

集中装薬発破の基礎式に関する研究

(昭和25年4月24日受理)

日 野 熊 雄

(日本化薬株式会社厚狭作業所)

摘 要

従來の発破基礎式を批判し、岩石粉碎の法則を利用して発破の一般式を導出した。薬量 = L 、火薬の比エネルギー = f 、岩石の破断臨界エネルギー密度 = e_c 、岩石の粉碎係数 = c 、最小抵抗線 = h 、漏斗指数 = n = 漏斗孔半径 R と h の比とすると

$$L = \left(\frac{4\pi e_c}{f} \right) h^2 (1+n^2) e^{ch\sqrt{1+n^2}} \dots \dots \dots (1) \quad \text{となる。}$$

(1) 式中 $F(n) = \frac{(1+n^2)}{2h} e^{ch\sqrt{1+n^2}} \dots \dots \dots (2)$ は旧來の諸研究者の漏斗孔指数に相当する。

(2) 式と従來の實驗的函数を比較し (I) Lebrun, Belidor (II) Dambrun (III) Mouze, Marescot, Brallion, Lares, Meinecke (IV) Hauser, Guillemain の式は一般式 (1) の c, h が特殊の範囲になつた特別の場合であることを明にした。 $\frac{e_c}{f}$ 及び c は $\log\left(\frac{L}{r^2}\right)$ を Y 軸に r を X 軸に實驗値から描けば之から決定されることを述べた。但し、 $r^2 = h^2 + R^2$ である。50% = トログリセリン入機ダイナマイト中等硬度の閃綠岩に関する實驗値を使用して c, e_c 等を求め (1) 式より導いた式を用ひ、発破のエネルギー効率、岩石片の大きさと数の分布、爆源からの距離とエネルギー消費等の関係を計算した。

I 緒 言

工業用爆薬及び火工品は岩石又は石炭等に対するその発破作用に依つてその効果を実現するものであるから発破法の研究は爆薬火工品を有効經濟的に使用する為の基礎を為すのみならず、メタン、炭塵の危険のある場所に於ては発破の計画及び実施が適當でなく過装薬又は弱装薬である場合には炭坑爆発の原因となるのであつて保安上も発破の研究は基礎的に重要である。しかるに発破の設計式に関する理論的實驗的研究は不充分であつて従つて発破が合理的に実施される基礎が薄弱である。発破の問題は複雑であるから理論的にも實驗的にも之を一挙に完全に解決することは困難であるが各方面からの研究を進めて発破の合理化を計る事は当面の急務である。

II 従來の発破基礎式

発破に関しては従來種々の基礎式が提出されているがその主なるものは原理的には次のものである。

(1) Daw の剪断理論式、(2) Hauser の實驗式、(3) 弾性理論式

(1) A. W. Daw 及び Z. W. Daw の剪断理論式は載断面に対する全圧力 P と剪断抵抗線長 h と載

断面の周辺長 S との間に $P = KS \cdot h \dots \dots (1)$ の関係が成立することを剪断力から理論的に考え氷を用ひた機械的破断試験で之を確めて理論設計式を展開して行く方法であつて一定の理論体系を形成し一書を成している。但し K は剪断係数である。又は圧力の作用面積を A とすれば載断面單位面積に対する圧力を P として $P = Ap$ 又 $\frac{K}{p} = c$ 、とおき、最小抵抗線の式 $h = \frac{A}{c \cdot S} \dots \dots (2)$ を得る。

この式は圧力だけで破断が起るとして基礎式を建てた処に無理がある。岩石を剪断する為には或一定の圧力 P 。以上の圧力が作用して之が岩石剪断面に於て岩石に或距離 d 以上の移動を引起させる間継続し塑性限を越して剪断を引起さねばならぬのであつて (1) 即ち圧力が P 。以上であるといふ圧力条件の他に (2) この圧力が d 以上の距離の間作用し続けるという移動条件が必要である。この (2) が発破に於て自由面が重要であることの物理的意味である。(1) と (2) の条件の何れが欠けても剪断破断は生じ得ないのであつて之を綜合すると破断の条件は (圧力) \times (移動距離) = エネルギーで決められねばならぬ。従つて (1) の条件のみを基とした Daw 式には根本的に無理があるので之が成立するのは或特殊の仮定をした特別の場合のみであつて

一般的基礎とはなり得ない。更に Daw 理論の難点は、剪断は漏斗孔周辺に於てのみ起るものとして基礎式を建てた点にあるのであつて、この周辺面積に於ける剪断力のみを加圧力と等しと置くことは特別の場合即ち岩石が完全に一体の漏斗状固体として剪断された場合にのみ当はまるが、一般的の岩石発破に於ては漏斗状の1ヶの固体塊を得るわけではなくして大小様々の碎片に破砕されるのであるから剪断に要する力又はエネルギーに乗すべき面積は漏斗周辺面積に対し遙に大なのである。この点を無視したことは Daw 理論の最大の弱点である。

(2) Hauser の三乗式

Hauser は実験的に採石量 $V = \frac{\pi}{3} h R^2 \dots\dots (3)$

(但し h は漏斗孔深、 R はその半径) は装薬量 L に比例するものと認め又 $h=R$ が標準的であるとして $L = \text{Const. } h^3 \dots\dots (4)$ と置いた。 $h=R$ の一般の漏斗孔に適用させる為この式はその後多くの研究者に依つて次の如く置かれた。即ち $L = a_1 \cdot a_2 \cdot F(n) \cdot h^3 \dots\dots (5)$ 但し a_1 は岩石に依り定まる岩石係数、 a_2 は爆薬に依り定まる爆薬係数、 $n = \frac{R}{h}$ = 漏斗指数で $F(n)$ はその函数で専ら実験的に定められた。厳密に言えばこの系統の式は總て実験式と云うべきもので物理的意味は附け難いが又それ故に反つて簡單明瞭であるから実用上の基礎式として広く用ひられて來ている。

この式はその理論的意味が明でない如く欠点であつてその為発展性が無く実用上も広く適用しようとする多くの矛盾が出てきて例えば實際には $L = \text{Const. } h^3$ の常数が同一岩石、同一爆薬で n 一定の場合も一定とならず、或は $L = \text{Const. } h^2 \dots\dots (4)$ の方が良く合うという場合も出て來て到底一般的基礎式とはなり難い。

