

しない。

終りにのぞみ、本實驗に努力された栗原洋三、小出壽太郎、富澤宣成の諸君に感謝する。(昭和25年6月寄稿)

文 献

- 1) Sauveur: Metallography and Heat Treatment of Iron and Steel (1938) 111.
- 2) 同上 112.
- 3) 三原金吾: 日本鐵鋼協會第 39 回講演大會講演大要 (1950) 60.
- 4) Sykes and Allibone: J. Inst. Metals 39 (1928) 173, 40 (1929) 179
- 5) Kriz and Poboril: Stahl und Eisen (1930) 1727.
- 6) 三島, 三橋: 「鐵と鋼」(1950) 6 月號.
- 7) Houdremont: Sonderstahl kunde (1935) 419.
- 8) Bain: Alloying Elements in Steel (1939) 248
- 9) Houdremont: 同上 412
- 10) Houdremont: 同上 418
- 11) 長谷川正義: 日本鐵鋼協會第 39 回講演大會講演大要 (1950) 51

特殊鑄鋼の研究(II)

Cr-Mo 鑄鋼の機械的性質に及ぼす Si の影響

(昭和 22 年 4 月本會講演大會にて講演)

三ヶ島 秀 雄*

RESEARCHES ON THE SPECIAL CAST STEEL (II)

THE EFFECTS OF Si ON THE MECHANICAL PROPERTIES OF Cr-Mo CAST STEEL

Hideo Mikashima

Synopsis:

Influence of C and Si on the hardness, tensile strength and impact resistance of Cr-Mo cast steels (Cr 1%, Mo 0.35%) were investigated.

As the result of these investigation, it has been ascertained that the addition of Si to Cr-Mo cast steels gives a considerable influence upon the mechanical properties, that is, not only to improve the tensile strength, but also toughness such as elongation, reduction of area and impact resistance, and that the moderate quantity of Si are 1% for cast steel contained with C 0.25~0.3%, Cr 1%, Mo 0.35%

The most suitable quantity of Si has an intimate relation with the C content, and the effective limiting amount moves to the lower Si side according to the C content increases. The maximum tensile strength are obtained by adding Si up to 2% for 0.3% C Steel, Si 1.0~1.2% for 0.4% C steel and Si 1% for 0.5% C steel.

In case of tempering the impact value of Cr-Mo-Si cast steel shows the minimum values at 300°~400°C, that is, due to the first temper brittleness. The Cr-Mo cast steel shows some inferiorities in mechanical properties as compared with the same forged steels, but the tensile strength in tempering at 600° or 700°C, are so improved as the forged special steels. In addition to these characteristic, the Cr-Mo-Si cast steel is not recognized any significant difference in strength at the longitudinal and transverse direction.

* 九州工業大學金屬工學教室, 工學博士

1. 緒 言

著者は第 I 報¹⁾に於て Cr-Mo 鑄鋼の鑄造組織と C 及び Si 含量との関係及び焼鈍に依る樹晶の擴散に就て報告したが、今回はそれに引續き Cr-Mo 鑄鋼の機械的性質に及ぼす Si の影響に就て研究を行つた結果を報告する。

元來 Si は強力脱酸劑として殆ど何れの製鋼に於ても用いられるが、本邦に於ける特殊鋼では Si を 0.35% 以下に制限している。この脱酸に必要な量以上 Si を添加した場合の影響に就ては良否二様の説がある。Hadfield²⁾, Baker³⁾其他^{4)~6)}は Si は強さを増加するが靱性を害すると云い、Turner⁷⁾, Harrison⁸⁾, 藪内氏⁹⁾等も之を認めている。之に對して或量以下の Si は靱性を犠牲にすることなく強さを増加すると云う説も有力で、Jones¹⁰⁾ Kinzel¹¹⁾, 太田氏¹²⁾等は之を主張している。

著者は Cr-Mo を研究の對照とし鑄造性を賦與するために Si を或程度以上添加した場合機械的性質特に衝撃抗力が如何に變化するかを試験した。尙 Cr-Mo 鋼は高温度でクリープに強い等優れた性質を有しているが、本研究では常温での強さを主眼として研究を進めた。試

料は豫備研究に依り Cr 1%, Mo 0.3% 程度のものが肉厚が特に大でない限り、強度を賦與するに適當な事を知り得たので、之等の成分を一定とし C と Si 量を種々變化させてその影響を試験した。尙本報告に於ては樹晶の擴散處理を施すことなく直接焼入、焼戻したものに就てのみ検討し、擴散焼鈍の影響に就ては改めて報告する。

