

技術報告

液化酸素燃焼試験装置の開発

Development of Experiment equipment for LOX related combustion

上森一範*,	阿部智信**,	水野全***
UEMORI Kazunori,	ABE Tomonobu,	MIZUNO Masashi
久保田士郎****,	緒方雄二****,	和田有司****
KUBOTA Shiro,	OGATA Yuji,	WADA Yuji

液化酸素と可燃性物質の混合物を安全に爆発・燃焼試験ができる燃焼試験装置の開発を行なった。いくつかの重要な容器の予備的な爆発試験を実施して最適化をしたうえで、液化酸素と液化メタンの混合液に着火・爆発させ、試験装置に想定外の損傷がないことを確認した。これらの評価から、本装置は今後、液化酸素と可燃性物質が共存する系で、安全に燃焼・爆発実験が可能になることを示した。

Experiment equipment for LOX related combustion and/or explosion has been developed. We have confirmed that the experiment can test explosion experiments safety by preliminary tests of several important vessels. Finally, we estimated that the equipment can be used explosion test that include LOX and flammables mixture systems with safety.

1. はじめに

酸素ガスが関わる燃焼や爆発の試験装置は、可燃性ガスの爆発範囲の測定や最小着火エネルギーの測定の他、酸素ガス中での自然発火温度測定など、これまでに多くの方法が紹介されている。また酸素ガスが関わる燃焼や爆発事故に関わる再現実験等も、事故時の条件を再現したうえで実施することは、これまでに多くの実施例が紹介されている。一方、液化酸素に可燃性物質が混合している系の爆発濃度範囲や、着火エネルギーの測定、爆発威力の測定の他、金属片、触媒能力のある表面を持つ物質が共存する系など、液化酸素に固体や他の可燃性物質が共存する条件での燃焼や爆発実験の報告例は少ない¹⁻⁴⁾。更に安全に繰り返し実施できる手法についての紹介は非常に少ない。そのためこ

れら酸素ガスが液の状態での燃焼・爆発をさせることのできる試験装置を開発することは、上記燃焼範囲や着火エネルギーの測定の他、液化酸素に関わる事故の再現実験を安全に、かつ再現性よく実施するうえで、非常に重要な課題である。

これまでの液化酸素に関わる爆発、燃焼実験方法で代表的なものとしては、ASTM D2512-95(2002)があるが、同試験方法は液化酸素中に浸漬した可燃性固体(主にアルミニウムなどの金属薄板)に100Jの機械的な衝撃を与えて、金属の燃焼有無を測定するものである。本方法は着火源が機械的衝撃に限られる他、液化酸素に溶解した可燃性物質やその他の夾雑物が共存する系に応用することはできない。

また、ロケット推進薬として使用する液化酸素と液化メタンが、事故等により地上で爆発したことを想定し、これら混合物に着火させた報告もあるが、これらは常温、常圧での実験であることや爆発したときの周囲への影響を観察することが目的であり、ガス組成や液組成が連続的に変化する系であること、気相での着火及び火炎の液相へ伝播に再現性がないなど、爆発範囲の推定や着火エネルギーの測定に応用することは困難である。

