

氏 名 お ぎ そ ち あき
小 木 曾 千 秋

授 与 学 位 工 学 博 士

学位授与年月日 昭和 61 年 7 月 9 日

学位授与の根拠法規 学位規則第 5 条第 2 項

最 終 学 歴 昭和 44 年 3 月

横浜国立大学大学院工学研究科電気化学専攻

修士課程修了

学 位 論 文 題 目 蒸気爆発に関する実験的研究

論 文 審 査 委 員 東北大学教授 武山 斌郎 東北大学教授 相原 利雄

東北大学教授 大谷 茂盛 東北大学教授 斎藤正三郎

論 文 内 容 要 旨

本論文は、従来、実験的事実に欠けていた蒸気爆発の特性に関する実験を行い、得られた結果をもとに蒸気爆発の機構について考察し、さらに他の物質系の蒸気爆発特性を評価するための新しい実験方法を提案し検討したことを内容としており、全 6 章より成っている。

第 1 章は緒論である。まず、蒸気爆発 (Vapor Explosion, Dampfexplosion) 現象を、『過熱液体が急激に蒸気化して衝撃的な圧力波を発生する爆発現象である。』と広義に定義し、蒸気爆発現象を次の 2 種類に分類した。第 1 は飽和温度の液体とその蒸気の間に達成されている相平衡が破綻し、液体が急激に沸騰蒸発することにより発生する蒸気爆発である。第 2 は低温度の液体がその沸点以上の高温度の液体と接触して急速伝熱を起し、低温液体が急激に沸騰蒸発することにより発生する蒸気爆発である。第 1 を相平衡破綻型蒸気爆発、第 2 を熱移動型蒸気爆発と称した。そこで、これまでに発生した事故の調査結果などから、各蒸気爆発の発生前後の現象過程を示し、各蒸気爆発に関する従来の研究を検討し、本研究との関連を示した。すなわち相平衡破綻型蒸気爆発の発生機構の詳細に関しては、蒸気爆発特性や発生条件が不明であり、現実問題として重要な容器に生じた開口部の大きさによる爆発性の差異、水以外の液体の蒸気爆発特性、特に反応暴走に続く蒸気爆発の発生の可否やその発生条件も不明であることを指摘した。また熱移動型蒸気爆発については、発生機構および挙動の細部に不明確な点があり、種々の条件に対する定量的な実験事実や説明は欠けて

いる。特に、蒸気爆発の挙動を解明するのに重要な圧力波形を系統的に取り扱った実験や、フラグメンテーションを起こすのに重要な表面張力の影響についての実験事実が不足していることを指摘した。

第2章では、高圧下で飽和水を内蔵する容器内に達成されている相平衡を、容器に設置した破裂板を破ることにより破綻させる実験を行い、過渡的な様相と圧力の変化を測定し、蒸気爆発現象の特性を調べた。その様相および従来の研究結果から、相平衡の破綻により生じる蒸気爆発をモデル化した。そこで容器内の各位置における圧力波の測定結果を比較し、容器内の位置により圧力波形が異なること、様相と圧力波形が対応していることなどを示し、モデルの妥当性を検討した。圧力波形に認められる特徴のある点より得たポジションダイアグラムから稀薄波、圧縮波、水滴の挙動および誘導期の存在などを知ることができ、蒸気爆発の様相との対応ができることを示した。開口部の面積の相違が圧力変化に及ぼす影響を調べた結果、減少圧力、圧力減少時間、最大圧力などが開口部の面積に依存し、開口面積が大きいほど減少圧力は大きく、圧力減少時間は小さく、最大圧力は大きくなることがわかった。減少圧力と圧力減少時間は圧力減少速度に関係するので圧力波形に及ぼす開口面積の影響を示すパラメータとして圧力減少速度を考慮した比開口面積(A^*)を用いて実験結果を示した。開口面積が小さい場合には最大圧力が初圧より小さく、初期温度が393~423 Kの範囲では、比開口面積が70~110 m⁻¹以上の範囲で初圧以上の圧力を発生するような『激しい蒸気爆発』を生じ、比開口面積が220~750 m⁻¹以上の範囲で初圧の約2倍の大きさの衝撃的な圧力を検出した。初期温度や初圧の最大圧力への影響を調べた結果、温度・圧力が高くなると最大圧力が大きくなり、それらの対数値の間には直線関係が認められた。

第3章では、各種液体の相平衡破綻型蒸気爆発の特性を調べるために、始めに液体窒素を用いて第2章と同様の実験を行った。実験の結果、初期温度が93~118 Kの範囲では、液体窒素は水のような『激しい蒸気爆発』を生じなかった。蒸気爆発の激しさは相平衡の破綻により発生する蒸気量に依存すると考え、その量を液体の種類や初期条件、すなわち液体の比熱、分子量、蒸発潜熱、沸点、開口部が生じたときの温度、圧力および重量から求め、実験結果や文献値と比較した結果、この蒸気体積の大きなものほど最高圧力値などの蒸気爆発性が顕著となる傾向があることが明らかとなり、この蒸気体積を比べることにより各種液体の蒸気爆発特性の相対的な比較ができることを示した。

