

Fig. 3. Calculated versus experimental hardness at 26 mm from quenched-end of Jominy specimen.

示す。

これより、よく知られているように焼入端 (2 mm) の硬度は C 量のみによつてほとんど決定されること、焼入端からの距離が大きくなると漸次、合金元素の効果が大きくなるが、その効果は Mo がもつとも大きく、続いて Cr, Mn さらに Si, Ni, Cu の順であることなど焼入性への合金元素の影響を知ることができる。Fig. 3 に本実験鋼の Jominy 焼入端より 26 mm 位置における硬度の計算値と実測値の関係を示す。従来、合金成分より Jominy 曲線を推定する方法として Field 法, Crafts-Lamont 法⁴⁾など種々の方法が発表されており、これらの方法によつてもかなりよく推定を行なうことができるが、低炭素低合金鋼の範囲においては、本実験結果による場合のほうが、推定の精度はより高いようである。

4. 結 言

直交配列表 $L_{16}(2^{15})$ にしたがつて成分配合をきめた、C, Si, Mn, Ni, Cr, Mo, Cu の 7 元素を含む低合金鋼について、焼入・焼もどし状態の強度ならびに Jominy 一端焼入性試験における各位置の硬度におよぼす合金元素の影響を、実験式を求めることにより、定量的に評価した。

降伏点、抗張力は十分な精度をもつて合金成分より推定することができる。また、Jominy 焼入性曲線も低炭素低合金鋼の範囲において、従来法に比してより高い精度をもつて合金成分より推定し得ることがわかつた。

ここで求めた強度ならびに Jominy 焼入性曲線の推定式を用い、さらに各合金元素の焼もどし抵抗性を考慮することによつて、かなり広い板厚範囲におけるこの種溶接性高張力鋼の強度を成分より推定することが可能である。なお、さらに強度の高い領域の鋼に対しては合金元素のより多量の添加ないしは V, B など微量元素の添加が必要となるが、これらを含む場合については別途報告する予定である。

文 献

- 1) 三好, 他: 鉄と鋼, 51 (1965) 5, p. 1080
- 2) 三好, 他: 鉄と鋼, 51 (1965) 5, p. 1083
- 3) 村木, 他: 富士製鉄技報, 10 (1961) 3, p. 373
- 4) 大和久: 焼入性, (1956), p. 120, 日刊工業新聞社

(135) 調質型高張力鋼に関する検討

(低合金鋼の諸特性に影響をおよぼす因子について—I)

日本鋼管, 技術研究所

久保田広行・大須賀立美・○田中 淳一
〃 本社

辻本 嘉伸・太田 正矩

Quenched and Tempered Type High Strength Steels.

(On the factors which affect mechanical properties of low alloy steels—I)

Hiroyuki KUBOTA, Tatsumi ŌSUKA,
Junichi TANAKA, Yoshinobu TSUJIMOTO
and Masanori ŌTA.

1. 結 言

鋼の機械的性質に影響をおよぼす因子については、定性的な観点からはほぼ論じつくされているようであるが、定量的な検討は、因子の種類が非常に多く、また相互に影響しあっているために、かなりの研究がなされているにもかかわらず^{1)~6)}、必ずしも十分であるとはいいがたい。特に調質鋼においては、熱処理の影響が加わるので、一層複雑になつてくる。本報では、調質鋼の機械的性質に影響をおよぼす因子を定量的に把握する目的で、電子計算機を用いた重回帰分析によつて、調質鋼の諸特性値に関する推定の検討をおこなつた結果を報告する。

