

40) G. Morris, *Engineering*, 190, 394, 414, (1950)
 41) B. F. Murphey, *Journ. Geophys. Res.*, 66, 947, (1962)
 42) P. N. S. O'Brien, *Geophys. Journ. Roy.*

Astron. Soc., 3, 29, (1960)
 43) N. Ricker, *Geophys.*, 18, 10, (1953)
 44) F. Rixman, 文献 36) に引用。

The Mechanism of the Generation of Elastic Waves by Explosives

by K. Nawa

The present paper deals with the mechanism of the generation of elastic waves by explosives. Results of this paper are as follows:

- 1) The amplitude of elastic wave is theoretically determined as

$$u \propto C^{2/3} g^2$$

where u is amplitude, C is charge weight and g is a function of characteristics for

explosives and rocks.

- 2) The amplitude is experimentally correlated with the specific energy and/or the brisance of explosives.
 3) The amplitude is experimentally proportional to the 2/3th power of the charge weight of explosives.

(Asahi Chemical Industry Co. Ltd.)

起爆薬類の反応性 (第7報)

機械的な作用に対する起爆薬の感度

山 元 一 元*

1. 緒 論

火薬類の衝撃や、摩擦に対する感度は、実用上も、爆発機構を研究する上からも重要な意義を有する。古くから、火薬類の衝撃、摩擦感度を測定する方法が考案され、適正利用や安全操業に多大の貢献をしているが、火薬類の挙動を完全に予測することは、いまだに不可能である。

起爆薬の反応は、摩擦化学と云われているように、機械的な作用によつて、隣接した分子が急激に触れあつたり、結晶に亀裂を生じて変形する場合にも、爆発を生起する。一般に、起爆薬の活性化エネルギーは、数 +kcal の値であるから、軽微なエネルギーによつても、容易に爆発させることができる。

反応の生起を熱によるものとすれば、機械的なエネルギーが熱に変換されて、これが部分的に集中して、

ホットスポットを生成するとした Bowden¹⁾ の理論が一般的である。

ホットスポットの生成は、含有気泡の断熱圧縮、起爆薬表面及び、混入粒子相互の摩擦、結晶相互の摩擦などによることも確められている。

本報では、従来行なわれている落槌試験機と、摺動板方式による摩擦試験機によつて、起爆薬類の感度を測定した。

落槌試験は、Will²⁾、Lenz³⁾、Kast⁴⁾ によつて用いられた試験機と同じ様式のもが現在でも使用されているが、種々な要因によつて、バラツキの大きい結果が出る。このため、エネルギーの伝達機構を究明し、再現性のある結果を得ようとする試みがなされており Ubbelohde⁵⁾ は、落槌の落下速度と爆発率の関係を求め、Taylor、Weale⁶⁾ は落槌重量を変化させて臨界発火落高を求めた。

このほか、Hollies、Legge⁷⁾ は運動エネルギーを加

昭和39年10月29日受理

* 旭化成火薬技術部 福岡市長浜町雷管工場製付

味した表示法をとり、Robertson⁹⁾ は、衝撃から爆発までの時間を測定し、Ljungberg⁹⁾ も、オッシログラムによつて、エネルギーの伝達機構や、衝撃による爆発発生起の機構を研究している。

JIS に規定された方法と直接ストライカーを落下させる方法とによつて実験した。

グリットを混入するときの影響については、種々検討されているが¹⁰⁾、融点、硬さ等の物理的なファクターと、起爆薬とグリットの相互の反応性を重視する必要がある。

摩擦感度は、実用上極めて重要な意味をもつが、試験機自体にも多くの問題があり、Taylor, Rinckenbach¹¹⁾の改良した振り型や、山田式のものを使用されている。

Rathsbrge¹²⁾ は、回転式の摩擦試験機を考案して、感度ごとに起爆薬を分類し、Koenen 等^{13) 14)} は数多くの実験によつて、新たな試験方法を提示した。

これらは、いずれも実用的な感度分類に属するもので、本質的な究明には不備な要素が多い。

摩擦エネルギーは、摩擦係数、荷重、摩擦速度によつて求められるので、爆発率と摩擦エネルギーの関係を求めた。

この場合、摺動板の熱伝導率も影響して、ポリカーボネートでは非常に鋭敏な結果が得られる。このことは、機械的なエネルギーも、熱に変換されて、反応を生起する一つの立証であろう。

実験は主に、雷汞、DDNP、テトラセン、トリニトロロズルシン鉛について実施し、機械的な作用に対する感度を測定し、利用面及び製造取扱いの保安について考察した。

機械的な作用に対する感度は、この実験によつても定量化されず、なお今後の研究に待たなくてはならない。Macek¹⁵⁾ は、衝撃波による起爆についてのべており、Marlow 等^{16) 17)} も同様な研究を行つているが、本報では、こうした点には触れていない。

今日でも、感度の問題は、いろいろな角度から研究されているが、^{18)~23)} 火薬類の広い分野にわたる用途の開発にあつては、定量化された諸感度特性を把握することが重要であろう。

2. 実 験

2.1 試 料

雷汞、DDNP、テトラセン、トリニトロロズルシン鉛、塩素酸カリは、いずれも前報まで用いたと同様なものを使用した。ケイ化カルシウム、三硫化アンチモンは、いずれも JIS 試薬 1 級品を使用した。

2.2 実験装置

落槌感度試験機は、坂下製作所製、電磁石式試験機

を用いた落槌重量は 2 kg を用いた。アンビル、ストライカーは高速度鋼を使用し、ショアー硬度約 60 とした。

直接打撃式のもの、前記装置を小型化したものでガイドレールに沿つて、落槌をかねたストライカーを直接、アンビルの上に落下させる方式のものである。

落槌重量は、131 g を用いた。

摩擦試験機は、振り型の試験機を Fig. 1 に示すように改良した。

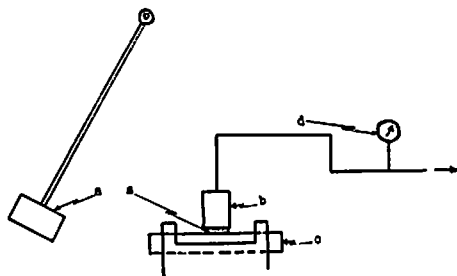


Fig. 1 Illustration of apparatus used for determining the friction sensitivity of primary explosives

a: Pendulum hammer, b: Flat roller
c: Sliding bar, d: Pressure gauge,
s: Primary explosives

