

## 直交格子を用いたエンジン筒内流動解析の精度検証 Verification of in-cylinder engine flow analysis using Cartesian grid

- 福地 健, 株式会社ヴァイナス, 東京都品川区東五反田 1-10-7, fukuchi@vinas.com  
 村田 宗一, 株式会社ヴァイナス, 東京都品川区東五反田 1-10-7, murata@vinas.com  
 Takeru FUKUCHI, VINAS Co.,Ltd,1-10-7 Higashi-Gotanda, Shinagawa-ku,Tokyo,141-0022,Japan  
 Souichi MURATA, VINAS Co.,Ltd,1-10-7 Higashi-Gotanda, Shinagawa-ku,Tokyo,141-0022,Japan

In conventional method for In-cylinder analysis, grid generation and moving wall control have been the bottleneck on the workflow in the analysis. CONVERGE is a new CFD code for In-cylinder analysis to overcome the bottlenecks. CONVERGE generates mesh in runtime by using the modified Cut-cell Cartesian method. Also, adaptive mesh refinement (AMR) is implemented. This paper presents the illustration of new techniques in CONVERGE and validations. The validations include cold-flow analysis, spray analysis and Diesel engine analysis including spray and combustion. These validations show good agreement with the results of experiments.

### 1. はじめに

従来の CFD ソルバによるエンジン筒内解析では、解析精度と作業効率の両面で問題が残されている。

解析精度に関しては、エンジン筒内の形状は複雑であり、しかも壁面の移動を伴うため、メッシュ作成には独特のスキルと経験を要する。さらに、解析結果はメッシュ品質、すなわちメッシュ生成担当者のスキルや経験に依存するとの問題がある。

また、解析精度向上のためにメッシュ品質の向上を図ると、メッシュ生成の作業時間が増大する。すなわち、解析精度と作業効率はトレードオフの関係にある。

エンジン燃焼解析専用ソルバ CONVERGE は、解析精度と作業効率を同時に向上させることを目的に開発された。従来法のボトルネックを解消するメッシング技術を搭載し、物理モデルの改善を行った。数値解のメッシュ依存性低減と物理モデル改善の相乗効果により、筒内解析の実用価値を高めた。

本報では、CONVERGE での計算原理と検証事例を紹介する<sup>(1)</sup>。

### 2. CONVERGE の開発コンセプトと機能概要

CONVERGE の開発元は Convergent Science 社 (以下、CSI) である。開発コンセプトは、作業効率と解析精度を同時に向上させることである。CONVERGE では従来法のボトルネックを解消するメッシング技術を搭載し、合わせて物理モデルの改善を図った。

従来法の主流である非構造格子によるメッシュと CONVERGE のメッシュを比較して示す (Fig.1, 2)。CONVERGE では直交メッシュを採用し、境界では改良したカットセル法を用いた。

体積メッシュは非定常あるいは定常計算中に、境界形状を参照してソルバ内で自動生成され、手作業による前処理としての体積メッシュ作成作業を省いた (Fig.3)。解適合格子 (以下、AMR) によりメッシュ解像度を自動調整する (Fig.2)。

気相化学反応計算のために、詳細素反応モデル (SAGE) の機能を有する。詳細素反応モデルにより、ノッキングを含む燃焼現象や有害生成物の予測精度の向上を図った。AMR による乱流反応帯の解像とあわせ、物理モデルの定数チューニングを排除した気相反応計算の予測を可能とした。

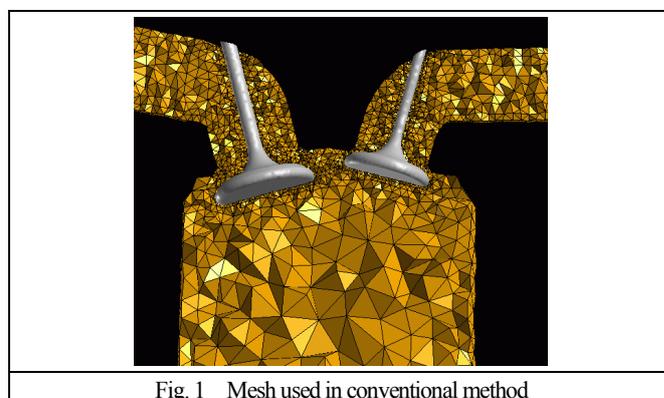


Fig. 1 Mesh used in conventional method

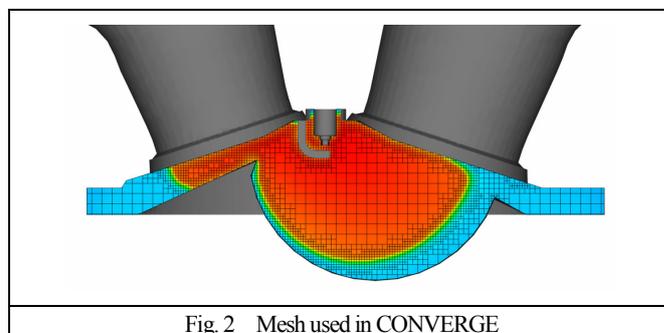


Fig. 2 Mesh used in CONVERGE

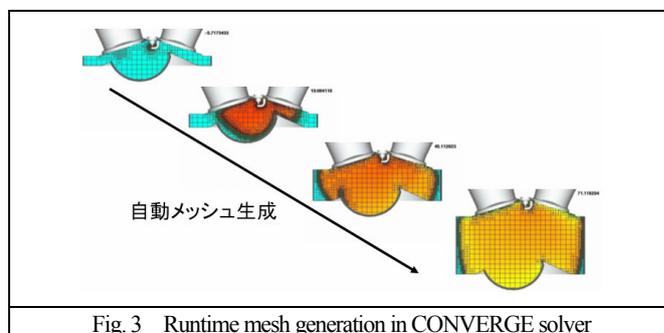


Fig. 3 Runtime mesh generation in CONVERGE solver

### 3. エンジン筒内流動の特徴と CFD ツールへの要求

解析手法や事例紹介に先立ち、エンジン筒内流動現象の特徴を示す (Fig.4)。吸気管での空気や混合気の流動(a)、バルブ隙間流

れ(b)と噴流(c)、筒内全域での平均流の方向が非一様な複雑乱流(d)、排気管からの流出である。吸気管の平滑曲面凸部(a)は、剥離や二次流れを伴い、流れの数値予測には注意を要する。バルブ隙間流れ(b)は圧損が大きくガス流量を支配し、筒内流れの基点となるので重要である。また、筒内流れとしては最も境界層が薄くなる。引き続き噴流(c)は、ピストン移動と合わせ、筒内流れを支配する。その結果、筒内流れ(d)が形成される。特に、筒内全域での旋回流れはスワールやタンブルと呼ばれる。

従来法でのエンジン筒内解析の一般的な状況を示す。

エンジン筒内は境界形状が複雑であり、しかもピストンやバルブの壁面移動を伴うため、メッシュ作成と移動壁面の設定は煩雑で大工数の作業となる。しかも、メッシュ生成担当者が変わると数値解が異なること、壁移動に伴うメッシュ歪み増大と数値解の品質低下や発散、メッシュ破綻による計算自体の停止といった問題がある。また、AMR の適用が難しく数値解の格子依存性排除が極めて困難である。

これらの従来法での欠点、すなわち、大きな作業工数、数値解の作業担当者への依存性、壁移動によるメッシュと数値解の品質低下や計算の破綻を排除した CFD ツールが強く求められる。