尙 Daw 式と Hauser 式の関連について一言して置かねばならぬのは Daw 式から Hauser 式が導かれるという説明である。その説明は要するに装薬 L は $L = \frac{\pi}{4} n_1 \Delta d^3 \dots\dots (6)$ (但し Δ は爆薬の比重 n_1 は薬長と薬径 d の比) で表わされ一方式(2)の

$$\frac{A}{S_1} = \frac{n_1 d^2}{2(n_1+1)d} \dots\dots (2)'$$

即ち $h = \frac{1}{c_1} \frac{n_1 d}{2(n_1+1)} \dots\dots (2)''$ から

$$L = \left(\frac{\pi n_1 \Delta}{4} \right) \left(\frac{2(n_1+1)}{n_1} \right)^3 c_1^3 h^3 = \text{Const. } h^3 \dots\dots (7)$$

であるという理論である。然るに Daw の基礎式に於ては全圧力 P 又は圧力強度 P と加圧面積 A と最小抵抗線 h との関係のみを規定しているのであつて装薬形はこの P を昂しさえすれば何の制限もないのである。即

ち比重 Δ が一定で圧力作用面積即ち装薬の截断面に於ける投影面積が一定ならば良いというのが Daw の基礎式の主要点であり、この条件さえ満足させれば装薬形が山の如く薬高のものであつても煎餅の如く薬低であつても一向構はないのであるから (6) 式は何の理論的必然性を有しない。従て (6) 式を用ひて (7) 式を出す理論にも必然性はないのであつて即ち Daw 式から Hauser 式は導き出せないのである。

むしろ (1) に述べた如く剪断に依り漏斗状固体が発破の發生したとすると爆薬の有する全エネルギー $E_0 = Lf \dots\dots (8)$ (但し f は火薬の比エネルギー) とすると之が剪断面積

$S = \pi R_c = \pi n h^2 \sqrt{1+n^2} \dots\dots (9)$ を生ずるのに費されるから岩石の単位面積の剪断にエネルギー e_0 を要するとすれば

$$L f = e_0 \pi n h^2 \sqrt{1+n^2} \dots\dots (10)$$

$$\text{即ち } L = \left(\frac{\pi e_0}{f} \right) \left(n \sqrt{1+n^2} \right) h^2 \dots\dots (11)$$

となるのであつて $L = \text{Const. } h^2 (4)'$ となるのである。即ちこの場合は二乗公式となつて Hauser 式の如き三乗公式とはならないから剪断の基本概念からは三乗式は導出されないのである。

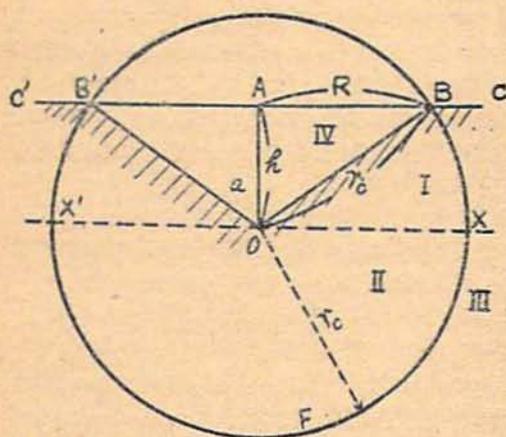
(3) 弾性理論式

弾性力学を岩石に適用して発破式を導く方法からは簡単な実用的な函数形式は導出されていないがこの系統の従來の理論の難点は弾性波動として爆破力を取扱う点であつてあたかも音波理論を用いた古い水中爆発理論式が爆発論的には意味が薄かつたのと類似の関係にある。即ちこの系統の理論として意味を持ちうるものは衝撃波の理論を基としたものでなければならず之は水及び空気に対しては近來はじめてアメリカの理論物理学者に依つて解かれたものである。又岩石発破に於ては爆薬のエネルギー自体に依り岩石の破砕がひろがつて行くのであるから通常の弾性論の適用は無理である。むしろ弾性論は岩石破砕の起る漏斗孔内ではなくそれ以外の所謂弾性帯内の震動傳播に利用されるべきものである。

III 岩石の破砕条件を基とした 一般的発破式

図1に於て0点は集中装薬半径 a なるものの中心点とし之を原点とする。BB'下方が岩石で BB' が自由面である。 h は装薬の深さ又は最小抵抗線と自由面に垂直穿孔の場合は穿孔長である。 R は漏斗孔の半径である。集中装薬という條件は $r_0 \gg a \dots\dots (12)$ を意味するから r_0 に対し a は無視して良い。但し r は原点0からの距離で r_0 は漏斗孔の側面長で $r_0^2 = h^2 + R^2$ である。

図 1



さて岩石が破断される為には先づ岩石素片の相対的移動が可能でなければならぬ。その移動必要距離 d は岩石を構成する原子間の結合力と結合距離及び岩石結晶の二次構造に主として関係するがともかく数 mm から大きくて cm 程度であらう。即ち自由面の発破に対する物理的意義はこの d にあるので広大な空間を必ずしも必要としないのであつて岩石間の裂け目等もその役目を演じ得るのであるが一般理論としては一様な固体内の発破を考えることにする。この条件を (a) 移動条件と略称すると図 1 の XOX' 下方は無限固体であるから破断は起り得ない。従来の発破解説に於て爆源附近は対称的に圧縮拡大層、粉砕層、破壊層、龜裂層、震動層という風に破砕が生ずると説明してあるものが多いが XOX' 以下では岩石の破断は起らず圧縮拡大層から震動層に飛ぶのであつて岩石破砕の様相は爆源に対し極めて非対称的である。之はむしろ発破の経験に合致するのであつてもし対称的に破砕が生じているものならば装薬位置より遙かに深い処迄発破が効くことになるが実際はそうでないのである。

岩石破断の第 2 の条件はその与えられたエネルギー密度 e_r が岩石に依り定まる一定値 e_c 以上であること之を (b) 臨界エネルギー条件と略称する。 e_r は r の増加に伴つて減少するから $e_r = e_c$ となる r を r_c とすると原点 O を中心として半径 r_c の円を描くとこの円周と自由面の交点 BB' が岩石破断のエネルギー的限界になるから B→C, B'→C' に於てはもはや岩石の破断は起らず BC の岩石は (a) の条件を充しても (b) の条件を満たさぬから震動層となる。即ち岩石内で半径 r_c の円内に入る所の内 (I) CBOX は (a) を充し (b) を充さず (II) XX'F は (b) を充して (a) を充さず、その他の岩石 (III) は (a) (b) 共に充さないから震動は傳播しても破断は起らず結局漏斗 BB'O 内のみにて破断が起る。この際重要な点

