

反応性化学物質および火工品  
の安全に関する研究

和田 有司



①

# 反応性化学物質および火工品 の安全に関する研究

和田有司

## 反応性化学物質および火工品の安全に関する研究

## 第1章 序論

1.1	緒言	1
1.2	既往の研究	3
1.2.1	反応性化学物質のエネルギー危険性評価	3
1.2.1.1	反応性化学物質とエネルギー危険性	3
1.2.1.2	エネルギー危険性評価システムと試験方法	5
1.2.1.3	衝撃起爆感度評価試験	10
1.2.1.4	危険反応の伝播性の試験	14
1.2.1.5	水中爆発法	16
1.2.2	火工品の安全性評価	22
1.3	本研究の目的	23
1.4	本論文の構成	25
	参考文献	26

## 第2章 衝撃起爆感度評価

2.1	緒言	29
2.2	水中雷管起爆試験	31
2.2.1	試験方法	31
2.2.1.1	試験材料	31
2.2.1.2	試験設備	33
2.2.1.3	計測装置	34
2.2.1.4	試験手順	35
2.2.1.5	評価方法	36
2.2.1.6	MkIII弾動白砲試験との比較	37
2.2.2	基礎実験	38
2.2.2.1	雷管起爆試験の測定精度	38
2.2.2.2	試料量とエネルギーの関係	40
2.2.2.3	限界ギャップ長の精度	43
2.2.3	試験結果	46

## 目次

2.2.3.1	高感度物質への適用	46
2.2.3.2	化合火薬類への適用	51
2.2.3.3	混合火薬類への適用	59
2.2.3.4	酸化剤/可燃物系混合物への適用	65
2.3	他の試験方法との比較	72
2.3.1	熱感度試験との比較	72
2.3.2	打撃感度試験との比較	76
2.3.3	他の衝撃起爆感度試験との比較	80
2.4	結論	84
	参考文献	86

## 第3章 反応伝播性評価

3.1	緒言	89
3.2	水中鉄管試験	91
3.2.1	反応伝播性に影響を与える因子	91
3.2.2	試験方法	93
3.2.2.1	水中鉄管試験の概略	93
3.2.2.2	水中31/38塩ビ管試験	95
3.2.2.3	水中30/40鉄管試験	97
3.2.2.4	水中50/60鉄管試験	98
3.2.3	試験結果と考察	102
3.2.3.1	水中31/38塩ビ管試験	102
3.2.3.2	水中30/40鉄管試験	104
3.2.3.3	水中50/60鉄管試験	109
3.2.3.4	伝爆薬量の影響	114
3.2.3.5	他の試験方法との比較	117
3.3	結論	119
	参考文献	120

## 第4章 エネルギー危険性評価システム

4.1	エネルギー危険性評価のフローチャート	121
4.2	エネルギー危険性評価システムの適用例	128

## 目次

4.2.1	黒色粉状火薬への適用例	128
4.2.2	過酸化ベンゾイルへの適用例	133
4.2.2.1	過酸化ベンゾイル100%品のエネルギー危険性評価	134
4.2.2.2	過酸化ベンゾイル75%含水品のエネルギー危険性評価	140
4.2.3	アジ化ナトリウムへの適用例	146
4.3	結論	151
4.4	将来展望	152
	参考文献	153

## 第5章 火工品の安全性評価

5.1	緒言	157
5.2	煙火の安全性評価	158
5.2.1	打上げ煙火の星の安全性評価	158
5.2.1.1	煙火の星の危険性	158
5.2.1.2	試験方法	159
5.2.1.3	試験結果	161
5.2.1.4	煙火の星の安全性評価の結論	163
5.2.2	玩具煙火の安全性評価	164
5.2.2.1	玩具煙火の危険性	164
5.2.2.2	試験方法	165
5.2.2.3	試験結果	166
5.2.2.4	玩具煙火の安全性評価の結論	168
5.3	新しい火工品の安全性評価	169
5.3.1	新しい火工品の危険性	169
5.3.2	結石破砕器の安全性評価	171
5.4	結論	176
	参考文献	177

## 第6章 総括

6.1	緒言	179
-----	----	-----

6.2	研究成果	180
6.3	将来展望	182
	参考文献	183
	発表状況	185
	あとがき	193

## 第1章 序論

## 1.1 緒言

化学物質は、現代社会を支えている最も重要な要素の一つである。身の周りの目に付くもの全てが、化学物質と無縁ではないと言ってよい。化学物質は、およそ考えつく全ての分野で社会を豊かにするために役立っている。世の中には、数多くの種類の化学物質が存在し、さらに、数多くの新しい種類の化学物質が開発されている。

本研究では、「その物質自身、あるいは、他の物質との化学反応によって起こる現象を利用する化学物質」を反応性化学物質(Reactive Chemicals)と定義し、研究の対象とした。また、本研究では、「反応性化学物質を用いてある目的に適するように加工した物品」を火工品(Pyrotechnics)と定義し、研究の対象とした。

反応性化学物質は、一般に反応性が高く、その反応性の高さを利用することによって他の方法では得られない有用性を持つ。しかし、その反応性の高さのために、条件によっては、火災や爆発を起こすエネルギー危険性を有する。

反応性化学物質の持つ優れた特性を有効に活用するためには、反応性化学物質の持つ潜在的なエネルギー危険性を正しく評価し、そのエネルギー危険性に応じた適切な安全対策を施して取り扱う必要がある。

反応性化学物質による事故は、過去に数多く起こっている<sup>1)</sup>。世界的な話題になった大事故もあれば、社会の表面に姿を現わすことのなかった小さな事故もある。最近でも、反応性化学物質による事故は絶えない。最近の事故は、死傷者が出るような大事故だけでなく、小さな事故でも、反応性化学物質や火工品の付加価値が高くなり、設備の近代化が進んで損害が大きくなっている。その影響の大きさは、反応性化学物質や火工品を取り扱う際の深刻な問題となっている。

このような理由から、世界的に反応性化学物質や火工品のエネルギー危険性評価に関心が持たれ、エネルギー危険性評価のための試験方法は、これまでの研究でかなり整備されている。中でも、国際連合(United Nations)の危険物輸送に関する勧告(Recommendations on the Transport of Dangerous

Goods)<sup>2)</sup>の危険物の分類試験方法(Tests and Criteria)<sup>3)</sup>が国際的に認められている。日本では、1988年5月に消防法が、別表によって危険物を指定する方法から、試験によって危険物を判定する方法に改正された<sup>4)</sup>。

しかし、現在のエネルギー危険性評価のための試験方法は、危険な物質を検出し、取り扱いを規制することを主目的としており、エネルギー危険性を精密に評価することや安全であることを確かめる試験方法としては適切ではない。したがって、最近開発されている多様化、特殊化した反応性化学物質や火工品のエネルギー危険性を正確に評価することは困難であり、反応性化学物質や火工品のエネルギー危険性が明らかでないまま、取り扱いを規制されることもあり得る。

そこで、反応性化学物質や火工品を有効に利用するために、それらのエネルギー危険性を正確に評価し、安全性を確認できるシステムの開発が望まれている。本研究は、そのような反応性化学物質のエネルギー危険性評価システムおよび火工品の安全性評価システムの開発を目的とした。それらのシステムによって反応性化学物質や火工品の危険性を正しく評価し、安全に利用することができるようになれば、より豊かな社会を築くことができるであろう。

## 1.2 既往の研究

### 1.2.1 反応性化学物質のエネルギー危険性評価

#### 1.2.1.1 反応性化学物質とエネルギー危険性

本研究の対象とした反応性化学物質には、比較的低温で、空気中の酸素を必要としないで発熱分解を起こして、急速なガスの発生や燃焼、爆発を起こす自己反応性化学物質(Self-reactive Substances)や、高性能爆薬や高性能推進薬の成分としてエネルギーを得ることを目的としたエネルギー物質(Energetic Substances)等が含まれる。

筆者らは、反応性化学物質の危険反応の種類を爆ごう、デフラグレーション、および熱爆発の3種類に分類して研究を進めてきた。

爆ごう(Detonation)は、反応面の進行速度が媒体中の音速を超え、衝撃波を伴う反応で、破壊作用を持つ。

デフラグレーション(Deflagration)は、衝撃波を伴わない発熱反応面の移動で、空気中の酸素を必要としない反応であり、主として推進作用を持つ。

熱爆発(Thermal Explosion)は、反応系内の発熱速度が周囲への放熱速度を超えた場合に起こる自己加速発熱反応である。

反応性化学物質のエネルギー危険性の種類は、3種類の危険反応それぞれについて、危険反応の起こる可能性と起こり易さ、危険反応が起こった場合の大きさと激しさがある。これらのエネルギー危険性の種類は、表1.1のようにまとめられている<sup>1)</sup>。

Table 1.1 Hazardous phenomena and types of hazards<sup>1)</sup>.

危険反応の種類	危険性の種類			
	起こる可能性	起こり易さ	大きさ	激しさ
爆ごう				
デフラグレーション				
熱爆発				

危険反応の起こる可能性は、反応性化学物質が発熱反応を起こすかどうかで評価できる。発熱反応を起こさない反応性化学物質は安全である。また、発熱

反応を起こす反応性化学物質は、その物質が爆ごうやデフラグレーションの危険な反応を起こすかどうか、また、それらの反応を持続するかどうかを評価する必要がある。

危険反応の起こり易さ、すなわち、感度は、与えられる刺激の種類で異なる。爆ごうやデフラグレーションの起こり易さは、打撃や摩擦など機械的に与えられる刺激に対する感度や起爆による衝撃で与えられる刺激に対する感度と火花や火炎等の着火源に対する感度で評価できる。熱爆発の起こり易さは、試料の分解開始温度を指標とした熱に対する感度で評価できる。

危険反応の大きさや激しさは、従来、大きく激しいことが判っている爆ごうについてはあまり問題にされなかった。しかし、最近では、反応性化学物質をその物理的性状を変えたり、希釈することによって安全化して利用する場合に、試料の一部で危険反応が起こってもその反応が持続しないか、あるいは、危険反応が大きくなり、激しくない場合に、大きな災害に結びつかないことを確認するために、爆ごうやデフラグレーションの大きさや激しさについて評価する必要が生じている。また、熱爆発についてはその大きさや激しさが重要な評価の対象となる。

反応性化学物質のエネルギー危険性を評価する場合は、以上に述べたそれぞれのエネルギー危険性について試験を行い、それらを総合して評価しなければならない。以後、このエネルギー危険性の総合的評価の方法を反応性化学物質のエネルギー危険性評価システムと呼ぶことにする。

### 1.2.1.2 エネルギー危険性評価システムと試験方法

反応性化学物質のエネルギー危険性評価システムは、図1.1に示すような段階を経るべきであるということが、一般に認められている<sup>1)</sup>。

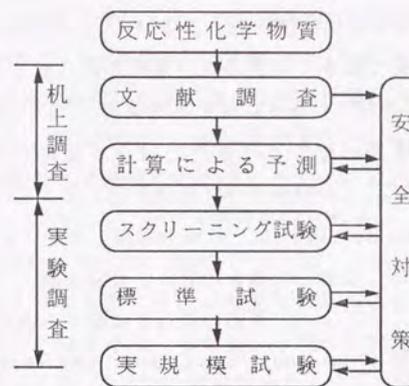


Fig.1.1 Assessment system of energy hazards for reactive chemicals.

エネルギー危険性評価の第1段階は、文献調査である。文献調査によって十分な情報が得られれば、エネルギー危険性評価は終了である。このための文献としては、L.Bretherickの"Handbook of Reactive Chemical Hazards" (日本語版："危険物ハンドブック")<sup>5)</sup>が優れている。

エネルギー危険性評価の第2段階は、計算による予測である。生成熱の実測値または計算値から、分解熱や燃焼熱、混合物の反応熱などが予測できる。このための計算機プログラムとしては、CHETAH<sup>6,7)</sup>やREITP2<sup>8)</sup>が知られている。ただし、計算によって予測できるのは、危険反応の大きさに関する情報だけであり、危険反応の起こり易さや危険反応の激しさに関する情報は得られない。

エネルギー危険性評価の以上の段階は、実験を伴わない机上の調査である。文献調査や計算による予測は、誰にでも実施でき、実験設備を必要としないという利点がある。しかし、これらによって、十分な情報が得られない場合は、実験による調査が必要である。

エネルギー危険性評価の第3段階は、スクリーニング試験である。スクリーニ

ング試験は、少試料量で、安全に、短時間で危険性に関する情報を得るための試験である。これまでに研究されてきたスクリーニング試験の中から、有用な試験を以下に紹介する。

密封セル-示差走査熱量測定(Sealed Cell - Differential Scanning Calorimetry; 以後SC-DSCと呼称)試験<sup>1)</sup>は、スクリーニング試験として非常に優れており、数mgの試料量で数多くの質の高い情報が得られる。DSC分解開始温度( $T_{DSC}$ )からは、反応の起こり易さに関する情報が、DSC分解熱( $Q_{DSC}$ )からは、反応の大きさと熱爆発の起こる可能性に関する情報が得られる。さらに、 $\log(T_{DSC}-25)$ と $\log Q_{DSC}$ との関係から、危険反応の起こる可能性が推定できる<sup>9)</sup>。

着火性試験(Ignitability Test)は、打撃や摩擦、静電気による火花を受けた場合や、火炎や高温物体に接触した場合の着火し易さを調べる試験である<sup>1)</sup>。また、燃焼状態を観察することによって反応の激しさに関する情報も得られる。

落球式打撃感度試験(Drop Ball Impact Sensitivity Test)<sup>1)</sup>および落つい試験(Drop Hammer Test)<sup>10)</sup>は、機械的な打撃(Impact)に対する感度を調べる試験方法である。また、試料が反応した場合は、音、火炎、光、煙等を観察することによって反応の激しさに関する情報を得ることが可能である。

微量加熱試験(Micro Heating Test)<sup>11)</sup>は、加熱によって微試料量でも爆発に移行する恐れのある物質を検知するために開発された試験である。この試験で起爆薬的物質(Primary Explosivelike Material)と判定された場合は、数mg以上の試料量の試験は危険を伴うので行うべきではないと判断される。

Table 1.2 Hazards of reactive chemicals which are predictable by screening tests.

危険反応の種類	危険性の種類			
	起こる可能性	起こり易さ	大きさ	激しさ
爆ごう	SC-DSC	落球, 落つい, SC-DSC, (着火性)	SC-DSC	(落球, 落つい)
デフラグレーション	SC-DSC	落球, 落つい, SC-DSC, 着火性	SC-DSC	(落球, 落つい, 着火性)
熱爆発	SC-DSC	SC-DSC	SC-DSC	微量加熱

以上のスクリーニング試験を表1.2にまとめた。これらの試験方法は、すでに

筆者らの研究室や、国内、国外の研究機関や企業で研究されており、試験方法として確立されている。これらの試験によって超高感度な物質あるいは起爆薬的な物質は確実に見分けられ、以後の試験で注意すべき点が明らかになる。

エネルギー危険性評価の第4段階は、標準試験である。標準試験は、反応性化学物質のエネルギー危険性を判定するための標準的な試験方法である。

MkIII弾動臼砲(MkIII Ballistic Mortar)を用いた可変起爆剤試験(Variable Initiator Test)<sup>12)</sup>は、ある種の産業用爆破薬、不安定物質(Unstable Substances)、有機過氧化物(Organic Peroxides)、酸化性物質(Oxidizers)等の打撃感度の低い反応性化学物質の衝撃起爆感度を評価するための試験方法である。試料が完爆した場合には、反応の大きさに関する情報が得られる。

圧力容器試験(Pressure Vessel Test; PVT)<sup>1)</sup>は、熱爆発に関する情報を与える。試料を加熱したときの挙動によって熱爆発の起こる可能性に関する情報が得られ、加熱開始から熱爆発が起こるまでの時間から熱爆発の起こり易さに関する情報が得られる。さらに、3回の実験中少なくとも1回破裂板が破裂する最大のオリフィス径(Pressure Vessel Limiting Diameter; PVLD)から熱分解の激しさに関する情報、あるいは、筆者らの研究室で熱爆発の危険性を評価するための試験方法として提案している測圧型圧力容器試験の圧力測定結果から、熱分解の大きさと激しさに関する情報が得られる。

燃焼試験(Burning Test)<sup>1)</sup>と改良型時間/圧力試験(Revised Time/Pressure Test; T/P)<sup>1)</sup>は、いずれも、反応の起こり易さと激しさに関する情報が得られる。

以上の標準試験によって、危険反応の起こり易さや大きさ、激しさに関する情報が得られるが、それは、反応性化学物質の1部分を取り上げた部分的な情報に過ぎない。例えば、危険反応が起こり難く、大きくなく、激しくない反応性化学物質でも、大量に存在して、その危険反応が物質全体に伝播する場合には大きな事故につながる。したがって、十分な試料量で危険反応の伝播の可能性を評価することが重要である。そのために、以下のような試験がある。

可変試料量試験(Variable Sample Test)は、危険反応の伝播の可能性を評価するための試験で、打撃や衝撃に対する感度の低い反応性化学物質を大量に取り扱う場合には非常に重要である。筆者らの研究室では、弾動振り(Ballistic Pendulum)やMkIII弾動臼砲を用いた可変試料量試験<sup>13,14)</sup>を研究してきた。

50/60鉄管試験(50/60 Steel Tube Test)<sup>3)</sup>は、ドイツ連邦材料試験研究所

(Bundesanstalt für Materialprüfung; BAM)で開発された危険反応の伝播の可能性を評価するための試験である。50/60鉄管試験を砂中爆発法を用いて行うことにより、漏斗孔の大きさから反応の大きさに関する情報が得られ<sup>15)</sup>、また、反応の伝播速度を測定することにより、反応の激しさに関する情報が得られる。この試験は、国連の危険物分類試験や日本の消防法危険物の判定試験に採用されている。

以上の標準試験を表1.3にまとめた。

Table 1.3 Hazards of reactive chemicals which are evaluated by standard tests.

危険反応の種類	危険性の種類			
	起こる可能性	起こり易さ	大きさ	激しさ
爆ごう	50/60鉄管	(可変起爆剤)	(可変起爆剤), 50/60鉄管	50/60鉄管
デフラグレーション	可変試料量	可変試料量, 燃焼, T/P	可変起爆剤	燃焼, T/P
熱爆発	圧力容器	圧力容器	(圧力容器)	圧力容器

エネルギー危険性評価の第5段階は、実規模試験である。第4段階までで反応性化学物質のエネルギー危険性に関する十分な情報が得られ、適切な安全対策が施されている場合でも、実際に工業的に大量に利用(製造, 貯蔵, 流通, 消費)する場合のエネルギー危険性は、予想ができないことが多い。したがって、より大規模な実規模試験によって反応性化学物質の安全性を確認することが重要である。

包装品熱爆発試験(Thermal Explosion Test for Package)は、反応性化学物質内部で蓄熱が起こり、断熱的に加熱された場合のエネルギー危険性を評価する試験である。

包装品外部火災試験(External Fire Test for Package)は、反応性化学物質が火災に巻き込まれた場合の火災との接触による着火、爆発の危険性や外部からの加熱により反応性化学物質内部が断熱的に加熱されて熱爆発に至る危険性を評価する試験である。

包装品デフラグレーション試験(Deflagration Test for Package)および包装

品爆ごう試験(Detonation Test for Package)は、反応性化学物質の一部が爆発した場合に、誘爆して災害を拡大しないことを確認するための試験である。デフラグレーションや爆ごうの伝播の可能性は、反応性化学物質の物理的性状によって大きく変化するので、実際に利用される形態での実規模試験が必要である。

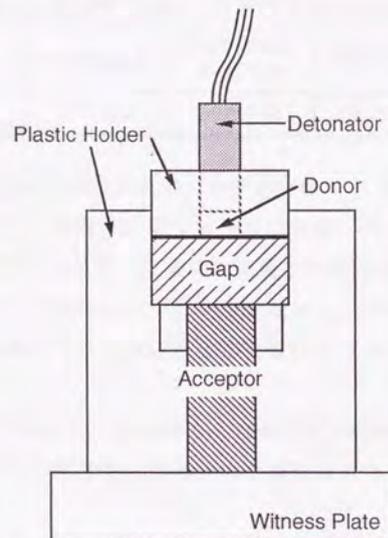
実規模試験は、大量の試料の爆発の可能性があるため、広大な試験場が必要である。最近、日本でもその重要性が認められるようになり、国内の企業に実規模試験が行える広さの試験場確保の動きがみられるようになった。

本研究では、以上のような段階的なエネルギー危険性評価システムを検討し、不十分な点を補う試験方法を開発して、1つのフローチャートとして提案することを最終的な目的とした。

以下に本研究で開発課題とした衝撃起爆感度評価試験および反応伝播性評価試験の従来の試験方法を述べる。また、本研究で開発した試験方法に応用した水中爆発法の概略を述べる。

## 1.2.1.3 衝撃起爆感度評価試験

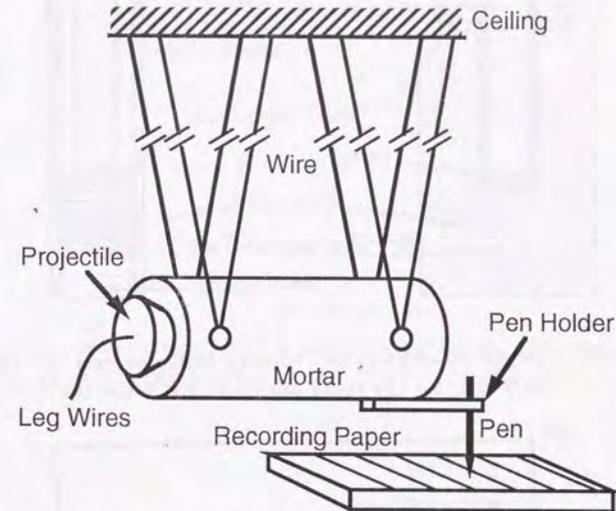
反応性化学物質の衝撃起爆感度を評価するための試験として、ギャップ試験 (Gap Test) が知られている<sup>16,17)</sup>。ギャップ試験は各所で研究され、様々なタイプの試験方法があるが、基本となる考え方には大きな差はない。まず、基準となる励爆薬 (Donor Explosive) を起爆し、発生した衝撃波をある厚みを持った不活性な障壁 (Barrier) を介して減衰させ、試料である受爆薬 (Acceptor) に入射させる。このとき、入射した衝撃波が受爆薬を起爆するに足るエネルギーを持っていれば試料は起爆され、減衰によって十分なエネルギーを失ってれば起爆されない。そこで、この入射衝撃波の持つエネルギーの指標として励爆薬と受爆薬との間の障壁の厚み、すなわち、空隙 (Gap) の長さを用い、衝撃起爆感度を評価しようとするものである。ギャップ試験の試験方法の一例を図1.2に示した。

Fig.1.2 Small-scale gap test assembly<sup>16)</sup>.

