手法をベースとして、日射の影響<sup>17)</sup>、シートの影響<sup>18)</sup>について研究した例もある。

さらに、人体は、代謝、血流、発汗の各反応により、体温調節を行っており、この体温調節の負担が最小化できている状態が快適領域にあると考えられる。従って、より精度の高い乗員快適性予測をするためには、体温調節モデルが必要になる。

田辺<sup>19)</sup>が開発した温熱環境評価のための 65 分割体温調節モデルは、人体を 16 部位に分割し、さらに各部位を 4 層とする 64 分割 + 中央血液溜りの合計 65 ノードにより、環境 (日射、温度、湿度、気流) に合わせた体温調節、skin 層からの発熱、発汗、さらには呼吸熱損失の計算が可能となっている。この高精度な 65 分割体温調節モデルを市販 CFD ソフトに組み込み各企業で活用<sup>20)21)</sup>も始まっている (Figs. 5 & 6)。

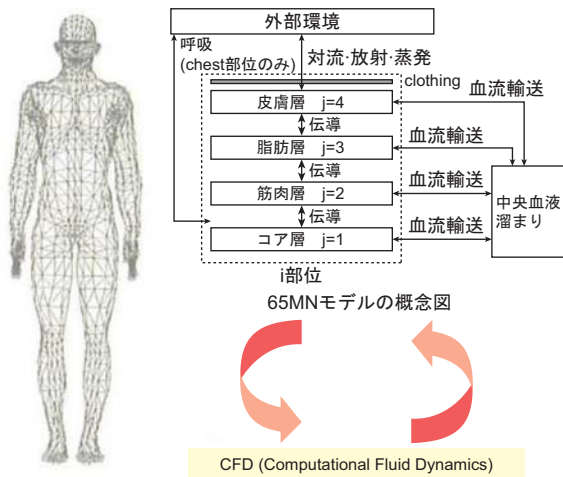


Fig. 5 Virtual thermal mannequin<sup>20)</sup>

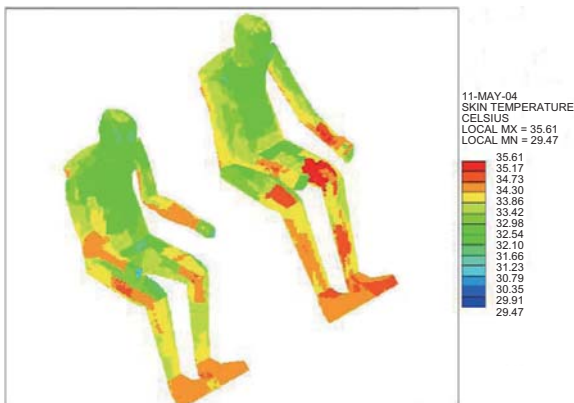


Fig. 6 Skin temperature of inclined insolation<sup>21)</sup>

### 3. 室内騒音の計算技術動向

流体騒音の数値解析が非常に困難な問題であると言われて久しい。その理由として三つある。①まず流体騒音解析は流れ解析と音響解析を同時に行う必要があるが、それぞれの対象領域は、流れ解析は最小渦スケールが1 mm程度、一方の音響解析では、数100 Hz～数kHzすなわち数m～数cmの波長のスケールである。すなわち基本的に極めて大規模な計算が避けられない。②次に騒音計の基準音圧相当の94 dB（聴感ではかなりの大音量）は圧力換算すると僅か1 Paである。すなわち騒音源を流れ解析から捕捉することが基本的に困難である。③さらに騒音挙動は非定常現象であり、非定常流れ解析を安定して解ける計算手法が未だ確立されていない。以上から、直接解法である圧縮性流体をLES, DNS (Direct Numerical Simulation) で解ききる技術の実現は遠いため、間接解法として、流れ解析で物体表面の圧力変動を音源として、その先を境界要素法BEM (Boundary Element Method)