は BOB' 円錐の周辺のみで破砕条件が成立するわけではなくこの円錐内部全体に於て破砕条件が満足されていることである。即ち破砕に要するエネルギー消費は Daw の考への如く円錐表面に沿うもののみでなく、円錐内部に於ける消費を同等に考慮しなければならず、定量的には後者の方が前者より遙に大となるのである。

一方爆源に於ける全エネルギーを $E_e = Lf$ とすると半径 a の装薬に接した岩石の表面積上のエネルギー密度を e_a とすると $E_e = 4\pi a^2 e_a$ 之が半径 r の球面上に拡がった時のエネルギー密度を e_r とすると幾何学的関係から $e_r 4\pi r^2 = e_a 4\pi a^2$ 即ち

$$e_r = \frac{E_e}{4\pi r^2} = e_a \frac{a^2}{r^2} = \frac{Lf}{4\pi r^2} \dots (13) \text{ さて一方 } r \text{ に}$$

垂直な単位面積に e_r のエネルギーが与えられた時 r の方向に長さ dr を考へた場合 dr の方向に於て岩石の破砕にエネルギーが費されるが Rittinger の粉砕法則に依れば粉砕に依り生じた新表面積は加れたエネルギー e_r に比例し一方単位表面積を生ずる為には一定のエネルギー e_c を要するので結局 dr 中の粉砕に要するエネルギー消費は $-de_r = e_c e_r dr \dots (14)$ この場合 $\frac{de_r}{e_r}$ の新表面積が $(1 \times 1 \times dr) \text{ cm}^2$ 内に生じてい

る。(13)式に於て c は岩石破砕に要するエネルギー消費率で之を岩石粉砕係数と略称する。(14)式を積分して $\int e_r = -e_c r + \text{Const.}$ $r = a$ に於て $e_r = e_a$ 従て $e_r = e_a e^{-c(r-a)} \dots (15)$ 但し e は自然対数の底である。(13)と(15)より総合的に e_r と r の関係は次式にて表わされる。即ち $e_r = \frac{Lf}{4\pi r^2} e^{-c(r-a)} \dots (16)$ 岩石破断の条件 (b) から漏斗孔の側辺長を r_c とすれば集中装薬の条件(12)を入れて $e_c = \frac{Lf}{4\pi} \frac{e^{-c r_c}}{r_c^2} \dots (17)$

$$\text{一方漏斗係数 } n = \frac{R}{h} \text{ 又 } r_c^2 = R^2 + h^2 \text{ より}$$

$r_c = h\sqrt{1+n^2}$ 之を (17) 式に代入し

$$L = \left(\frac{4\pi e_c}{f} \right) h^2 (1+n^2) e^{c h \sqrt{1+n^2}} \dots (18)$$

(18)式が最小抵抗線 h と薬量 L との関係を表す基礎式である。従来一般に n の函数 $F(n)$ は $n=1$ 即ち標準装薬の場合 $F(n)=1$ となる如く定義されてきているから $e=0$ 即ち岩石の粉砕を考へぬ場合を標準とすると $L = \left(\frac{8\pi e_c}{f} \right) h^2 \frac{(1+n^2)}{2h} e^{c h \sqrt{1+n^2}} \dots (19)$

$$L = \left(\frac{8\pi e_c}{f} \right) h^2 F(n) \dots (19)'$$

$$\text{但し } F(n) = \frac{(1+n^2)}{2h} e^{c h \sqrt{1+n^2}} \dots (19)''$$

IV 一般的発破式と従来の諸式の関係

(19)の一般式と従来の諸式との関係は次の如くである。

(1) $c=0$ の場合

M. Chalon に依ると $L=Const. h^3 \dots (4)$ は h 大の時は過大の L を与え $L=E_1 R_1 h^2 \dots (4)'$ (但し $E_1=$ 爆薬係数, $R_1=$ 岩石係数) の方が正確であると E_1 及び R_1 の値を与えている。この二乗式は(18)の一般式の $C=0$ 即ち岩石粉砕係数を零と置いた特別の場合である。

(2) ch 小の場合

e の項を級数に展開して第二項迄とれば

$$L = \left(\frac{4\pi e_0}{f} \right) (1+n^2) h^2 (1+ch\sqrt{1+n^2})$$

$$= \left(\frac{4\pi e_0}{f} \right) (1+n^2) (h^2 + h^3 c \sqrt{1+n^2})$$

即ち L は h の自乗に比例する項と h の3乗に比例する項の和から成るから實際上 $h^2 (2 < n < 3)$ に比例する。従来3乗公式が必ずしも良く合はぬことは良く認められている処でありその他2乗式が提出されてもいるがこの事情は一般式に依り良く表わされている。

(3) $F(n)$ の実験式

従来の諸式は三乗式と実験の差を漏斗函数 $F(n)$ を実験的に求めることに依り補正せんとしている。 $F(n)$ の主なるものは次の如くである。

- (f) Dambrun $(\sqrt{1+n^2} - 0.41)^3$
- (a) Marescot $\frac{n^2 \sqrt{1+n^2}}{\sqrt{2}}$
- (b) Mouze n^2
- (c) Lebrun 過装薬 $(0.1+0.9n)^2$ 弱装薬 $\left(\frac{3n+4}{7}\right)^3$
- (b) Hauser, Guillemain n^2
- (e) Brallion $\frac{(1.0+4.4n^2)}{5.4}$
- (h) Lares $\left\{ \sqrt{1+n^2} - \frac{1}{n^2} (\sqrt{1+n^2} - 1) \right\}^3$
- (i) Meinecke $\frac{n^2(1+\sqrt{1+n^2})}{1+\sqrt{2}}$
- (g) Belidor $(1+n^2)^{3/2}$

以上の特殊函数形 $F(n)$ が先の一般式の $F(n)$ に相当するから

$$F(n) = \frac{1+n^2}{2h} e^{ch\sqrt{1+n^2}} \dots (19)''''$$

$$\text{今 } \frac{F(n)}{1+n^2} = i \text{ と置くと } i = \frac{1}{2h} e^{ch\sqrt{1+n^2}}$$

$$\log i = \log \frac{1}{2h} + 0.4343 ch\sqrt{1+n^2} \dots (20)$$

i は前記の各函数形に対して計算し得るから $\log i$ を直角座標の y 軸, $\sqrt{1+n^2}$ を x 軸にとれば(20)式が若し成立するものならば直線が得られる筈である。その計算値を表1及び図2に示す。