次に、密閉状態の容器内での懸濁重合反応中に攪拌が停止したとき、反応が暴走し、蒸気爆発を生じるか否かを実験で確かめた。始めに攪拌停止に伴う重合暴走時の反応特性をオートクレーブを用いて調べた。次に容器内で懸濁重合反応中に攪拌を停止させて反応を暴走させ、高温・高圧になったところで容器に設置した破裂板を破ることにより蒸気爆発現象が生じるか否かを調べた。その結果、蒸気爆発現象が生じ、爆発の大きさは水より小さいことを確認した。

第4章では、熔融塩と水の接触により生じる熱移動型蒸気爆発の特性を明らかにしようとした。

始めに、実験で用いる5種類の溶融塩からなる2成分系混合塩の物性のうち従来測定されていない状態図と表面張力を測定した結果を示した。次に、各種の溶融塩を水中に落下させたときの様相と圧力波形から、接触後の挙動は4種類に分類できることを示した。また、得られた圧力波形や排水量を比較すると溶融塩の組成により顕著な差が認められた。図1には、炭酸ナトリウム-塩化ナトリウム系の溶融塩と水を接触させたときに得られた挙動および圧力波形を爆発率(P_r)と組成との関係図の中に示した。これらの蒸気爆発のうち、誘導期が存在する爆発の場合には、水中に大きな衝撃圧を生じ、また排水量も多くなることからこの爆発は激しいものであるが、誘導期が存在しない爆発の場合には水中に大きな衝撃圧を生じず、また排水量も少ない小規模な爆発現象であった。また、爆発率と表面張力との関係を調べた結果、両者に相関があることが示された。各種の溶融塩の組合せによる実験結果を総合すると、本実験条件においては1173 Kにおける表面張力が0.14 N/m以上の溶融塩は爆発しないが、0.14 N/m未満の溶融塩は爆発した。さらに、溶融塩と水の重量、温度、落下高さ、容器の底の材料などの諸因子が及ぼす影響を示した。また、蒸気爆発により発生する圧力を評価するために、爆発により生じる圧力を水槽内の2個所に設置した圧力計で同時に計測し、さらに爆発の挙動を調べることで爆心を知り、実験で計測した圧力値から任意の位置における圧力値を算出する方法を示した。得られた値をこれまでに提案されているモデルから計算した値と比較した。その結果、溶融塩・水系において発生する圧力は、モデルから予想される圧力値より低く、また予測される温度範囲以外であっても多少の圧力を発生すること、およびこのような実験方法で任意の点における圧力が推定できることなどを示した。