ギャップ試験の励爆薬には、高性能爆薬であるRDX (Research Department Explosive; Cyclotrimethylenetrinitramine; Hexogen) またはRDXを主成分とするPBX (Plastic Bonded Explosive) が使用され、励爆薬量が250g程度の大規模な試験から、50g程度の中規模の試験、0.4g程度の小規模の試験まであり、試

験の規模に応じてギャップの種類も様々な厚みを持った合成樹脂板や黄銅板を使用する。

筆者らの研究室で研究されてきた衝撃起爆感度を評価する試験方法は、いずれもMkIII弾動臼砲を用いたもので、1つは前述の可変起爆剤試験<sup>12)</sup>であり、もう1つは、小型ギャップ試験 (Small Gap Test)<sup>18)</sup>である。MkIII弾動臼砲の概略図を図1.3に示す。

Fig.1.3 Outline of MkIII ballistic mortar<sup>12)</sup>.

可変起爆剤試験は、図1.4(a)に示すようなガラス製サンプルピンに入れた5.0gの試料をMkIII弾動臼砲に装填し、0号雷管または6号雷管とPETN (Pentaerythritol Tetranitrate) を0.1~0.6gを用いて起爆力を変化させて起爆し、2.0kgの弾丸が投射されたときの弾動臼砲の振れ幅を測定する。起爆力の指標となるPETN当量(雷管単独の起爆による弾動臼砲の振れ幅を同じ振れ幅を与えるPETNのg数に換算した値)と弾動臼砲の振れ幅との関係から5.0gの試料を完爆されるために必要な起爆力を判定し、衝撃起爆感度の指標とする。可変起爆剤試験の結果の一例を図1.5に示す。

小型ギャップ試験は、図1.4(b)に示すようなガラス管に入れた1.0gの試料の上に、厚さ1mmまたは2mmのポリエチレンカードを所定の厚さとなるように入

れ、その上に0号雷管を接触させた試料体をMkIII弾動臼砲に装填し、起爆して、2.0kgの弾丸が投射されたときの弾動臼砲の振れ幅を測定する。ギャップの厚さ(ギャップ長)と弾動臼砲の振れ幅との関係から衝撃起爆感度を判定する。小型ギャップ試験の結果の一例を図1.6に示す。

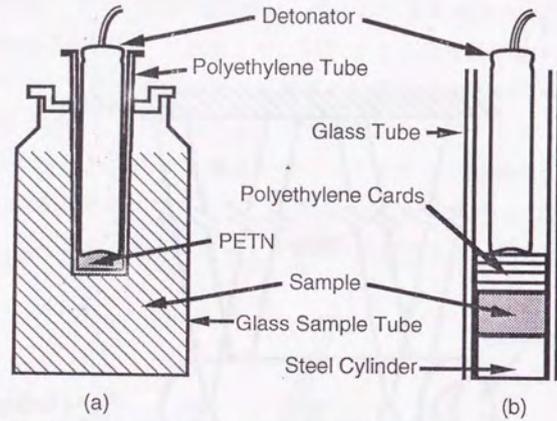


Fig.1.4 Sample assemblies for variable initiator test (a) and small gap test (b) using MkIII ballistic mortar<sup>12,18</sup>.

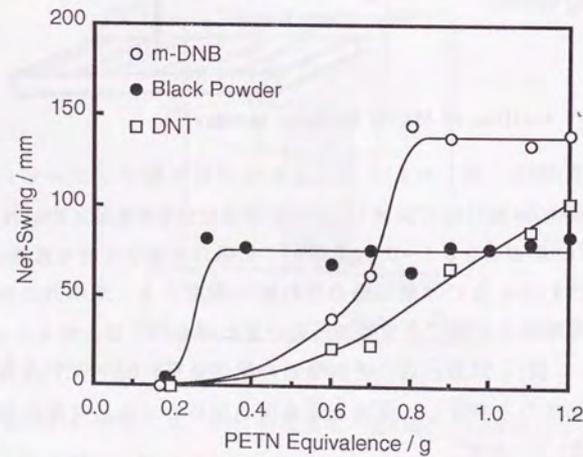


Fig.1.5 Net-swing of MkIII ballistic mortar vs. PETN equivalence of variable initiator test<sup>12</sup>.

これら2つの試験方法は、起爆力の指標としてPETN当量あるいはギャップ長を用い、試料の爆発威力の指標として弾動臼砲の振れ幅を用いており、それらをプロットすることによって容易に感度曲線が得られる点で優れている。

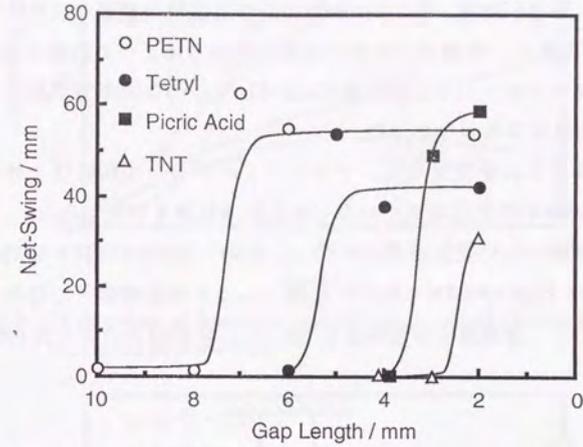


Fig.1.6 Net-swing of MkIII ballistic mortar vs. gap length of small gap test<sup>18</sup>.

1.2.1.4 危険反応の伝播性の試験

危険反応の伝播性の試験のうち、爆ごうの伝播性の試験は、BAMの50/60鉄管試験やTNOの50/70鉄管試験等の優れた試験が存在する。50/60鉄管試験は、内径50mm、外径60mm、長さ500mmの鉄管に試料を装填し、6号雷管とRDX 50gを用いて起爆し、試験後の鉄管の破損状況から爆ごうの伝播を判定する。

一方、デフラグレーションの伝播性の評価では、50/60鉄管試験に匹敵するような優れた試験は存在しなかった。

そこで、筆者らの研究室では、デフラグレーションの伝播性を評価するために弾動振り子やMkIII弾動白砲を用いた可変試料量試験を開発した。

弾動振り子を用いた可変試料量試験<sup>13)</sup>は、100~300gの試料を弾動振り子に装填し、6号雷管と20gのPETNを用いて起爆したときの弾動振り子の振れ幅を爆発威力の指標とする。弾動振り子の概略図を図1.7に、試験結果の例を図1.8に示す。

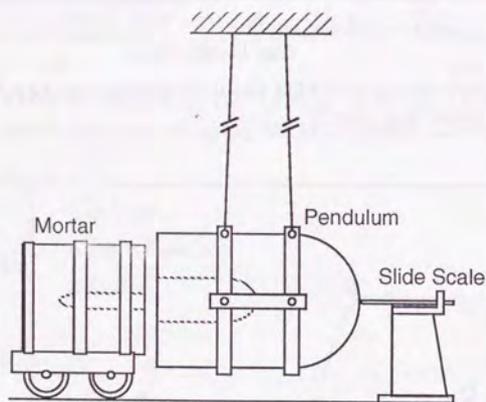


Fig.1.7 Outline of ballistic pendulum (JIS type)<sup>13)</sup>.

MkIII弾動白砲を用いた可変試料量試験<sup>14)</sup>は、10~30gの試料を弾動白砲に装填し、6号雷管と0.6gのPETNを用いて起爆したときの弾動白砲の振れ幅を爆発威力の指標とする。いずれの試験も、試料量に対して振れ幅をプロットし、試料量に対して振れ幅が単調増加する場合をデフラグレーションの伝播性があると判定する。可変試料量試験の結果の一例を図1.9に示す。

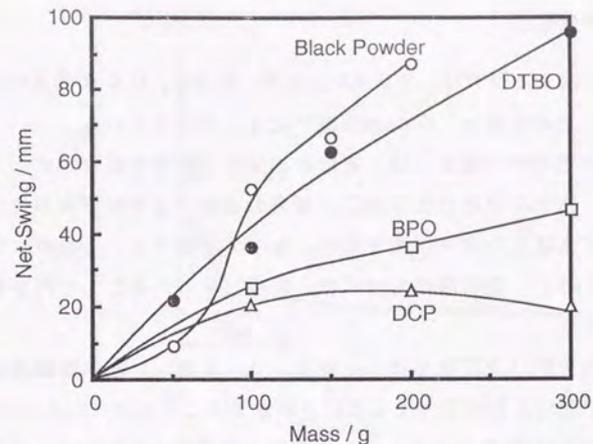


Fig.1.8 Net-swing of ballistic pendulum vs. mass of sample of variable sample test<sup>13)</sup>.

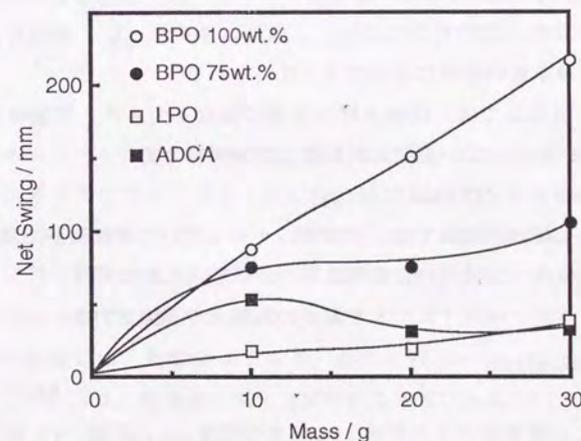


Fig.1.9 Net-swing of MkIII ballistic mortar vs. mass of sample of variable sample test<sup>14)</sup>.

## 1.2.1.5 水中爆発法

水中爆発に関する研究は、主に第2次世界大戦中に、U.S.A.およびEnglandで進められ<sup>19)</sup>、その理論は、Coleの著書<sup>20)</sup>にまとめられている。

水中爆発の基本的な現象には、衝撃波の発生と爆発生成ガスによるガス球の運動がある。水中で反応性化学物質が爆発すると、まず衝撃波が発生し、次に爆発によって生成したガスが大きな泡となって膨張する。このガス球はある容積まで膨張すると、逆に収縮をはじめ、収縮しきったところで再び衝撃波を発生して膨張する。

水中爆発法を用いた試験では、圧力センサーを用いて水中衝撃波の圧力波形を記録する。記録された波形をもとに、衝撃波として放散されたエネルギー(衝撃波エネルギー)が計算できる。また、最初の衝撃波と収縮によって発生した第二の衝撃波の時間間隔(脈動周期)から、爆発によって生成したガスのエネルギー(気泡エネルギー)が計算できる。衝撃波エネルギーは、爆発によって物を破壊するために費やされる動的効果に相当し、気泡エネルギーは、爆発によって物を押し、移動させる静的効果に相当すると考えられる。

また、水中爆発法では、試験を行う水槽の強度と大きさ、試験場の周囲の状況さえ許せば、かなり広い範囲の試料量の試験が行える。

## (A) 衝撃波エネルギー(Shock Energy)

水中爆発法を用いた試験では、圧力センサーを用いて衝撃波形を測定する。

水中爆発法によって得られた衝撃波形の一例を図1.10に示す。

衝撃波エネルギーは以下に示す音響学の定義より導出される。

$$\frac{\Delta E_s}{4\pi R^2} = \rho_0 c v^2 \quad \text{Eq.1.1}$$

ここで、 $E_s$  : 衝撃波エネルギー、 $\rho_0$  : 水の密度、 $c$  : 音速、 $v$  : 衝撃波速度、 $R$  : 爆源-測定点間の距離である。

運動量保存則より、時間(t)における水中圧力(P(t))は、

$$P(t) = \rho_0 c v \quad \text{Eq.1.2}$$

であるから、1.1式は次のように表わすことができる。

$$\frac{\Delta E_s}{4\pi R^2} = \frac{P(t)^2}{\rho_0 c} \quad \text{Eq.1.3}$$

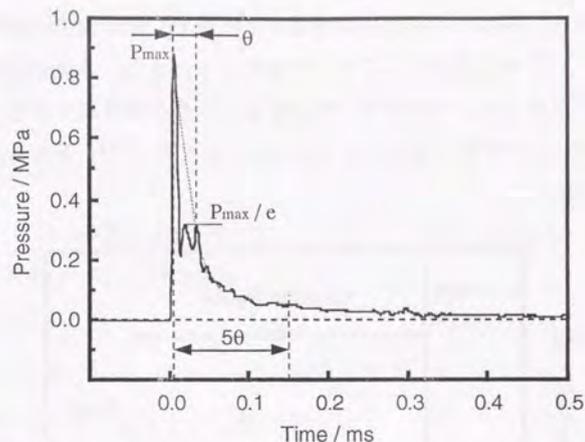


Fig.1.10 Shock wave of underwater explosion.

両辺を時間(t)で積分して、

$$E_s = \frac{4\pi R^2}{\rho_0 c} \int P(t)^2 dt \quad \text{Eq.1.4}$$

となる。

衝撃波エネルギーを計算する際には、図1.10に示すように、衝撃波の時間/圧力曲線を指数減衰式にあてはめたと仮定し、圧力が最大となった時間から衝撃波の減衰定数( $\theta$ )の5倍の時間について数値積分を行った。衝撃波の減衰定数は、便宜的に、圧力が最大となった時間から、圧力が圧力の最大値( $P_{max}$ )を自然対数の底(e)で割った値になるまでの時間とした。

後述の実験結果には、衝撃波エネルギーが得られていない場合が少なからず存在する。その原因は、衝撃波の放出は瞬間的な現象(1ms以下)で、最大圧力値の予想がつきにくく、測定装置のレンジオーバーによって測定に失敗するケースがあったためである。現状では、経験を積んで、データを蓄積し、衝撃波エネルギーの最大圧力値を予想する技術を身につけるしか方法がない。

## (B) 気泡エネルギー(Bubble Energy)

水中爆発法によって得られた脈動波形の一例を図1.11に示す。気泡エネルギーの計算に必要な爆発によって生成するガス球の脈動波形は、衝撃波形よりはるかに遅い現象(100ms程度)なので、数10msの現象を記録することができるデ

ータレコーダーの再生データを用いることによって、衝撃波形の測定に用いる圧力センサーで同時に測定することが可能である。また、空気中に投射された音波のマイクロホンによる測定や、地面に伝えられた地振動の測定によっても気泡エネルギーの計算が可能であることが知られており<sup>21)</sup>、筆者もそれを確認することができた<sup>22)</sup>。

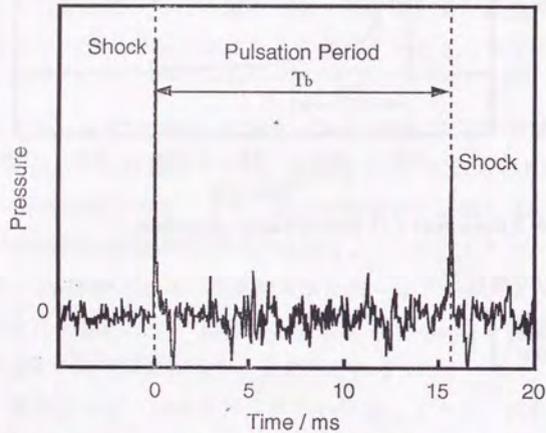


Fig.1.11 Pressure wave of bubble pulsation.

気泡エネルギーの計算式は、いくつかの仮定のもとに、以下の水力学的考察より導出される<sup>20)</sup>。

仮定I: ガス球は放射状に運動する。

仮定II: 重力、浮力の影響を無視する。

これらの仮定により、連続の式は以下ようになる。

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + u \frac{\partial \rho}{\partial r} + \rho \frac{\partial u}{\partial r} + \frac{2\rho u}{r} = 0 \quad \text{Eq.1.5}$$

ここで、 $\rho$ : 水の密度、 $t$ : 時間、 $r$ : ガス球の中心からの距離、 $u$ : ガスの速度である。

また、運動方程式は以下ようになる。

$$\rho \frac{\partial u}{\partial t} + \rho u \frac{\partial u}{\partial r} + \frac{\partial P}{\partial r} = 0 \quad \text{Eq.1.6}$$

仮定III: 水は非圧縮性である(かなり高圧でも密度の変化は1%未満)。

この仮定により、 $\Delta \rho < 0$ となり、1.5式は以下のように書くことができる。

$$\rho \frac{\partial u}{\partial r} + \frac{2\rho u}{r} = 0 \quad \text{Eq.1.7}$$

したがって、

$$\frac{\partial u}{\partial r} = -\frac{2u}{r} \quad \text{Eq.1.8}$$

ここで、ガスの速度( $u$ )は、時間( $t$ )と半径( $r$ )との関数であるから、 $u = u(r, t)$ と置いて1.8式を $r$ について積分する。

$$u(r, t) = \frac{C}{r^2} \quad \text{Eq.1.9}$$

ただし、 $r = 1$ として、 $C = u(1, t) = u_1(t)$ と置いた。

$\rho$ は変化しないので $\rho_0$ とし、1.6式を書き直す。

$$\frac{\rho_0}{r^2} \frac{du_1}{dt} + \frac{\rho_0}{2} \frac{\partial u^2}{\partial r} + \frac{\partial P}{\partial r} = 0 \quad \text{Eq.1.10}$$

1.10式を $r$ について積分する。

$$\int_{r \rightarrow \infty}^a \left[ \frac{\rho_0}{r^2} \frac{du_1}{dt} + \frac{\rho_0}{2} \frac{\partial u^2}{\partial r} + \frac{\partial P}{\partial r} \right] dr = C \quad \text{Eq.1.11}$$

ここで、 $r \rightarrow \infty$ では、 $u \rightarrow 0$ 、 $P \rightarrow P_0$ 、 $r = a$ では、 $u = \frac{u_1(t)}{a^2} \left( \frac{da}{dt} \right)$ 、 $P = P_a$ 。従って、1.11式は次のようになる。

$$\frac{\rho_0}{a} \frac{d}{dt} \left( a^2 \frac{da}{dt} \right) - \frac{1}{2} \rho_0 \left( \frac{da}{dt} \right)^2 - (P_a - P_0) = C \quad \text{Eq.1.12}$$

次に両辺に $a^2 \left( \frac{da}{dt} \right)$ をかけて、時間について積分する。

$$\frac{1}{2} \rho_0 a^3 \left( \frac{da}{dt} \right)^2 + \frac{1}{2} P_0 a^3 - \int_0^t P_a a^2 da = C' \quad \text{Eq.1.13}$$

1.13式の両辺に $4\pi$ をかける。

$$\frac{3}{2} \rho_0 \left( \frac{3}{4} \pi a^3 \right) \left( \frac{da}{dt} \right)^2 + \frac{4}{3} \pi a^3 P_0 - \int_0^t 4\pi a^2 P_a da = Y \quad \text{Eq.1.14}$$

$V = \frac{4}{3} \pi a^3$ と置いて、

$$\frac{3}{2}\rho_0 V \left(\frac{da}{dt}\right)^2 + P_0 V - \int_0^t P_a dV = Y \quad \text{Eq.1.15}$$

ここで、左辺第1項：ガス球の運動エネルギー、  
左辺第2項：ガス球のポテンシャルエネルギー、  
左辺第3項：ガス球の内部エネルギー変化、  
右辺：ガス球の全エネルギーである。

したがって、1.15式はエネルギー保存の式である。

これより、ガス球の全エネルギー( $Y = E_b$ )を解く。

仮定IV：内部エネルギーは他の項に比べて小さいので無視する。

この仮定により、1.15式は、

$$\frac{3}{2}\rho_0 V \left(\frac{da}{dt}\right)^2 + P_0 V = Y \quad \text{Eq.1.16}$$

となり、ガス球が最も大きくなった時、その半径を $a_{\max}$ とすると、 $a = a_{\max}$ で、

$$\frac{da}{dt} = 0, \quad Y = \frac{4}{3}\pi a_{\max}^3 P_0 \quad \text{Eq.1.17}$$

となる。

これを用いて、1.16式を書き直すと、

$$\frac{da}{dt} = \left(\frac{2P_0}{3\rho_0}\right)^{\frac{1}{2}} \left\{ \left(\frac{a_{\max}}{a}\right)^3 - 1 \right\}^{\frac{1}{2}} \quad \text{Eq.1.18}$$

となり、1.18式を $t$ について積分すると、ガス球が最大となるまでの時間 $t_{\max}$ が求まる。

$$t_{\max} = \left(\frac{3\rho_0}{2P_0}\right)^{\frac{1}{2}} \int_0^{a_{\max}} \frac{da}{\sqrt{(a_{\max}/a)^3 - 1}} \quad \text{Eq.1.19}$$

ここで、 $(a_{\max}/a)^3 = Z$ と置くと、 $da = \frac{a_{\max} Z^{-2/3} dZ}{3}$ となり、1.19式は次のようになる。

$$t_{\max} = \frac{a_{\max}}{3} \left(\frac{3\rho_0}{2P_0}\right)^{\frac{1}{2}} \int_0^1 Z^{-1/6} (1-Z)^{-1/2} dZ$$

$$= \frac{a_{\max}}{3} \left(\frac{3\rho_0}{2P_0}\right)^{\frac{1}{2}} \beta\left(\frac{5}{6}, \frac{1}{2}\right) \quad \text{Eq.1.20}$$

