

4.4 ものづくり

4.4.1 熱流体

(1) 現在行われている課題

熱流体解析に限らず、ものづくり分野で利用される商用アプリケーションソフトウェアの開発に関しては、わが国は欧米に対して大きく後れを取っている。現在、産業界で用いられている CAE (Computer Aided Engineering) 分野のアプリケーションソフトウェアは欧米製のものが大半であり、わが国で開発されたソフトウェアはほとんど用いられていない。例えば、英国インペリアル・カレッジ・ロンドンで開発された STAR-CCM や米国 Creare Inc.社で開発された Ansys Fluent が標準ソフトウェアとして広く使われている。また、燃焼計算の代表的ソフトウェアである CHEMKIN は米国サンディア国立研究所で開発されたものである。

しかしながら、ここに来て新たな転機を迎えようとしている。現在のスーパーコンピュータは数万個以上の CPU や演算コアを搭載しており、その性能を発揮させるためにはこれらを同時並列的に、かつ、効率的に動作させる必要があるが、現在、業界標準となっているアプリケーションソフトウェアの多くはこのような超並列計算には対応していないためである。また、ものづくりの設計現場においては、計算プログラムのみならず、設計者の扱う CAD (Computer Aided Design) データから計算格子を自動的に生成する前処理プログラムや、膨大な量の計算結果から、設計者が工学的に重要な情報を抽出し、その結果を設計にフィードバックすることを支援する後処理プログラムがあつて初めて、ものづくりの現場でスーパーコンピューティングの威力が発揮される。計算機ハードウェアの長足の進歩に伴い、アプリケーション・ソフトウェアやそれを利用した設計システムにもパラダイムシフトが起こりつつある[1][2]。

(2) 長期的目標

ソフトウェアや設計システムの研究開発や実証研究のフェーズは別として、ものづくり分野で HPC が実際の製品の研究開発や設計の現場で活用されるためには、企業の研究者や設計者が容易にアクセスでき、また、長時間にわたり一定のリソースを占有できる計算機環境があることが必須となる。現在のスーパーコンピュータのコア性能は 10 GFLOPS のオーダーであり、コア数は 100 万程度に達している。計算機の従来の価格性能比トレンドから推定すると、企業の研究者や設計者は世界最速のスーパーコンピュータの 1/10 程度の性能を持つ計算機を 3 年後に自由に使えるようになるものと予想される。したがって、2014 年頃には、10 万程度のコアを使用した超並列計算が先端的企業において有効性が実証されているものと推定される[3][4]。

ものづくりにおいて重要となる熱流体シミュレーションでは、従来よりスーパーコンピュータが必要とされてきた。工学的に重要な流れは、ほとんどの場合「乱流」と呼ばれる状態の流れである。乱流では大小さまざまなスケールの渦が複雑な干渉をしており、その結果として、平均的な流れや流れの時間変動が決定される。例えば、時速 100 km で走行中の自動車まわりの流れを考えると、車の後ろには車と同程度のサイズの大きな渦が存在しているが、ルーフや側面に発達する乱流境界層中には数百 μm の微細な渦が存在している。このマルチスケール性

が熱流体シミュレーションの本質的な難しさの根源にある。従来、このような微細な渦を直接計算せず、モデルにより渦の効果を取り込むことにより熱流体の数値解析は行われていた。このため、普遍的で高精度なモデルを開発することは不可能であり、熱流体の数値解析を更に発展させるうえでの障害になっていた。しかしながら、計算機性能の長足の進歩や数値解析手法の進展により、このような微細な渦の運動まで準第一原理的に計算する Large Eddy Simulation (LES) と呼ばれる手法の実用化に大きな期待が集まっている。どの程度の計算規模の LES が何年頃に産業界で実用化されるかは、今後の計算機の発達や計算手法の進歩によるところも大きい。なお、2014 年頃には 10 億点の計算格子を用いた LES (渦モデル使用時は 100 億点) が企業の研究開発の現場や設計現場で実用化されるものと期待されている。一方、詳細な説明は割愛するが、乱流中の主要な微細渦まで計算するために必要となる格子点数は、流れの代表速度、代表長さ、および動粘度により決定されるレイノルズ数 (Re) と呼ばれる無次元パラメータの大小により大きく異なり、レイノルズ数のほぼ 3 乗に比例して大きくなる。必要となる格子解像度と流れの一要素を解析するのに必要な格子点数を推定した結果をそれぞれ表 4.4.1-1 (Re はレイノルズ数、 C_f は摩擦係数、 Δx 、 Δy 、 Δz は格子幅、 L は代表長さ) と表 4.4.1-2 (n は格子点数を示す) に示す[6][7][8]。

