

不連続部を含む岩盤のスムーズブラスティング のための模型実験

中川 浩二*・坂本 仡**・岡 利文***

Fundamental Model Study of Smooth Blasting in the Rock Containing Discontinuity Plane

Koji NAKAGAWA, Takeshi SAKAMOTO and Toshifumi OKA

Abstract

Since rock mass contains the geological discontinuities, it is necessary to know the effects of the discontinuities on the smooth blasting contour. In order to simulate the propagation of blast cracks and the formation of smooth blasting contour in the rocks containing discontinuities, blasting tests were conducted by using concrete specimen which contains discontinuity plane.

1. はじめに

地下発電所建設のための大規模地下空洞の掘削や、トンネル施工における NATM の一般化にともないスムーズブラスティング（以下 SB と略）の重要性が見直されている。

SB の考え方が我が国へ導入されてからすでに 30 年近くを経ており、岩盤掘削現場においては現場技術者の手により種々の工夫がなされているが、統一的な検討はあまりみられないようである。その理由の一つとして実際の岩盤の力学的特性が実に多種多様であることが挙げられる。すなわち SB に関する系統的な研究を行うためには同一条件とみなしうる爆破を何回か行うことが必要となるが、実験結果に再現性を期待できる岩盤を得ることが困難であるといえる。

この岩盤条件を支配する大きな要因として、岩盤中の不連続部がある。我が国においては爆破による岩盤掘削という立場からは等方、等質とみうる岩盤はまず存在せず、多くの場合それらは層理あるいは節理を含んでいる。すなわち実際の岩盤掘削において層理、節理を離れて SB を考えることは困難である。

岩盤中に含まれるこれら不連続部はその厚さ、介在

物、密度、発達方向とその数、構成岩質の力学的特性等、実に多種多様な状態にある。そのため定量的な意味で不連続部を有する岩盤における SB の機構を明らかにすることは非常に困難である。このような状態を考慮すると典型的な不連続部を含む岩盤における定性的なクラックの発生、発達の機構に関する知識をもとに、個々の現場においてその岩盤の特性を考慮しつつ適当な工夫を行うことが現時点において重要なことであると考えられる。

筆者らはこれまでコンクリート供試体を用いた SB の模型実験を行ってきた¹⁾。本研究ではさらに上のような考えをもとにコンクリートモデル供試体を工夫して不連続部を含む岩盤の模型を作製し、これを用いて模型実験を行った。そして不連続部を含む岩盤の SB のためのクラックの発生、発達に関する基礎的資料を得たのでこれを報告する。

2. 不連続部を有する岩盤の SB のための模型実験

2.1 実験の目的

層理あるいは節理を含む岩盤の SB を考えるとき、SB 結果に影響を与える要因は多い。しかしそのすべての要因について系統的に実験することはその数が多く困難である。そこで本研究では不連続部を含む岩盤におけるクラックの発生、発達に関する基礎的資料を得るために比較的重要であると思われる (1) 不連続

* 土木工学科

** 前非常勤講師（日本化薬株式会社）

*** 東京工大大学院

部の種類, (2) 不連続面と SB 面との傾き, (3) 爆破孔間隔, をとり挙げる. そしてこれらの変化により爆破による孔間のクラック連結状況がどのように不連続面の影響を受けるかを検討する.

岩盤の爆破において SB を成功させるということは目的とする SB 面に沿ったクラックを発生させ, また予定破断面より地山側にはクラックをできるだけ発達させないことを意味する. しかるに層, 節理等は爆破以前から不連続面として存在している. したがって不連続面を含む岩盤の SB を行う時にはこの不連続面を利用し, また発達させないように配慮しつつ目的とする方向に新しくクラックを発達させることになる.

