

金属材料に対する爆轟効果

第I報 軟鋼板に生ずる歪模様について

(昭和33年9月11日受理)

野村羊親・飛沢昌太郎・高橋知夫

(防衛大学校)

I. 緒 言

金属に爆薬を密着させて爆轟したとき、衝撃進行中にその金属内における諸現象の測定とは全く趣を異にするが、衝撃を受けた金属片の金属組織学的研究もまた重要と思われる。Cook¹⁾はノイマン成型薬より生ずる Slug について詳細な顕微鏡観察を行っている。爆轟衝撃の際物体内に殆んど不連続的に変化するいくつかの応力波が発生することを、桜井氏は本誌上に多数発表されている。本報文は、爆轟衝撃を行った金属片について何等かの不連続的な現象が金属組織学的に見出し得るか否かを確かめるために行つたものである。この場合の金属材料としては軟鋼が一番好都合であるので、もつぱらこれについて実験を行つた。多数の試料中から代表的なものについて記述を行うことにする。

II. 実 験

爆薬としては TNT と RDX の二種を用いた。RDX を成型する場合は 5% のピッチを混合して成型を容易にした。圧縮成型後の RDX, TNT の仮比重は夫々 1.55, 1.50 前後であり、爆速測定値は夫々 8,000 m/sec. 6,200 m/sec. であつた。雷管(6号)は円柱上面にゴム粘土を用いて固定し、かつ軟鋼板は地上にお

いた。軟鋼板は市販のものを多種類使用して見たが、観察事項が定性的であるだけに区別の必要を認めなかつた。

III. 結 果

鋼板を縦断して試料片を作り、フライ試薬による歪模様を検出した。試料片を加温することなしにフライの試薬*で腐蝕すると、極めて明瞭な半月形の歪模様が黒く現われる。TNT, 25g, 径 21 mm の円柱薬を用いた場合を例として写真1にその状態を示す。この黒化はフライ試薬に接触したとき、直ちに起るが、上面に黒化しない薄層が見られる。勿論この部分と雖ども時間をかけてフライ試薬を用いれば黒化を示す。黒化の起点 A', A'' 間の長さは爆薬の径に一致し、A', A'' において黒化は表面から起つている。これらの事柄は薬種を変えても同様である。ただ爆速の小さいものでは黒化が弱くかつ浅く、RDX の如く爆速の大なるものでは黒化が強かつ深い。写真2は TNT と RDX の場合について薬量を 5, 15, 20 g と変化させた場合の差異を示す。両者とも 5 g と 10 g との間で黒化の深さの差が大きい。10 g 以上においてはあまり差がなく、爆轟条件が決まれば、爆速によつて大体一定して来る傾向を示している。

写真1において黒化した部分A及び黒化しない部分Bの検鏡写真は夫々写真3, 写真4の如くであり、写真5は比較のために示した常態の部分Dである。検鏡のときの腐蝕液は総て2% 硝酸-アルコール液であり、倍率は600倍である。写真3の粒界は勿論ある程度の変形が起つているには違いないが、常態と殆んど変わらない程度であり、フェライトには多数のかつ方向の異なるわり帯が見られる。写真4においてはわり帯の生起が更にはげしく起つているが、この場合においても粒界は常態と同程度である。またこれらの写真は結晶粒の応力

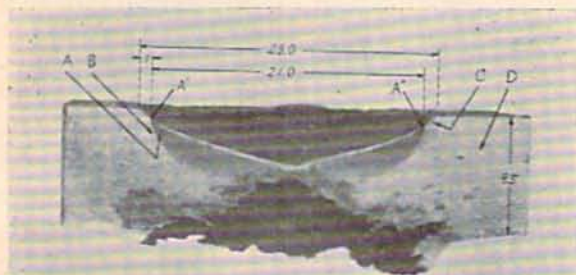


Photo. 1. A strain figure obtained by Fry's reagent.

* 塩化銅=5g, 濃塩酸=40cc, 水=30cc,
エチルアルコール=25cc.