による音響伝播解析で音場を解く方法が主流になりつつある<sup>22)</sup>。

さらに各種市販CFDソフトにおいても気流騒音を計算可能に標準機能化されるものも多くなり、企業ニーズの反映と思われる<sup>23)</sup>。

### 3.1 空調騒音

車室内で発生する空調送風騒音は、送風機騒音（モーター機械音とファン騒音）とHVACユニット及びダクト内での気流乱れから発生する気流騒音である。本稿では、後者に着目する。

A. Ayarら<sup>24)</sup>は、空調ダクトからの放射音、HVACユニットからの放射音、吹き出し口からの放射音について、細密格子で構成し、LESとBEMにより周波数特性を計算し、実験特性と比較し、良い一致を得ている。また、O. M. Mohamed<sup>25)</sup>らは、吹き出し口付きの空調ダクト（分岐あり）について、BNS (Broadband Noise Source) 法、すなわちNS (Navier-Stokes) 方程式をベースとしたLighthill理論（式(5)）からダクト内の騒音発生部位を特定する設計手法を確立している。

$$\frac{\partial^2 p}{\partial \tau^2} - a_0^2 \nabla^2 p = \frac{\partial^2}{\partial x_i \partial x_j} (\rho u_i u_j + p_{ij} - a_0^2 \rho \delta_{ij}) \dots (5)$$

ここで、 $a_0$  は媒質の音速、 $p_{ij}$  は応力テンソル

さらに、空調ユニット開発の最終段階で現れる問題の一つである異音（狭帯域騒音）に対しても同様な手法で周波数特性を推定する技術<sup>26)</sup>も研究されている。

これらは非定常計算であり、膨大な計算時間を要するため、実用性を考慮して線形k-ε乱流モデルのエネルギー散逸量の変化に着目した研究例<sup>27)</sup>もある。

### 3.2 振動騒音

自動車は100 kg軽量化すると燃費が約2-3%程度改善する。このため、より軽量化を可能とする構造部材の開発と車両搭載が進展している。カーエアコンシステムにおいても、製品重量を低減するため、熱交換器の薄型化、HVACユニットの軽量化が進められている。しかし軽量化と振動は相反する課題である。軽量化により振動特性が悪化し、乗員の不快感が増す懸念がある。これを回避するためには、解析手順として、どこからの振動がどのように室内に伝播するのか、起振源解析、振動伝播寄与度解析、及び振動特性解析が解析技術として必要になる。

外崎<sup>28)</sup>はエンジン騒音を、エンジン振動が車内に伝達して発生する振動騒音として精度良く再現するために、振

動伝達経路解析 TPA (Transfer Path Analysis) から伝達に支配的な部位を特定し、続いて詳細 FEM (Finite Element Method) モデルを含む車体全体 FEM モデルにて加速度を予測し、実測した車体音響伝達関数との乗算にて車内振動騒音を推定する手法を開発した。

200 Hz 以下の固体伝播音解析は FEM で、500 Hz 以上の空気伝播音解析は SEA (Statistical Energy Analysis) が一般的に使用されるが、井出ら<sup>29)</sup>はロードノイズについて、中周波数域での固体伝播音による車室内騒音を低減するために、シミュレーション技術単独で解析することは困難であるため、実験解析として、伝達経路解析手法<sup>30)</sup>により、寄与の高いパネル放射音源を同定できるようになった (Fig. 7)。

さらに、車室内という閉空間において、運転者の耳に達する音響特性を予測し、ダッシュボード部への吸音材の配置の工夫により、音響特性をよりフラットな周波数特性に改善する手法が開発されている<sup>31)</sup>。

#### 4. 過渡特性の計算技術動向

車室内快適性の向上は、燃費向上と背反する場合がある。今や個別システムの省動力化だけでなく、システム全体として、どのような制御により、総合的に燃費悪化率を最小化できるのか、様々な過渡運転状態での予測と改善が必要となる。

この場合過渡状態での複数のエネルギー諸量(熱, 電気, 動力, 振動, 音,)の流れをシステム全体をサイクル的に解く方法として、常微分方程式をベースとした集中定数系モデルを GUI (Graphical User Interface) で連結して演算できる市販システムシミュレータの活用が盛んになってきた<sup>32)</sup>。

市販シミュレータの開発、展開は、A. Berry ら<sup>33)</sup>や、C.