いま Fig. 1 のように一つの不連続面をはさんで不連続面から等距離に爆破孔が配置された場合を考える. もし理想的な SB が行なわれたとすると SB 面は不連続面にかかわりなく爆破孔を直接連結して形成され,

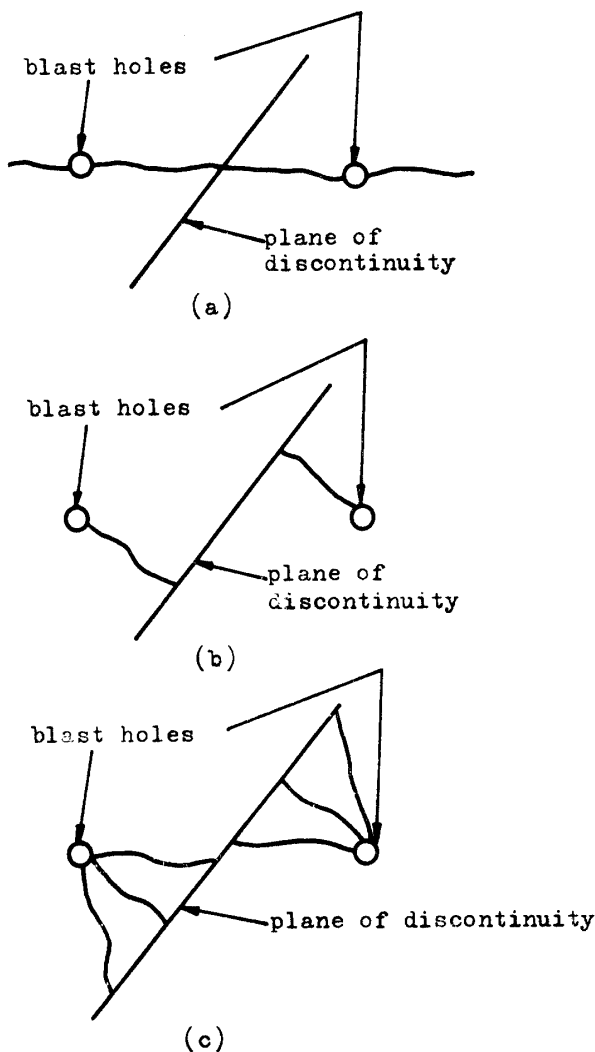


Fig. 1 Blast crack formation around the discontinuity plane.

またそれ以外, 特に地山側にはクラックは発達しない状態となる (Fig. 1a). これにくらべて不連続面のもつ不連続性の程度が高い場合にはそれぞれの爆破孔からのクラックは独立に不連続面に向かって発達する. この場合, 不連続面から爆破孔までの距離に対する薬量の多少によりこのクラックは単一の卓越したもの (Fig. 1b), あるいは多数の放射状のもの (Fig. 1c) となる. その結果 SB 面はこれらのクラックと不連続面とを連結した状態となり, Unevenness はかなり大きくなるであろう.

本研究では SB 結果の評価をその一つの目的である破断面の平滑さという立場から考え, 不連続面による Unevenness の変化を主たる尺度として上述の要因の検討を行なうことにする.

2.2. 実験

2.2.1. 供試体

供試体は $57 \times 41.5 \times 10.5$ cm のコンクリート製である. コンクリートにはレディミクストコンクリートを用い, 最大骨材寸法 13 mm, スランプ 8 cm, 設計強度 350 kgf/cm^2 (4 週) のものを用いている. 打設後一日で脱型, 試験日まで湿潤状態を保つよう努めた. 打設に際して供試体中に不連続部分および爆破孔を作製した. すなわち爆破孔は直径約 12.5 mm の丸鋼を打設時に所定の間隔で平行に埋め込み, コンクリートが半ば硬化した時点でこれを抜きとることにより作製した. 爆破孔間隔は 10 cm, 15 cm, 20 cm である. また不連続部分の作製には厚さ 2.0 cm, 幅 10.5 cm のコンクリート板をあらかじめ作製し, これを爆破孔と平行に供試体中に埋め込んだ. コンクリート板は周囲の材料と同一の配合のコンクリートからなり, 一週間前に打設して湿潤養生を行ったものである. 不連続面の状態として (1) コンクリート打ち継ぎ面, (2) 板と周囲のコンクリートとの間に 0.03 mm 厚さのポリエチレンシートをはさんだもの, (3) 板と周囲のコンクリートとの間に 0.3 mm 厚さのビニールシートをはさんだもの, の 3 種とした.

これらの状態は (1) 例えばセメントミルクなどにより充てんされた節理面, (2) 非常にうすい介在物を有する節理面, そして (3) それよりは若干厚い介在物を有する節理面を表わそうとしたものである. 従ってこれらの供試体においては隣接する爆破孔の間に 2 面の不連続面が存在することになる. またコンクリート板は両爆破孔のちょうど中間位置にあり, 爆破孔間を結ぶ線と 90° , 67.5° , 45° , 22.5° の傾きをなしている.