CONVERGE の開発にあたっては、これらの要求を勘案した。

た。このことより、セルペクレ数を参照する通常の手法の結果は一次風上差分を用いた結果と同じであり、両者共に CONVERGE に比べ旋回が減衰した結果となっている。

#### 5. 流体内部でのメッシュ配置

流体内部はすべて直交メッシュである。メッシュの大きさは数段階に制御される。まず、Base Grid と呼ばれる様な直交メッシュを配置する。 $\Delta x$ 、 $\Delta y$ 、 $\Delta z$  を個別に入力するが、通常は同じ値を指定する。次に、Scaling と呼ばれる操作で、非定常計算の指定時刻で一樣にメッシュを粗大化(寸法で2倍、隣接8個のセルを合体)あるいは精細化(寸法で1/2、「田」の字型に8個に分割)する。Scaling は、プラグでの点火や燃料噴霧、バルブの開閉などのイベント時に行う場合が多い。次に、ユーザー指定の時刻(クランク角)と領域で、Embedding と呼ばれる精細化を行う。Embedding の対象領域は、単純形状の立体内部、特定壁面や噴霧器の近傍として指定する。最後に AMR の機能により、速度や温度の勾配を検出して、勾配の大きな箇所メッシュを精細化する。速度勾配の解像は、二次中心差分の適用と合わせて、自由噴流 (Fig4(c)) の模擬のために重要である。勾配が小さくなった時点で、メッシュ大きさを元に戻すことも可能である。

#### 6. 壁面近傍でのメッシュ配置

一般に元データの境界形状は3次曲面を近似する細かな三角形の集合で表現される。通常のカットセル法では、境界フェイスはセルの大きさに応じた平面となる。すなわち、境界隣接セルの大きさに応じて元データの複雑形状が単純な平面で近似されるので、大きなセルを用いた場合は境界形状近似の悪影響が大きい。CONVERGE のカットセル法では、境界隣接セルの大きさによらず、境界形状は元データと同じであり、形状の近似をしない。すなわち、境界セル形状は多面体となる (Fig5)。カット後にセル体積が30%以下になった場合、隣接セルと合体させる。

従来法の高レイノルズ数では、壁面に沿って境界層メッシュを配置することが出来る。壁面近傍の流れ構造は、壁に沿った流動流束と壁に垂直方向の拡散流束が直交する、境界層近似が成立する場合が多い。このため、境界層メッシュの配置は合理的である。特に、航空機などのような高レイノルズ数の外部流れでは境界層が薄いので極めて重要である。

しかしながら、筒内では平均流の方向が非一様な複雑乱流となっており、境界層近似が成立する領域は限られている (Fig4)。このため CONVERGE では、境界層メッシュではなくカットセルを用いて、必要な箇所での精細化に対応する。具体的には、平滑な凸壁面 (Fig4(a)) やバルブ隙間部 (Fig4(b)) で、幅 0.5mm 程度に精細化する。流動流束と拡散流束を解像することが重要であり、筒内ではレイノルズ数が極端に大きくはないので、アスペクト比の大きな薄いメッシュの必要が小さい。

精度の議論とは別に、筒内形状で境界層メッシュを配置する作業は困難で高い熟練を要する。少数のパラメータ入力で自動処理可能な CONVERGE のアプローチは作業効率の面で有益である。なお、外部流れへの対応を意図して、境界層メッシュの機能も開発中である。

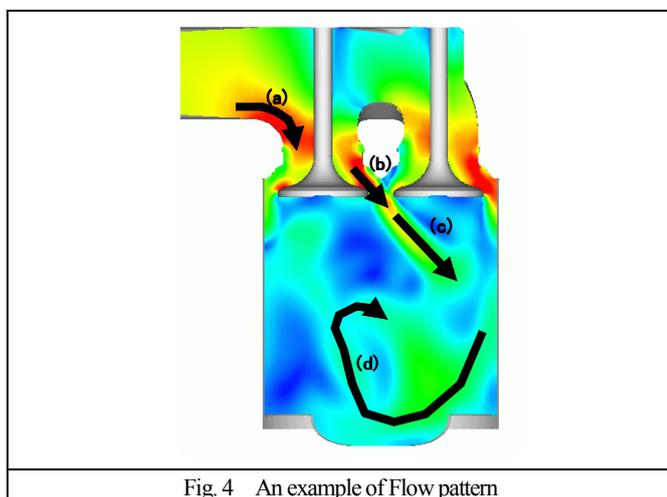


Fig. 4 An example of Flow pattern

#### 4. CONVERGE の数値解法の概要

有限体積法を用い、全ての変数はセル中心で定義される。メッシュ配置は直交メッシュとカットセルに基づき、詳細は後述する。

ソルバは、圧力ベースと密度ベースの両ソルバが使用可能である。圧力ベースソルバでの圧力・速度連成は PISO 法を用い、定常と非定常に対応する。筒内は低マッハ数なので、筒内解析には圧力ベースソルバが適する。密度ベースソルバは現状では定常解析のみ可能であり、高マッハ数の外部流れ解析を意図している。

行列解法は SOR 法であり、圧力ポアソン式にはマルチグリッドを適用する。

流動項の差分スキームに特徴がある。二次中心差分と一次風上差分を併用する。二次中心と一次風上を併用する場合、通常はセルペクレ数=2を切り替えの判断基準とするが、筒内解析の条件下では主に一次風上が使われることになる。CONVERGE では、基本的に二次中心を用い、速度や密度の空間的な振動を検出した箇所でのみ一次風上を用いる。

メッシュや境界条件等を固定して、流動項の差分スキームの影響を、筒内定常流れの旋回運動量を無次元化したスワール比から調べた。CONVERGE の手法ではスワール比 1.6、セルペクレ数で切り替える手法では 1.0、一次風上差分を用いた場合で 1.0 であつ

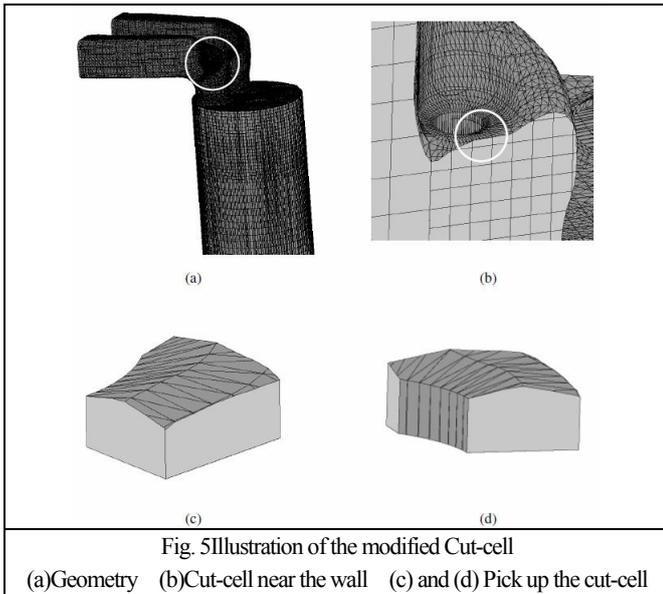


Fig. 5 Illustration of the modified Cut-cell

(a)Geometry (b)Cut-cell near the wall (c) and (d) Pick up the cut-cell

## 7. 移動壁面の模擬

筒内解析では、バルブやピストン移動の模擬も重要課題である。

従来法の非構造格子では、壁面移動に追従して内部のメッシュを変形させる。変形量大きい場合、メッシュの追加・削除も併用する。これらの設定は煩雑で工数を要すること、メッシュ変形による幾何的なメッシュ破綻や、メッシュ歪み増大による数値解の品質低下や計算の停止（発散）などの問題があった。