表 1 $\log i = \log \frac{F(n)}{1+n^2}$

n	$\sqrt{1+n^2}$	(f) Dambrun	(a) Marescot	(b) Mouze	(c) Lebrun	(d) Hauser & Guillemain	(e) Brallion	(h) Lares	(i) Meinecke	(g) Belidor
0.5	1.118	1.4594	1.2041	1.3010	1.5933	1.0170	1.3655	1.3345	1.2430	1.5933
0.6	1.166	1.4900	1.3444	1.4232	1.6232	1.2095	1.4232	1.4082	1.3747	1.6149
0.7	1.221	1.5514	1.4502	1.5172	1.6464	1.3579	1.4983	1.4871	1.4800	1.6325
0.8	1.281	1.6042	1.5490	1.5911	1.6665	1.4942	1.5635	1.5647	1.5670	1.6542
0.9	1.345	1.6607	1.6284	1.6522	1.6911	1.6053	1.6335	1.6314	1.6375	1.6767
1.0	1.414	1.6990	1.6990	1.6990	1.6990	1.6990	1.6990	1.6990	1.6990	1.6990
1.1	1.487	1.7396	1.7604	1.7404	1.7709	1.7810	1.7612	1.7619	1.7959	1.7226
1.2	1.562	1.7945	1.8129	1.7709	1.8267	1.8500	1.8136	1.8195	1.8407	1.7459

図2より明なる如く(20)式は成立するのであつて之に依り諸実験式は次の4群に分類し得る事が判る。即ち表2の如くである。

表 2

実験面数	$F(n)$	h	e
(1) Lebrun, Belidor		3.31	0.279
(2) Dambrun		13.15	0.140
(3) Mouze, Marescot, Brallion Lares, Meinecke		39.6	0.0652
(4) Hauser, guillemain		218.0	0.0178

図 2 (1)

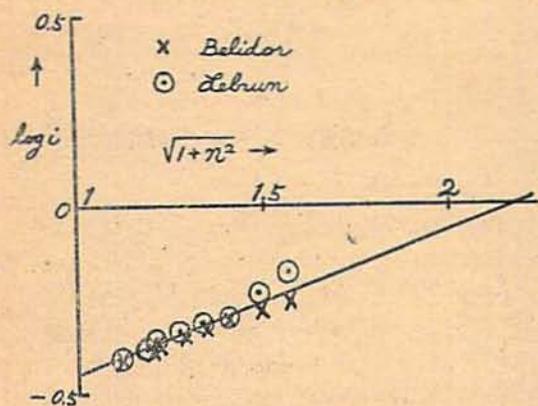


図 2 (2)

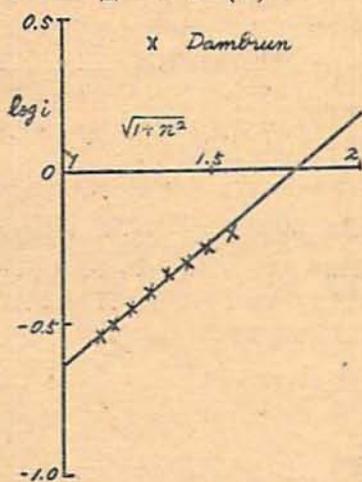


図 2 (3)

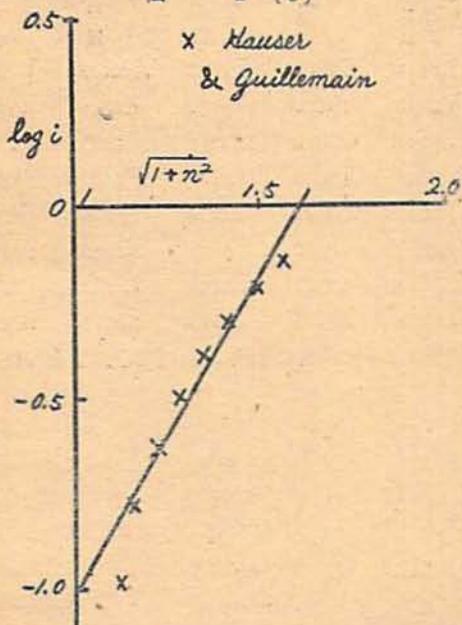
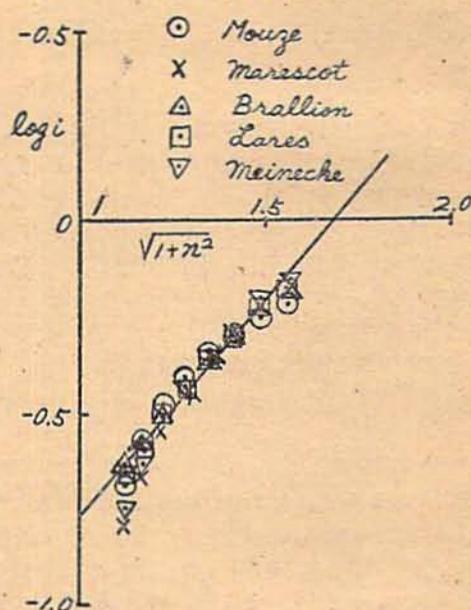


図 2 (4)



発破の実験成績は相当のバラツキを有するものであるから前記諸研究者は種々の異つた岩石、爆薬、孔長で実験したものの平均的な値から函数の実験式を求めているわけであつて表2の h, c の値はその意味に於ける標準値であつて一義的のものではない。一般式(18)は最小抵抗線の絶対値 h 及び岩石粉砕係数 c の両変数の範圍に依り従來の全ての実験式をそれぞれ特別の場合として含む事が明になつたわけで結局一般式(18)の実用範圍は従來のどの式よりも大なることが明であり、特に重要な点は従來物理的意味不明のまま専ら実験式に依つて計算する以外途のなかつたものがそれぞれ明確な物理的意義を有する変数の函数として表されている点である。

