

0.4% C 炭素鋼の凝固組織と機械的性質の関係について

大 島 聡 範*
林 忠 夫**

Relationship between Solidification Structure and Mechanical Properties of 0.4% C Steel.

Toshinori ŌSHIMA
Tadao HAYASHI

要 旨

0.4% 炭素鋼について、凝固組織としてのデンドライトの大きさが、機械的性質に及ぼす影響を調べた結果、デンドライトの微細なものは、粗大なものにくらべて、強度、延性および靱性のいずれについても優れていることが認められた。

Synopsis

The effect of dendritic structure on the mechanical properties of steel have been examined. It was proved that the finer dendritic structure has better effect on the ductility, toughness and strength of steel than the coarse one.

I 緒 言

炭素鋼の組織と機械的性質の関連性については、多くの報告があるが、凝固組織との関係について検討したものは少ない。しかし、一般に、凝固組織の微細なものは機械的性質がすぐれている、という経験的事実もあって、造塊、鑄造等の工程では、凝固組織を制御し、微細化することが重要な条件となっている。凝固組織の代表的なものはデンドライトであり、その形態と機械的性質の関連性が注目される。しかし、中炭素鋼では、包晶反応による δ 凝固を伴なうこと、および、 A_1 、 A_3 変態を経ることなどにより、機械的性質に密接な関係のあるオーステナイト結晶粒その他の、二次的な組織と初晶デンドライトの形態との関係は複雑であり、不明の点が多い。本研究は、このような問題に対するアプローチの方法の一つとして、デンドライト形態の異なる鋼について、機械的性質の評価ならびに比較検討を行ない、若干の考察を加えたものである。

II 試料および実験方法

本実験では、デンドライト組織の粗大なものと微細なものについて、デンドライトアームスペーシングを指標として両者を比較してゆく方法を行なった。デンドライトの大きさをコントロールするには、種々の方法があるが、特殊な元素の添加や、冷却速度の制御は、鑄塊の本質的な性質に影響を与えることが懸念されたので、溶湯の凝固過程に機械的攪拌を与える方法⁽¹⁾⁽²⁾を採用した。溶解は高周波電気炉で 1 charge 30kg の S45C 鋼材に黒鉛 50gr、フェロシリコン 100gr、Al 10gr を添加した。鑄型は乾燥砂型で、予熱温度 800~900°C である。鑄込温度は 1600±10°C、注湯後約 30 sec で攪拌開始、約 150~200 sec にわたって攪拌を行なった。また、普通静止凝固については、鑄込温度、予熱温度ともに攪拌凝固と同様である。鑄塊の寸法形状を図 1 に、化学成分を表 1 に示す。これを縦割りにして、厚さ 15~25 mm の板状ブロックを切り出し、Stead 氏液によりデンドライト組織を観察した。写真 1 の (a) および (b) にそれを示す。静止凝固は、チル晶から柱状晶、等軸晶へと移行する典型

* 助教授 機械工学科

** 技官 機械工学科

的な凝固組織である。これに対して、攪拌凝固は柱状晶が形成されず、全体が微細な等軸晶となって、攪拌によるデンドライトの微細化が達成されたことがわかる。両者のデンドライト間スペースは、平均値で、静止が $d_c=0.76\text{ mm}$ 攪拌が $d_s=0.28\text{ mm}$ で

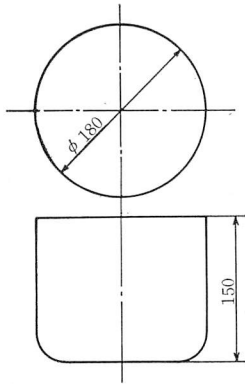


図 1 鋼塊の形状と寸法

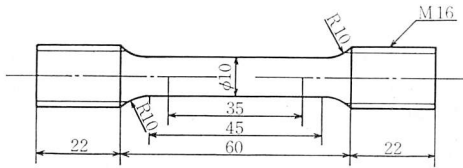


図 2 引張試験片の寸法と形状

あり、前者は粗大、後者は微細となって、対照的な凝固組織を示した。つぎに、両者の等軸晶および柱状部分から機械加工によって各種試験片を製作し、表 2 に示す熱処理を行なったのち、引張試験、衝撃試験、硬さ試験により、機械的性質を測定した。引張試験片の形状寸法は図 2 に示す。衝撃試験はシャルピー 4 号試験片で、 $100\sim-77^\circ\text{C}$ における遷移温度曲線を求めた。熱処理材の機械的性質の評価にあたっては焼入性を考慮する必要があるので、L 型ジョミニー試験片による焼入性試験も行なった。また、凝固組織と熱間加工組織を比較する意味で、熱間鍛造を行なった試料