この推定に基づき、実際の機械製品の解析に必要な格子点数を見積もった結果を表 4.4.1-3 (N/n は格子点当りの内部反復回数を示す) に示す。この表に示すように機械工学分野の多くの製品に関しては、今から 5 年後には熱流体の準第一原理的な数値解析が実現されるものと期待されている。機械工学以外のものづくり分野、例えば、航空宇宙工学分野などでは流れのレイノルズ数が総じて大きいため、必要な格子点数は表 4.4.1-3 に示した数の数百倍から数千倍程度になるものと推定されるが、今後これらの分野においても乱流の準第一原理的な計算が実用化されるものと予想される。

ものづくり分野で非常に重要となる燃焼をとまなう流れや流体・構造連成問題などの複合分野においては、更なる計算規模が必要となる場合がある。特に燃焼流れの場合は、乱流の微細構造に加えて化学反応の微細プロセスとそれによる微細構造を解像する必要がある。例えばロケットエンジンなどの高圧燃焼では火炎の厚さは乱流スケールに比べても数十万倍薄くなる。そのため化学反応のない流れに比べてはるかに多くの格子点数が必要となると推定でき、当面はモデル (例えば、薄い火炎を不連続として扱うフレイムレットモデルなど) を用いた解析が主流と予想される。

表 4.4.1-1 LES 解析を実施する際に必要となる壁付近での格子解像度の予測

Re	C_f	$\frac{\Delta x}{L}$	$\frac{\Delta y_{min}}{L}$	$\frac{\Delta z}{L}$
2×10^4	1.1×10^{-2}	2.7×10^{-2}	1.3×10^{-3}	6.7×10^{-3}
2×10^5	6.2×10^{-3}	3.6×10^{-3}	1.8×10^{-4}	9.0×10^{-4}
2×10^6	3.9×10^{-3}	4.5×10^{-4}	2.3×10^{-5}	1.1×10^{-4}

表 4.4.1-2 工学的 LES 解析に必要なとなる計算格子点数の予測

Re	n_x	n_y	n_z	$n = n_x \times n_y \times n_z$ (total number of grids)
2×10^4	3.7×10^1	2.5×10^1	1.5×10^2	1.4×10^5
2×10^5	2.8×10^2	1.0×10^2	1.1×10^3	3.0×10^7
2×10^6	2.2×10^3	4.0×10^2	9.0×10^3	7.9×10^9

表 4.4.1-3 2015 年における工学的 LES 解析の適用予測

Products	Specifications	Re	N/n	N
車	L=1 m, U=28 m/s (100 km/h)	1.9×10^6	10	7.9×10^{10}
模型船	L= 5m (1/50 scale model), U=1.0 m/s	4.6×10^6	1.2	8.9×10^{10}
小型ポンプ	$D_2=300$ mm, 1500 rpm, L=0.15 m, U=24 m/s	3.6×10^6	12	3.9×10^{11}
風車	$D_2=40$ m, L=0.4 m, U=64 m/s	2.5×10^6	3	4.0×10^{10}
軸流ファン	$D_2=600$ mm, 1800 rpm, L=0.2 m, U=56 m/s	7.5×10^5	12	8.6×10^9
換気扇	$D_2=500$ mm, 600 rpm, L=0.2 m, U=16 m/s	2.0×10^5	3	1.0×10^8
小型冷却ファン	$D_2=80$ mm, 3400 rpm, L=0.02 m, U=14 m/s	1.9×10^4	7	1.0×10^6