岩石の発破に於ける特性は従來の発破式に於ては唯一の係数即ち岩石係数に依つて表されていたが本研究に於て示した如く発破の特性を廣範圍の條件に對して表す為には岩石に関する二つの係数が必要である。即ち従來の意味の岩石係数 c_0 の他に動的粉砕性を表す岩石粉砕係数 c_1 が重要である。 c_1 は岩石片が離脱する限界に於けるエネルギー密度の下限でこの内岩石の破砕に使われるのは $c_1 c_0$ であるから 1 cm^3 当り $\frac{c_1 c_0}{c_0}$ の新破断面が生じていることを意味する。一方單位容積當りの表面積即ち比表面積 S は岩石碎片を直径 l の球又は一辺 l の立方形と仮定した場合は $S = \frac{6}{l}$ であるから $S = \frac{c_1 c_0}{c_0} = \frac{6}{l}$, $l = \frac{6 c_0}{c_1 c_0}$ (21)

(21)式より発破に依り生じた岩石片の内最大のもの即ち自由面の破断境界Bに於ける岩石の大きさ l_0 が求められる。平均的に l が之以上ではもはや岩石に龜裂は生じても離脱は起らないという限界が l_0 従つて又 e_c に依り表わされている。 e_c はこの意味に於て岩石の被発破性を表しているのであつて e_c は岩石の新單位面積を生ぜしむるのに要するエネルギーである。即ち e_c は岩石の原子構造に依り決定されるが e_c は大塊としての岩石の破砕強度に関するもので結晶の一次、二次構造、岩石の壁開等幾多高次の構造に左右されるものである。

V 一般的爆破式の諸係数の決定

一般的爆発式は(18)又は(17)より

$$L = 4\pi \left(\frac{e_c}{f} \right) r_c^2 e^{e_c} \dots \dots \dots (22)$$

$\frac{e_c}{f}$ 及びCの実験的決定は次の如くに行い得る。

即ち(22)より

$$\log \left(\frac{L}{r_c^2} \right) = \log(4\pi) + \log \left(\frac{e_c}{f} \right) + 0.4343 e_c \dots \dots (23)$$

2回以上の発破を同一岩石、同一薬種に対して薬量又

は最小抵抗線をかえて行えば L, r_c は実測されるから直角座標の y 軸に $\log \left(\frac{L}{r_c^2} \right)$ を、 x 軸に r_c をとれば一つの直線を得る。その直線が y 軸を切る所をAとし傾斜角を α とすれば

$$A = \log(4\pi) + \log \left(\frac{e_c}{f} \right) \quad \tan \alpha = B = 0.4343 e_c \dots \dots \dots (24)$$

(24)式から $\frac{e_c}{f}$ 及び e_c を得る。 f は火薬の比エネルギーで火薬の組成から計算し得るから e_c を求め得る。

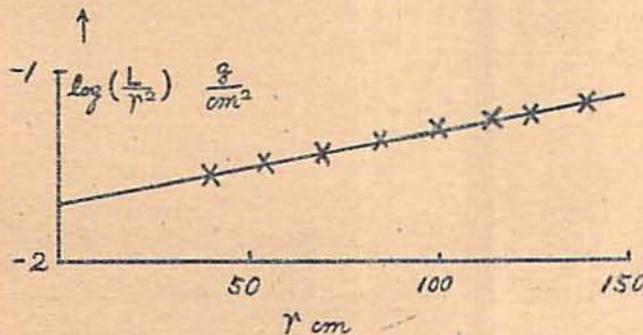
今山本教授の実験値 (50%ニトログリセリン櫻ダイナマイト、中等硬度の閃緑岩) を用いて計算した結果を表3及び図3に示す。この実験は穿孔角約45°で標準装薬として行われているからその孔深を以て漏斗孔の側辺長 r_c と見做すことが出来る。(9)項の計算値はHauserの三乗式 $L = ch^3$ の c の値を示すが之は不規則的なバクツキを示しこの三乗式が標準装薬でも成立しないことを示している。図3を見ると(23)式即ち一般式が成立すると考えてよい。之より

$$\frac{e_c}{f} = 0.00154 \quad \text{又} \quad 0.4343e_c = 0.0038 \quad e_c = 0.00876$$

表 3

実 測			計 算						
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)
L	r_c	h	r_c^2	r_c^3	$\frac{L}{r_c^2}$	$\frac{L}{r_c^3}$	$\log \frac{L}{r_c^2}$	$c = \frac{L}{h^3}$	E_{ff}
45 g	40 cm	30 cm	1,600	64,000	0.0281	0.000703	2.4487	0.00167	7.4%
100	55	40	3,020	166,375	0.0332	0.000605	2.5211	0.00157	9.5
180	70	50	4,900	343,000	0.0369	0.000526	2.5658	0.00144	11.4
320	85	60	7,200	614,125	0.0443	0.000522	2.6464	0.00148	13.1
500	100	70	10,000	1,000,000	0.0500	0.000500	2.6990	0.00146	14.6
680	115	80	13,200	1,520,875	0.0515	0.000448	2.7118	0.00133	15.9
900	125	90	15,600	1,953,125	0.0577	0.000461	2.7612	0.00124	16.7
1300	140	100	19,600	2,744,000	0.0664	0.000474	2.8222	0.00130	17.7

図 3



50%ニトログリセリン櫻ダイナマイトの

$$f = 68701\text{-kg/cm}^2 = 6870000 \text{ cm}^3\text{-kg/cm}^2$$

$$\text{従つて } e_c = 0.00154 \times 687 \times 10^6 \text{ cm}^3\text{-}$$

$$\text{kg/cm}^2 = 10600 \text{ cm}^3\text{-kg}$$

之が岩石 $1 \text{ cm}^2 \times 1 \text{ cm}$ 当り加えられるべきエネルギーであるから 1 cm^2 当りの圧力とすれば 10600 kg/cm^2 である。

Hanischの抗圧力の値は $1300 \sim 2900 \text{ kg/cm}^2$ で先の値はこの3~8倍に当るが発破に於ては動的にエネルギーが与えられ抗圧力試験では静的であるからこの差はむしろ当然であらう。又青山教授に依ると 1 m^3 当りの岩石に60%櫻が

2.08 kg 必要とされているが之は $\frac{2080 \text{ g}}{10^3 \text{ cm}^3} = 0.00208$

g/cm^3 である。一方 $\frac{e_c}{f} = 0.00154$ であることは

1 cm^3 の岩石発破に 0.00154 g の爆薬を要することを意味しているのであるから前の 0.00208 と殆んど一致

する。之より見て $\frac{e_c}{f}$ に対しては従来青山教授や Dr. Lares 等が 1 m^3 の岩石を発破するに要する薬量 kg として与えているものを g/cm^3 で表したものをを用ひ又爆薬の影響は f の計算値に依り標準爆薬に換算すれば実用上差支えないことが判る。