2. 実験方法

効果的な解析をおこなうために、要因のうちで最も影響が大きいと思われる化学成分と熱処理条件とに注目し、他の因子はできるかぎり一定の水準に固定した。熱処理条件はさらに加熱温度、加熱時間、冷却速度、焼戻温度および時間などの要因にわかれるが、複雑化をさけるために、ここでは焼戻温度だけを変動させ、その他は固定した。これらの化学成分と焼戻温度との効果を一次加算的であると仮定して要因にとり、降伏点、引張強さ、降伏比、伸び、絞り、2 mm V ノッチシャルピー衝撃試験の 0°C に於ける衝撃値、50%脆性破面遷移温度、15 ft-lb 吸収エネルギー遷移温度、溶接熱影響部最硬さの 9 種の機械的性質を特性値とつて重回帰分析をおこなつた。解析用のデータとしては、高周波電気炉によつて溶製した 50 kg キルド鋼塊を 20 mm 厚に鍛造し、熱処理後に実施した各種試験の結果を用いた。熱処理は 920°C に加熱保持後、約 20°C/sec の冷却速度で焼入れをおこない、550°C 以上 700°C 以下の三水準の温度に焼戻した。Table 1 に溶製した供試鋼の化学成分範囲を

Table 1. The range of chemical composition of steels. (%)

C	Si	Mn	P	S	Cu	Ni	Cr	Mo	V	Zr	Ti	Nb	Al	N
0.07 ~0.26	0.07 ~1.55	0.23 ~1.53	0.005 ~0.025	0.005 ~0.032	0.04 ~0.82	0.01 ~3.46	0.01 ~3.89	0.01 ~0.57	0 ~0.24	0 ~0.05	0 ~0.03	0 ~0.06	0.003 ~0.103	0.0031 ~0.2055

示す。チャージ数は約 100 チャージである。顕微鏡組織は均一なマルテンサイト組織または中間段階組織あるいは両者の混合組織で、一部の少数チャージにフェライトと中間段階組織との混合組織がみられたが、無視し得る程度であつたので、組織については各チャージともほぼ共通であると考えた。オーステナイト粒度は本来要因に入れるべきものであるが、データが不足したためここでは要因から除かざるを得なかつた。引張試験片は JIS 4 号試験片を用い、板厚中心部から採取した。衝撃試験片は 2mmV ノッチシャルピー試験片を用いた。採取位

置は板厚中心部でノッチは板面に垂直に切つた。溶接熱影響部最高硬さ試験は鋼板の強度に見合った市販の低水素系溶接棒を用い、JIS Z 3101 に規定された方法にしたがつて実施した。

3. 実験結果および考察

Table 2 に試験結果の上限値と下限値を示す。また Table 3 に重回帰分析を行つた結果の一覧表を示す。各特性値は、Table 3 の係数を用いることにより (1) 式で表わすことができる。

$$y = \beta_0 + \sum \beta_i \cdot x_i + \beta_T T \dots \dots \dots (1)$$

Table 2. The range of mechanical properties of steels.

Yield strength kg/mm ² #	Tensile strength kg/mm ²	Yield ratio %	Elongation %###	Reduction of area %###	Charpy impact test			Hmax.**** Vickers (10kg)
					Eo* kgm/cm ²	TrS** °C	Tr 15*** °C	
36.2~120.9	50.0~131.5	63.8 ~98.3	15.0 ~38.8	45.0~79.0	0.3~27.2	-131 ~>+80	-140 ~>+80	289~459

- # 0.2% off set
- ## G. L.: 50 mm
- ### 14 mm dia.
- * Impact value at 0°C
- ** 50% brittle transition temperature.
- *** 15 ft-lb absorbed energy transition temperature.
- **** Maximum hardness of H. A. Z. under single bead.

Table 3. The results of the multiple regression analyses.

