

© 1988 ISIJ

論 文

GROSSMANN の焼入性予測式の実験的検討

上 野 正 勝*・伊 藤 亀太郎*²

Empirical Verification of GROSSMANN'S Equation

Masakatsu UENO and Kametaro ITOH

Synopsis:

According to GROSSMANN'S equation, the effect of alloying element on the hardenability of a steel is expressed in terms of the multiplying factor. Its reliability, however, becomes doubtful since it was confirmed that B-factor is not a function of only B-content. Therefore, in order to confirm whether GROSSMANN'S equation is reliable or not, the relation between a multiplying factor of different alloy element and its content has been investigated. The results obtained are as follow:

- 1) The multiplying factor f_X is a function of D_S as well as content of alloying element X. D_S is the hardenability of the steel before addition of alloying element X. With increasing D_S , f_X becomes smaller.
- 2) Boron factor, f_B , is a function of D_I° and shown as follows,
 $f_B = 1 + 1.6/D_I^\circ$, where D_I° is the hardenability expressed by ideal critical diameter of B-free steel.
- 3) Accordingly, GROSSMANN'S equation is not always realized. When D_S is smaller than 2 inch and the hardenability of the steel after alloying element added is less than 3~3.5 inch, GROSSMANN'S equation is available.
- 4) There is more intimate relation between the critical cooling velocity and alloy content, X than between D_I and X. D_I is ideal critical diameter of a steel.

Key words: heat treatment; alloying element; hardenability; quality controll.

1. 緒 言

調質鋼の成分設計を行う場合、焼入性は重要な検討項目の一つである。そのためこれまで多くの研究者によって鋼の化学成分から焼入性を計算する方法が提案されてきた。なかでも GROSSMANN の式^{1)~3)} が良く知られており、計算の簡便さと実用性の点から広く一般に使用されてきた。

この GROSSMANN の式では焼入性に対する合金元素の効果は焼入性倍数で表示される。ところがボロン (B) の焼入性倍数 f_B はこれまで多くの研究者^{1)4)~16)} によって求められてきたが、残念ながらまだ統一された値は見出されていない。したがって GROSSMANN の式を使って B 鋼の焼入性の計算は一般的にはできないのが現状である。B は焼入性向上元素として極めて有用な元素であるから、実用的な面から B 鋼の焼入性の計算式の確立が強く望まれていた。

前報¹⁷⁾ において著者らは B の焼入性効果について次

の 2 点を明らかにした。

① f_B 値は B だけの関数ではなくその鋼の基本成分 (B を除いた成分) の焼入性にも依存する。

② 焼入性を臨界冷却速度で表し、B 添加による焼入性の変化の程度をこの冷却速度の比で表示すると、この比の値は B だけの関数となる。

以上二つの事実は B 鋼の焼入性を GROSSMANN の式を用いて表すことには限界があり、臨界冷却速度を使って焼入性を表示した方が汎用性のある焼入性の計算式が得られる可能性があることを示唆している。

f_B 値が GROSSMANN の仮定に一致しないと他の合金元素の焼入性倍数 f_X も元素 X だけの関数にならない可能性がある。もしこの予見が正しければ GROSSMANN の式は B の有無にはかかわらず一般的には成立しないことになる。そこで本実験では臨界冷却速度を用いて新しい焼入性の計算式を求める前に、それぞれの元素から見て GROSSMANN の式の妥当性について検討した。

昭和 62 年 4 月 6 日受付 (Received Apr. 6, 1987)

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

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

2. 実験結果

2.1 試料

本実験に使用した鋼の化学成分を Table 1~4 に示す。これらの成分表には実験結果（焼入性の測定結果）もあわせて示した。この方が実験結果を化学成分と対比させながら解析するのに便利だからである。

Table 1 は B-free 鋼の、Table 2~4 は B 添加鋼の化学成分を示す。

B 添加鋼の場合、B の効果を最大かつ一定にするために前報¹⁷⁾の結果に基づき固溶 B が 5 ppm 以上になるよう成分制御を行った。具体的には N の固定のため $\Delta Ti = Ti - 3.4N \geq -0.007(\%)$ になるよう、Ti を添加しそして B を 10 ppm 以上添加した。