CONVERGE では、初期に設定した境界形状を参照して、瞬時の壁面位置とメッシュ制御用の指定に応じて、各タイムステップ毎にソルバ内でメッシュが自動生成される (Fig.3)。内部メッシュは壁面移動により変形しない。セル形状が単純なため、メッシュの品質低下やクラッシュが起こり得ない。また、移動壁の変位指定は、内部メッシュと無関係に行えるので、極めて単純である。

なお壁面移動のタイムステップは、壁面隣接セルの寸法と壁移動速度で定義されるクーラン数が 0.3 以下となることが推奨される。壁面隣接セルの体積変化を考慮して変数の保存則を満足させる。特に、移動壁から受ける運動量も考慮している。

バルブ全閉時の固体接触であるが、現状はメッシュとしては模擬できない。0.2mm 程度の隙間を残し、イベント機能で流量をゼロにする。固体接触機能は開発中である。

## 8. メッシュ配置の特徴

従来の非構造格子では、一般にメッシュの歪みを伴う。また、境界壁移動に追従するメッシュの配置自体が困難であり、AMR 等の非定常なメッシュ制御はさらにメッシュの再配置を伴うため、実用上ほとんど不可能である。壁移動に伴うメッシュ歪み増大と数値解の品質低下は、空間的な議論である。さらに、壁移動に伴い内部メッシュが変形を受ける。すなわち、流束を評価するセル界面が非定常に移動するが、これに起因して数値拡散が発生する。

CONVERGE では、歪みが無く最高品質の直交メッシュである。メッシュの粗大化と精細化の幾何操作が単純であり、AMR 等の非定常なメッシュ制御も容易である。メッシュの粗大化と精細化では、セルの合体・分割により分解能は変化するが、セル界面は移動しないので、これによる数値拡散は発生しない。AMR 等による分解能制御は、流れの速度勾配や境界層、噴霧液滴存在領域、燃焼の温度・濃度勾配などの解像に重要である。

従来法の一つに、非構造格子ではなく、直交メッシュとカット

セルを併用するものがある。この意味では CONVERGE と類似である。相違点は、壁移動に応じた多数のメッシュを準備して、時系列的に使い分けることである。この手法では、前処理としてメッシュを準備するため、数値解を参照する AMR が適用できない。また、一つのメッシュが受け持つ時間（クランク角）範囲内では、壁移動に伴い内部のメッシュが変形する。メッシュ変形が大きくなった時点で、セル数とセル配置が異なる他のメッシュに切り替える。この場合、メッシュ変形によるセル界面の移動と、メッシュ切り替え時の補間により数値拡散が発生する。CONVERGE ではこのような欠点が無い。

ここで示したメッシュ配置の特徴と、前述の二次中心差分を主体とした流動項のスキームの相乗効果により、従来法に対して CONVERGE では流動解析の精度を高めた。

## 9. 乱流モデルと壁面境界条件

CONVERGE では、乱流モデルとして RANS 系の  $k-\epsilon$  モデルと LES を搭載している。筒内解析では、LES よりも RANS が実用面で優れていると考える。 $k-\epsilon$  モデルでは、標準、RNG、Rapid distortion RNG の 3 種のオプションを準備している。前二者はこの分野ではポピュラーである。最後は、平均流の構造が迅速に変形 (Rapid distortion) することを考慮して修正された RNG  $k-\epsilon$  モデルである。開発元 CSI 社での筒内流動解析の検証経験より、Rapid distortion RNG  $k-\epsilon$  モデルを推奨している。

乱流モデルの壁面境界条件は、基本的に壁関数であるが、壁近傍で Embedding や AMR を用いて詳細メッシュを適用することを考慮して、 $y^+$  に応じて遷移層や粘性底層も連続的に考慮する定式化としている。

## 10. コールド流の検証事例

流れ解析の検証事例として、コールド流定常解析を示す。実験では、サンディアの実験エンジン (Fig.6) を使用した。ボアは 79.5mm である。吸気バルブのリフトを 2mm、ピストンヘッド位置をシリンダヘッドの下方 139mm に設定した。吸気バルブでの圧力損失を固定して、空気質量流量を測定した。測定結果は 0.0269kg/s である。

数値解析では、Base Grid の寸法を 1mm とした。単気筒解析においては、通常、筒の中心軸を  $z$  軸と一致させる。本手法でのメッシュ分割法、特に壁面近傍のカットセルが予測精度に与える影響について検討するため、系を通常配置した場合 (Fig.7, Fig.8(a)) に加え、系を  $45^\circ$  傾けた場合 (Fig.7, Fig.8(b)) で解析を行った。Embedding と AMR を併用してメッシュを精細化した。最小格子幅は 0.25mm である (Fig.9)。