*開発・エンジニアリング本部エンジニアリング統括部
エンジニアリング部供給技術課

**開発・エンジニアリング本部山梨研究所ガスアップ
センター開発二課

***開発・エンジニアリング本部山梨研究所
安全技術センター

****独立行政法人産業技術総合研究所
安全科学研究部門

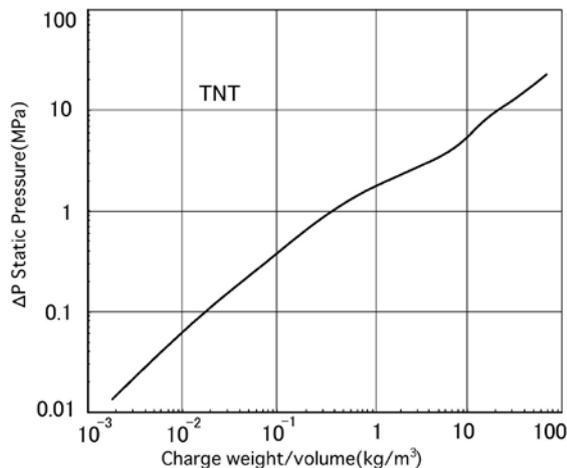


Fig. 1 Static overpressure from explosion in confined spaces

これらの背景から、筆者らは、一定の温度、圧力条件の基で液化酸素が関わる燃焼、爆発実験を安全に、かつ繰り返し精度良く実施できる実験装置の開発を以下におこなった。

2. 装置の原理と構造

固体、液体の爆薬は、TNT の爆発威力と比較し TNT 換算値として表す場合がある。液化酸素と液化メタンの混合物が爆発したときの正確な TNT 換算値は計測されてはいないが、薄葉らは 1 以下としている²⁾。

また、TNT が密閉容器中で爆発させたときの発生する内圧を Fig.1 に示す³⁾。これらから、一定量の液化酸素と液化メタンの混合物が定容容器内で爆発したときの容器内壁が受ける圧力を予想することができる。

一方、液化酸素及び可燃性物質を一定の組成で繰り返し替えし、同条件で着火、爆発させる試験設備には、以下の機能が必要である。

- ・ 試料容器内が 90K 前後の温度、大気圧付近の圧力が定常的に一定に保てること
- ・ 試料の爆発に伴う排ガスが系外に確実に排気できるシステムであること
- ・ 爆発に伴う発生圧力及び構成部品類の破損による損傷から十分に耐えられる強度のある容器内に試料溶液を保持できること(排ガスの系外への排出ができなかった場合も含む)
- ・ 安定かつ定量化した着火エネルギーを供与できることなどが上げられる。