ここで、 $\beta(p, q)$ は $\beta$ 関数で、以下のような関数である。

$$\beta(p, q) = \int_0^1 x^{p-1} (1-x)^{q-1} dx$$

数表で数値を調べると、 $\beta\left(\frac{5}{6}, \frac{1}{2}\right) = 2.2405$ である。

1.20式より、 $t_{\max}$ と $a_{\max}$ とは比例することがわかる。

求めるべき値は、2.17式の $Y$ であるが、 $t_{\max}$ 、 $a_{\max}$ ともに測定困難な量である。しかし、先に述べたように水中爆発法における $T_b$ (脈動周期)は測定が容易である。そこで、

仮定V：ガス球の脈動周期 $T_b$ は $t_{\max}$ の2倍である。

と仮定すると、 $T_b = 2t_{\max}$ となり、1.20式は、

$$a_{\max} = \frac{3}{2} \left(\frac{2P_0}{3\rho_0}\right)^{\frac{1}{2}} \frac{T_b}{\beta\left(\frac{5}{6}, \frac{1}{2}\right)} \quad \text{Eq.1.21}$$

となる。したがって、ガス球の全エネルギー、すなわち、気泡エネルギーは、

$$Y = E_b = \frac{4}{3}\pi \left\{ \frac{3}{2} \left(\frac{2P_0}{3\rho_0}\right)^{\frac{1}{2}} \frac{T_b}{\beta\left(\frac{5}{6}, \frac{1}{2}\right)} \right\}^3 P_0 \quad \text{Eq.1.22}$$

となり、 $\rho_0 = 1$  [g/cm<sup>3</sup>]と置いて、 $T_b$ の単位を[ms]、 $P_0$ の単位を[MPa]とすると、

$$E_b = 6.84 \times 10^{1/2} \times P_0^{5/2} \times T_b^3 \text{ [J]} \quad \text{Eq.1.23}$$

と表わされる。

以上のように、気泡エネルギーは、いくつかの仮定のもとに、比較的測定が容易な脈動周期から計算される。そのためあって、Paterson等は、水中爆発法による爆発威力の測定は、気泡エネルギーのみでも十分に有用であると述べている<sup>23)</sup>。本論文中でも、水中爆発法のデータの解析には主として気泡エネルギーを用いている。

## 1.2.2 火工品の安全性評価

火薬類取締法<sup>24)</sup>の定義によると、火工品とは、火薬、爆薬を使用して、ある目的に適するように加工したものと解釈することができる。

危険物輸送に関する国連勧告<sup>2)</sup>では、「火工物質(Pyrotechnic substances)：熱、光、音、ガスまたは煙によって効果を出すように設計された物質または混合物、あるいは非爆ごう的自己持続的発熱化学反応を生ずるように上記物質または混合物を組み合わせたもの」と定義されている。

本研究では、より広い意味で火工品を捉え、火工品を「反応性化学物質を用いてある目的に適するように加工した物品」と定義する。本研究の目的は、反応性化学物質を安全に利用できるようにすることであるから、火薬類取締法の火工品や国連勧告の火工物質はもちろん、安全に利用することを目的として成型された反応性化学物質等も火工品として取り扱った。

火工品は、原料に反応性化学物質を用いているので、誤った使用法をすると非常に危険である。しかし、通常の作動によって事故が起こったり、原料の反応性化学物質を取り出して悪用されたりしてはならない。したがって、火工品は、その危険性を評価するよりも、その火工品がいかにか安全であることを示すことが重要である。このような理由で、本研究では火工品に関しては、危険性評価とは言わないで、安全性評価と呼ぶことにした。

火工品が危険な現象を起こす原因は、その原料である反応性化学物質にある。したがって、火工品の安全性評価のために、反応性化学物質のエネルギー危険性評価のための試験方法を適用することは合理的である。しかし、火工品は、さまざまな用途のために加工されているので、その性能や形状が一律ではない。そのために、粉状の固体や液体の評価を主な目的とした反応性化学物質のエネルギー危険性評価試験をそのまま適用することには限界がある。そこで、火工品の安全性評価は、反応性化学物質のエネルギー危険性評価のための試験方法を性能や形状に適するように改良を加えて適用されてきた。

本研究では、このような火工品の安全性評価の考え方をまとめて、安全性評価システムとして提案することを目的とした。

## 1.3 本研究の目的

本研究の最大の目的は、反応性化学物質や火工品を安全に利用できるようにし、豊かな社会を築くために貢献することである。そのために本研究は、反応性化学物質のエネルギー危険性評価システムおよび火工品の安全性評価システムの提案を目的として掲げた。

本研究で理想とする反応性化学物質のエネルギー危険性評価システムは、簡便で信頼性の高いシステムである。信頼性の高いシステムとは、反応性化学物質のエネルギー危険性が確実に把握でき、反応性化学物質の安全性を確実に保証できることを意味する。したがって、そのようなエネルギー危険性評価システムを提案するためには、信頼性の高い試験方法を整備する必要がある。

反応性化学物質のエネルギー危険性評価のための試験方法は、世界各国の企業、研究所等で研究され、かなり整備されてきたが、決して充分とはいえない。

例えば、先で紹介したスクリーニング試験に不足する試験がある。落球式打撃感度試験や落つい試験によって与えられる機械的な打撃より、瞬間的に大きなエネルギーが与えられる場合、すなわち、衝撃が与えられた場合の危険性を評価するための試験である。

筆者らの研究室で開発したMkIII弾動白砲を用いた可変起爆剤試験と小型ギャップ試験は、容易に衝撃起爆感度が評価できる点で優れている。しかし、爆発威力の弱い物質の場合は、振れ幅が少なく、測定精度が悪くなるために試料量を増やさなければならない。また、ともに衝撃起爆感度試験でありながら試料量や試料形態が異なるために2つの試験方法の間の整合性が不十分であるなどの問題がある。

したがって、本研究では、可変起爆剤試験と小型ギャップ試験をともに同一の試料形態で、より少ない試料量で精密に測定できる試験方法として水中雷管起爆試験の開発を課題とした。

また、非常に有用であるがエネルギー危険性を有する反応性化学物質を希釈等によって安全化して利用する場合には、安全化され、危険反応の伝播性を失ったことを確認するための標準試験が必要とされている。

50/60鉄管試験は、判定が容易である点で優れているが、鉄管を破壊しないような弱い爆ごうやデフラグレーションを伝播する試料には適用できないという

問題点がある。

また、弾動振子やMkIII弾動臼砲を用いた可変試料量試験は、試料が爆ごうした場合に弾動振子やMkIII弾動臼砲を破壊し、試験者や試験設備を損傷する恐れがあるため、爆ごうする可能性のある試料には適用できない。また、弾動振子の場合には与えられる起爆力の限界が小さいため、MkIII弾動臼砲の場合は試験できる試料量が少ないために、反応の伝播を判定するには不十分と考えられている。さらに、いずれの試験も騒音、振動が大きいなどの問題があった。

本研究では、以上に述べたような従来の反応伝播性評価のための試験方法の問題点を検討した結果、50/60鉄管を用いて可変試料量試験を行い、試料の爆発威力の指標として水中爆発気泡の脈動エネルギーを用いる水中50/60鉄管試験の開発を課題とした。

火工品の安全性評価は、これまでに総合的な研究が行われていない。危険物輸送に関する国連勧告のクラス1の分類試験は、火工品も対象にしているが、それは火工品を輸送する際の危険性を大量の試料で評価して、分類するための試験なので、ここでは参考にはならない。

したがって、本研究では、火工品の安全性を総合的に評価するための考え方を安全性評価システムとして提案することを目的とした。

#### 1.4 本論文の構成

研究課題として取りあげた衝撃起爆感度評価および反応伝播性評価の試験方法の開発の過程は、それぞれ第2章および第3章にまとめた。いずれも、第三者が実際にこれらの試験を実施可能なように詳細な試験方法を記載し、実際に反応性化学物質に適用して、結果を考察した。

本研究で開発した試験を取り入れた反応性化学物質のエネルギー危険性評価システムは、フローチャートの形で第4章にまとめた。フローチャートは、実際に反応性化学物質に適用して、結果を考察した。第4章では、さらに、反応性化学物質のエネルギー危険性評価の将来への展望を述べた。

火工品の安全性評価は、第5章にまとめた。安全性評価システムの考え方を最初に述べ、打上げ煙火の星、玩具煙火および結石破砕器の安全性評価の実施例を示した。

本研究の総括は、第6章に記した。

最後に、研究の発表状況を載せた。

## 参考文献

- 1) 吉田忠雄, 田村昌三編著, 「反応性化学物質と火工品の安全」, 大成出版社(1988)
- 2) United Nations, "Recommendations on the Transport of Dangerous Goods, Seventh Revised Edition", ST/SG/AC.10/1/Rev.7(1991)
- 3) United Nations, "Recommendations on the Transport of Dangerous Goods, Tests and Criteria, Second Edition", ST/SG/AC.10/11/Rev.1(1990)
- 4) 自治省, 「消防法の一部を改正する法律(法律第55号)」, 官報(号外第6号), 昭和63年5月24日(1988)
- 5) L.Bretherick, "Handbook of Reactive Chemical Hazards", 3rd Edition, Butterworths(1985)  
日本語訳版; 吉田忠雄, 田村昌三監訳, 「危険物ハンドブック」, 丸善(1987)
- 6) W.H.Seaton, E.Freedman, D.N.Treweek, "CHETAH - the ASTM Chemical Thermodynamic and Energy Release Evaluation Program", ASTM DS51(1974)
- 7) 新井充, 遠山和広, 田村昌三, 吉田忠雄, 「CHETAHプログラムによる最大分解熱と火薬類性能との相関」, 工業火薬, **41**(5), 293
- 8) 大内博史, 宇田川令子, 吉田忠雄, 「混合危険予測のための改良プログラムREITP2とその応用」, 安全工学, **22**(1), 12(1983)
- 9) 吉田忠雄, 吉沢二千六, 伊藤葵, 松永猛裕, 渡辺正俊, 田村昌三, 「物質の火災・爆発危険性の予測(第1報), DSCデータを用いた自己反応性物質の爆発性の推定」, 工業火薬, **48**(5), 311(1987)
- 10) 日本工業規格, 「火薬類性能試験法」, JIS K 4810-1979
- 11) 奈沢俊雄, 金子良昭, 池田義之, 周興喜, 波多野日出男, 細谷文夫, 吉沢二千六, 田村昌三, 吉田忠雄, 「高感度物質の安全性評価の研究(III), 高反応性エネルギー物質のスクリーニング試験としての微量加熱試験」, 工業火薬, **51**(6), 390(1990)
- 12) 村永浩太郎, 松永猛裕, 田村昌三, 安部隆幸, 吉田忠雄, 「MkIII弾動白砲の性能と応用(X), 弾動白砲を用いた爆発性物質の衝撃感度の測定法」,

- 工業火薬, **46**(3), 162(1985)
- 13) 松永猛裕, 池田義之, 平井靖男, 萩井英彦, 吉田忠雄, 「弾動振子による有機過酸化物の伝爆性及び静的爆発威力試験法の研究」, 安全工学, **24**(5), 247(1985)
  - 14) 吉田忠雄, 村永浩太郎, 松永猛裕, 萩井英彦, 村門徹, 田村昌三, 「有機過酸化物の衝撃感度, 伝爆性と爆発威力の試験法, MkIII弾動白砲の性能と応用(XII)」, 安全工学, **24**(5), 256(1985)
  - 15) 松永猛裕, 村永浩太郎, 黒田英司, 伊藤葵, 田村昌三, 安部隆幸, 齊藤照光, 吉田忠雄, 「砂中爆発法の性質と応用(第1報), 漏斗孔容積と伝爆性」, 工業火薬, **47**(5), 309(1986)
  - 16) T.R.Gibbs, A.Popolato, "LASL Explosive Property Data", Univ. California Press (1980)
  - 17) B.M.Dobratz, "LLNL Explosives Handbook. Properties of Chemical Explosives and Explosive Simulants", Lawrence Livermore National Laboratory (1981)
  - 18) 松永猛裕, 村永浩太郎, 伊藤葵, 田村昌三, 蔵持勇, 吉田忠雄, 「MkIII弾動白砲の性能と応用(第11報), 弾動白砲を用いた小型カードギャップ衝撃感度試験法」, 工業火薬, **46**(5), 327(1985)
  - 19) 田中一三, 「水中爆発におけるガス球の挙動, 第1報 電導度プローブによる測定」, 工業火薬, **36**(1), 11(1975)
  - 20) R.H.Cole, "Underwater Explosions", Princeton University Press (1948)
  - 21) 田中一三, 生沼仙三, 「水中爆発ガス球脈動周期のマイクロフォンによる測定」, 工業火薬, **47**(4), 196(1986)
  - 22) 吉田信男, 木村歩, 金子良昭, 和田有司, 松永猛裕, 吉田忠雄, 「水中爆発を用いた爆発性の評価(III), 50/60鉄管と10gPETN伝爆薬を用いた伝爆性試験」, 工業火薬, **50**(3), 162(1989)
  - 23) S.Paterson, A.H.Begg, "Underwater Explosion", Propellants and Explosives, **3**, 63(1978)
  - 24) 日本産業火薬会資料編集部編, 「火薬類取締法令集」, 日本産業火薬会資料編集部(1988)

## 第2章 衝撃起爆感度評価

## 2.1 緒言

反応性化学物質の危険性の一つに危険反応の起こり易さがある。危険反応の起こり易さは、一般に感度(Sensitivity)と呼ばれ、与えられる刺激の種類によって異なる。刺激の種類には、熱や火花、火炎、あるいは、機械的に与えられる打撃や摩擦、衝撃波のエネルギー、静電気による火花等がある。危険反応の起こり易さは、反応性化学物質を取り扱う場合に最初に注意しなければならない危険性であり、これらの刺激に対する感度を評価するための試験、それも少ない試料量で簡便に評価できるスクリーニング試験がかなり整備されている。

機械的な打撃に対する感度を評価するための試験(打撃感度試験)には、落つい試験<sup>1)</sup>や落球式打撃感度試験<sup>2)</sup>がある。

落つい試験は、試験機の金敷きの上に置いた2個の円筒コロの間に試料を挟み、鉄ついをその上に落下させて、その落高と試料の爆、不爆との関係から反応性化学物質の感度を調べる試験である。例えば、日本工業規格では、5kgの落ついを用いて、同一落高で6回連続して試験を行い、1回だけ爆発する落高を1/6爆点とし、1/6爆点によって落つい感度の等級を定めている。

落つい試験は、落ついをガイドに沿って落下させるので、落ついの大きさが限定され、重量がかなり重く、与えるエネルギーが大き過ぎる場合がある。また、自由落下ではないために落ついとガイドの間の摩擦の影響も無視できない等の問題がある。

落球式打撃感度試験は、落つい試験の鉄ついのかわりに鉄球を落下させて、円筒コロの間に挟んだ試料を間接的に、または、円筒コロの上に載せた試料を直接的に打撃する。球面で打撃するため方向性が無く、ガイドが不要なため、落下の際に摩擦の影響を受けない。また、落球の重量を自由に選択できるので、与えられるエネルギーの範囲が広く、感度の高い物質から感度の低い物質まで評価できる。

しかし、これらの打撃感度試験は、試料の爆、不爆を音、火炎、光、煙等で判定するために、物質によっては判定が困難で、感度の評価を誤ってしまう可能性がある。また、これらの打撃感度試験では感度が低すぎて爆発しない物質

も存在する。

雷管の起爆等で物質が爆ごうすると衝撃波を発生する。このような衝撃波も危険な反応を開始する刺激となる。衝撃波によって与えられるエネルギーは、打撃によるエネルギーより瞬間的に与えられる。また、打撃よりはるかに大きなエネルギーを与えることも可能である。したがって、打撃感度試験では感度が低すぎて評価できない物質が反応する場合がある。

本研究では、反応性化学物質に衝撃波が当たったときの爆ごうやデフラグレーションの起こり易さ、言い換えれば、反応性化学物質に衝撃を与えたときの起爆され易さを衝撃起爆感度と呼ぶ。

MkIII弾動白砲を用いた可変起爆剤試験<sup>2)</sup>や小型ギャップ試験<sup>2)</sup>は、衝撃起爆感度を評価する試験である。これらの試験は、起爆力の指標となるPETN当量やギャップ長と弾動白砲の振幅との関係から、試料が起爆される限界の起爆力が求められ、定量的に感度を比較することができる。しかし、これらの試験は、試料量がそれぞれ1回当たり5.0gおよび1.0gで複数回の試験が必要であり、高価な物質や合成が非常に困難な物質の場合には決して少ない量とはいえない。また、可変起爆剤試験は5.0gの試料内部で起爆するのに対して、小型ギャップ試験は1.0gの試料の一端から起爆することから、試料量や試料形態、起爆方法等が異なるために、二つの試験の間の整合性が明確ではない。

本章では、前述の打撃感度試験の判定の困難さと感度の低い物質の評価ができないという欠点およびMkIII弾動白砲を用いた衝撃起爆感度試験の試料量の多さと感度による試験方法の相違という欠点を克服する試験として開発した水中雷管起爆試験について述べる。

水中雷管起爆試験は、可変起爆剤試験と小型ギャップ試験を少試料量の統一された試料形態で行う試験である。水中雷管起爆試験では、少ない試料量で試料の爆、不爆を判定するために、爆発によって発生するエネルギーを精密に測定できる水中爆発法を応用した。

## 2.2 水中雷管起爆試験

### 2.2.1 試験方法

#### 2.2.1.1 試験材料

雷管起爆試験の試料容器は、研究の初期においては、MkIII弾動白砲を用いた可変起爆剤試験で雷管あるいはPETNを装填するために用いたポリエチレン製チューブを使用した<sup>3,4)</sup>。このポリエチレン製チューブは、長さ47mm、底部の内径6.5mm、外径8mm、上端部の内径7mmで、肉厚は0.8mmで一定であるが、上端部ほど内径が広がっている。また、底部に厚さ0.8mmの底板と上端部に肉厚0.8mmで外径11mmのつばを持つ。

衝撃起爆感度が高い物質は、このチューブよりギャップ長の方が長くなるため、内径7mm、外径10mm(肉厚1.5mm)のチューブを必要な長さに切断して試料容器とした<sup>5)</sup>。このとき、試料に不慮の刺激を与えないように底に厚さ2mmのカードを入れた試料の装填部分を別に作成し、ギャップと雷管を入れたチューブを後から接続する方法を採用した。この場合、ギャップと雷管を入れたチューブの底は伸張可能なラボラトリーフィルム(American National Can Co.製、商品名 Parafilm M)で封じ、静かに試料に押しつけた。この方法は、試料部分だけをあらかじめ作成しておくことができ、試験の能率が向上することが判明したので、以後の試験はこの方法で行った。以上の試料体の変遷を図2.1に示した。

ギャップ材は、直径6.5mm、厚さ1mmまたは2mmのポリエチレン製カードまたは直径6.5mm、長さ4mm、8mmおよび16mmのポリエチレン製棒を組み合わせて用いた。

雷管は、日本化薬(株)製の瞬発電気雷管で、小型ギャップ試験では0号雷管を用い、可変起爆剤試験では0号雷管、1号雷管、2号雷管、3号雷管および6号雷管を用いた。

試験は水中で行うため、試料体をラボラトリーフィルムで包んで防水した。

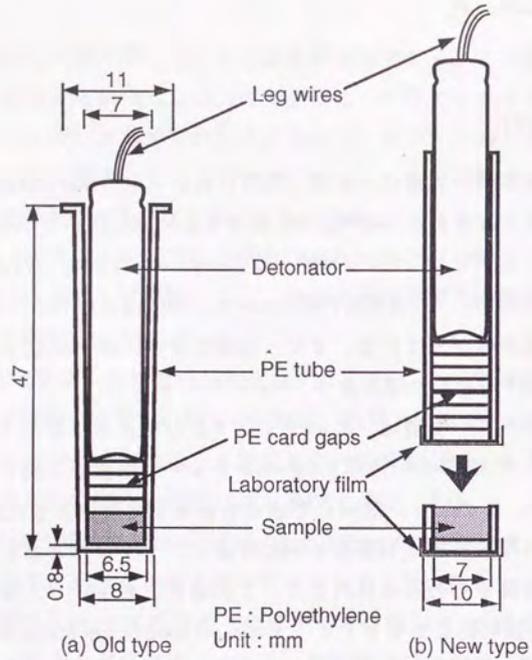


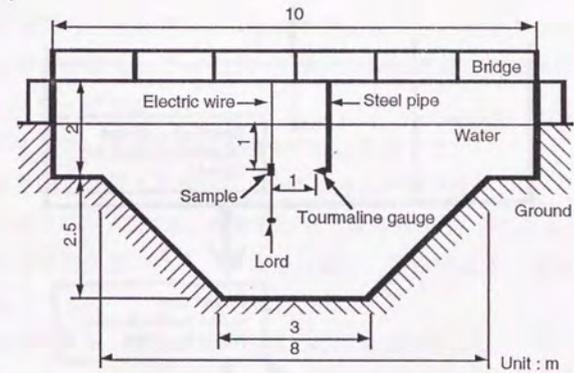
Fig.2.1 Changes of sample assemblies for underwater detonator initiating test.

2.2.1.2 試験設備

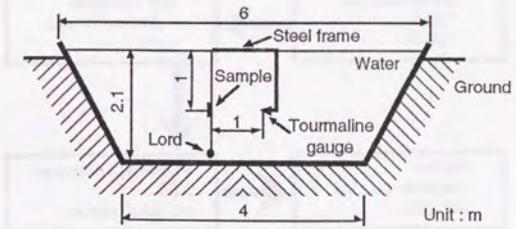
試験は、二カ所の水槽で行った。一つは、細谷火工(株)技術開発センターに備えられた水槽である。その形状は、底部の直径が3m、上部の直径が8m、深さ2.5mの逆円錐台形的水槽の上に、直径10m、深さ2mの円筒形的水槽がつけられた形で、合計の深さが4.5mである。水槽の上には、水槽のほぼ中央を通過して橋が架けられており、試料体および圧力センサーはこの橋から吊り下げた。

もう一つは、日本化薬(株)姫路工場の水中爆発試験場に備えられた水槽である。その形状は、底部の直径が4m、上部の直径が6m、深さ2.1mの逆円錐台形である。水槽の上にはクレーンが備えられており、試料体および圧力センサーを支持具に取り付け、その支持具をクレーンで水槽に沈めた。

試験設備と測定配置を図2.2に示した。



(a) Water pool in Sugao factory of Hosoya Kako Co., Ltd.