質量流量と誤差を Table1 に示す。系を傾けた場合に精度が若干低下しているが、実用上許容できると考える。

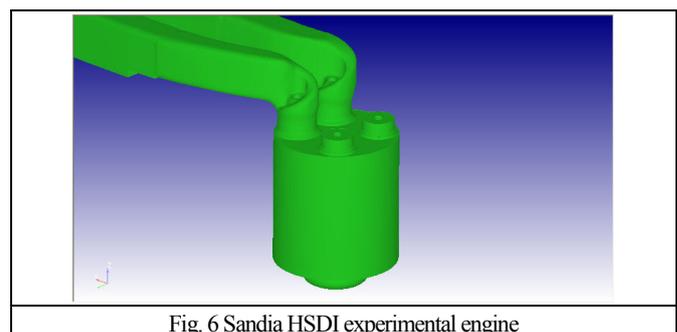


Fig. 6 Sandia HSDI experimental engine

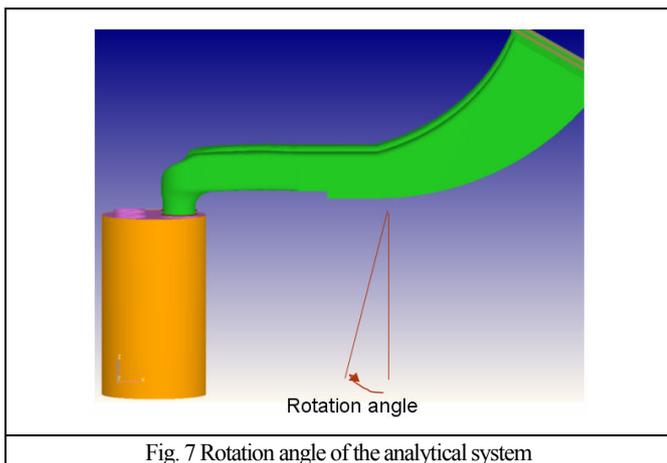


Fig. 7 Rotation angle of the analytical system

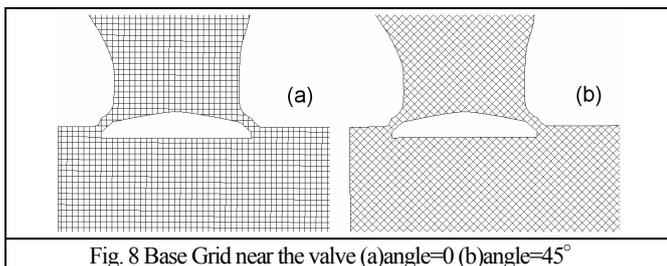


Fig. 8 Base Grid near the valve (a)angle=0 (b)angle=45°

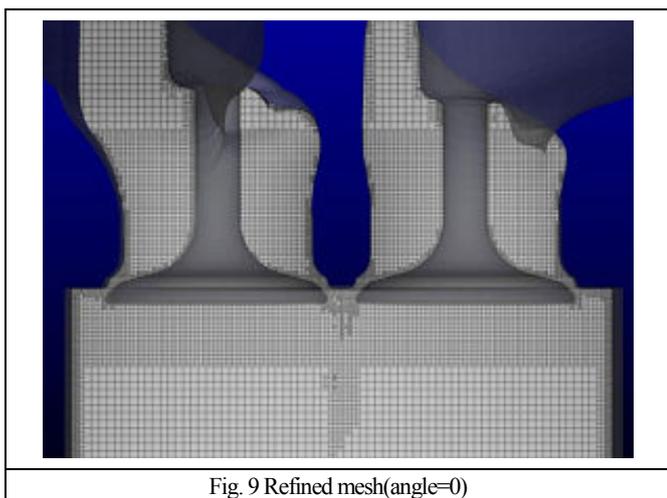


Fig. 9 Refined mesh (angle=0)

Table 1 Comparison result

Rotation angle[deg]	Mass flow [kg/s]	Error[%]
0	0.0270	0.4
45	0.0266	-1.1

### 1 1. エンジン筒内噴霧・燃焼の特徴と CFD ツールへの要求

これまで、エンジン筒内解析の基本となる流動解析について示してきた。以降では、液体燃料（ガソリンや軽油）の噴霧や、蒸発した燃料と空気の燃焼（気相での化学反応）について示す。ピストン往復動式のエンジンは、火花点火機関（ガソリンエンジン）と圧縮点火機関（ディーゼルエンジン）に大別される。

ガソリンエンジンでは、液体燃料のガソリンが吸気管内に噴霧され蒸発して、燃料と空気が予混合した状態で筒内に供給される。筒内において、スパークプラグでの火花を基点として、予混合燃焼が行われる。数値解析上は、乱流予混合燃焼の扱いが課題となる。

一方のディーゼルエンジンでは、予め空気を筒内に供給して、ピストンで圧縮して筒内を昇温した状態で液体燃料である軽油などを筒内に噴霧する。噴霧された液体燃料は、微粒化と蒸発を経て、気相の燃料と空気が拡散燃焼を行う。数値解析上は、噴霧・微粒化と、乱流拡散燃焼が課題となる。

ガソリンエンジンでも、吸気管内での液滴蒸発や壁面液膜形成を議論する場合や、筒内に液体燃料を直接噴霧する場合には、噴霧・微粒化や液膜形成のモデル化と解析が課題となる。

複雑な混相流である噴霧・微粒化については、第一原理的な予測手法は確立しておらず、モデル定数を含む物理モデルの使用が避けられない。気相燃焼については、中間生成物を含む多数の化学種を、多数の素反応式で扱うことで、厳密に扱うことが期待できる。しかしながら、この素反応解析は計算負荷が高いため、モデル定数を含む簡略な物理モデルも多用されている。

このように、噴霧・燃焼モデルでは、チューニングすべきモデル定数を含む場合が多い。ここで、格子依存性が顕著な従来の解析ソルバを用いる場合、物理現象と数値誤差が干渉した状態でモデル定数のチューニングが行われることになり、チューニング結果の適用範囲が不明確である問題がある。

CONVERGE の場合、流動解析における格子依存性を極力排除する工夫を上述した。これらの工夫は、噴霧・燃焼に対しても有効である。

噴霧解析の場合、多数のサンプル粒子で液滴を代表させ、ラグランジュ計算を行う。流体計算用の格子配置の依存性を小さくするために、Embedding と AMR による精細化が有効となる。

また、燃焼解析においても、温度や化学種濃度の勾配、すなわち反応帯の解像に AMR は有効であり、格子依存性の排除が期待できる。

### 1 2. 噴霧解析

筒内解析で多用される噴霧モデルの多くの開発に CSI 社が関与していることもあり、CONVERGE には噴霧解析に必要な多数の物理モデル、すなわち噴射、液膜微粒化、液柱微粒化、液滴微粒化、液滴の衝突・合体、液滴抵抗則、液滴乱流分散、壁面液膜形成、液滴と壁面液膜の蒸発、が搭載されている。

ここでは、液柱微粒化のモデルと検証事例を示す。

円形ノズルから噴出した液柱の Kelvin-Helmholts (KH) 不安定性による分裂と液滴生成、この液滴と周囲空気の相対速度に起因する Rayleigh-Taylor (RT) 不安定性による液滴微粒化を考慮したのが KH-RT モデルである。従来の KH-RT モデルでは、液柱の長さ（以下、分裂長さ）を入力データとしていた。これは、メッシュ依存性を排除した解析が不可能であったため、力学の忠実な計算を断念していたとの事情による。

一方で、CONVERGE に搭載の modified KH-RT モデルでは分裂長さは指定せず、KH 不安定性と RT 不安定性による力学計算から予測する。これは、十分な格子解像度を確保することが前提である。さらに、テイラー級数展開による局所ガス流速の評価、流体格子とは独立な粒子衝突評価用の格子の使用により、噴霧計算の格子依存性を実用上排除した。

この液柱微粒化の modified KH-RT モデルの検証事例として、ディーゼルエンジン燃焼室の環境を模擬した定積容器内（108mm 立方）での燃料液柱の分裂長さの測定<sup>(2)</sup>と解析の比較を示す<sup>(1)</sup>。

実験では、蒸発は考慮するが燃焼しない条件にて、定常状態での液柱長さを測定した。ディーゼル燃焼室内の高圧・高温環境再現のため、燃焼室を窒素、酸素、水素アセチレンの混合気で満たし燃焼させた。実験条件を Table 2 に示す。パラメーターとして、ノズル径、噴射圧、周囲密度をそれぞれ独立に変化させた。

解析に用いた格子の一例を Fig.10 に示す。Base Grid は 10mm、4 段階の AMR を適用し、最小格子幅は 0.625mm である。

Table 2 Experimental condition

	Case1	Case2	Case3
Nozzle diameter[mm]	0.1-0.498	0.246	0.246
Injection Pressure[MPa]	163	86-163	136
Ambient gas density[kg/m <sup>3</sup> ]	30.2	14.8	7.3-60
Ambient gas temperature[K]	1,300	1,000	1,000

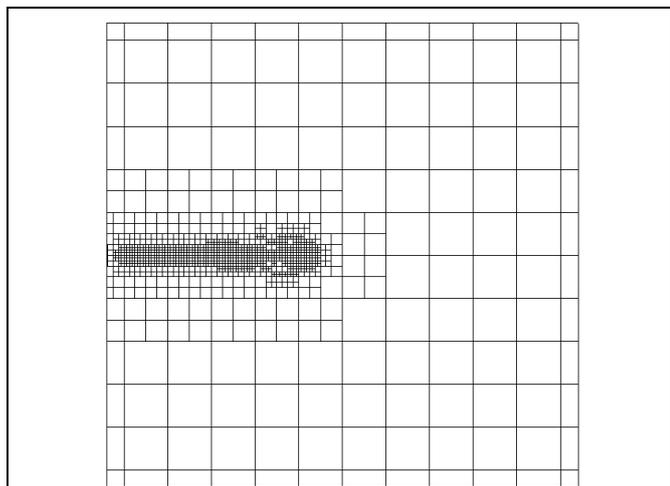


Fig. 10 Grid for modified KH-RT breakup model

ノズル径が液柱長さに与える影響を Fig.11 に示す。垂直白線と図中の数値は、測定結果である。ノズル径が増大すると、液柱長さが長くなっている。白い点は解析結果である。解析結果の液柱の定義に任意性があるため、液柱長さの定量化には注意が必要である。しかしながら、解析は測定と整合する結果となっている。