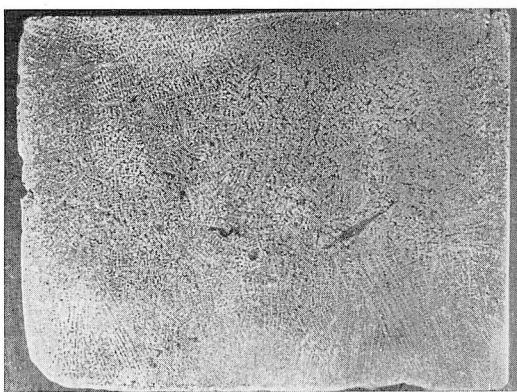
表 1 試料の化学成分 ($w_i\%$)

	C	S_i	M_n	P	S
静止材	0.42	0.393	0.40	0.022	0.016
攪拌材	0.39	0.68	0.44	0.020	0.017

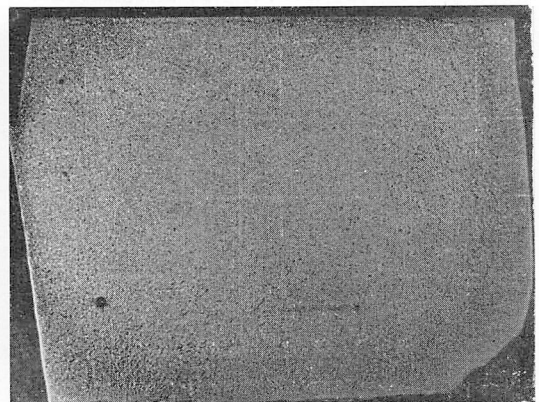
表 2 試験片の熱処理

焼 鈍	$820^\circ\text{C}\times 1h_r$ F.C
	$1050^\circ\text{C}\times 1h_r$ F.C
調 質	$850^\circ\text{C}\times 1h_r$ W.Q, $650^\circ\text{C}\times 1h_r$ W.C
	$850^\circ\text{C}\times 1h_r$ O.Q, $650^\circ\text{C}\times 1h_r$ W.C

についても前述の各種試験を行なった。鍛造材の素材寸法は $25\times 25\text{ mm}^2$ 角で、これを 1200°C 加熱後スプリングハンマーで $13\times 13\text{ mm}^2$ 角に鍛造した。鍛造比は約 4、鍛造終了温度は 800°C である。



