

GROSSMANN の式に代わる鋼の焼入性の
新しい予測式上野 正勝*・伊藤亀太郎*²New Empirical Formula for Estimation of Hardenability
from Chemical Compositions

Masakatsu UENO and Kametarou ITOH

Synopsis :

The accuracy of GROSSMANN's equation, which has been widely used for calculation of the hardenability of a steel, is not always satisfactory in particular in the case of B-added steels. We found out that this problem arose from the fact that the GROSSMANN's equation was not always formulated rationally. In this work, an investigation has been made to obtain the new empirical formula for estimating the hardenability in place of GROSSMANN's equation.

The results are as follows :

The hardenability of a steel can be predicted accurately by the following equations.

① In the case of a B-added steel (free-B \geq 5 ppm)

$$\log V_{c-90} = 2.94 - 0.75\beta$$

$$\beta(\%) = 2.7C + 0.4Si + Mn + 0.45Ni + 0.8Cr + 2Mo$$

where, V_{c-90} is the critical cooling velocity ($^{\circ}\text{C}/\text{s}$) at which 90% martensite structure can be obtained.

② In the case of a B-free steel.

$$\log V_{c-90} = 3.69 - 0.75\beta'$$

$$\beta'(\%) = 2.7C + 0.4Si + Mn + 0.45Ni + 0.8Cr + Mo$$

Those results show that the effect of Mo in B-free steels is a half of that in B-added steels and the effect of B itself is equivalent to 1%Mn addition.

Key words : heat treatment ; alloying element ; phase transformation ; hardenability.

1. 緒 言

鋼の焼入性をその化学成分から予測することは鋼の成分設計において非常に重要なことである。そのためこれまで多くの研究者によつて鋼の焼入性の予測式が提案されてきた。その中でも GROSSMANN の式^{1)~3)}が良く知られており、計算が比較的簡単なことと実験データが豊富なことから広く一般に利用されている。しかしこの式が長年使用されてきたとはいえ、精度や適用可能範囲に問題がないわけではない。例えばボロン鋼（以下B鋼）についていえば、Bの定まった焼入性倍数が得られていないため GROSSMANN の式を使つての焼入性の予測は一般的にはできなかつた⁵⁾。またこのBの焼入性倍数 (f_B) が一定でないことがB鋼に対する根強い不信感の一因にもなつていた。B鋼を工業製品として信頼あるものにする

ためには、少なくとも精度良い焼入性の予測式を見出し、かつ f_B 値の不一致の理由を明確にする必要があつた。

前報⁴⁾において著者らは焼入性に対する合金元素の効果を焼入性倍数で表示することは必ずしも合理的でないこと、したがつて GROSSMANN の式は一般的には成立しないことを明らかにした。さらに著者らはB鋼の焼入性に関する研究⁵⁾で鋼の焼入性を臨界冷却速度で表示し、Bの効果をその臨界冷却速度の比で表すと、この比の対数とB量との間には直線関係が成り立つことを見出した。もしこれらの関係が一般の合金元素においても成り立つならば、この関係を用いて従来より精度の良い焼入性の予測式が導かれることが期待される。

そこで著者らは本実験において調質鋼の成分設計に用いられる主要元素と臨界冷却速度との関係を調べ、新し

昭和 53 年 10 月本会講演大会にて発表 昭和 62 年 4 月 30 日受付 (Received Apr.30, 1987)

* 新日本製鉄(株)八幡製鉄所 (Yawata Works, Nippon Steel Corp., 1-1 Edamitsu Yahatahigashi-ku Kitakyushu 805)

*² 新日本製鉄(株)厚板技術部 (Plate Technical Division, Nippon Steel Corp.)

い観点から焼入性の予測式を導き出すことを試みた。またこの研究を通じて従来報告されていた f_B 値がなぜ一致しなかつたかの理由が明らかになったので、この検討結果もあわせて報告する。

2. 実験方法

2.1 試料

Bは他の合金元素と相互作用を有する可能性があるの
で、本実験ではB鋼とB-free鋼とにわけて焼入性を調
べた。Table 1~6はB鋼の、Table 7~9はB-free鋼
の化学成分を示す。化学成分は焼入性に対して影響が大

Table 1. Chemical compositions of B-added steels (wt%) and observed value of hardenability in terms of critical cooling velocity ($^{\circ}\text{C}/\text{s}$) and ideal diameter (inch).