(b) Water pool in Himeji Branch of Nippon Kayaku Co., Ltd.

Fig.2.2 Water pools for underwater explosion test.

## 2.2.1.3 計測装置

水中圧力波形の検出には、トルマリンゲージ(PCB Piezotronics, Inc.製, 138A10)を用いた。トルマリンゲージの位置は水深1mとし、トルマリンゲージの先端を試料体に向け、センサー部と試料体との距離が1mとなるようにした。

検出された圧力波形はパワーユニット(PCB Piezotronics, Inc.製, 480D06)を通して、水中衝撃波形の場合は、直接、A/D変換器(Autonics (株)製, S210)を介して、爆発気泡の脈動波形の場合は、データレコーダー(TEAC (株)製, MR-10)に記録してからA/D変換器を介して、マイクロコンピューター(NEC製, PC-9801)に取り込み、解析した。圧力波形は、X-Yプロッター(Graphtec (株)製, MP-3200)に出力した。

測定系のブロック図を図2.3に示した。

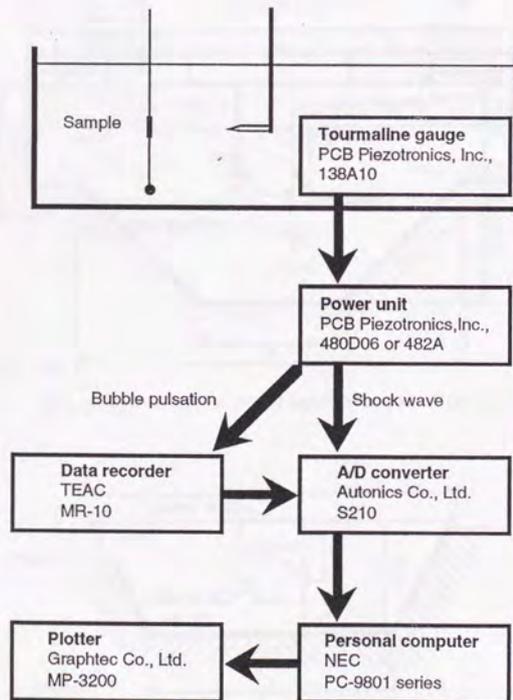


Fig.2.3 Measuring system for underwater explosion test.

## 2.2.1.4 試験手順

水中雷管起爆試験の手順を以下に示す。

- (1) 試料装填用にポリエチレン製チューブを切断する。この長さは、試料を装填した場合に試料の上面とチューブの上面がほぼ一致するようにする。一端をビニルテープで封じて底とし、厚さ2mmのポリエチレン製カードを入れる。
- (2) 0.3gの試料を秤り入れる(ただし、非常に敏感であることが予想される物質の場合は0.1gとする)。
- (3) 雷管およびギャップ装填用にポリエチレン製チューブを切断する。この長さは、ギャップ長より30mm程度長くする。一端をラボラトリーフィルムで封じて底とし、所定のギャップ長になるように、適当な枚数のポリエチレン製カードまたはポリエチレン製棒を入れる。
- (4) 試料装填部の上面にギャップ部の下面を合わせ、ギャップの上から所定の雷管で静かに押え、ギャップの下端が試料に接触するようにする。接続部をビニルテープで固定する。
- (5) 雷管が抜けないように脚線を巻き付けて固定する。
- (6) 試料体全体をラボラトリーフィルムで包んで防水する。
- (7) 試料体の中心が水深1m、圧力センサーから1mの位置になるように沈める。
- (8) 測定系の準備が整ったら、雷管を結線し、導通確認後、発破器を用いて起爆する。
- (9) 試料体を回収し、試料部分の破損の程度を観察する<sup>5)</sup>。

## 2.2.1.5 評価方法

水中雷管起爆試験による起爆され易さは、与えられた起爆力と発生したエネルギーとの関係から評価する。ただし、与えられた起爆力は直接測定することができないので、小型ギャップ試験の場合はポリエチレンカードの長さ(ギャップ長)を、可変起爆剤試験の場合は雷管号数を起爆力の指標とする。

与えられた起爆力の指標と発生したエネルギーとの関係をプロットすると、ある起爆力以下では試料の分解によるエネルギーが観察されない領域が存在する。この領域に相当する起爆力では試料は起爆されないで安全であると考えられる。

しかし、これ以上の起爆力の領域、すなわち、僅かでも試料の分解によるエネルギーの発生が認められる領域では、安全であるとはいえない。したがって、試料の起爆され易さの指標として、試料の分解によるエネルギーが観察されない領域の最大の起爆力を採用した。これは、小型ギャップ試験では、試料が起爆されない領域の最短のギャップ長(限界ギャップ長;  $L_{\text{Crit.}}$ )に相当し、可変起爆剤試験では、試料が起爆されない領域の最大の雷管号数(限界雷管号数;  $N_{\text{Crit.}}$ )に相当する。

このような評価方法は、試料の一部でも反応するということは大きな危険反応につながる可能性があるという安全側に立った考えに基づいている。実際に、試料の一部で起こった反応が試料全体の危険反応につながるかどうかは、後章に述べる危険反応の伝播性の試験によって確認する必要があるが、それ以前の、試料について十分な知識がない段階では、安全側に立って注意して取扱うことが望ましい。

## 2.2.1.6 MkIII弾動白砲試験との比較

水中雷管起爆試験とMkIII弾動白砲試験との測定精度、評価の正確さについての比較は2.4節に述べることとし、ここでは、試験方法について比較する。

MkIII弾動白砲試験の長所は、限界ギャップ長やPETN当量によって感度を定量的に評価できる点と弾動白砲の振れ幅を測定するだけでよいために試験が簡便であることである。一方、短所は、試料量が多い点、設備に費用がかかる点、騒音、振動が大きい点および分解ガスや粉じんの発生等による試験者の健康に対する安全面などがあげられる。

それに対し、水中雷管起爆試験は、感度が定量的に評価できる点では同等であるが、圧力変化を測定し、解析するための測定装置が必要で、解析も複雑である。ただし、気泡エネルギーだけを測定するのであれば、マイクロホンとオッシロスコープで充分である。一方、試験設備は、実用的には0.2~0.3m<sup>3</sup>の水槽で充分なため費用がかからない。また、雷管と少量の試料を水中で起爆するだけであるから、ほとんど騒音、振動、ガス、粉じんが発生しない点で、周囲の環境に対する影響が非常に少ないといえる。ただし、試験後の水槽の水の浄化を考慮する必要がある。

以上のように、費用の面、周囲への影響の面からみて、水中雷管起爆試験が優れている。特に騒音、振動は、エネルギー危険性評価のための試験を実施する際の障害となることが多いので水中雷管起爆試験は有用である。

## 2.2.2 基礎実験

## 2.2.2.1 雷管起爆試験の測定精度

雷管起爆試験におけるエネルギーの測定精度についての知見を得るために、0号雷管単独による衝撃波エネルギー( $E_s$ )および気泡エネルギー( $E_b$ )の測定値を統計的に調べた<sup>5)</sup>。

実際の試験条件に近づけるために、0号雷管はポリエチレン製チューブに入れ、雷管底部には厚さ2mmのポリエチレン製カードを接触させた。防水等の処置も通常の試料体に準じて行った。

実験の結果を表2.1に示す。

Table 2.1 Underwater explosion data of No.0 detonators initiated in polyethylene tubes.

No.	$P_{max}$ [MPa]	$E_s$ [kJ]	$T_b$ [ms]	$E_b$ [kJ]
1	0.91	0.06	16.05	0.37
2	0.90	0.07	15.85	0.35
3	0.88	0.06	15.95	0.36
4	0.67	0.06	15.70	0.34
5	0.84	0.06	15.85	0.35
6	0.86	0.07	15.95	0.36
7	0.69	0.05	15.70	0.34
8	0.81	0.06	15.85	0.35
9	0.81	0.06	15.90	0.36
10	0.78	0.05	15.05	0.30
11	0.73	0.05	15.45	0.33
12	0.74	0.04	15.15	0.31
13	0.79	0.06	15.55	0.33
14	0.73	0.05	15.45	0.33
15	0.78	0.06	15.90	0.36
m	0.80	0.06	15.69	0.344
s	0.07	0.01	0.29	0.019

ここで、 $P_{max}$ ：水中衝撃波の最高圧力、 $T_b$ ：水中爆発気泡の第1脈動周期、 $m$ ：各測定値の平均、 $s$ ：各測定値の標準偏差である。

15回の試験の結果、気泡エネルギーの計算のもととなる水中爆発気泡の第1脈

動周期の平均は15.69ms、標準偏差は0.29msであった。0号雷管の起爆薬量(0.2g)に最大約3%の秤量誤差があり、また、このときの圧力測定のサンプリング間隔(0.05ms)と同等の測定誤差があることを考慮すると、かなり良い精度であるといえる。一方、衝撃波エネルギーの場合は、測定されるエネルギーが小さ過ぎて精度があまり期待できない。これらのことから、1.2.1.5項の最後に述べたように、データの解析には、第1脈動周期から算出される気泡エネルギーを採用する事が妥当であると考えた。

この実験で、算出された気泡エネルギーの平均値は0.34kJ、標準偏差は0.019kJであった。1.2.1.5項の気泡エネルギーの算出式(1.23式)から明らかのように、計算には試料が吊るされた位置の水中の静圧が必要であるが、同一試験日での水中の静圧の変化はあまり大きくないと考え、便宜的に標準条件下での水面下1.0mの位置の静圧を用いた。そのため、水中の静圧の変化分の誤差が増加しているはずであるが、それでも気泡エネルギーのばらつきは、かなり小さく、試料の一部で起こった反応を検知するには充分であると考えられる。

したがって、水中雷管起爆試験では、水中の静圧の変化による誤差を考慮して、試験日毎に時間を変えて複数回雷管単独の気泡エネルギーを測定し、その平均値より0.03kJ以上大きい気泡エネルギーが測定された場合に試料が爆発したと判定することとした。

2.2.2.2 試料量とエネルギーの関係<sup>4)</sup>

雷管起爆試験の試料量を決定するために、試料量と衝撃波エネルギーおよび気泡エネルギーとの関係を調べた。

試料は、日本化薬(株)製のPETN (Pentaerythritol Tetranitrate)の含水品を真空乾燥したものを用いた。雷管は、日本化薬(株)製の0号および6号電気雷管を用いた。

試料量を変化させて0号雷管および6号雷管で起爆したときの試料量と衝撃波エネルギーおよび気泡エネルギーとの関係を表2.2および図2.4に示した。

試料量と衝撃波エネルギーおよび気泡エネルギーの間には直線関係が認められた。そこで、0号雷管で起爆した場合のPETN 1g当りの気泡エネルギーおよび衝撃波エネルギーを最小自乗法を用いて解析すると、それぞれ、2.68kJおよび1.03kJであった。一方、6号雷管で起爆した場合は、それぞれ、2.49kJおよび1.02kJであった。

Table 2.2 Underwater explosion data of PETN in polyethylene tube.

No.	Detonator No.	Mass [g]	$P_{max}$ [MPa]	$E_s$ [kJ]	$E_b$ [kJ]
1	0	0.10	1.63	0.18	0.64
2	0	0.20	2.20	0.31	0.94
3	0	0.30	1.07	0.43	1.25
4	0	0.60	3.00	0.71	1.97
5	0	0.80	3.46	0.93	2.50
6	6	0.10			1.37
7	6	0.30	1.30	0.65	1.86
8	6	0.50	1.50	0.84	2.35
9	6	1.00	1.83	1.43	3.62

0号雷管を用いた実験では、試料量-気泡エネルギー曲線が試料量の少ない領域で湾曲している。これは、試料量の少ない領域では、PETNがポリエチレン製チューブを破壊するための十分なエネルギーを持たず、正常な水中爆発気泡とならないためと考えられる。したがって、0号雷管で起爆した場合の試料量が多い領域(PETN 0.3g以上)について同様に解析すると、PETN 1g当りの気泡エネ

ルギーは2.49kJとなり、6号雷管で起爆した場合と一致する。6号雷管を用いた実験では、6号雷管自身が十分な添装薬(Tetryl 0.4g)を含んでいるために、このような傾向がでない。

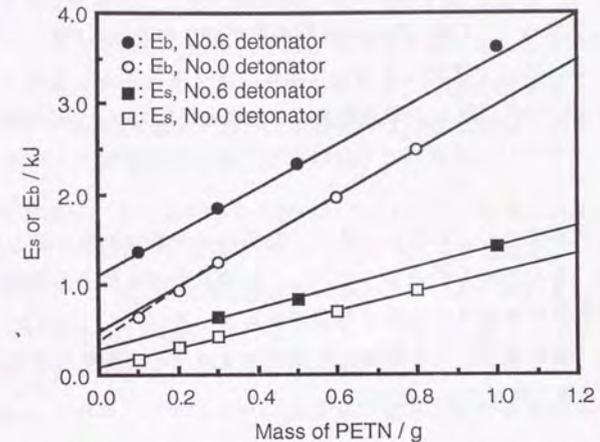


Fig.2.4 Shock energy ( $E_s$ ) or bubble energy ( $E_b$ ) vs. mass of PETN in polyethylene tube by underwater explosion.

以上の基礎実験の結果、0.3g以上の試料量で試料の爆発による衝撃波エネルギーおよび気泡エネルギーが精密に測定できることが明らかになった。そこで、試験時の安全性を考慮して、起爆薬を除く反応性化学物質の水中雷管起爆試験の試料量を0.3gとした。また、試料量と衝撃波エネルギーおよび気泡エネルギーとが直線関係にあることから、試料および雷管の爆発によって発生した衝撃波エネルギーおよび気泡エネルギーから試料量0g、すなわち、雷管単独の爆発によって発生する衝撃波エネルギーおよび気泡エネルギーを差し引くと試料から発生する正味の衝撃波エネルギー( $Net-E_s$ )および正味の気泡エネルギー( $Net-E_b$ )が算出できる。さらに、これらの値を試料量で除することによって単位試料量当りの正味の衝撃波エネルギー( $E_s'$ ;  $Net-E_s/Mass$ )および単位試料量当りの正味の気泡エネルギー( $E_b'$ ;  $Net-E_b/Mass$ )が得られることが明らかになった。

基礎実験では、衝撃波エネルギーまたは気泡エネルギーのどちらを用いても結果の解析が可能であった。これは、試料が高性能爆薬のPETNであり、衝撃波

を伴って爆発するためである。しかし、試料の爆発が衝撃波を伴わない場合は、衝撃波エネルギーによる解析は不可能である。また、衝撃波は、1ms以下の非常に短い時間に観察されるので、実験に用いたデータレコーダーでは波形の記録が不可能で、直接A/D変換器に記憶してコンピューターに取り込まなければならぬ。したがって、1回の実験で波形が記録できる機会は1回しかなく、レンジオーバーやノイズで記録に失敗した場合はデータを得ることができないという短所がある。これに対し、爆発気泡の脈動現象は数10msの時間間隔で観察されるので、データレコーダーで十分に記録でき、ほぼ確実にデータを得ることができる。

前項および本項に述べた理由により、以後の水中雷管起爆試験の解析には主として気泡エネルギーを用いることにし、実験結果は起爆力の指標となる値に対して、単位試料量当りの正味の気泡エネルギーをプロットして行うことにした。ただし、衝撃波形からも衝撃波の発生の有無などの重要な知見が得られるので、できる限り解析することにした。

### 2.2.2.3 限界ギャップ長の精度

試料の衝撃起爆感度を評価する前に、感度の指標となる値の精度について検討する必要がある。ここでは、小型ギャップ試験の場合の限界ギャップ長の精度を検討しようとした。しかし、限界ギャップ長を試料が起爆されない領域の最短のギャップ長と定義したため、そのばらつきを調べることは不可能である。そこで、爆、不爆が明確に分かれる試料を選べば、50%の爆発率を与えると推定されるギャップ長(50%爆点;  $L_{50}$ )が限界ギャップ長にはほぼ一致すると考えて次の実験を行った。

50%爆点の精度は、水中雷管起爆試験においてPETNが起爆されるギャップ長(Gap Length;  $L$  [mm])の対数値( $\log L$ )が正規分布すると仮定して、ギャップ長の対数値を変数としたUp and Down法<sup>6)</sup>によって調べた。試料量は0.3gとした。ギャップ長の対数値で0.05刻みで変化させることとし、ポリエチレン製カードでは正確なギャップ長にできないため、直径6.5mmのポリエチレン製棒を所定の長さで切断して用いた。それ以外の条件は、通常の雷管起爆試験に準じて行った。

試験の結果を表2.3に、解析の経過を表2.4に示した。結果は、Up and down法の解析方法に従い、表2.4に示した式を用いて、50%爆点の対数値( $\log L_{50}$ )およびギャップ長の対数値の標準偏差( $s$ )を求めた。さらに、母集団の標準偏差( $\sigma$ )から平均値の標準偏差( $\sigma_m$ )を求めるための一般式  $\sigma_m = \sigma/\sqrt{N}$  から導かれる2.1式を用いて50%爆点の対数値の標準偏差( $s_{L_{50}}$ )を求めた<sup>6)</sup>。

$$s_{L_{50}} = G \cdot s / \sqrt{N} \quad \text{Eq. 2.1}$$

ここで、 $G$  : 試験水準の刻みと確率密度の標準偏差との比( $d/s$ )によって定まる定数、である。

解析の結果、50%爆点の対数値は1.085( $L_{50} = 12.16\text{mm}$ )、50%爆点の対数値の標準偏差は0.037と推定された。これらの値を用いて、50%爆点の対数値の95%信頼区間を求めると、 $1.085 \pm 1.96 \times 0.037$ 、すなわち、1.012 ~ 1.158で、実際の長さに換算すると10.27 ~ 14.40mmとなり、50%爆点には $\pm 2\text{mm}$ 程度の誤差があると推定された。

Table 2.3 Results of up and down test for PETN by underwater detonator initiating test. (Mass of PETN = 0.3g)

No.	L [mm]	logL	Judgment	P <sub>max</sub> [MPa]	E <sub>s</sub> [kJ]	E <sub>b</sub> [kJ]	Net-E <sub>b</sub> [kJ]
1	25.4	1.40	X	0.88	0.06	0.36	0.00
2	22.4	1.35	X	0.82	0.07	0.38	0.02
3	20.0	1.30	X	0.86	0.07	0.37	0.01
4	17.8	1.25	X	0.87	0.06	0.35	-0.01
5	15.8	1.20	O	0.89	0.14	0.94	0.58
6	17.8	1.25	X	0.82	0.07	0.35	-0.01
7	15.8	1.20	X	0.81	0.06	0.34	-0.02
8	14.1	1.15	X	0.78	0.07	0.35	-0.01
9	12.6	1.10	O	1.78	0.27	0.97	0.61
10	14.1	1.15	X	0.79	0.07	0.36	0.00
11	12.6	1.10	X	0.81	0.07	0.35	-0.01
12	11.2	1.05	X	0.83	0.07	0.36	0.00
13	10.0	1.00	O	1.51	0.26	1.05	0.69
14	11.2	1.05	O	0.94	0.15	0.80	0.44
15	12.6	1.10	O	1.65	0.24	0.85	0.49
16	14.1	1.15	X	0.81	0.07	0.36	0.00
17	12.6	1.10	O	1.52	0.23	0.95	0.59
18	14.1	1.15	X	0.79	0.07	0.35	-0.01
19	12.6	1.10	X	0.81	0.06	0.36	0.00
20	11.2	1.05	X	0.80	0.07	0.36	0.00
21	10.0	1.00	O	1.49	0.22	0.95	0.59
22	11.2	1.05	X	0.85	0.07	0.36	0.00
23	10.0	1.00	O	1.26	0.17	0.81	0.45
24	11.2	1.05	X	0.77	0.06	0.35	-0.01
25	10.0	1.00	O	1.10	0.17	0.92	0.56
26	11.2	1.05	O	1.48	0.22	0.85	0.49
27	12.6	1.10	X	0.77	0.06	0.34	-0.02

ここで、X：不爆，O：爆，を表す。

以上の解析結果をもとに、小型ギャップ試験の限界ギャップ長付近では、最大2mm程度の間隔のギャップ長で試験を行い、爆と不爆がそれぞれ続けて2水準程度観察された場合に試験を終了し、試料が爆発しない領域の最短のギャップ長を限界ギャップ長として採用することとした。

Table 2.4 Analysis of up and down test. Analytical Table

i	L <sub>i</sub> / mm	logL <sub>i</sub>	O(n <sub>i</sub> )	X	i x n <sub>i</sub>	i <sup>2</sup> x n <sub>i</sub>
8	25.4	1.40	0	1		
7	22.4	1.35	0	1		
6	20.0	1.30	0	1		
5	17.8	1.25	0	2		
4	15.8	1.20	1	1	4	16
3	14.1	1.15	0	4	0	0
2	12.6	1.10	3	3	6	12
1	11.2	1.05	2	4	2	2
0	10.0	1.00	4	0	0	0
Total			N = 10	17	A = 12	B = 30

## Analysis

$$\begin{aligned}
 \log L_{50} &= \log L_{i=0} + d \times (A/N + 0.5) \\
 &= 1.00 + 0.05 \times (12/10 + 0.5) \\
 &= 1.085 \\
 (L_{50} &= 12.16\text{mm}) \\
 s &= 1.62 \times d \times \{(N \times B - A^2)/N^2 + 0.029\} \\
 &= 1.62 \times 0.05 \times \{(10 \times 30 - 12^2)/10^2 + 0.029\} \\
 &= 0.129 \\
 s_{L50} &= G \cdot s / \sqrt{N} \\
 &= 0.92 \times 0.129 / 10^{1/2} \quad (G(d/s) = 0.92)^6 \\
 &= 0.037
 \end{aligned}$$

## 2.2.3 試験結果

2.2.3.1 高感度物質への適用<sup>5)</sup>

起爆薬、煙火原料等の高感度物質は、雷管、煙火、その他の火工品原料として重要である。また、信頼性が高く、爆薬として高性能な高感度物質は、今後も医療用火工品、自動車用安全火工品等の精密火工品に必須の要素として利用されていく可能性が高い。

高感度物質は、外部からの刺激に対して非常に敏感で、容易に発火、爆発することが知られているので、危険反応を起こす可能性よりも危険反応の起こり易さに関して十分な知識を持つことが重要である。

高感度物質の危険反応の起こり易さを調べるための試験は、微量の試料で行えることが望ましい。そのため、一般の反応性化学物質のスクリーニング試験である落球式打撃感度試験、着火性試験、SC-DSC試験が適用されてきた。また、特に起爆薬類を判別するための微量加熱試験が最近開発された。

ここでは、数種類の高感度物質に水中雷管起爆試験を適用して衝撃起爆感度を評価した。

高感度物質は、表2.5に示す起爆薬を用い、試験の安全を考慮して0.1gの試料量で行った。また、比較のためにPETN 0.3gの試験も行った。

Table 2.5 Primary explosive samples for underwater detonator initiating test.