Properties	β_0	β_i									
		C	Si	Mn	P	S	Cu	Ni	Cr	Mo	
Y.S. kg/mm ²	131.7**	67.35**	3.977*	11.54**	60.07	-416.0**	12.94**	2.733**	9.001**	64.99**	
T.S. kg/mm ²	131.1**	108.9**	5.99**	11.95**	57.34	-295.0**	11.82	3.689**	9.061**	53.09**	
Y.R. %	107.8**	-53.38*	-2.116*	3.166*	11.65	-246.0**	-0.1955	-1.031*	2.233**	26.70**	
El. %	-3.867	-11.54	1.592*	-2.835*	-47.64	112.8**	-0.4364	0.5009	-3.178**	-16.17**	
R.A. %	43.50**	-76.26**	-2.474**	-2.070	-77.98*	-154.9**	-7.302**	0.8408Δ	-2.6881*	-14.83**	
Eo kgm/cm ²	14.74**	-78.56**	-2.013*	-3.048*	-33.70	-413.3**	-4.234*	-0.1546	-3.456**	-3.823*	
Trs °C	104.5	130.2Δ	49.35**	-27.02*	611.4*	1466.0**	-3.190	-23.70**	27.66**	-84.13**	
Tr15 °C	-40.36	364.5**	58.16**	-15.96	98.09**	2660.0**	-0.1891	-22.15**	39.51**	-58.01**	
Hvmax.	105.6**	935.5**	78.87**	72.40**	-111.8	36.32	-9.573	-14.36	67.06**	217.1**	
\bar{x}	0.159	0.348	0.937	0.020	0.018	0.0126	0.529	0.522	0.522	0.243	
δx	0.031	0.254	0.269	0.0074	0.0049	0.117	0.791	0.586	0.178		

Properties	β_i							β_t	r ²	\bar{y}	δ_E
	V	Zr	Ti	Nb	B	Al	N				
Y.S. kg/mm ²	141.4**	-13.97	34.88	36.59	1085.0*	-24.38**	-101.9	-0.1715**	0.86	67.08	6.91
T.S. kg/mm ²	115.4**	-22.58	-20.06	-30.68	1309.0**	-16.56**	-214.7*	-0.1659**	0.88	75.97	5.62
Y.R. %	46.07**	11.57	66.03*	106.0**	-81.90	-15.18**	134.0**	-0.03077**	0.71	87.24	3.45
El. %	-30.91**	-41.92	34.85	51.02**	-534.3**	9.622**	127.2**	0.0583**	0.72	24.88	2.79
R.A. %	-46.10**	-44.04	67.46*	28.79	-703.9**	7.937**	83.92	0.07425**	0.78	63.98	3.12
Eo kgm/cm ²	-27.48**	-29.62	-20.28	0.4993	-583.2**	1.972	-27.99	0.03881**	0.69	9.85	2.92
Trs °C	229.2**	-56.87	-694.2**	-660.5**	-3566.0*	-28.46	-1839.0*	-0.2547**	0.56	-44.18	25.4
Tr15 °C	363.4**	141.2	-711.5**	-345.5*	423.5	-103.8**	-1744.0**	-0.2438**	0.62	-81.35	28.0
Hrmax.	238.5**	116.1	-333.6	743.3**	6230.0**	-513.5**	-1596.0**	-0.01666	0.84	388.3	17.8
\bar{x}	0.032	0.0037	0.0057	0.0031	0.0016	0.044	0.0079	638.4			
δx	0.037	0.011	0.0093	0.011	0.0014	0.085	0.0044	32.8			

* 5%の危険率で有意である。 ** 1%の危険率で有意である。

- y: 特性値 (機械的性質)
- β_0 : 定数項
- β_i : 合金元素 1%の増加によつて生ずる特性値の変化
- x_i : 合金元素 i の鋼中含有量 wt%
- β_i : 焼戻し温度 1°C の上昇によつて生ずる特性値の変化
- T: 焼戻し温度 °C