以上は計算機の性能向上のトレンドから、ものづくり分野における熱流体の数値解析がどの程度大規模化し、それにより、工学的に重要となる乱流の準第一原理的な数値解析が何年頃に実用化されるかに関して述べたものである。一方で、ものづくり分野においては単に解析ができるだけでは十分ではなく、これらの解析が実際の設計で利用できることが重要となる。そのため、ものづくり分野における熱流体の数値解析の今後の発展形態の一つとして、数百から数万ケースにも及ぶ計算を同時並行的に実施し、数値解析に基づく本格的な設計探査が実用化されるものと期待されている（一般に大量解析と呼ばれるスーパーコンピュータの利用形態の一つである）。これを実現するためには更に多くの計算リソースが必要となると同時に、実用的に問題となる多くの目的関数がある場合にも適用し得る設計探査方法の研究開発と、計算効率の抜本的な向上による **strong scaling**（問題規模を一定にして並列数を大きくして計算速度の向上を図る）時の計算時間を飛躍的に短縮するための研究開発などが必要となる。

従来から、工業製品の研究開発や設計に数値シミュレーションは幅広く用いられていた。しかし、従来の計算機で予測できる現象や予測精度には限界があり、複雑なマイクロ現象の解明や製品試作の数値シミュレーションによる代替は実現されていなかった。しかし、長足の進歩を遂げているスーパーコンピュータを駆使すれば、製品試作の一部あるいは全部をシミュレーションにより代替したり、試行錯誤に基づいて決定していた種々の設計パラメータを理論的に最適化したりすることが可能となる。以下、具体例を用いて、ものづくり分野で期待されているブレークスルーを説明したい。

自動車の空気抵抗を低減するために大規模な流体シミュレーションを活用した例を図 4.4.1-1 に示す[9]。車体回りの空気の流れには 1m 程度の大きな渦から 1mm 以下の非常に小さ

な渦まで存在しているが、従来の計算機では計算速度ならびに記憶容量の制約から、流れの中の小さな渦の運動までは計算することは不可能であった。しかし、近い将来、最先端のスーパーコンピュータを利用すれば、最大1兆点程度の計算格子を用いた大規模な流体シミュレーションも可能であり、車のまわりの微細な渦の相互作用を明らかにすることができるようになる。そのような知見に基づいて渦を制御すれば、従来手法による空気抵抗低減の限界を打破できることが期待されている。また、このようなシミュレーションにより風洞試験と同程度の精度で空気力の予測が可能となり、現在、試作車両を用いたり、クレイモデルを製作したりして行われている風洞試験の一部、あるいは全部を数値シミュレーションにより代替することも可能になる。これらのシミュレーションが民間企業で可能となれば産業競争力の大幅な向上に貢献できる。