VI 岩石の破砕度

漏斗孔内の起爆点からの距離 r の点に於ける岩石の破砕度は次の如くにして求められる。岩石破砕片を一边 l cm の正立方形又は直径 l cm の球形と仮定するとその何れの場合も単位体積当りの表面積即ち比表面積 S は $S = \frac{6l^2}{l^3} = \frac{6}{l}$ 又は $S = \frac{\pi l^2}{\frac{\pi}{6} l^3} = \frac{6}{l}$

$$\text{即ち } S = \frac{6}{l} \dots\dots\dots(25)$$

である。一方岩石の新表面を作る為には 1 cm^2 当り e_s のエネルギーを要し又 r に於けるエネルギー密度 e_r の内岩石の破砕に e_{cr} が使はれるから

$$\frac{e_s e_r}{e_{cr}} = \frac{6}{l_r} \dots\dots\dots(26)$$

一方 (16) の e_r と r の関係式から

$$e_r = \frac{6}{l_r} \frac{e_s}{c} = \frac{L_f}{4\pi r^2} e^{-c(r-a)} \text{ 又は}$$

$$l_r = 24\pi \left(\frac{1}{L_f} \right) \left(\frac{e_s}{c} \right) r^2 e^{c(r-a)} \dots\dots\dots(27)$$

図

岩石破砕の限界即ち発破に於て生じた最大の岩石片が大略その一边の長さが例えば 30 cm であつたとすると

$$\frac{e_s e_r}{e_{cr}} = \frac{6}{l_c} = \frac{6}{30} \text{ 又 (V) の計算例では}$$

$$e_{cr} = 0.009 \quad e_s = 10600 \text{ cm}^2\text{-kg/cm}^2$$

従て $e_s = 0.009 \times 10600 \times \frac{30}{6} = 477 \text{ cm-kg}$ 即ちこの

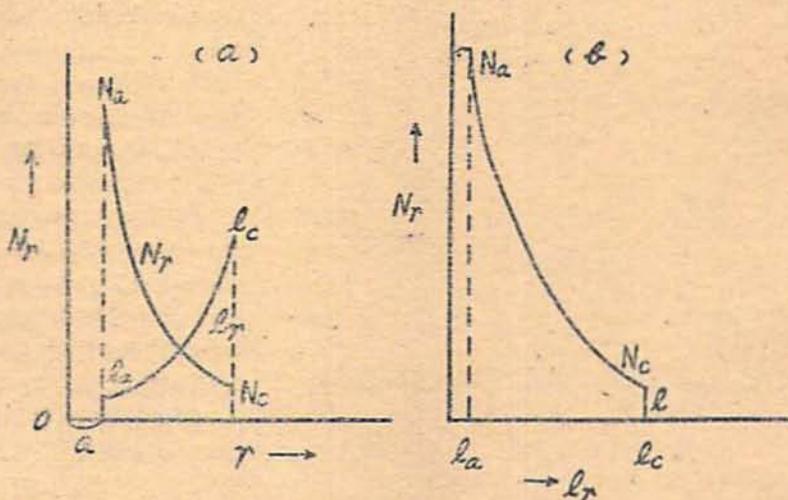
岩石の 1 cm^2 の新表面を作るに要するエネルギーは 477 cm-kg/cm^2 である。即ち岩石の破砕度の限界 l_c を測定すれば e_s を計算し得る。 l の式は球又は正立方体以外の他の形状に容易に拡張出来るが多くの場合 (25) 式は成立するものとみてよい。又 (27) 式を用いて爆薬の比エネルギー f と薬量 L 、又は岩石係数 e_s 及び c 又は距離 r の函数として破砕度 l_r を計算し得る。実用上は破砕度 l_r とその数 N_r との関係即ち破砕度分布曲線が重要であるが之は次の様にして求め得る。爆源からの距離 r に於ける漏斗孔内の岩石層単位

厚さの体積 V_r は $V_r = 4\pi r^2 \times \frac{1}{4} = \pi r^2$ この内に一边 l_r の正立方体が N_r 存在するとすれば

$$N_r = \frac{\pi r^2}{l_r^3} = \frac{1}{(24)^3 \pi^2} (L_f)^3 \left(\frac{c}{e_s} \right)^{\frac{3}{2}} r^{\frac{3}{2}} e^{-3c(r-a)} \dots\dots(28)$$

(27) 式より r が増加すれば l_r は急速に増大するが又 (28) より見て r 増加に依る N_r の減少率は l_r の増大率より遙かに大なることが判る。即ち図 4 の (a) の如き関係となるから l_r と N_r の関係は図 4 (b) の如くなり l_r が増大すれば N_r は急激に減少する。その大略の関係は (28) (27) に於いて $c=0$ として見当をつけよう $r^2 \propto l_r$ であるから $N_r l_r^3 = \text{const.}$ で N_r と l_r の自乗が双曲線的関係にあり c の項の為一般的には $N_r l_r^m = \text{const.}$ $m > 2$ である。即ち細かく粉砕された岩石片数は極めて多く岩石片が大になるにつれそ

4



の数は減少して行く。この岩石破砕度の分布は実用上重要であつて採炭、採鉄、採石に於てはその用途に応じて適当な破砕度が必要であるが従来の発破基礎式は之に対して何の結論も与え得なかつた。本研究に依ると(28)(27)から近似的に

$$N_r l_r^{m-1} \approx \text{const} (L_f)^m \left(\frac{c}{e_s}\right)^m \dots\dots\dots (29)$$