これらの鋼は主として 150 kg の真空溶解炉を用いて溶解した。注目する（変化させる）合金元素以外の元素量はできるだけ一定になるよう分鑄を行って合金濃度を

変化させた。3 分鑄して得られた 50 kg の鋼塊を 1250°C、2 h 加熱後、熱間圧延で 13 mm の板に圧延して供試材とした。

分鑄しなかつた 150 kg の鋼塊は粗圧延でいつたん 70 mm 厚のスラブに圧延した。このスラブを 1250°C、2 h 加熱し、熱間圧延で 13 mm の板にした。

これら熱延ままの板から直径 10 mm、長さ 40 mm の小型ジョミニー試験片を切り出し、焼入性の試験片とした。

2.2 焼入性試験

先述の小型ジョミニー試験片を用い、我々が開発した焼入性試験装置¹⁸⁾を使ってジョミニー試験を行った。この時のオーステナイト化条件は前回と同じく、940~950°C 加熱で、5 s 保持とした。焼入性の決定に必要なジョミニー曲線は同一の鋼から 3 本の試験片を使って試験を行い、その結果を重ねて作製した。このようにして作製されたジョミニー曲線から 50% マルテンサイト組

Table 1. Chemical composition of steels (%) (B-free steel).

Steel	C	Si	Mn	Cr	Mo	Nb	Ti	Al	P	S	N	D_{I-obs}
M-31	0.20	0.25	0.78	0.98	—	—	—	0.029	0.008	0.009	0.0017	2.8
M-32	0.18	0.24	1.18	0.98	—	—	—	0.024	0.008	0.009	0.0017	3.2
M-33	0.19	0.24	1.39	0.98	—	—	—	0.024	0.009	0.010	0.0016	3.6
A-60	0.18	0.11	0.50	0.49	0.29	0.027	0.010	0.033	0.003	0.001	0.0036	1.5
A-61	0.18	0.11	0.73	0.49	0.29	0.027	0.010	0.028	0.003	0.001	0.0032	1.8
A-62	0.16	0.11	0.99	0.49	0.29	0.027	0.010	0.031	0.003	0.001	0.0031	2.6
A-63	0.16	0.12	1.42	0.49	0.30	0.027	0.010	0.030	0.003	0.001	0.0030	3.0
M-29	0.19	0.25	1.33	0.49	—	—	—	0.031	0.004	0.005	0.0030	2.6
M-30	0.19	0.25	0.81	0.51	—	—	—	0.029	0.005	0.005	0.0021	3.6
S-21	0.09	0.26	1.01	0.40	—	—	—	0.047	0.005	0.006	0.0065	1.0
S-22	0.10	0.26	2.06	0.42	—	—	—	0.046	0.005	0.007	0.0058	2.3
S-76	0.21	0.26	1.01	0.52	—	—	—	0.041	0.006	0.005	0.0017	1.6
S-77	0.21	0.26	1.01	0.96	—	—	—	0.042	0.006	0.006	0.0016	2.1
S-78	0.20	0.26	1.01	1.49	—	—	—	0.043	0.006	0.007	0.0018	3.6
L-4	0.04	0.24	1.19	0.12	—	—	—	0.027	0.009	0.008	0.0080	0.8
L-5	0.04	0.25	1.21	0.12	0.26	—	—	0.029	0.010	0.008	0.0079	2.0
L-6	0.04	0.24	1.20	0.12	0.51	—	—	0.021	0.010	0.008	0.0079	2.0
L-7	0.04	0.24	1.18	0.12	0.69	—	—	0.021	0.010	0.008	0.0074	2.7

Table 2. Chemical composition of steels (%) (Effect of Mn on hardenability of B-added steel).