TNT

RDX

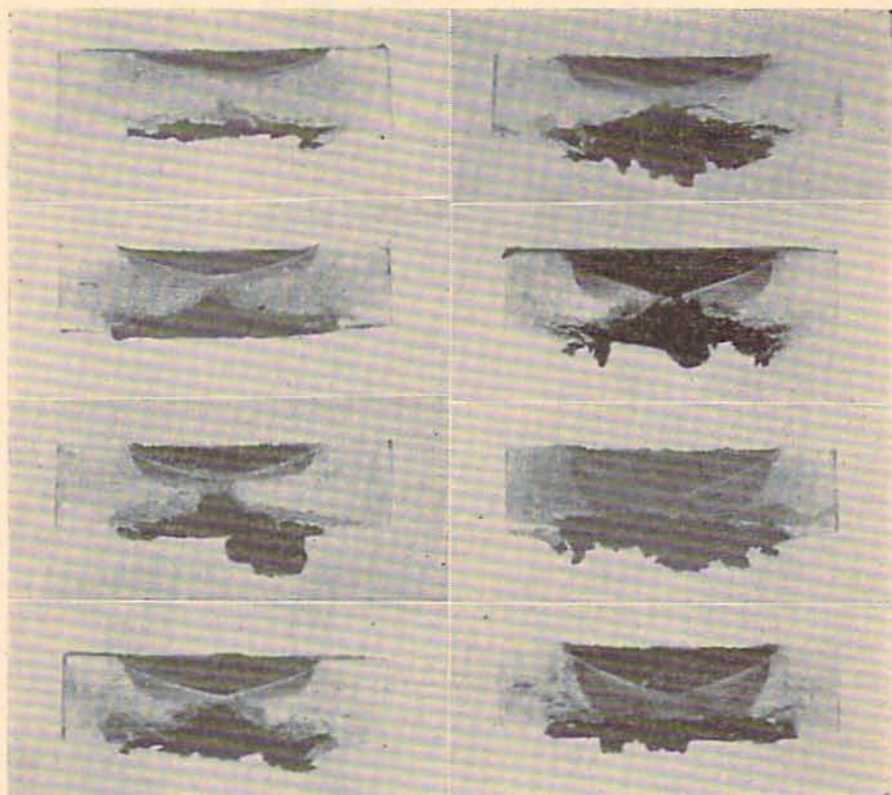


Photo. 2. Comparison of strain figures obtained from TNT with ones from RDX.



Photo. 3.



Photo. 4.

方向に対する回転が充分に起つてないことを示している。Cの部分は写真6に見られる如く、冷間加工の際に発生する繊維組織になつてゐるが、フライ試薬によつて直ちに黒化しない。

IV. 考 察

爆薬が直接接触していた上面部分が薬の周辺部を除

き0.5 mm位の深さで黒化してないことは爆轟熱の影響は無視してよいこと、したがつて温度上昇は均等に伴う発熱に由来することを示す。Zener²⁾は高速度の均り変形は断熱的に行われ、発熱を伴うことを述べている。黒化しない部分は肉眼的にはかなり明瞭であるが、顕微鏡観察では写真4より若干均りが少ない程度である。表面をよく研磨した軟鋼板を用いて実験した

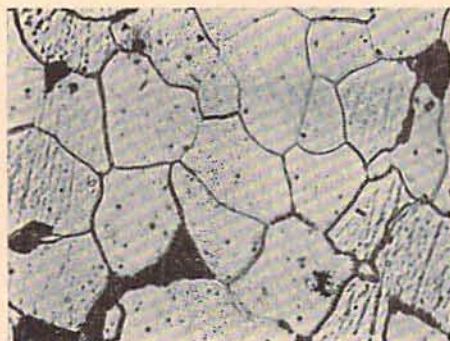


Photo. 5.



Photo. 6.

