

核融合プラズマの実時間安定性計算および制御に関する新技術 動向調査

(財)高度情報科学技術研究機構 徳田 伸二

本報告書で取り上げた計算機の利用技術は、現象の従う基礎方程式を現象の起こる時間スケールと同じ時間で、あるいはそれより早く解くことによって、現象を予測し、さらには制御することを目指すものである。このような計算を本報告書では「実時間・超高速計算」と呼ぶことにした。この観点から、核融合プラズマの実時間安定性計算および制御を実現するためのソフトウェア技術およびハードウェア技術について調査研究を行った。また、それと関連があり、実時間・超高速計算として重要な「計測融合シミュレーション」と航空機搭載合成開口レーダ SAR について調査した。さらに電子デバイスおよび超高速コンピューティングに関する調査も行った。

今後 1~2 年で販売される PC クラスタ (CPU 数 50、価格 2000 万円程度) によって核融合プラズマの安定性解析コード MARG2D が 0.5 秒以下の時間で計算され、核融合プラズマの実時間安定性計算が実現すると予想できる。さらに、5 年後の CPU では十分な裕度を持って実時間計算が可能となる見通しである。また、MARG2D では行列演算が計算量の多数を占めるので、高い実効効率の点からベクトル計算機が有利であり、2013 年から 2014 年にかけて公表されると予想されるベクトル計算機でも十分な裕度を持った実時間安定性計算が期待できる (ただし、そのための価格は一億円を超えると予想される)。

実時間安定性計算の実現は、CPU の性能向上にもよるが、そのためのソフトウェアの開発によるところが大きい。計算を速くする確実な方法は計算量そのものを減らすことである。MARG2D ではプラズマの圧力や電流が引き起こす不安定性を対象とし、解析に際して成長率の計算は行わず、安定性の同定だけに絞ることにより、従来の安定性解析コードより 40 倍以上速い安定性の判定を可能とした。このような数値計算法の考案と並列計算の普及の結果、安定性の実時間解析を現実のものとして取り上げることができるようになった。また、物理的な成長率が必要な問題 (プラズマや周りの導体壁の電気抵抗が引き起こす不安定性) の場合、その成長率が決定される領域においてのみ基礎方程式 (磁気流体力学方程式) を解き、それ以外の大部分の領域では MARG2D を用いる接続法を開発した。この方法により、成長率の誤差が 2% になることを許容するだけで、全領域で基礎方程式を解く場合に比べて 140 倍以上速い、そして

MARG2D の 2.3 倍程度の計算時間で安定性解析が可能になった。この結果、電気抵抗が引き起こす、核融合プラズマで重要なもう一つの不安定性についても実時間解析および制御が視野に入ってきた。

安定性の実時間解析と制御を実現するためには、高速な安定性解析に加えて、その時刻におけるプラズマ内部の圧力分布と電流分布を求めることが必要である。実際はプラズマ外部における磁場の測定をもとにプラズマ内部を推定するため MHD 平衡の再構成問題と呼ばれ、広い意味での逆問題（逆解析）の一種である。再構成問題においては装置（核融合炉）のミッションや設計方針に則った開発が不可欠であるが、ITER や JT-60SA は設計・建設段階で、その開発研究はあまり進んでいないのが現状であり、今後重要な開発テーマになると予想される。MHD 平衡の再構成において磁場とともにプラズマ内部から放出される X-線や中性子を利用する場合、医療診断や合成開口レーダ SAR で広く知られているトモグラフィー（断層映像法）技術を用いると予想される。また、基礎方程式を実時間で解く逆解析として「計測融合シミュレーション」が医療への応用を目指して研究が進められている。

血流の従う基礎方程式（流体力学方程式）の数値計算法はよく発達しているが、方程式を解くためには、方程式を解く領域の「形状」とともに「初期条件」と「境界条件」とが必要である。実際の血流問題（他の実問題でも同様）ではそれらを正確に設定することは原理的に不可能であるので、基礎方程式を正確に解いても、その結果は実際の血流とは一致しない。計測融合シミュレーションでは、病巣（例では動脈瘤）を含む領域（フィードバック領域）を設定し、超音波計測でその領域における血管形状と血流の速度を計測する。ただし、速度は一定の方向の 1 次元成分だけが測定できる。そして、フィードバック領域での測定結果とシミュレーション結果の差に比例する仮想的な力を基礎方程式に加えてシミュレーションを続ける。この方法によれば、厳密な境界条件を設定することなく、そして、医療現場で利用可能な規模の計算機で実行できる 3 次元シミュレーションにより、フィードバック領域（すなわち病巣）での血流の 3 次元速度分布を得ることができる。動脈瘤の表面の圧力分布を求めるためには血流の 3 次元速度が必要であるので、この実時間シミュレーションは高度な医療診断への応用を拓くものとして期待される。そして、この方法は流体力学だけでなく、核融合プラズマや他の分野における実時間シミュレーションの手法としても大変有力な方法であると考えられる。