Steel	C	Si	Mn	Cr	V_{C-90}	D_{I-50}
K-32	0.16	0.24	1.20	—	38	2.4
M-28	0.21	0.26	1.19	—	27	2.6
M-20	0.23	0.26	1.22	—	32	2.7
M-22	0.23	0.26	1.20	—	31	2.6
M-24	0.23	0.25	1.21	—	29	2.6
M-26	0.23	0.26	1.19	—	25	2.6
K-41	0.13	0.28	1.20	—	36	2.3
K-42	0.16	0.28	1.19	—	32	2.3
K-43	0.20	0.28	1.21	—	26	2.7
K-44	0.27	0.28	1.23	—	20	2.9
M-5	0.21	0.27	1.42	—	19	3.3
M-16	0.24	0.28	1.42	—	17	3.2
NS-12	0.23	0.26	1.42	—	20	3.0
K-37	0.11	0.27	1.40	—	27	2.7
K-38	0.16	0.27	1.38	—	21	3.0
K-40	0.18	0.28	1.42	—	17	3.1
S-53	0.27	0.25	1.41	—	18	3.2
I-1	0.11	0.24	0.41	0.97	58	2.1
I-2	0.16	0.24	0.41	0.97	48	2.5
I-3	0.21	0.25	0.42	0.98	42	2.7
I-5	0.12	0.25	0.43	0.93	70	1.9
I-6	0.18	0.25	0.43	0.96	45	2.5
I-7	0.22	0.25	0.42	0.94	37	2.6
I-8	0.28	0.25	0.43	0.95	36	2.9

Table 2. Chemical compositions of B-added steels and observed value of hardenability (Effect of Si).

Steel	C	Si	Mn	V_{C-90}	D_{I-50}
S-58	0.25	0.11	1.18	25	2.8
S-59	0.25	0.47	1.16	22	3.0
S-60	0.24	0.75	1.15	14	3.4
K-51	0.15	0.11	1.17	42	2.3
K-52	0.15	0.48	1.17	32	2.5
K-53	0.15	0.77	1.17	23	3.0

Table 3. Chemical compositions of B-added steels and observed value of hardenability (Effect of Mn).

Steel	C	Si	Mn	Cr	V_{C-90}	D_{I-50}
S-34	0.05	0.25	0.97	—	110	1.5
S-35	0.05	0.25	1.27	—	70	2.0
S-36	0.05	0.25	1.66	—	50	2.4
S-37	0.05	0.25	1.44	—	50	2.2
S-19	0.09	0.25	1.01	0.38	32	2.6
X-0	0.10	0.25	1.36	0.41	20	3.2
S-6	0.11	0.28	1.34	0.40	20	3.0
S-20	0.09	0.27	2.08	0.40	8	—
R-11	0.20	0.25	0.25	1.18	27	3.0
R-12	0.20	0.25	0.51	1.18	20	3.5
R-13	0.20	0.25	0.76	1.18	12	4.2

き主要元素量のみ示した。ここに示されていない Al, P, S 量ほどの鋼とも共通で, Al=0.03~0.05% (重量%, 以下同じ), P, S は 0.005~0.015% である。

B鋼の場合, free-B \geq 5 ppm であればBの効果は最大かつ一定になることがわかっているの
で、本実験ではこの条件を満たすようB鋼を溶製した。具体的には前報⁴⁾の結果に基づき, $\Delta T_i \equiv T_i - 3.4N \geq -0.007\%$, 添加 B \geq 10 ppm とした。

B-free鋼の場合, 微量Bが含有されていても free-B \equiv 0 となるようNを 60~80 ppm 添加した。

これらの鋼は 20 kg, 150 kg の真空溶解炉および 1 t 電気炉で溶製された。150 kg 炉で溶製された鋼は 3 分 鑄を行い, 50 kg 鋼塊とした。20 kg およびこの 50 kg 鋼塊は 1250 $^{\circ}\text{C}$ (1523 K), 2 h で加熱後, 熱間圧延で 13

Table 4. Chemical compositions of B-added steels and observed value of hardenability (Effect of Ni).

Steel	C	Si	Mn	Ni	V_{C-90}	D_{I-50}
S-70	0.05	0.26	1.11	0.48	70	2.0
S-71	0.05	0.26	1.13	0.95	50	2.3
S-72	0.04	0.27	1.14	2.09	20	3.3
K-32	0.16	0.24	1.20	—	36	2.5
S-64	0.15	0.26	1.22	0.59	26	2.9
S-65	0.15	0.26	1.22	0.99	22	3.0
S-66	0.15	0.26	1.22	2.08	7	4.9

Table 5. Chemical compositions of B-added steels and observed value of hardenability (Effect of Cr).

Steel	C	Si	Mn	Cr	V_{C-90}	D_{I-50}
S-37	0.05	0.25	1.44	—	55	2.1
S-38	0.05	0.26	1.42	0.50	32	2.8
S-39	0.05	0.25	1.42	1.02	16	3.8
NS-15	0.10	0.25	1.22	0.25	34	2.8
NS-16	0.10	0.25	1.21	0.78	22	3.3
NS-17	0.09	0.26	1.22	0.62	27	3.0
K-41	0.13	0.25	1.20	—	36	2.3
NS-18	0.14	0.26	1.22	0.63	14	3.7
NS-19	0.13	0.25	1.19	0.30	23	2.9
K-33	0.18	0.23	1.16	—	28	2.6
NS-20	0.18	0.26	1.20	0.31	16	3.3
NS-21	0.18	0.26	1.22	0.10	27	2.6
NS-22	0.19	0.26	1.21	0.61	11	3.8
I-11	0.18	0.24	0.42	0.97	55	2.3
I-12	0.18	0.26	0.42	1.29	38	2.7
I-13	0.19	0.26	0.42	0.60	65	1.9
I-14	0.28	0.26	0.42	1.33	19	3.7
I-15	0.28	0.25	0.41	0.59	50	2.0
I-16	0.28	0.26	0.41	0.96	38	2.6

Table 6. Chemical compositions of B-added steels and observed value of hardenability (Effect of Mo).