爆破により供試体が破断, 飛散するのを防ぐ目的で

供試体中外周に沿って丸鋼を□の字形に2重に配している。

供試体の個数は不連続面の状態3種、孔間隔3種、不連続面の傾き4種の計36種であり、さらに不連続面を含まない供試体について孔間隔3種をとり、総計39種の条件について各2個、すなわち78個の供試体について実験した。

2.2.2 爆破

用いた爆薬は導爆線である。導爆線はPETNを心薬とし、薬量は10.7g/mとなっている。爆破に際して導爆線は供試体を貫通しており、爆破孔一孔当りの薬量は1.12gとなる。

装薬に際して導爆線が孔中央に保たれるよう2ヶ所にテープを巻きつけた。起爆は供試体の外部で行ない、6号電気雷管を用いた。雷管から両爆破孔にいたる導爆線の長さを等しくとり、両孔の起爆が同時となるようにしている。

2.2.3 爆破により供試体中に発生、発達したクラックの検出と Unevenness

爆破の結果供試体中に発生、発達したクラックを検出した。爆破により供試体中に発生、発達するクラックには種々のレベル(幅)のものがあると考えられるが、本研究においては肉眼で検出できるもののみをとり挙げることにした。検出されたクラックを黒色インクでトレースし、写真撮影ならびに計測に供した。

導爆線が供試体を貫通して爆轟するとき、供試体は爆破孔に沿って移動衝撃荷重を受けることになる。そのため供試体の両面のうち爆轟が供試体中へ入る側に比べて供試体から出る側で供試体表面の剝離が大きくなる。そこでクラックの検出は常に供試体中へ爆轟が入る側で行うことにした。爆破により供試体面には Fig. 2 に示すようなクラックパターンが現われる。不連続面は打ち継ぎ面の場合を含めて分離面となりうるものと考え、発達したクラックと不連続面とにより爆破孔をつなぐ破断面が形成されるとした。従って Unevenness の値としては両孔間を結ぶ線からの最大距離をとることとし、コンクリート板の両側についてそ

の値を求めた。実測に際して Fig. 2 において一般には a は b より大きく、また c は d よりも大きい。そこで Unevenness の値としては a および c の値をとることとした。

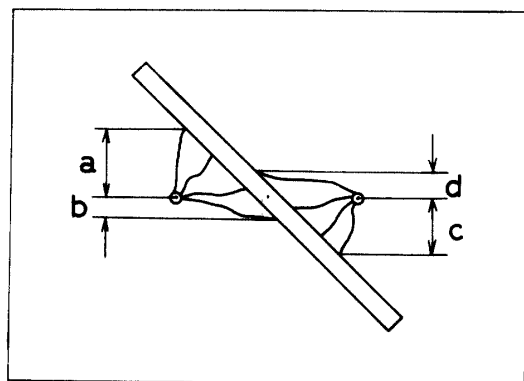


Fig. 2 Blast crack formation and unevenness in the specimen.

3. 実験結果と検討

3.1 実験結果

Photo. 1 に不連続部を含まない試供体の実験写真例を示す。爆破孔間隔 10~20 cm は前の報告¹⁾ からみて爆破により発達したクラックによって十分連結可能な距離である。クラックによる孔間の連結は直線状あるいはなめらかな曲線状となる。それぞれの供試体

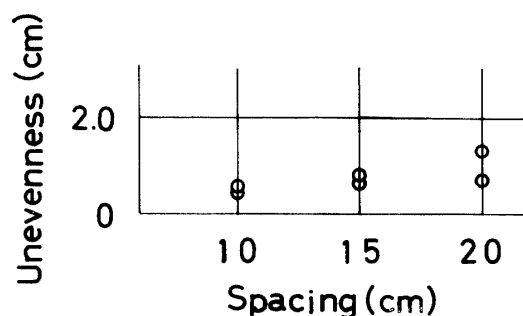


Fig. 3 Unevenness in the specimen without discontinuity.