場合も同様の現象が見られる。最も大きな応力を受けると思われる爆薬との密着部分が上記の現象を示すことは、爆薬端面から衝動力が金属内に侵入する際の機構が打抜加工の場合と同様に考えてよいことを示す。この点については硬度の測定に基いて詳しく吟味したので稿を更めて述べる。

フライ試薬による黒化が短時間に現われることは注目し得る。普通の機械加工を受けた部分のフライ試薬による黒化が試料を $200\sim 250^{\circ}\text{C}$ で、30分程度焼戻しをした場合最も鋭敏に現われることはよく知られている。それゆえ本試料における半月形に黒化した部分は断熱的迂回変形により温度が 200°C 以上に上昇した部分を示すと思われる。而してフライ試薬に直ちに感ずる程に温度が上昇するためには写真4に見られる程度のはげしい迂回の急激な生起が必要であることが云われる。半月形になることは爆薬周縁部より内部に侵入した応力が迂回を起し易い方向の結晶を運らねて伝播するためである。軟鋼 ($0.15\sim 0.17\%$ C) はフェライト粒が多く、フライ試薬による歪痕を検出するには最適の材料であるが、炭素パーセント 0.5, 0.7の鋼についてもやはり黒化は同様に現われる。ただしこの場合の黒化は弱い。D. C. Pack³⁾, 桜井氏⁴⁾等は鉄材を中級爆薬で爆轟しても衝撃波あるいは高次塑性波は発生し難いこと、更にはまた 10 万気圧の衝撃波面が発生したとしてもその波面温度は 100°C 以下であろうと述べている。上記実験によれば爆薬に接する軟鋼内部のある範囲は 200°C を超える温度まで上昇すると推定される。D点における粒界の変形が著しいにも拘らずフライ試薬に不感感なのは、その速度がゆるやかに発生した熱量の蓄積がさして起らないためであると考えられる。

フライ試薬により黒化する部分の輪かくは肉眼的に極めて明瞭であるが、顕微鏡的にも写真3と4との遷

移はフェライト粒数個の巾で行われている。迂回変形による温度上昇が大きいためには、迂回が十分に急速にかつ極く多数行われなければならない。したがって輪かくが明瞭なことは、ある範囲で急速多数の迂回を起し得た応力が不連続的により低速少数の迂回しか起し得ない程度に弱まることを示していると考えられる。すなわち内部において応力の大きさ及び作用速度が不連続に変化する。桜井氏⁴⁾は一般に物体を爆轟衝撃した場合、弾性波領域、低次塑性領域、衝撃波領域及び高次塑性領域の四者が存在すべきことを述べている。顕微鏡的観察によつて認められる不連続と前記四形式との対応は簡単には決定し得ないが、鉄においても爆薬に接する極く短かい数ミリの距離内において内部に侵入した応力は不連続的に変化することが認められる。写真4に示される如き迂回が発生するとき、鉄材についても衝撃面からの距離によつて応力伝播速度に異状の生ずることを期待してもよいと思われる。

V. 総 括

軟鋼板に密着しておかれた TNT, RDX が鋼板にあたえた影響を金属組織学的に観察した。フライ試薬に対して敏感に現われる黒化の様式、及びフェライトに現われる迂回のはげしさの程度から下記事項を推定した。(1)黒化した部分の温度は少くとも 200°C には達していると思われる。この温度上昇は爆轟熱の伝導によつて起るものではなく、急速な多数の迂回が断熱的に起ることに起因する。(2)黒化する領域の輪かくが明瞭であることは、鉄材中に侵入した応力が不連続的に弱くなることを示す。

本報文の整理にあたり、種々有益なる助言を賜つた本校機械工学教室の今井彦太郎助教授に深謝する。なお本実験の一部は村田純一学生の協力を得た。

文 献

- 1) M. A. Cook: The Science of High Explosives, p.247 (1958)
 2) C. Zener: Progress in metal Physics Vol.