Steel	C	Si	Mn	Mo	V_{C-90}	D_{I-50}
L-8	0.13	0.23	1.33	—	100	1.5
L-9	0.15	0.24	1.36	0.28	40	2.7
L-10	0.14	0.24	1.34	0.49	22	3.3
L-11	0.14	0.25	1.35	0.69	12	3.7
S-67	0.05	0.25	1.23	—	85	1.6
S-68	0.05	0.25	1.22	0.41	23	3.9
S-69	0.05	0.25	1.22	0.81	7	5.5
S-73	0.13	0.27	1.21	—	50	2.1
S-74	0.12	0.26	1.21	0.20	27	3.0
S-75	0.12	0.27	1.23	0.60	6	—
M-1	0.21	0.26	1.20	—	27	—
M-2	0.21	0.26	1.20	0.21	15	—

Table 7. Chemical compositions of B-free steels and observed value of hardenability (Effect of C).

Steel	C	Si	Mn	Cr	V_{C-90}	D_{I-50}
S-4	0.09	0.21	1.35	—	250	—
M-7	0.24	0.27	1.45	—	140	1.0
P-11	0.30	0.40	1.35	—	95	—
N-25	0.30	0.30	1.37	—	95	—
N-43	0.37	0.22	1.43	—	65	—
N-44	0.38	0.22	1.41	—	53	—
K-57	0.10	0.25	1.37	0.51	110	1.6
K-58	0.20	0.26	1.37	0.51	85	1.9
K-59	0.29	0.26	1.33	0.50	50	2.5
K-60	0.15	0.25	1.35	0.50	90	1.7
K-61	0.24	0.26	1.35	0.50	65	2.1
K-62	0.33	0.26	1.30	0.50	40	2.5

Table 8. Chemical compositions of B-free steels and observed value of hardenability (Effect of Mn).

Steel	C	Si	Mn	Cr	Mo	V_{C-90}	D_{I-50}
M-31	0.20	0.25	0.78	0.98	—	45	2.8
M-32	0.18	0.24	1.18	0.98	—	22	3.2
M-33	0.19	0.24	1.39	0.98	—	19	3.6
M-34	0.20	0.25	1.80	0.98	—	8	—
A-60	0.18	0.11	0.50	0.49	0.29	100	1.5
A-61	0.18	0.11	0.73	0.49	0.29	80	1.8
A-62	0.16	0.11	0.99	0.49	0.29	42	2.6
A-63	0.16	0.12	1.42	0.49	0.30	18	3.0
M-29	0.19	0.25	1.33	0.49	—	35	2.6
M-30	0.19	0.25	1.81	0.51	—	18	3.6
S-21	0.09	0.26	1.01	0.40	—	180	1.0
S-22	0.10	0.28	2.06	0.42	—	65	2.3

Table 9. Chemical compositions of B-free steels and observed value of hardenability (Effect of Cr, Mo).

Steel	C	Si	Mn	Cr	Mo	V_{C-90}	D_{I-50}
S-76	0.21	0.26	1.01	0.52	—	100	1.6
S-77	0.21	0.26	1.01	0.96	—	75	2.1
S-78	0.20	0.26	1.01	1.49	—	30	3.6
M-17	0.24	0.25	1.15	0.50	—	90	1.8
M-18	0.23	0.25	1.16	1.61	—	8	—
L-4	0.04	0.24	1.19	0.12	—	210	0.8
L-5	0.04	0.25	1.21	0.12	0.26	150	1.3
L-6	0.04	0.24	1.20	0.12	0.51	100	2.0
L-7	0.04	0.24	1.18	0.12	0.69	70	2.7

mm の板に圧延した。1 t の鋼塊は鍛造によつて丸棒にし、これを用いて直径 4½ inch (114.3 mm) のシームレス鋼管に圧延した。

このようにして得られた板およびパイプから直径 10 mm、長さ 40 mm の小型 Jominy 試験片を切り出し焼入性試験片とした。Jominy 試験は著者らが開発した装置⁶⁾を用いて行つた。その時のオーステナイト化条件は前報⁴⁾⁵⁾と同じ 940~950°C (1 213~1 223 K)、5 s である。

成分表には実験結果の解析に便利なように、それぞれの鋼に対応させて次に述べる焼入性の測定結果および GROSSMANN の定義による焼入性 (D_{I-50}) の測定値を示した。

2.2 焼入性の測定方法と焼入性の計算式の求め方

本実験における焼入性は“90% マルテンサイト組織が得られる臨界冷却速度・ V_{C-90} (°C/s)”で定義した。Jominy 試験片における 90% マルテンサイト位置は前

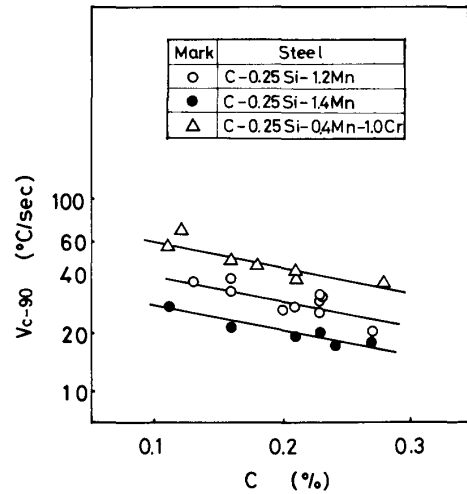


Fig. 1. Effect of C on hardenability of B-added steels.

