

TNT 爆発の並列計算とブラストウェーブのビジュアライゼーション

青木 尊之

東京工業大学・学術国際情報センター

目的

爆発現象に対するビジュアライゼーションのほとんどは映画やゲームなどのエンターテインメントが目的であり、実際の爆発現象と異なってもそれほど問題にはならない¹⁾。多くの人は実際の爆発を近くで体験したことがないので、擬似的な爆発のビジュアライゼーションに対して違和感を持つことは少ない。

最近爆発事故のニュースが多いように感じるが、社会開発において爆薬は欠くことができない存在である。強大な破壊力を持つために貯蔵庫の安全性を検証することは極めて重要であるが、大規模な爆発実験には多くの危険が伴うため、爆発をコンピュータ上で仮想的に実験する数値シミュレーションが注目されている。本稿では、実際の爆発（特に爆風）を3次元数値流体シミュレーションにより忠実に再現し、その計算結果を詳細に把握するために高品位なビジュアライゼーションを行う。

爆発現象

日常生活で我々が遭遇する可能性がある爆発は、化学反応（燃焼）を伴いながら火炎面が広がるケースが多い。反応速度が遅く発生するエネルギーが小さいため、このような爆発の危険性は低い。産業用爆薬では反応速度が非常に早く放出されるエネルギーも膨大である。TNT などの強力な固体爆薬は起爆の瞬間に爆轟が進み、一瞬のうちに化学反応が爆薬全体に広がる。ほぼ固体状態のまま爆轟は終了するが、温度・圧力・内部エネルギーは放出されたエネルギーのために極限とも言える状態に上昇している。爆轟で生成された物質は超音速で空気中に膨張して行き爆風となる。膨張とともに次第に密度が低下してガス状になるが、依然として温度が高いために炭素などが発光を続け燃えているように見える。我々が目にする爆発の火炎面は爆轟生成ガスの表面である。爆風により爆轟生成ガスが広がる範囲は限られているが、爆轟生成ガスの超音速膨張が空気中に強い衝撃波を発生させ、遠方にまで伝播し被害をもたらす。爆轟生成ガスと空気の界面は重力不安定（レイリー・テラー不安定性：水と油の入った容器で、水が上にあるような状態）であり、ずり流れの状態になっているためにケルビン・ヘルムホルツ不安定性も発生するなど流体力学的に非常に不安定である。これらが火炎面を非常に乱れた複雑な構造にしている原因である。

爆風を詳細に解析するには、爆轟生成ガスの複雑な運動に対して細かい計算格子を用いる必要があり、さらに遠方にまで伝播する衝撃波の強さを精度よく評価することも重要である。従って爆発（爆風）解析の計算領域も広くなるため、非常に大規模な計算が必要となる。

数値流体シミュレーション

実験を行わずに爆発（爆風伝播）現象を計算機の中で忠実に再現させるために、圧縮性流体方程式を時間・空間で離散化し数値シミュレーションを行う。通常は差分法などが用いられるが、爆轟直後の密度は空気の1000倍以上あり、ミリ秒オーダーで膨張すると密度が空気の100分の1以下に低下する部分もある。このような急激な密度変化に対して精度の高い計算を行うために、局所補間微分オペレータ法（IDO法）^{2,4)}という数値計算手法を用いている。空間格子点上に物理量とその空間微係数を定義し、それぞれ独立に計算を行うことで高次精度のエルミート補間関数を形成させる。この補間関数が圧縮性流体方程式の近似解になるという考えに基づき離散化を行う。また、密度や圧力が数値計算の原因で、ほんの少しでも負の値を取ると計算が続行不可能になるため、方程式中の対流項に対しては解の単調整を保障する有理関数型のエルミート補間が用いられている^{5,6)}。一方、時間発展に関しては、十分な空間精度と計算の安定性を確保するために4段4次精度のルンゲク