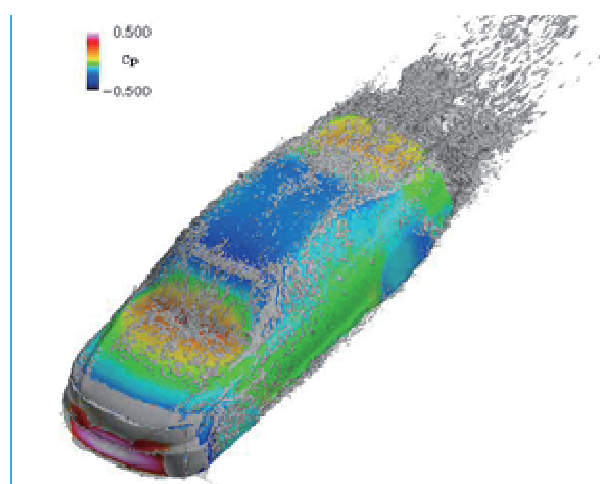


図 4.4.1-1 自動車回りの詳細な気流解析

種々の設計パラメータを決定するためにも熱流体シミュレーションが用いられてきたが、多数の設計パラメータを最適化するためには膨大なケース数に上がるシミュレーションを実行する必要がある、これに要する計算時間がボトルネックになり、シミュレーションを用いた最適設計は実用化されていなかった。しかしながら、現在のスーパーコンピュータは数万個以上のCPUから構成されているため、多数のケースを同時に計算することができ、スーパーコンピュータを駆使した最適設計の実現にも大きな期待が集まっている。図4.4.1-2に数値シミュレーションを利用した最適化により、計算機サーバ用の冷却ファンから発生する騒音を大幅に低減した例を示す。CPUなどの発熱量は年々増大しており、この熱を除去するためのファンの回転数も増大している。ファンから発生する騒音の大きさは理論的にはファンの回転数の5乗から6乗に比例して大きくなるため、回転数の増大にともない騒音も急激に増大する。したがって、冷却ファンの低騒音化は重要な技術課題であるが、経験的な手法による低騒音化は限界に達していた。ファンの翼形状は数十個のパラメータの組み合わせにより決定されるが、従来の計算機の能力ではこのような多数のパラメータの組み合わせのそれぞれに対して性能や騒音を予測し、最適なパラメータの組み合わせを探索することは不可能であった。しかし、現在のスーパーコンピュータを利用すれば数百ケースのパラメータスタディを数時間で実施するこ

とができるため、数値シミュレーションによる最適化が可能となる。このケースでは 6dB 以上の低騒音化が実現されている。

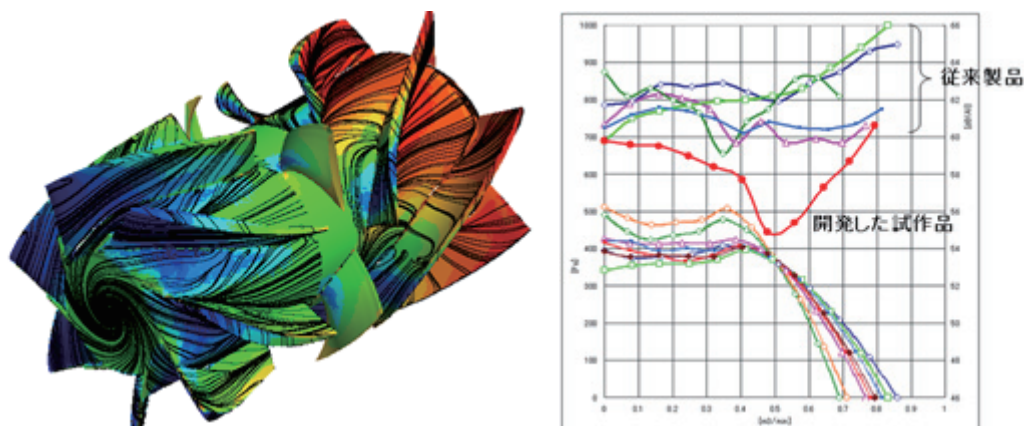


図 4.4.1-2 ファンの騒音低減例

一方、土木・建築系の熱流体シミュレーションとしては、土木分野における橋梁の耐風安定性の照査、建築分野における都市内の熱・拡散環境解析などがその代表例として挙げられる。橋梁の耐風安定性の照査では、耐風安定性が問題となる吊り橋や斜張橋などは長大橋であるため、従来の計算機的能力では、一部の橋梁断面区間をモデル化した解析しか実施できなかった。また、都市内の熱・拡散環境解析の場合、建物形状を正確にモデル化した解析では、都市の一部を取り出した数キロ四方の解析しか実施できなかった。しかし、最先端のスーパーコンピュータを利用すれば、橋梁の耐風安定性の照査においては全橋モデルを用いた耐風安定性の解析が、また都市内の熱・拡散環境解析では数十 km 四方の中規模都市（地方主要都市）を丸ごと解析することがそれぞれ可能となり、数値シミュレーションの適用性と信頼性が大幅に向上する。

