

氏 名 ^{かた やま まさ ひで} 片 山 雅 英

授 与 学 位 博士 (工学)

学 位 授 与 年 月 日 平成13年7月11日

学 位 授 与 の 根 拠 放 棄 学 位 規 則 第 4 条 第 2 項

最 終 学 歴 昭和54年3月

大阪大学工学部原子力工学科 卒業

学 位 論 文 題 目 流体と固体の衝撃問題に関する数値解析的研究

論 文 審 査 委 員 主 査 東北大学教授 高山 和喜 東北大学教授 井小萩 利明
東北大学教授 澤田 恵介 東北大学教授 中橋 和博
東北大学助教授 斎藤 務

論 文 内 容 要 旨

衝撃波の研究においては、衝撃波のみならず、圧力波、応力波等の伝播速度が重大な意味を持つ。これらの粗密波の伝播速度は、それらが伝播する媒質の密度と密接に関係付けられるため、衝撃波研究では、本論文の題名に用いた流体と固体という分類法と共に、気体と凝縮媒体という分類方法が用いられる。これは、物質の三相の一つである液体は、対象とする問題の観点に応じ、気体、あるいは固体の何れかと一纏めにして論じられることを意味している。また、固体間的高速衝突現象や、爆薬によって発生した超高压が固体に負荷されるような現象では、Hugoniot 弾性限界を超えるような高压が固体中に発生するため、固体も液体と同様、流体的挙動を示すものと考えられている。このように、衝撃波研究では、気体と液体を流体として一纏めに分類し、それに対して固体という概念を対立させるよりも、液体と固体を一纏めにして凝縮媒体という概念を用いる方が合理的である場合も多い。その反面、衝撃問題では、しばしば衝撃力が局在化するため、それら局部以外の低圧下にある固体の材料強度も無視できないことが多い。

本研究は、標題では簡単のため、流体と固体という分類法に従っているが、液体と気体を一纏めにして議論することを意図するものではない。物質の三相を統一的に記述する連続体の力学に基づき、物質の三相が混在するような複雑な系の問題や、相変化を生じるような衝撃問題の数値解析法に関する研究を目的とするものである。衝撃的な条件下にある物質の三相の挙動を解析するために、連続体力学に基づいて開発されてきた衝撃解析法に関し、その物理的・数学的定式化方法について記述すると共に、それらの特徴を明確にし、代表的な衝撃問題である爆発問題と高速衝突問題に対する適用性と有用性を示す。

衝撃解析法の定式化に関しては、ラグランジュの方法とオイラーの方法、及びそれらの間の相互作用計算方法に焦点を当てて議論する。また、衝撃問題で重要な役割を演じる材料非線型性に関しては、状態方程式・構成方程式・破壊条件という分類法に従って記述・検討する。一般に、ラグランジュの方法とオイラーの方法は、それぞれ、固体、流体の模擬に適用性があるとされ、構造力学分野においてはラグランジュの方法が、流体力学分野ではオイラーの方法が用いられる場合が多い。複雑な系における衝撃問題では、相変化や媒質間の衝撃力の授受、波の透過と反射が支配因子となるため、一つの問題の中でこれらの両方法を使用できることが有効かつ必須である。特に、代表的な衝撃問題である爆発問題と超高速衝突問題では、物質の三相が混在する。すなわち、爆発現象には、気相から爆発する気体爆発問題と、爆薬のように固相、もしくは液相から爆発し気相の生成物を生じる場合がある。何れの場合

にも、衝撃問題としての興味の対象は爆発現象そのものに留まらず、爆発後、周囲の媒質に与える影響を知ること
 及び場合が多い。一方、超高速衝突問題においても、衝撃力に起因する固体材料の液化や気化が生じる。したがっ
 て、流体-固体、流体-流体、固体-固体の間の相互作用を自由に扱えることが必要である。換言すれば、ラグラン
 ジェとオイラーの方法間の相互作用計算機能や、各方法自身の相互作用計算機能が必要である。

