

爆風伝播の数値シミュレーション

Numerical simulation of blast wave propagation

吉田正典¹⁾, 岡新一²⁾, 毛利昌康²⁾, Sukumar Chakravathy³⁾

1) (株) 爆発研究所, 2) (株) デイライト, 3) Metacomp Technologies Inc.

Masatake YOSHIDA¹⁾ Shinichi OKA²⁾, Masayasu MOHRI²⁾, and Sukumar Chakravathy³⁾

1) Explosion Research Institute Inc., 2) Delight Co. Ltd.,

2) Metacomp Technologies Inc.

I. 緒言 爆風の伝播過程の数値計算には、1) 爆発生成ガスと空気との間に高い密度差があること、2) 高マッハ数の領域からマッハ数 1 近くまでの流れ場を含むこと、3) わずか数 cm 程度の爆薬の爆発でも、数十 m の距離まで解析しなければならぬケースもあり、巨大な計算機資源を必要とすること、などと言ったさまざまな困難性があり、数値計算上いまだにチャレンジングな課題である。爆発現象の解析には、扱う状態方程式の種類が多種多様であり、また構成方程式の形態やパラメータなどは物質ごとに異なり、保存系の解法を適用することが難しいため、非保存系の流体力学を解く場合が多いが、爆風解析の場合には、非保存系の解法では遠方での解の精度が著しく落ちるため、保存性の良好な解法が好ましい。また、本来ならば爆発生成ガスに対しては JWL のような状態方程式を用いるべきであるが、遠方での爆風伝播の挙動を問題にする場合は理想気体状態方程式を用いても差し支えないと考えられるため、商用も含め、保存系解法アルゴリズムを用いたさまざまな汎用の数値計算コードを用いることが可能となるが、上記の 3) の困難性を克服するためには、良好な並列化効率を有することが必須条件である。

ここでは、非定常衝撃波流れの解析で高い精度を有すると同時に、並列計算においても良好なスケーラビリティを有する、CFD++を用いて爆風伝播の解析を行い、適用可能性について検証を行った。

II. CFD++の特徴と計算の概要 CFD++は高次の TVD スキームを用いた数値流体計算コードであるが、高マッハ数の圧縮性流れから非圧縮性流れまでを、また反応を含んだ流れや多相流れも、単一のソルバーで解くことができること (Unified Physics) や、Grid に関しては、1D、2D、3D のすべての種類の格子を統一的に扱うことが可能であること (Unified Grid) などの優れた特徴を有する一方、モデラーはなく、またメッシュャーは四面体格子にしか対応していない、など他のプリプロセッサを必要とするといった面もある。

しかしながら、入力ファイルのフォーマットは公開されているため、単純な形状のものを直方体格子に切る、といったことはユーザーが自力で行うことが可能である。ここでは、二次元軸対称を仮定し、CFD++入力データを生成するプログラムを作成し、CFD++用の node データファイル、cell データファイル、境界データファイルを生成して二次元軸対称の爆風伝播計算を行った。

爆源は TNT 1kg 相当で、対応する理想気体空気の初期状態は、密度を TNT と同じ 1630 kg/m^3 とすると、2.80 GPa、5980K となる。この密度の場合の形状は、直径 92mm、高さ 92mm の直円筒であるが、遠距離まで計算を行う場合は、エネルギーを一定に保って、直径・高さを拡大した。例えば、最大 23m の距離まで伝播する過程の計算の場合は、直径・高さを 4 倍し、 $368\text{mm}\phi \times 368\text{mm}$ とした。

並列計算を行う場合、領域分割は、軸方向等分割と METIS [1, 2] による非等分割が可能である。異なるハードウェアが混在する環境での CPU の重み付けはできず、プロセス数で調整する。ここでは、水平伝播方向軸に垂直または平行に等分割した。用いたハードウェアは、Core2Duo 2.13GHz 4 台の並列計算機であり、総メモリは 8 GB、性能としては、HPL (High Performance Linpack) 約 26 GFLOPS、姫野ベンチ約 5.7 GFLOPS であった。Dual コアマシンなので、領域を最大 8 分割して並列計算を行った。

III. 計算結果

空中爆発 TNT 1kg エネルギーの高圧空気源が空中爆発した場合の計算を行った。実際の計算は半空間で TNT 0.5kg 相当、半径 46mm、高さ 46mm を最低数の場合でも 8×8 の格子に切った。計算条件を表 1 に示す。

また、その結果を図 1 に示す。

表 1: 空中爆発計算の格子条件

格子サイズ	爆源格子数	計算空間全格子数	計算空間
mm	半径方向 × 高さ方向	同左	m × m
23.0	8 × 8	800 × 400	18.4 × 9.2
11.5	8 × 8	800 × 400	9.2 × 4.6
5.75	8 × 8	800 × 400	4.6 × 2.3
2.875	16 × 16	800 × 400	2.3 × 1.15
1.4375	32 × 32	800 × 400	1.15 × 0.575

地表 HOB (Height of Burst) 爆発 基準曲線 MITI87 は $0.18 \text{ m/kg}^{\frac{1}{3}}$ の換算 HOB で集積されたデータのフィット式でありこれとの比較計算を行った。格子の関係で $\text{HOB} = 0.184 \text{ m/kg}^{\frac{1}{3}}$ に設定した。

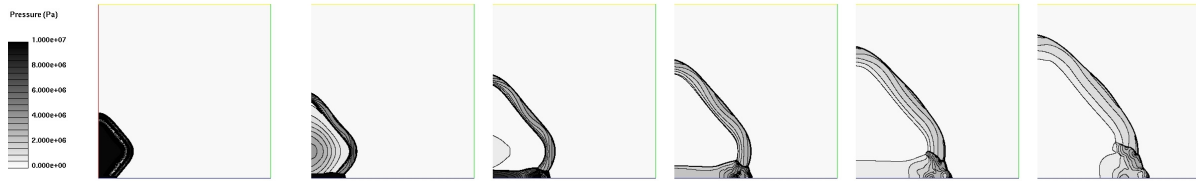


Figure 1: TNT 1kg 相当の高圧空気爆源の高さ 0.184 m での爆発. 左から、爆発後 50, 100, 150, 200, 250, 300 μs における等圧線。空間領域は半径・高さ方向とも 1.2m

参考文献

- [1] G. Karypis and V. Kumar, Intn'l Conf. Parallel Processing, pp.113-122 (1995)
- [2] <http://glaros.dtc.umn.edu/gkhome/views/metis>