となり $m > 2$ となり之に依り薬勢、薬量、岩石の特性が破砕度分布に対する影響を考察し得る。次に爆薬のエネルギーが岩石破砕の為消費される率と距離 r

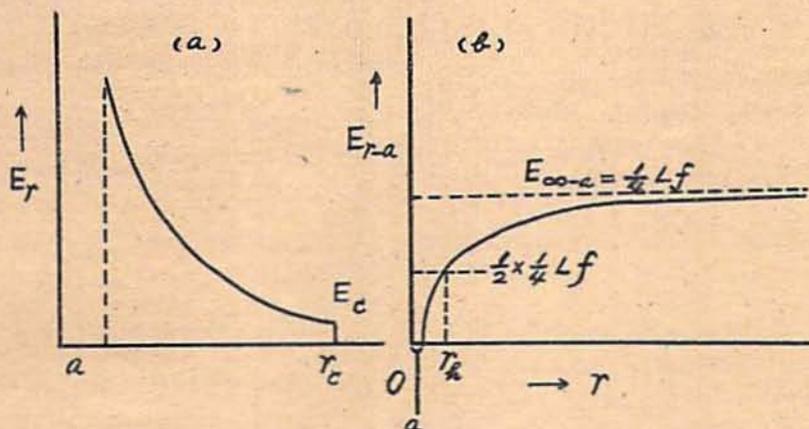
の関係は次の如くである。先に破砕度分布の時考へたと同じ岩石層に於て破砕の為のエネルギー消費は

$$E_r = 6l_r^2 N_r e_s = 6l_r^2 \frac{\pi r^2}{e_s^2} e_s = (6\pi e_s) \left(\frac{1}{24\pi}\right) (L_f) \cdot \left(\frac{c}{e_s}\right) e^{-\alpha(r-a)}$$

即ち
$$E_{r-a} = \frac{1}{4} (L_f) e^{-\alpha(r-a)} \dots\dots\dots (30)$$

即ち図5(a)の如く爆源から遠ざかるにつれ指数函数的に急激に減少するが爆源から r 迄の距離内で消費さ

図 5



れたエネルギーを E_{r-a} とすれば

$$E_{r-a} = \frac{1}{4} (L_f) \int_a^r e^{-\alpha(r-a)} dr = \frac{1}{4} L_f \cdot \{1 - e^{-\alpha(r-a)}\} \dots\dots\dots (31)$$

即ち図5(b)の如くなり $r \rightarrow \infty$ で E_{r-a} は $\frac{1}{4} L_f$

に近づく。発破のエネルギー効率 $E_{ff} = \frac{E_{r-a}}{L_f}$ の計算

値を表3の(10)に示す。 E_{r-a} が $\frac{1}{4} L_f$ の半分に達する距離を半減距離 r_a と定義すると

$$\frac{1}{2} = 1 - e^{-\alpha(r_a-a)}$$

即ち
$$-\alpha(r_a-a) = 0.4343 \log \frac{1}{2}$$

即ち
$$r_a - a = \frac{0.1305}{\alpha} \dots\dots\dots (32)$$

V の計算例の C の値を代入すると $r_a - a = 14.9$ cm 即ち爆源から約 15 cm の処では爆薬のエネルギーは既に半分消費されている事になる。之から考えると爆源に極めて接近した部分で大部分のエネルギーが消費されることが判る。逆に炭坑等に於ては爆源に極めて近接した僅の部分の負荷又は荷重が爆薬のエネルギー吸

収に対して重要なわけであつて爆源近接部に亀裂等があつてそこに僅かな負荷も存在しない部分があると爆薬のエネルギーは減衰せずに放出されメタン炭塵の着火の原因となり得るのである。

VII 結 言

現在の産業発破に於ける心抜方法の主なもの集中装薬に依るV-カット、等であるが本研究は自由面に於ける発破即ち心抜について論じたものであつて同じ論旨で自由面発破即ち拂の理論は従て応用例として解ける。以上の集中装薬に依る心抜と対照的なものとしてはバーンカット心抜法があるが之に関する実用的及び原理的研究に付ては筆者の考察の部を先に報告した。発破に関しては従来の如き簡単な経験法則を基とした設計法や、現象の実体を余りに簡略化し過ぎた力学的理論を基にした設計法を脱して物性論を基とし特に破壊の法則を基にした発破設計式の研究を理論的にも実験的にも進める必要がある。それに依つて発破の能率化、安全化、最適爆薬及び火工品の合理的な設計使用が遂次科学的になつて行くものと期待される。

文 献

- 1) A. W. Daw & Z. W. Daw; Blasting of rock (1909)

- 2) (a) 山本祐徳; 産業爆破概論 (1947)
 (b) 南坊平造; 探鉱火薬学 (1948)
 (c) 深尾七郎; 工業爆薬及岩石発破法 (1936)
 (d) 安藤源次; 岩石発破法 (1934)
 (e) J. J. Cosgrove; Rock excavating and blasting (U.S.A.) (1913) h の3乗式
 (f) W. Gerard Boulton (London). Blasting with high explosives (1923)

採石に対して要量 $L = \frac{h^2 \times H}{K}$ (h = 最小抵抗

抗線, H = 垂直高さ, K = 爆薬及岩石係数)

トンネル掘進及び金属鉱石, 採炭 $L = h^2 \times D \times F$ (D = 穿孔長, F = 爆薬及岩石係数) 大

発破に対しては $L = \frac{h^2 \times H}{K}$ (H = 垂直高さ)

自由面に垂直な装薬孔が平行し孔間距離が

穿孔長 D の2倍の時は $L = \frac{D^3}{K}$ 以上の式は

Hauser 系の三乗式と見做し得る。

鉄板の破断に対しては $L = T^2 \times B \times G$ (T =

鉄板の厚さ, B = 所要切断長, G = 爆薬係

数), 壁の破断に対しては $L = \frac{T^2}{J}$ (T = 壁

の厚さ, J = 係数), 以上の二式は2乗式と

見るべきであらう。

- (g) O.S. Guttman; Blasting (1906)

$L = C_1 (\sqrt{h^2 + R^2})^2$ を理論式とし次に経験

に依り之を次の如く拡張する。 $L = \text{Const}$

$(h+R)^n$ 但し $\frac{R}{h} = n - 1.5$, 又 $n > 15$ では

$L = 0.36 C_1 q (h+R)^2$ とし q を又経験から

計算して一表とす。即ち $F(n)$ の函数形は

出していないが n が 1.5 → 2.62 では q は

1.0 → 4.48 となる。

- (h) 鈴木徹男; 理論炭鉱学 (1949) Gillette の

大発破式 $L = 3K (h^2 + 5H)$ 但し H は岩

石の高さ, 之は3乗式の一つと見られる。

- (i) その他; G. G. André (London); Rock

blasting (1878), G. J. Burgoyne (London);

A treatise on blasting and quarrying of stone. (No date)

- 3) 西村源六郎, 太原正; 火兵学会誌 (1938) 32 巻, 2号 p. 140 (G. Blaise; 5^e fac ann Travaux Publics de Belgique Oct. (1908)

その古河儀一訳, 工火協会誌 (1943) 5 巻 2 号 p. 125

山家信次; 工火協会誌 (1949) 10 巻 2 号, p. 51.

