

報告番号 <sup>\*</sup>甲 第 1562号

# 主論文の要旨

題名 多相デトネーション伝播の速度と機構

氏名 長谷川 達也

## 主論文の要旨

報告番号

※甲第

号 氏名

長谷川 達也

本論文は多相デトネーション伝播の速度と機構を解明するために行なわれた実験的及び理論的研究をまとめたものである。

多相デトネーションには様々な形態があるが、本研究では気泡を含む媒質中のデトネーション及び壁面の触媒作用を受ける気相デトネーションを取り上げる。気泡を含む爆薬や推進薬のデトネーションでは、気泡と衝撃波の干渉によって形成される高温高圧のホットスポットと言われるものがデトネーション伝播に重要な役割を果たしている。このホットスポットの実体及びその形成機構を解明することは事故対策や爆発制御にとって必要不可欠であるが、現在のところ極めてあいまいにしかなされていない。また原子炉の異常沸騰により発生すると言われている酸水素気泡などの反応性気泡の爆発伝播（気泡デトネーション）は、本論文で初めて現象の存在が指摘されるまで全く研究されておらず、災害防止上その伝播機構の解明が緊急の問題となっている。壁面の触媒作用による気相デトネーションの速度減少は気相デトネーション研究の分野でもほとんど取り上げられていない問題であるのみならず、比較的知られていない低温固体触媒上の反応機構研究にも役立つ。従って本論文では非反応性及び反応性気泡の

## 主論文の要旨

報告番号

※甲第

号

氏名

長谷川 達也

衝撃波との干渉、気泡デトネーションの伝播、そして酸水素デトネーションの速度減少解明を目的として研究が進められた。

具体的には、まず均一に気泡を含む液体中の微小圧力波伝播が熱伝達を考慮して解析され、伝播速度の低下と圧力波の分散が調べられた。さらに衝撃波により圧縮を受ける単一球形的気泡振動が解析された。実験面では縦型衝撃波管を用いて水及びグリセリン中気泡の衝撃波による変形が高速度カメラで観察され、振動気泡の理論解と比較された。

次に実験で観察された非球形気泡の衝撃波による変形を説明するため変分法とルジャンドル多項式展開を用いた解析が行われ、液体の流れや初期形状などのパラメーターが気泡変形に与える影響が調べられた。

気泡デトネーションについては、酸水素気泡を含むグリセリン中に衝撃波を入射して気泡デトネーションを伝播させ、圧力波形、伝播速度、気泡の挙動が観察された。また酸水素反応を考慮した気泡運動が解析され、実験結果と比較された。そして気泡デトネーションの伝播速度が気泡の挙動に基づいて定式化され、その正当性が検討された。

気相デトネーションに対する管壁の効果については、細いアルミナ管中における酸水素デトネーションの伝播速度減

# 主論文の要旨

報告番号

※甲第

号

氏名

長谷川 達也

少が測定され、触媒作用と水の吸着を考慮したデトネーション速度の理論計算値と比較された。また管径、触媒性、表面粗さ、熱拡散係数の異なる管中でデトネーション速度が計測され、速度減少の原因が比較検討された。

本論文は7章からなり、その内容については各章ごとに要約し、以下に示すことにする。

第I章は序論であり、多相デトネーション研究の歴史と本論文の目的および研究方法の関連について述べている。

第II章では、本研究の基礎となっている気泡力学研究の発展について、まとめが行なわれた。

第III章では気泡を均一に含む液体中での微小圧力波伝播の問題が扱われ、気泡から液体への熱輸送を考慮して断熱音速と等温音速を含む波動方程式が導かれた。この波動方程式を用いて、ステップ状圧力波及び矩形パルス状圧力波入力に対する厳密解が求められ、熱輸送効果による圧力波の分散が示された。上述の解析で気泡は熱力学的に扱われ、力学的な気泡振動は含まれなかったが、衝撃波の通過により実際の気泡は収縮膨張振動を行なうことが知られている。そこで周囲圧力上昇に伴う単一球形的気泡の振動が解析された。初期気泡半径、ヌッセルト数、圧力上昇の立ち上がり時間、粘性を変えた時の解析結果が比較され、半径が小さくなると振動周期が短くなること、熱伝達が大きくなると気泡振動は減衰するが最高圧力は慣性の

## 主論文の要旨

報告番号 ※甲第 号 氏名 長谷川 達也

ため増加すること、気泡の圧縮には圧力の立ち上がり時間と振幅の積が小さくこと、グリセリン中では粘性により振動減衰が生じることが示された。この解析結果は後述の衝撃波圧縮を受ける気泡の実験観測結果と比較される。

縦型衝撃波管を用いた実験では、まず水とグリセリン中における衝撃波伝播特性が調べられ、管の弾性変形により伝播速度が著しく低下し、波形が分散することが示された。

また数種類の異なる気体を気泡として用い、水とグリセリン中における衝撃波到達後の気泡変形が高速コマ撮リシャドウグラフにより観察された。水中では気泡の初期における周期的振動、その後の二重及び三重円盤型不安定性の発達、最終状態における微小気泡への崩壊が観察され、周期的振動部分は断熱変化を仮定した単一球形気泡振動の理論と一致した。