同様に、Fig.12 は噴射圧の影響である。測定、解析ともに、液柱流さは噴射圧に対して顕著に依存しない様子が示されている。

次に、周辺密度の影響を Fig.13 に示す。測定、解析ともに、周辺密度の増加により液長さが短くなっている。

以上、CONVERGE の適切な使用により、噴霧した液柱長さが良好に予測されることが示された。追記するが、この液柱長さは、従来法のように入力条件ではなく、数値予測の対象である。

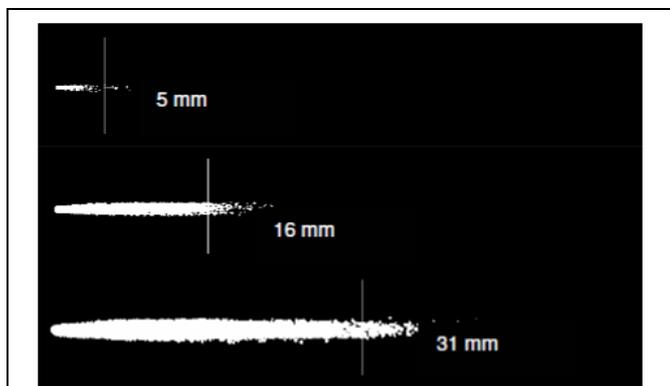


Fig. 11 Effect of nozzle diameter on liquid length  
(Top:0.1mm, middle:0.246mm, bottom:0.498mm)

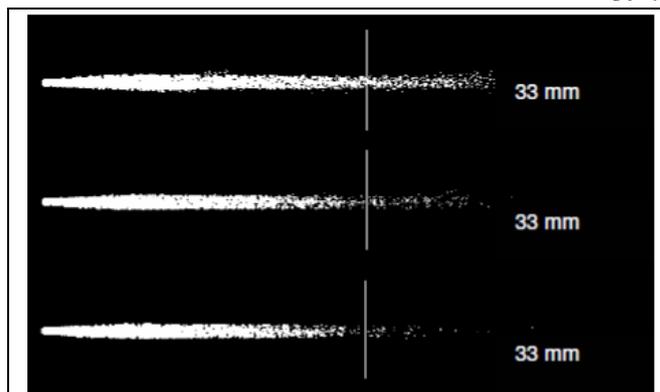


Fig. 12 Effect of injection pressure on liquid length  
(Top:86MPa, middle:136MPa, bottom:163MPa)

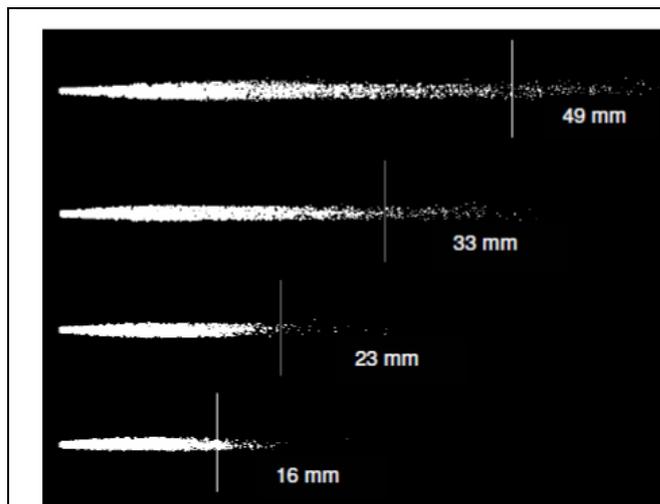


Fig. 13 Effect of ambient density on liquid length  
(from the top, 7.3kg/m<sup>3</sup>, 14.8kg/m<sup>3</sup>, 30.2kg/m<sup>3</sup> and 60kg/m<sup>3</sup>, respectively)

### 1.3. 燃焼解析

CONVERGE の燃焼モデルとして、人為的なモデル定数を省いたの現象予測を重視した詳細素反応モデルと、計算負荷低減を図った簡易燃焼モデルが用意されている。詳細素反応解析用に、SAGE (<http://convergecf.com/products/sage/>) と呼ばれるスティッフソルバーを採用した。また、ディーゼルエンジン用の簡略燃焼モデル (shell モデル、CTC モデル) も使用可能である。ガソリンエンジン用の簡略燃焼モデル (G 方程式) の搭載も予定している。

汚染物質の予測法として、素反応解析機構の一部としてサーマル NO<sub>x</sub> や煤前駆体の機構を組み込むことが出来る。また、従来からある簡略モデルとして、ポスト処理的なサーマル NO<sub>x</sub> モデル (拡張ゼルドビッチ機構) や廣安による煤モデルが用意されている。

燃焼解析においては、物理モデルと同等に数値解法も重要である。すなわち、数値誤差が邪魔をせずにモデル式相当の数値解が得られることが重要であり、主として空間分解能が課題となる。すなわち、反応帯 (火炎面厚さ) での温度・濃度勾配をメッシュで解像することが必須となる。拡散火炎 (ディーゼルエンジン) よりも、予混合火炎 (ガソリンエンジン) の方が反応帯が薄いため、数値解析上は厳しい条件と言える。予混合火炎では、乱流モデルを使わない実現象として、火炎面厚さは 0.01mm 程度となり、これを解像する詳細メッシュの適用は非実用的である。一方、塔

内解析では乱流モデルの使用が実用的であり、この場合、渦混合の影響で反応帯が厚くなり、2mm 程度となる。この反応帯厚さを解像するメッシュ (0.5mm 程度) を用いることは可能であるが、空間全域にこの寸法の詳細メッシュを用いることは、やはり非実用的である。ここで、AMR の機能を活用すれば、必要箇所 (反応帯) 以外ではメッシュ数の削減が可能であり、計算負荷の面で実用的である。拡散火炎 (ディーゼル) の場合でも同様に、AMR の適用は数値精度と計算負荷の面で有益である。ガソリンエンジンでの乱流予混合燃焼解析に、素反応解析と AMR を適用した事例を Fig.14 に示す。図中、ガス温度コンターとメッシュを示した。

なお、基礎的な 1 次元解析の結果から、十分な格子分解能と素反応解析を用いれば、乱流予混合火炎速度の測定結果を数値的に再現するとの知見を得ている。すなわち、モデル定数のチューニングを省いた、乱流燃焼の数値予測が可能と考えている。

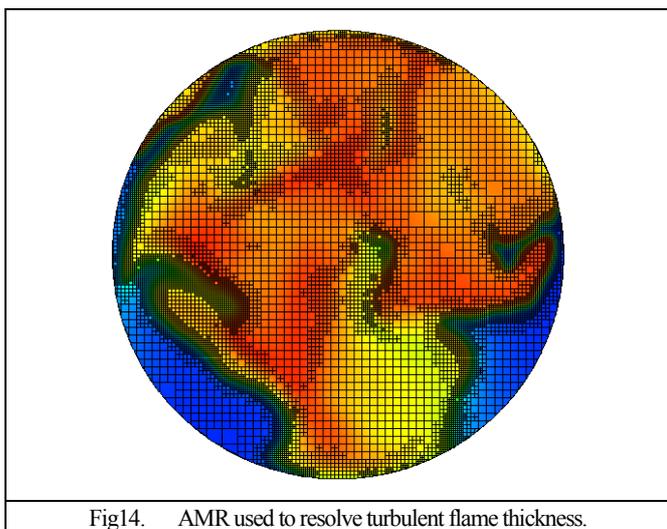


Fig.14. AMR used to resolve turbulent flame thickness.