報⁴⁾に述べたように硬さから求めた。Jominy 試験は 3 本の試験片を用いて行い、Jominy 曲線は 3 本からのデータを重ねて作製した。

著者らは B 鋼の焼入性の研究で B 量によつて焼入性が変化する範囲では $\log V_{C-90}$ と free-B 量との間には直線関係が成立することを示した⁴⁾。もしこの関係が他の合金元素の場合にも成り立ち、かつ元素相互間の相互作用がなければ鋼の焼入性は次の式で表せるはずである。

$$\log V_{C-90} = C_0 - \sum K_i X_i \dots\dots\dots (1)$$

ここで、 C_0 は定数、 K_i は元素 i に固有な定数、 X_i は元素 i の濃度 (%) を示す。

定数 K_i は合金濃度 X_i と $\log V_{C-90}$ との関係を示す直線の傾きから求められ、 C_0 は合金濃度から求まる値、 $\sum K_i X_i$ と $\log V_{C-90}$ との関係から求められる。

そこで本実験では以上述べた考えに基づき、まず最初に各合金元素の K_i 値を求めることにした。

3. 実験結果

3.1 B 鋼の焼入性におよぼす合金元素の影響

Table 1~6 に B 鋼の焼入性の測定結果を示す。焼入性は他の文献値との比較が容易なように、 D_I 値で示された 50% マルテンサイト焼入性 (D_{I-50}) をも求めた。

まず最初に C の影響について述べる。Fig. 1 は Table 1 に示した測定結果を C 量と $\log V_{C-90}$ との関係で整理した図である。この図から① $\log V_{C-90}$ と C 量との間には直線関係が成り立ち、②この直線の傾きは鋼の成分が異なつても変化しないことがわかる。これらの結果は著者らが予想したように C の効果は定数 K_C 値で表示でき、この値は他の合金成分の影響を受けないことを示し

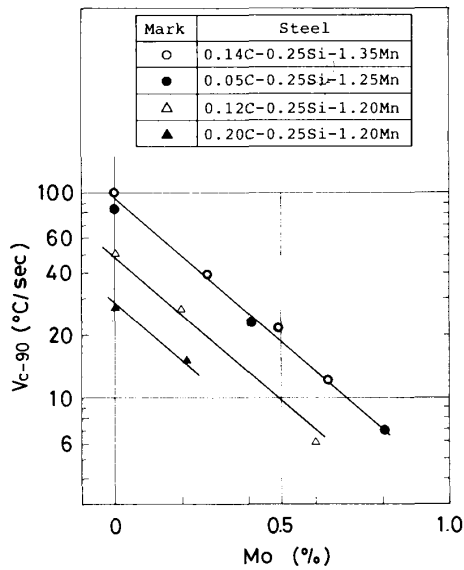


Fig. 2. Effect of Mo on hardenability of B-added steels.

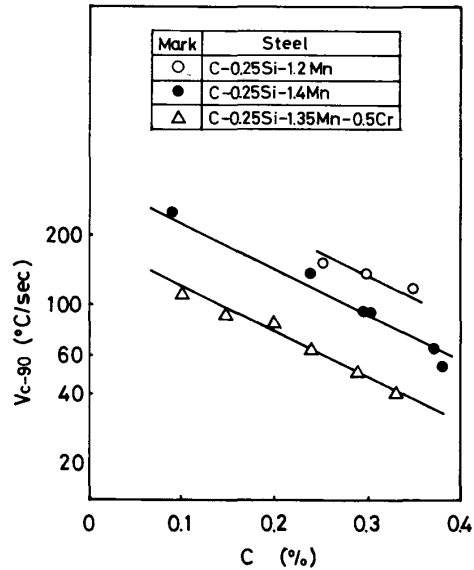


Fig. 3. Effect of C on hardenability of B-free steels.

Table 10. K_i -value of each alloying element.