(a) 静止凝固材のマクロ組織
 $\times 1.5$



(b) 攪拌凝固材のマクロ組織
 $\times 1.5$

写真 1 鋳鋼の凝固組織

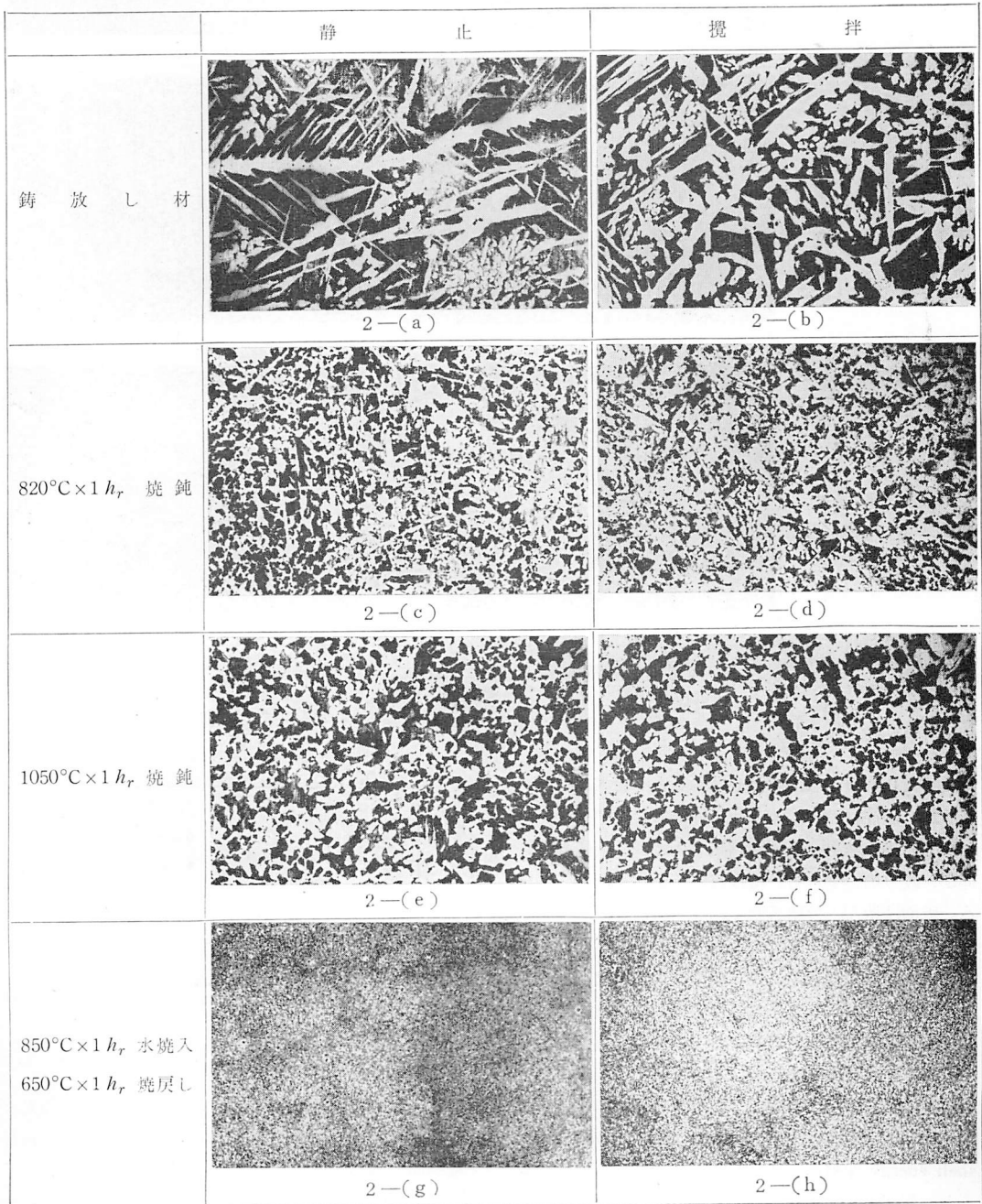
III 実験結果および考察

III・1 鋳放し材

写真2の(a)および(b)に鋳放し状態のマイクロ組織を示す。静止、攪拌の両者とも、粗大な Wiedmanstätten 組織であり、攪拌材がやや微細であるように見えるが、それほど明らかなものではない。ただ、一次晶

デンドライトを取りかこむ形で存在するフェライト境界は、デンドライト形態の大小と一致し、その意味では、攪拌材の方が微細であるといえる。

図3はシャルピー衝撃試験の結果である。試験温度全域にわたって両者の差は極めて小さく、攪拌材の硬度が静止材の硬度が静止材よりも $10H_v$ ほど高いことを考慮すれば、実質的には両者の差はほとんどないも