5, p. 34 (1954)

3) D. C. Pack, W. M. Evans and H. J. James: Proc. Phys. Soc. 60, 1 (1948)

4) 櫻井武尚: 工火誌 19, 95 (1958)

An Explosive Attack on Metals (I)

Strain Figures of Mild Steel Plates Attacked by Explosions

by Yōkan Nomura, Shōtaro Tobisawa and Tomoo Takahashi

Metallographic observations have been made on a deformation of mild steel plates on which explosives are detonated. The densities and detonation velocities of cylindrical charges of TNT and of RDX were 1.55g/cm³ and 8,000m/sec., and 1.50g/cm³ and 6,200m/sec., respectively.

(I) A strain figure appeared very sensitively on etching a cross section of a plate with Fry's reagent. As shown in Photo. 1, a strong strain caused by an explosive attack are restricted to a semilunar zone of which a well-defined boundary can be distinguished visually. This fact shows that a magnitude of stress becomes feeble discontinuously at the distance of several millimeters from an impact surface. In Photo. 2, strain figures obtained from TNT are compared with ones from RDX. A extension of strain figure is governed largely by a brisance or a detonation velocity. A strain figure could be obtained very easily without heat-treating specimen. On the other hand, it is a well-known fact that Fry's reagent is very active for a specimen annealed for about 30 minutes in the temperature range from 200°C, to 250°C. It can be, therefore, estimated that the temperature of the violent stressed zone would rise beyond 200°C., at least.

(2) Photographs of micro-structures of

grains were taken at the magnification of 600 by etching the specimen with 2 per cent nitric-alcohol solution. Photos. 3, 4 and 5 were obtained at regions A, B and C, designated in Photo. 1, respectively. Many slip bands in various directions are observed in grains at B and their abundance become countless at A. A severe grain flow in Photo. 4 is a well-known texture of steel subjected to a violent cold working, and is observed only in the narrow region close to a surface. On purpose of comparison, the grains of original metal are shown in Photo. 6. It is presumable that a velocity of propagation of stress generated within a mild steel under explosive attack has an abnormal spatial distribution, owing to a momentary occurrence of the slip characterized by Photo. 4.

(3) As seen distinctly in Photos. 1 and 2, the zone immediately above semilunar strain figure is less sensitive for Fry's reagent. This fact shows that a heat of explosion is scarcely effective to raise a temperature of the region below a explosive. Photo. 4 suggests that a rise of temperature in a semilunar strain figure is due to a momentary occurrence of violent slip, because such a slip can be accompanied by an adiabatic accumulation of heat due to a slip.

(Defence Academy)

第II報 軟鋼材料に生ずる亀裂

I. 結 言

本邦において、鉛を爆轟衝撃した場合の亀裂について松井氏の研究が本誌の随所に報じられている。また小銃弾を使用した場合の高速衝撃については蓮井氏¹⁾の報文がある。いわゆる Scabbing については Rinehart²⁾の詳細は研究がある。亀裂の問題はいわゆる組織敏感現象であるばかりでなく、また被爆材料の形状や装填状態によっても異なるゆえ、出来るだけ多くの実験例を集積することが望ましい。成型薬の爆轟による軟鋼破壊について二種類の実験を行ったが、その際に見出された亀裂について述べる。

亀裂の現象については熱処理による差異はあり得るが、この点を明らかにする実験としては熱処理の影響の大きな特殊鋼を用いる方が好ましい。本実験では手初めとして市販の軟鋼材をそのまま使用した。薬及び雷管に関する事項は前報と同様である。

II. 軟鋼円柱内に円柱薬をおいた場合

図1に示される如き状態で爆轟を行った。薬量はRDX, TNTともに10gである。爆発後の破片を集めて復元すると図2の如くなる。斜線を施した部分を切り出して試料とした。写真1に示される如く、RDXの場合には亀裂が多いがTNTでははるかに少く、破壊力の差が明瞭である。亀裂は中間層に発生する傾向

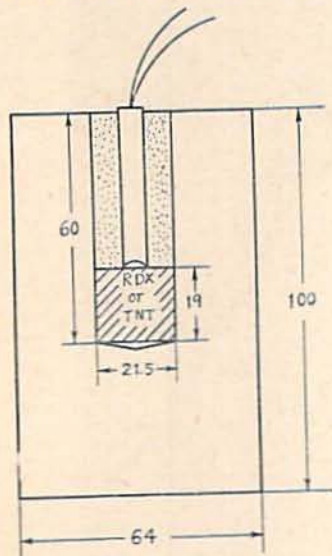


Fig. 1. An internally loaded cylinder of mild steel with explosives (in mm unit).