II. 試料の調製及び實驗方法

試料の調製は第 I 報に述べたと同一方法で熔解し、硬度及び衝撃試験用には第 I 報第 1 圖の様な L 型鑄物を作り、10mm 角、長さ 55mm、深さ 2mm の切込を有する標準衝撃試験片を作製した。又抗張試験には 40×40×135mm の砂型鑄物(I 型試片)を作り、縦横の各方向に試片を切り出し直径 3.57mm、平行部 15.0mm、全長 25.0mm の小型抗張試験片に仕上げ、小型試験機(ユニバソメーター)に依り抗張試験を行つた。尙本試験機は標準試験棒とエキステンソメーターに依り嚴密な檢定を行い補正して使用した。

III. 實驗結果

第 1 表

類 別	番 號	C%	Cr%	Mo%	Mn%	Si%	P%	S%
第 I 類 C 0.24~0.26%	71B	0.26	1.04	0.35	0.57	0.19	0.005	0.018
	1	0.25	1.05	〃	0.54	0.29		
	72B	0.24	1.98	〃	0.67	0.59	0.010	0.009
	3	0.24	1.06	〃	0.68	1.08	0.003	0.013
	74B	0.29	1.06	〃	1.07	1.58		
	75B	0.26	1.06	〃	0.68	2.09	0.011	0.012
	76B	0.25	1.04	〃	0.66	2.31	0.007	0.014
第 II 類 C 0.30~0.32%	85B	0.31	1.08	0.35	0.64	0.28		
	12	0.31	1.15	〃	0.69	0.63		
	17	0.31	1.10	〃	0.63	1.32	0.004	0.023
	18	0.31	1.00	〃	0.62	1.85	0.004	0.017
	19	0.31	1.01	〃	0.65	2.57	0.004	0.014
第 III 類 C 0.35~0.38	4	0.37	0.95	0.35	0.65	0.27	0.004	0.018
	11	0.38	1.13	〃	0.71	0.32	0.004	0.020
	15	0.37	1.18	〃	0.66	0.51	0.003	0.038
	2	0.38	1.14	〃	0.63	0.67		
	16	0.36	1.22	〃	0.71	1.13	0.004	0.011
	80B	0.36	0.95	〃	1.28	1.22	0.005	0.012
	81B	0.34	1.08	〃	1.11	1.70	0.006	0.024
	77B	0.35	1.06	〃	0.66	1.87	0.004	0.010
	20	0.35	1.14	〃	0.67	3.27	0.003	0.012
第 IV 類 C 0.40~0.43	14	0.43	1.21	0.35	0.79	0.26	0.003	0.019
	79B	0.40	1.12	〃	0.79	0.79	0.005	0.011
	28	0.44	1.08	〃	0.63	1.09		
	21	0.41	1.04	〃	0.62	1.66	0.008	0.012
	22	0.42	1.02	〃	0.61	1.86		
	82B	0.43	1.05	〃	1.19	1.99	0.006	0.025
	23	0.43	1.03	〃	0.61	2.52	0.004	0.038
	24	0.43	1.04	〃	0.65	2.91	0.004	0.024

A. 硬度及び衝撃抗力に及ぼす Si の影響

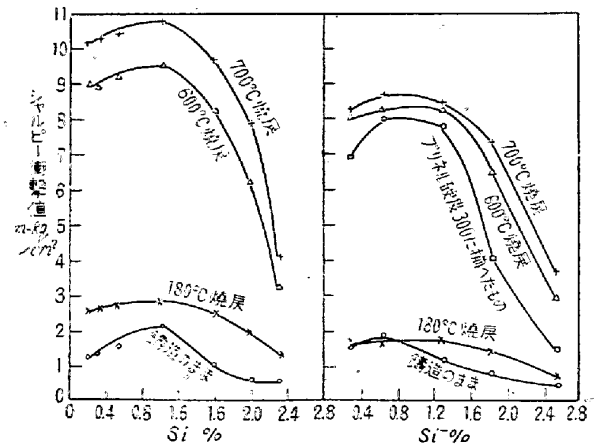
本実験に使用した試料の成分は第1表に示す様に Cr 1%, Mo 0.35%, Mn 0.6% を標準とし, C 及び Si を種々変化したものを用いた. C は硬度及び衝撃抗力に大なる影響を及ぼすから, 第1表の様に C 0.28~0.43% の4種に分類し, 各部類の C 量に對し, Si を 0.2~3.0% 迄変化させた. 鋼の基本原料には電解鐵を使用したので P, S 等の不純物は孰れも低い.