ッタ法が用いられている。

本数値シミュレーションがどの程度実際の爆発を再現できるかを検証するために、32kgの TNT を爆発させた実験と同一の条件で計算を行った。起爆とほぼ同時に爆轟が終了するため、爆轟直後を初期条件として爆風伝播の計算を行った。前述の局所補間微分オペレータ法を用いて3次元圧縮性流体方程式を解くシミュレーション・コードを開発し、(独)産業技術総合研究所・爆発安全研究センターの Xeon 2.4GHz×40CPU のセルフメイドの PC クラスタで計算を行った。3000 万点を越える格子数を用い、MPI ライブラリを用いた領域分割による並列計算を実行しているが、計算終了までに数日を要する。計算結果を実験と比較した結果、爆源から遠い距離においても圧力の測定値と良く一致した結果が得られている。現在は図1のように本計算を実行したときよりもさらに計算機の規模が大きくなり、Xeon 2.8GHz×128CPU の構成で Myrinet2000 によりインターコネクタされている。Linpack ベンチマークテストで 492.9Gflops の性能がでることが確認され、2003 年 11 月の時点で世界のスーパーコンピュータの 351 位にランキングされている⁷⁾。



図1 (独) 産業技術総合研究所・爆発安全研究センターのセルフメイド PC クラスタ (ミリネット接続 Xeon 2.8 GHz x 128)

レイトレーシングによるビジュアライゼーション

爆轟生成ガスが発光しながら膨張する様子(火炎)をビジュアライゼーションするために、フリーソフトとして有名な POV-Ray 3.5⁸⁾ のボリューム・レンダリング機能を用いた。科学技術用汎用グラフィクス・ソフトウェアにもボリューム・レンダリング機能はあるが、テクスチャ・マッピングと共存できない問題や、背景をレイトレーシングでリアリスティックにレンダリングしたいなどの理由で POV-Ray を用いた。しかし、POV-Ray の単純なボリューム・レンダリング表示では火炎の領域での光の吸収率を大きく取れず、背景が透けて見える状態になる。color_map をどのように調節してもなかなか火炎の感じを表すことができない。実際の火炎は黒体輻射であり、外界からの光は火炎の領域を通過できない。そこで不透明な等値面表示と組み合わせることにより、乱れた火炎の複雑な構造に対するリアルなレンダリングが可能になった。図2は火薬庫の中で爆発し、火炎が噴出するようすを動画にしたものである。図3は地表で爆発した場合で、実際の爆発を高速カメラで撮影したものと比較して、かなり類似した火炎面の動きをとらえている。

一方、空気中を広がる衝撃波は、空気を圧縮し屈折率を変えるためにレンズ効果を示す。実際にも観測されるこの現象も同時にレンダリングすることで、図4に示すように現象をリアルに再現している。大きなサイズの密度ファイルに対する POV-Ray のレンダリングは1枚当たり30分~1時間かかり、2000枚の画像をレンダリングするために東京工業大学・学術国際情報センターの Titech Grid システム(図5)および青木研究室 PC Cluster で分散処理を行った。

以上のようなビジュアライゼーションにより、火炎面(爆轟生成ガス)の複雑な動きと衝撃波の伝播を分かりやすく示すことができたと考える。

本研究は(社)全国火薬類保安協会において経済産業省原子力安全・保安院保安課委託の爆発影響低減化委員会のもとで行われ、高速度カメラによる TNT 爆発実験のビデオ提供および測定結果との比較について協力して頂いた(独)産業技術総合研究所・爆発安全研究センターの多くの方に感謝の意を表す。

