金属破断面の電子顕微鏡による研究 (II)* 鉄合金の破断面

若島久男** 上村 信*** 高橋 求****

Hisao Wakashima, Shin Uemura, Motomu Takahashi : On the Study of Microstructure of Fracture of Metals by Electron Microscopy (II). On the Fractured Surfaces of Steel.

The fractured surfaces of steel were studied electron-microscopically, using the replica technique described in the previous report. (part 1)

The fractured surfaces of ductile materials such as pure iron and low carbon steel consist of small domains whose dimensions are 1~10 μ in diameter. The boundary of this domain may correspond to the microcrack which is at first induced in the material in the process of fracture. On the contrary, the fractured surfaces of mild steel after fatigue test contain many streaks of crack originating from grain boundaries. Brittle materials such as high carbon steel or quenched Ni-Cr steel have very flat fractured surfaces, and the domains in these surfaces are larger than those of ductile materials. The mechanisms of fracture in brittle materials are unknown unless the relation between the fractured surfaces and the structure are completely investigated.

(Received May 31, 1954)

I. 緒 言

本報では第1報に述べたレプリカ法により、炭素鋼、特殊鋼の破断面を電子顕微鏡により観察した結果を報告する。この方面の研究は Al-press-replica 法による Mähli⁽¹⁾の研究があり、彼は破断面は 1 μ 程までの単位から成り、その内部構造は腐蝕組織に似ていることを認めた。その後 J. Nutting および V. E. Cosslett⁽²⁾は珪素鋼、軟鋼、純鐵、Ni-Cr 鋼などについて同じ方法で調べた。山本⁽³⁾等はやはり Al-press replica 法により金属表面の研

小野⁽⁴⁾はそれぞれ Al および炭素鋼の疲労破断面を普通のメチル・メタクリル Al 法で調べている。

II. 実験方法その他

レプリカ作製については第1報に報告した通りである。たゞし鑄造には酸溶解法を適用出来ないでエチル・メタクリル樹脂による高温プレスにより破面の型をとった。しかしこの方法は非常に不確実で信頼度が低いので本報告では述べない。

この実験に使用した材料は Table 1 に示す通りで、純鐵、低、中、高炭素鋼、Ni-Cr 鋼である。破断方法は主

Table 1

Materials	Tensile strength kg/mm ²	Elongation %	Hardness H _{RB}	Treatment	Remark
Pure iron	—	—	34.0	Heated in H ₂ at 1300°	—
Low-carbon steel	41.14	27.6	74.9	Anneal	0.1 % C
Medium-carbon steel	55.38	16.0	90.0	"	0.4 % C
High-carbon steel	—	—	98.2	"	1.1 % C
Cast steel	51.5	31.2	81.2	"	0.23 % C 0.28 % Si
Ni-Cr steel	89.7	18.2	H _B 269	Oil-quenched at 850°, tempered at 600°	SNC80 Charpy test values 14kg-m/mm ² after cooling 7kg-m/mm ² after cooling.

究を行ったが、破断面についてはふれていない。なお谷、

として引張破壊によつたが衝撃および疲労、破壊などについても少しく実験した。

III. 実験結果

1. 純鐵および低炭素鋼

純鐵および低炭素鋼の引張破断面は何れも同じ様相を呈し、たゞ純鐵は軟いために伸びが幾分多いように認められる。低炭素鋼の引張破断面は通常見られる cup and cone

(4) 谷, 小野, J. Electron-Microscopy, Japan, 2(1954), No. 1.

** 金澤大學工學部 *** 富士電機株式会社

**** 芝浦機械製作所

* 1953 年秋季應用物理學會及び 1954 年 4 月本會東京大會に發表。

(1) H. Mähli, Metalforschung, 2 (1947), 186.

(2) J. Nutting & V. E. Cosslett, Nature, (1950), 165.

(3) 山本, 藤田, 本誌, A 15 (1951), 416.

状を呈し、Photo. 1 はその外縁部の shear 断面の、Photo. 2 は中央部の平坦な tension 断面の電顕写真で何

Photo. 1 Fracture by shear in tensile test of 0.1 % C steel.

Photo. 2 Fracture by tensile strain in tensile test of 0.1 % C steel

Photo. 3 Fracture in Charpy's impact test of 0.1 % C steel.

ともその破面は $1\sim 10\mu$ 程度の単位からなっている。立體觀察によれば各境界の内部はそれぞれ引張方向に突出しておりその先端は尖っている。従つて破断はまず単位粒の境界に micro-crack が発生しその内部の軟い部分が塑性變形を生じ、次第に細くなり遂に分離するものと考えられる。この粒界がその大きさから考えて結晶粒界と一致しないことは結晶粒の大きさが $30\sim 50\mu$ の程度であることから推定出来る。しかし後述の中炭素鋼に関する實驗から、この最初に micro-crack の発生する部分は格子欠陥のあるところと考えられるから、結晶粒界も最初の crack の発生には大いに関係あるものと思われる。shear 断面と引張断面とはたゞ粘性變形の方向が前者は張力方向、後者は剪断力方向というだけ本質的の差異はない。なお粘性變形の突端部には小さい凹部、凸部が認められるが、この部分はおそらく最後に分離した部分で微少な cup and cone 状をなすものである。

Photo. 3 は低炭素鋼のシャルピー衝撃破断面で、その破断面の外貌はいわゆる靱性破面で電顕像も引張の場合と

よく似た粘性變形が認められる。破面は引張試験の shear 破断面によく似ているが、變形の先端は尖つていず直線状

Photo. 4 Fracture in torsion test of 0.1 % C steel.