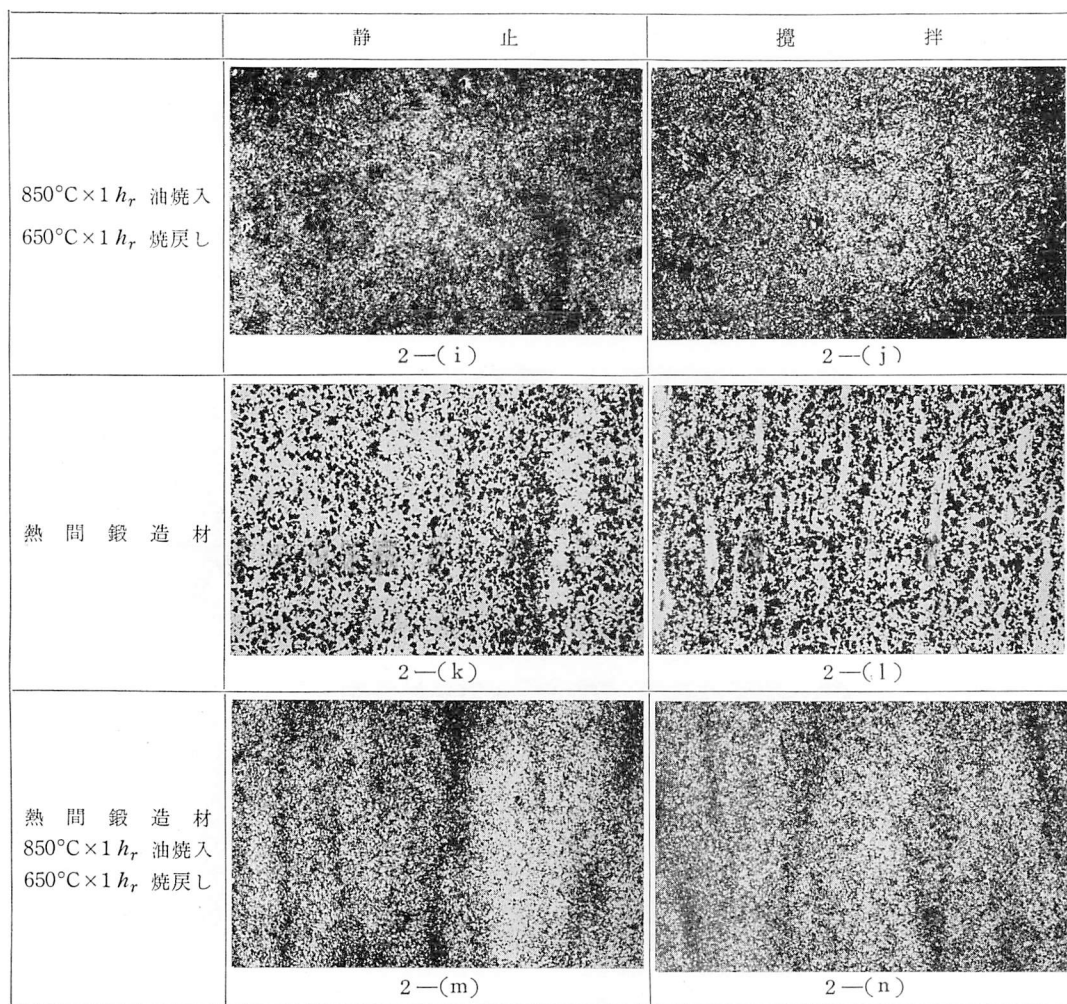


写真 2 各熱処理状態における顕微鏡組織
×60

のと考えられる。破面の外観は両者とも粗大な粒状であるが、攪拌材の方がやや微細であった。

引張試験の結果は、表 3 に示すように、引張強さ、伸び、絞りのいずれも、攪拌材が静止材を上回っている。破面は殆んど分離破断であり、攪拌の方がやや微細であった。

鋳鋼の破面における、へき開面の大きさは、フェライト粒の長さとの 1 対 1 の対応があり、フェライト粒の長さと衝撃値は反比例の関係があるという報告もあるが⁽³⁾、本実験の結果からは、あまり判然としなかった。図 4、5 および 6 は、各熱処理状態における引張強さを基準として、伸び、絞り、衝撃試験の upper shelf energy を整理して示したものである。これで見ると、強度、延性ともに攪拌材は静止材よりもややす

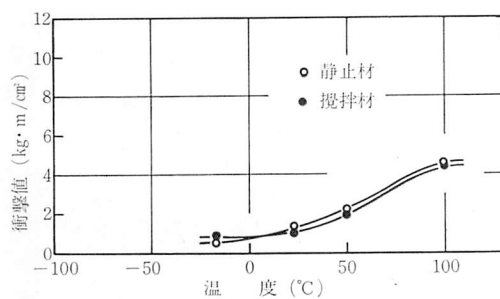


図 3 鋳放し材の衝撃値と温度との関係

ぐれていることがわかる。結局、デンドライトの大きさが鋳放材に及ぼす影響は引張強さと伸びにあらわれ、衝撃値については引張強さとの関係によって決ってくるものと考えられる。