試料は豫め示差熱分析により變態點を測定し $A_{c3} + 50^{\circ}\text{C}$ を焼入温度とした. 焼入前の加熱は眞空中で行い焼入温度に 20 分間加熱保持し油焼入をした. 又焼戻は 180° , 600° 及び 700°C に各1時間保持して油冷した. 焼戻時間は豫備試験により 45 分以上であれば硬度が一定することを確かめたので1時間とした. 以下之等の實驗結果に就て述べる.

1) C 及び Si 含量の硬度に及ぼす影響:— 第1圖 (a), (b) 及び第2圖 (a), (b) は C 含量を異にする4種類 (第1表) に對し Si 量と硬度との關係を示したものである. 之に依れば硬度は C 含量の増加と共に著しく上昇する. この傾向は 180°C 焼戻試料 (マルテンサイト組

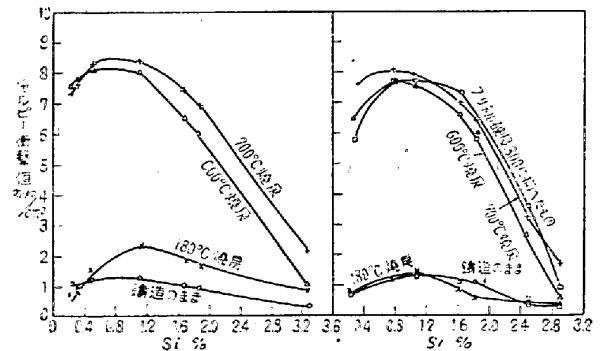
織) に於て特に著しい. C の比較的低い第I類, 第II類の 180°C 焼戻では Si 1% 及び 1.3% を含む場合に硬度が最大となり, Si が過多となれば硬度が低下するが, 高炭素鋼に於てはこの傾向がない. $600^{\circ}\sim 700^{\circ}\text{C}$ の高温焼戻 (ソルバイト組織) では Si 含量と共に硬度が常に上昇を示している.

2) C 及び Si 含量の衝撃値に及ぼす影響:— 第3圖 (a), (b) 及び第4圖 (a), (b) は4種の炭素量のものに就て Si 量と衝撃値との關係を示したもので, C 含



第 3 圖

(a) 第I類 C 0.24~0.26% (b) 第II類 C 0.30~0.32%



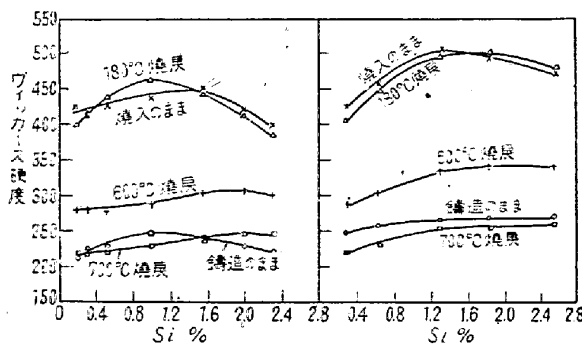
第 4 圖

(a) 第III類 C 0.35~0.38% (b) 第IV類 C 0.40~0.43%

量一定の場合には Si 1% 附近迄は衝撃値が増加するがそれ以上では急激に低下する.

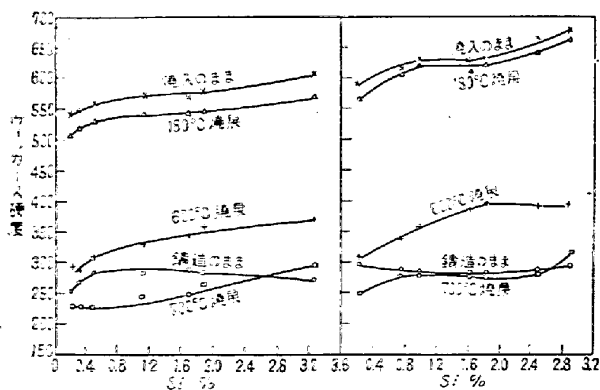
この關係は高温焼戻に於て特に明瞭に現れるが, 又低温焼戻に於ても見られる. 又衝撃値に對する Si の有効限度は C 量が多くなる程低 Si 側に移動する傾向がある. C の添加は硬度増加の反面衝撃抗力を減ずるが, 高温焼戻すれば Si が過多でない限り孰れも $7\text{m}\cdot\text{kg}/\text{cm}^2$ 以上の靱性を有することが明かとなつた.