これらの条件を満たした試験設備の構成を以下に示し、これらの開発に伴う実験を次項以降に解説する。

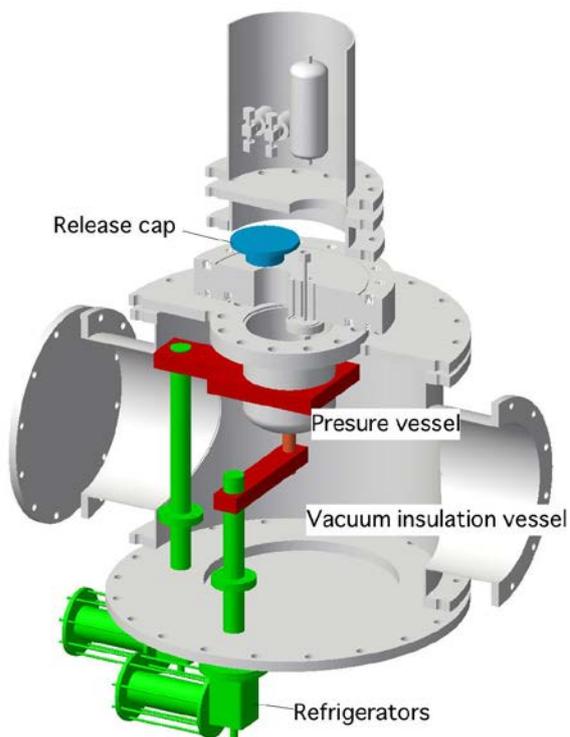


Fig.2 Structure of Experiment equipment for LOX

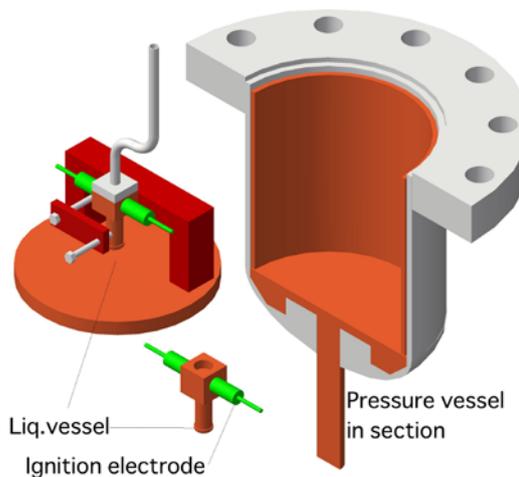


Fig.3 Pressure vessel and Liq. vessel

開発した試験設備の概念図を Fig.2 に示し、試験設備の基本構成とその概要を以下に示す。設備の主な構成は試料液を貯留する液化容器 (liq. vessel) とその周囲を囲む耐圧容器 (Pressure vessel), が真空断熱槽 (Vacuum insulation vessel) 内に納められる他、耐圧容器には排ガスを系外に放出するための圧力開放機構 (Release cap) 及びガス導入配管が接続される。これら詳細を以下に解説する。

液化容器と耐圧容器の概念図を Fig.3 に示す。

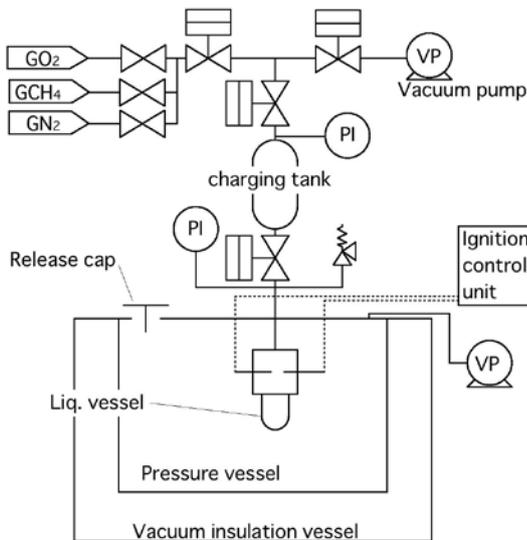


Fig.4 Flow diagram of Experiment for LOX

液化容器は耐圧容器の中心部に装備され、後述のHe冷凍機により冷却される。容器の上部(以下、ブロック部)には試料となるガスの導入配管及び着火のための放電電極が装備できる構造である。液化酸素を貯留する部分(以下、液溜め部)及びブロック部は銅など熱伝導の良い材質で製作され、He冷凍機からの冷熱を固体熱伝導で導き、冷却ができる構成と形状であるとともに、液溜め部の肉厚は可能な限り薄肉であることが好ましい。これらは、次項実験例で更に詳細に説明を加える。

耐圧容器は、想定される爆発物量と耐圧容器容積の関係から、Fig.1により必要な耐圧を想定したうえで、耐圧容器底部には固体熱伝導の経路を確保するための銅製の貫通部を設けている。

耐圧容器上部には、爆発時の排ガスを可能な限り素早く系外に排出できるように、圧力開放機構を設けている。圧力開放のためのRelease capは、可能な限り軽量であり、周囲に衝突して容易に変形して衝突のエネルギーを吸収し、できるだけ外部に影響がないことが重要である。

更に、液化容器へ試料ガスを導入するためのガスコントロール部として、Fig.4に示す機器類を装備した。

筆者らは、上記各構成部品設計の適性及び総合的な機能を評価するために以下実験をおこなった。

3. 実験

3-1. 常温爆薬試験

(1) 液化容器

液化容器は、試料ガスの導入や液化の他、他の夾

雑物を系内に導入できる構造である他、液が着火、爆発するときに同時に破損しやすいことが求められる。更に、破損容器破片が飛び散ったときの周囲へのダメージや製作コストなども考慮すべきである。筆者らは、液化容器の構造を最適化するために、いくつかの液化容器を試作し、液化酸素と液化メタン当量混合物が爆発するときと威力が同等以上のトリメチレントノリトロアミン((CH₂)₃(NNO₂)₃)を主成分とするC4爆薬を容器に充填し、大気圧、開放系で爆発実験をおこなった。液化容器の近傍には底部と側部それぞれ約50mm,100mmの場所に鉄板を置き、爆発後に容器破片の衝突痕を目視観察した。試験方法のイメージをFig.5に示す。試作容器は、①ロー付け構造と、②削り出し構造を試験した。ロー付け構造の容器は、市販の銅配管(OD15.8mm,t=1)にキャップ(ID15.8,深さ11mm)を銀ローで溶接した。削り出し容器は、外径15.8mm,t=0.2mmの削り出し部品をそれぞれ電極が装着できる銅ブロックに溶接した。また、C4爆薬の着火には雷管を使用した。