実時間・超高速計算に用いるハードウェア（計算機）を核融合炉、計測融合シミュレーション（医療機器に使用されると想定）および航空機搭載合成開口

レーダ SARなどを例に取って調査した。SARはマイクロ波を用い、火災・煙、雲や雨に影響を受けずに、かつ昼夜を問わず観測が可能な装置である。有人および無人の航空機・ヘリコプタ等に搭載し、実時間で画像を取得して、地震・津波や火災時における迅速な災害観測や人命救助に活躍することが期待されている。

これらの機器は最終的には民生用商品となることを予定しており、また、それぞれの現場（核融合炉、小型飛行機内および病院）で使用されるため、そのスペース、重量、消費電力そしてコストに対して強い制限が課せられる。これらの点および最近の汎用 CPU の性能向上を考慮すると、使用する計算機はパソコン（あるいは PC クラスタ）であろうと予想される（すなわち、FPGA や ASIC を用いて、その機器専用の計算機を開発することはコストの観点から不可能であると予想する）。また、機器に実装されるソフトは数値計算コードだけでなく、ユーザインターフェイスや機器の動作を制御するソフトが重要な構成要素となる。それらを低コストで且つ円滑に開発する環境を提供できる点からも汎用 CPU（パソコン）が適切と考えられる。核融合プラズマの実時間安定性計算および制御システムの開発に関しても、パソコン（および PC クラスタ）を核にした検討が妥当であろう。

また、一般的に“流れ”に関する実用規模のシミュレーションを念頭に置き、「実時間・超高速計算」をコンパクトに実現する有望技術について5点考察した。

第1に、シミュレーションの目的を達成できる範囲内で、可能な限り簡単な「シミュレーションモデル」を採用することが大切である。従来から、“近似方程式の解法とモデルの精緻化”というアプローチがシミュレーションの王道になっているが、精緻化を進めるほどモデルの計算過程が複雑になり必要とされる計算機的能力が急激に増大してしまう。分子動力学のように“より根源的な基礎方程式からの出発”するアプローチでは、実用規模スケールでの現象解析にまだ多大な計算時間を要する。こうした中、「解析したい現象の空間・時間スケールよりも一段階だけ細かいスケールで仮想的な世界を想定し、そこで単純な法則に基づく現象を計算機で高速に解き、得られた仮想世界の現象をある適切な空間及び時間の範囲で平均化（疎視化・粗視化）して現実世界の現象を導く方法」がある。今後、「実時間・超高速計算」を達成する観点から、このような“仮想世界からの現実収束”アプローチにも注目する価値がある。

第2に、現実世界における実応用では、“初期条件”も“境界条件”も完璧には知ることができないので、ある暫定的な条件で計算を開始し、その後、適当な時間間隔で現実世界の実測情報をフィードバックしながら、「シミュレーショ

ンの適応制御」を実施するということが重要である。この際、前述した“計測融合シミュレーション”という手法が大切であり、具体的な方法を参考にすべきである。

第3に「実時間・超高速計算」を実現する観点から、可能な限り多くの格子点について、同時並列計算を実現していくことが大切である。このためには、「1格子点計算に必要な回路面積」をできるだけ小さくして、同一面積により多数の格子点に係る演算装置を組み込む必要がある。回路面積を小さくする観点からは、“1格子点1ビット幅”でデータ処理を行うのが理想的である。

第4に、各格子点における時間発展計算時のデータの移動、すなわち、記憶装置⇒演算装置⇒記憶装置という一連の「データパスの全体」が淀みなく進むことが大切である。1ビット幅の計算では、if文等による分岐計算を皆無にすることができるので、“パイプライン処理”が特に有効に機能する。また、パイプラインの各段における演算機能を必要に応じてその都度瞬時に変更できれば、多くの異なるパイプラインを配置する必要もなくなる。この観点から、“動的再構成可能なシストリックアレイ”が検討に値する技術になるであろう。

第5に「低消費電力の記憶演算回路」を実現する観点から、“不揮発性ダイナミック論理”の採用が有望である。これは、「本当に必要なタイミングだけ必要な量の電流を流す技術」と「電流を流さない電源オフの時間にも情報を保持するため、スピン注入型磁気抵抗素子などの不揮発性デバイスを演算回路に一体化する技術」である。今後、日本独自の技術として期待したい。