Case	Element					
	C	Si	Mn	Ni	Cr	Mo
B-added	2.0	0.30	0.75	0.34	0.60	1.5
B-free	2.0	*	0.75	0.34	0.60	0.75

* Not observed

ている。Fig. 1 から K_C 値を求めると $2.0/C(\%)$ が得られた。

続いて Si, Mn 等の元素の K_i 値を Table 2~6 に示した測定値を用いて求めた。Fig. 2 にその代表例として Mo についての解析結果を示す。Mo の場合も C の場合と同様に Mo 固有の K_{Mo} 値があることがわかる。この図から K_{Mo} を求めると $1.5/Mo(\%)$ が得られた。他の元素もそれぞれの元素固有の K_i 値があることがわかり、それらの値をまとめて Table 10 に示した。

3.2 B-free 鋼の K_i 値

B 鋼で行ったのと全く同じ解析方法で B-free 鋼における各元素の K_i 値を求めた。この場合も B 鋼と同様、各元素に固有の K_i 値があることがわかった。その解析結果の一例を Fig. 3, 4 に示す。

Fig. 3 は C の影響を示す図である。この図から $K_C = 2.0$ が得られ、B 有無によつて K_C 値は不変であることがわかった。

ところが Mo の場合は B の有無によつて異なる K_{Mo} 値が得られた。Fig. 2 で求めた B 鋼の K_{Mo} 値は $1.5/Mo(\%)$ であつたのに対し、Fig. 4 から求まる B-free 鋼の K_{Mo} は $0.75/Mo(\%)$ であつた。この結果

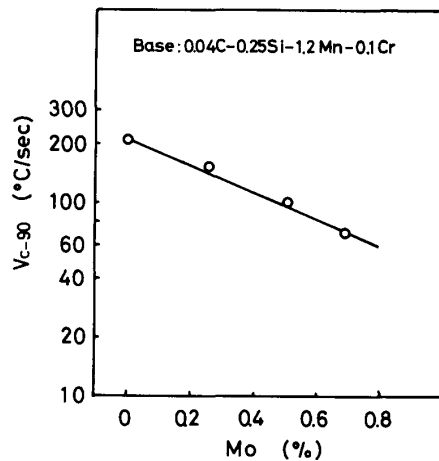


Fig. 4. Effect of Mo on hardenability of B-free steel.

は Mo-B 間には相互作用があり、Mo の効果は B 添加で 2 倍になることを示している。

B-free 鋼において求められた K_i 値も Table 10 にまとめて示した。このように各元素の K_i 値が求められたのでこれらの数値を基に焼入性の計算式を求めた。

3.3 焼入性の計算式

Mo の効果は B の有無によつて異なつたので、とりあえず計算式は B 鋼と B-free 鋼にわけて考えることにした。

Table 10 に示した K_i 値を用いると、B 鋼の場合(1)式の合金濃度に依存する項は次式で書き表すことができる。

$$\Sigma K_i X_i = 2.0 C + 0.30 Si + 0.75 Mn + 0.34 Ni + 0.60 Cr + 1.5 Mo = 0.75 \beta$$

ここで

$$\beta(\%) = 2.7C + 0.4 Si + Mn + 0.45 Ni + 0.8 Cr + 2 Mo \quad (2)$$

(2)式は焼入性に対して有効な合金濃度を Mn 量を基準に表示したもので、 β 値は焼入性の指標となる Mn 当量式といえることができる。

(1)式の定数 C_0 は $C_0 = \log V_{C-90} + 0.75\beta$ で与えられるから、本実験に使用した鋼からこの値を求め、その平均値を(1)式の C_0 とした。すると(1)式は次のようになった。

$$\log V_{C-90} = 2.94 - 0.75 \beta \quad (3)$$

これは Mn 当量 (β 値) を用いた B 鋼の焼入性の計算式である。この実験式の精度を確認するため本実験に使用した鋼を含む B 鋼で β 値と $\log V_{C-90}$ との対応関係を調べた。その結果を Fig. 5 に示す。この図中に示した実線は(3)式に対応する直線である。点線は $\pm 30\%$ の誤差範囲を示す。この図からわかるとおり、B 鋼の焼入性 (V_{C-90}) は β 値を用いて $\pm 30\%$ の精度で予測できることがわかった。

次に B-free 鋼の焼入性の計算式を求めた。B-free 鋼の場合、Mo の効果は B 鋼の場合の半分の大きさであるから、Mn 当量式は次のようにおいた。

$$\beta'(\%) = 2.7C + 0.4 Si + Mn + 0.45 Ni$$

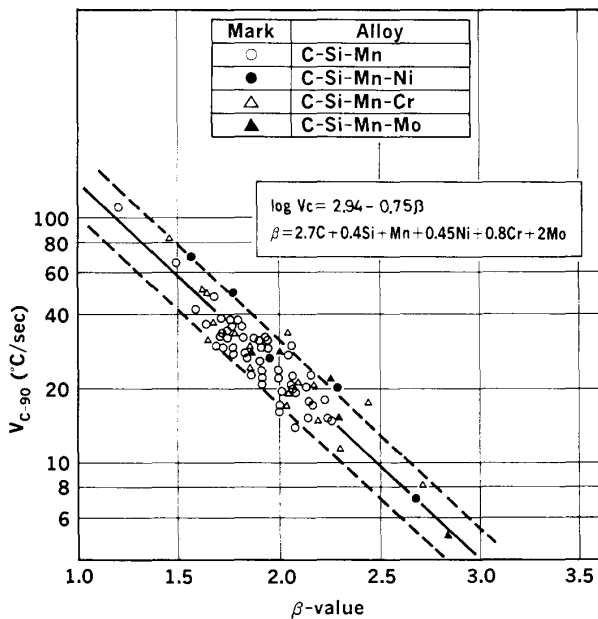


Fig. 5. Relationship between β -value and critical cooling velocity of B-added steels.