3) 焼戻温度の影響:— 以上は 180° , 600° 及び



第 1 圖

(a) 第I類 C 0.24~0.26% (b) 第II類 C 0.30~0.32%



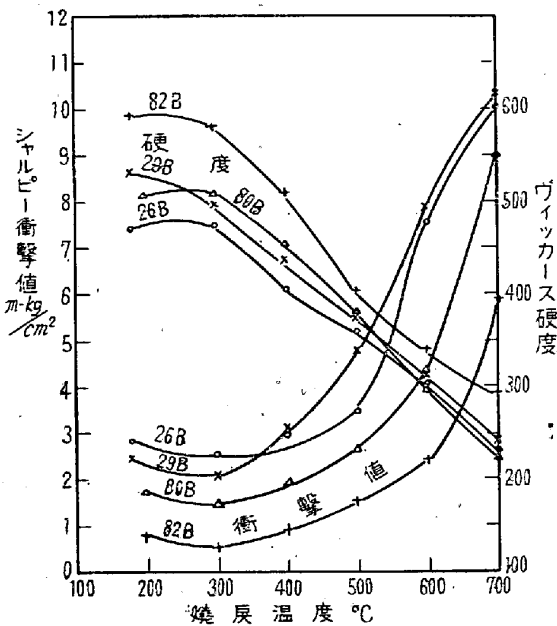
第 2 圖

(a) 第III類 C 0.35~0.38% (b) 第IV類 C 0.40~0.43%

700°C の3種の焼戻温度に就て述べたが、別に第2表に示すC 0.2~0.43%, Si 1%, 1.2% 及び2% を含む4種

第2表

番號	C%	Cr%	Mo%	Mn%	Si%	P%	S%
26B	0.20	1.07	0.35	0.68	1.03	0.008	0.014
29B	0.28	1.05	//	0.68	1.10	0.006	0.013
80B	0.36	0.95	//	1.28	1.22	0.005	0.012
82B	0.43	1.05	//	1.19	1.99	0.006	0.025



第5圖

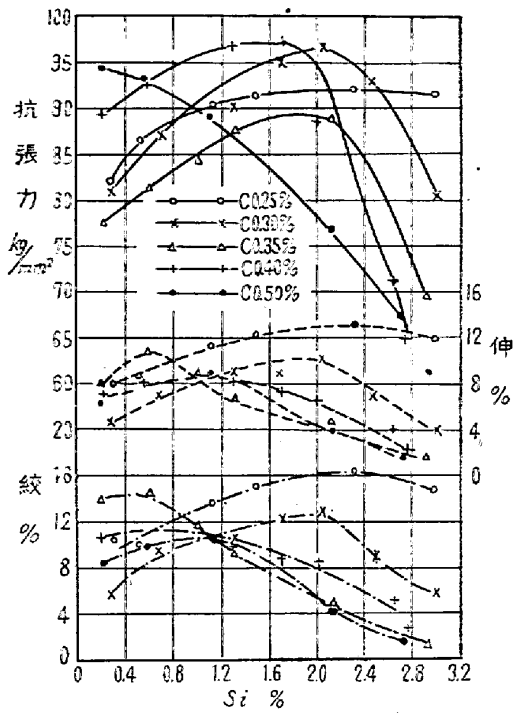
のCr-Mo 鑄鋼を油焼入 ($Ac_3+50^\circ C$) 後 $180^\circ C \sim 700^\circ C$ の各種温度で焼戻して硬度と衝撃値の變化を試験した。第5圖はその結果を示す。之に依れば Cr-Mo-Si 鑄鋼は焼戻温度 $300^\circ C$ 迄は硬度の減少が比較的少いが、それ以上の焼戻温度では略々温度に比例して低下する。然るに衝撃抗力は $300^\circ C$ 焼戻の場合には $180^\circ C$ 焼戻よりも稍低下の傾向を示し、 $400^\circ C$ では尙低下するが $500^\circ C$ 附近から急激に増加する。この $300^\circ C \sim 400^\circ C$ に於ける衝撃値の低下は第一焼戻脆性として既に永澤氏¹⁵⁾の研究に依て明かにされている。又高温焼戻の場合徐冷に依る脆化が第二焼戻脆性であるが、本実験の様に焼戻後急冷したものでは第二焼戻脆性は起らない筈である。Cr-Mo 鑄鋼に靱性を要求する場合にはソルバイト組織を呈する $600^\circ C$ 以上の焼戻が望ましいが、他方硬度と靱性の両者が要求せられる場合にはCを低目に選び、 $200^\circ C$ 迄の低温焼戻を施して用ふるか或はCを高くして高温焼戻をするのが良く、 $300^\circ C \sim 400^\circ C$ の焼戻温度は脆性を伴うから常に避けなければならない。