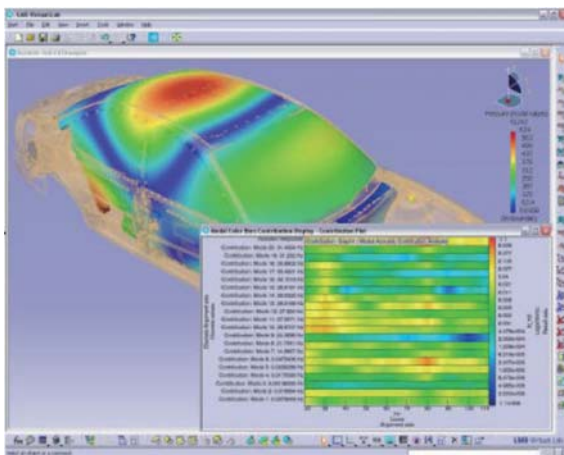


Fig. 7 TPA result<sup>30)</sup>

Stroh ら<sup>34)</sup>が自動車の熱管理システムモデルとして紹介するように、エンジン冷却、冷凍サイクル、車両熱負荷、のバランスを一体化して過渡条件での解析を可能とする技術は既に確立している。H. Petutschnig ら<sup>35)</sup>は同様なモデルにて NEDC (New European Driving Cycle) 条件で実験比較により、計算精度を検証した。

前章までの各技術は特定領域最適シミュレーションであり、その結果は必ずしも全体最適を達成するとは限らない。そこで複数分野の複数エネルギー量の流れを同時並行で解析するマルチドメインシステムシミュレーションの実用化研究が各社で始まっている<sup>36)</sup>。

市販シミュレータはコマンド入力ほとんどないため、個々のプログラムミスを低減でき、また、システム全体フローを可視化できる利点を持つため、システムレベルでのロジックミスを未然防止できる。しかし構成部品であるコンポーネントモデルの精度に全体システム精度が依存するため、開発者のモデリング技術力に大きく左右される (Fig. 8)。

#### 5. 計算技術の活用動向

前章までの計算技術は全て車両開発の中で活用されることを目的として開発されてきた計算技術である。本章では、その活用動向そのものについて紹介する。なお、製造業現場へのアンケート分析では 81.9% が活用増加を予測し、活用を望む声は 68.7%、活用の第一目的は実験工数の削減 66.0% である<sup>37)</sup>。

##### 5.1 短期開発プロセス

自動車の短期開発が主題となり始めた 1990 年代初頭、各社で BPR (Business Process Re-engineering) が盛んに検討された。その多くが、従来のシーケンシャル型開発

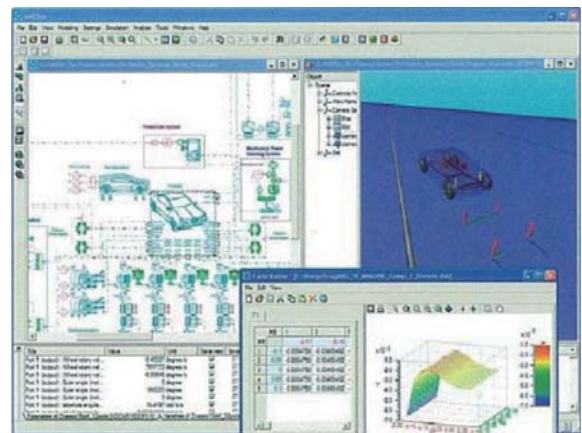


Fig. 8 System simulator example<sup>32)</sup>

プロセスからコンカレント型開発プロセスへの変革であり、大型計算機による三次元ソリッドCAD/CAM (Computer Aided Manufacturing) /CAE/PDM (Product Data Management) の統合システムを中核とし、組織の壁を取り払う仮想大部屋体制を再構築すると言うプロジェクト構想が多かった<sup>38)</sup>。