本論文では、このような衝撃解析法の定式化について記述し、それを踏まえて、(1)流体と構造物の衝撃的相互作
 用問題、(2)気体爆ごう時構造応答問題、及び(3)相変化を伴う超高速衝突問題、という三種類の代表的な衝撃問題
 に対し、実験結果との比較を交えながら、数値的衝撃解析法の妥当性と有用性を示す。

まず、流体と構造物の衝撃的相互作用問題として、高速増殖炉の HCDA (炉心崩壊事故) 解析として知られる耐
 衝撃問題を取り上げる。燃料棒と液体ナトリウムとの爆発的な反応による仮想的な爆発事故を想定した実験では、炉心
 の爆発力を低爆速の火薬で、液体ナトリウム冷却材を水で模擬する方法が採用される。この模擬実験に対する数値
 解析を実施し、実験結果との比較を通じ、その適用性について確認すると共に、HCDA 事象の物理を明らかにする。

Figure 1 の左側に示した模式図は、計算に用いた解析モデル図である。実験での爆発源である火薬、水、及び充
 填気体を、multiple material オイラーの方法による単一の差分空間で模擬している。炉内構造物である鉛製円筒はラ
 グランジェの方法で、その周りに貼り付けられているアルミニウム製の円筒は、ラグランジェの方法の一種であるシェル
 要素で模擬している。炉容器部分についてもシェル要素で模擬している。これらのラグランジェ、シェルの各計算メッ
 シュと流体に対して適用したオイラー・メッシュの間には、ラグランジェ・オイラー相互作用境界条件を、炉内構造物のラ
 グランジェとシェル・メッシュの間には結合境界条件を適用した。一方、火薬の領域には、ガス・バグ・モデルを適用し
 た。この爆発源のモデルは、別の実験によって計測された火薬の威力を模擬する状態方程式に相当する。ガス・バグ
 内は圧力が一様で、その圧力は、ガス・バグ領域全体の体積膨張と共に減衰するものと仮定される。

Figure 1 の右側に示した二つの時刻歴は、左側のモデル図内に○印と◁印で示した位置における、それぞれ、水
 の圧力と炉容器のフープ方向ひずみの時刻歴である。両履歴共に実験結果とかなり良く一致している。本問題に関
 連して、流体内各点における圧力履歴と炉容器等構造物のひずみ履歴、及び時系列の速度分布と圧力分布を可視
 化することにより、炉内のピーク圧力の発生と炉容器変形の物理が明快に説明され、実験によっては解明されなかつ
 た問題も明らかになった。また、メッシュ依存性等の数値解析上の問題についても議論、検討された。

第二の気体爆ごう時構造応答問題に関しては、衝撃解析法における爆ごう現象の定式化方法について検討し、
 特に気体爆ごうに対する Gordon-McBride の爆ごう特性計算法と組み合わせた数値的モデル化方法を提案する。爆
 ごう過程の数値解析モデル自身は、気体爆ごうと爆薬の爆ごう現象の両方に適用できるものである。また、構造系の
 健全性評価を主眼とするため、三次元セル構造のような二次的な圧力振動や小さなスケールの問題は考慮の対象外
 である。尚、爆ごう物質と構造物の相互作用計算のモデル化方法は、流体と構造物の相互作用問題で述べたものと

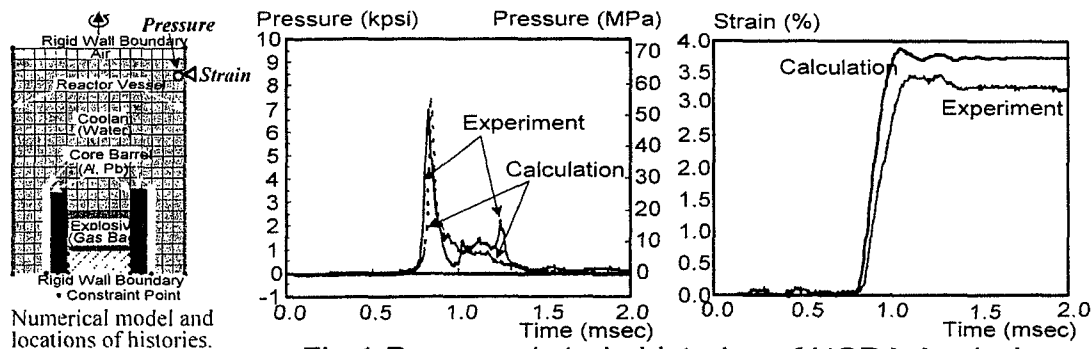


Fig.1 Pressure / strain histories of HCDA Analysis.