摺動板と摩擦頭との間に試料をはさみ、水圧ポンプによつて摩擦頭に荷重を加えておき、ペンジュウハンマーを所定の角度から摺動板を打撃して移動させ、摺動板と試料の面の摩擦によつて、試料が爆発するかどうかを調べる。

摺動板の移動速度は、荷重及びペンジュウハンマーの重量、振れ角度などを変えて、摺動板から 1~1.5 mm の点で、ピンコンタクト方式によつて、あらかじめ、オッシロスコブで測定しておく。

ペンジュウハンマーの重量は、1, 2, 5 kg に変へることができる。摺動板には、炭素鋼、黄銅、ポリカーボネート、ポリスチレンを使用して実験できる。

摩擦頭は、主に炭素鋼を用いたが、これを前記した黄銅、ポリカーボネート、ポリスチレンに変えて実験することもできる。

2.3 実験方法

(1) JIS 法による落槌感度試験

雷汞、DDNP、テトラセン、トリニトロロズルシン鉛を夫々 30 mg 採取し、常法に従つて落槌感度を試験した。同一落高で夫々 20 回の試験を行い、落高と爆発率の関係を求めた。湿状起爆薬の感度を知るため試料を錫箔に包むさいに、水を 1 滴ピペットで滴加して、直ちに前と同様な方法で試験した。なお、アンビル、ストライカーの面はできるだけ平滑にし、各試験

ごとに400番のエメリー紙で磨いたのち、布で、このあとを更に磨いて試験した。

(2) 直接打撃法による落槌感度試験

試料を夫々、直径5mmφ、厚さ0.3mmに、約1.5t/cm²圧力で圧搾成型した試料を用いて、アンビルの上に直接このペレットをおいて、この上にストライカーを落下させ、落高と発火率の関係を求めた。

(3) グリット及び酸化剤の影響

テトラセン、トリニトロフェノール鉛に、ケイ化カルシウム、または三硫化アンチモンを夫々20%添加して、前と同様に圧搾試料によつて、落高と発火率の関係を求めた。ケイ化カルシウム、三硫化アンチモンは、100~150#, 325# 通過の2種類を用いて、グリットのサイズの影響を調べた。また、塩素酸カリを、雷汞の場合30%、他の3種類の起爆薬には、夫々、50%添加して、(2)と同様に圧搾成型して、直接打撃法によつて感度を試験した。

(4) 摩擦感度試験

Fig. 1の装置を用いて、摩擦感度を試験した。試料をあらかじめ、3.0mmφ、厚さ0.17~0.25mmとなるように、約3~4t/cm²の圧力でペレット状に圧搾成型しておく。ペンジュウムハンマーの重量を5kg、振り角度を60°として、荷重を変えて摩擦頭と摺動板の間にはさんだ試料を摩擦して、荷重と発火率の関係を、前記4種類の起爆薬について求めた。同一荷重について、夫々20回の試験を行なった。摺動板は炭素鋼材を用いた。摺動板の移動速度は、荷重が20~120kgまでは、ほぼ400m/secのオーダーであることを実測しておいた。摩擦係数は、常法に従つて、夫々の組合せについて静摩擦係数を求めておいた。摺動板、摩擦頭は、各試験毎に面の平滑度を検し、400番のエメリー紙で磨いたのち、更に布で研磨して実験した。

(5) 摩擦感度に及ぼす摺動板の影響

摺動板の物理的特性の影響を調べるため、炭素鋼、黄銅(6:4, 1/2H)、ポリカーボネートを用いて、(4)と同様の方法で、起爆薬の摩擦感度を試験した。また前記摺動板にポリスチレンを用い、摩擦頭にも摺動板と同種の材料を表面に被覆して、トリニトロフェノール鉛の摩擦感度を調べた。ペンジュウムハンマーの重量を1kg、振り角度を30°として荷重をかえて実験した。摺動板の移動速度と摩擦係数とは、あらかじめ測定しておいた。各荷重について、夫々20回の試験を行ない、摩擦力と爆発率の関係を求めた。試料が爆発すると、合成樹脂材の損傷が激しいが、少しでも損傷を受けた摺動板は使用せず、新しいものと交換して実験した。

3. 実験結果並びに考察

3.1 起爆薬の衝撃感度

雷汞、DDNP、テトラセン、トリニトロフェノール鉛の落槌感度をJIS法によつて測定した結果を、Fig. 2に示す。Fig. 2・Aは乾状起爆薬の爆発率と落高の関係を示したもので、Bは、湿状起爆薬の爆発率と落高の関係を求めたものである。

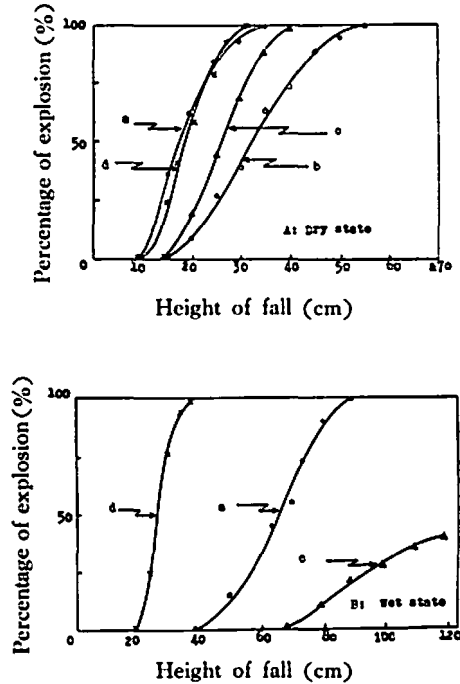


Fig. 2 Percentage failure-height of fall curves for single primary explosives
Weight of hammer: 2kg.
a: Mercury fulminate,
b: Diazodinitrophenol
c: Tetracen
d: Lead styphnate

この結果から明らかなように、感度の序列は、雷汞、テトラセン、トリニトロフェノール鉛、DDNP、の順になる。湿状では、テトラセン、DDNPは大巾に鈍感になり、特にDDNPは、120cmの落高まで全く爆発しない。雷汞もかなり鈍感になるが、トリニトロフェノール鉛は僅かに鈍感になるにすぎない。

湿状実験では、起爆薬が部分的に発火して、全体が爆発しない場合が多かつたが、一部分でも発火すれば爆発したものとして集計したものである。Fig. 2の結果から、不爆、臨界、完爆落高を一括表示すると、次表のようになる。