しかし細分化された縦割り組織の中では、部門を跨ぐ Collaboration は言う端から Collapsation に変わった<sup>39)</sup>。それは内部強化のためのプロセスマネジメントが置き去りにされ、外面的なデジタルエンジニアリングの導入が優先されたためとの指摘も多い<sup>40)41)</sup>。

自動車は擦り合わせ (Integral) 型アーキテクチャ (設計思想) に適した製品であるとされ<sup>42)</sup>、そのため開発プロセスの方式として、シーケンシャル型やコンカレント型よりもオーバーラップ型が有効だとして多くの企業はオーバーラップ型開発プロセスとして、ラップ部分の前後工程の連携強化を推進している。(Table 1)。

製品アーキテクチャ毎に、より適切な開発プロセスを構築することは、時流が大変速くなっている現代において、企業自身が取り組むべき重要課題の一つと言っても過言ではない。

5.2 フロントローディング

オーバーラップ型開発プロセスにおいて、短期開発のための Fig. 9 左のような、フロントローディング構想がよく示される。従来プロセス (赤) とは、設計試作実験の繰り返して作りこみを実施する方法であり、一方の新プロセス (青) は、前半に試作せずに積極的に CAE を活用することでトータルとして開発期間を短縮させようとする手法である。(なお、Fig. 9, Table 2 の数値は自動車部品開発の一般的な数値と

Table 1 Design process flow

シーケンシャル方式	オーバーラップ方式	コンカレント方式

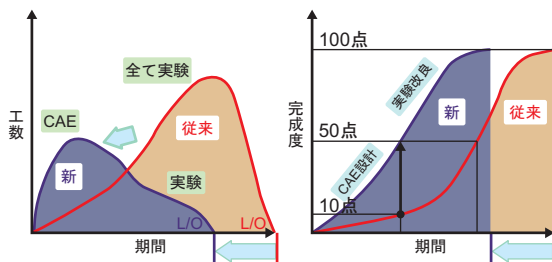


Fig. 9 Front loading concept

して見立てた概念的なもの)

従来プロセスは試作品完成後の実験評価から性能品質作りこみ開始と共に、改良設計変更のため後半から工数が急増し、さらに 3/4 でピークとなる。一方、新プロセスは始まりから相当に工数を掛け、全期間の 1/4 ~ 1/3 あたりがピークになる。しかし、このピーク値は従来プロセスのピーク値より低い。これらを各プロセスの総工数を完成度 100 点と見なして、各月の累積工数を各月完成度とすれば、両プロセスが必要とする完成度曲線 (Fig. 9 右) が得られる。

横軸時間  $T$ 、縦軸工数  $P$  とすると、トータル開発工数は Fig. 9 の山の面積、すなわち、 $\sum (T_i \times P_i)$  となるため、 $k$  番目の工程完了時点の完成度  $f_k$  (点) は、式 (6) となる。

$$f_k = 100 * \frac{\sum_{i=1}^k (T_i \times P_i)}{\sum_{i=1}^n (T_i \times P_i)} \dots\dots\dots (6)$$

ここで、 $P_i$ :  $i$  番目の工程に要する工数  
 $T_i$ :  $i$  番目の工程に要する時間

なお、前後工程のオーバーラップ度が製品開発リードタイムに影響を及ぼすとの研究<sup>43)</sup>もある。それによると、Fig. 10 右のように前工程の情報進化  $e$  が後工程の情報感度  $S$  に影響を与え、結果としてリードタイムが決定する。従って製品開発リードタイム  $\lambda$  は式 (7) となる。

$$\lambda = \sum_{i=1}^n [T_i + S_i(e_i)] \dots\dots\dots (7)$$

ここで、 $S_i$ :  $i$  番目の工程の情報感度  
 $e_i$ :  $i$  番目の工程の情報進化

$\lambda$  を最小化するために、非線形計画法を実行して影響因子  $P_i, T_i, S_i, e_i$  の最適化解を求める。

Fig. 9 右にて注目すべきことは、新プロセスは、全期間の半分の時期に既に 50 点の完成度に到達していることである。一方の従来プロセスは、同じ時期ではまだ完成度は