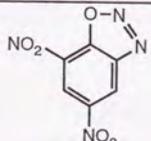
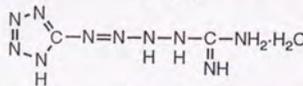
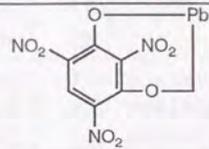
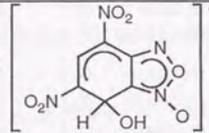
Abbreviation	Chemical Designation	Chemical Structure
PETN	Pentaerythritol Tetranitrate	$C(CH_2ONO_2)_4$
DDNP	Diazodinitrophenol	
アジ化鉛	Lead Azide	$Pb(N_3)_2$
テトラセン	Tetrazene, Tetrazolyl Guanyltetrazene Hydrate	

Table 2.5 (Continued)

Abbreviation	Chemical Designation	Chemical Structure
トリシネート	Tricinate Lead Trinitroresorcinate	
KDNBF	Potassium 4,6-Dinitrobenzofuroxane	$K^+ \left[ \text{C}_6\text{H}_3\text{N}_2\text{O}_4 \right]^-$ 

試験の結果を表2.6および図2.5に示す。試料が不爆となる領域を明確に判定できる感度曲線が得られた。

Table 2.6 Results of underwater detonator initiating test for primary explosives.

Sample	Mass [g]	L [mm]	Det. No.	$P_{max}$ [MPa]	$E_s$ [kJ]	$E_b$ [kJ]	Net- $E_b$ [kJ]	$E_b'$ [kJ/g]
PETN	0.3	45	0	0.78	0.06	0.41	0.05	0.18
PETN	0.3	32	0	1.12	0.10	0.41	0.05	0.16
PETN	0.3	23	0	1.38	0.23	0.83	0.47	1.57
PETN	0.3	16	0	3.12	0.57	1.12	0.76	2.53
PETN	0.3	12	0	1.86	0.31			
PETN	0.3	8	0	2.69	0.43	1.15	0.79	2.62
DDNP	0.1	64	0	1.07	0.09	0.38	0.02	0.22
DDNP	0.1	45	0	1.13	0.09	0.37	0.01	0.12
DDNP	0.1	38	0	1.06	0.09	0.49	0.13	1.32
DDNP	0.1	32	0	1.07	0.14	0.51	0.15	1.52
DDNP	0.1	16	0	1.06	0.14	0.51	0.15	1.52
Lead Azide	0.1	64	0	1.14	0.08	0.38	0.02	0.22
Lead Azide	0.1	54	0	1.05	0.12	0.41	0.05	0.52
Lead Azide	0.1	45	0	1.04	0.13	0.46	0.10	1.02
Lead Azide	0.1	32	0	1.13	0.14	0.45	0.09	0.92

Table 2.6 (Continued)

Sample	Mass [g]	L [mm]	Det. No.	$P_{max}$ [MPa]	$E_s$ [kJ]	$E_b$ [kJ]	Net- $E_b$ [kJ]	$E_b'$ [kJ/g]
Tetrazene	0.1	128	0	0.96	0.08	0.32	-0.02	-0.23
Tetrazene	0.1	91	0	1.16	0.09	0.31	-0.03	-0.33
Tetrazene	0.1	76	0	1.25	0.10	0.37	0.03	0.27
Tetrazene	0.1	64	0	1.07	0.08	0.44	0.08	0.82
Tetrazene	0.1	32	0	0.98	0.09	0.46	0.10	1.02
Tricinate	0.1	64	0	1.15	0.09	0.37	0.01	0.12
Tricinate	0.1	54	0	1.11	0.08	0.36	0.00	0.02
Tricinate	0.1	45	0	1.14	0.08	0.53	0.17	1.72
Tricinate	0.1	32	0	1.01	0.09	0.52	0.16	1.62
Tricinate	0.1	16	0	1.12	0.10	0.51	0.15	1.52
KDNBF	0.1	76	0	1.04	0.07	0.36	0.00	0.02
KDNBF	0.1	64	0	1.21	0.09	0.39	0.03	0.32
KDNBF	0.1	45	0	1.09	0.08	0.40	0.04	0.42
KDNBF	0.1	32	0	1.01	0.08	0.40	0.04	0.42

ここで、L:ギャップ長, Det. No.: 雷管号数, である。

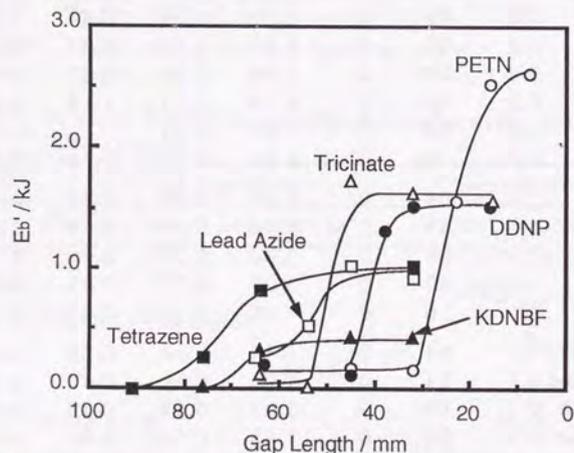


Fig.2.5 Net bubble energy per mass of explosives ( $E_b'$ ) vs. polyethylene card gap length for primary explosives and PETN.

前項に述べたように、試料の一部でも爆発し、エネルギーを発生した場合は危険反応に至る可能性があるという判定基準で、ギャップ長に対して単位試料量当りの正味の気泡エネルギー( $E_b'$ /kJ)をプロットした図から、限界ギャップ長( $L_{Crit.}/mm$ )を求めて衝撃起爆感度の指標とした。

また、 $E_b'$ だけから爆・不爆の判定が困難となった場合を想定して、試験後の試料集合体を回収して、観察した。試料が爆発した場合には、試料部分の防水用のフィルムがめくれた状態になり、容易に判定できた。また、その判定は気泡エネルギーからの判定と一致した。

このようにして求められた高感度物質の衝撃起爆感度を限界ギャップ長を指標として表すと表2.7のようになった。

Table 2.7 Shock sensitivities of primary explosives.

Sample	$L_{Crit.}$
PETN	32mm
DDNP	45mm
Lead Azide	64mm
Tetrazene	91mm
Tricinate	54mm
KDNBF	76mm

ここで、 $L_{Crit.}$ は限界ギャップ長である。

したがって、これらの物質の感度の序列は次のようになる。

テトラセン > KDNBF > アジ化鉛 > トリシネート > DDNP > PETN

用いた起爆薬は、PETNの限界ギャップ長よりも限界ギャップ長が長く、いずれもPETNよりも衝撃起爆感度が高いことを示した。しかし、ギャップ長と $E_b'$ との関係曲線(感度曲線)の形には、DDNPやトリシネートのように完全に爆発する領域と全く爆発しない領域が非常に明確な場合とアジ化鉛やテトラセンのように中間の領域が存在する場合の2通りが観察された。起爆薬のような高感度物質は、試料の爆、不爆が明確に分かれて、部分的な爆発が起こらないものと予想したが、実際には完爆していないと判断できるエネルギーが測定されており、部分的な爆発が起こり得ることが判明した。

以上のように、水中雷管起爆試験によって起爆薬類のような高感度物質の衝

撃起爆感度を判別し、感度の序列を求めることができた。したがって、水中雷管起爆試験は高感度な物質に適用可能な試験であるといえる。

### 2.2.3.2 化合火薬類への適用

化合火薬類は、爆ごうやデフラグレーションを利用する目的で製造されているため、それらの危険反応が起こり得ることは明白である。したがって、高感度物質と同様にそれらの危険反応の起こり易さを知ることが取扱いの安全上重要である。

ここでは、化合火薬類の衝撃起爆感度を水中雷管起爆試験で調べた。

用いた試料は、ニトロ基、ニトラミン基を含む化合火薬類で、表2.8に示すものである。試料量は、0.3gである。

Table 2.8 Explosives for underwater detonator initiating test.

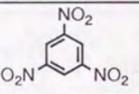
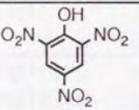
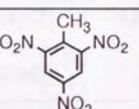
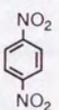
Abbreviation	Chemical Designation	Chemical Structure
TNB	1,3,5-Trinitrobenzene	
PA	Picric Acid 2,4,6-Trinitrophenol	
TNT	2,4,6-Trinitrotoluene	
o-DNB	o-Dinitrobenzene	
m-DNB	m-Dinitrobenzene	
p-DNB	p-Dinitrobenzene	

Table 2.8 (Continued)

Abbreviation	Chemical Designation	Chemical Structure
Tetryl	2,4,6-Trinitrophenylmethyl-nitramine	
DATB	1,3-Diamino-2,4,6-trinitrobenzene	
TATB	1,3,5-Triamino-2,4,6-trinitrobenzene	
RDX	Research Department Explosive Cyclotrimethylenetrinitramine Hexogen	
HMX	High Molecular Weight Explosive High Melting Point Explosive Cyclotetramethylenetetra-nitramine Octogen	
HNS	2,2',4,4',6,6'-Hexanitrostilbene	
HNBB	2,2',4,4',6,6'-Hexanitrobibenzil	
HNDP	2,2',4,4',6,6'-Hexanitrodiphenyl-amine	
KHNDP	Potassium 2,2',4,4',6,6'-Hexa-nitrodiphenylamine	

Table 2.8 (Continued)

Abbreviation	Chemical Designation	Chemical Structure
ONT	2',2'',4,4',4'',6,6',6''-Octanitro-m-terphenyl	

試験の結果を表2.9および図2.6, 2.7, 2.8に示す。

Table 2.9 Results of underwater detonator initiation test for explosives.

Sample	Mass [g]	L [mm]	Det. No.	$P_{max}$ [MPa]	$E_s$ [kJ]	$E_b$ [kJ]	Net- $E_b$ [kJ]	$E_b'$ [kJ/g]
TNB	0.3	0	0	1.06	0.09	0.40	-0.01	-0.03
TNB	0.3	0	2	1.99	0.29	0.94	0.04	0.13
TNB	0.3	0	3	2.27	0.39	1.22	0.12	0.40
TNB	0.3	0	6	2.66	0.50	1.37	0.18	0.60
TNB	0.3	0	6	2.63	0.47	1.32	0.14	0.47
PA	0.3	10	0			0.34	0.00	0.00
PA	0.3	8	0			0.35	0.01	0.03
PA	0.3	8	0	1.20	0.10	0.41	0.00	0.00
PA	0.3	6	0			0.76	0.42	1.40
PA	0.3	4	0	1.68	0.26	0.95	0.54	1.80
PA	0.3	2	0	2.12	0.31	0.97	0.56	1.87
PA	0.3	0	0			0.91	0.57	1.90
PA	0.3	0	0	2.01	0.29	0.95	0.54	1.80
TNT	0.3	8	0	0.53	0.11	0.35	0.03	0.10
TNT	0.3	6	0	1.07	0.11	0.35	0.03	0.10
TNT	0.3	5	0	0.92	0.09	0.33	0.01	0.03
TNT	0.3	4	0	0.57	0.18	0.64	0.32	1.07
TNT	0.3	4	0	1.02	0.09	0.41	0.04	0.13
TNT	0.3	3	0	1.26	0.21	0.82	0.50	1.67
TNT	0.3	3	0	1.05	0.17	0.81	0.44	1.47
TNT	0.3	2	0	1.29	0.23	0.97	0.60	2.00
TNT	0.3	2	0	0.81	0.25	0.80	0.48	1.60
TNT	0.3	0	0	0.89	0.29	0.88	0.56	1.87

Table 2.9 (Continued)

Sample	Mass [g]	L [mm]	Det. No.	$P_{max}$ [MPa]	$E_s$ [kJ]	$E_b$ [kJ]	Net- $E_b$ [kJ]	$E_b'$ [kJ/g]
o-DNB	0.3	4	0	0.99	0.09	0.42	0.01	0.03
o-DNB	0.3	2	0	1.01	0.09	0.56	0.15	0.50
o-DNB	0.3	0	0	1.25	0.14	0.69	0.28	0.93
o-DNB	0.3	0	1	1.68	0.23	0.89	0.32	1.07
o-DNB	0.3	0	2	2.44	0.40	1.28	0.38	1.27
o-DNB	0.3	0	6	2.84	0.58	1.57	0.38	1.27
m-DNB	0.3	0	1	2.36	0.34	1.09	0.52	1.73
m-DNB	0.3	0	1	1.51	0.17	0.57	0.00	0.00
m-DNB	0.3	0	2	2.19	0.39	1.34	0.44	1.47
m-DNB	0.3	0	2	2.48	0.44	1.26	0.36	1.20
m-DNB	0.3	0	3	2.99	0.57	1.60	0.50	1.67
m-DNB	0.3	0	3	2.56	0.50	1.50	0.40	1.33
m-DNB	0.3	0	6	3.02	0.59	1.56	0.37	1.23
m-DNB	0.3	0	6	2.58	0.55	1.65	0.47	1.57
p-DNB	0.3	2	0	0.88	0.08	0.41	0.00	0.00
p-DNB	0.3	0	0	1.40	0.12	0.49	0.08	0.27
p-DNB	0.3	0	1	1.74	0.22	0.84	0.27	0.90
p-DNB	0.3	0	2	2.44	0.38	1.17	0.27	0.90
p-DNB	0.3	0	3	2.56	0.48	1.44	0.34	1.13
p-DNB	0.3	0	6	2.57	0.52	1.48	0.29	0.97
Tetryl	0.3	16	0	1.21	0.10	0.40	-0.01	-0.03
Tetryl	0.3	12	0	1.11	0.09	0.39	-0.02	-0.07
Tetryl	0.3	8	0	1.51	0.20	0.70	0.29	0.97
Tetryl	0.3	4	0	2.11	0.28	0.81	0.40	1.33
DATB	0.3	3	0	0.77	0.06	0.35	0.01	0.03
DATB	0.3	2	0	1.19	0.11	0.43	0.02	0.07
DATB	0.3	1	0	0.72	0.06	0.38	0.04	0.13
DATB	0.3	0	0	1.96	0.24	0.82	0.41	1.37
TATB	0.3	4	0	0.99	0.09	0.39	0.03	0.10
TATB	0.3	2	0	1.15	0.09	0.39	0.03	0.10
TATB	0.3	1	0	1.05	0.09	0.39	0.03	0.10
TATB	0.3	0	0	1.02	0.09	0.40	0.04	0.13
RDX	0.3	14	0	1.14	0.09	0.32	-0.02	-0.07
RDX	0.3	12	0			0.39	0.05	0.17
RDX	0.3	10	0			0.46	0.12	0.40
RDX	0.3	8	0			0.59	0.25	0.83
RDX	0.3	6	0			0.57	0.23	0.77

Table 2.9 (Continued)

Sample	Mass [g]	L [mm]	Det. No.	$P_{max}$ [MPa]	$E_s$ [kJ]	$E_b$ [kJ]	Net- $E_b$ [kJ]	$E_b'$ [kJ/g]
RDX	0.3	4	0			0.63	0.29	0.97
RDX	0.3	2	0			0.78	0.44	1.47
HMX	0.3	16	0	1.11	0.10	0.41	0.00	0.00
HMX	0.3	10	0	0.78	0.06	0.34	0.00	0.00
HMX	0.3	9	0			0.99	0.65	2.17
HMX	0.3	8	0	1.78	0.21	0.61	0.20	0.67
HMX	0.3	6	0	1.24	0.16	0.63	0.22	0.73
HMX	0.3	4	0	1.40	0.20	0.76	0.35	1.17
HMX	0.3	2	0	1.92	0.24	0.82	0.41	1.37
HNS	0.3	6	0	0.99	0.09	0.35	0.01	0.03
HNS	0.3	4	0	1.09	0.09	0.37	0.03	0.10
HNS	0.3	3	0	1.57	0.25	0.95	0.54	1.80
HNS	0.3	2	0			0.92	0.58	1.93
HNS	0.3	2	0	1.20	0.23	0.95	0.54	1.80
HNS	0.3	0	0	1.84	0.29	0.96	0.55	1.83
HNS	0.3	0	0			0.90	0.56	1.87
HNBB	0.3	6	0			0.35	0.01	0.03
HNBB	0.3	4	0	1.24	0.20	0.75	0.41	1.37
HNBB	0.3	2	0			0.84	0.50	1.67
HNBB	0.3	2	0	2.01	0.26	0.87	0.46	1.53
HNBB	0.3	0	0	1.95	0.26	0.92	0.51	1.70
HNDP	0.3	4	0	0.77	0.06	0.36	0.02	0.07
HNDP	0.3	3	0	0.82	0.07	0.39	0.05	0.18
HNDP	0.3	2	0	1.67	0.21	0.86	0.52	1.73
HNDP	0.3	0	0			0.89	0.55	1.84
KHNDP	0.3	16	0	0.76	0.05	0.35	0.01	0.05
KHNDP	0.3	8	0			0.34	0.00	0.01
KHNDP	0.3	7	0	0.75	0.06	0.36	0.02	0.06
KHNDP	0.3	6	0	0.92	0.12	0.73	0.39	1.31
KHNDP	0.3	4	0	1.33	0.15	0.73	0.39	1.29
KHNDP	0.3	0	0	1.41	0.16	0.81	0.47	1.56
ONT	0.3	8	0	0.76	0.06	0.35	0.01	0.05
ONT	0.3	6	0	0.69	0.05	0.35	0.01	0.03
ONT	0.3	5	0	0.74	0.06	0.37	0.03	0.10
ONT	0.3	4	0	0.81	0.07	0.46	0.12	0.42
ONT	0.3	0	0	1.20	0.12	0.63	0.29	0.97

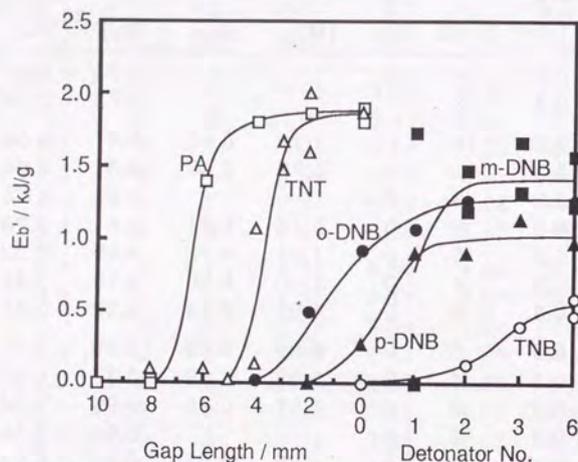


Fig.2.6  $E_b'$  vs. gap length or detonator number for explosives (I).

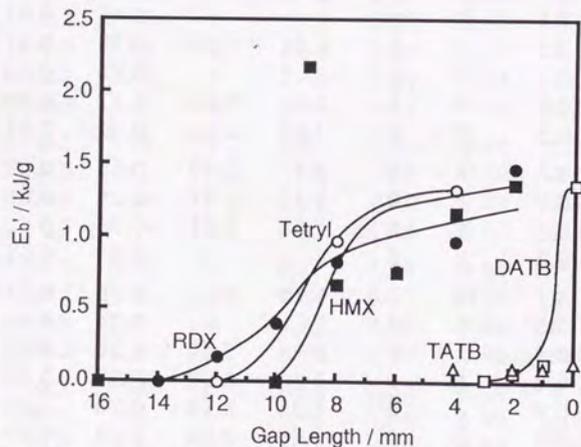


Fig.2.7  $E_b'$  vs. gap length for explosives (II).

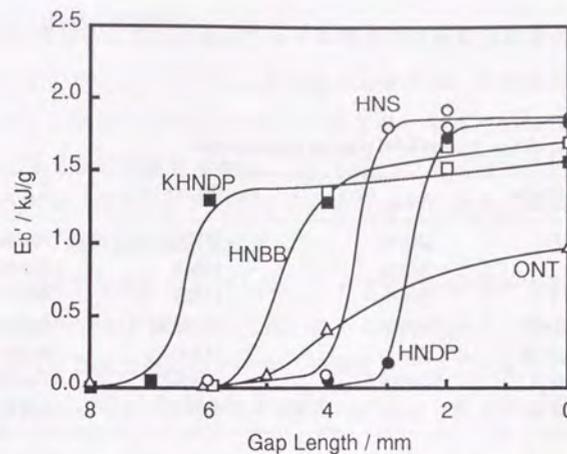


Fig.2.8  $E_b'$  vs. gap length or detonator number for explosives (III).

ほとんどの試料について、試料が爆発しない領域から爆発する領域までの感度曲線が得られた。また、一部の試料では、水中雷管起爆試験の長所が発揮された。例えば、図2.6に示したPAやTNTは、MkIII弾動白砲を用いた小型ギャップ試験で評価が可能である<sup>7)</sup>。しかし、o-DNBやp-DNBのように小型ギャップ試験と可変起爆剤試験の両方の範囲にわたるような感度曲線を持つ物質は、従来の試験方法でこのような連続した感度曲線を得ることは不可能である。特に、p-DNBのような場合は、0号雷管でギャップ長0mmの場合に爆、不爆の判定は容易ではない。仮に、p-DNBが可変起爆剤試験で0号雷管や1号雷管で起爆されても、小型ギャップ試験とは試験方法が異なるために、先の疑問に明確な答えを与えてはくれない。しかし、水中雷管起爆試験では、0号雷管でギャップ長0mmの場合は、試料が部分的に爆発していると判断できる。

また、図2.7のRDXや図2.8のONTのように試料が部分的に爆発している領域が広い物質の場合には、精密な測定が不可能なMkIII弾動白砲を用いた従来の試験方法では部分的な爆発を見落としてしまう危険性が大きい。試験方法が異なるので、どちらの試験結果が正しいかを判断することはできないが、RDXについて従来の試験で、5mm完爆(弾動白砲振れ幅74mm)、6mm不爆(同-1mm)という結果がある<sup>7)</sup>のは部分的な爆発が測定できていない可能性が大きい。

化合火薬類の衝撃起爆感度を限界ギャップ長を指標として表すと、表2.10のようになる。

Table 2.10 Shock sensitivities of explosives.