Table 1 Fall Heights of Non, Critical and Complete Explaion of Various Primary Explosives

Primary Explosives	State	Fall Hight (cm)		
		Non	Critical	Complete
Mercury Fulminate	Dry	10	18	35
	Wet	40	64	70
DDNP	Dry	15	31	55
	Wet	up to 120	—	—
Tetracene	Dry	10	19	30
	Wet	70	up to 120	—
Lead Styphnate	Dry	15	25	40
	Wet	20	27	40

3. 2 直接打撃法による衝撃感度の測定

落槌感度は種々な要因によつて、バラツキのある結果が得られる。経験的には、温度、湿度によつても影響されるほか、アンビルやストライカーの材質、面の仕上げの程度、試料の厚さや密閉される条件によつて異つてくる。

ストライカーの上に落槌を落下させる場合には、落槌の衝撃エネルギーが一部吸収されて、起爆薬を打撃するエネルギーは、落槌の落高と重量によつて定まるポテンシャルエネルギーよりも小さくなる。こうした要因をできる限り小さくするために、試料を直接打撃して感度を試験した。

試料の厚さが影響されるので、あらかじめ、起爆薬

Table 2 Critical Explosion Energies of Various Primary Explosives obtained from JIS and Direct Impact Drop Hammer Tests.

Primary Explosives	JIS		Direct Impact	
	Total Energy (kg·cm)	Per Sq. Energy (kg·cm/cm ²)	Total Energy (kg·cm)	Per Sq. Energy (kg·cm/cm ²)
Mercury Fulminate	36	36	1.44	5.1
DDNP	62	62	1.91	6.9
Tetracene	38	38	1.44	5.1
Lead Styphnate	50	50	1.70	6.0

上表の直接打撃法の単位面積当りのエネルギーは、ストライカーの打撃面積を規準とした。この結果から明らかなように、起爆薬を直接打撃する場合には、間接的な方法に比較して、臨界爆発エネルギーは小さくなる。

間接的に打撃する場合には、ストライカーに運動のエネルギーが与えられて、これが飛行して起爆薬を打撃すると考えれば、起爆薬に与えられるエネルギー

を直径 5 mmφ、厚さ 0.3 mm になるように、1.5 t/cm² の圧力で圧搾してペレット状に成形して試料とした。

落槌は、重量 131 g、打撃面の直径は 6.0 mmφ の高マンガン鋼を用いた。アンビルも同一材料で、成形試料を直接アンビルの上に置いて実験した。この結果を Fig. 3 に示す。

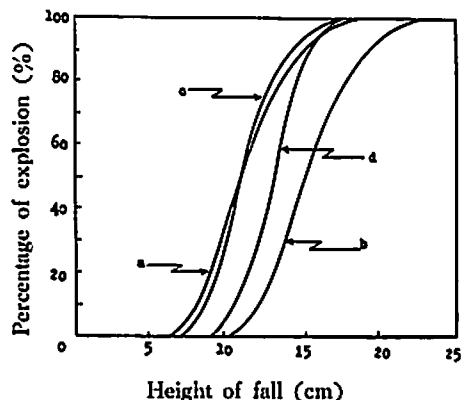


Fig. 3 Percentage failure-fall height curves of drop hammer test used for the direct impact hammer

Weight of drop hammer: 131g

a: Mercury fulminate, b: Diazodinitrophenole
c: Tetracene, d: Lead styphnate

このように、感度の序列は、JIS 法と変わらない。グラフから、臨界爆発落高に於ける JIS 法とのエネルギーの比較をすると、Table 2 のようになる。

は、位置のエネルギーよりも、むしろ運動のエネルギーが問題になる。

今、重量 Mg の落槌を Vm/sec の速度で、重量 mg のストライカーに衝突させるときには、反撥係数を e 衝突時の落槌及びストライカーの速度を夫々、V', v' とすると、ストライカーの初速を v とすれば、次式が成立する。

$$v' - V' = e(V - v) \quad (1)$$

また、運動量保存の法則から、

$$MV + mv = MV' + Mv' \quad (2)$$

これらの式から、 v' を解くと

$$v' = v - (1+e)(v-V)M/(M+m) \quad (3)$$

ストライカーは、最初静止しているのだから、 $v=0$ であるから、

$$v' = MV(1+e)/(M+m) \quad (4)$$

となる。ストライカーの重量は、落錘重量に比較して非常に小さいので、

$$v' \approx V(1+e) \quad (5)$$

が成立する。

V は空気の抵抗や、スライド面の摩擦を無視すると落高 H と、重力の加速度により、

$$V = \sqrt{2gH} \quad (6)$$

となるので、ストライカーの運動エネルギーは次式で示される。

$$\begin{aligned} mv'^2 &= mV^2(1+e)^2 \\ &= 2gmH(1+e)^2 \end{aligned} \quad (7)$$

直接打撃法では、(7) 式の反撥係数が、ゼロとして扱われる。こうした、運動エネルギー表示によって臨界爆発エネルギーを計算すると、Table 3 の結果が得られる。

この場合、ストライカーの重量は 10 g、反撥係数は焼入れ鋼の値として、0.9 をとった。直接打撃法では、打撃面の直径は 6.0 mmφ であるので、単位面積当りのエネルギーに換算すると、この値は大きくなる。

Table 3 Momentum Energies for the Critical Explosions of the Primary Explosives

Primary Explosives	JIS Method (g·cm)	Direct Impact oMethd (g·cm)
Mercury Fulminate	1,300	2,200
DDNP	2,200	3,000
Tetracene	1,600	2,200
Lead Styphnate	1,800	2,600

このように、直接法と間接法では、運動エネルギーをとって表示してもかなりの差があるが、直接打撃する方が、ストライカーのエネルギー吸収などを考えると有利と云える。

3.3 グリットを混入した起爆薬の感度

起爆薬にグリットを混入するときには、一般に感度は上昇するが、既に多くの研究者によってグリットの

硬さや、融点について検討されている。テトラセン、トリニトロレゾルシン鉛に、ケイ化カルシウム及び三硫化アンチモンを夫々 20% 添加して、直径 5 mmφ、厚さ 0.3 mm に圧搾成形して、直接打撃法によって感度を試験した。この結果を Fig. 4 に示す。