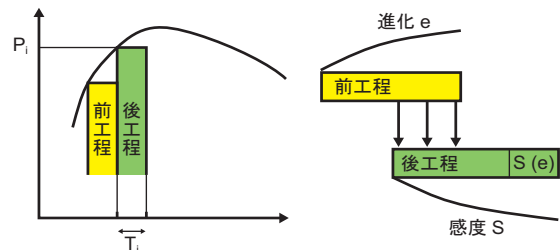


Fig. 10 Process cooperation

10点であり、全期間の2/3が終わった時期によく50点に達していることになる。

### 5.3 新プロセス専用 CAE

新プロセスが従来プロセスと比較して、新プロセス全期間の半分の同じ期間で完成度が40点リードできるようなCAE活用を目指さなければならない。しかしCAEが実験から置き換えかつ50点を出すためには、CAE特有のモデル化・精度・ロバスト最適化など内在する問題<sup>44)</sup>を解決する必要がある。

実は、3章までのCAE解析は、新プロセスの前半で使えるものではない。例外はあるものの、製品形状がほぼ確定した最終段階で熟練したCAE専任者が更なる性能向上、最適化を狙うために使う技術である。

特別のCAE専門知識を持たない設計者が新プロセスの前半で50点を得られるCAEツールはTable 2を満足するようなものであり、従って各社がそれぞれ独自の様々な工夫を実施している。

この分野の特徴的な活動を以下紹介する。中村ら<sup>45)</sup>が三次元ソリッドデータの特質からCAD/CAEを連携した設計者向け強度解析システムを開発し、種田ら<sup>46)</sup>はメッシュ自動化機能を組み込んだ設計支援システムを開発し、飯田ら<sup>47)</sup>はDMU (Digital Mock-Up) をどこでも誰でも簡単に使える環境づくりを推進し、倉田<sup>48)</sup>は評価部門と設計部門がDMDR (Digital Mock-Up Design Review) を実施する、と言うデジタルエンジニアリングによる開発基盤を構築した。

標準設計業務の範囲で簡易入力、高精度、高速計算を全て満たす万能なCAEツールは存在しない。目的に応じて力点をどこに置くかについて設計部門との適切な協議、合意の下で、各企業内固有の設計方針に立脚したCAEツールを開発しなければならない。これはもう一つの擦り合わせ技術と言える。

### 5.4 CAE 活用の光と影

以前は、プレゼンテーションや参考資料にしか使われなかったCAEが、近年、新製品開発研究や短期開発ツールとして盛んに活用され貢献するようになった。高度なCAE

技術と設計者が活用できる簡便なCAEツールは益々多種多様に開発され、製品開発への貢献度も今後さらに上がるものと期待されている。

しかし、CAEが設計者に身近になるほど、逆に不適切な取り扱いや間違った認識により、一般論として以下三つの問題が指摘されるようになった。

第一に、設計者向けCAEツールの自動化が設計力を減退させると言うCAE悪者説<sup>49)</sup>である。早くから警鐘が鳴らされているが、妙案がないまま各社自動化を加速している。しかし設計者の領域であり醍醐味であるはずの基本設計の仮説検証までCAEに依存するのでは設計の本質が問われているのもまた現実である。

第二に、CAEはものづくりではなく、単なる道具であると言うCAE道具論<sup>50)</sup>である。だから道具にしては精度が悪い、時間が掛かるとの悪評が立ち易い。一方の製品内ソフトウェア開発が、ものづくりの領域だ<sup>51)</sup>との指摘は論を待たないが、複雑な物理現象を読み解き、数式モデル化してプログラミングし計算可能にする、さらに計算インフラを構築して開発設計部門が活用できる道具にする道程はそれはそれで大変なのであるが一般的なものづくりの世界と異質に見えるため、技術部門と認知され難いのではないか。そこに存在意義と自己矛盾、自己実現の間で葛藤が発生する。