がある。亀裂は水平方向に放射状に存在し、垂直方向には発達していない。爆薬に接した内縁部と外縁部との組織は、RDX と TNT とにおいてそれぞれ類似している。内縁部には多数多方向のむり発生が見られ

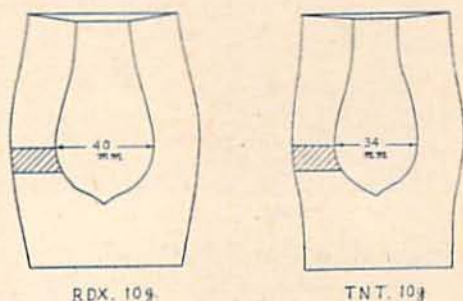
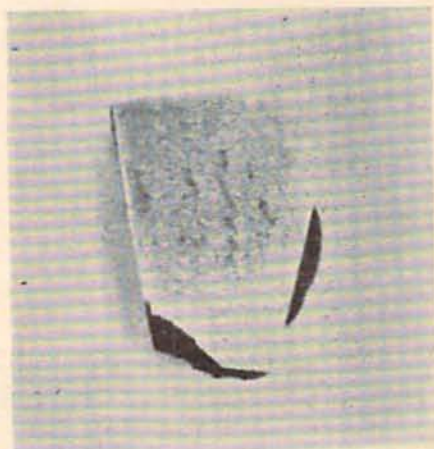


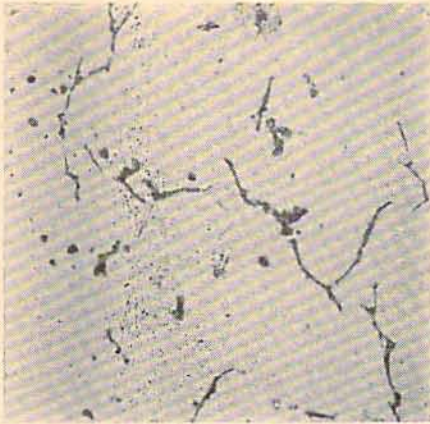
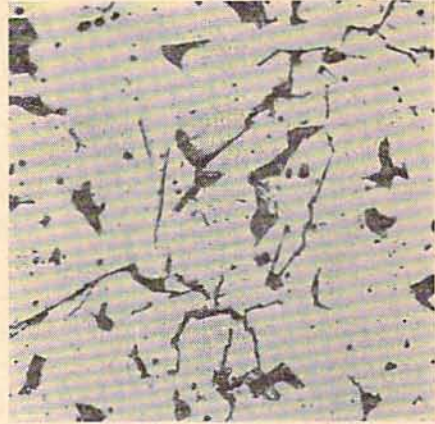
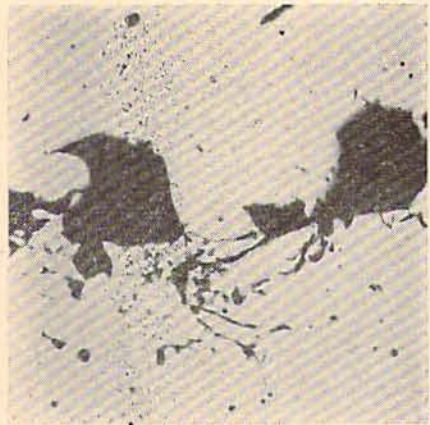
Fig. 2.