引張り特性に関してはほとんどの要因が有意と認められ、寄与率も高く、ほぼ信頼できる式を得たといふことができる。しかし衝撃特性については全般に寄与率が低く、式の信頼度は十分ではない。最高硬さは引張り特性と同様に寄与率が高く信頼できる式といえる。各特性値別に検討を行なうと、降伏点に対しては B と V が最も効果的であり、次に効果の大きいのが C, Mo および有意ではないが P のグループである。Si, Ni は最も効果が小さく Mn, Cu, Cr はこれらよりやや効果がある。S, Al は降伏点を減少させる要因として評価されており注目に値する。P, Zr, Ti, Nb, N は有意ではない。引張り強さに関しては降伏点の傾向をほぼ全面的にうけついでいるが、C の効果が降伏点の場合のほぼ 2 倍に評価されている。この場合も P, Zr, Ti, Nb は有意ではない。N は Al と同様に降伏点を減少させる要因として評価されている。降伏比については、やや趣が異なり、Mn, Cr, Mo, V, Ti, Nb, N が降伏比を増加させ、C, Si, S, Ni, Al は降伏比を減少させる。S の効果が特に大きい。P, Cu, Zr, B は有意ではない。伸びに対しては Si, S, Nb, Al, N が伸びを増加させることになっているが、S の評価には疑問がある。伸びを大きく損なうものは B であり、V および有意ではないが P の悪影響も大きい。Mn, Cr, Mo, Zr も伸びを損なう要因である。C, P, Cu, Ni, Ti は伸びに対しては有意ではない。絞りに対してはほとんどの元素が有害であり、Ti および Al のみが良い効果を持つと評価されている。最も悪影響のあるものは B であり、C, P, S がこれに次ぐ。V, Zr もやや害があるが Si, Cu, Cr, Mo の影響はあまり大きくない。また Mn, Nb, Ni, N は有意ではない。以上の引張り特性に関して、焼戻し温度は極めて有意になつており、妥当な評価を受けているといえる。衝撃特性のうち、 E_0 については、元素を添加することによる改善はできないことが明らかになつた。有意な元素はすべて E_0 を低下させる。極端に有害なものは B および S であり、C の害の 5~10 倍に相当する。V もかなり有害であるが、Si, Mn, Cu, Cr, Mn はこれらにくらべれば害は小さい。P, Ni, Zr, Ti, Nb, Al, N は E_0 に対しては有意ではない。TrS に関しては S, P が特に有害であり、V もかなり悪い効果がある。Si, Cr も有害ではあるがその程度は小さい。Ti, Nb, B, N, 特に B および N は TrS を大巾に改善する。Mn, Ni, Mo も TrS には良い影響がある。C, Cu, Zr, Al は有意ではない。Tr₁₅ に対しては TrS の場合とほぼ同様の傾向を示すが、C, Al が有意になり Mn, B が有意ではなくなつた点異なる。この場合も S の悪影響が極めて大きい。以上の衝撃特性に対しても焼戻し温度の効果は極めて有意であり、常に衝撃特性を改善する要因として大き

く評価されている。最高硬さに関しては各元素ともほとんど硬度を増加させているが、Al, N のみが減少させる要因として評価されている。最も効果の大きいのは B であり、Nb と C がこれに次いでいる。最高硬さに関しては、(2) 式および (3) 式⁴⁾に示すような炭素当量による推定式が一般に用いられている。

$$Hv_{max} = 666C_{eq} + 40 \dots\dots\dots (2)$$

$$C_{eq} = C + 1/24 \cdot Si + 1/6 \cdot Mn + 1/5 \cdot Cr + 1/4 \cdot Mo + 1/14 \cdot V + 1/40 \cdot Ni \dots\dots (3)$$

本報における解析結果を (2), (3) 式にならつて書きなおすと (4), (5) 式ようになる。

$$Hv_{max} = 935 \cdot 5C_{eq} + 105 \cdot 6 \dots\dots\dots (4)$$

$$C_{eq} = C + 1/12 \cdot Si + 1/13 \cdot Mn + 1/14 \cdot Cr + 1/4 \cdot Mo + 1/4V + Nb + 7 \cdot B - 1/2 \cdot Al - 2 \cdot N \dots\dots\dots (5)$$

これによれば C_{eq} において (3) 式と同等の評価を受けているのは Mo のみであり、他はことごとく評価がくいちがっている。特に (5) 式においては Nb, B などの微量添加元素が大きく評価されている一方、Mn, Cr に対する評価は小さい。(4) 式を用いて Hv_{max} を推定し、実験値とつきあわせた結果を、Fig. 1 に示す。これによれば実験値と推定値は極めて良い一致を示している。

以上で各種の機械的性質におよぼす各元素および焼戻し温度の効果を通観したが、これらの重回帰式の実用性を検討するために、解析に用いられた鋼種と全く同じ条件で製造され、しかもこの解析に含まれていない試作鋼について、特性値の推定計算をおこない実験値と比較した。この結果は、Fig. 2, Fig. 3 に示すように、引張り特性に関しては実験値と推定値は極めてよく一致することがわかる。衝撃特性については寄与率が低かつたためか、良い一致は見られなかつた。