(3) 次世代に解決すべき課題

(i) 解析プログラムの開発から解析システムの開発へのパラダイムシフト

単に計算プログラムだけがあっても、製品設計に生かすことはできない。超大規模な計算科学シミュレーションをものづくり設計に生かすためには、設計データを用いて迅速に計算を実行することを可能にする前処理プロセスや、計算結果を効率的に設計にフィードバックするための後処理プロセス、更に、設計の最適化を支援する機能などを有した、次世代の CAE システムを構築する必要がある。近い将来、熱流体解析における格子点数は最大 1 兆点程度になるものと予想されるが、このような大規模計算のための前後処理を従来の考え方の延長で実現することは不可能である。つまり、前後処理を含めた流れ解析システムとしてのパラダイムシフトが必要となり、これを実現するための研究開発が必要である。

(ii) 物理モデルの高度化、新規アルゴリズムの開発

今後の計算機の発達を考えると、さまざまな分野で大規模、高精度な解析が可能となることが期待されるが、計算機能力の向上に任せておけば物理モデルの高度化が不要となるわけではない。これまで述べてきたように、乱流自体に関してはほぼ予測の目処が立っており、モデルに対するこれ以上の高度化のニーズはない。しかしながら、キャビテーション流れや燃焼流れのように、乱流の渦スケールよりもはるかに小さな空間スケール、時間スケールを持ったマルチスケール現象に関しては、計算機性能が向上するだけでは分子スケールの運動を直接解析することは不可能であり、これらの現象のより定量的な予測のためには物理モデルの更なる高度化が必要である[10][11]。また、流体・構造・音響現象などのマルチフィジックス現象に関しては、それぞれの現象の解析手法は確立されているが、連成現象の高精度で効率的な数値解析手法の研究開発も必要である。更に、これからの計算機アーキテクチャに合致したシミュレーションの方法論やそれを具現化する計算アルゴリズムの研究開発も欠かしてはならない。また、大規模な連立一次方程式に対する、前処理も含めた高収束性で低コストの計算アルゴリズムの研究開発や輻射計算などで必須となる密行列の超並列解析アルゴリズムなどの研究開発も必要である。

(4) ターゲットとする研究対象

多くの製品や構造物の熱流体解析にスーパーコンピューティングの活用が期待されるが、代表的な例を下記に列挙する。

- ターボ機械の熱流動、振動、音響解析
- 自動車の空力解析、流体振動解析、車室内の騒音解析、エンジンルームや車室内の熱解析
- 電子機器の熱流体解析、騒音解析
- 航空機の翼設計、機体設計、エンジンや機体の空力・騒音解析
- 宇宙機の熱流体設計、推進系解析、全機システム解析
- 原子力機器等、プラントの熱流動解析
- 都市や建築物内の空気の流れや汚染物質の拡散解析

(5) 課題を解決するために必要なアプリケーション群（要求性能）

熱流体解析では、差分法や有限要素法などにより解析領域を計算格子に分割し、各計算格子上で近似的に成立する、質量、運動量、ならびに、エネルギーの保存則を計算することにより、流れ場の解を時間発展させて行く。時間発展の方法は差分法による場合が多いが、計算時間刻み幅の制約を受け難い陰解法を用いることが多く、この場合は各時間ステップにおいて連立一次方程式を解く必要がある。各計算格子上の近似方程式では隣接する計算格子の情報を使い、参照する格子点数は数値解析手法により異なるが、最低で6点、最大で100点程度である。したがって、陰解法を用いて連立一次方程式を解く場合の係数行列はバンド幅が6~100程度の疎行列となる。1時間ステップ計算を進めるのに必要な計算回数（浮動小数点演算）は1格子点当たり数百から数万程度である。また、浮動小数点演算1回実行するのに必要となる実効的