4) 顯微鏡組織:— Cr-Mo-Si 鑄鋼の顯微鏡組織に就て見るに、鑄造した儘のものでは樹晶と共に偏析が見えるが、Cの低い試料3(C 0.24%, Si 1.08%) では結晶粒界に初析フェライトが可なり大きく現れ、更にCが増加すればフェライトが析出しない様になる。試料16(C 0.36% Si 1.13%) 及び21(C 0.41%, Si 1.66%) の中炭素及び高炭素では細かいウィッドマンスタツテン乃至マルテンサイト組織を呈するが、その硬度は Hv 285 程度であるからマルテンサイトではない。之は Cr, Mo, Si 等の影響でパーライト組織とならずソルバイト組織となり、その形態がウィッドマンスタツテン状に發達したものと考えられる。更に Si 量が多くなると白色組織が混ざる様になり、而かも之は焼入組織よりも焼戻組織に多くなつて来るが、C量が多くなればこの白色組織は少くなる。又 Si を多量に含有する試料75B(C 0.26%, Si 2.09%) の焼入組織にもマルテンサイト中に白色組織を混じているが、之を焼戻すると温度が高くなると共に之が増加する。尙焼戻温度を更に高めると地中に吸収されて少くなる。之等の點から白色部はフェライトに相當するものとも考えられるが、その形状は化合物の様にも見える。従て本鋼の様に複雑な成分のものでは之等組織の本質は未だ正確に判明せず今後の研究に俟つものが多い。

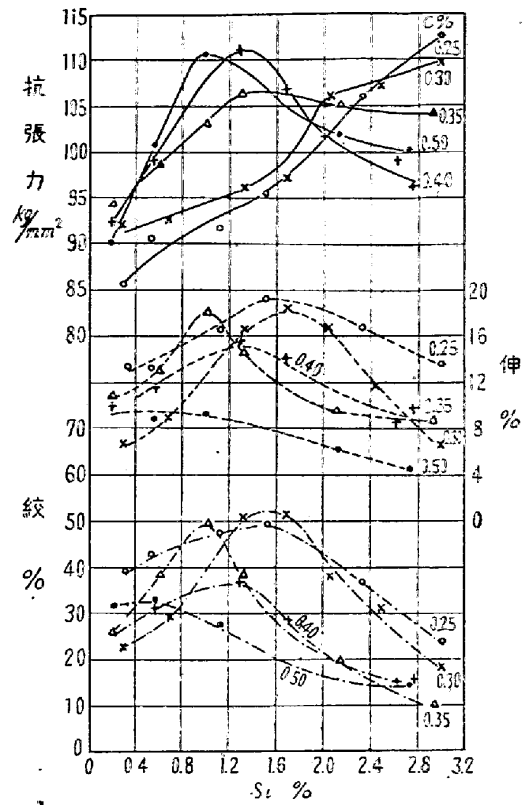
B. Cr-Mo 鑄鋼の抗張性に及ぼす Si の影響

1) 鑄造試料の抗張試験:— 先づ鑄造した儘の Cr-Mo-Si 鑄鋼を小型抗張試験機により試験した結果は第6圖に示す通りである。但し之等試料のC含量は 0.25~0.5%, Si 含量は 0.25~3.0% の範囲のものである。この結果を見るに可なり試験値が散亂して結論を與えるに稍困難を感じるが、之は鑄造の儘であるため状態が揃はぬ事及び試験片が小さいため僅かの局部的缺點不同が大きな影響を與える事等に起因するものと考えられる。併し第6圖から判断すれば Si が 1.6~2% の時に抗張力が最大で、Si が之以上多くなれば急激に減退する。伸及び絞は Si 1% 附近の時は良好で、それ以上では減退する場合が多い。而してCが多くなる程抗張力及び伸の最良限界點が低 Si 側に移動する傾向がある。