(2) 耐圧容器

耐圧容器には、液化容器内での爆発による破損がないことが最も要求される他、圧力開放機構の機能も確認する必要がある。耐圧容器は、液化酸素と液化メタン当量混合物が最大で3mL爆発したときに受ける爆発圧力をFig.1から推定し、安全率を約2倍として容器の耐圧及び容積を決定した。

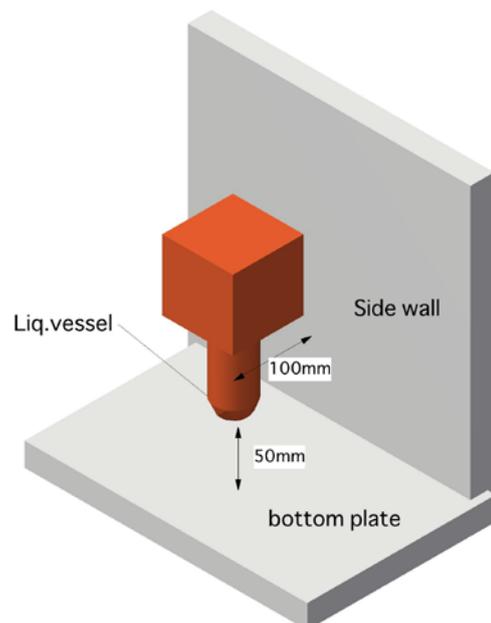


Fig.5 Test method of explosive test(liq. vessels)



Fig.6 Results of explosive tests(liq. vessels)

耐圧容器容積を約 8L とし、耐圧を 5MPa として設計した。また、圧力開放部分は排ガスを排出できる面積を最大にできるようにレイアウトを検討し、約 100mm φ の口径を確保した。前記液化容器の試験で、耐圧容器への損傷が少ないと期待された構造である削り出し構造の容器に C4 爆薬を装填し、耐圧容器内で雷管を使用して爆発試験を行なった。液化酸素と液化メタンの当量混合液 3mL と同等の C4 爆薬量は約 4.1g であるが、容器の耐爆性能を検証するための試験であるため、C4 爆薬を 5g 装填した。耐圧容器外表面胴部中央には、歪みゲージを取り付け、爆発時の容器の歪みを計測した。

3-2.実液試験

上記常温爆薬試験において、爆発時の損傷や各部位の設計健全性を確認したうえで、液化容器を耐圧容器内に収納し、He 冷凍機で液化温度まで冷却した。更に液化容器内に液化酸素及び液化メタンを調製し、液化容器ヘッドスペースで放電着火させ、実験設備が期待通りの性能を確認するかどうかの確認試験をおこなった。

4. 結果

4-1 液化容器試験

ロー付け容器と削り出し容器の爆発後の写真及び底部、側部の鉄板への破片の衝突痕比較を Fig.6

に示す。削り出し容器はロー付け容器に比べ明らかに鉄板への粒子衝突痕が浅く、衝突した粒子も細かく、均一に分散していることが観測されている。また容器上部に溶接により接続されている銅ブロックについても、ロー付け容器の方がダメージが大きいことがわかる。これらから液化容器の肉厚はできるだけ薄く、容器材質も少ないほど外部へのダメージが少なく、液化容器の耐圧も小