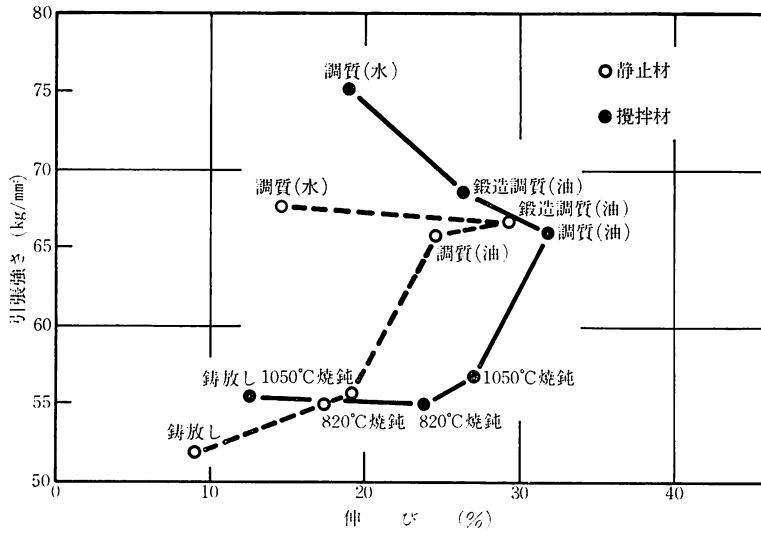


図 4 引張強さと伸びの関係

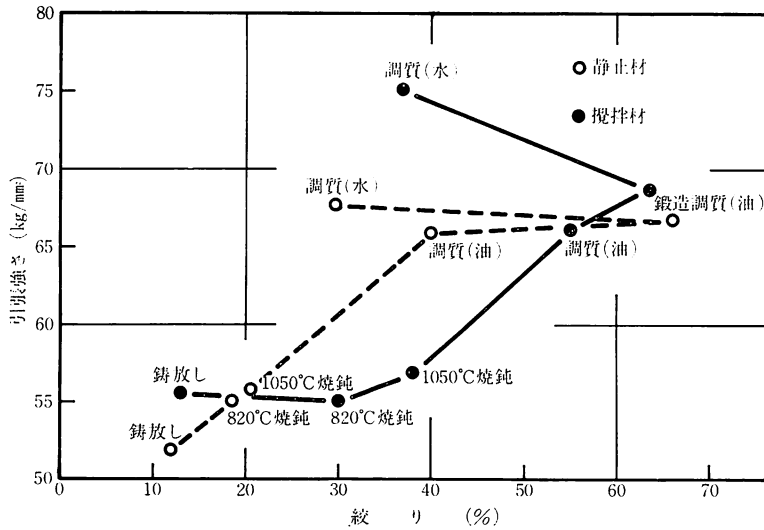


図 5 引張強さと絞りの関係

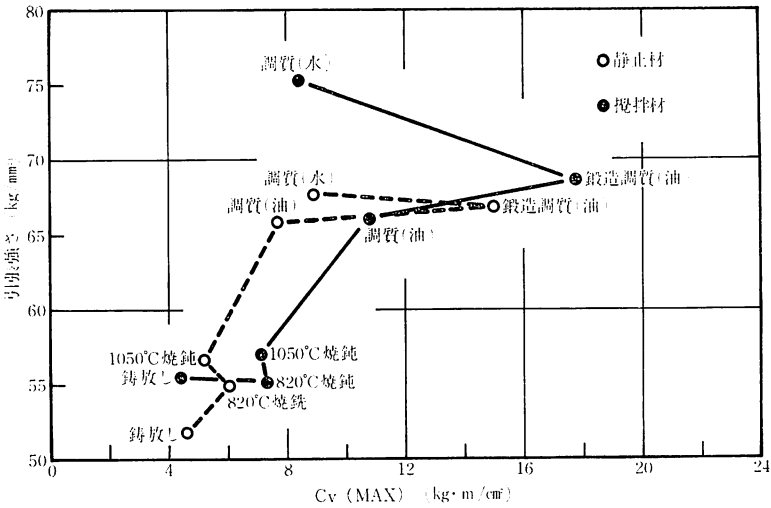


図 6 引張強さと upper shelf energy C_v (MAX) の関係

表 3 引張試験結果

熱 処 理	素 材	引張強さ kg/mm ²	伸 び %	絞 り %
鑄 放 し	静 止	51.8	8.9	12.1
	攪 拌	55.5	12.5	13.2
820℃ 焼 鈍	静 止	55.0	17.3	18.6
	攪 拌	54.9	23.8	30.2
1050℃ 焼鈍	静 止	55.7	19.1	20.3
	攪 拌	56.9	26.8	38.0
850℃ 油焼入 650℃ 焼戻し	静 止	65.8	24.5	38.9
	攪 拌	66.0	31.7	54.9
850℃ 水焼入 650℃ 焼戻し	静 止	67.6	14.5	29.8
	攪 拌	75.2	18.9	37.1
鍛 造 820℃ 油焼入 650℃ 焼戻し	静 止	67.1	29.3	66.2
	攪 拌	68.6	26.3	63.6

III・2 焼 鈍 材

写真 2 の (c) (d) (e) (f) に焼鈍状態のミクロ組織を示す。pearlite patch の分布形態において、攪拌材

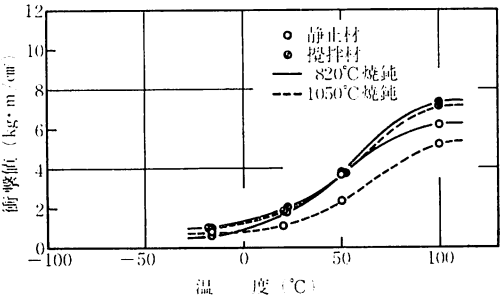


図 7 焼鈍材の衝撃値と温度との関係

の方がやや微細で均一であるが、それ以外では特に目立った相違はない。これは 820℃、1050℃ のいずれについても同様である。なお、マクロ腐食によるデンドライトは、鑄放し状態とほとんど変わらず、明瞭に出現した。