$$+ 0.8 Cr + Mo \quad (4)$$

続いて B 鋼で行ったのと同じ方法で定数項を求めると、B-free 鋼の焼入性の予測式として次式が得られた。

$$\log V_{C-90} = 3.69 - 0.75 \beta' \quad (5)$$

(5)式は実験条件から明らかなように γ 粒度が ASTM-No. で 7~8 番のときの予測式である。一般には B-free 鋼の焼入性は γ 粒度に依存するから(5)式は粒度の関数として表示されねばならない。今回の実験では通常の焼入温度範囲での鋼の焼入性の予測式を求めるとを主目的にしているの、とりあえず(5)式を B-free 鋼の焼入性の予測式とすることにした。

さてここで B-free 鋼の焼入性予測式が得られたので、この式を(3)式と比較することで B の効果の大きさがわかる。Mo-free 鋼の場合、 $\beta = \beta'$ となるので(3)式と(5)式の定数項の差が B の効果の大きさに対応する。この差は Mn 当量にして 1.0% であるので、B の効果はその効果が最大るとき Mn を 1% 添加したに等しい効果があるといえる。

4. 考 察

4.1 B-factor と β 値の関係

GROSSMANN の式では B の効果は f_B で表された。ところが、この f_B は測定者によつて値が異なり、今日までその理由は明らかにされていない。

著者らは本実験において焼入性を臨界冷却速度で表示すれば B の効果は① Mo の効果を倍増させる効果と② Mn を 1% 添加したのに等しい効果があることを見出した。ここで見出された B の効果を f_B 値を用いて表現することによりこれまで不明だった f_B 値の不一致の理由について考察してみよう。

f_B 値は D_I 値の比として定義されているから、(3)、(5)式の臨界冷却速度を D_I 値に変換する必要がある。 D_I 値と臨界冷却速度との関係はすでにわかっているの⁴⁾、この関係を用いて変換を行った。その結果を Fig. 6-(b) に示す。この図で B-added は(3)式から、B-free は(5)式からの変換結果を示している。

Mo-free の場合、 $\beta = \beta'$ となるのでこの場合の f_B 値は β の関数として表すことができる。各 β 値のところでは f_B 値を計算し、これを β の関数として表示したのが Fig. 6-(a) である。この図からわかるとおり、 β 値の増加とともに f_B 値は減少することがわかる。またこの f_B 値の変化を D_I° 値 (B-free 鋼の D_I 値) との関係から見ると、 D_I° の増加とともに f_B 値は減少することがわかる。この現象は前報⁴⁾で著者らが報告した結果と一致する。

以上述べたように、本実験からも f_B 値は一定にならず合金濃度 (あるいは D_I° 値) の関数になることが確認された。したがってこれまで多くの研究者によつて求められた f_B 値が異なるのはむしろ当然で、供試鋼の成分によつては f_B 値が 3~4 の値になることもあり得ることが明確になった。

次にこれまで文献に発表されているさまざまな f_B 値がこの β 値から説明できるかどうか検討してみよう。

4.2 文献に報告されている f_B 値の β 値からの解析

これまで報告されている f_B 値のうちから代表的なものを選び、それを年代順に整理した結果を Table 11 に示す。各研究者によつて D_I° (B-free 鋼の焼入性) の求め方が異なるので、この表にはその方法を区別して表示した。この表からわかるとおり、一部の研究者は計算による D_I° を用いて f_B 値を求めていることがわかる。

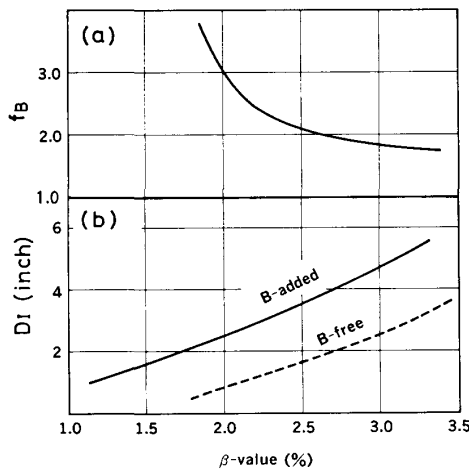


Fig. 6. Relationship between β -value and D_I -value converted from $V_{C.90}$. Boron factor (f_B) is obtained as D_I (B-added)/ D_I (B-free).