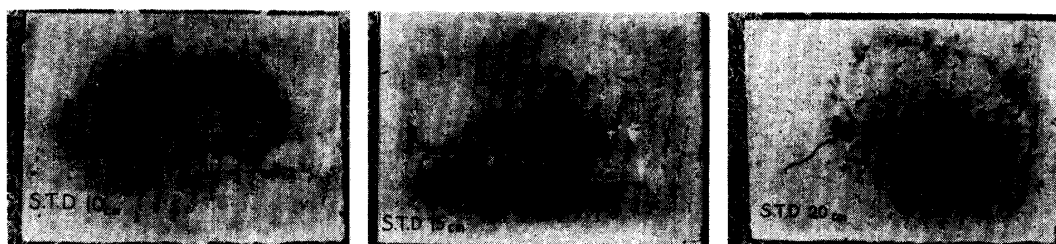


Photo. 1 crack formation in standard specimens (without discontinuity)

に対する Unevenness を示したものが Fig. 3 である。この場合 Unevenness は小さく、孔間隔 20 cm に対しても最大 1.3 cm であった。

Photo 2 に不連続部を含む供試体の例を示す。写真中の文字は爆破孔間隔 (10, 15, 20 cm), 不連続面と爆破孔間を結ぶ線との傾き (90°, 67.5°, 45°, 22.5°), コンクリート板と周囲のコンクリートとの間の介在物 (なし: 打ち継ぎ面, 0.03 mm 厚さのポリエチレンシート, 0.3 mm 厚さのビニールシート) を意味する。

写真からみられるようにシートをはさむ供試体では不連続面の傾きが 90° の場合を除いて爆破孔間が直線状に近いクラックで結ばれることはなく、破断面が爆破により発生、発達したクラックと不連続面とが連結して形成される。

孔間隔が 10 cm の場合や、不連続面の傾きが 22.5° の場合に多くみられるように、爆破孔と不連続面との間がクレーター状となるものについては Unevenness を求めることが困難である。そこでこの場合にはクレーター外縁と不連続面との交点を求めることにより一応 Unevenness を計測しているが、以下の図中では記号をぬり潰すことにより明確なクラックの検出から求められた Unevenness とは区別している。また供試体によっては Unevenness を計測すべきクラックが検出されなかったものもある。

Fig. 4 はそれぞれの孔間隔に対して不連続面の状況

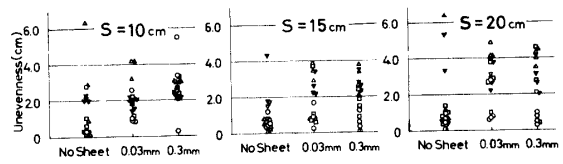


Fig. 4 Dependence of unevenness on the discontinuity condition.
(○: 90°, |: 67.5°, △: 45°, ▽: 22.5° solid mark; crater edge)

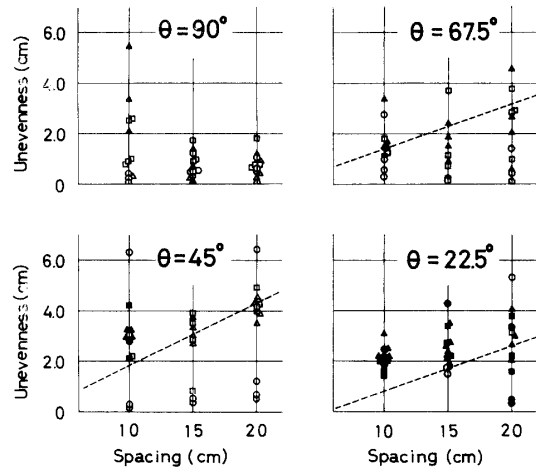


Fig. 5 Dependence of unevenness on the inclination of the discontinuity plane.
(○: without sheet, □: 0.03 mm sheet, solid mark; crater edge)