ディーゼルエンジン用の簡易燃焼モデルについて補足する。燃料噴霧初期の段階で部分的形成される予混合気による着火判定のために、簡易的なアレニウス式を用いたのが shell モデルである。その後の拡散燃焼に適用するのが CTC モデルであり、局所の化学平衡状態 (完全燃焼状態、中間生成物や熱乖離を許す) の温度・濃度に、応答時間 (乱流混合と化学的時定数) を考慮して近づくとしたモデルである。簡易燃焼モデルは SAGE に比べ計算負荷は低い、モデル定数のチューニングが必要である。AMR を適用することで、格子依存性を省いたチューニングが可能となる。

エンジン筒内燃焼の重要な指標に、クランク角と筒内平均圧力の関係を示す、指圧線図がある。指圧線図を数値予測するにあたり、噴霧や燃焼解析の精度も重要であるが、圧縮行程での圧力上昇を正しく予測することが基本となる。状態方程式として、燃焼解析では完全ガス近似が多用されるが、この場合圧縮行程での圧力上昇に無視できない誤差が混入する。これに対応するため、CONVERGE では、実在実ガスの状態方程式も準備しており、圧縮行程での圧力上昇の予測精度向上を図った。

以下で、ディーゼルエンジン燃焼解析応用事例と実験との比較を示す<sup>4)</sup>。実験で使用したエンジン仕様 (Table 3)、実験条件 (Table 4) を示す<sup>9)</sup>。数値解析にあたっては、排気バルブ閉鎖後を対象にして、噴霧ノズル配置の幾何的対称性から、周方向に 1/6 のショートケーキ形状のセクターモデルを使用した。

解析では、ディーゼル燃料を n-ヘプタン (C<sub>7</sub>H<sub>16</sub>) で近似し、NO 生成を含む 42 化学種、168 可逆反応による反応機能を用いた。格子依存性を示すため、Table 5 に示す 4 種のケースで解析を行った。

Table 3 Specifications for the Caterpillar 3401

Parameter	Value
Bore[cm]	13.716
Stroke[cm]	16.51
Connecting rod length[cm]	26.16
Displacement[L]	2.44
Compression ratio[-]	15.1:1
Nozzle hole diameter[cm]	0.026

Table 4 Operating conditions

Parameter	Value
Intake surger tank pressure[kPa]	183
Intake Surge Tank temperature[K]	309
Intake valve closure[deg ATDC]	-147
Swirl ratio[-]	1.0
Engine speed[rev/min]	1,600
Injection Pressure[MPa]	90
Mass of fuel injected[g/cycle]	0.1625
Injection duration[deg]	21.5

Table 5 Mesh control

	Case1	Case2	Case3	Case4
Base mesh size	2.5mm	2.5mm	2.5mm	0.625mm
Min. mesh size	2.5mm	1.25mm	0.625mm	0.625mm
Embedding	Off	On	On	Off
AMR	Off	Off	On	Off

噴霧中のクランク角 5(deg ATDC)における温度コンター、噴霧粒子、メッシュを図示した (Fig.15~18)。温度コンターのスケールレンジは青~赤で 700[K]~2200[K]、噴霧粒子の色は粒径である (青:小~赤:大)。

Case1(Fig.15)のメッシュは一樣に粗、Case2(Fig.16)は噴霧部分に 1 段 Embedding を適用、Case3(Fig.17)はさらに AMR を適用して、最小格子幅を順次半分にした。噴霧の貫通と温度分布が変化しており、格子依存性が確認できる。

一方、Case4(Fig.18)は Case3 と最小格子幅は同じであるが、一樣に密としている。格子数は時間で変化するが、図示のクランク角からさらにクランク角が 100deg.進行した時点では、Case4 の格子数は Case3 の 28 倍となる。両図から、Case3 と 4 で噴霧の貫通と温度分布はほぼ等しい。

Fig.19 に、Case1~3 での燃焼による熱発生時間変化を示す。水平線は完全燃焼を示す。格子の精細化で熱発生は上昇し、Case3 ではほぼ完全燃焼している。ここでも格子依存性が示されている。格子が粗い場合、噴霧の貫通と蒸発ガス燃料の空気との混合が不十分のため、燃焼反応の進行が遅れたものと思われる。

次に、Case1~3 での指圧線図を測定値と比較して示した (Fig.20~Fig.22)。格子を細かくすると、解析結果のピーク圧力が上昇し、実測値との一致が良くなる。格子が粗いと、燃焼反応が不十分であり、精度が悪化している。

また、Case3 と 4 での指圧線図を比較したところ (Fig.23)、ほぼ等しい結果であり、格子依存性が無いことが示されている。

Case3 について、NOx と煤生成量の実験結果との比較を示す (Fig.24, 25)。ここでは数値解の結果は実験結果と良好に一致しているが、NOx と煤の予測モデルの原理から、常にこの精度を保障するものではない。特に、煤の予測には困難が伴う。