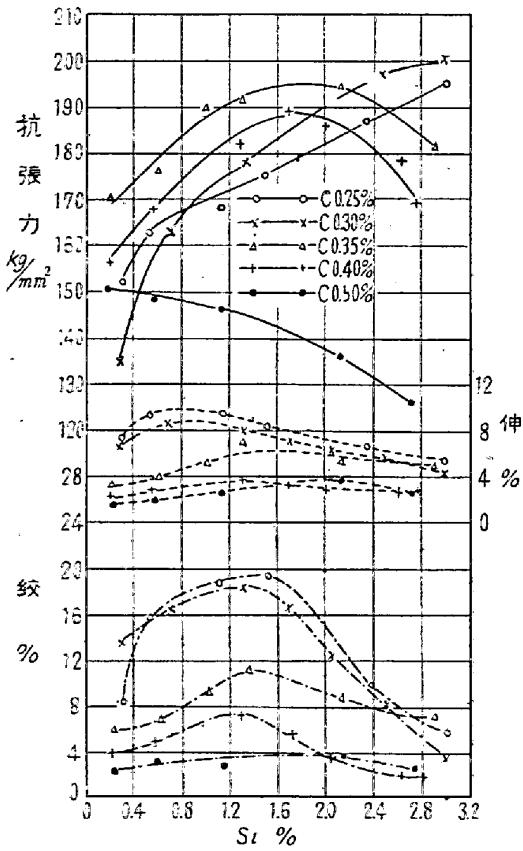
2) 熱処理試料の抗張試験:— 次に鑄造後焼入、焼戻したものに就て抗張試験を行つた。但しこの場合には焼入前に擴散焼鈍を行はなかつた。第7圖は $Ac_3+50^\circ C$ に20分間加熱油焼入したものを $180^\circ C$ で低温焼戻を施した結果を示し、第8圖及び第9圖は $600^\circ C$ 及び $700^\circ C$ で焼戻した場合の機械的性質の變化を示したものである。この結果に依れば $180^\circ C$ の低温焼戻では大體マ