Sample	L <sub>Crit.</sub>	Sample	L <sub>Crit.</sub>
TNB	0mm	RDX	14mm
PA	8mm	HMX	10mm
TNT	5mm	HNS	4mm
o-DNB	4mm	HNBB	6mm
p-DNB	2mm	HNDP	4mm
Tetryl	12mm	KHNDP	7mm
DATB	1mm	ONT	5mm

以上のように、水中雷管起爆試験によって従来の小型ギャップ試験によって評価される衝撃起爆感度、従来の可変起爆剤試験によって評価される衝撃起爆感度、そして両方に跨る衝撃起爆感度を持つ物質の評価が可能であった。

### 2.2.3.3 混合火薬類への適用

産業用爆破薬やロケット推進薬などの混合火薬類は、爆発威力が重要な性質である。しかし、製造時や取り扱い時の事故を防止するためには、その感度に関する知識を持つことが重要である。ここでは、一般に市販されている産業用爆破薬や黒色火薬、開発されたロケット推進薬などの混合火薬類に水中雷管起爆試験を適用して衝撃起爆感度を評価した。

用いた混合火薬類を表2.11に示した。ダイナマイトの原料であるニトロセルロース(Nitrocellulose)も試料として用いた。ニトロセルロース、産業用爆破薬および粉状黒色火薬は火薬製造メーカーで製造された工業製品である。ロケット推進薬は細谷火工(株)で製造された4種類のロケット推進薬の成型品を粉砕して用いた。

Table 2.11 Blasting explosives for underwater detonator initiating test.

Abbreviation	Sample
Nitrocellulose	ニトロセルロース
CC Collodion	コロジオン
GC Gun Cotton	強綿薬
Dynamites	ダイナマイト類
3KD No.3 Kiri Dynamite	3号桐ダイナマイト
2ED No.2 Enoki Dynamite	2号榎ダイナマイト
Watergel Explosives	含水爆薬類
IM Iremite	アイレマイト
S100A Sunvex 100A	サンベックス100A
SE Sunvex Enoki	サンベックスえのき
Emulsion Explosives	エマルション爆薬類
CM Chitamite	チタマイト
HM Hamamite	ハママイト
KM Kayamite	カヤマイト
Propellants	推進薬類
BP Black Powder	粉状黒色火薬
P1-4 Propellant 1-4	ロケット推進薬1-4

試験の結果を表2.12および図2.9, 図2.10, 図2.11, 図2.12に示す。

Table 2.12 Results of underwater detonator initiating test for blasting explosives and propellants.

Sample	Mass [g]	Gap [mm]	Det. No.	$P_{max}$ [MPa]	$E_s$ [kJ]	$E_b$ [kJ]	Net- $E_b$ [kJ]	$E_b'$ [kJ/g]
CC	0.3	16	0	1.14	0.09	0.38	-0.03	-0.10
CC	0.3	8	0	1.02	0.09	0.38	-0.03	-0.10
CC	0.3	4	0	1.25	0.22	0.97	0.56	1.87
GC	0.3	16	0	1.11	0.09	0.39	-0.02	-0.07
GC	0.3	8	0	2.05	0.34	1.10	0.69	2.30
GC	0.3	4	0	1.79	0.35	1.11	0.70	2.33
2ED	0.3	4	0	1.14	0.10	0.43	0.02	0.07
2ED	0.3	2	0	1.21	0.12	0.45	0.04	0.13
2ED	0.3	0	0	1.33	0.13	0.44	0.03	0.10
3KD	0.3	8	0	1.18	0.10	0.41	0.00	0.00
3KD	0.3	4	0	1.16	0.11	0.46	0.05	0.17
3KD	0.3	2	0	1.32	0.13	0.54	0.13	0.43
3KD	0.3	0	0	1.56	0.18	0.64	0.23	0.77
3KD	0.3	0	1	1.77	0.22	0.90	0.33	1.10
3KD	0.3	0	6	2.99	0.53	1.43	0.25	0.83
IM	0.3	4	0	1.21	0.11	0.46	0.05	0.17
IM	0.3	2	0	1.41	0.16	0.62	0.21	0.70
IM	0.3	0	0	1.57	0.15	0.51	0.10	0.33
IM	0.3	0	1	1.78	0.26	0.95	0.38	1.27
IM	0.3	0	1	2.01	0.27	0.88	0.31	1.03
IM	0.3	0	2	2.14	0.36	1.32	0.42	1.40
IM	0.3	0	3	2.90	0.52	1.50	0.40	1.33
IM	0.3	0	6	3.02	0.59	1.61	0.43	1.43
S100A	0.3	0	0	1.32	0.12	0.43	0.02	0.07
S100A	0.3	0	1	1.68	0.20	0.65	0.08	0.27
S100A	0.3	0	2	2.26	0.33	0.97	0.07	0.23
S100A	0.3	0	3	2.46	0.40	1.23	0.13	0.43
SE	0.3	2	0	1.57	0.13	0.50	0.09	0.30
SE	0.3	0	0	1.22	0.10	0.41	0.00	0.00
SE	0.3	0	0	1.89	0.20	0.70	0.29	0.97
SE	0.3	0	1			0.97	0.40	1.33
SE	0.3	0	2	2.67	0.45	1.32	0.42	1.40
SE	0.3	0	3	2.99	0.56	1.59	0.49	1.63
SE	0.3	0	6	3.00	0.57	1.65	0.47	1.57

Table 2.12 (Continued)

Sample	Mass [g]	Gap [mm]	Det. No.	$P_{max}$ [MPa]	$E_s$ [kJ]	$E_b$ [kJ]	Net- $E_b$ [kJ]	$E_b'$ [kJ/g]
CM	0.3	2	0	1.17	0.10	0.40	-0.01	-0.03
CM	0.3	0	0	1.37	0.17	0.74	0.33	1.10
CM	0.3	0	1	2.12	0.31	0.98	0.41	1.37
HM	0.3	2	0	1.19	0.10	0.40	-0.01	-0.03
HM	0.3	0	0	1.19	0.10	0.41	0.00	0.00
HM	0.3	0	1	2.22	0.31	1.01	0.44	1.47
HM	0.3	0	2	2.63	0.44	1.32	0.42	1.40
HM	0.3	0	3	2.70	0.46	1.44	0.34	1.13
HM	0.3	0	6			1.63	0.45	1.50
KM	0.3	2	0	1.18	0.10	0.39	-0.02	-0.07
KM	0.3	0	1	1.71	0.19	0.67	0.10	0.33
KM	0.3	0	2	2.28	0.36	1.17	0.27	0.90
KM	0.3	0	3	2.80	0.56	1.48	0.38	1.27
KM	0.3	0	6	2.59	0.52	1.59	0.41	1.37
BP	0.3	1	0	1.16	0.10	0.43	0.02	0.07
BP	0.3	0	0	1.12	0.10	0.50	0.09	0.30
BP	0.3	0	1	1.57	0.20	0.82	0.25	0.83
P1	0.3	16	0	0.53	0.04	0.34	0.00	-0.01
P1	0.3	14	0	0.77	0.06	0.35	0.01	0.02
P1	0.3	12	0	1.39	0.15	0.72	0.37	1.24
P1	0.3	8	0	0.62	0.05	0.39	0.05	0.16
P1	0.3	0	0	1.33	0.17	0.89	0.55	1.82
P2	0.3	16	0	0.81	0.05	0.33	-0.01	-0.04
P2	0.3	12	0	0.62	0.05	0.34	-0.01	-0.02
P2	0.3	10	0	0.76	0.06	0.37	0.03	0.09
P2	0.3	8	0	0.90	0.12	0.69	0.34	1.14
P2	0.3	0	0	1.52	0.18	0.81	0.47	1.56
P3	0.3	32	0	0.38	0.03	0.31	-0.04	-0.13
P3	0.3	23	0	0.75	0.05	0.35	0.01	0.02
P3	0.3	16	0	1.25	0.14	0.78	0.43	1.45
P3	0.3	8	0	1.13	0.14	0.82	0.48	1.60
P3	0.3	0	0	1.28	0.17	0.93	0.58	1.95
P4	0.3	8	0	0.78	0.05	0.34	0.00	-0.01
P4	0.3	6	0	0.60	0.04	0.31	-0.03	-0.11
P4	0.3	5	0	0.78	0.05	0.34	0.00	-0.01
P4	0.3	4	0	0.52	0.05	0.39	0.04	0.15
P4	0.3	0	0	0.99	0.11	0.64	0.30	0.99

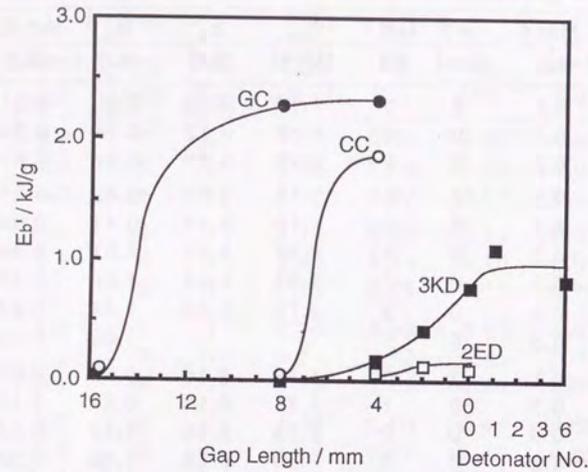


Fig.2.9  $E_b'$  vs. gap length or detonator number for nitrocellulose and dynamites.

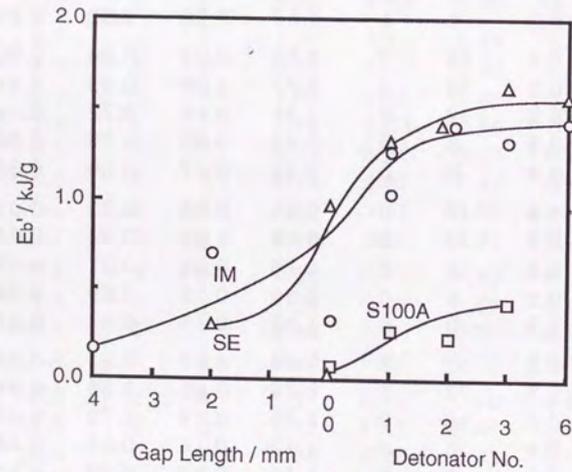


Fig.2.10  $E_b'$  vs. gap length or detonator number for watergel explosives.

ニトロセルロースは、ダイナマイトと比較してはるかに敏感であることが確認された。また、産業用爆破薬類は、ギャップ長が減少するにつれて徐々に $E_b'$

が増加する傾向が見られた。これは、産業用爆破薬が安全化されているために、試料の一部分で起こった反応が伝播しないことをあらわしている。

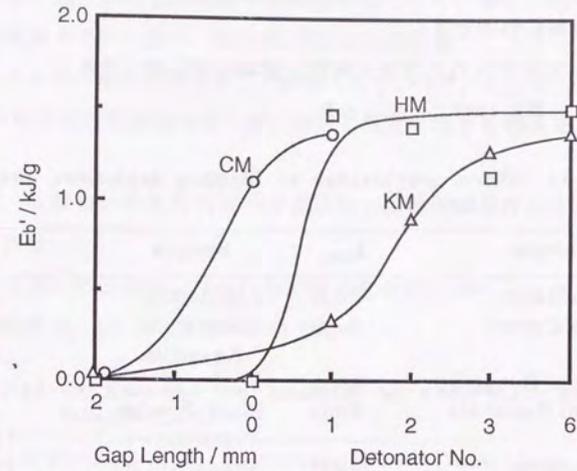


Fig.2.11  $E_b'$  vs. gap length or detonator number for emulsion explosives.

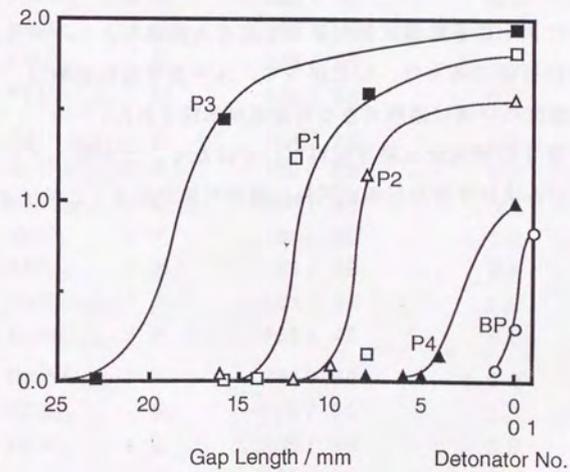


Fig.2.12  $E_b'$  vs. gap length or detonator number for black powder and propellants.

混合物からの微量のサンプリングでは、個々の試料に差ができてエネルギーのばらつきが大きくなり、明確な感度曲線が得られないことが予想された。しかし、実際には、試料の部分的な爆発は観察されたが、爆発する領域と爆発しない領域は容易に判別できた。

実験によって求められた混合火薬類の衝撃起爆感度を限界ギャップ長を指標として表すと、表2.13のようになった。

Table 2.13 Shock sensitivities of blasting explosives and propellants.

Sample	L <sub>Crit.</sub>	Sample	L <sub>Crit.</sub>
Collodion	8mm	Chitamite	2mm
Gun Cotton	16mm	Hamamite	0mm
		Kayamite	2mm
No.2 Enoki Dynamite	4mm		
No.3 Kiri Dynamite	8mm	Black Powder	1mm
		Propellant 1	14mm
Iremite	>4mm	Propellant 2	10mm
Sunvex 100A	0mm	Propellant 3	23mm
Sunvex Enoki	>2mm	Propellant 4	5mm

以上のように水中雷管起爆試験によって混合火薬類のような混合物の衝撃起爆感度の評価が可能であった。したがって、水中雷管起爆試験は、一般の混合物の衝撃起爆感度の評価に適用できる可能性が示唆された。

また、水中雷管起爆試験は粉体試料だけではなく、こう質、スラリー状、エマルジョン、ゴム状粉末等の形態の試料に適用可能であることが示された。

#### 2.2.3.4 酸化剤/可燃物系混合物への適用

酸化剤は、煙火やその他の火薬類の原料として重要な位置を占めている。酸化剤の中には、酸化剤単独や可燃物との混合物として、激しい燃焼性や、爆発性を示す物質がある。一般に、酸化剤/可燃物系混合物は、エネルギー放出量が大きく、エネルギー危険性が高いことが知られている<sup>8)</sup>。したがって、これらの酸化剤/可燃物系混合物を取り扱う際にはその感度に関する知見を得ることが重要である。

ここでは、数種類の酸化剤/可燃物系混合物の衝撃起爆感度を水中雷管起爆試験によって評価した<sup>9)</sup>。

用いた酸化剤と可燃物およびそれらの混合量を表2.14に示した。試料はいずれも市販の試薬で、1級品または特級品である。

Table 2.14 Oxidizer and fuel mixtures for underwater detonator initiating test.

Oxidizer / Fuel	Mixture ratio [mg/mg]	Total Mass [g]
Ba(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> / Al	223 / 77	0.3
KClO <sub>3</sub> / Al	208 / 92	0.3
KClO <sub>4</sub> / Al	198 / 102	0.3
KNO <sub>3</sub> / Al	208 / 92	0.3
Pb(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> / Al	236 / 64	0.3
Ag(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> / P	164 / 36	0.2
Ba(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> / P	162 / 38	0.2
KClO <sub>4</sub> / P	148 / 52	0.2
KNO <sub>2</sub> / P	164 / 36	0.2
KNO <sub>3</sub> / P	152 / 48	0.2
Pb(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> / P	168 / 32	0.2
Sr(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> / P	155 / 45	0.2
Ba(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> / S	230 / 70	0.3
KClO <sub>3</sub> / S	215 / 85	0.3
KClO <sub>4</sub> / S	205 / 95	0.3
KNO <sub>3</sub> / S	215 / 85	0.3
Pb(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> / S	242 / 58	0.3

ただし、Pは赤燐(Red Phosphorus)である。

試料量は、落球式打撃感度試験の結果などから推測される危険性の程度に応じて、酸化剤/アルミニウム系混合物および酸化剤/硫黄系混合物0.3g, 酸化剤/赤燐系混合物0.2gとした。混合比は酸素バランス<sup>2)</sup>が0となるように調整した。各酸化剤成分は、めのう乳鉢で粉碎してから混合した。

水中雷管起爆試験の結果を表2.15および図2.13, 図2.14, 図2.15に示した。

Table 2.15 Results of underwater detonator initiating test for oxidizer and fuel mixtures.

Oxidizer	Fuel	Mass [g]	L [mm]	Det. No.	$P_{max}$ [MPa]	$E_s$ [kJ]	$E_b$ [kJ]	Net- $E_b$ [kJ]	$E_b'$ [kJ/g]
Ba(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub>	Al	0.3	8	0	0.83	0.07	0.36	0.02	0.06
Ba(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub>	Al	0.3	6	0	0.76	0.05	0.35	0.01	0.02
Ba(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub>	Al	0.3	4	0	0.80	0.06	0.37	0.03	0.09
Ba(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub>	Al	0.3	2	0	0.74	0.05	0.53	0.19	0.63
Ba(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub>	Al	0.3	0	0	0.74	0.06	0.55	0.21	0.69
KClO <sub>3</sub>	Al	0.3	16	0	0.72	0.05	0.34	0.00	-0.01
KClO <sub>3</sub>	Al	0.3	12	0	0.80	0.06	0.40	0.05	0.17
KClO <sub>3</sub>	Al	0.3	8	0	0.74	0.06	0.40	0.06	0.19
KClO <sub>3</sub>	Al	0.3	4	0	0.79	0.07	0.72	0.38	1.26
KClO <sub>3</sub>	Al	0.3	0	0	0.84	0.08	0.91	0.57	1.88
KClO <sub>4</sub>	Al	0.3	32	0	0.77	0.06	0.34	0.00	0.00
KClO <sub>4</sub>	Al	0.3	27	0	0.69	0.06	0.35	0.01	0.02
KClO <sub>4</sub>	Al	0.3	23	0	0.76	0.06	0.44	0.10	0.32
KClO <sub>4</sub>	Al	0.3	16	0	0.74	0.06	0.48	0.13	0.44
KClO <sub>4</sub>	Al	0.3	8	0	0.84	0.06	0.42	0.07	0.25
KClO <sub>4</sub>	Al	0.3	4	0	0.72	0.06	0.69	0.35	1.16
KClO <sub>4</sub>	Al	0.3	0	0	0.87	0.08	0.92	0.58	1.93
KNO <sub>3</sub>	Al	0.3	8	0	0.47	0.04	0.36	0.02	0.07
KNO <sub>3</sub>	Al	0.3	6	0	0.56	0.04	0.35	0.01	0.02
KNO <sub>3</sub>	Al	0.3	4	0	0.76	0.06	0.42	0.07	0.25
KNO <sub>3</sub>	Al	0.3	2	0	0.71	0.06	0.49	0.14	0.47
KNO <sub>3</sub>	Al	0.3	0	0	0.61	0.06	0.65	0.31	1.04

Table 2.15 (Continued)

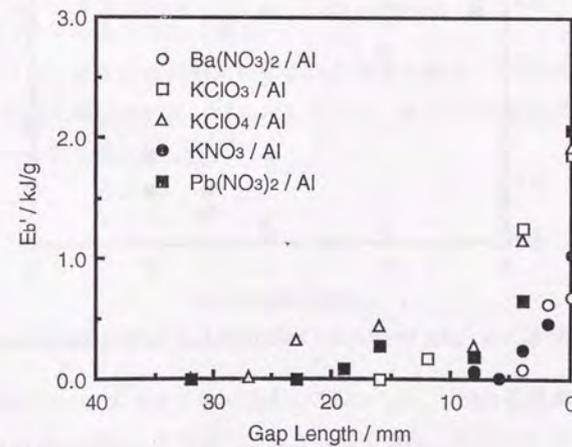
Oxidizer	Fuel	Mass [g]	L [mm]	Det. No.	$P_{max}$ [MPa]	$E_s$ [kJ]	$E_b$ [kJ]	Net- $E_b$ [kJ]	$E_b'$ [kJ/g]
Pb(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub>	Al	0.3	32	0	0.77	0.06	0.34	0.00	0.00
Pb(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub>	Al	0.3	23	0	0.75	0.05	0.33	-0.01	-0.03
Pb(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub>	Al	0.3	19	0	0.72	0.05	0.37	0.03	0.09
Pb(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub>	Al	0.3	16	0	0.74	0.06	0.43	0.09	0.28
Pb(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub>	Al	0.3	8	0	0.70	0.05	0.40	0.06	0.19
Pb(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub>	Al	0.3	4	0	0.70	0.06	0.54	0.20	0.66
Pb(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub>	Al	0.3	0	0	0.78	0.09	0.97	0.62	2.08
AgNO <sub>3</sub>	P	0.2	64	0	0.95	0.07	0.32	0.01	0.05
AgNO <sub>3</sub>	P	0.2	54	0	0.85	0.07	0.32	0.01	0.05
AgNO <sub>3</sub>	P	0.2	45	0	1.01	0.08	0.33	0.02	0.11
AgNO <sub>3</sub>	P	0.2	32	0	0.90	0.08	0.37	0.06	0.31
AgNO <sub>3</sub>	P	0.2	0	0			0.55	0.24	1.21
Ba(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub>	P	0.2	32	0	1.16	0.09	0.33	-0.01	-0.07
Ba(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub>	P	0.2	23	0	0.98	0.08	0.33	-0.01	-0.07
Ba(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub>	P	0.2	16	0	1.05	0.10	0.40	0.06	0.28
Ba(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub>	P	0.2	8	0	1.09	0.09	0.36	0.02	0.08
Ba(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub>	P	0.2	6	0	0.88	0.08	0.40	0.06	0.28
Ba(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub>	P	0.2	4	0	1.00	0.09	0.41	0.07	0.33
Ba(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub>	P	0.2	0	0	1.28	0.12	0.52	0.18	0.88
KClO <sub>4</sub>	P	0.2	256	0	1.27	0.08	0.35	0.01	0.03
KClO <sub>4</sub>	P	0.2	215	0	1.09	0.09	0.36	0.02	0.08
KClO <sub>4</sub>	P	0.2	181	0	1.04	0.07	0.39	0.05	0.23
KClO <sub>4</sub>	P	0.2	128	0	1.13	0.08	0.49	0.15	0.73
KClO <sub>4</sub>	P	0.2	64	0	0.98	0.08	0.52	0.18	0.88
KClO <sub>4</sub>	P	0.2	32	0	1.22	0.10	0.51	0.17	0.83
KClO <sub>4</sub>	P	0.2	16	0	1.21	0.13	0.52	0.18	0.88
KClO <sub>4</sub>	P	0.2	0	0	1.29	0.12	0.63	0.29	1.43
KNO <sub>2</sub>	P	0.2	16	0	1.11	0.09	0.31	-0.03	-0.17
KNO <sub>2</sub>	P	0.2	8	0	1.19	0.09	0.31	-0.03	-0.17
KNO <sub>2</sub>	P	0.2	6	0			0.34	0.00	-0.02
KNO <sub>2</sub>	P	0.2	4	0	0.99	0.09	0.39	0.05	0.23
KNO <sub>2</sub>	P	0.2	0	0	1.22	0.12	0.56	0.22	1.08