なデータのロード回数（キャッシュミスをもっと抑えた場合）は1 格子点あたり 0.2～2 ワード（コンピュータで使うデータ量の単位）程度である。

熱流体の数値解析では、表面張力の計算など複雑な計算をする場合を除いて、基本的には1 演算あたり最低でも 0.5 ワードから 1 ワードのデータをメモリからロードあるいはメモリにストアする必要がある。例えば、この値が1 ワードであった場合、メモリバンド幅比（B/F 値）が 0.5 の計算機で実現可能な実効性能比は 8 バイトワードの場合で 6.25%、4 バイトワードの場合で 12.5%となる。例えば、現在「京」用にチューニングを進めている非圧縮ナビエ・ストークス解析プログラムでは 4 バイトワード（データのロード・ストア量を削減するために、メモリと CPU との間では 4 バイトワードと用いているが、演算は倍精度で実行している）を用いているが、B/F 値 0.5 の「京」において、ピーク性能に対する実効性能は 8.5%である。今後の大規模解析では 8 バイト（倍精度）ワードのロード・ストアが必須となるものと予想されるため、より高い B/F 値が要求される。したがって、現在の「京」と同程度の B/F 値でも不足であり、更に低い値、例えば 0.1 となってしまうと、計算の実効性能比は最大でも 1%程度となってしまう、そのような計算機を使う意味がほとんどなくなってしまう。

計算機のノード性能に関しては weak scaling（問題規模の増大に合わせて並列数を増やす方式、理想的な状態では計算時間は一定である）をしていく場合は特に制約はないが、エクサスケールの計算機（具体的には 10 エキサフロップスのピーク性能を持つ計算機を想定している）において、筐体の大きさや筐体数、筐体内に搭載可能な CPU 数（ノード数）は現状とさほど変わらないものと推定されるため、エクサスケールの計算機のノード性能はペタスケールの計算機の 1,000 倍になっている必要がある。ノードのメモリ容量に関しては離散化手法により異なるが、1 格子点あたりに必要な変数の数は数十から最大 1,000 程度であり、通信性能とメモリ性能の比を 0.1 と仮定した場合、weak scaling で並列性能が確保できるためには、最低でもノード当たりのメモリ容量としては 1TB 程度は必要になる。つまり、演算性能に対するメモリ容量の比 GB/GFLOPS 値で 0.01 程度までは小さくしもよいということである。この値は現在の L2 キャッシュの大きさ（GB/GFLOPS 値で 0.0005）の 20 倍程度になるが、メモリ容量比の 1/10 程度までは小さくしても問題がないということの意味しているが、詳細に関してはより具体的なケーススタディを実施する必要がある。更に、解析対象や解析目的（現象解明のための Capability Computing（一つの問題を大規模に計算）なのか設計のための Capacity Computing（小規模な問題を大量に計算）なのか）によってノード当たりの計算規模が変化する。その結果メモリ量やネットワークバンド幅は 1 桁程度は変動する。

以上から、計算機の単一ノードの演算性能を仮に 100TFLOPS だと想定した場合について、必要となる計算機のスペックをまとめると以下ようになる（単一ノードの性能が異なる場合は、以下の数値は別の値になる）。

- 想定する単一ノード演算性能：100 TFLOPS
- ネットワークバンド幅（ノードあたり）：0.5～5TB/s
- メモリ容量（ノードあたり）：0.1～1 TB
- メモリバンド幅（ノードあたり）：50 TB/s
- ストレージ容量・ストレージ速度：単純に外挿するとエクサバイト、ペタバイト/秒のストレージが必要となるが、今後、後処理の高度化のための研究開発が必要であり、