最後に今回の解析で残された今後の問題点として、各要因の効果を一次加算的であると仮定したこと、焼戻し温度による効果を各鋼種に共通の係数で一義的に評価したこと、一部の微量元素についてはデータが不備であ

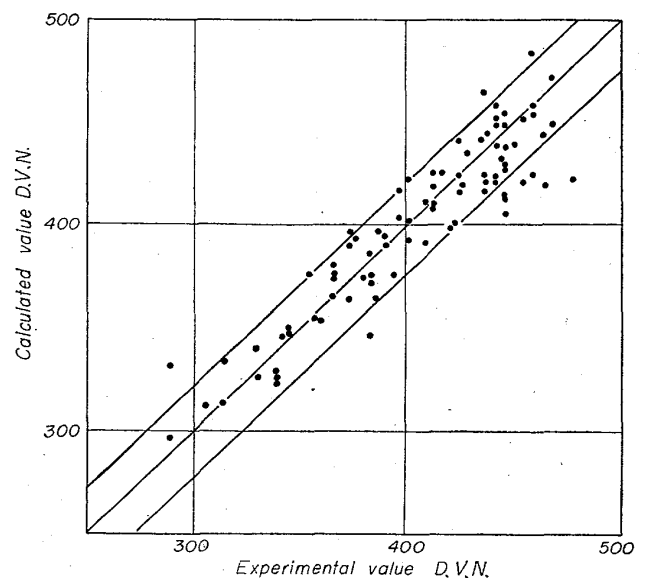


Fig. 1. Calculated vs experimental value of Hv_{max} .

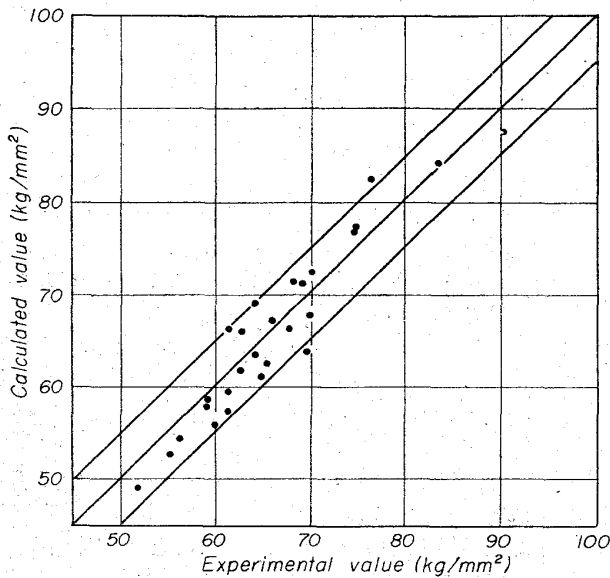


Fig. 2. Calculated vs experimental value of yield strength of check melts.

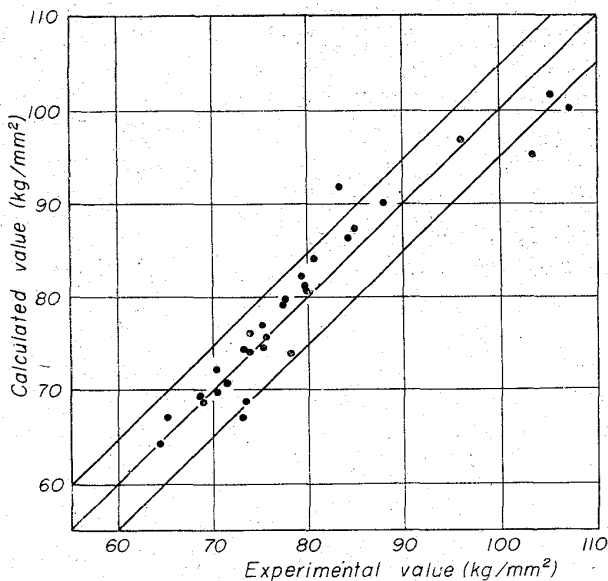


Fig. 3. Calculated vs experimental value of tensile strength of check melts.