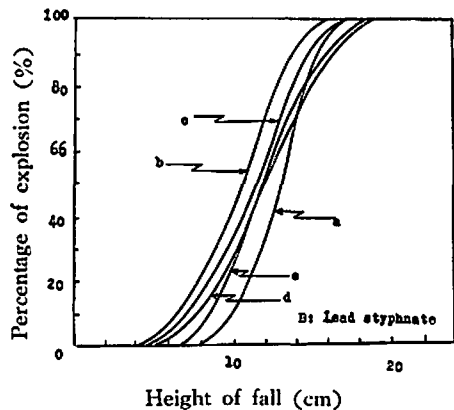
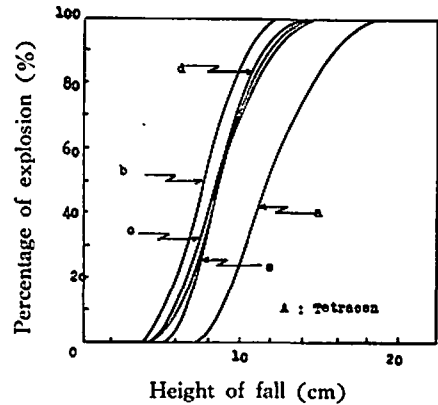


Fig. 4 Effect of grit particles on impact sensitivity of the primary explosives
Grit particle

a : None, b : CaSi_2 (100-150#) c : CaSi_2 (325# pass) d : Sb_2S_3 (100-150#) Sb_2S_3 (325# pass)

結果から明らかなように、グリットを混入することによって、衝撃感度はかなり鋭敏になる。

グリットの粒度の差について見ると、325# 通過の小さなものよりも、100~150# の方が感度は高くなる傾向を示す。起爆薬では、トリニトロレゾルシン鉛は、グリットの効果が顕著にあらわれないのに対してテトラセンは鋭敏になる。

テトラセンは結晶が破壊されやすく、かつ流動抵抗が小さく、結晶相互間の摩擦によって生成する熱エネルギーが小さく、グリットを混入するときには、摩擦エネルギーが大きくなるためと思われる。

これに対して、トリニトロレゾルシン鉛は、比較的

結晶が硬く、結晶相互間の摩擦によつても爆発を生じ得るので、グリットの効果が顕著でないものと思われる。このように見ると、グリットの効果は、Bowden 等が提唱するように、融点だけが支配的ではない。

同様な実験を、雷汞、DDNP について行った。即ち、雷汞 (7) —塩素酸カリ (3) と、DDNP (5) —塩素酸カリ (5) との混合物を前記したと同様の方法で衝撃感度を試験した結果を Fig. 5 に示す。

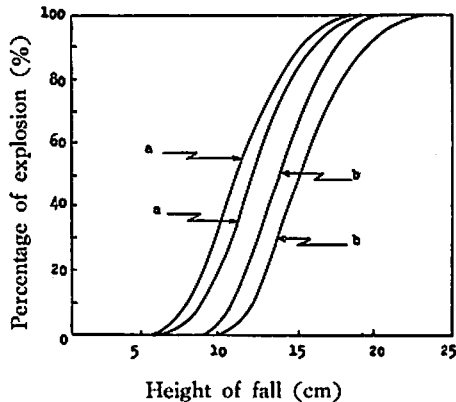


Fig. 5 Impact sensitivities of mercury fulminate and diazodinitrophenol incorporated with the potassium chlorate

- a : Single mercury fulminate
- a : Mercury fulminate (7)—Potassium chlorate (3)
- b : Single diazodinitrophenol
- b : Diazodinitrophenol (5)—Potassium chlorate (5)

塩素酸カリの融点は、大略 360°C で、DDNP の融点 150~160°C より高く、塩素酸カリを DDNP に混入する場合には感度は鋭敏になる。雷汞の場合には、塩素酸カリを混入することによつて逆に鈍感になる。

Table 4 Shock Sensitivities of Primary Explosives
(Direct Method, Drop Hammer; 131g)

Primary Explosives	Critical Height (cm)
Mercury Fulminate	11.0
Mercury Fulminate (7) —Potassium Chlorate (3)	12.4
DDNP	15.0
DDNP (5)—Potassium Chlorate (5)	13.8
Tetracene	11.0
Tetracene (5) —Potassium Chlorate (5)	9.8
Lead Styphnate	13.0
Lead Styphnate (5) —Potassium Chlorate (5)	13.8

DDNP はテトラセンの如く、結晶は破壊されやすいことや、流動抵抗の小さいことなどから考えると、摩擦による効果を増加することが考えられる。

Copp, Ubbelohde⁵⁾は、混入するグリットの硬さについて研究し、4 moh 以上のものでは鋭感化の効果があるとしているが、グリットの硬さは、火薬類の物理的な性質によつて決まるものであろう。

例えば、テトラセン、トリニトロロゼン鉛に塩素酸カリを混入して、同様な方法で、臨界落高を求めると Table 4 のようになる。

3. 4 起爆薬の摩擦感度

グリットを混入したときの鋭感性などから考えると落植感度試験の中にも摩擦的要素が含まれていることは明らかである。また、実用的な感度としては、衝撃感度よりもむしろ摩擦感度が重要である。

摩擦感度は、基礎的にもまた実用的にも重要な意味をもちながらも、操作の困難さや、解析の雑点があつて、国際的な方法としても、乳体試験があるにすぎない。しかし、摩擦感度を定量化しようとする試みは古くから行われており、米国防山局の方法や^{24) 25) 26)}、これを改良した Taylor 及び Rinckenbach¹⁴⁾ や Ubbelohde の研究がある。

我国では、山田式の摩擦試験機が広く使用されているが、これらの方法には夫々欠点がある。回転式の摩擦試験機としては、Rathsburg の装置があるが、最近では、Ide, Koenen の BAM 試験機が、摩擦感度を調べるのに用いられている。

摩擦感度の最も簡単な測定方法は、固体の 2 面間に試料をはさんで、加圧下で一方の面を定速度で移動させる形式のものである。

この場合、摩擦力 R は、摩擦係数を μ 、荷重を W とすると、

$$R = \mu W \quad (8)$$

であらわされるので、起爆薬に与えられるエネルギーは、摩擦係数 μ と、荷重 W と面の移動速度 V によつて定まるものである。

このような考え方に従つて、Fig. 1 に示す装置によつて、起爆薬の摩擦感度を測定した。摩擦係数は動的な値が不明であるので、あらかじめ、種々な材料を使用した場合の静的摩擦係数を測定した。この結果を Table 5 に示す。一般には、動的摩擦係数は、静的摩擦係数より僅かに小さいとされているので、ほぼこの表の値をとつて計算できる。