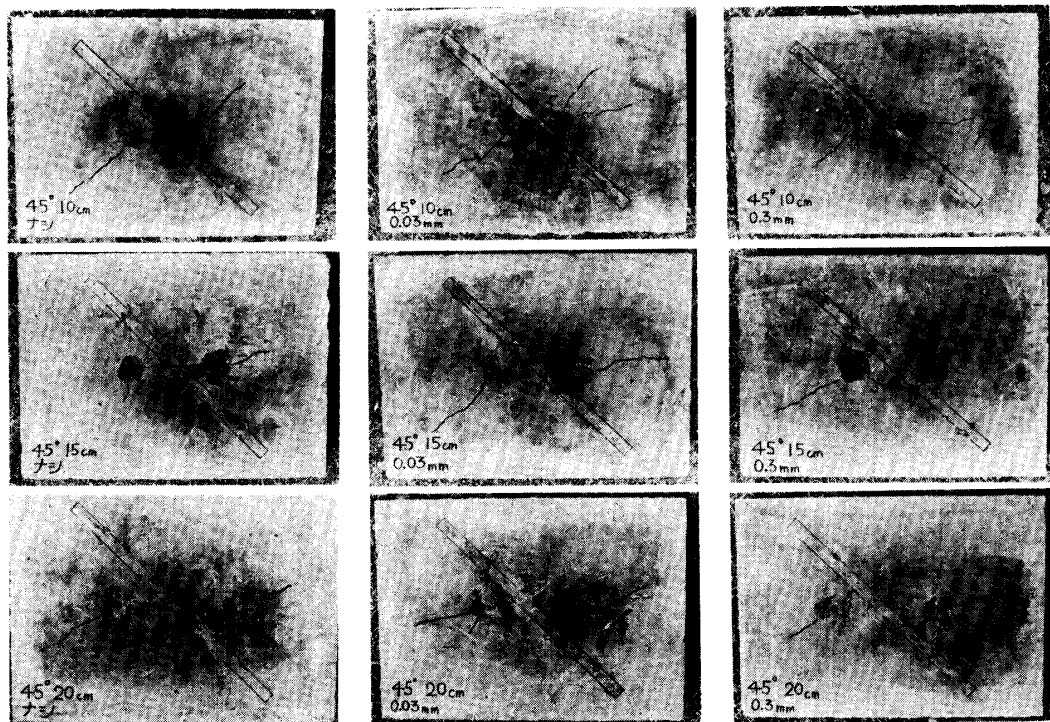


Photo. 2 crack formation in the specimens (with discontinuity)

による Unevenness を示したものである。

Fig. 5 はそれぞれの不連続面の傾きに対し、孔間隔によって Unevenness がどのように変化するかを示したものである。

3.2 検討

前項で示した実験結果により、不連続面を有するコンクリート中の爆破によるクラックの発達を検討する。以下簡単のため不連続面の状態を (A) 打ち継ぎ面、(B) 0.03 mm 厚さのポリエチレンシート、(C) 0.3 mm 厚さのビニールシートのそれぞれについて (A), (B), (C) と呼ぶ。

3.2.1 不連続面の状態が Unevenness に及ぼす影響

不連続面が打ち継ぎ面である (A) の場合と 2 種のシート (B), (C) の場合とでは Unevenness に大きな差がある。クレーター状態とならない時は数個の例外を除いて (A) の Unevenness は小さい。また (B) および (C) では大差ない。この点については次のように考えることができる。すなわち (A) の不連続面は面の引張強度に不連続性はあるが、爆破衝撃波の伝播特性からみたとときは連続状態に近い。そのため破断面は通常不連続面を含まない供試体と同様に形成される。しかし不連続面は弱面としては存在するため、破断予定面以外の方向へ発達したクラックがこの不連続面と連結して大きな Unevenness を与えることがある。これとくらべて (B), (C) の場合には不連続面によって爆破衝撃波が大きくカットされ、SB にとって有効な波の相互作用が生じにくくなると思われる。またこれらの場合不連続面は自由面に近い作用をするため、クラックは爆破孔からこの面に垂直に発達する傾向にあり、Unevenness は大きくなる。

クレーター状態となったデータの個数は (A), (B), (C) の順でそれぞれの孔間隔において増加しており、順に不連続性が高くなることに対応している。

3.2.2 不連続面の傾きおよび爆破孔間隔が Unevenness に及ぼす影響

いま Fig. 1b のようにクラックが発生し、このクラックは不連続面に垂直であるとする。このクラックと不連続面との交点の破断予定線からの距離は不連続面の傾きの関数となる。これを孔間隔に対して表わすと Fig. 5 中の破線となる。すなわち爆破孔から不連続面に垂直な単一のクラックが発生する場合、計測される Unevenness はこの破線で表わされる値をとり、放射状の多数のクラックあるいはクレーターを生じる場合には破線で表わされる値より大きく、また破断予