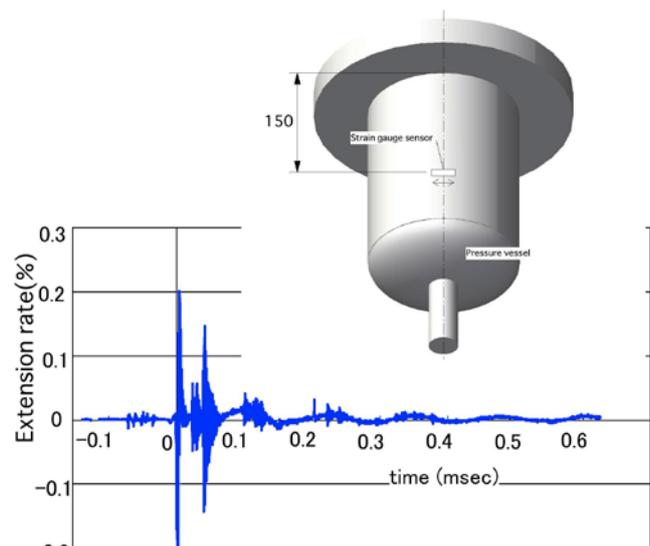


Fig.7 Strain gauge position and explosive test result (Pressure vessel)

さいことが望ましいことがわかる。

4-2 耐圧容器試験

耐圧容器胴部中央に添付した歪みゲージの計測結果を Fig.7 に示す。爆発直後に最大 0.2%の歪み量を計測しているが、時間とともに減衰し、元の状態に戻っていることがわかる。また、実験を通じて圧力開放機構の動作も想定通りに作動し、耐圧容器自体にも損傷がなかったことから、耐圧容器内で安全に爆発実験が可能と判断された。

4-3 実液試験

実液試験の着火時の条件と結果をまとめて Table 1 に示し、損傷した液化容器を Fig.8 に示す。表では、気相だけが爆発したと推定される結果(以下爆燃とする)と、液相も爆発したと推定される(以下爆轟とする)例を示す。爆轟が観測された実験では、爆燃時よりはるかに大きな爆発音を観測しているが、どちらの条件も耐圧容器には損傷がなかった。液化容器や Release cap,耐圧容器内のリード線,圧力センサの受圧部など破損が予想される箇所以外にも損傷は観測されず、爆発実験が安全にできる設備であることを確認した。

Table 1 Test Results

Sample No.	CH ₄ Concentration(%)		Spark Enegy (mJ)	Results
	Gas Phase	Liq.Phase		
1	13	64	28	Deflagration
2	13	45	252	Detonation

5. 考察

5-1 液化容器

先に述べたとおり、液化容器は、爆発時に容易に損壊する構造であるほど、耐圧容器へのダメージが少なくてすむことがわかった。耐圧容器へのダメージは、液化容器破片の量と飛散分布が大きく

関わってくると考えられる。飛散量は液化容器を構成する素材量に比例するため、素材量は少ないことが好ましい。また、ロー付け構造のように、一部分でも素材量が多い部位があると、その部分が飛散したときに多量の破片が集中して衝突することが Fig.6 からわかる。更に液化容器の耐圧性が高いと、爆発時に大きな爆発エネルギーが蓄積するまで液化容器が損壊しないことで、液化容器破片が大きな運動エネルギーをもって耐圧容器壁に衝突することが予想される。これらから、液化容器はできるだけ損壊しやすい構造、素材で構成されることが望ましいと考えられる。

5-2 耐圧容器及び圧力開放機構

液化容器内で爆轟が発生した場合、受ける衝撃波よりも圧力開放機構の作動が遅いことが十分に予測できる。従って耐圧容器の強度は、圧力開放機構の作動がなくても十分な強度及び容積を確保する必要がある。本実験では圧力開放機構の動作により完全な密閉系での爆発ではないものの、爆発の圧力に十分耐えられるものであり、かつ一次的な内圧を受けても歪みが元に戻っていることなどからも、繰り返しの爆発実験にもある程度耐えうると判断できる。

また排気ガス放出時には Fig.2 に示す Release cap が飛翔するため、Release cap 本体も軽量で損壊しやすい構造と材質を選択することが好ましい。