このようにして、雷汞、DDNP、テトラセン、トリニトロロゼン鉛を直径約 3.0 mm ϕ 、厚さ、0.17 ~ 0.25mm に約 4 t/cm² の圧力で圧搾成形して試料

をつくり、摺動板に炭素鋼板を使用して、試料をこの板と摩擦頭の間にはさんで、荷重を摩擦頭に作用させて、ハンマー重量 5kg を用いて、荷重と爆発率の関係を求めた。

ハンマーの重量が充分大きく、振り角度が大きければ、荷重が 150 kg 以下では、摺動板の移動速度はほぼ一定の、4.0 m/sec のオーダーであるので、同一種類の爆薬については、荷重と付与エネルギーは比例した関係になる。

Table 5 Friction Coefficients of the Sliding Bars and Primary Explosives

Sliding Bar	Load (kg)	Load Head	Hg(ONC) ₂	DDNP	Tetracene	Lead Styphnate
Steel	40	0.23	0.18	0.21	0.16	0.24
	60	0.24	0.17	0.22	0.17	0.25
	100	0.24	0.15	0.20	0.14	0.25
Brass	40	0.15	0.24	0.23	0.23	0.27
	60	0.15	0.26	0.22	0.22	0.26
	100	0.16	0.25	0.23	0.21	0.28
Polycarbonate	40	0.23	0.21	0.21	0.15	0.24
	60	0.22	0.22	0.24	0.15	0.25
	100	0.23	0.21	0.25	0.17	0.25
Polystyrol	40	0.15	0.21	0.21	0.13	0.20
	60	0.15	0.23	0.24	0.14	0.22
	100	0.14	0.18	0.23	0.14	0.23

雷汞、DDNP、テトラセン、トリニトロレゾルシン鉛について、実験した結果を Fig. 6 に示す。結果から明らかなように、雷汞、トリニトロレゾルシン鉛は鋭感であるが、DDNP は鈍感である。

この実験では、摺動板、圧接頭の材質は、いずれも炭素鋼を使用しているが、結晶の破壊されやすく、しかも爆発を生起する前の過程に、局所的な熔融相を形成するテトラセン、DDNP の摩擦感度が鈍感であることは興味がある。

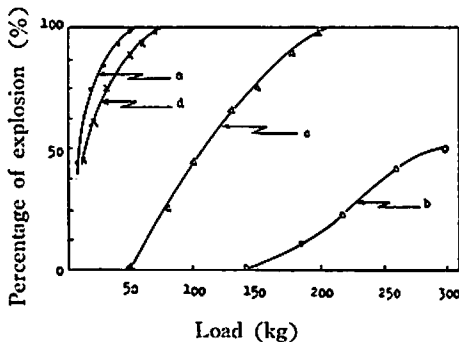


Fig. 6 Initiation of the primary explosives by friction

a: Mercury fulminate, b: Diazodinitrophenol, c: Tetracene, c: Lead styphnate

3.5 摩擦感度に及ぼす摺動板の影響

摩擦感度は、摩擦エネルギーとして表示されることは既に述べたが、摩擦による機械的なエネルギーが、熱に変換されて起爆薬を励起して、爆発すると云う見方が支配的である。

Bowden は、摩擦の際の温度上昇を次式で示している。

$$T - T_0 = \frac{\mu WV}{4aJ} \cdot \frac{1}{k_1 + k_2} \quad (9)$$

但し、 μ : 摩擦係数、 W : 荷重

V : 摺動速度、 a : 接触部の半径

J : 熱の化学当量、 T, T_0 : 最終、初期温度

k_1, k_2 : 摩擦片の熱伝導率

(9) 式で、 μWV は摩擦エネルギー項であるから、温度上昇は、このエネルギーが大きい程大きく、摩擦片の熱伝導率が小さい程大きくなる。このように摩擦による起爆薬の発火も熱としてみるときは、摩擦片の熱伝導率が関係する。

物理的な特性の異なる摺動板として、炭素鋼、黄銅、ポリカーボネートを用いて摩擦感度を試験した。この結果を、Fig. 7, 8, 9, 10 に示す。この実験は、ハンマー重量 5kg、振り角度 60° で実施した。

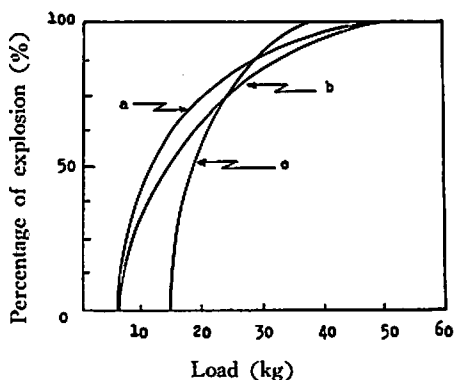


Fig. 7 Effect of the sliding bars on the friction sensitivity of mercury fulminate
a : Steel bar, *b* : Brass bar,
c : Polycarbonate resin bar

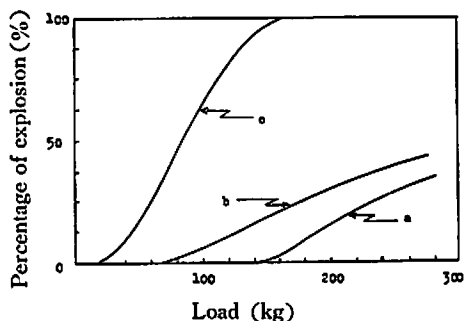


Fig. 8 Effect of the sliding bars on the friction sensitivity fo diazodinitrophenol
a : Steel bar, *b* : brass bar
c : Polycarbonate resin bar

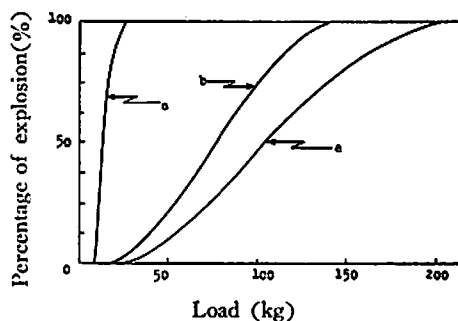


Fig. 9 Effect of the sliding bars on the friction sensitivity of tetracene
a : Steel bar, *b* : Brass bar
c : Polycarbonate resin bar