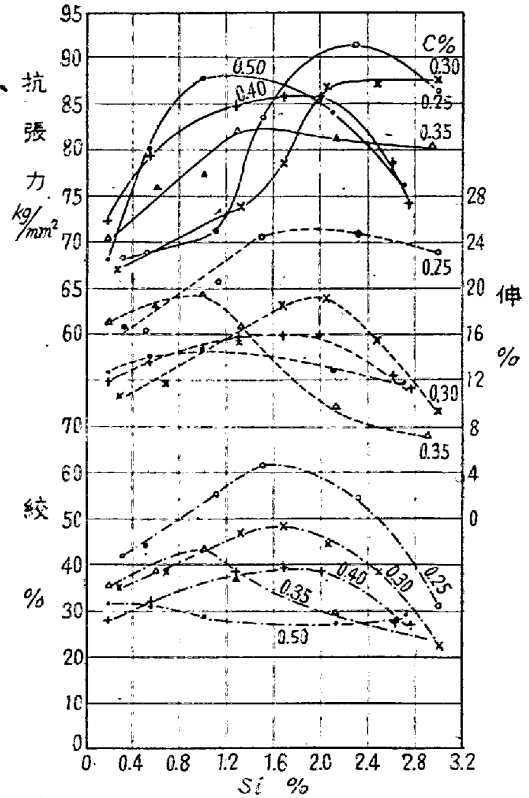
第6圖 鑄造のまま



第8圖 600°C 焼戻



第7圖 180°C 焼戻



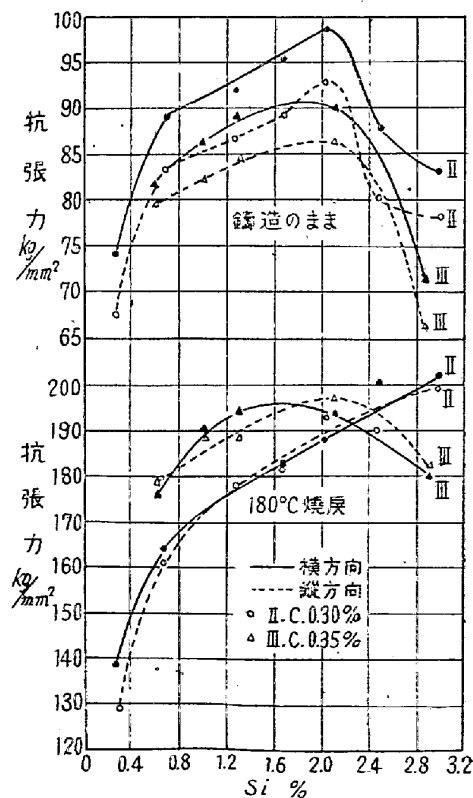
第9圖 700°C 焼戻

ルテンサイト組織を示し、抗張力が 180~190 kg/mm² にも達する。而して C 0.3% 程度の低炭素鑄鋼の場合にはかなりの伸及び絞を示し、就中或適量の Si の添加

は抗張力、伸及び絞を増加する。例えば C 0.3% 以下の低炭素鋼では Si 0.8~1.4% 附近のものは抗張力を

増加すると共に伸及び絞をも良好ならしめるものである。又 $600^{\circ}\text{C}\sim 700^{\circ}\text{C}$ の高温焼戻試料はソルバイト組織のものであるが、或適量の Si の添加は抗張力、伸及び絞も向上させる。即ち C 0.3% 以下の鋼では抗張力は Si の多いもの程大となるが、C 0.4% では Si 1~1.2%, C 0.5% では Si 0.6~0.8% の時抗張力は最高値を示す。然るに伸及び絞は C 量の増加と共に減退する。低炭素の場合には伸、絞は Si 1.5~1.6% の時最高を示し、C が多くなればその限度が下り、C が 0.5% 附近になれば Si の添加と共に總體的に低下する。即ち伸及び絞を減退させるものは C 自身にして、Si は或範囲内では強度と共に靱性を向上させることが明かとなった。

3) 方向性に就て:— 鍛造鋼は鋼種並びに鍛造比に應じて鍛伸方向とそれに直角な方向とで強度が異なることが知られている。併し鑄鋼では方向性が少いと想像せられるが鑄物表面近くの柱状組織部と内部では強さの差があると考えられるので、方向性に全然無関係とも云えない。従て C 0.3~0.35% を含む Cr-Mo 鑄鋼に Si を種々添加した數種の試料を前述の I 型試片に鑄造し、縦方向(上下)及び横方向に切り出し、小型試験片に仕上げて抗張試験を行つた。第 10 圖はその結果を示したもので、鑄造の儘では縦方向よりも横方向が幾分強い傾向を示すが、熱処理を施したものではその差が殆ど認められ



第 10 圖

なくなる。但し伸及び絞に就てはその結果が不規則で方向性との關係を明かにすることが出来なかつた。この結果から Cr-Mo-Si 鑄鋼は鍛造物に比較して方向性の影響が少く、實際使用に當りこの點を顧慮する必要がないものと推察せられる。

C. Cr-Mo-Si 鑄鋼の機械的性質に関する實驗結果の考察

Si は鋼の靱性を犠牲にして硬度、弾性限、抗張力等を増加すると云う説に對し、太田氏¹²⁾は低 Ni 鋼に少量の Si の添加は總ての機械的性質に有利で而かも焼入性も良好にすると報じている。著者の場合には試料が Cr-Mo-Si 鑄鋼であるから同一傾向を示すとは限らないが、Si の適量は静的並びに衝擊試験共に良好な影響を與える事が判明した。勿論 Si 添加の適量は C 量に支配せられ高炭素の場合には Si は寧ろ悪影響を與えることさへある。

著者の結果を概括的に見れば C 0.3% 以下では Si 2% 迄は抗張力を増加し、C 0.4% 程度では Si 1.2~1.5%, C 0.5% 程度では Si 1% 附近に最高抗張力の限界點が存在し、それ以上 Si が増加すれば抗張力を減退する。併し伸、絞、衝擊値等の靱性に對する Si の有効添加量は抗張力の場合よりも低い。

Cr-Mo 鍛造鋼の機械的性質に對する Si の影響に就ては錦織氏¹⁴⁾等の研究があり、その成分は大體 Cr, Mn Si 各 1% を標準としている。第 3 表は本研究の結果を錦織氏等の鍛造鋼の機械的性質と比較したものである。この結果に依れば鑄鋼は鍛鋼に比較して總體的に機械的性質が低く、特に低温焼戻状態に於ける靱性に可なり遜色が認められる。併し 600°C 焼戻状態に於ては抗張力 90kg/mm^2 、伸 13%、絞 40%、シャルピー衝擊値 $8.0\text{m}\cdot\text{kg/cm}^2$ 以上の値を示し、機械的性質は相當優秀なものとなる。尙この値は鑄造後その儘調質を施したものに就て測定した結果であるが、適當な焼準を行へば更に靱性の向上が期待せられるから、本鑄鋼は多くの重要部品として充分信頼し得る材料である事を確信する。