前報⁵⁾ で明らかにしたように、GROSSMANN の式は必ずしも精度が良くないので、 D_I° の計算値を用いて求められた f_B 値は真の値と異なる可能性がある。このような計算による誤差をさけるため、文献値と著者らの結果との比較は焼入性の測定値で直接行うことにした。この比較で良い一致が得られれば、当然のことながら f_B 値も著者らの求めた結果と一致するといえる。

著者らの実験においては B-C 間の相互作用は認められなかつた (Fig. 1, 3)。しかしこれまでの多くの研究者はこの相互作用を指摘している⁸⁾⁹⁾¹³⁾¹⁴⁾¹⁶⁾。したがつてある条件によつては B-C の相互作用が現れる可能性があるから、著者らの結果と文献値との比較は C 量と対応させながら行うことにした。

著者らの結果と文献に報告されている測定値との一致の程度を $|D_{obs} - D_{cal}|$ で表し、この値を C 量に対してプロットした。 D_{cal} は著者らの結果 ((3)式と Fig. 6) から求めた焼入性である。Fig. 7 にその結果を示す。こ

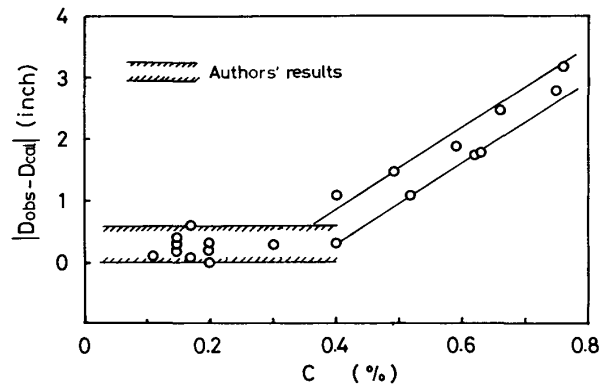


Fig. 7. Relation between difference of observed D_I and calculated D_I Value of B-added steels and C-content.

Table 11. Boron-factors observed by different researchers.

Year	Researcher	D_I -value		B-factor	Max- f_B	Ref. No.
		B-free	B-added			
1942	M. A. GROSSMANN	●	●		1.496	(1)
1944	W. CRAFTS	○	○		1.76	(7)
1946	R. A. GRANGE	●	●	$1+1.8(0.82-C)$		(8)
1948	G. D. RAHRER	●	●	$1+1.5(0.9-C)$		(9)
1961	R. A. GRANGE	●	●	$1+1.5(0.9-C)$		(10)
1968	B. M. KAPADIA	●	●		2.9	(11)
1968	YAMADA	○	○		1.8	(12)
1972	D. H. BREEN	○	○	$1+1.76(0.74-C)$		(13)
1973	R. F. KERN	○	○	$1+1.6(0.81-C)$		(14)
1973	G. F. MELLODY	×	●		3.2	(15)
1974	D. T. LLEWELLYN	●	●	$1+2.7(0.85-C)$		(16)
1974	R. HABU	×	●		1.5	(17)
1977	K. YAMANAKA	×	●			(18)
1978	R. TANAKA	○	○		1.8	(19)
1979	F. NAKASATO	×	○		2.65	(20)

Note : ×...Not observed
 ○...Observed but data not shown
 ●...Observed and data shown

の図には著者らが実験に供した試料のC範囲と実験誤差範囲を斜線で示した。この図からわかるとおり $C \leq 0.4\%$ の範囲では D_I の計算値と実測値の差が小さいことがわかる。つまり、 $C \leq 0.4\%$ の範囲では B-C の相互作用は考える必要もなく、文献における測定値と著者らの結果は一致するといえる。このことからC増加に伴う f_B 値の減少は、B の効果が減少したためおこつた現象ではなく、C の増加によつて大きくなつた分母の値が影響して商としての f_B 値が小さくなつたにすぎないと説明できる。

しかし、 $C > 0.4\%$ では計算値と実測値の差はC量とともに増大した。

4.3 f_B 値とCとの関係

$C = 0.4\%$ 付近を境に(3)式があてはまらなくなる理由として次の二つが考えられる。

① $C > 0.4\%$ では B-C の相互作用が現れ、B の効果はC量とともに減少する。

② $C = 0.4\%$ 付近でCの効果の大きさが変わる。 $C > 0.4\%$ では、 $C \leq 0.4\%$ のときに比べ焼入性に対するCの効果は小さい。

まず①の可能性について考察する。

これまでBの効果は γ 粒界に偏析したBが粒界のエネルギーを下げることで $\gamma \rightarrow \alpha$ 変態を抑制し、その結果として焼入性を向上させると考えられてきた²¹⁾²²⁾。本実験のように90%マルテンサイト焼入性を評価の対象とする場合、Bの効果としてはベイナイト変態を抑制する効果を評価していると考えて良い。HONEYCOMBEら²³⁾はベイナイト変態とCとの関係を調べ、 $C > 0.4\%$ になるとベイナイト変態の際のCの拡散はベイナイトのlath境界に沿つての拡散が優位となり、その結果上部ベイナイト変態がおこりやすくなることを指摘している。このように焼入性を決定する変態生成物が変わればBの効果の程度も変わることも考えられる。そしてBの効果はこの上部ベイナイト変態を抑制する効果の方が小さいとすると、C量の増加に伴うBの効果の減少は容易に理解できる。

Cの増加により変態生成物に変化すれば当然焼入性に対するCの効果も変化することが予想される。またCの増加によつて炭化物の生成が容易になり、そのため短時間のオーステナイト化ではCr、Mo等の一部が未溶解で残る可能性もある。今回の実験では合金の濃度範囲を実用範囲にとどめたため、 $C > 0.4\%$ での実験は行わなかつた。①の疑問の解明はもちろん、②の疑問の解明のためにもこのC範囲の実験は今後行う必要がある。