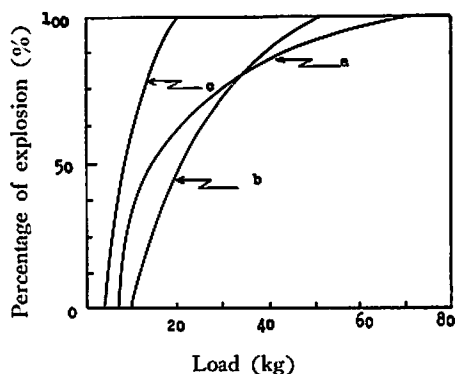


Fig. 10 Effect of the sliding bars on the friction sensitivity of lead styphnate
a : Steel bar, *b* : Brass bar
c : Polycarbonate resin bar

Table 6 Critical Explosion Energies of the Primary Explosives obtained from the Friction Tests

Primary Explosives	Sliding Bars	Critical Loads (kg)	Friction Coefficient	Critical Energy (kg·m/sec)
Mercury Fulminate	Steel	12	0.21	8.2
	Brass	15	0.24	14.4
	Polycarbonate	17	0.21	14.0
DDNP	Steel	up to 300	0.19	—
	Brass	"	0.23	—
	Polycarbonate	84	0.23	77.3
Tetracene	Steel	110	0.14	61.2
	Brass	78	0.22	68.8
	Polycarbonate	11	0.14	5.7
Lead Styphnate	Steel	17	0.24	16.3
	Brass	20	0.27	13.6
	Polycarbonate	7	0.24	6.7

グラフから明らかなように、雷承以外は、いずれもポリカーボネートを使用した場合が最も鋭感であつて炭素鋼と黄銅では、相似た結果が得られる。

このグラフから、50% 爆発するときの荷重を求め、Table 5 の結果と、実測した摺動板の移動速度とから摩擦によつて起爆薬の受けるエネルギーを $\mu W V$ とし、夫々臨界荷重、臨界摩擦エネルギーとして表示すると、Table 6 のようになる。

摩擦頭には、いずれの場合も炭素鋼を使用して実験した。摺動板の物理的な特性は Table 7 に示すように硬さは金属材料が大きい、熱伝導率は、合成樹脂であるポリカーボネートの方が小さい。Table 6 の結果からは、硬度よりも熱伝導率が支配的であると考えられ、ポリカーボネート摺動板では、いずれの場合にも低いエネルギーで爆発する。

このことは、機械的なエネルギーが熱に変換されて起爆薬を励起するものと推論され、摩擦感度も本質的には熱に起因するものであろう。

Table 7. Physical Properties of the Sliding Bars

Materials	Hardness (HV)	Thermal Conductivity (cal·cm ⁻¹ ·sec ⁻¹ ·°C ⁻¹)
Steel	485	0.108
Brass	215	0.280
Polycarbonate	15.5	4.6 × 10 ⁻⁴

しかし、この実験では、摩擦頭に炭素鋼を使用している、(9) 式に於いて、 k_1 、 k_2 を夫々摩擦頭、摺動板の熱伝導率とすれば、ポリカーボネートは、上表からも明らかなように、金属材料に比較して非常に小さい値であるので、温度上昇を支配するのは、炭素鋼となる。しかし、実験の結果では、ポリカーボネートが鋭感であることは、反応の生起が、ポリカーボネートと起爆薬の間でおこり、起爆薬全体が均一の温度になり得ないものと思われる。

この関係を更に詳しく調べるため、前記した3種類の材料のほかに、ポリスチレン摺動板を用いて実験した。摩擦頭には、夫々摺動板材と同種のものを用いた。

トリニトロソルシン鉛について、荷重と爆発率の関係を Fig. 11 に示す。

ハンマー重量は 1 kg とし、振り角度を 30°C としたときの、各荷重に対する摺動板の移動速度を測定すると Table 8 のようになる。

Table 8 Sliding Velocities of the Sliding Bars and Friction Coefficients of the Leadstypnate and the sliding Bars (Hammer Weight: 1kg, Angle: 30°C)

Loads (kg)	Sliding Velocity (m/sec)	Friction Coefficient			
		Steel	Brass	Poly-carbonate	Poly-styrol
20	2.5	0.23	0.24	0.22	0.19
30	2.4	0.24	0.25	0.24	0.20
40	2.3	0.25	0.25	0.24	0.20
50	2.1	0.25	0.25	0.25	0.21
60	1.9	0.26	0.26	0.25	0.22
70	1.7	0.26	0.27	0.26	0.23
100	1.4	0.27	0.29	0.26	0.24

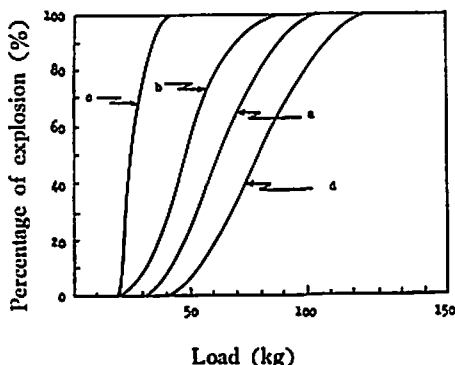


Fig. 11 Effect of the sliding bars on the friction sensitivity of lead styphnate
a: Steel bar, b: Brass bar, c: Polycarbonate resin bar, d: Polystyrol resin bar

摺動板の速度は、材料別に殆ど変わらず一定であつた。Fig. 11 から明らかなように、ポリカーボネートが最も鋭感で、次で黄銅、炭素鋼、ポリスチレンの順である。

ポリスチレンの熱伝導率は 3.0×10^{-4} で、硬さは Hv. 15.8 でポリカーボネートと殆ど同一の特性値である。熱伝導率だけが、感度を支配するとすればポリスチレンが最も鋭感であるが、結果は逆である。

ポリスチレンの熱的な特性としては、熱変形温度が 70°C で、ポリカーボネートの 140°C に比較して低いほか、ポリスチレンは、200°C 以下の温度で溶融するのに対して、ポリカーボネートの流動温度は約 280°C であり、300°C を越えると分解する。

したがつて、摩擦によつて生成する熱の大部分は、ポリスチレンの溶融に費されるため、見掛の摩擦面の温度は低下するものと思われる。

摩擦力とトリニトロレゾルシン鉛の爆発率の関係を Fig. 12 に示すが、前記したように、同一摩擦力に対しても、摺動板の材質によつて大きい差のあることが明らかである。