つたこと、さらに組織上の要因を組み入れていないこと、Sの挙動に不可解な点が多いこと、またこれらが重なりあつて衝撃特性に関する推定式の精度が十分得られなかつたことなどがあげられる。

なお本報では、各元素の効果を1%当りの変化で評価したが、実際にはこれに添加量をかけたものがその元素の寄与として現われるので、一部の微量元素については、一見過大な評価が行なわれているような感じがするが、実際には妥当と思われる線に落ちついている点に注意されたい。

4. 結 言

解析の結果、種々の機械的性質を化学成分、焼戻し温度から定量的に推定し得る式が得られた。一部にはまだ問題が残されているが、かなりの精度で調質鋼の諸性質を推定することが可能であるとの結論が得られた。

文 献

- 1) C. E. SIMS and H. M. BANTA: *Welding J.*, (1949), April, p. 178
- 2) J. A. RINEBOLT and W. T. HARRIS: *Trans. Amer. Soc. Metals*, (1951), p. 1195
- 3) J. A. RINEBOLT and W. T. HARRIS: *Welding J.* (1951), April p. 202
- 4) 木原, 鈴木: “高張力鋼の溶接”, (1958), p. 9
- 5) 三好, 邦武, 他: 鉄と鋼, 51 (1965) 5, p. 1080
- 6) 中村, 内木, 栗山: 石川島播磨技報, 23 (1965) May, p. 5

(136) 5Ni-2Al系時効硬化鋼の時効挙動

金属材料技術研究所 ○金尾正雄・青木孝夫
 東京大学, 工学部 工博 荒木 透
 金属材料技術研究所 沼田 英夫
 Aging Behaviour of 5Ni-2Al Age Hardening Steels.

Masao KANAO, Takao AOKI,
 Dr. Tōru ARAKI and Hideo NUMATA.

1. 緒 言

時効硬化を利用した低合金鋼の開発に必要な基礎資料を得る目的で、前報¹⁾において、著者らは5% Ni, 2% Alを含む単純な鉄合金を用い、主として硬化におよぼすオーステナイト化温度および焼もどし条件の影響について報告した。その際、本合金は焼入れ後変態点以下の約700°C前後の温度に焼もどしすることにより、フェライト中においても固溶量が大で、溶体化処理を兼ねうることを示した。今回は、前回と同様に、5% Ni, 2% Alを含み、0.2% Cを添加したもの、および添加しない鉄合金を用いて、焼入・焼もどし後種々の条件で時効して、硬化曲線を求め、本合金に見出した2種類の析出物を電子回折等で同定し、とくに粒界反応型析出物の挙動について検討した。

2. 供試材および実験方法

再電解鉄、電解Ni、高純度AlおよびFe-C母合金を原料として、真空高周波誘導炉で約50kgのFe-5Ni-2Al合金、およびこれに0.2% Cを添加した合金を溶製した。また比較のため0.037%のBを添加した約7kgの合金も真空溶解した。インゴットは1,200°Cに加熱して、10mmφ丸棒に鍛圧した。試料は1,000°C×1hr W. Q., 680°C×2hr W. Q.の熱処理をほどこしたのち、種々の条件で時効した。Table 1に分析結果を示す。

時効により生じた析出物を同定するため、電解残渣のX線回折、抽出レプリカ、薄膜による直接観察および回折を行なった。電解残渣のX線回折は、10% H₃PO₄水溶液中で、10mA/cm²の電流密度で電解した試料を用いた。直接観察は、熱処理した10mmφの試料より圧延方向に直角に約1mmの薄片を機械的に切り出し、エメリーと化学研磨(弗酸5%, 過酸化水素水85%, 水10%)で約50μに予備研磨したのち、氷酢酸135cc, CrO₃ 25g, 水7ccの電解液を用いて、Bollmann法で電解研磨した。