Steel	C	Si	Mn	Cr	Ti	Al	P	S	N	B	ΔTi	D_{I-obs}	D_{I-cal}	f_B	Mark
S-34	0.05	0.25	0.97	—	—	0.036	0.010	0.009	0.0019	0.0021	—	1.5	0.3	5.0	○
S-35	0.05	0.25	1.27	—	—	0.035	0.009	0.008	0.0016	0.0020	—	2.0	0.4	5.0	
S-36	0.05	0.25	1.66	—	—	0.038	0.011	0.011	0.0019	0.0021	—	2.4	0.5	4.8	
S-37	0.05	0.25	1.44	—	—	0.032	0.009	0.008	0.0018	0.0023	—	2.2	0.5	4.4	
S-19	0.09	0.25	1.01	0.38	—	0.033	0.012	0.018	0.0023	0.0016	—	2.6	1.7	1.5	●
X-0	0.10	0.25	1.36	0.41	—	0.026	0.009	0.007	0.0017	0.0009	—	3.2	1.2	2.7	
S-6	0.11	0.28	1.34	0.40	—	0.036	0.008	0.007	0.0018	0.0012	—	3.0	1.2	2.5	
M-2	0.26	0.26	1.00	—	—	0.041	0.009	0.007	0.0027	0.0015	—	2.3	0.8	2.9	△
NS-4	0.24	0.24	0.99	—	0.025	0.039	0.009	0.007	0.0016	0.0030	0.020	2.4	0.8	3.0	
M-26	0.23	0.26	1.19	—	0.025	0.044	0.011	0.009	0.0037	0.0015	0.012	2.6	0.9	2.9	
K-25	0.25	0.25	1.16	—	0.021	0.039	0.009	0.004	0.0061	0.0013	0.0	2.8	0.9	3.1	
M-16	0.24	0.28	1.42	—	0.023	0.069	0.005	0.006	0.0034	0.0020	0.011	3.2	1.0	3.2	
M-6	0.26	0.28	1.47	—	—	0.070	0.005	0.006	0.0010	0.0019	—	3.5	1.1	3.2	
R-11	0.20	0.25	0.25	1.18	0.023	0.026	0.009	0.003	0.0034	0.0020	0.011	3.0	1.1	2.7	
R-12	0.20	0.25	0.51	1.18	0.023	0.026	0.009	0.003	0.0034	0.0020	0.011	3.5	1.6	2.2	
R-13	0.20	0.25	0.76	1.18	0.023	0.026	0.009	0.003	0.0034	0.0020	0.011	4.2	2.3	1.8	

Table 3. Chemical composition of steels (%) (Effect of C on hardenability of B-added steel).

Steel	C	Si	Mn	Cr	Cu	Ti	Al	P	S	N	B	ΔTi	D_{I-obs}	D_{I-cal}	f_B	Mark
S-37	0.05	0.25	1.44	—	—	—	0.032	0.010	0.008	0.0018	0.0023	—	2.1	0.5	4.2	
S-38	0.05	0.25	1.42	0.50	—	—	0.031	0.009	0.009	0.0020	0.0023	—	2.8	1.0	2.8	○
S-39	0.05	0.25	1.42	1.02	—	—	0.027	0.010	0.011	0.0022	0.0022	—	3.8	1.5	2.5	
NS-15	0.10	0.25	1.22	0.25	—	0.024	0.028	0.015	0.006	0.0074	0.0015	-0.001	2.8	1.9	1.5	
NS-16	0.10	0.25	1.21	0.78	—	0.024	0.030	0.012	0.006	0.0078	0.0008	-0.003	3.3	0.9	3.7	⊙
NS-17	0.09	0.26	1.22	0.62	—	0.022	0.034	0.013	0.005	0.0082	0.0011	0.010	3.0	1.5	2.0	
K-33	0.18	0.23	1.16	—	—	0.019	0.023	0.010	0.006	0.0037	0.0012	0.006	2.6	1.7	1.5	
NS-20	0.18	0.26	1.20	0.31	—	0.024	0.037	0.010	0.008	0.0064	0.0020	0.002	3.3	1.3	2.5	
NS-21	0.18	0.26	1.22	0.10	—	0.025	0.033	0.010	0.009	0.0085	0.0016	-0.004	2.6	0.9	2.9	△
NS-22	0.19	0.26	1.21	0.61	—	0.025	0.035	0.011	0.007	0.0075	0.0019	-0.001	3.8	1.8	2.1	
I-11	0.18	0.24	0.42	0.97	0.29	0.020	0.020	0.014	0.013	0.0057	0.0018	0.0	2.3	1.1	2.1	
I-12	0.18	0.26	0.42	1.29	0.30	0.021	0.021	0.015	0.014	0.0060	0.0018	0.0	2.7	1.4	1.9	▲
I-13	0.19	0.26	0.42	0.60	0.30	0.021	0.023	0.014	0.012	0.0048	0.0018	0.005	1.9	0.9	2.1	
I-14	0.28	0.26	0.42	1.33	0.30	0.021	0.021	0.015	0.013	0.0049	0.0017	0.004	3.7	1.8	2.1	
I-15	0.28	0.26	0.41	0.59	0.29	0.021	0.023	0.016	0.015	0.0055	0.0016	0.002	2.0	1.0	2.0	◇
I-16	0.28	0.26	0.41	0.96	0.29	0.021	0.024	0.017	0.015	0.0053	0.0017	0.003	2.6	1.4	1.9	
K-41	0.13	0.25	1.20	—	—	0.023	0.028	0.011	0.009	0.0058	0.0011	0.004	2.3	0.6	3.8	
NS-18	0.14	0.26	1.22	0.63	—	0.024	0.040	0.016	0.011	0.0056	0.0018	0.005	3.7	1.6	2.3	●
NS-19	0.13	0.25	1.19	0.30	—	0.022	0.034	0.014	0.010	0.0066	0.0010	-0.000	2.9	1.0	2.9	

Table 4. Chemical composition of steels (%) (Effect of Mo on hardenability of B-added steel).

