

VorCat 社の米国政府機関および自動車メーカーからのプロジェクト受託の概要

2003年10月

(訳) 株式会社イノベーションパートナーズ

(1) 米国防総省防衛脅威削減局(DTRA): 小企業革新研究制度による第 1 段階契約による研究

- この研究の目的は、生物化学兵器による危害中和戦略の効果予測を狙いとして、乱流の混合具合を予測するための正確な手法を考え出すことにあった。米エネルギー省が支援する小企業革新研究制度による第 2 段階プロジェクトとして行われた、乱流シミュレーションの為に三次元ボルテックス法の開発において **Krispin Technologies** が達成した成果を基にして、**DTRA** が関心を有する現実的なハザードシナリオづくりに直ちに応用された。その中には隔離された、あるいは開放された領域内での複数のサイトから発するスカラー量を持ったプルーム(羽毛のかたまり状のもの)がある。ボルテックス法特有の能力は、無格子特性のもつ多様性、計算速度、ならびに乱流の本質的な物理特性を表現する能力に由来するものである。とりわけボルテックス法は、非物理的な拡散モデルに基づいた伝統的な格子を用いた囲いや大渦シミュレーションの手法よりも、スカラー的混合に及ぼす、小規模な渦の本質的な効果をモデル化するのに適している。
- この方法の正確性を、種々の条件下の大気流れにおける、スカラー量をもったプルーム、ならびに乱流ジェットについてテストした。ついで発生源間の混合を定量化する方法を考案した。これらの方法は、異なった発生源からスカラー量が発生するような問題に応用可能である。

結果と画像:

VorCat 社のホームページで見ることができる (<http://www.vorcat.com>)。

(2) フォードモーター社: 研究契約による研究

- 急速平行ボルテックス法に基づいたソフトウェアである **VorCat** を、自動車の自動変速機からの圧力調整器スプール弁内の流れの、時間的な変化の正確なシミュレーションに応用した。スプール弁には流れの力が加わり、それが軸方向の動きと半径方向のクリアランスに影響する。この研究では速度、渦度、圧力分布を含む詳細は流れ場情報を、スプール弁開度 1 ミリから 0.25 ミリについて計算した。予測した速度の結果は実験による測定とよく一致し、また予測した渦度も、事件による圧力測定とよい相関性を示した。

結果と画像: VorCat 社のホームページで見ることができる。

(3) NIST(米国立標準・技術研究所): ATP 制度コスト分担交付金利用による研究

- VorCat 社は、革新的なアルゴリズムと計算方法を用いて、劇的に改善された流れ場予測を行うことを提案した。流体工学——流体の最適流れの為のシステムの設計——は、エンジンやガスタービンの設計から、翼、自動車、船体、電子実装、空調システム、産業処理機器にまたがる近代工学分野で大きな役割を担っている。
- 様々な局面における流体の挙動をモデル化するために高速コンピュータならびに強力なアルゴリズムを用いる CFD は、急速に発展しつつある、優れた流体流れのデザインにあたっての強力なツールではあるが、現行の CFD モデルはその有用性において、重要な限界がある。問題を妥当なコストと計算限界内に抑えるため、現行のモデルは乱流および熱伝達、燃焼、ならびに圧縮性 (HTCC) を伴う乱流には適切に対応できていない。しかしこれらは、実世界で遭遇するデザイン上のありふれた要因である。VorCat 社は、ボルテックス法の計算を実用的なものとした数学の進歩である Fast Muptipole Method の発展を利用した、いわゆる「ボルテックス法」による代案としての CFD アプローチの先駆者である。当社の現行ソフトウェアは、古い CFD モデルよりはるかによく乱れをモデル化できるが、HTCC を伴わない、限られた場合のことである。
- 然るに CFD を使う業種の乱流アプリケーションの 80%以上は、HTCC を伴っている。VorCat 社は、極めて複雑な HTCC 乱流に対応する為、基本となる Fast Multipole Method のアルゴリズムを、非常に効率の高い並列処理コンピュータで使えるように更に最適化し、かつ極めて複雑さの増した HTCC 流れにも対応できるように、ボルテックス法による流体流れの計算を拡張することを提案するものである。
- 複雑性はこのプロジェクトにおける最大のリスク源であり、計算は非実用的であるかもしれない。零細企業である VorCat 社は、乱流モデリングの一般解を得るための研究に必要な資金の調達に成功していない。もし成功すれば、このプロジェクトは自動車、航空宇宙、エレクトロニクス、プロセス産業といった広範な業界に使える、優れた CFD モデリングを可能にするものであり、その結果革新的な新しいデザインが可能になり、開発コストが下がり、市場投入への期間が短縮し、産業工程やエンジンのエネルギー効率が上がる。VorCat 社の推定では、かかる先進乱流モデリングの年間市場は、10 億ドルから 30 億ドルである。

現在までの成果:

別紙発表論文リストの各論文にて発表済み。

(4) 米エネルギー省: 小企業革新研究制度による第 1 段階および第 2 段階交付金利用による研究

- 本研究は、エネルギー工学で遭遇する広範囲な乱流問題を解く為の、融通が利き、効率がよく、物理的に正確な商用ソフトの開発を狙いとしている。第1段階では、三次元ボルテックス素子によって発生する速度場を計算する **Fast Multipole Method** の、速度と効率の両方を劇的に改善することに狙いを定めた。この部分こそ完全なアルゴリズムのうち、もっとも計算作業を要する部分である。得られた結果は、ボルテックス素子 1000 万個程度を含むシミュレーションにおいて、直接計算に比べ、1000 倍程度のスピードアップが得られた。
- 第2段階の目標は、当社の急速ボルテックス法に基づいたコンピュータコードを開発することに有り、それができれば伝統的なモデルに比べて、似たようなサイクルタイム内で、複雑な乱流場の予測精度が格段に高くなるはずである。アプリケーションは、自動車の外部流れに狙いを定めている(ダイムラー・クライスラー社と SGI 社の Cray 本部が本プロジェクトの共同スポンサーである)。
- 本プロジェクトの結果として、自動車用ならびにエネルギー工学分野用の、迅速で、グリッドなしの、並列 CFD ソフトウェアが得られた。そのコードはボルテックスフィラメントとシートとの混成物であり、計算効率の為、適応 **Fast Multipole Methodology (FMM)** を使っている。分散式メモリ並列化は **Message Passing Interface(MPI)** を用いて達成された。
- 乱流の数値的なシミュレーションにあたって、ボルテックス法は伝統的な格子法に対し、幾つかの利点を持っている。特にこの方法は、あるとしても無視できるほどの数値の拡散があり、高いレイノルズ数をもった乱流効果を、高い数値的な精度と忠実度で表すことができる。ボルテックス法はまた無格子であることから、複雑な形状の中での工学的な流れにも容易に応用できる。加えて、計算素子が、渦度が重要である流れ場の比較的小さなサポートしか占有しないので、ボルテックス法は本来的に適応性に富む。最後に、ボルテックス法は、乱流の最も重要な動力学プロセス——ボルテックスの伸びにより生じるエネルギーカスケードと、境界近傍での準流れ方向での渦発生——のうちの幾つかを、直接モデル化する方法を提供するものである。
- 本プロジェクトの推進中ならびに初期の結果に基づき、登録商標 1 件と米国特許 1 件を出願し、いずれも登録済みである(それぞれ 2000 年、2003 年)。

結果と画像:

結果の詳細は発表論文リスト中の論文で、画像はホームページで見ることができる。

(5) NASA ラングレー研究センターとの小企業革新研究制度による第1段階契約およびニューポート・ニューズ造船との研究契約による研究

- 本プロジェクトの目的は、三次元粘性ボルテックス法の **VorCat** ソフトウェアを用

いて、低速の空力的乱流をシミュレーションすることにある。VorCat は、長年にわたって CFD の領域内で開発されてきた伝統的な RANS や LES 手法とは根本的に異なった乱流予測の方法である。技術モニターならびに NASA ラングレー研究センターの、「計算によるモデル化ならびにシミュレーション」部門との数度にわたる相談の結果、VorCat の持つ能力の有用な試験は、レノルズ数 200,000 での平板境界層の流れ、ならびにレノルズ数 9,000,000 でのベンチマーク 30P30N 多素子翼を通過する流れのシミュレーションでこそ意味があるとの決定がなされた。

- ・ シミュレーションを実施する為、周期的な境界条件も扱えるように VorCat を拡張し、関連するジオメトリを扱えるように可視化ツールも修正された。

結果と画像：

VorCat 社のホームページで見ることができる。

(6) 全米科学財団：小企業革新研究制度による第一段階契約による研究

- ・ 本契約の目的は、2相、微粒子状、非圧縮性乱流場を含むアプリケーション向けに、VorCat 技術を基礎にした最先端 CFD 技術を作り上げることであった。この第 1 段階においては、二つの目標を達成することに狙いを定めた：すなわち (i) ボルテックス法を分析し、発展させ、連結した 2 相の流体微粒子シミュレーションができるに必要な修正を施し、(ii) 時間の許す限り、限定された試験と実証研究を行うことである。とりわけ、受動的なスカラー量モデル(外力有り、なし)と、簡単な設定の為の二方向結合モデルを比較することである。
- ・ 空間的に成長する三次元平板混合層の計算に VorCat コードを使用した。多数のフルスケールで長時間を要する計算が行われ、それによりこのアプローチの精度と効果が確認された。統計数値と混合層の構造内容が実験と一致した。VorCat によるシミュレーションは以前の分析を超えてなされ、混合層の渦のこれまで観察されていなかった諸相が明らかになった。根底にある混合層流れの物理的諸相がはっきりしたので、流れに固体の粒子を混ぜて計算を行った。
- ・ 当初ストークス数 0.001、1、4 および 100 の粒子について、一方向結合の場合を検討した。ここでストークス数とは、粒子の時間スケールと流体の時間スケールとの比である。結果は以前の測定ならびに数値的検討と一致し、二次元混合層あるいは流れ方向の周期的、時間的混合層の研究には無かった、三次元混合プロセスにおける粒子の分散についての情報が得られた。
- ・ 最後に、粒子相と流体層との間の二方向結合を含む、一連のシミュレーション・ランを行った。その中で VorCat コードを修正し、埋め込まれた粒子が新しい渦度を発生させる効果を織り込めるようにした。このような拡張を行った上で、

異なった粒子を入れて数回の計算を行い、混合層の構造の上に二方向結合によって新しい渦が発生するという効果が見られた。要するに第1段階の目標は成功裡に完了したということである。

結果と画像：

本研究の詳細は最終技術報告書として提出され、一部は発表論文リスト掲載の AIAA 会議にて報告した。画像はホームページで見ることができる。

(VorCat 受託プロジェクト)