Table 2.15 (Continued)

Oxidizer	Fuel	Mass [g]	L [mm]	Det. No.	$P_{max}$ [MPa]	$E_s$ [kJ]	$E_b$ [kJ]	Net- $E_b$ [kJ]	$E_b'$ [kJ/g]
KNO <sub>3</sub>	P	0.2	32	0	1.11	0.09	0.34	0.00	-0.02
KNO <sub>3</sub>	P	0.2	16	0	1.10	0.09	0.33	-0.01	-0.07
KNO <sub>3</sub>	P	0.2	8	0	1.17	0.11	0.39	0.05	0.23
KNO <sub>3</sub>	P	0.2	6	0	1.17	0.10	0.43	0.09	0.43
KNO <sub>3</sub>	P	0.2	4	0	1.15	0.10	0.50	0.16	0.78
KNO <sub>3</sub>	P	0.2	2	0	1.18	0.11	0.61	0.27	1.33
KNO <sub>3</sub>	P	0.2	0	0	1.10	0.11	0.65	0.31	1.53
Pb(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub>	P	0.2	64	0	1.16	0.08	0.31	-0.03	-0.17
Pb(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub>	P	0.2	45	0	1.11	0.08	0.33	-0.01	-0.07
Pb(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub>	P	0.2	32	0	0.98	0.08	0.39	0.05	0.23
Pb(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub>	P	0.2	16	0	1.07	0.09	0.42	0.08	0.38
Pb(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub>	P	0.2	8	0	1.04	0.09	0.43	0.09	0.43
Pb(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub>	P	0.2	0	0	1.27	0.11	0.51	0.17	0.83
Sr(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub>	P	0.2	16	0	1.15	0.09	0.33	-0.01	-0.07
Sr(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub>	P	0.2	8	0	1.03	0.08	0.34	0.00	-0.02
Sr(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub>	P	0.2	6	0	1.03	0.08	0.36	0.02	0.08
Sr(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub>	P	0.2	4	0	0.98	0.08	0.42	0.08	0.38
Sr(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub>	P	0.2	0	0	1.09	0.11	0.50	0.16	0.78
Ba(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub>	S	0.3	4	0	0.81	0.06	0.36	0.01	0.05
Ba(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub>	S	0.3	3	0	0.69	0.05	0.36	0.01	0.05
Ba(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub>	S	0.3	2	0	0.66	0.05	0.37	0.03	0.09
Ba(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub>	S	0.3	0	0	0.86	0.06	0.37	0.03	0.10
KClO <sub>3</sub>	S	0.3	8	0	0.73	0.04	0.33	-0.01	-0.04
KClO <sub>3</sub>	S	0.3	7	0	0.73	0.05	0.33	-0.02	-0.05
KClO <sub>3</sub>	S	0.3	6	0	0.73	0.06	0.44	0.10	0.32
KClO <sub>3</sub>	S	0.3	4	0	0.45	0.05	0.46	0.12	0.39
KClO <sub>3</sub>	S	0.3	0	0	0.62	0.06	0.45	0.11	0.36

Table 2.15 (Continued)

Oxidizer	Fuel	Mass [g]	L [mm]	Det. No.	$P_{max}$ [MPa]	$E_s$ [kJ]	$E_b$ [kJ]	Net- $E_b$ [kJ]	$E_b'$ [kJ/g]
KClO <sub>4</sub>	S	0.3	8	0	0.63	0.05	0.36	0.01	0.05
KClO <sub>4</sub>	S	0.3	6	0	0.78	0.05	0.35	0.01	0.02
KClO <sub>4</sub>	S	0.3	5	0	0.66	0.04	0.31	-0.03	-0.11
KClO <sub>4</sub>	S	0.3	4	0	0.68	0.05	0.39	0.04	0.15
KClO <sub>4</sub>	S	0.3	0	0	0.87	0.07	0.48	0.14	0.46
KNO <sub>3</sub>	S	0.3	8	0	0.77	0.06	0.36	0.02	0.07
KNO <sub>3</sub>	S	0.3	4	0	0.54	0.04	0.35	0.01	0.02
KNO <sub>3</sub>	S	0.3	3	0	0.53	0.04	0.36	0.02	0.06
KNO <sub>3</sub>	S	0.3	2	0	0.81	0.06	0.39	0.04	0.15
KNO <sub>3</sub>	S	0.3	0	0	0.67	0.06	0.47	0.13	0.43
Pb(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub>	S	0.3	8	0	0.76	0.05	0.35	0.00	0.01
Pb(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub>	S	0.3	4	0	0.72	0.06	0.35	0.01	0.03
Pb(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub>	S	0.3	3	0	0.74	0.06	0.37	0.03	0.09
Pb(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub>	S	0.3	2	0	0.70	0.05	0.37	0.03	0.09
Pb(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub>	S	0.3	0	0	0.79	0.06	0.40	0.06	0.20

Fig.2.13  $E_b'$  vs. gap length for oxidizer and aluminum mixtures.

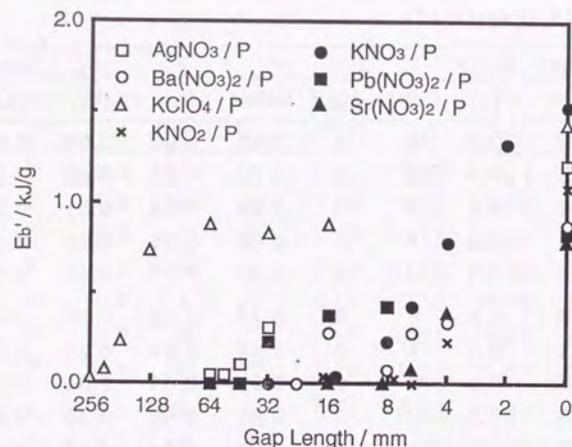


Fig.2.14  $E_b'$  vs. gap length for oxidizer and red phosphorus mixtures.

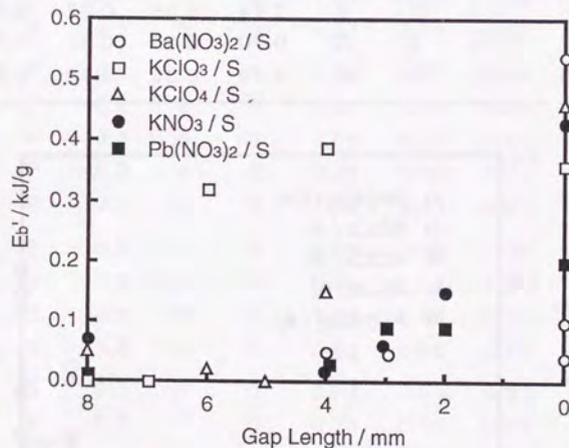


Fig.2.15  $E_b'$  vs. gap length for oxidizer and sulfur mixtures.

酸化剤/可燃物系混合物は、 $E_b'$ のばらつきが大きく見えるが、これは、全般的に $E_b'$ が小さいためである。感度曲線から試料が爆発する領域と爆発しない領域は、明らかに判別できるので、限界ギャップ長の判定に問題はない。このようにして求められた酸化剤/可燃物系混合物の限界ギャップ長を表2.16に示した。

Table 2.16 Results of underwater detonator initiating test for oxidizer and fuel mixtures.

Oxidizer / Fuel	$L_{Crit.}$	Oxidizer / Fuel	$L_{Crit.}$
Ba(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> / Al	4mm	KNO <sub>3</sub> / P	16mm
KClO <sub>3</sub> / Al	16mm	Pb(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> / P	45mm
KClO <sub>4</sub> / Al	27mm	Sr(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> / P	8mm
KNO <sub>3</sub> / Al	6mm	Ba(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> / S	3mm
Pb(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> / Al	19mm	KClO <sub>3</sub> / S	7mm
Ag(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> / P	54mm	KClO <sub>4</sub> / S	5mm
Ba(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> / P	23mm	KNO <sub>3</sub> / S	3mm
KClO <sub>4</sub> / P	215mm	Pb(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> / S	4mm
KNO <sub>2</sub> / P	6mm		

煙火原料として利用されている過塩素酸カリウム/赤燐混合物は、起爆薬類よりも衝撃起爆感度が高く、非常に危険であることが確認された。硝酸銀/赤燐混合物、硝酸鉛/赤燐混合物も、起爆薬類と同等の衝撃起爆感度を示した。

同じ酸化剤について可燃物の種類による衝撃起爆感度の序列は、次のようになった。

赤燐 >> アルミニウム > 硫黄

以上のように、水中雷管起爆試験によって過塩素酸カリウム/赤燐混合物のような非常に衝撃起爆感度が高い混合物も含めて、酸化剤/可燃物系混合物の衝撃起爆感度の評価が可能であった。

## 2.3 他の試験方法との比較

## 2.3.1 熱感度試験との比較

化学反応論的に考える場合、反応性化学物質の様々な種類の感度は、その物質が爆発するために必要な活性化エネルギーと密接に関連している<sup>10)</sup>。また、水中衝撃波によるアジ化銀やアジ化鉛の起爆の際には、衝撃波によってHot Spotが形成されているという報告がある<sup>11)</sup>。Hot Spotが形成され、それが爆発に至る過程では熱に対する感度(熱感度)が重要な因子となることは明白である。これらのことから、物質の熱感度と衝撃起爆感度との間には関連が予想される。

熱感度を評価するための試験として、熱分析装置の1種である密封セル型示差走査熱量測定装置試験(SC-DSC試験)が広く使用されている。ここでは、SC-DSC試験の測定結果と衝撃起爆感度との関連を調べた。

水中雷管起爆試験とSC-DSC試験の結果を表2.17に示した。

Table 2.17 Comparing shock sensitivity with SC-DSC data.

Sample	$L_{Crit.}$ [mm]	$\log L_{Crit.}$	$E_b' Sat.$ [kJ/g]	$T_{DSC}$ [°C]	$Q_{DSC}$ [kJ/g]
PETN	32	1.51	2.58	197	4.76 <sup>a</sup>
DDNP	45	1.65	1.52	149	3.44 <sup>b</sup>
Lead Azide	64	1.81	0.97	327	1.03 <sup>b</sup>
Tetrazene	91	1.96	1.02	149	3.33 <sup>b</sup>
Tricinate	54	1.73	1.62	270	1.91 <sup>b</sup>
KDNBF	76	1.88	0.42	183	3.43 <sup>b</sup>
TNB	0	—	0.54	393	4.49 <sup>a</sup>
PA	8	0.90	1.85	289	4.86 <sup>a</sup>
TNT	5	0.70	1.87	305	4.50 <sup>a</sup>
Tetryl	12	1.08	1.33	190	6.69 <sup>a</sup>
DATB	1	0.00	1.37	331	2.83 <sup>c</sup>
RDX	14	1.15	1.47	211	3.34 <sup>a</sup>
HMX	10	1.00	1.37	269	4.03 <sup>a</sup>
HNS	4	0.60	1.85	339	3.26 <sup>c</sup>
HNBB	6	0.78	1.70	312	3.23 <sup>c</sup>
HNBP	4	0.60	1.84	256	5.23 <sup>d</sup>
KHNBP	7	0.85	1.56	334	4.69 <sup>d</sup>
No.2 Enoki Dy.	4	0.60	—	167	3.70 <sup>e</sup>
No.3 Kiri Dy.	8	0.90	0.90	165	4.16 <sup>e</sup>

Table 2.17 (Continued)

Sample	$L_{Crit.}$ [mm]	$\log L_{Crit.}$	$E_b' Sat.$ [kJ/g]	$T_{DSC}$ [°C]	$Q_{DSC}$ [kJ/g]
Sunvex 100A	0	—	0.43	190	2.93 <sup>e</sup>
Chitamite	2	0.30	1.37	214	3.01 <sup>e</sup>
Kayamite	2	0.30	1.37	228	2.62 <sup>e</sup>
Black Powder	1	0.00	—	319	3.08 <sup>f</sup>

a : Ref.12, b : Ref.13, c : Ref.14, d : Ref.15, e : Ref.16, f : Ref.17.

ここで、 $E_b' Sat.$ は水中雷管起爆試験において試料が完全に起爆されたとき、すなわち、起爆力の増加に対して気泡エネルギーが飽和した時の $E_b'$ 値である。

図2.16に限界ギャップ長( $L_{Crit.}$ )とDSC外挿分解開始温度( $T_{DSC}$ )との関係を示した。

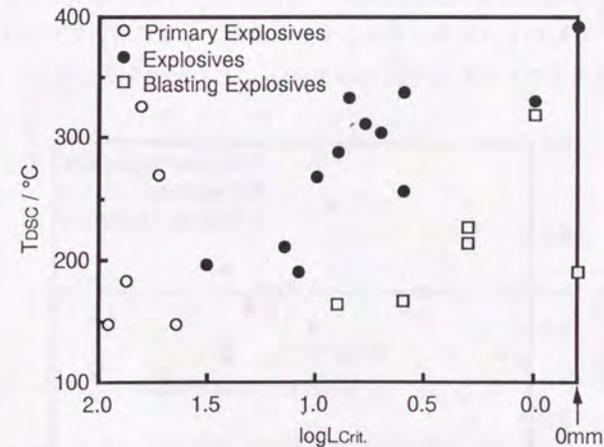


Fig.2.16 SC-DSC decomposition temperature ( $T_{DSC}$ ) vs. logarithm of critical gap length ( $\log L_{Crit.}$ ).

限界ギャップ長と分解開始温度の間には、限界ギャップ長が長いほど分解開始温度が低い、すなわち、衝撃起爆感度が高いほど熱感度が高いという関係が存在した。

物質の種類によって詳細に検討すると、起爆薬類はこの関係が明確ではない。

それは、衝撃起爆感度が高いにもかかわらず分解開始温度が高い物質が存在するためである。それらの物質はアジ化鉛とトリシネートであり、分子中に鉛を含む塩であるために他の有機化合物とは異なった特性を示すと考えられる。

化合火薬類や混合火薬類では、衝撃起爆感度と熱感度との関係が明確である。ただし、化合火薬類と混合火薬類を比較すると、同程度の分解開始温度では混合火薬類の方が限界ギャップ長が短く、衝撃起爆感度が低い。これは、ダイナマイト類や含水爆薬類が取り扱い上の安全性を考慮して、必要以上に感度が高くないように製造されていることに対応する。

また、試料として用いた物質の中に耐熱爆薬と呼ばれる一群の物質がある。耐熱爆薬は、高温地下や宇宙空間、高速飛翔体での利用を目的として開発が盛んであり、目的に応じて様々な感度の耐熱爆薬が必要とされている。しかし、以上に述べたような衝撃起爆感度と熱感度との関係が広く一般に当てはまるものであるとすれば、衝撃起爆感度が高い耐熱爆薬の合成には限界があるといえるので、アジ化鉛やトリシネートのような金属を含む塩に着目すべきであろう。

図2.17に限界ギャップ長とDSC分解熱( $Q_{DSC}$ )との関係を示した。

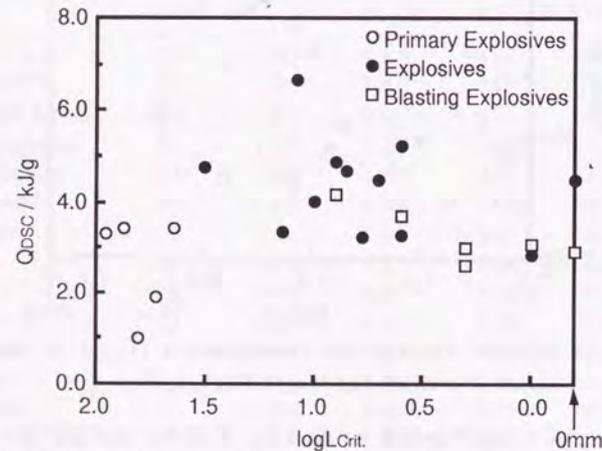


Fig.2.17 SC-DSC heat of decomposition ( $Q_{DSC}$ ) vs.  $\log L_{Crit.}$

限界ギャップ長と分解熱との間には明確な関係がみられなかった。これは、前述のように衝撃起爆感度は活性化エネルギーと関連があるが、分解熱は反応

系と生成系の熱量の差であり途中の経路、すなわち、活性化エネルギーの大きさには依らないためと考えられる。

起爆薬類では、アジ化鉛とトリシネートの分解熱が低く、これらの物質は、高感度で耐熱性があるが発熱量が小さいという特性を持っていることがわかる。

化合火薬類や混合火薬類では、衝撃起爆感度に関係なく約3.0-5.0kJ/gの分解熱を示した。

ここで、気泡エネルギーは、試料の分解時の全エネルギーの約40%を占め、全エネルギー発生量の指標となることが知られている<sup>18)</sup>ので、水中雷管起爆試験において試料が完全に起爆されたときの気泡エネルギーに相当する $E_b'_{Sat.}$ と分解熱との間に関連が予想される。この関係を図2.18に示した。

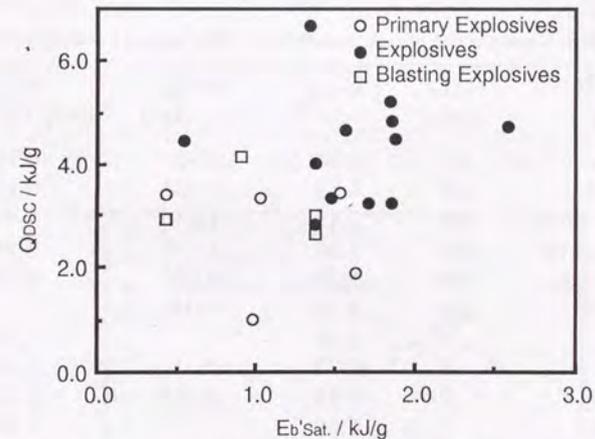


Fig.2.18  $Q_{DSC}$  vs. saturated value of  $E_b'$  ( $E_b'_{Sat.}$ ).

予想に反して、 $E_b'_{Sat.}$ と分解熱との間には明確な関係がみられなかった。ただし、化合火薬類だけに着目して、最も $E_b'_{Sat.}$ が小さいTNBと最も $Q_{DSC}$ が大きいテトリルを除外すると相関係数約0.5の弱い相関がある。TNBは、8号雷管で起爆したときに $E_b' = 2.50$ という参考値があり、テトリルは、最短で4mmのギャップ長までしか試験していないので、両試料ともに $E_b'_{Sat.}$ がさらに大きくなる可能性がある。これらのことを考慮すると化合火薬類に関しては $E_b'_{Sat.}$ と分解熱との間に関連があると考えてよいであろう。

2.3.2 打撃感度試験との比較

落球式打撃感度試験や落つい感度試験などによって評価される打撃感度 (Impact Sensitivity) は、試料に力学的にエネルギーを与えた場合の感度を評価するという点で衝撃起爆感度と共通しており、関連が予想される。

ここでは、衝撃起爆感度の指標として求められた水中雷管起爆試験の限界ギャップ長 ( $L_{Crit.}$ ) と落球式打撃感度試験の50%爆点エネルギー ( $E_{50}$ ) の関連を調べた。

限界ギャップ長と50%爆点エネルギーとの関係を表2.18および図2.19に示した。限界ギャップ長および50%爆点エネルギーは、いずれも値のとる範囲が広いので対数値 ( $\log L_{Crit.}$ ,  $\log E_{50}$ ) をとって比較した。

Table 2.18 Comparing shock sensitivity with impact sensitivity.