図 7 は焼鈍材の衝撃試験結果である。鑄放し材とくらべて、静止、攪拌ともに靱性は大きくなっているが 820℃ 焼鈍の upper shelf energy は攪拌材が静止材よりも大きくなっており、1050℃ 焼鈍では、全温度域にわたって、攪拌材が静止材よりも大きい。これはデンドライト形態の相違が、オーステナイト粒度に関係していること、すなわち、粗大デンドライトの静止材のほうが、オーステナイト粒が粗大化しやすいこと

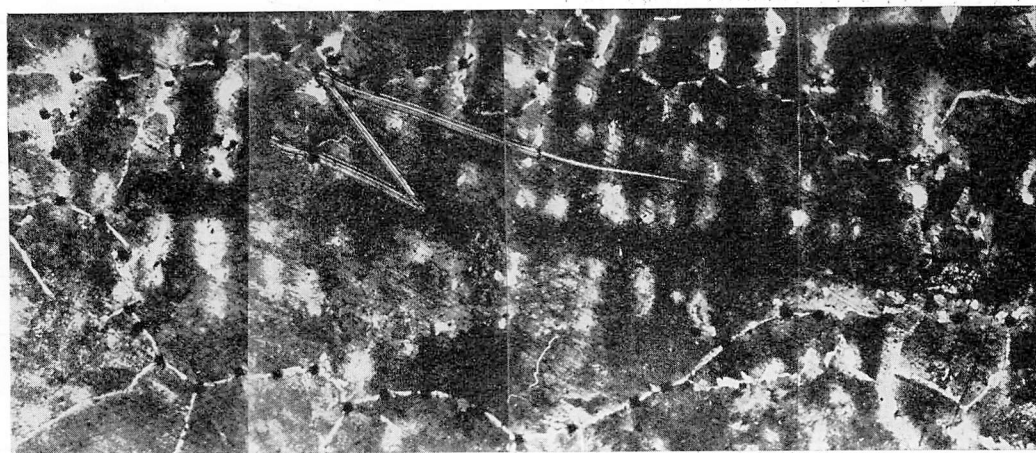
が原因となっているのではないかとされる

表3および図4, 5, 6から引張試験の結果を見ると, 鑄放し材にくらべて, 延性は向上している。引張強さは, 静止材ではやや向上しているが, 攪拌材ではあまり変わらない。1050°C 焼鈍では 850°C 焼鈍よりも延性が大きくなっているが, 引張強さは変わらない。

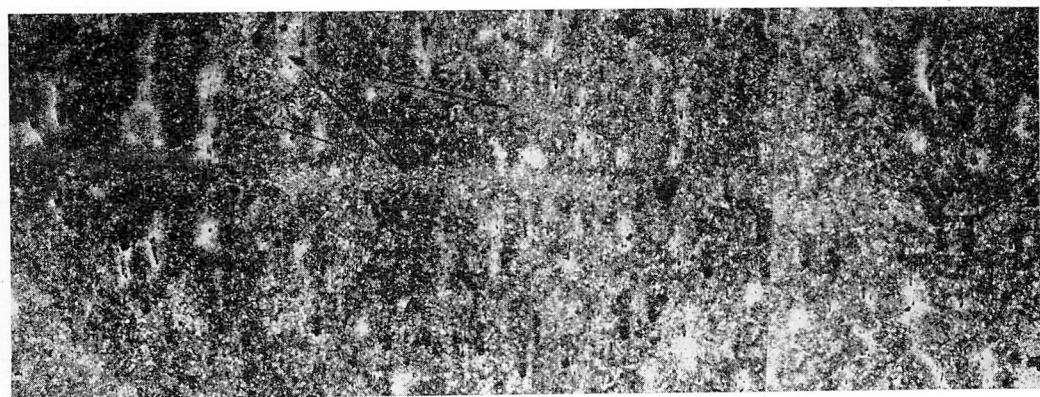
焼鈍材の機械的性質と, デンドライトの大きさの関係は, 伸び, 絞りおよび衝撃値において顕著であり, 引張強さとの関係はあまり深くないようである。しかし, 低炭素鋼に関する報告では, pearlite の分布形態と引張強さの関係は明確に指摘されており⁽⁴⁾, また, 中炭素鋼においても, 相関関係のあることが認められている⁽⁵⁾ので, 今後さらに検討が必要である。