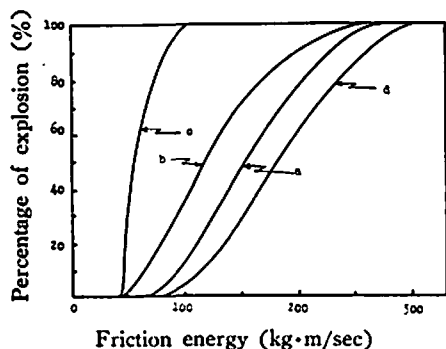


Fig. 12 Effect of the sliding bars on the friction sensitivity of lead stypnate

- a : steel bar, b : Brass bar
- c : Polycarbonate resin bar
- d : Polystyrol resin bar

合成樹脂材では、摩擦によつて局部的に熔融したり分解することは当然おこり得るので、摩擦力に対する起爆薬の感度を調べる場合には、なるべく、摩擦のさいに、弾性、塑性変形の少ない、かつ融点の高い物質を選ぶのが望ましい。

こうした観点からすれば、本実験の中では炭素鋼が適当である。試みに、炭素鋼を用いたときの、摩擦面の温度上昇を計算すると、Table 9 のようになる。

Table 9 Explosion Percentages and the Surface Temperatures obtained from the Friction Test of the Leadstypnate rubbing by steel Bar

Explosion Percentages (%)	Final Temperatures (°C)
0	310
20	440
40	520
50	550
60	560
80	600
100	680

この結果では、臨界爆発率に対応する温度は 550°C である。ホット・スポットの持続時間は、1 m. sec. 程度であるから、発火遅れから推定される温度は約 400°C であることから、これよりも若干高い温度が必要である。

摩擦エネルギーを定量的に測定して、起爆薬の感度と関連づけて研究することは、実用上重要であり、非常な困難を伴うが、今後更に研究しなくてはならない問題である。

4. 総括

機械的な作用に対する起爆薬の感度について研究した本報文の結果を総括すると次のようになる。

衝撃試験は、雷承、トリニトロレゾルシン鉛がほぼ同等で、次でテトラセン、DDNP の順になる。水湿状の起爆薬は一般に鈍感であるが、トリニトロレゾルシン鉛は臨界落高、完爆落高は殆ど乾状のものと同様でない。テトラセン、DDNP は大巾に鈍感になり、特に DDNP は 2 kg の落槌で 120 cm の落高では全く爆発しない。

グリットを混入する場合には、一般に衝撃に対する感度は鋭敏になる。グリットの融点が感度を支配する主要因とされているが、起爆薬の結晶との相対的な硬さも影響され、トリニトロレゾルシン鉛にケイ化カルシウムや三硫化アンチモンを混入するよりも、テトラセンに混入の方が鋭敏になる。

酸化剤を、一種のグリットと考える場合には、前と同様の効果が期待できるが、起爆薬と相互反応性をもつのは、鋭感化の度合いが顕著である。

摩擦感度は、実用上非常に大切であるが、これを定量的に測定する方法は見当らず、種々な要因を統合整理する必要がある。

摩擦エネルギーは、摩擦係数と摩擦面にかかる荷重とによつて求められ、起爆薬を摩擦するときには、起爆薬に与えられるエネルギーは、摩擦力に速度を乗じたものになる。こうした考え方に立脚して、前記 4 種類の起爆薬の摩擦感度を求めた。この結果では、雷承、トリニトロレゾルシン鉛が鋭感で、次でテトラセン、DDNP の順になり、DDNP は特に鈍感である。

摩擦する材料を変えて実験した結果では、合成樹脂材であるポリカーボネートでは、炭素鋼や黄銅に比較すると、見掛の感度は鋭敏となる。これは材料の熱伝導率の差に起因すると推論され、摩擦による爆発の生起も熱によるものであると推論される。

この結果は、基礎的な面だけでなく、起爆薬の装填、貯蔵、運搬等の装置や容器に対する示唆が与えられた。

ポリスチレンは、ポリカーボネートと相似た物理的特性を示すが、摩擦片にポリスチレンを用いるときには著しく鈍感になる。

ポリスチレンは、熱変形温度が低く、かつ熔融温度も低いから、摩擦によつて発生する熱の大部分は、変形、熔融に費されるものと考えられ、単に熱伝導率の

みをとつて、機械的エネルギーの熱への変換を考えることは出来ない。

Bowden の考え方にしたがつて、炭素鋼の摺動板を用いたときのトリニトロソルシン鉛の温度上昇を計算すると 550°C が臨界爆発温度であつた。

摩擦や衝撃に対する起爆薬の感度を評価するには、試験法自体、更に検討する必要があるが、一般には、局所的な溶融相を生成して爆発を生起する DDNP 等は機械的な作用に対しては鈍感である。

多くの場合、結晶の粉碎、破壊については、定量的な考察は行われていないが、結晶の急激な破壊によつて、界面に急激な自由エネルギーの変化を生じて、多量に蒸を発生する分解を生起することも考慮する必要がある。