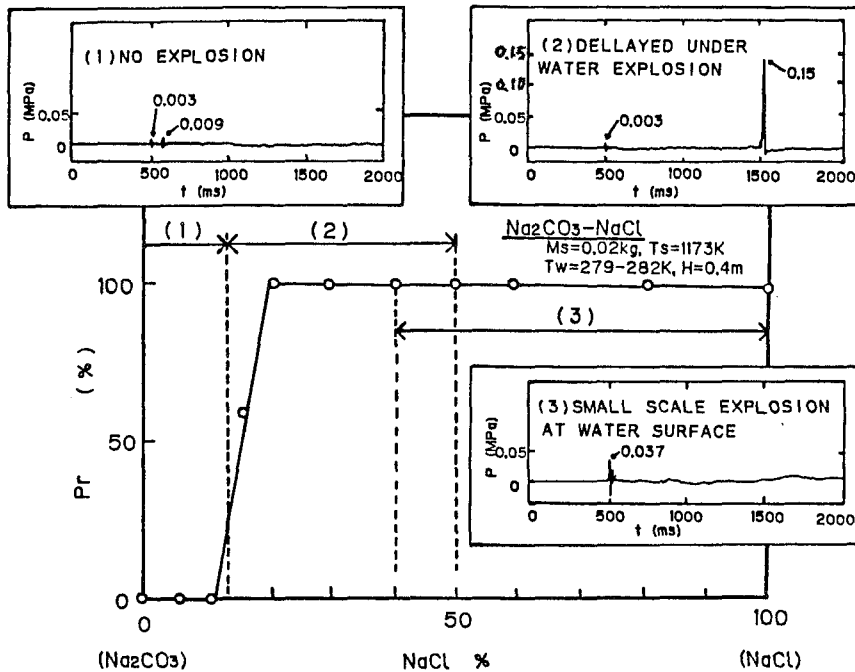


図1 溶融塩・水接触時の挙動，圧力波形，爆発率の組成による違い

第5章では、溶融塩の上に滴下した水滴が蒸発する様相を観察し、蒸発時間曲線を得ることにより広い温度差 (ΔT_{sat}) 範囲にわたって伝熱挙動を調べると共に、蒸気爆発機構の解明のためのひとつのアプローチを試みた。まず、第4章で蒸気爆発特性を調べた溶融塩のうち炭酸ナトリウム・塩化ナトリウム系の各組成の溶融塩を用い、蒸発の様相を観察した。また、蒸発時間を広い温度差範囲にわたり測定して、蒸発時間曲線を得た。蒸発時間曲線のなかには、瞬間沸騰を生じる温度差範囲を有するものがあった。4-2章で示した激しい蒸気爆発を生じるような溶融塩上では水滴が激しい沸騰音を伴う瞬間沸騰を生じることがわかった。この場合、瞬間沸騰を生じる条件では、急速な熱移動が行われていることを示しており、蒸気爆発を引き起こすひとつの条件を満たしている。瞬間沸騰を生じる温度差範囲を第4章で得た状態図中に図示すると、その範囲は溶融塩が融体と固溶体の共存状態にある範囲と一致するという結果を得た。そこで、この遷移現象の様相をモデル化し、潜熱と接触状態の相違により伝熱が急速に行われるものと考えた。また、上記のように蒸発の様相を観察し、蒸発時間曲線を得る実験（蒸発時間曲線法と称する）が、蒸気爆発現象や液・液直接接触現象を評価するひとつのアプローチになり得る可能性をさぐるために、他の高温融体と低温液滴の組合せにおける実験を行い、いくつかの実験事実を明らかにするとともに考察した。その結果、液滴の蒸発の程度に差異があることを認め、様相の観察、音圧波形の計測、蒸発時間の計測により沸騰の激しさや爆発性がある程度推定されることを示した。さらに蒸発時間曲線法により、ライデンフロスト膜沸騰の安定性、不安定になる温度条件と不安定さ、遷移域の存否とその大きさおよび起こり得る条件範囲などを知ることができることを示した。またこのようにして得た蒸発時間や温度差などからみかけの熱伝達率を算出し、一応の熱伝達特性が理解されることを示した。

さらに、蒸発時間曲線法と蒸気爆発特性を比較することにより、蒸発時間曲線法から蒸気爆発を評価する試みを検討した。上述の実験で得た瞬間沸騰蒸発の出現率と第4章で得た最高圧力値や排水量との相関を調べたところ、両者に良い相関があることを認めた。この結果および上記の諸特性を総合し、蒸発時間曲線法は少なくとも溶融塩・水接触時の蒸気爆発性のある程度評価することができる一簡易方法になることを確かめた。

第6章は結論で、本研究により得た結論の主要点を列挙した。

これらの実験研究は限られた条件のもとではあるが、蒸気爆発現象の一部を解明し、それに関する種々の事実を示した。

審査結果の要旨

容器内で急激な沸騰蒸発が瞬時におこり、衝撃的な圧力波を発生する蒸気爆発の研究が安全工学の観点から系統的に解析されるようになったのは最近のことである。蒸気爆発を大別すれば、飽和温度の液体と蒸気間の相平衡が何かの原因で破れて急激な沸騰がおこる相平衡破綻形と、低温度の液体とその沸点以上の高温液との直接熱伝達によって低温度の液体が沸騰蒸発して発生する熱移動形とに分けられる。

本論文はこれらの蒸気爆発の発生機構と挙動を実験的に明らかにしたのみならず、相平衡破綻形に関しては従来の推論に明確な考察を加え、熱移動形に関しては物質系の爆発に対する新しい評価方法を提案するもので、全編6章よりなる。

第1章は緒論である。

第2章では高圧力下で飽和水を内蔵した容器内の開口部を破断するとき生じる相平衡破綻による蒸気爆発を、伝ばする圧力波の計測、および沸騰様相の高速度写真の解析により、稀薄波の水面到達と沸騰の発生、圧縮波と拡張する二相流および水滴の挙動などを観測し、爆発のモデルを確立し、とくに、圧力波形に及ぼす開口面積、水温、圧力および水量の影響について考察している。

第3章は、第2章の実験を水以外の液体における相平衡破綻にまで発展させたものである。すなわち、液体窒素を用いた実験と水の場合とを比較検討し、液と蒸気の比体積と最高圧力値などの相関から、各種液体における蒸気爆発特性をそれらの物理量から推定出来ることを示している。さらに、重合暴走から生じる爆発現象を実現し、その発生限界について新たな知見を得ている。

第4章では、6種類の溶融塩と水の接触により生じる熱移動形蒸気爆発の特性を溶融塩の塊を水中に落下させるときの挙動から検討している。すなわち爆発率および排水量と溶融塩の組成および表面張力との関係、さらに、落下高さ、溶融塩の重量、水の温度および容器底の材質など諸因子の及ぼす上記関係への影響を述べている。

第5章では、熱移動形蒸気爆発の特性を評価するために蒸発時間曲線法を提案している。すなわち、広範囲の温度に保たれた各種物質上における各種液滴の蒸発様相と蒸発時間を測定し、ある特定の組み合わせの系と温度において爆発的な沸騰蒸発を起こす大きな熱伝達率の存在を確認し、第4章の蒸気爆発実験で得られた結果との相関性を考察している。

第6章は結論である。

以上要するに本論文は、蒸気爆発に関する数多くの実験的研究により、その発生機構と挙動を明らかにするとともに、安全の評価に対し、有用な示唆を与えるもので、機械工学の発展に寄与するところが少なくない。

よって、本論文は工学博士の学位論文として合格と認める。