III・3 調 質 材

写真2の(g)(h)(i)(j)に調質状態のミクロ組織を示す。水焼入, 油焼入ともに spheroidite 組織であるが, 低倍率で観察すると炭化物密度の小さい白色に見える部分が存在する。これを micro-vickers 硬度測定すると, 約 160 *Hv* であり, spheroidite 部分の 210 *Hv* よりも軟かく, 焼鈍組織の matrix ferrite と同程度で, ferrite であろうと判定された。この ferrite の分布形態は, 攪拌材と静止材ではやや異なっており, 攪拌では小さく, 静止では大きい。さらに, 旧デンドライトとの位置関係を見ると写真3の(a)(b)のように, 旧デンドライトの樹間部に相当することがわかる。このような ferrite が形成される理由として, 樹間部に



(a) 鑄放し材のデンドライト痕跡
×126



(b) 調質材のデンドライト痕跡
×126

写真3 デンドライト形態と熱処理組織の関係

において S_1 などの元素が富化するため、 A_3 点が上昇し pro-eutectoid ferrite が優先的に析出すること、および、 S_1 の富化により cementite が不安定となり、焼戻し過程に cementite の分解貧化するかわり ferrite の形成が行なわれること⁽⁶⁾などが考えられる。

図8に調質状態の衝撃値を示す。油焼入焼戻しでは、全温度域にわたって、攪拌材が静止材を上回っており、遷移温度も 25°C 程度低くなっている。これに対して、水焼入焼戻しでは、upper shelf energy で、静止が攪拌よりも大きくなっているが、遷移温度域では殆んど同一の曲線となっている。また、焼入温度を 1050°C としたものは全温度域にわたって攪拌が静止に優っている。破面は静止と攪拌の差はあまり明確ではなかった。

表3および図4, 5, 6から引張試験の結果を見ると、いずれの場合も攪拌材が静止材よりも優れた値を示しているが、その差は、油焼入では伸び、絞り、靱性にあらわれるのに対して、水焼入では引張強さにあらわれる傾向が認められる。とくに水焼入では強度と延性、靱性のいずれも、攪拌が静止を上回っていることは注目すべきである。このように、調質材は、攪拌と静止すなわちデンドライトの大きさによる機械的性質の相違がかなり明確にあらわれているが、この理由については判然としない。調質材の靱性を左右する因子として、オーステナイト粒度が考えられるが、本実験での測定結果は、静止が No. 8.6 に対して攪拌が No. 8.7 となって、両者の差はごく小さいものであった。図9はL型ジョミニー焼入性試験の結果を示すものであるが、これより、攪拌材は静止材よりも焼入性が劣ることがわかる。これは、前述の攪拌材の機械的性質の優位性とは矛盾する結果となる。しかしながら、攪拌材の焼入性の劣る点を補って、静止材を上回る強度と靱性をもたらしている何等かの因子の存在することについては、今後さらに研究すべき問題であろう。前述の炭化物分布の不均一性が旧デンドライト組織と対応することなど、凝固組織の形態が調質組織に受けつがれている点に注目すべきであるかも知れない。

III・4 鍛造材

写真2の(k)(l)(m)(n)に鍛造材の顕微鏡組織を示す。特有の fiber structure が形成されており、pearlite patch は完全に微細化している。攪拌と静止の差は明確ではないが、攪拌の方がやや微細であること、fiber structure が明瞭に認められることがわかる。しかし、鍛造後調質したもので、両者の差はほとんど認められない。

衝撃試験の結果は、図10に示すように、鍛造材に

くらべて大巾な増加が認められるが、 820°C 焼鈍材、油焼入焼戻材では、いずれも攪拌材が静止材を上回っており、全体の傾向は鍛造材とよく似ている。また、水焼入焼戻材については、遷移温度域で、攪拌が静止よりも大きく、upper shelf energy では静止が攪拌よ