TNT



RDX
Photo. 1. $\times 1.5$

Photo. 2. $\times 200$ Photo. 4. $\times 200$ Photo. 3. $\times 200$

かつフェライト粒界もかなり変形している。外縁部における組織は常態に近いが、これは中間部位に発生した亀裂により応力が弱まったためと思われる。

以下RDXの場合について、亀裂の検鏡を行った結果を述べる。先づ亀裂の状態を示すと写真2、写真3の如き部分を見出し得る。2%ピクリン酸-アルコール液で腐蝕すると写真4の如くである。蓮井氏¹⁾は秒速300 m/sec.の小銃弾で軟鋼を貫徹した場合について、亀裂がパーライトを選択的に連ねている状態の写真を提出している。写真4において亀裂がパーライトを横切っている箇所もあるが、本実験の場合においては亀裂の分布と、パーライトとは特に関係があるとは云えない。

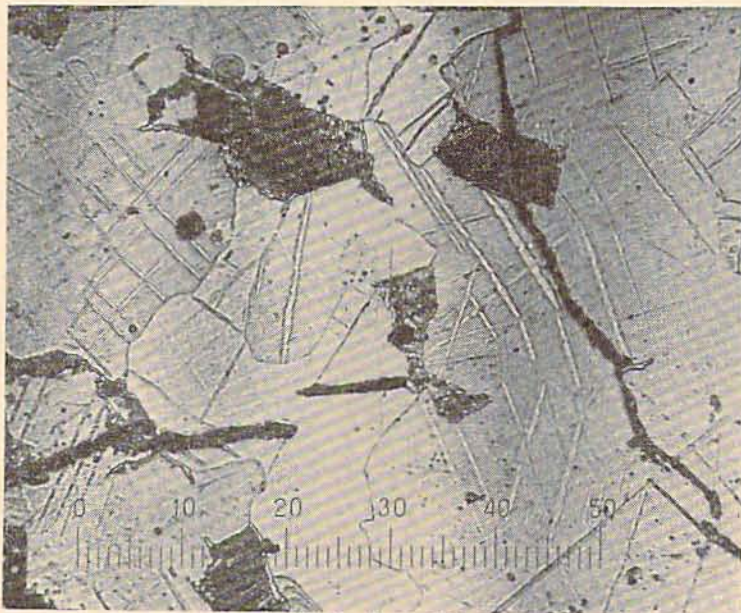
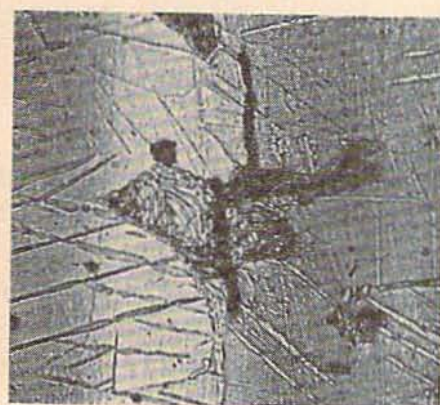
Photo. 5. $\times 280$

Photo. 6. $\times 200$ Photo. 7. $\times 200$

2% 硝酸—アルコールで腐蝕した場合の例として、写真 5~7 を示すが、この他にも観察した多くの写真から以下のことが云われる。フェライト粒内破断が最も多いが、上記の如く、パーライトも亀裂を生ずる場合は粒内に生じていることが多い。その生じかたは各個独立である。すなわち、各亀裂は巾 $1/200$ mm、長さ $1/20$ mm 程度の棒状に発生しており、これが多数発生すれば連続亀裂、あるいは網状亀裂の様相を呈し