5-3 実液試験

(1)爆轟と爆燃について

Table 1 に示す実験結果において、液中のメタン濃度が非常に濃いときの着火では、爆音が少なく液化容器の破片が大きい傾向にあった。これに対し液組成が薄い条件では、爆音が遥かに大きく、Fig.8 に示す様に液化容器の破片が非常に細かいことが観測されている。特に破片の大きさについては、反応速度や爆速に大きく影響があると推定され、液組成が濃い条件では、気相のみが着火し、その火炎が液相に伝播せず、容器も爆燃によりゆっくりと損壊したことが破片を大きくした要因と推定できる。一方、液組成が薄い場合は、気相の火炎が液相に伝播後、液状態のまま燃焼反応がおき、大きな爆発音とともに大きな力が急激に液化容器にかかり、容器を破損させたと推定される。

(2)メタン-酸素系爆発について

メタン-酸素系の爆速は、ガスでは約 2km/sec、液体混合物では 5~6km/sec であるとされている(いずれもメタン 30~40%濃度のとき)⁴⁾。常温爆薬試



Fig.8 Results of LOX explosion tests(broken fragments)

験で使用した C4 爆薬は、今回の使用条件では爆速約 7km/sec であり、本実験のように凝縮系で威力のある爆轟を呈する⁶⁾。従って、メタン-酸素系を想定した予備的な評価実験として、C4 爆薬の使用は妥当であると考えている。常温爆薬試験における液化容器の破片は、実液試験における爆轟したと推測されたときの破片形状に似ており、これらからも液化メタン-酸素混合物が爆轟したときの爆発現象は C4 爆薬のそれに近いものであったと考えられる。

一方、液化酸素と液化メタンの混合物の爆発範囲や着火の有無については、いくつかの文献があるものの、その濃度範囲や着火エネルギーについては、現段階ではデータが少なく、更に再現精度が期待される。

6. まとめと今後の課題

これまでの結果から、液化ガスの爆発実験を安全に再現性よく実験可能な試験設備の開発に成功した。本報告中の実液試験での液化酸素と液化メタン混合物の爆発試験は、利用の一例であり、今後は本試験設備を基本構造として、

- ・液の爆発範囲、着火エネルギーの測定や爆発威力の測定などの他
- ・液化ガスが共存する系での事故の再現試験
- ・夾雑物共存下で安全性評価

などに、利用することができると思われる。特に近年の事例として常温の酸素ガスで使用が認められているグリズなどを使用した可能性のある液酸が関与する火災事故も発生しており、夾雑物が共存する液化ガスの爆発実験の必要性に比べられると考えている⁷⁾。

一方、これまでの試験装置の開発及び爆発試験から、

- ・液化容器内の混合状態
- ・着火方法や着火エネルギーの定量化
- ・日本国内における法対応

などいくつかの解決すべき点があげられる。今後は運用をしながらこれら課題を解決させてゆく予定であるとともに、測定する目的や対象に最適化

した更なる改造や開発をする計画である。

7. 謝辞

本試験設備の開発及び研究に、東京大学大学院工学系研究科土橋律教授、茂木俊夫准教授に多大なご助言を頂いたことに深く感謝いたします。

参考文献

- 1)北川浩,井上篤,高圧ガス,1958, 22 (3), p.104-111
- 2)薄葉州,角館洋三,金東俊,渡邊康秀,成尾俊久,火薬学会 2010 年度春季研究発表会予稿集 27, p.75-76
- 3) 薄葉州,角館洋三,金東俊,渡邊康秀,成尾俊久,安全工学シンポジウム 2009 予稿集 OS-G-1, p.186-189
- 4)A. G. Streng, A. D. Kirchenbaum, Journal of Chemical and Engineering Data 1959, Vol.4, No.2, p.127-131
- 5)Michael M. Swisdak Jr, NSWC Technical Report Explosion, Effects and Properties Part1, 1975, p.120-123
- 6) 山川道雄,産業火薬,日本産業火薬会, 1981, p.29.
- 7) Safety Info 33/13, EIGA, 2013