IV. 總 括

以上の實驗結果を要約すれば次の通りである。

(1) Cr-Mo 鑄鋼に脱酸に必要な量以上の Si を添加した場合の影響に就て見るに Si が過量に涉らない限り鋼の硬度及び抗張力を増加し、又或限度迄は伸、絞、衝擊値をも向上する。その最適量は C 含量と密接な關係を有し、C の増加と共に Si の有効量が低炭素側に移動す

第3表 Cr-Mo-Si 鋼鑄造材及び鍛造材の機械的性質の比較

	主成分		焼戻温度 °C	抗張力 kg/mm ²	伸%	絞%	ヴィツカ ース硬度	シャルピ ー衝撃値 m.kg/cm ²	熱処理状態
	C%	Si%							
鑄	0.25	1.0	180	170.0	10.0	18.7	464	2.84	焼準処理を施さず 860°C 20 分間加熱油焼入 各種温度に 1 時間焼戻油 冷
			600	91.5	16.5	48.0	290	9.58	
			700	71.0	21.0	55.0	230	10.83	
鋼	0.30	1.0	180	172.0	8.5	18.0	480	1.80	同 上
			600	95.0	13.0	40.0	325	8.36	
			700	72.0	14.0	43.0	250	8.65	
鍛	0.30	1.0	200	183.5	6.5	18.3	536	6.87	860°C 30 分間加熱油焼 入, 各種焼戻温度に 1 時 間焼戻油冷
			300	180.9	6.8	33.1	536	5.50	
			400	155.3	9.6	40.0	460	4.37	
			500	147.1	13.4	38.3	443	4.64	
			600	118.9	17.7	52.5	320	11.42	
			700	97.1	23.6	61.4	282	17.36	

る。C 量 0.25~0.3% 範囲の鑄鋼を例にとれば Si 1% 程度が最適である。

(2) Cr-Mo-Si 鑄鋼の衝撃抗力は 300°~400°C の焼戻の場合に低い。即ちこの温度附近に第一焼戻脆性が現れる。

(3) Cr-Mo-Si 鑄鋼は鍛造鋼に比較して衝撃値が幾分低い。その抗張試験の結果は強靱鋼として充分優秀な性質を有している。

(4) 鑄鋼の強さが鍛伸鋼の様に方向に依る差異が少ないことは本鑄鋼の極めて有利な点である。

以上の結果からして Cr-Mo 鑄鋼に適量の Si の添加は鑄造性のみならず機械的性質も優れている事を確認した。因て Cr-Mo-Si 鋼を鑄物に積極的に利用する事を推奨し度い。

(昭和 25 年 7 月寄稿)

文 献

- 1) 谷村熙, 三ヶ島秀雄: 鐵と鋼, 30(1944), 166
- 2) R.A. Hadfield: Jour. Iron and Steel Inst., 1889 No. 2, 222
- 3) T. Baker: Jour. Iron and Steel, 1903, No. 2 312.

- 4) L. Guillet: Rev. de Mét., 1904, No. 1, 46
- 5) P. Paylianti: Metallurgie, 1921, 217.
- 6) T. D. Yensen: Bulletin. No. 83. Univ. of Illinois, 1915.
- 7) T. Turner: Trans. chem. Soc., 1887, 134, 1888 884.
- 8) R. Harrison: Jour. Iron and Steel Inst., 124 (1931) II 261.
- 9) 藪内周三郎: 鐵と鋼, 23 (1937) 413.
- 10) J. A. Jones: Jour. Iron and Steel Inst., 120 (1929) II 127.
- 11) A. B. Kinzel: Trans. Amer. Soc. Steel Treat., 14 (1928) 866.
- 12) 太田雛一: 鐵と鋼, 27 (1941) 441, 28 (1942) 969.
- 13) 永澤清: 鐵と鋼, 19 (1933) 174., 日本=ツケル時報, 2 (1934) 165.
- 14) 錦織清治, 熊井俊一, 淺田千秋: 電氣製鋼, 19 (1943) 1.