て来る。この種の亀裂がフェライトに生ずるときは、そのフェライトに数え得る程度の回り帯が発生しているが、その回り帯の方向と亀裂の方向との間には特に関係は認められない。同じ軟鋼でも炭素含量、パーライト粒界の大小、不純物の析出状態等の組織上の差異があり、かつ衝撃方法が異なれば、亀裂の生じかたも千差万別と思われる。要はパーライト、フェライトを問わず、さらに粒内、粒界を問わず衝撃に対して弱い点が偶然に潜在しており、この点を起点として亀裂が発生すると考えるべきであろう。ここに述べた例も千差万別であろう亀裂の一つの様相と見るべきものである。

III. 軟鋼板上に円錐空洞を有する成型薬をおいた場合

衝撃圧とその作用速度を高めるため、円柱薬の代りに円錐空洞を有する薬を使用することを試みた。この場合には鋼板の厚さと薬量との兼ねにより不貫徹の穿孔に終る場合から、完全な貫徹孔を生ずる場合まで種々の状態が得られる。以下例として述べるのは、薬量 10 g、径 21 mm、円錐角 45 度の RDX (比重 1.55) を用いて得た不貫徹孔の場合であつて、写真 8 は凹型孔の底部より得たものである。写真 8 と類似の状態は他の例においても常に見出し得る。写真 8 において、亀裂及び組織の流れの複雑な模様が見られ、顕微鏡的な大きさにおいて、多方向のかつ大きさの異なる応力の作用していることがわかる。これらの写真において一様にせまい巾を有する長い亀裂は特に注目し得る。写真中に附加されたスケール最小 1 目盛は $1/140$ mm であるゆえ、上記亀裂の巾は約 $1/1000$ mm である。パーライトと特に関係のないことは高倍率観察から云われる。この狭巾亀裂は、流れの異なる組織の会

Photo. 8. $\times 140$

合部に見られることもあり、あるいは方向の同じ流れの組織中に生じていることもある。それゆえ異なつた方向の応力による塑性変形が衝突する部分に狭巾亀裂が生ずるとしては説明し得ない。また一方クサビを打ち込む場合の如く、最初に大きな亀裂が生じその先端に応力が集中し、根幹よりも細い亀裂が伸長することによつて上記の狭巾亀裂が生じたものとも思われぬ。ここで取り扱つた試料はどれも飛散すべきものは飛散した残りであるが、飛散は狭巾亀裂を界として剝離的に起るべきものと思われる。したがつて巾の大きい長い亀裂は最初に生じた狭巾亀裂が、飛散を起さない程度に二次的に拡大することによつて生ずるものと見るべきであろう。加うるにこの狭巾亀裂は、本性的に脆性破壊を起すガラス、あるいは松脂等に生ずる亀裂を想わせるものがある。したがつて、上記の狭少亀裂は脆性破壊の行われたことを示すものと考えたい。

写真8は、塑性変形を示している部分にはそれを起す程度の作用速度と大きさの応力が作用したことかつ塑性変形の著しい領域がかえつて内部に存在していることを示している。これらの事柄は、急速巨大応力により脆性破壊が行われた後に再び応力の到来により塑性変形を起す場合、あるいは逆に、塑性変形を起して硬化したところにさらに急速巨大応力が到来して脆性破壊を起す場合等を考えなければならぬことを示すものである。すなわち本実験の条件下で穿孔が行われる過程において応力の作用回数が一回に限らないものと見るべきであろう。

IV. 亀裂の分枝について

蓮井氏は軟鋼について枝分かれを認めたことを報じている。しかし塑性に富む金属に生じた亀裂が枝分かれを起すか否かは未だ充分明らかでないと思ふべきであろう。ガラス、あるいは松脂について行い得る如き、一点に打撃をあたえて発生した亀裂が伸びつつ枝分かれをするか否かの実験は、金属については行い難

い。金属を爆轟衝撃した場合、最後の亀裂の形態は観察し得るが形態から亀裂進行の過程を推定することは余程特別な形態ででもない限り不可能なことであろう。写真2~4に見られる亀裂は、一見した場合枝分かれをしている如く思われるのであるが、写真5~7によれば多数個の粒内に各個に発生した剝離的空隙と見るべきであろう。写真3における如く、大きな空隙を見得る場合もあるが、これについては、上記の剝離が全体破壊の際二次的に拡大して生ずる場合、あるいはまた試料の切断、研磨の際粒界剝離の完全なものが集団で脱落することによつて生ずる場合もあり得るものと思われる。写真8においても、形の上では一応枝分かれを認めることが出来るけれども、別々に生じた亀裂が交叉したのか、枝分かれたために交叉しているのかを区別することは困難である。