定線に近い直線状あるいはそれに近い状態にある場合には破線で示される値より小さくなる。

図によると (A) の場合を除いて傾きが 67.5° のときには Unevenness は破線の値より一般に小さくなり、 22.5° のときにはクレーター状となって大きくなる。そして 45° の場合には孔間隔が 20 cm, 15 cm ではほぼ破線上にあるが、孔間隔が 10 cm の場合には多くの供試体でクレーター状となり大きく現われる。また傾きが 90° の場合には破線により示される Unevenness の値は 0 であり、この場合にはクラックが不連続面に対して垂直からずれる量だけ Unevenness として現われる。

また (A) の場合には Unevenness は不連続面の傾きおよび爆破孔間隔にかかわらず一般的に小さい。すなわち不連続面の傾きが 67.5° ではここで検討した不連続性に対して相互の爆破孔からの衝撃波等の影響により孔間を連結するクラックが直線状に近くなることが認められる。しかし 45° では (A) の場合には Unevenness は不連続面を有しない場合のように著しく小さく、また孔間隔 10 cm では多くの場合クレーター状態となるため若干大きくなるが孔間隔 15, 20 cm ではほぼ破線で示される値に近くなる。すなわち不連続面の傾きが 45° となると隣接孔の爆破を同時に行なうなどの工夫によっても発生、発達するクラックの方向を制御することは困難となり、クラックの発達方向は大きく不連続面の影響を受けることになる。また傾きが 22.5° となると爆破孔からの不連続面への距離が小さくなるため、ほとんどの供試体でクレーター状となり、その結果 Unevenness の値は破線で示される値よりも大きくなる。

不連続面の傾きが 90° の場合、孔間隔が 15 cm, 20 cm では Unevenness はほぼ同程度の値を示すが、孔間隔 10 cm になるといくつかの供試体で値が大きくなる。これは他の傾きの場合とくらべて孔間隔の増加とともに Unevenness の値が大きくなる一般的傾向とくらべて逆である。この点については本実験での薬量に対して 10 cm の孔間隔 (爆破孔から不連続面までの距離は 4 cm) が短いため、クラックの発生が放射状あるいはクレーター状となり、必要以上の破壊を生じた結果であると解釈される。

4. おわりに

本研究はコンクリート供試体を工夫して不連続部を含む岩盤の模型を作製し、これを用いて爆破実験を行ない、不連続部を含む岩盤の SB のための基礎的資料

を得ようとしたものの報告である。不連続部を含む岩盤の SB 結果に与える不連続の要因は多い。そこで本研究ではそれらの要因のうち比較的重要であると思われる (i) 不連続部の種類, (ii) 不連続面と SB 面との傾き, (iii) 爆破孔間隔をとり挙げている。

実験により得られた主な結果は次のようである。

(1) 打ち継ぎ面は材料強度に関する不連続面として作用し、時に発生したクラックと連結し、大きな Unevenness を与えることがある。しかし一般に供試体の挙動としては不連続面の存在しない場合と大差ない。0.3 mm および 0.03 mm 厚さのシートによる不連続効果に大差はないが、クレーターの発生状況からみて 0.3 mm 厚さのシートの方が不連続性の程度の高いうことがうかがえる。

(2) シートを含む供試体において一般に爆破孔間距離の増加により Unevenness は増大する。しかし破断予定線と不連続面とが直交する場合には爆破孔間距離が小さいと Unevenness が逆に小さくなることがある。

(3) シートを含む供試体において計測される Unevenness を爆破孔から不連続面へ下した垂線の足

の位置の破断予定線とのへだたりと比較したとき、傾きが 67.5° では実測値の方が小さく、 45° では同程度であり、また 22.5° ではクレーター等のため大きくなる。 90° に対しては垂直の足の位置は破断予定線上にあるので当然実測値が大きくなる。

5. 謝 辞

本研究を行なうにあたり多くの方々のお援助をいただいた。特に実験に便宜をお計りいただいた日本化薬厚狭工場の石井工場長に感謝するしだいである。また実験に御協力をいただいた日本化薬荒木主任および多数の山口大学の職員、学生諸氏に謝意を表す。

参 考 文 献

- 1) 中川浩二, 坂本 佐, 山本顕一郎: 土木学会論文報告集, No. 316, 51-60 (1981)
- 2) 中川浩二, 坂本 佐, 吉開亮介: 工業火薬協会誌 **43**, No. 2, 75-82 (1982)

(昭和57年4月15日 受理)