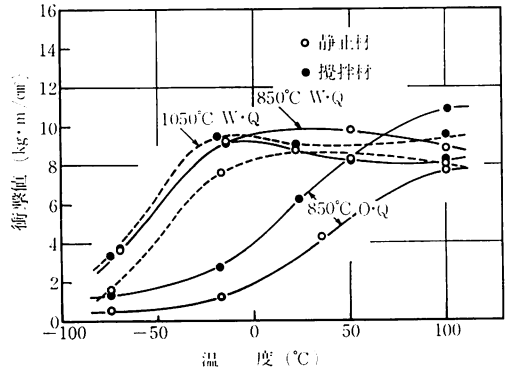


図8 調質材の衝撃値と温度の関係

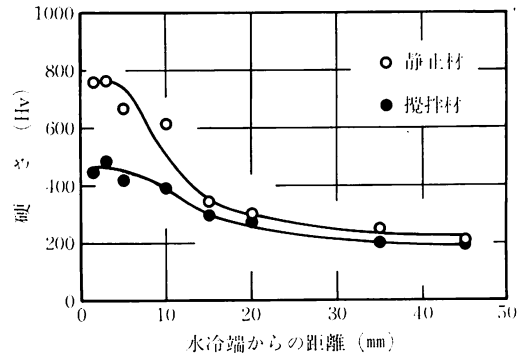


図9 L型ジョミニー焼入性曲線

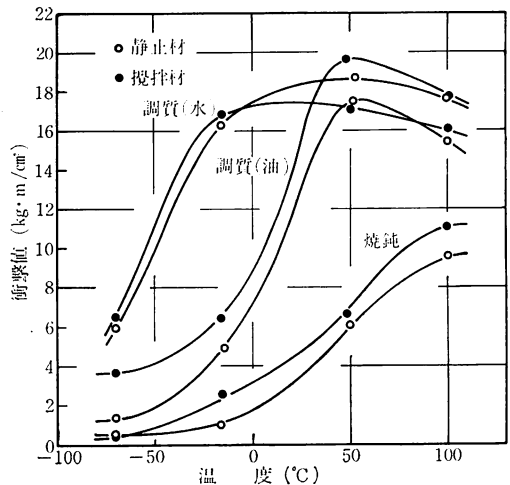


図10 鍛造材の衝撃値と温度の関係

りも大きくなることなど、その特徴は鑄造材と酷似している。以上のことは、凝固組織の影響が鍛造後においても受けつがれている可能性を示すものではないかと考えられる。また、表3および図4, 5, 6から、鍛造材の伸び、絞りは鑄造材にくらべて大巾に増加しているが、反面、引張強さは殆んど変らないこと、および、静止と攪拌の差がはっきりしないことなどがわかる。以上のように、鍛造によって、凝固組織を破壊した場合においては、引張り諸性質に関してはその効果が明確にあらわれ、旧デンドライト形態の差は殆んど受けつがれていない。しかし、衝撃試験では、依然として旧デンドライト形態の影響があらわれている。また、鍛造によって、オーステナイト粒が微細化するか否かについては種々の説がある⁽⁷⁾が、本実験の測定では、鑄造材のオーステナイト粒度は、静止が No. 9.2 に対して攪拌が No. 9.1 となつて、いずれも鑄造材にくらべて若干の微細化が生じた。これについては、今後、より精密な検討を必要とするであろう。

IV 総 括

0.4% C 炭素鋼塊について、デンドライトの粗大なものと微細なものを比較対照し、マクロ的およびミクロ的組織と機械的性質の関連性を調べた結果、つぎのことがわかった。

- (1) 鑄放し材では、デンドライトの大きさの影響は引張強さと伸びにあらわれ、いずれも、デンドライトの微細なものが良好な値を示す。
- (2) 焼鈍材では、デンドライトの微細なものが、伸び、絞り、衝撃値において良好であるが、引張強さではほとんど変らなかつた。
- (3) 調質状態では、デンドライトの微細なものが同一

強度レベルでの延性、靱性において良好であり、この傾向は水焼入について顕著である。

- (4) デンドライトの微細なものは、粗大なものにくらべて焼入性が小さい。
- (5) 熱間加工後の機械的性質では衝撃値が、旧デンドライト形態の影響を受けついでいるものと思われる。

本研究を行なうにあたっては、北海道大学工学部高橋忠義教授に終始御指導いただいた。ここに深く感謝申し上げる。また、試料の溶解その他に御協力、御教示いただいた北大工学部工藤昌行氏、北海道工業試験場の各位、さらに、実験の一部に協力された、本校卒業生、岩崎雅義、加藤愛一郎、工藤慎吾、鈴木貴由、星経敏の諸氏ならびに、機械加工、鍛造等について御協力いただいた本校実習工場の各位に深く感謝する次第である。

参 考 文 献

- 1) 高橋、萩原：日本金属学会誌 29 (1965), 1152.
- 2) 大島、大場：苦小牧高専 紀要 No. 5 (1970), 13.
- 3) 大和田野、江原、浅田：鉄と鋼 Vol 59 (1973), 284.
- 4) たとえば K. W. Burns and F. B. Pickering : JISI (1964), 185, 889.
- 5) T. Gladman, I. D. Mcivor, and F. B. Pickering : JISI (1972), 193, 916.
- 6) 高石昭吾：富士製鉄技報, Vol 13. No. 1 (1964). 1.
- 7) たとえば 藤田、盛、大西、野間：鉄と鋼 vol 59 (1973), No. 8. 65.

(昭和49年12月2日受理)