Sample	$L_{Crit.}$ [mm]	$\log L_{Crit.}$	$\log E_{50}$ (Drop Ball)	$\log E_{50}$ (Drop Hammer)
PETN	32	1.51	-0.18 <sup>a</sup>	0.70 <sup>b</sup>
DDNP	45	1.65	-0.86 <sup>c</sup>	0.63 <sup>b</sup>
Lead Azide	64	1.81	-1.01 <sup>c</sup>	1.40 <sup>b</sup>
Tetrazene	91	1.96	-1.17 <sup>b</sup>	0.94 <sup>b</sup>
Tricinate	54	1.73	-0.62 <sup>c</sup>	0.70 <sup>b</sup>
KDNBF	76	1.88	-1.04 <sup>c</sup>	
PA	8	0.90		1.25 <sup>d</sup>
TNT	5	0.70		-1.56 <sup>d</sup>
Tetryl	12	1.08	0.03 <sup>a</sup>	1.54 <sup>b</sup>
DATB	1	0.00		1.89 <sup>d</sup>
RDX	14	1.15	-0.44 <sup>a,c</sup>	0.85 <sup>b</sup>
HMX	10	1.00	-0.47 <sup>a</sup>	0.98 <sup>b</sup>
HNS	4	0.60		1.21 <sup>d</sup>
HNBB	6	0.78		1.44 <sup>d</sup>
HNBP	4	0.60		1.60 <sup>e</sup>
KHNBP	7	0.85		1.23 <sup>e</sup>
ONT	5	0.70		1.42 <sup>d</sup>
Ba(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> / Al	4	0.60		>2.04 <sup>d</sup>
KClO <sub>3</sub> / Al	16	1.20		>2.04 <sup>d</sup>
KClO <sub>4</sub> / Al	27	1.43		>2.04 <sup>d</sup>
KNO <sub>3</sub> / Al	6	0.78		>2.04 <sup>d</sup>

Table 2.18 (Continued)

Sample	$L_{Crit.}$ [mm]	$\log L_{Crit.}$	$\log E_{50}$ (Drop Ball)	$\log E_{50}$ (Drop Hammer)
Pb(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> / Al	19	1.28		>2.04 <sup>d</sup>
Ag(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> / P	54	1.73	-0.48 <sup>d</sup>	
Ba(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> / P	23	1.36	0.10 <sup>d</sup>	
KClO <sub>4</sub> / P	215	2.33	-0.61 <sup>d</sup>	
KNO <sub>2</sub> / P	6	0.78	-0.48 <sup>d</sup>	
KNO <sub>3</sub> / P	16	1.20	0.20 <sup>d</sup>	
Pb(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> / P	45	1.65	-0.11 <sup>d</sup>	
Sr(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> / P	8	0.90	0.06 <sup>d</sup>	
Ba(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> / S	3	0.48		1.01 <sup>d</sup>
KClO <sub>3</sub> / S	7	0.85		0.51 <sup>d</sup>
KClO <sub>4</sub> / S	5	0.70		0.63 <sup>d</sup>
KNO <sub>3</sub> / S	3	0.48		0.88 <sup>d</sup>
Pb(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> / S	4	0.60		0.66 <sup>d</sup>

a : Ref.19, b : Ref.20, c : Ref.13, d : Ref.9, e : Ref.15.

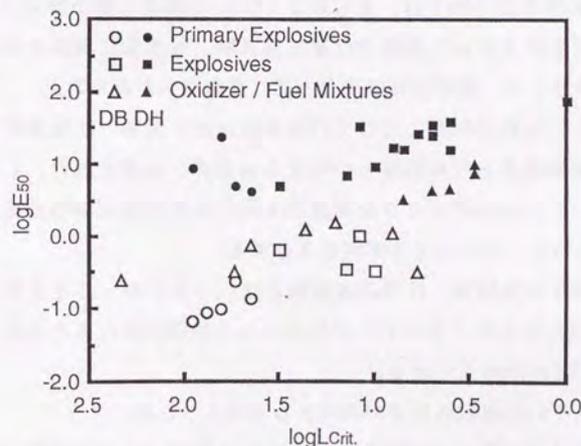


Fig.2.19 Logarithm of 50% point energies ( $E_{50}$ ) evaluated by drop ball (DB) or drop hammer (DH) tests vs. logarithm of critical gap length ( $L_{Crit.}$ ) evaluated by underwater detonator initiating test.

全体として衝撃起爆感度が高い( $L_{crit}$ が大きい)物質ほど打撃感度が高い( $E_{50}$ が小さい)ことが確認された。しかし、その相関性は試料や試験の種類によって異なっている。

起爆薬類では、衝撃起爆感度と落つい感度試験による打撃感度との間の相関が悪い。しかし、起爆薬類は、化合火薬類よりも打撃感度が高いと考えられるので、落つい感度試験の測定結果に疑問が持たれる。この原因として、落つい感度試験では落つい重量が重く、その落下音や落下時の打撃火花のために試料の爆発音や発光が判別できず、正確に感度が評価できないこと等が考えられる。一方、起爆薬類の衝撃起爆感度と落球式打撃感度試験による打撃感度との間では、トリシネートとDDNPとの間で感度の序列の逆転が見られるが、ほぼ直線関係にある。このような感度の序列の逆転やばらつきについては、後に考察する。

化合火薬類では、衝撃起爆感度と落つい感度との間に直線関係がみられた。衝撃起爆感度と落球式打撃感度試験との関係は、落球式打撃感度試験では爆発しないほど打撃感度の低い物質が多く、詳細な比較はできなかった。

酸化剤/可燃物系混合物では、亜硝酸カリウム/赤燐混合物が特異であった以外は、可燃物に赤燐を用いた落球式打撃感度試験、可燃物に硫黄を用いた落つい感度試験に共通して、衝撃起爆感度との間に直線関係がみられた。

以上のように試料の種類に応じて打撃感度試験の試験方法を選択することによって衝撃起爆感度と打撃感度との間に直線関係が確認された。しかし、中にはトリシネートとDDNPのような感度の序列の逆転や感度間の直線関係からの逸脱等がみられる。以下にその原因を考察する。

第一に、雷管起爆試験と打撃感度試験とは、エネルギーの与え方、すなわち、エネルギーの大きさやエネルギーが加えられる時間が異なるために、実際に感度が異なる可能性が考えられる。

次に、それぞれの試験の誤差が原因として考えられる。

落球式打撃感度試験は、20回のUp and down法による試験で50%爆点を算出し、標準偏差も求められることから、信頼性が高いと考えられている。しかし、試験回数や落高間隔をUp and down法の適用条件(40回以上の試験で落高間隔が標準偏差の0.5~2倍)に合わせる事が困難であることや、落球の重量によって

50%爆点エネルギーが変化することが知られており、 $\log E_{50}$ で0.2程度の誤差があるという報告もある<sup>19)</sup>。

一方、水中雷管起爆試験は、試験回数を節約するために、各ギャップ長で1回しか試験していない。したがって、特に高感度物質の場合はギャップ長の間隔が長いので10mm程度の誤差がある。ただし、この誤差は、限界ギャップ長付近の僅かな回数の試験の追加によって飛躍的に減少することが充分期待できる。

以上の考察の結果、衝撃起爆感度と打撃感度とは、相対的に同じような感度の評価を与えるので、通常の実験室で試験が可能な落球式打撃感度試験の方が簡便さの点で優れていると言える。しかし、同一の落球や落ついで試験した評価でなければ、 $\log E_{50}$ による絶対的な感度の評価は信頼できないので、より正確に感度を評価したい場合は、水中雷管起爆試験の方が信頼性があり、優れていると言える。また、酸化剤/アルミニウム系混合物のように落つい感度試験で爆発しないほど打撃感度が低い混合物であっても、水中雷管起爆試験によって衝撃起爆感度を評価し、他の物質と感度を比較することが可能であった。

2.3.3 他の衝撃起爆感度試験との比較

従来行われてきた衝撃起爆感度試験の中にギャップ試験と呼ばれる試験がある。Naval Surface Weapons Center (NSWC; 米国海軍表面武器センター)およびLos Alamos National Laboratory (LANL; ロスアラモス国立研究所)で測定されたギャップ試験の結果は、Dobratz<sup>21)</sup>によってまとめられている。

また、MkIII弾動白砲を用いた小型ギャップ試験および可変起爆剤試験も衝撃起爆感度試験である。

ここでは、水中雷管起爆試験の結果とNSWCおよびLANLのギャップ試験、MkIII弾動白砲を用いた小型ギャップ試験および可変起爆剤試験の結果を測定されたギャップ長によって比較した。これらの値を表2.19に示す。ただし、NSWCおよびLANLのギャップ試験の結果は、Up and Down法を用いて算出された50%爆点のギャップ長である。また、試料の形態はできるだけ粉末に近いものの値を選んだ。

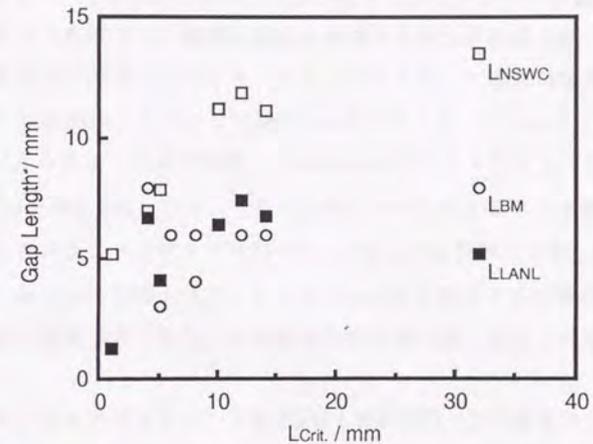
Table 2.19 Comparing gap lengths evaluated by various methods.

Sample	L <sub>Crit.</sub> [mm]	L <sub>BM</sub> [mm]	PETN Eq. [g]	L <sub>NSWC</sub> <sup>a</sup> [mm]	L <sub>LANL</sub> <sup>a</sup> [mm]
PETN	32	8 <sup>b</sup>		13.56	5.21
Lead Azide	64			5850	
PA	8	4 <sup>b</sup>			
TNT	5	3 <sup>b</sup>		7.90	4.11
Tetryl	12	6 <sup>b</sup>		11.96	7.44
DATB	1			5.18	1.27
RDX	14	6 <sup>b</sup>		11.18	6.77
HMX	10			11.28	6.45
HNS	4			7.06	6.71
No.2 Enoki Dy.	4	8 <sup>c</sup>			
No.3 Kiri Dy.	8	6 <sup>c</sup>			
Hamamite	0		0.18 <sup>d</sup>		
Black Powder	1		0.18 <sup>d</sup>		
KNO <sub>3</sub> / Al	6	6 <sup>e</sup>			
KNO <sub>3</sub> / S	3		0.18 <sup>e</sup>		

a : Ref.21, b : Ref.7, c : Ref.22, d : Ref.23, e : Ref.24

ここで、L<sub>BM</sub>、L<sub>NSWC</sub>、L<sub>LANL</sub>はそれぞれMkIII弾動白砲を用いた小型ギャップ試験の限界ギャップ長、NSWCおよびLANLのギャップ試験の50%爆点のギャップ長を表す。また、PETN Eq.は、MkIII弾動白砲を用いた可変起爆剤試験で試料が起爆されない限界のPETN当量を表し、0.18は0号雷管に相当する。

これらのギャップ長の関係を図2.20に示す。ただし、NSWCのギャップ試験のギャップ長の中、アジ化鉛のギャップ長は他の物質と比較して大き過ぎるので省略した。



起爆薬量，試料形態，ギャップの材質，直径等の試験条件が大きく異なるにも関わらず，強い相関がある。したがって，水中雷管起爆試験の限界ギャップ長は，衝撃起爆感度試験として従来行われてきたギャップ試験の50%爆点ギャップ長と同様に衝撃起爆感度の評価値として信頼できる。

一方，水中雷管起爆試験の限界ギャップ長とMkIII弾動白砲を用いた小型ギャップ試験の限界ギャップ長との関係においても，PETNの値が特異となった。この原因については上に推察した。

また，2号榎ダイナマイトの値も他の試料と大きく異なった。ダイナマイト類に関しては，爆破薬包に対する衝撃起爆感度試験として筆者らが開発した可変ギャップ起爆剤試験で，ポリエチレンカードギャップを用いた限界ギャップ長が求められている<sup>25)</sup>。それによると2号榎ダイナマイトの限界ギャップ長は8mm，3号桐ダイナマイトのそれは4mmで，感度の序列からみると $L_{BM}$ が正しく， $L_{Crit.}$ が過小に評価されている可能性が高い。また，図2.9からも2号榎ダイナマイトの $E_b'$ は他の試料より小さく，3号桐ダイナマイトとも大きく異なるので， $L_{Crit.}$ に問題があると考えてよいであろう。この原因については，試料そのものに問題があったか，混合物からの微量のサンプリングに問題があったと推察される。

以上のことを考慮して，PETNおよび2号榎ダイナマイトを除外した両限界ギャップ長の関係は以下の式で示される。

$$L_{BM} = 0.22 \times L_{Crit.} + 3.3 \quad (R = 0.57) \quad \text{Eq.2.4}$$

式2.2や式2.3に示されたギャップ試験との相関と比較して，相関が良くない。そこで，先に述べた混合物からの微量のサンプリングに問題があるという推察に基づいて，混合物を全て除外して関係を調べた。その結果は以下の式で示される。

$$L_{BM} = 0.36 \times L_{Crit.} + 1.2 \quad (R = 0.98) \quad \text{Eq.2.5}$$

混合物を除外することによって相関が強くなった。したがって，水中雷管起爆試験の試料量が少ないという特徴は，混合物に対しては限界ギャップ長を過小に評価してしまう欠点となる可能性がある。

しかしながら，本章2.2.2.2に示したように試料量と気泡エネルギーとは比例することが確認されているので，試料量を変化させても $E_b'$ は変化しないはずで

ある。したがって，混合物に対しては試料量を増やすことによってサンプリングに関する問題は克服できると推定できる。

以上の衝撃起爆感度試験の比較をまとめると，水中雷管起爆試験は，従来の衝撃起爆感度試験と相関があり，限界ギャップ長による衝撃起爆感度の評価は信頼できる。また，試料量の少なさ，測定精度の点で優れていることは明らかで，騒音，振動等の環境に対する影響も少ない点で従来の衝撃起爆感度試験より優れた試験であるといえる。

## 2.4 結論

従来の打撃感度試験の判定の困難さと感度の低い物質の評価ができないという欠点およびMkIII弾動白砲を用いた衝撃起爆感度試験の試料量の多さと感度による試験方法の相違という欠点を克服する試験として水中雷管起爆試験を開発した。

水中雷管起爆試験は、可変起爆剤試験と小型ギャップ試験を少試料量の統一された試料形態で行う試験である。水中雷管起爆試験では、少ない試料量で試料の爆、不爆を判定するために、爆発によって発生するエネルギーを精密に測定できる水中爆発法を応用した。水中雷管起爆試験による衝撃起爆感度は、試料を水中で起爆した際の起爆力の指標となるギャップ長または雷管の号数と、試料の爆発によって発生したエネルギーの指標となる単位試料量当りの正味の気泡エネルギーとの関係から求められる限界ギャップ長によって評価される。

基礎実験では、0号雷管の爆発を水中爆発法によって測定した場合の測定誤差および試料量と気泡エネルギーとの関係から、試料の爆、不爆を判定するために必要な試料量を0.3gと決定した。また、Up and Down法により50%爆点のギャップ長の精度を検討し、限界ギャップ長を求める際のギャップ長の試験間隔を2mm以下と決定した。

また、実際に水中雷管起爆試験を高感度物質、化合火薬類、混合火薬類および酸化剤/可燃物系混合物に適用し、広い範囲にわたる反応性化学物質の感度を評価することができた。

熱感度試験との比較では、DSC分解開始温度との間に、衝撃起爆感度が高いほど分解開始温度が低く、熱感度が高いという関係が存在した。

打撃感度試験との比較では、試料の種類に応じた打撃感度試験の試験方法を選択することによって衝撃起爆感度と打撃感度との間に直線関係が確認された。また、打撃感度が低すぎて従来の打撃感度試験では爆発しない物質の衝撃起爆感度を水中雷管起爆試験によって評価することが可能であった。

従来の衝撃起爆感度試験との比較では、混合物を除いて強い相関がみられ、水中雷管起爆試験の限界ギャップ長が衝撃起爆感度の評価値として信頼できることが示された。混合物の場合も試料量を増やすことによって正確な評価が可能であると推定される。

以上のように水中雷管起爆試験は衝撃起爆感度の評価試験として信頼できる試験である。また、熱感度や打撃感度の低い物質のエネルギー危険性を検出することが可能である。これは、衝撃波による起爆が、SC-DSC試験における加熱や落球式打撃感度試験や落つい感度試験における打撃よりも厳しい条件で試料にエネルギーを与えているためと考えられる。

ここで、エネルギー危険性評価システムの中での水中雷管起爆試験の位置付けについて考察する。

水中雷管起爆試験は、試料量の少ない試験であるが、スクリーニング試験にはななり得ない。それは、雷管を使用するために、簡便に行えるというスクリーニング試験の定義に当てはまらないからである。しかし、打撃感度や熱感度を評価するスクリーニング試験を補足して、感度の高い物質を検出したり、感度の低い物質に感度の評価を与える試験として、標準試験を実施する前に実施すべき試験である。

したがって、水中雷管起爆試験は、スクリーニング試験で非常に高感度であると判定されなかった全ての物質に対して、標準試験を実施する前に適用する試験として位置付けることにする。このように位置付けることによってエネルギー危険性評価を実施する際に、打撃感度や熱感度のスクリーニング試験での高感度な物質の見落としを防止し、感度に関する正しい知識を持って標準試験に望むことができる。

## 参考文献

- 1) 日本工業規格, 「火薬類性能試験法」, JIS K 4810-1979
- 2) 吉田忠雄, 田村昌三編著, 「反応性化学物質と火工品の安全」, 大成出版社(1988)
- 3) 吉田忠雄, 村永浩太郎, 松永猛裕, 田村昌三, 「MkIII弾動白砲試験による有機過酸化物の爆発危険性評価」, 災害の研究, **16**, 197(1985)
- 4) 和田有司, 松永猛裕, 劉榮海, 金子良昭, 細谷文夫, 田村昌三, 吉田忠雄, 「水中爆発を用いた爆発性の評価(VI), 水中小型ギャップ試験」, 工業火薬, **51**(2), 83(1990)
- 5) 波多野日出男, 矢橋英郎, 和田有司, 柰沢俊雄, 細谷文夫, 田村昌三, 吉田忠雄, 「高感度物質の安全性評価(II), 起爆薬の水中小型ギャップ試験」, 工業火薬, **51**(5), 343(1990)
- 6) W.J.Dixon, A.M.Mood, "A Method for Obtaining and Analyzing Sensitivity Data", J.American Statistical Association, **43**, 109(1948)
- 7) 松永猛裕, 村永浩太郎, 伊藤葵, 田村昌三, 蔵持勇, 吉田忠雄, 「MkIII弾動白砲の性能と応用(第11報), 弾動白砲を用いた小型カードギャップ衝撃感度試験法」, 工業火薬, **46**(5), 327(1985)
- 8) 吉沢二千六, 井上吉勝, 金子良昭, 松永猛裕, 田村昌三, 蔵持勇, 吉田忠雄, 「酸化剤の反応性と危険性の評価(IV), 酸化剤組成物の落球式打撃感度試験」, 安全工学, **26**(5), 283(1987)
- 9) 矢橋英郎, 「火工品の安全性評価に関する研究」, 東京大学工学部反応化学科修士論文(1991)
- 10) 三宅淳巳, 小川輝繁, 福山郁生, 「感度理論及び感度評価法の提案」, 工業火薬, **46**(2), 57(1985)
- 11) M.M.Chaudhri, J.E.Field, "The role of compressed gas rockets in the initiation of condensed explosives", Proc.R.Soc.Lond.A.340, 113(1974)
- 12) 伊藤葵, 吉沢二千六, 渡辺正俊, 金子良昭, 森崎繁, 田村昌三, 吉田忠雄, 「反応性化学物質の火災・爆発危険性の予測(第2報), 複数のDSC及びDTAデータの比較検討」, 工業火薬, **49**(1), 47(1988)
- 13) 波多野日出男, 吉沢二千六, 矢橋英郎, 和田有司, 田村昌三, 細谷文夫,

- 吉田忠雄, 「高感度物質の安全性評価(I), 高感度物質の着火性, 落球およびSC-DSC試験」, 工業火薬, **51**(2), 70(1990)
- 14) 細谷文夫, 金子良昭, 吉沢二千六, 田村昌三, 森崎繁, 板橋国夫, 吉田忠雄, 「ニトロ化合物系耐熱爆薬の合成と爆発性評価(I), 密封セルDTAによるニトロ化合物の安定性と伝爆性評価」, 工業火薬, **49**(5), 322(1988)
- 15) 細谷文夫, 周興喜, 波多野日出男, 吉沢二千六, 田村昌三, 吉田忠雄, 「ニトロ化合物系耐熱爆薬の合成と爆発性評価(II), KHNDのSC-DSC, 打撃感度及び着火性」, 工業火薬, **52**(2), 121(1991)
- 16) 矢橋英郎, 柰沢俊雄, 和田有司, 黄東榮, 阿久津好明, 田村昌三, 吉田忠雄, 「産業用爆破薬のSC-DSC測定」, 工業火薬, **52**(4), 260(1991)
- 17) 柰沢俊雄, 和田有司, 矢橋英郎, 金子良昭, 池田義之, 田村昌三, 吉田忠雄, 「フローチャートによる黒色火薬の火災・爆発危険性評価」, 工業火薬, 投稿中
- 18) S.Paterson, A.H.Begg, "Underwater Explosion", Propellants and Explosives, **3**, 63(1978)
- 19) 松永猛裕, 金子良昭, 吉沢二千六, 井上吉勝, 田村昌三, 蔵持勇, 吉田忠雄, 「落球式打撃感度試験機による高感度物質の打撃感度」, 工業火薬, **49**(1), 3(1988)
- 20) 周興喜, 波多野日出男, 和田有司, 柰沢俊雄, 細谷文夫, 田村昌三, 吉田忠雄, 「高感度物質の安全性評価(IV), 各種打撃 衝撃感度試験の比較」, 工業火薬, **52**(5), 363
- 21) B.M.Dobratz, "LLNL Explosives Handbook. Properties of Chemical Explosives and Explosive Simulants", Lawrence Livermore National Laboratory (1981)
- 22) 吉田忠雄, 田村昌三, 松永猛裕, 村永浩太郎, 蔵持勇, 「爆発性物質の衝撃感度と新しい試験法」, 化学品安全, **4**(3), 36(1986)
- 23) 村永浩太郎, 松永猛裕, 田村昌三, 安部隆幸, 吉田忠雄, 「MkIII弾動白砲の性能と応用(X), 弾動白砲を用いた爆発性物質の衝撃感度の測定法」, 工業火薬, **46**(3), 162(1985)
- 24) 村永浩太郎, 井上吉勝, 松永猛裕, 伊藤葵, 田村昌三, 吉田忠雄,