一方、グリセリン中では二つの型の変形が観察された。気泡振動が球形を保ったまま減衰して不安定性が現われない場合と、パラシュート型に変形しその後二重円盤型不安定性が現われる場合である。ただしどちらの場合にも、衝撃波が誘起する液体流が作り出す圧力分布の作用で気泡上部が平らになる現象が観察された。

実験で観察された気泡は完全な球形でなく、扁平な楕円体または偏長楕円体であり、分散した衝撃波により気泡全体が圧縮されるのみならず、誘起液体流により衝撃波

## 主論文の要旨

報告番号 ※甲第

号氏名 長谷川 達也

の伝播方向へ移動した。第IV章では初期形状、圧力上昇及び液体流を考慮した上で非球形気泡の変形解析が行われた。解析には Hsieh 等によって展開されてきた変分法が用いられた。

水中偏平気泡の場合理論においても二重円盤型、三重円盤型不安定性が生じ、周期も実験とほぼ一致した。またルジャンドル多項式の打ち切り次数の違い  $N = 12, 16$  に対する計算結果が比較され、初期における低次例えば三重円盤型変形の計算においては低い方の  $N = 12$  で十分であることが示された。時間の経過と共に打ち切り次数  $N$  に対応する高調波成分の振動振幅が大きくなり、やがては発散し計算は続行できなくなった。

計算から得られる偏平楕円気泡の縦・横半径の平均変化と平均初期半径を用いた球形気泡の半径変化を比べると周期はほぼ一致し、最小寸法付近を除けば平均振幅も一致した。従って、III章において実験から得られた非球形気泡の平均半径変化が球形気泡の理論値と一致したことは、偶然ではなかつたわけである。

衝撃波が液体流を誘起する場合には、Kelvin-Helmholtz 不安定性により静止気泡の場合よりも不安定性の出現が早期に起こることが示された。また偏長気泡の方が偏平気泡に比べ不安定性を起しやすいくとも示された。

グリセリン中の偏長、偏平、球形気泡の変形解析により、初期形状と不安定性の出現が強く関連をもつことが示され

## 主論文の要旨

報告番号

※甲第

号

氏名

長谷川 達也

た。またグリセリンを用いた実験に対応して気泡半径、衝撃波圧力、誘起流速が大きいので、ウェーバー数、ボンデ数ともに大きく、水中気泡の場合よりも早く不安定性が発達し、高調波成分の発散がより顕著に生じた。

第V章では酸水素混合気泡を含むグリセリン中に衝撃波が入射され、気泡の爆発が衝撃波伝播と気泡の挙動に及ぼす影響が調べられた。その結果酸水素混合気泡が自らの爆発が作り出す圧力波によって連続爆発するという気泡デトネーションが初めて観測された。まず液中衝撃波の増幅、構造の変化を以て伝播速度の増加が確認されるとともに、気泡初期半径の違いにより爆発伝播に限界が現われることが示され、現象が気泡デトネーションであることが示唆された。また気泡内反応を考慮した爆発気泡の理論的挙動は高速コマ撮りカメラで撮影された挙動とほぼ一致した。

続いて気泡連鎖爆発伝播を確認するために複数気泡の挙動が同時観察され、気泡の爆発が伝播し、衝撃波と同じ速度であることが示された。これらの事実の積重ねにより、気泡連鎖爆発が衝撃波伝播を維持する気泡デトネーションが存在することが確かめられた。また衝撃波圧力の三点測定によると、実験で得られた気泡デトネーションは非定常伝播をしている途中で、伝播速度、圧力振幅がしだいに減少しながら、漸近的に一定値に近づく傾向を示した。

## 主論文の要旨

報告番号 ※甲第

号氏名

長谷川 達也

最後に、気泡の挙動に基づく気泡デトネーション伝播速度を与える式が求められ、実験における気泡デトネーションの伝播速度を説明した。

第VI章では、いくつかの金属酸化物を表面にもつ管中で、 $H_2+O_2$ 、 $H_2+2O_2$ 、 $3H_2+O_2$  混合気に対するデトネーション速度が Chapman-Jouguet 速度から最大 20% 減少することが先ず実験的に示された。この速度減少は境界層を考慮した抵抗からは説明されず、管表面におけるいくつかの触媒反応または水の吸着を考慮することによるのみ説明された。ただし、触媒と吸着のいずれが速度低下の真因であるかを特定することはできなかった。水の吸着作用が原因とすると凝縮係数が混合気によつて一貫した値をもたない点が弱く、触媒作用が起きているとするとその係数の高すぎるものが難点となるからである。

続いて管径、管表面材質（触媒係数、凝縮係数に利く）、表面粗さ、熱拡散係数の異なる管を用いて  $H_2+O_2$  デトネーション速度が比較され、アルミナ管では水の吸着、真ちゆう管では触媒作用によつて速度減少が生じていると考へた方がデータの解釈に一貫性が生ずることが確認された。

第VII章は総括であり、第III章から第VI章までの結論がまとめられ、本研究の成果について記述されている。

本研究第V章で発見された気泡デトネーションは今までに知られていないデトネーション形態であり、応用上重要なものを含んでいる。