V. 総 括

軟鋼材料に密着しておかれた炸薬の爆轟による亀裂の形態を顕微鏡で観察し、性質の明かに異なる二つの亀裂の例を述べた。(1)フェライト、パーライトの両者に対して粒内に起る短い亀裂がある。巾は1/200 mm、一ケの長さは平均1/20 mm程度である。これは各個に生ずるが、多数生ずるときに全体としては網状に見える。(2)他は1/1000 mm以下の巾を有する長い亀裂である。この狭巾亀裂の存在は応力の大きさ及びその作用速度が充分大きいとき鉄材に脆性破壊が起つたことを示すと考えた。(3)見掛上亀裂の分枝を見出し得るが、亀裂の伸展による枝分かれであるかどうかの判定は困難である。

本報文の整理にあたり、種々有益なる助言を賜つた本校機械工学教室の今井彦太郎助教授に深謝する。

文 献

- 1) 蓮井淳: 応用物理 25, 108, (1956)
- 2) J. S. Rinehart: J. Appl. Phys. 22, 555 (1951) 23, 1,229 (1952)

Explosive Attack on Metals. (II)

Cracks in a Mild Steel Attacked by an Explosion

By Yōkan Nomura, Shōtaro Tobisawa and Tomoo Takahashi

Microscopic examinations have been made on a crack in a mild steel attacked by an explosion. There are two types among cracks of specimens obtained under different conditions.

(1) Explosion was carried out under a condition illustrated in Fig. 1. A weight and density of cylindrical charge of TNT were 10g. and $1.50\text{g}/\text{cm}^3$, respectively, and those of charge of RDX are 10g. and $1.55\text{g}/\text{cm}^3$. Fig. 2 shows the forms, fragments of which were returned to their original seats, and specimens were obtained from the zone marked by the oblique lines. As shown in Photo. 1, cracks develop in the middle region of the wall.

Photos. 2 and 3 show cracks of a specimen attacked by RDX. Photo. 4 shows cracks obtained by etching a specimen with 2 per cent picric acid-alcohol solution, and shows that there is no close connection between a crack-formation and a grain of pearlite. Photos. 5~7 show cracks obtained by etching a specimen with 2 per cent nitric-alcohol solution to observe the relation between a crack-formation and a grain of ferrite. From Photos. 5~7, the authors can find the one type of crack of which features are as follows: a crack is rather apt to occur independently within each grain of ferrite or of pearlite, and the length and width of

each crack are ca. $1/20\text{mm.}$ and $1/200\text{mm.}$, respectively. If an abundance of the independent cracks reaches to some extent, the independent cracks connect one another to form a network of crack.

(2) In order to attack a mild steel plate with high-intensity stress, an explosive charge with a unlined-cavity was placed on it. In Fig. 8 an example is given. The figure of cracks and texture indicate that the specimen was attacked with stresses of various magnitudes and directions. These cracks are long and narrow, ca. $1/1,000\text{mm.}$ in width. The type of them is different from that mentioned above. This crack could be observed on many specimens obtained under the condition mentioned above. It is presumable that a brittle-fracture occurs in a mild steel by attacking with a high-intensity explosion.

(3) It has been not sufficiently established, whether a branching of crack in a plastic metal occurs or not. Cracks observed in Photos. 2~4 shows a branching at a glance, but it must be emphasized from Photos. 5~7 that the crack-formation takes place independently. Although in Photo. 8 branchings are also recognized at a glance, it is difficult to decide whether branchings occur actually or crossing of an independently generated cracks take place.

(Defence Academy)