第三に、設計者に負荷が集中しすぎるとのフロントローディング懐疑論である。豊富な経験を持つ設計者であるからこそ自動化CAEツールを使い効率的な設計改良をオンタイムで回せる<sup>52)</sup>と昔から言われている。本格的に使える環境が整ってきた現在、5.1、5.2節で述べたように設計の後工程がフロントシフトすることで初めてフロントローディングが成立すると考えるべきであろう。なおCAEは離散化計算である以上、実験と同一にはならない。そのギャップを埋めることができるのは現象を正しく理解できる設計者だけである、一層設計者への期待は高まる。

以上のように、CAEを取り巻く環境は難しい問題を抱えたまま、現在もad hocな対応で抜本的な解決を先送りしている。

## 6. おわりに

以上、車室内環境に関わる幾つかの項目について、最近の大型計算機を用いた数値シミュレーションの状況を概説した。いずれも、現実の実機・実車・空間・乗員の細部に一層近づいた精密な形状モデルと現象をより緻密に捉えた大規模数理モデルの構築が進められ、現実の挙動に対する予測精度の向上が図られている。しかし、それに比例する計算時間の増大はCAE技術を設計プロセスの中で活

Table 2 CAE for front loading

機能	仕様計算	簡易形状計算	高精度解析
適用	開発初期	開発前半	開発後半
目的	設計仕様決定	改良方針決定	改良・最適化
精度	—	±10～20%	±3～5%
時間	1～5分	0.5～1時間	2～10時間
対象	一般設計者	特定設計者	CAE専任者
完成度	目標10点	目標30点	目標50点

用するには大きな障害となる。このため多並列計算機能が不可欠となる<sup>53)</sup>。

CAE 技術は、CFD 分野に限ってみても、単相流の層流、乱流、自由表面流れ、蒸発を伴う2相流、噴霧流、流体騒音、など多岐に渡り、さらに実際の解析対象に対する適用方法を峻別する必要がある、また事象が非常に複雑化して構造解析との連成など、マルチフィジックス CAE 技術の開発が急務である<sup>54)</sup>。以上の技術が益々快適利便な世界を広げていくと思われる。

20 年以上に渡る企業内コンピュータ解析の世界を概観すると、ソフト/ハード技術の驚異的な進歩は賞賛に値する。これは CAE 開発に関わる全ての人々の絶え間ない努力の賜物である。