Photo. 5 Fracture in bending fatigue test of 0.1 % C steel.

Photo. 6 Fracture in tensile test of normalized 0.4 % carbon steel.

たと思われる無数の條痕が認められる。この疲労破断については最近谷および小野の考察がある。

2. 中炭素鋼

Photo. 6 および 7 は 0.4 % C 鋼のそれぞれ焼ならし状態および焼入、焼戻状態の引張破断面を示し、前者は低炭素鋼と同じく大きい變形単位から出来ているが後者では

をなしている。すなわち衝撃破断では前方への十分の伸びが許されず、側方へ伸びるためと考えられる。

Photo. 4

は低炭素鋼の振り試験破断面の電顕写真で、その表面は非常に平滑であるが非常に伸びた流動變形の跡が認められる。振り破断においても引張の場合と同じく、まず micro-crack が発生しその内部が流動變形を起すものと考えられる。

Photo. 5

は低炭素鋼の屈曲疲労破断面で、前述の引張、振り衝撃の場合とは全く異なる破面の様相を呈し、ほとんど粘性變形の跡が求められない。粒界と思われる所から破断が進行し

大部分 1μ 程度の小さい変形単位からなっている。これは焼入、焼戻 (500°) 状態では結晶粒内に微小な炭化物が分散析出しているため、microcrack も分散発生するため変形単位が小さくなるものと考えられる。またこのことから microcrack はまず格子欠陥のあるところから発生するだろうことが想像出来る。

Photo. 7 Fracture in tensile test of quenched and tempered 0.4% C steel.

Photo. 8 Fracture in tensile test of 1.1% C steel.

Photo. 9 Fracture in tensile test of cast steel.

大きい粘性變形は起り得ずいわゆる脆性破面を呈する。平坦な部分の破壊機構は軟鋼とは異なると思われるが今後の研究にまたねばならぬ。

4. 鑄 鋼

Photo. 9 および 10 はそれぞれ鑄鋼 (0.23% C) の引張および衝撃破面である。何れも処理は焼ならし状態、引張破断面は shear 断面を呈しその電顕寫眞も軟鋼のそれに似ている。しかし衝撃破面は軟鋼と異なり、いわゆる脆性

破面を呈し灰白色で伸びも少い。その電顕像は軟鋼の場合によく似た伸びた大きい部分と微小な伸びが階段状に集つ

Photo. 10 Fracture in Charpy's impact test of cast steel.

Photo. 11 Fracture in tensile test of quenched Ni-Cr steel.

Photo. 12 Fracture in Charpy's impact test of water-cooled after tempering

けるような粘性變形を示す部分もある。焼戻したものについては寫眞を示さなかつたが、 0.4% 炭素鋼の焼戻した場合の破断面によく似た非常に小さい 1μ 程度の大きさの単位粒が認められる。Ni-Cr 鋼の場合には溶解残滓が多いため寫眞は非常に汚い。

Photo. 12, 13 は同じ Ni-Cr 鋼の衝撃破面で何れも 850° 焼入、 600° 焼戻であるが、後者は焼戻後鹽浴して焼

ている部分からなっている。この階段状の部分は衝撃破壊の起點となる部分が多いため、一つの起點から発生した流動變形が長く続かないで、次々と新しい起點からの破壊が起るためこのように階段状を呈するものと考えられる。この階段状の部分が脆性破壊の特徴と考えられるが今後十分な検討が必要である。

5. Ni-Cr 鋼

Photo. 11

は構造用 Ni-Cr 鋼の焼入状態の引張破断面の電顕像である。焼入れたものの引張破断面は Photo. 11 から明らかなように平坦な広い領域からなっている。しかし所によつては軟鋼にお

戻脆性を起さしてある。焼戻後急冷した材料は Photo. 12 に示す如く靱性材料に共通な流動變形が認められるが、脆

Photo. 13 Fracture in Charpy's impact test of Ni-Cr steel slow-cooled after tempering.

性材料は Photo. 13 からわかるように伸びの少ない平坦な破面が見受けられる。

IV. 結論

以上鋼の破断面の電子顕微鏡像から得られた結果を要約すると次

のようになる。

(1) 純鐵、炭素鋼、Ni-Cr 鋼などでいわゆる靱性破断をするものの破断面は $1\sim 10\ \mu$ 程度の単位からなり、その

内部の軟質部が流動變形をなす。

(2) 焼入、焼戻した組織の密なものは単位粒が小さいことから考えて、上の単位粒の境界は材料の欠陥部で最初に microcrack が発生したところと考えられる。

(3) 鑄鋼の如く引張では靱性破断を生ずるが、衝撃では脆性破断をするものでは衝撃破面に階段状の變形の跡が認められるのが靱性材料のそれと異なっている。その原因については明らかでない。

(4) Ni-Cr 鋼の焼戻脆性を起したものの衝撃破面は鑄鋼のそれと異なり、變形の少ない平坦な部分が認められ、脆性の原因が鑄鋼などの場合と異なるように思われるが、今後の研究にまつべき点である。著者の研究はなお初歩の段階にあるが、今後さらに replica 法の改良による破面の微細構造の検討、microcrack の確認、單結晶破断面の観察などにより金属の破断機構究明に有用な手段となるであろう。

最後に本實驗實施に當り種々の便宜を與えられ、また貴重な材料をいただいた本學細井助教授、柴原助教授に深謝し、また熱心に實驗に當られた西田君の勞を多とします。