これらの値を現実的な範囲に縮減する必要がある。そのため、現時点では必要となるストレージ容量、ストレージ速度は不明。

課題	要求性能 (PFLOPS)	要求メモリ / バンド幅 (PB/s)	メモリ量/ ケース (PB)	ストレージ 量/ ケース (PB)	計算時間/ ケース (hour)	ケース数	総演算量 (EFLOP)	概要と計算手法	問題規模	備考
ターボ機械の熱流動、振動、音響解析	120	51	16	500	120	20	1000000	有限要素法	10 ¹² 格子	B/F=0.5として計算
熱流体シミュレーション(自動車、実際の設計、最適化問題)	280	560	0.04	4	1	100	100000	Re=10 ⁶ ~10 ⁷ のLES流体計算、パラメータスタディ、100ケースを4日	10 ¹⁰ 格子	BF=2として計算
電子機器の熱流体解析、騒音解析	14	19	0.01	1.6	2	100	10000	有限要素法	10 ¹⁰ 格子	
航空機の翼設計、機体設計、エンジンや機体の空力・騒音解析	23	23	0.1	8	24	1000	2000000	差分法	10 ¹¹ 格子	
宇宙機の熱流体設計、推進系解析、全機システム解析	58	57	1	80	240	10	500000	差分法	10 ¹² 格子	
都市や建築物内の空気の流れや汚染物質の拡散解析	930	490	50	160	96	10	3200000	有限要素法	10 ¹³ 格子、10 ⁴ ステップ	

※本見積もりは未だ精査中である。より精度の高い数値はWeb版(→「1.2. 本文書の構成」)を参照のこと。

(6) 他分野との連携

これまで熱・流体解析技術に関しては、物質科学分野、ものづくり分野、気象・気候分野などが独立して研究を行ってきた。しかし、対象は異なっても数理構造が同一ならシミュレーション技術は共有できる。この視点に立ち、個々の基礎理論の発展とモデルの高解像度化を進めると同時に、多くの分野に共通する流体的手法の共有や他分野における数理モデルに学びながらシミュレーション技術の向上が図られる。

(7) 公的な意見交換とそのサマリー

平成23年度にアプリケーション作業部会によって執筆された計算科学ロードマップ白書に関して、以下の会合で意見交換を実施した。

- 第26回数値流体力学シンポジウム 特別企画2「エクサスケールコンピューティングに向けて」 平成24年12月19日(水) 国立オリンピック記念青少年総合センター

意見交換の結果、次世代のスーパーコンピュータにおいて熱流体分野のシミュレーション研究を展開することについて、特に異論は出なかった。1番を目指す意義についての議論があり、科学としての必要性とものづくりにおける意義について意見交換が行われた。

- 平成25年6月20日(木) 計算工学講演会シンポジウム「エクサスケールに向けた計算工学の取り組み」(この意見交換は、熱流体、構造、材料、建築などものづくりの主要な分野を含んでいる)

ものづくり分野のコミュニティである計算工学会での議論では、シミュレーションの周辺技術まで含めたスループットが重要視されるという意見があった。つまり、ものづくり分野のシミュレーションで意味のある成果を創出するためには、モデル生成などの前処理、物理シミュレーション、ポスト処理のプロセスが必要となる。そこでは単にシミュレータの計算性能だけでなく、超大規模格子生成や計算結果の迅速かつ効果的な可視化への強い要求が特徴として挙げられる。このことは、ファイルシステムへの高い要求数値として表れている。一方で、現在のグローバルファイルシステムからローカルファイルシステムベースでグローバルビューを与えるような方式の検討も指摘された。

ものづくりの実務への応用を考えると、今後、単一の大規模な解析（Capability Computing）から小・中規模の多数の解析（Capacity Computing）へと適用方法がシフトしていく点が強調された。この変化は、シミュレーション結果に基づく大規模なデータベースを利用した設計高度化の実現につながるとともに、出現頻度は少ないが重大な事象の予測も現実的になり、より信頼性の高い製品開発の基盤技術となる。

今後、計算規模が大きくなると、結果の分析・可視化フェーズがものづくり解析プロセスのボトルネックとなることが容易に予想できる。また、結果の分析から新たな知見を発見することを支援するために、インタラクティブなポスト処理環境は非常に有効であるという意見が多数挙げられた。

以上のように、単にハイエンドの計算機が必要なだけでなく、高いファイル I/O 性能やグラフィックス性能を備えたサブシステムを準備し、不足性能を補完することにより、全体として高スループットなシミュレーションを実行可能なシステムが要求されている。