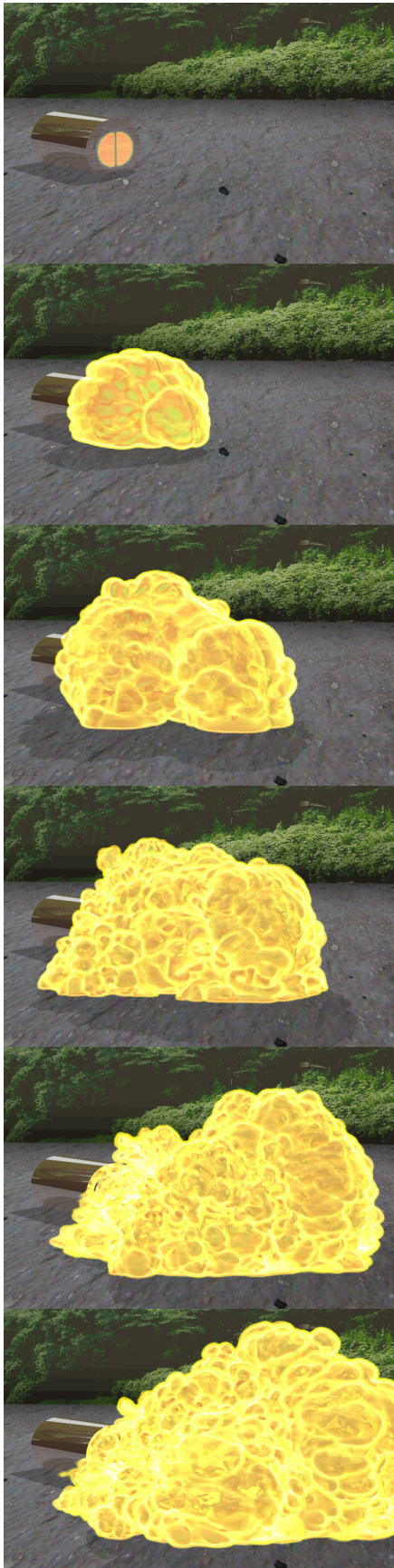


図2 火薬庫の中で爆発し噴出する火炎.

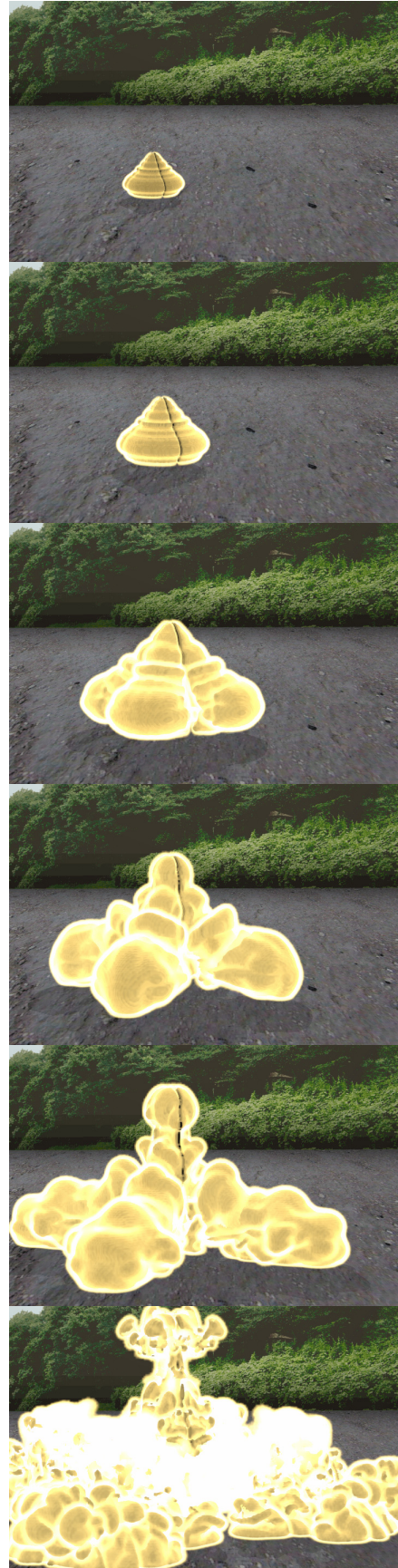


図3 地表で爆発し広がる火炎.