また本実験ではMo-Bの相互作用を実験的に明らか

にした。しかしそのメカニズムの解明までは至らなかつた。今後、この問題はBの偏析・析出曲線やMo鋼の $\gamma \rightarrow \alpha$ 変態特性を調べる等の方法で解明してゆく考えである。

5. 結 論

焼入性の計算式として広く用いられてきたGROSSMANNの式は必ずしも精度が良くない。そのため、この式に代わる新しい合理的な式を求めるため、Jominy試験を行い、臨界冷却速度 V_{C-90} ($^{\circ}\text{C}/\text{s}$) で表示された焼入性と合金濃度との関係を調べた。その結果、下記のことが明らかとなつた。

1) B鋼 (free-B ≥ 5 ppm) の焼入性は粒度に無関係に次の式を用いて計算できる。

$$\log V_{C-90} = 2.94 - 0.75\beta$$

$$\beta(\%) = 2.7C + 0.4\text{Si} + \text{Mn} + 0.45\text{Ni} + 0.8\text{Cr} + 2\text{Mo}$$

ここで V_{C-90} は90%マルテンサイト組織が得られる臨界冷却速度

2) B-free鋼の場合の計算式は次の式で与えられる。

$$\log V_{C-90} = 2.94 - 0.75(\beta' - 1)$$

$$\beta'(\%) = 2.7C + 0.4\text{Si} + \text{Mn} + 0.45\text{Ni} + 0.8\text{Cr} + \text{Mo}$$

ただし、この場合の γ 粒度はASTM-No.で7~8番である。

3) 上記1)、2)からわかるとおり、焼入性に対するBの効果は二種類ある。一つは直接効果で、他の一つはMoとの相互作用である。前者は1%Mn添加と等価であり、後者はMoの効果をも2倍にする効果である。

4) f_B 値は β 値の関数である。 β の増加に伴い f_B 値は単調に減少する。これまで報告されていたCによる f_B 値の減少は、B-Cの相互作用による結果ではなく、Cにより β 値が増加した結果生じたとして説明できる。

5) $\beta \approx 2\%$ 程度の低合金鋼で f_B 値を求めると3.0付近の値が得られる。これより合金量が増えると、 f_B 値は小さくなる。

なお、本研究で見出された焼入性の予測式は1977年以来、新日本製鉄(株)のシームレス鋼管の成分設計に応用されている。

文 献

- 1) M. A. GROSSMANN: Trans. Metall. Soc. AIME, **150** (1942), p. 227
- 2) 大和久重雄: 熱処理, **15** (1975) 3, p. 146
- 3) ASTM-A255
- 4) 上野正勝, 伊藤亀太郎: 鉄と鋼, **74** (1988), p. 910
- 5) 上野正勝, 伊藤亀太郎: 鉄と鋼, **74** (1988), p. 918

- 6) 上野正勝, 中村勝治, 伊藤亀太郎, 峰松祐行: 鉄と鋼, **68** (1982), p. 155
- 7) W. CRAFTS and J. L. LAMONT: Trans. Metall. Soc. AIME, **158** (1944), p. 157
- 8) R. A. GRANGE and T. M. GARVAY: Trans. ASM, **37** (1946), p. 136
- 9) D. G. RAHRER and C. D. ARMSTRONG: Trans. ASM, **40** (1948), p. 1099
- 10) R. A. GRANGE and J. B. MITCHELL: Trans. ASM, **53** (1961), p. 157
- 11) B. M. KAPADIA, R. M. BROWN and W. J. MURPHY: Trans. Metall. Soc. AIME, **242** (1968), p. 1689
- 12) 山田雄康: 三菱技報, **2** (1968) 1, p. 32
- 13) D. H. BREEN and G. H. WALTER: Metal Prog., **102** (1972) 12, p. 42
- 14) R. F. KERRN: Metal Prog., **103** (1973) 3, p. 90
- 15) G. F. MELLOY, P. R. SLIMMON and P. P. PODGURSKY: Metall. Trans., **4** (1973), p. 2279
- 16) D. T. LLEWELLYN and W. T. COOK: Met. Technol., **1** (1974), p. 517
- 17) 土生隆一, 宮田政祐, 関野昌蔵, 合田 進: 鉄と鋼, **60** (1974), p. 1470
- 18) K. YAMANAKA and Y. OHMORI: Trans. Iron Steel Inst. Jpn., **18** (1978), p. 404
- 19) 田中良治, 磯川憲二, 渡辺敏幸, 福井彰一: 鉄と鋼, **64** (1978), S452
- 20) F. NAKASATO and M. TAKAHASHI: Met. Technol., **6** (1979), p. 102
- 21) C. R. SIMCOE, A. E. ELSEA and G. K. MANNING: Trans. AIME, **203** (1955), p. 193
- 22) M. UENO and T. INOUE: Trans. Iron Steel Inst. Jpn., **13** (1973), p. 210
- 23) R. W. K. HONEYCOMBE and F. B. PIKERING: Metall. Trans., **3** (1972), p. 1099