同様である。

本問題の数値解析結果を Fig. 2 に示す。爆
ごう気体であるメタン/ブタンと酸素の予混合気
は、常温・常圧下、化学両論比で混合されてい
ると仮定している。厚さ 300 mm のコンクリート
建屋には、鉄筋を模擬した厚さ 5 mm の鋼板が
前・背面から内側に共に 50 mm の位置に入っ
ているとしている。内部構造物は無筋のコンクリ
ートである。内部構造物によって爆ごう波の伝
播する軌跡が影響される効果は、解析機能に

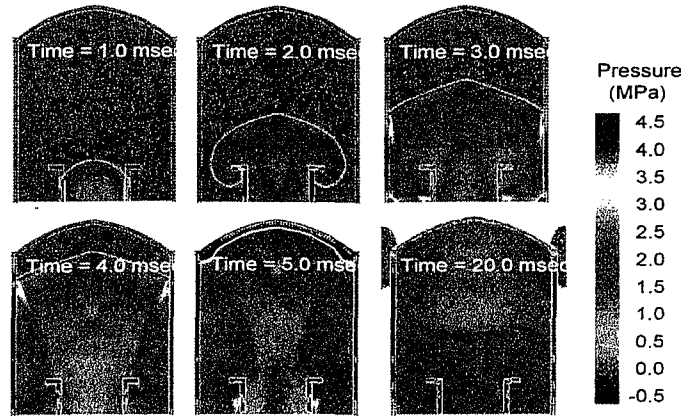


Fig.2 Gas explosion analysis in a concrete st

によって自動的に考慮されている。この混合気体の定常爆ごうによる Chapman-Jouguet の爆ごう圧力は 3.1 MPa である
が、図は爆ごう後の圧縮によってより大きな 5 MPa 級の圧力が評価されていることを示している。この解析では、恣意
的に建屋胴部とドーム部の接合条件をコンクリート強度の接着力だけと仮定したため、約 16 ms にドームが吹き飛ばさ
れ気体が噴出している。

第三番目の問題である相変化を伴う超高速衝突問題では、スペース・デブリ (space debris、宇宙ゴミ) の宇宙機へ
の衝突問題に関連し、2 km/s から 15 km/s に至る超高速衝突問題に対する解析手法について記述し、現時点におい
て実施可能な地上実験結果と比較検討を行った。解析手法のうち材料モデルに関しては、高速変形にさらされる動的
的・非線型な材料挙動、特に固体材料の材料強度のひずみ速度や温度依存性、衝撃による気化過程の模擬方法に
ついて記述し、検討した。

本問題に関して、数値解析結果と実験結果を比較した例を Fig. 3 に示す。上段は京都大学工学部の火薬銃を用
いて約 14 g の飛翔体を約 2 km/s に、中段は東北大学流体科学研究所の二段式軽ガス銃を用いて約 3.5 g の飛翔体
を約 4 km/s に、下段は宇宙科学研究所のレールガンを用いて
約 1 g の飛翔体を約 7.5 km/s に加速した実験である。それぞれ、
38.9、22.2 mm の二種類の厚さの標的について、実験と数値解
析の結果を示している。何れの加速方法でも飛翔体の運動エネ
ルギーがほぼ等価になるように実験条件を設定している。各計
算結果は変形状・変形形態共にほぼ実験を模擬している。特
に、下段左側の計算結果は、背面附近にスポール破壊を評価し
ており、実験結果と良い一致を示している。下段右側のケース
の場合にも、初期の段階で同様の現象が起きた後に貫通している
ことが、別の解析結果の視覚化から知ることができる。