一方、ソフトウェア開発においては、ソフトウェアの寿命とメンテナンスの点から、生産性が高く効率的な高性能アプリケーション開発方法への期待が高い。これを実現するためには、高性能機能ライブラリやアプリケーションレベルのミドルウェア（機能ライブラリと実アプリケーションの間に位置する機能部品群の集合体、およびコードのひな形機能を提供するソフトウェア）が必要となる。高性能ライブラリの開発は、アーキテクチャを熟知した専門家に任せ、アプリケーション開発者は提供されるライブラリや部品群を用いて高レベルのアルゴリズム記述を行うような、開発作業の分業化に向かうと思われる。

(8) ロードマップ

2020 年頃にはエクサスケールのスーパーコンピュータが実現されるものと予想されているが、ものづくり分野における熱流体解析の大まかなロードマップを図 4.4.1-3 に示す。

年代 課題	2012 ～	2014 ～	2016 ～	2018 ～	2020 ～	2022 ～
アルゴリズム開発	エクサに向けた産業利用の全体像の検討、 アルゴリズム開発					
基盤S/W開発		エクサに向けた基盤S/Wの研究開発				
実証・実用化研究	Re数 10^6 に対するLESの実証研究	多目的設計探索手法の実証研究			Re数 10^7 に対するLESの実証研究	
		100億～1,000億格子規模のLES解析(自動車、ターボ機械など)				
実用化フェーズ					1兆～10兆規模格子のLES解析 (航空宇宙、高圧ターボ機械など)	
		RANS計算による設計探索			LES計算による設計探索	

図 4.4.1-3 熱流体解析ロードマップ

参考文献

- [1] 加藤千幸：ものづくりと次世代スーパーコンピュータ——期待と課題——，日本の科学者，Vol.45，No. 12，日本科学者会議発行，pp.28-33，2010年12月
- [2] 加藤千幸：ものづくりにおけるスーパーコンピューティング技術の推進検討小委員会から提言，学術会議主催第2回計算科学シミュレーションシンポジウム，2011年4月20日，日本学術会議
- [3] 加藤千幸：HPCによるものづくりの革新，京コンピュータ・シンポジウム2012および第2回戦略プログラム5分野合同ワークショップ，2012.6.14-15，神戸大学
- [4] 加藤千幸：ものづくり分野におけるスパコン「京」の活用，都市政策第148号，pp.4-10，2012年7月
- [5] Chisachi Kato：Very Large-Scale Fluid-Flow and Aeroacoustical Simulations for Engineering Applications Performed on Supercomputer “K”，SC12，November 10-16，2012，Salt Lake City，Utah，U.S.A.
- [6] 加藤千幸：乱流の直接シミュレーションによる熱流体設計の革新を目指して，文部科学省 HPCI 戦略プログラム 第3回分野4 次世代ものづくりシンポジウム 講演集，pp.21-pp.32，2012年12月
- [7] 加藤千幸：21世紀のものづくりにおけるCFDへの期待と課題，ながれ30(2011)，pp.57-60，2011年5月
- [8] 加藤千幸：非定常流れのCFDとターボ機械の騒音予測，ターボ機械，第38巻第11号，pp.27-32，2010年11月
- [9] 忠津雅也，山村淳，田中博，安木剛，高山務，山出吉伸，鈴木康方，加藤千幸：2Box車の空気抵抗低減に関する研究，自動車技術会2012年秋季大会，2012年10月，大阪国際会議場

- [10] Chisachi Kato: Industry-university collaborative project on numerical predictions of cavitating flows in hydraulic machinery, ASME-JSME-KSME Joint Fluids Engineering Conference 2011, July 24-29, 2011, Hamamatsu, Japan
- [11] 鈴木貴之, 加藤千幸: 均質媒体モデルを用いたキャビテーション解析の問題, 第 16 回キャビテーションシンポジウム、2012.11.24、金沢大学