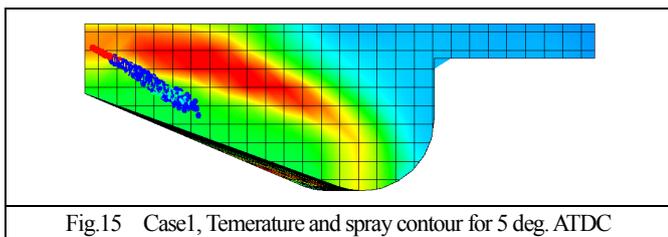


Fig.15 Case1, Temperature and spray contour for 5 deg. ATDC

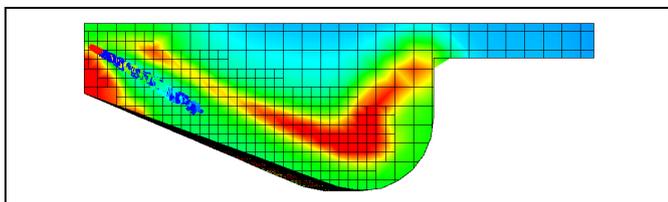


Fig.16 Case2, Temperature and spray contour for 5 deg. ATDC

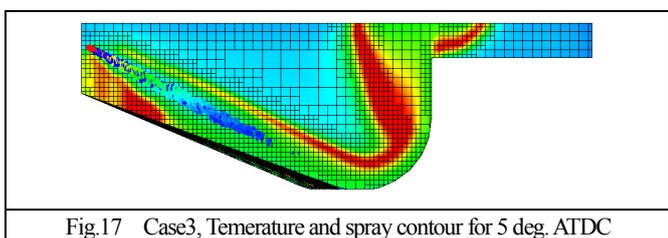


Fig.17 Case3, Temperature and spray contour for 5 deg. ATDC

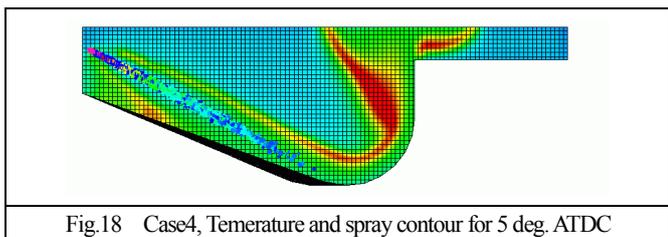


Fig.18 Case4, Temperature and spray contour for 5 deg. ATDC

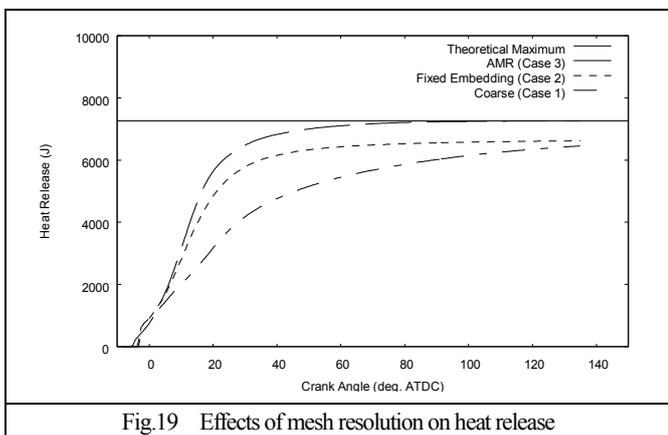


Fig.19 Effects of mesh resolution on heat release

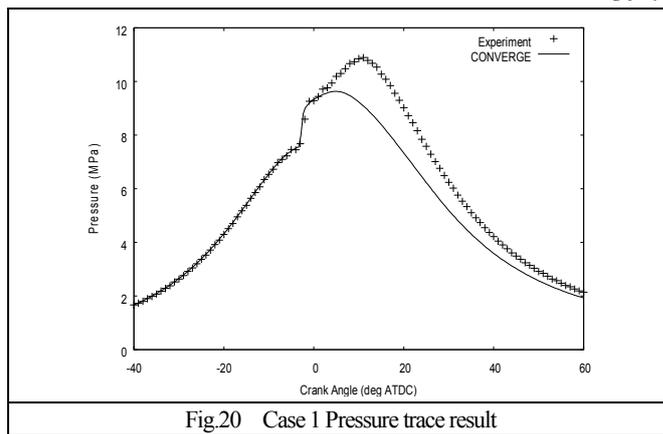


Fig.20 Case 1 Pressure trace result

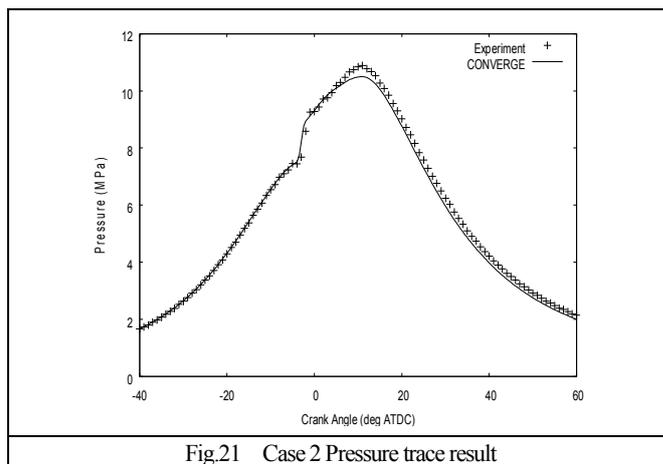


Fig.21 Case 2 Pressure trace result

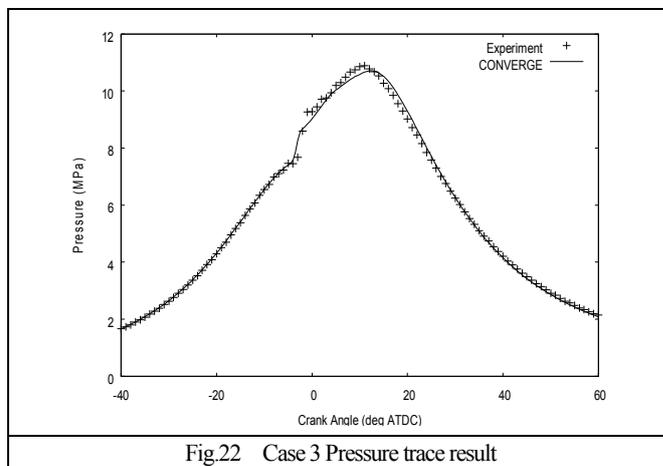


Fig.22 Case 3 Pressure trace result

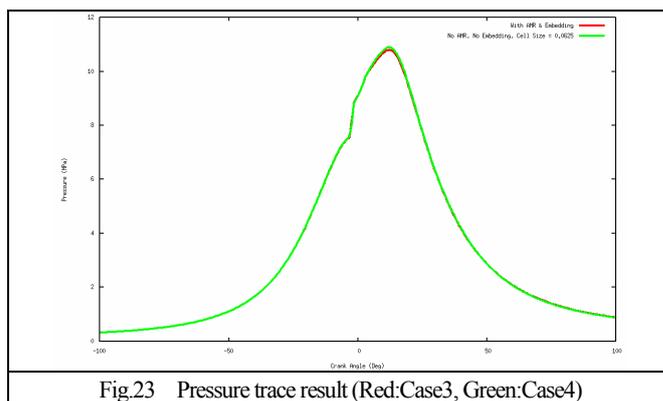


Fig.23 Pressure trace result (Red:Case3, Green:Case4)

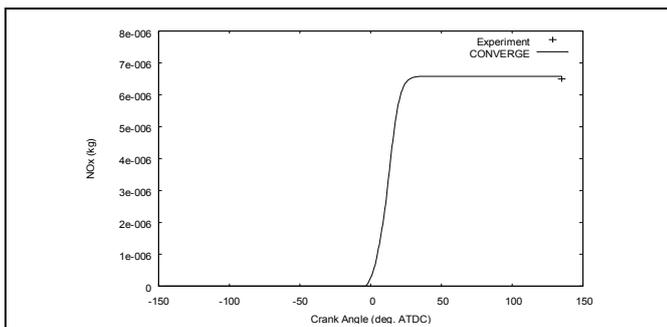


Fig.24 Case 3 NOx emissions result

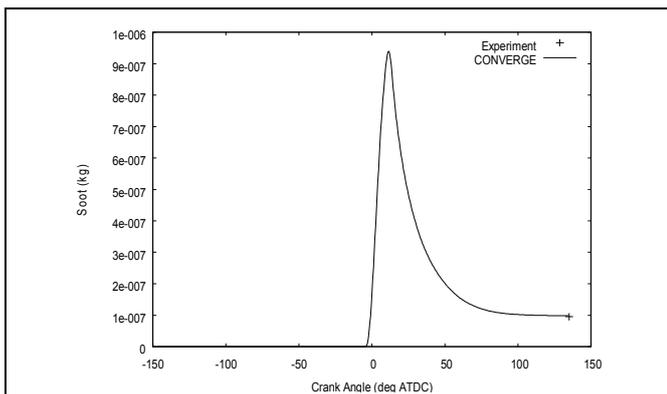


Fig.25 Case 3 Soot emissions result

#### 1 4. 作業工数

ソルバ操作前の工数として、体積メッシュの生成が必要となる従来法の非構造格子ソルバでは、通常 1 週間程度、CONVERGE では半日以下である。また、気筒間の干渉を模擬するための多気筒エンジン解析の実例を Fig.26 に示した。この場合、ソルバ操作前の工数は、従来法の非構造格子ソルバでは 1 ヶ月程度、CONVERGE では 1 日以内である。顕著な工数削減効果がある。