これらの数値的衝撃解析による視覚化を通じて、複雑な系の動的
的、非線型、非定常な衝撃的現象の物理を容易かつ明快に、さ
らには、より深く理解できることを示した。また、未知の問題に対
する予測ができると共に、理想的な条件による数値実験の実施
により、想定した問題に関する因果関係の特定等、物理の解明
に対しても威力を発揮することを明らかにした。

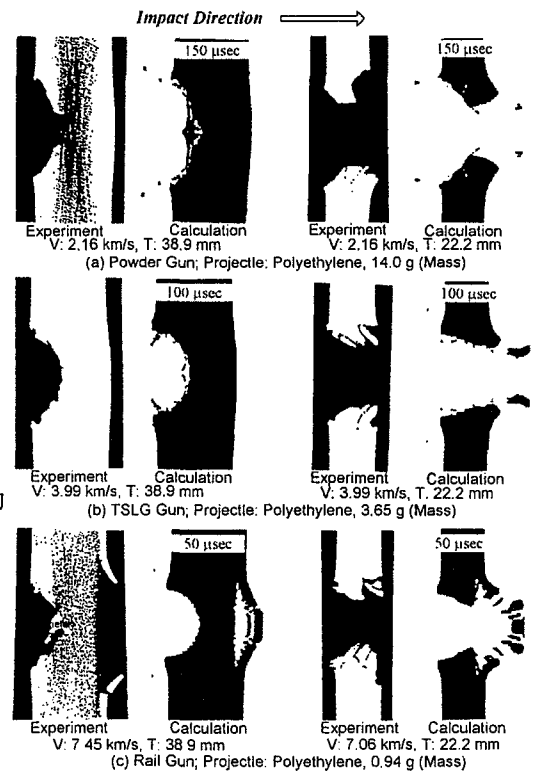


Fig.3 Hypervelocity impact analysis:

審査結果の要旨

流体中の構造物に強い衝撃波が作用し固体中に非常に短時間にユゴニオ弾性限界を超える応力が発生するとき、構造物の変形と内部の波動は本質的に連続媒体中の非線形波動方程式で記述できることが知られている。このとき固体の内部を伝播する衝撃波と流体中の衝撃波とは複雑な相互作用を示し、固体の変形はその干渉の結果として現れる。固体・液体・気体を統一的に取扱うなど、衝撃問題の定量的な解明は重要な研究課題である。本論文は、流体と構造物の衝撃的相互干渉を数値流体的な手法で明らかにした研究成果を取りまとめたもので、全編5章よりなる。

第1章は緒論である。特に、ここでは衝撃解析法の開発の歴史と研究の背景が詳述されている。

第2章では、ラグランジュ解法とオイラー解法を組み合わせた数値計算法について詳細に論じ、この方法を高速増殖炉の仮想的炉心崩壊事故の模擬および爆発成形問題に適用し、流体の中の波動と固体の弾塑性挙動の機構を解明している。これは有用な成果である。

第3章では、可燃性予混合気中に発生する爆轟波と鉄筋コンクリート構造物との複雑な干渉について、反応流体と構造物に対して様々の状態方程式を導入して数値解析することに成功している。この解析法は産業爆発事故の事例解析に新しい手法を提供するもので、高く評価されるべき成果である。

第4章では、相変化を伴う高速衝突を論じ、国際スペースステーション計画に参加する日本実験棟の基礎開発にも関係し、高速飛行体が固体標的に衝突する現象の数値解析を詳述している。特に、スペースデブリが様々の構成材料からなるバンパーシールドを貫通する現象の解明を試み、様々の条件下で衝突孔の形成過程およびデブリ雲の発生など実験とよく一致する結果を得て、信頼性の高い数値模擬に成功している。これは重要な知見である。

第5章は結論である。

以上要するにこの論文は、衝撃波負荷および高速衝突に伴う複雑な流体と固体との干渉過程を数値模擬する手法をより精緻に展開し、様々の複雑な事例を詳細に解析することに成功し、種々の新しい知見を導いているもので、衝撃波工学、数値流体力学の発展に寄与するところが少なくない。

よって本論文は博士（工学）の学位論文として合格と認める。