同10巻3号 p. 110

小林明夫; 図解爆破学 (1948)

- 4) 内田, 龍井, 八田; 化学工学 (1946) p. 601 及び (6)

- 5) L. Vennin, E. Burlot, H. Lécorché; Les Poudre et Explosifs (1932) p. 671. M. Chalon, Les explosifs modernes. p. 498 自乗式

- 6) 化学機械協会; 化学工学講義 (第1輯) 桑井源碩 (1949) p. 37.

- 同協会; 化学工学と化学機械 (1949) 中條金兵衛 p. 1.; 友田宜孝; 最新化学機械学 (1947)

- 7) 前出 (2) (a) の p. 131

- 8) 前出 (2) (b) の p. 202

- 9) 前出 (2) (a) の p. 134

- 10) 日野熊雄, 佐藤淳一; 工火協会誌 (1949) 10 巻 3 号 p. 127~131

本論文中 p. 129 上から 19 行は

$$G \approx k_0 \frac{\pi r^2}{\sqrt{f}} \frac{f \pi R^2 \Delta}{\pi r^2 - \alpha \pi R^2 \Delta}$$

20行は $\frac{\pi r^2 k_0 R^2 \Delta \sqrt{f}}{r^2 - \alpha R^2 \Delta}$

22行は $G \approx \frac{\pi r^2 k_0 \Delta \sqrt{f}}{1 - \alpha \Delta}$

23行は「 C_r をガス比熱, T をガス温度とすると $E_c \propto G C_r T \propto G f$ と見てよいから」

24行は $D_c \approx \pi r^2 k_0 \frac{\Delta \sqrt{f}}{1 - \alpha \Delta}$

26行は $E = f \pi R^2 \Delta$

30行は $f \pi r^2 \Delta =$ で右辺最終項は $\frac{\pi r^2 k_0 \Delta \sqrt{f}}{1 - \alpha \Delta}$

32行 $x = \frac{\pi r^2}{2} f \Delta$

$$\left(1 - \frac{k_2}{1 - \alpha \Delta} - \frac{k_4}{1 - \alpha \Delta} - \frac{k_6 \sqrt{f}}{(1 - \alpha \Delta) l} \right) \cdot \frac{1}{2c} - 2r$$

(12) 式は $x = \pi r^2 f \Delta$

$$\left\{ 1 - \frac{K_2}{1 - \alpha \Delta} - \frac{k_6 \sqrt{f}}{(1 - \alpha \Delta) l} \right\} \frac{1}{2cm} - 2r$$

(12)' 式は $X = x + 2r = \pi r^2 f \Delta$

$$\left\{ 1 - \frac{K_2}{1 - \alpha \Delta} - \frac{K_4 \sqrt{f}}{(1 - \alpha \Delta) l} \right\} \frac{1}{2cm}$$

(12)'' 式は $2nl \times e = \pi r^2 f \Delta$

$$\left\{ \left(1 - \frac{K_2}{1 - \alpha \Delta} \right) l - \frac{K_4 \sqrt{f}}{1 - \alpha \Delta} \right\}$$

p. 131. の (13) 式は

$$y = \frac{\pi r^2 f \Delta}{2c} \left\{ 1 - \frac{K_2}{1 - \alpha \Delta} - \frac{K_4 \sqrt{f}}{1 - \alpha \Delta} \right\}$$

On the Fundamental Equations for Industrial Blasting

By Kumao Hino

Usual equations for the design of industrial blasting are criticised. A general equation based on the law of crushing is derived.

$L = \left(\frac{4\pi e_c}{f} \right) h^2 (1+n^2) e^{cA} \sqrt{1+n^2}$ (1) where L =weight of concentrated charge, f =specific energy of explosives, e_c =critical energy density in rock at rupture, c =coefficient of rock crushing, h =line of least resistance, n =crater index, that is the ratio of the radius of crater R to h . In equation (1), $F(n) = \frac{(1+n^2)}{2h} e^{cA} \sqrt{1+n^2}$ (2) corresponds to the crater functions in classical authors. It is proved that the experimental crater functions of (I) Lebrun, Belidor, (II) Dambrun (III) Mouze, Marescot, Brallion, Lares, Meineche (IV) Hauser, Guillemain are the special cases of the equation (1) with various pairs of the values of h and c for 4 groups. The constants $\frac{e_c}{f}$ and c can be determined experimentally by plotting $\log \frac{L}{r_c^2}$ on the y -axis and r_c on the x -axis of the rectangular co-ordinates where $r_c^2 = h^2 + R^2$. An example of calculation is shown on 50% nitroglycerine dynamite and Diorite of moderate hardness. The energy efficiency of rock blasting, the distribution of the sizes and numbers of the rock fragments, and the relation between energy consumption and the distance from the concentrated charge are discussed by some equations derived from (1).

(Nihon Kayaku K. K.)

ダイナマイトの酸素平衡と後ガスの関係

(昭和25年4月24日受理)

仁多富男・大谷敢之

(日本化薬株式会社厚狭作業所)

I 緒言

ダイナマイトの爆発生成ガスに就いては理論及び実用上の見地から既に数多くの研究が行われているが、此度厚狭作業所において簡便に行得る方法によつて種々配合を変えた桂ダイナマイトに対し、それが発生する有毒ガスの試験を行つた。

II 実験方法

ガス試験は土を盛つて埋められた鉄製タンク(直径2m長さ4m)でその一端は閉じ、他端に直角に曲つてコンクリート製の出入口(2m×2m)を付した中

で行つた。タンクの中央の天井に直径約50cmの通気孔があり、爆発の直後之を閉じて発生されたガスを試験した。

試験に供する爆薬は毎回500gを一端に鉛(又は木)の塞栓を打ち込んだ鉄管(直径1 1/2", 長さ75cm)に装填し、最後の薬包に6号電気雷管を装着した。鉄管の残部には口元まで柔かい土を填塞した。この鉄管に装填した爆薬を上述した試験坑道の閉じた端から約1mの場所に懸吊して起爆した。

爆発生成ガス中の一酸化炭素は光明理化学工業株式会社製の川崎光明型一酸化炭素検知器を使用し、試験を行う時の気温に相当した送入秒時でガスを送入り、