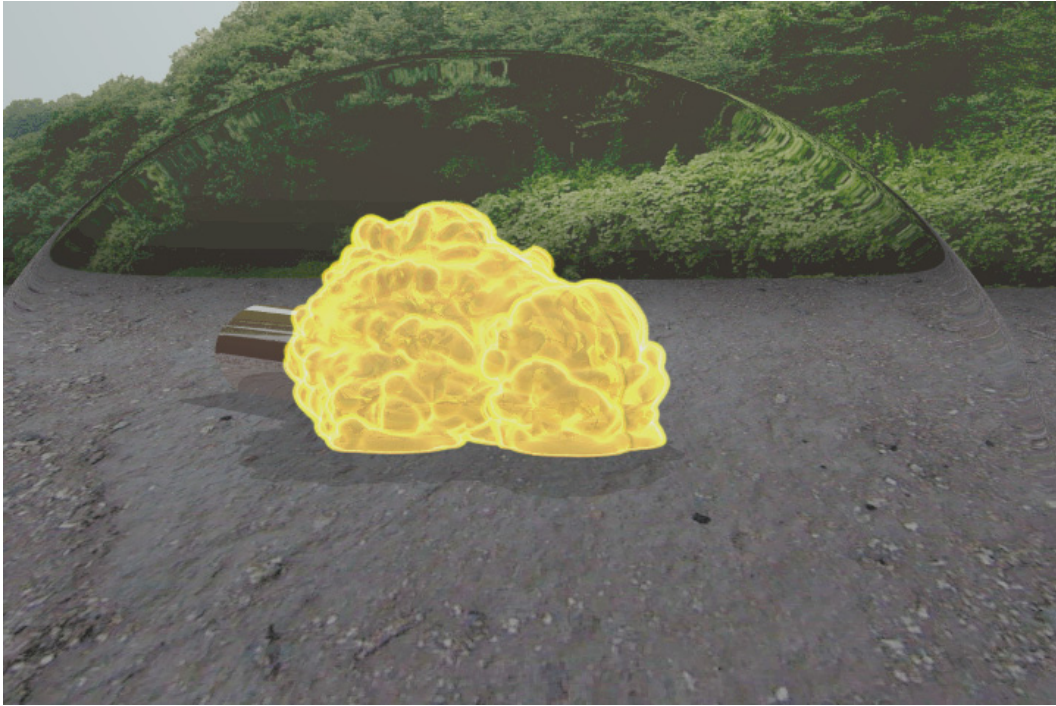


図 4 空気中を広がる衝撃波.

参考文献

- 1) Rasmussen, N., Nguyen, D., Geiger, W. and Fedkiw, R., "Smoke Simulation for Large Scale Phenomena", SIGGRAPH 2003, ACM TOG 22, 703-707 (2003).
- 2) T. Aoki: Comput. Phys. Commun. 102 (1997) pp.132
- 3) T. Aoki, Comput. Phys. Commun. Vol.142, p. 326 (2001)
- 4) T. Aoki, S. Nishita, K. Sakurai: Comput. Fluid Dynamics Journal , Vol.9, No.4 (2001) 406-417
- 5) T. Yabe, T. Aoki: Comput.Phys.Commun., Vol.66, (1991) 219-232.
- 6) F.Xiao, T.Yabe, T.Ito: Comput.Phys.Commun.93 (1996) pp.1.
- 7) <http://www.top500.org>
- 8) <http://www.povray.org>



図 5 東京工業大学・学術国際情報センターの Tokyo Tech Grid System (Pentium III 800 processors with Campus LAN).

氏名： 青木 尊之
勤務先：東京工業大学・学術国際情報センター
役職： 教授
勤務先住所：〒152-8550 目黒区大岡山 2-12-1
TEL: 03-5734-3667 FAX: 03-5734-3276
E-mail: taoki@gsic.titech.ac.jp

1985年 東京工業大学・大学院総合理工学研究科・修士課程修了
同年 富士通研究所（株）厚木研究所入社
1986年 東京工業大学助手
1992年～1993年 マックス・プランク量子光学研究所客員研究員
1997年 東京工業大学助教授
2001年 東京工業大学教授 現在に至る
2002年・2003年 ビジュアル・サイエンス・フェスタ優秀賞
2003年 日本機械学会・計算力学部門・業績賞
大規模数値流体計算・生体力学シミュレーションに従事。