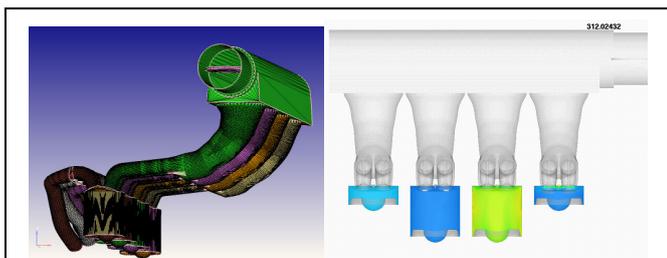


Fig.26 Full engine analysis

#### 1 5. 並列計算

計算時間短縮に、並列計算は有効である。CONVERGE は並列計算に対応している。壁移動や AMR 適用により、非定常計算の最中にセル数が増える。また、噴霧計算を行うと、各流体セルでの計算負荷に不均衡が発生する。CONVERGE ではこれらを考慮した、領域自動分割と自動負荷バランスの機能を有する。また、詳細素反応解析を行う場合、流体計算とは別に、化学反応計算をほぼ均等に並列化する。Fig.27 に、並列計算のスケールビリティの一例を示す。

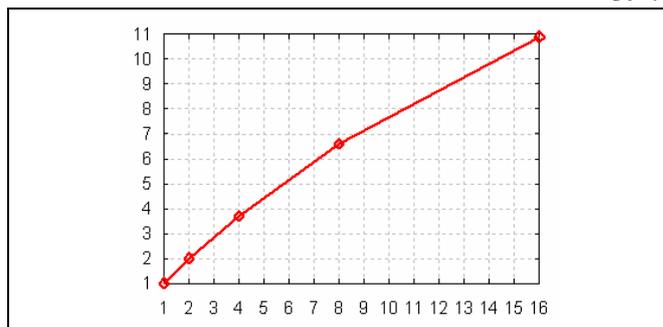


Fig.27 Representative parallel speedup curve for CONVERGE

#### 1 6. エンジン以外への応用例

CONVERGE 開発の動機は、エンジン筒内解析の精度と作業効率を同時に改善することである。しかしながら、特徴のあるメッシュ技術は他の応用分野でも有効である。ここでは、車体回り流れ (Fig.28)、都市環境ビル風 (Fig.29)、および空調器ダクト内流れ (Fig.30) への適用例を示す。最後の例では、ダクト内の案内羽が非定常に可動するが、条件設定と解析の実行は極めて容易である。

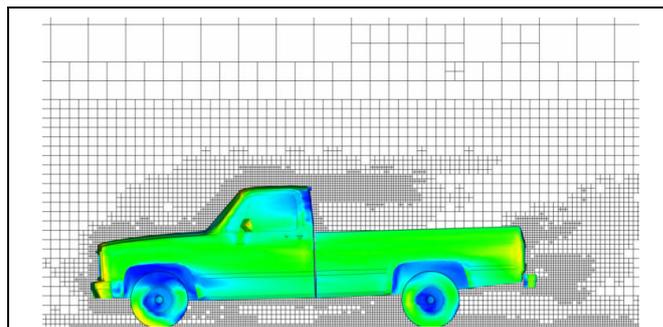


Fig.28 Flow analysis around vehicle body (Velocity contour)

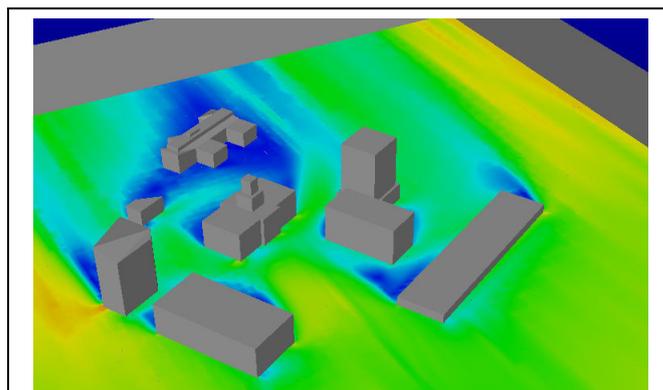
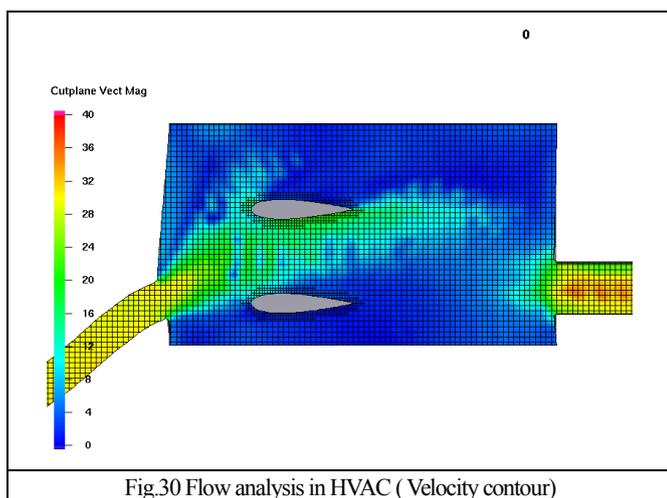


Fig.29 Wind environment analysis around buildings (Velocity contour)



### 17. 終わりに

本報告では、CONVERGE がエンジン筒内解析の精度と作業効率を同時に向上させ、非構造格子を用いた従来解析手法の欠点を抜本的に改善していることを示した。主要技術は、直交メッシュとカットセル法を用いてソルバ内で自動メッシュ生成を行うこと、そのメッシュコントロール方法としての AMR である。また、噴霧や燃焼の物理モデル自体の改善と、メッシュ依存性低減の相乗効果により、筒内解析の信頼性が顕著に向上した。

検証事例として、コールド流、ディーゼル噴霧の液柱長さ、指圧線図の解析結果と測定値との比較から、CONVERGE の解析精度を検証した。

現在開発中の機能は、境界層メッシュ、予混合乱流燃焼の G 方程式モデル、固体接触機能、ユーザーカスタマイズ機能 (UDF)、混相流の VOF 法などである。

### 参考文献

- (1) Senecal P. K. et al, "A New Parallel Cut-Cell Cartesian CFD Code for Rapid Grid Generation Applied to In-Cylinder Diesel Engine Simulations" SAE 2007-01-0159.
- (2) Siebers D. L., "Scaling Liquid-Phase Fuel Penetration in Diesel Sprays Based on Mixing-Limited Vaporization," SAE 1999-01-0528, 1999.
- (3) Montgomery, D. T., "An Investigation of the Effects of Injection and EGR Parameters on the Emissions and Performance of Heavy Duty Diesel Engines," MS Thesis, Dept. of Mechanical Engineering, University of Wisconsin-Madison, 1996.