追記；本研究を行うにあたり、指導を賜つた、旭化成雷管工場長、大久保道次郎氏、研究課長、鈴木輝彦氏、実験に協力された、首藤正次氏に対して厚く御礼申し上げる。

文 献

- 1) F. P. Bowden and A. D. Yoffe, "Initiation and Growth of Explosion in Liquid and Solid." Butterworth, 1955
- 2) W. Will, Z.S.S., 1, 209 (1905)
- 3) F. Lenze, *ibid.*, 1, 287 (1906)
- 4) H. Kast, *ibid.*, 4, 263 (1909)
- 5) T. Nash, W. J. Powell, A. D. Ubbelohde et al, *Phil. Trans.*, A241, 197 (1948)
- 6) W. Taylor and A. Weale, *Proc. Roy. Soc. (London)*, A138, 92 (1932)
- 7) N. R. S. Hollies, N. R. Legge and J. L. Morrison, *Can. J. Chem.*, 31, 746 (1953)
- 8) E. K. Rideal and A. J. B. Robertson, *Proc. Roy. Soc. (London)*, A195, 135 (1948)
- 9) S. Ljungberg, *Nobel Hefte*, 24, 40 (1958)
- 10) F. P. Bowden and H. T. Williams, *Proc. Roy. Soc. (London)*, A208, 176 (1951)
- 11) C. A. Taylor and W. H. Rinkenbach, *J. Franklin Inst.*, 204, 369 (1927)
- 12) H. Rathsburg, *Z. Angew. Chem.*, 41, 1284 (1928)
- 13) H. Koenen and K. H. Ide, *Explosivstoffe*, 3, 57, 89 (1955); *ibid.*, 4, 1 (1956)
- 14) H. Koenen and K. H. Ide and K.H. Swart, *Explosivstoffe*, 9, 4, 30, 195 (1961)
- 15) A. Macek, *Chem. Rev.*, 62, 41 (1962)
- 16) W. R. Marlow and I. C. Skindmore, *Proc. Roy. Soc. (London)*, A246, 284 (1958)
- 17) V. S. Ilyuklin and F. P. Poklil, *D ohlay akad. Nauk S.S.S.R.*, 140, 179 (1961); *Chem. Abstr.*, 56, 6229h (1962)
- 18) F. P. Bowden and A. D. Yoffe, *Endeavour*, 21, 125 (1963)
- 19) V. K. Bobolev and L. G. Bolkhovitiy, *Izvest. Akad. Nauk S.S.S.R.*, 754 (1960); *Chem. Abstr.*, 56, 10438d (1962)
- 20) A. W. Campbell, W. C. Davis, J. B. Ramsay and J. R. Travis, *Phys. Fluids*, 4, 511 (1961)
- 21) M. A. Cook, D. H. Pack and W. S. McEvan, *Trans. Faraday Soc.*, 56, 1028 (1960)
- 22) C. Fauguignon, *Mém. Powdres, annexe*, 43, 69 (1961)
- 23) M. H. Friedman, *Trans. Faraday Soc.*, 59, 1865 (1963)
- 24) C. Hall and S. P. Howell, *U.S. Bur. Mines, Bull.*, 66, (1913)
- 25) S. P. Howell, *ibid.*, *Tech. Paper*, 234, (1919)
- 26) C. E. Munroe and J. E. Tiffany, *ibid.*, 346, (1931)

Behaviours of Primary Explosives VII.

"Sensitivity of Primary Explosives to Mechanical Action"

Kazumoto Yamamoto*

Experiments for the impact and friction sensitivities were carried out with the primary explosives, namely mercury fulminate, diazodinitrophenol, tetracen and lead trinitroresorcin.

The impact sensitivities were measured by using the drop hammer test apparatus. In impact sensitivity, their orders (from higher to lower) are; mercury fulminate, lead trinitroresorcin, tetracen, diazodinitrophenol.

The primary explosives wet with water become generally insensitive to impact, especially diazodinitrophenol cannot be initiated.

The presence of grit particles renders many primary explosives more sensitive to impact. This provides a method of introducing hot spots into the primary explosives

When potassium chlorate was incorporated, tetracen and diazodinitrophenol had their impact sensitivities sharpened, while mercury fulminate and lead trinitroresorcin had not their impact sensitivities changed clearly.

The friction sensitivities were measured by using the friction apparatus applied with the sliding bar.

The apparent sensitivity of the primary explosives to friction is affected with the

materials of the sliding bars.

With non-metallic sliding bar, such as polycarbonate resin, the thermal conductivity are low compared with that of metals, and apparent sensitivity to friction is high.

Although, using the polystyrol resin bar that has low melting point, apparent friction sensitivity is lower than that of the case using the metallic sliding bar.

There may be evident that for the majority of primary explosives, the initiation is thermal in origin. The mechanical energy must be turned into heat and concentrated in a small region to form a hot spot.

(*Research Laboratory for the Department of Explosives, Asahi Chemical Industry Co. Ltd., Tokyo)

ニ ュ ー ス

MHD発電, 超高压高温発生装置, など 4件, 重要鉱工業技術研究委託制度

工業技術院は今年度から重要鉱工業技術試験研究委託制度を設けて、いわゆる“中核技術”の開発と取組んでいるが、明年度の委託研究テーマとして①MHD発電, ②直流送電, ③超高压高温発生装置, ④スペース・チャンパーを内定した。同院はこれに必要な経費2億4千万円を来年度予算に要求しており、近く具体的な研究計画の策定ならびに委託先の選定をはじめ。MHD発電はマグネットハイドロダイナミックスの頭文字をとったもので、高温燃焼ガスから直接電気エネルギーを得る発電方式の事。超高压高温発生装置の開発は人造ダイヤモンド, 有機半導体などの製造に必要な装置製作をめざし、差し当り20万気圧, 3,000°C程度のもを開発する。

(日刊工業, 39.11.3)

多孔質パイプを使う推薬の連続混合法

固体推薬を安全かつ高速で混合する新プロセスがインジアン・ヘッドの米海軍推薬工場が開発された。本法は多孔質パイプの隙を通して空気を送り込んで固体成分と液体成分とを乱流混合する所を特徴としている。又本法は機械的混合を使わずある瞬間において混合装置内にある爆発性物質の量が最小なので特に安全である。混合装置内で混合される量は

1lb以下であるのに混合速度は毎時5,000lbである。この様に経済的で安全であるので、大量の固体推薬を連続的に遠隔制御出来るので設備投資の少ない装置で製造出来る。(日刊工業, 39.12.7)

「イオノマー」誕生, 米デュボン社の新重合体

ガラスの様な透明度と硬度をもち、加工の時熱を加えれば柔軟な可塑性を兼有する新しいプラスチックが開発された。この新重合体は多くの原子団がイオン結合を作る事が特徴なので「イオノマー」と命名され、注目を集めている。同社の新製品サーリンAは今後続々登場するイオノマーの1種に過ぎず、主原料としてエチレンを用い、イオン結合を作るため、他の原子団を共重合させたのである。その系列の中で陰に帯電した群は炭化水素の主鎖から分岐したカルボキシル基であり、陽イオンはナトリウム等の金属イオンである。両者は互に結合して重合体の連鎖を作る。このイオン結合がイオノマーを作る模様は全く倫理的である。サーリンAの内部構造は1個の金属イオンが1個のカルボキシルイオンに吸引されるのではなく、その吸引力が多くのイオンに分配される。そこですずなりのイオン重合が行なわれるのである。その強剛性と柔軟とを可逆的に兼有するのはこのすずなりのイオン重合構造によるものである。(科学新聞, 39, 12, 11)