### ＜参考文献＞

- 1) カーエアコン研究会：カーエアコン，山海堂，p.v，(2003)。
- 2) 池田雄策：自技会学会講演会前刷集 924，924076，(1992)。
- 3) 佐藤裕路，他：自技会学会講演会前刷集，No.956，p. 125，(1995)。
- 4) Kitada M, et al: SAE paper 2002-01-0223，(2003)。
- 5) Waku T, et al: SAE paper 2004-01-1504，(2005)。
- 6) 小暮正幸，他：CALSONIC KANSEI TECHNICAL REVIEW vol. 4，(2007)。
- 7) 本藤博，他：自動車技術会論文集，Vol. 33，No.2，(2002)。
- 8) 高野祐二，他，CALSONIC WORLD vol. 5，(1998)。
- 9) H. Asano, et al: SAE paper, 2001-01-0033，(2001)。
- 10) M. Loehle: VDI BERICHTE NR. 1411, p. 931, (1998)。
- 11) 小林敏雄 編，“数値流体力学ハンドブック”，丸善，p. 646，(2003)。
- 12) Z. Chroné'er: SAE paper 1999-01-1201，(1999)
- 13) 岡田義浩，他：自動車技術会論文集，Vol. 31，No.2，(2000)。
- 14) 片岡拓也，他：デンソーテクニカルレビュー，Vol. 10，No.1，(2005)。
- 15) 片岡拓也，他：械論 (B 編)，Vol. 64，No.628，(1998)。
- 16) 小森谷徹：自動車技術会論文集，Vol. 27，No.2，(1996)。
- 17) 尾関義一，他：自技会学会講演会前刷集 No.33，p. 13，(1999)。
- 18) 江崎秀範，他：自技会論文集 Vol. 37，No.4，p. 187，(2006)。
- 19) 田辺新一：日本建築学会計画系論文集 No.541，p. 9，(2001)。
- 20) 白石靖幸：ソフトウェアクレイドルユーザーカンファレンス 2006，(2006)。
- 21) CDAJ ユーザーズミーティング 2004，“STAR-CD+人体モデル Ver1.5 紹介”，(2004)。
- 22) 飯田明由，他：騒音制御 Vol. 31，No.4，pp. 305-309，(2007)。
- 23) CFD 技術部門委員会：“ここまでできる空力騒音解析”，自動車技術会 2010 年春季大会フォーラム，p. 11，(2010)。
- 24) A. Ayar, et al: SAE paper 2005-01-0509，(2005)。
- 25) O. M. Mohamud, et al: SAE paper 2006-01-1192，(2006)。
- 26) 小野寺淳，他：自技会学会講演会前刷集 No.64，p. 1，(2010)。
- 27) 甲村圭司，他：自技会学会講演会前刷集 No.44，p. 15，(2007)。
- 28) 外崎学：SUBARU Technical Review, No.33, p. 100, (2006)。
- 29) 井出史彦，他：Honda R&D Technical Review, Vol. 19, No.2, (2007)。
- 30) LMS International, LMS International, Application Notes (1995)。
- 31) 戸井武司：自動車技術会 Vol. 57, No.7, pp. 104-108, (2003)。
- 32) LMS International: LMS International, Application Notes, (2007)。
- 33) Alan Berry et al: SAE paper 2002-01-1208，(2002)。
- 34) Christoph Stroh et al: SAE paper 2002-01-1026，(2002)。
- 35) Heinz Petutschnig: 自技会論文集，Vol. 38，No.2，p. 43，(2007)。
- 36) 播磨謙司，他：自技会 2010 年春季大会前刷集 20105133。
- 37) 日経ものづくり 2009.12，日経 BP，p. 68，(2009)。
- 38) Howard Crabb: 日経 BP，p. 153，(1998)。
- 39) 米倉誠一郎：ネオ IT 革命，講談社，p. 337，(2000)。
- 40) 藤本隆宏：ものづくり経営学，光文社新書，p. 423，(2008)。
- 41) 長江雅史：設計工学，Vol. 43，No.4，p. 9，(2008)。
- 42) 藤本隆宏：能力構築競争，中公新書，p. 337，(2003)。
- 43) 糸久正人：赤門マネジメント・レビュー，Vol. 8，No.6，p. 337，(2009)。
- 44) 吉野睦，他：シミュレーションと SQC，日本規格協会，p. 38，(2009)。



- 45) 中村薫, 他: AISIN TECHNICAL REVIEW, Vol. 4, No.1, p. 5, (2000).
- 46) 種田 渉, 他: SUBARU Technical Review, No.29, (2002).
- 47) 飯田健次, 他: マツダ技報, No.25, (2007).
- 48) 倉田効市朗: SUZUKI TECHNICAL REVIEW, Vol. 34, (2008).
- 49) 日経ものづくり 2008.8, 日経 BP, p. 59, (2008).
- 50) 日経ものづくり 2007.7, 日経 BP, p. 218, (2007).
- 51) 本位田真一: 東芝レビュー, Vol. 64, No.4, p. 31, (2009).
- 52) 栗山利彦: 自動車技術会誌, Vol. 47, No.4, p. 35, (1993).
- 53) 岡森克高, 他: テスティングツール最前線, 自動車技術会, p. 54, (2007).
- 54) 大島伸行: 機論 (B 編), Vol. 76, No.765, p. 729, (2010).



< 著 者 >



浅野 秀夫  
(あさの ひでお)  
冷暖房実験部 工学博士  
カーエアコン開発設計の  
CAE 適用研究に従事