Steel	C	Si	Mn	Mo	Ti	Al	P	S	N	B	ΔTi	D_{I-obs}	D_{I-cal}	f_B	Mark
L-8	0.13	0.23	1.33	—	0.015	0.020	0.008	0.006	0.0070	0.0007	-0.009	1.5	0.7	2.1	
L-9	0.15	0.24	1.36	0.28	0.016	0.021	0.009	0.006	0.0068	0.0014	-0.007	2.7	1.2	2.3	
L-10	0.14	0.24	1.34	0.49	0.016	0.022	0.009	0.006	0.0065	0.0012	-0.006	3.3	1.9	1.7	○
L-11	0.14	0.25	1.35	0.69	0.015	0.021	0.009	0.006	0.0066	0.0011	-0.007	3.7	2.3	1.6	
S-67	0.05	0.25	1.23	—	—	0.034	0.003	0.005	0.0027	0.0012	—	1.6	0.4	4.0	
S-68	0.05	0.25	1.22	0.41	—	0.034	0.004	0.005	0.0021	0.0015	—	3.9	0.9	4.3	●
S-69	0.05	0.25	1.22	0.81	—	0.036	0.004	0.005	0.0025	0.0013	—	5.5	1.4	3.9	
S-73	0.13	0.27	1.21	—	—	0.036	0.005	0.007	0.0021	0.0021	—	2.1	0.7	3.0	
S-74	0.12	0.26	1.21	0.20	—	0.036	0.005	0.005	0.0017	0.0023	—	3.0	1.0	3.0	△

織となるジョミニ距離を求め、これを D_I 値に変換した。50% マルテンサイト硬さは HODGE らが求めた結果に我々の実験結果を重ねて作製した図¹⁷⁾を用いて求めた。

2.3 GROSSMANN の式の合理性の検証方法

GROSSMANN の定義では合金元素 X の焼入性倍数は合金濃度を X、その元素に固有な定数を m とすると次の式で表される。

$$f_x = 1 + m \cdot X \dots\dots\dots (1)$$

したがって GROSSMANN の式が合理的であるかどうかの検証は (1) 式が常に成立するかどうかを調べれば良い。

その代表的方法として f_x の測定値と X との対応関係を調べる方法が良く用いられる。しかしこの方法は①必ず $X=0(\%)$ のときの焼入性 (D_s) を求める必要がある② f_x は D_s を基準にして求められるので、 D_s の測定誤差はすべての f_x 値に影響する③合金元素が Si や Mn の場合、このときの D_s は実用鋼にない鋼の焼入性を求めることになり、これらの値が特異点とならない保証はないこと。もし特異点となればそれだけで (1) 式は成立しなくなり、この方法による検証は無意味となる、等の

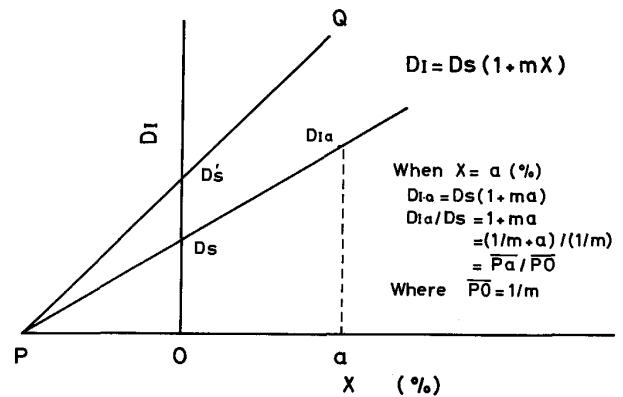


Fig. 1. Schematic representation of GROSSMANN's equation.

理由から次に述べる方法で (1) 式の妥当性の検証を行った。

今注目する元素 X を添加する前の焼入性を D_s とし、この鋼に元素 X を $a(\%)$ 添加したときの焼入性を D_{I-a} とすると、この両者の関係は (2) 式で与えられる。

$$D_{I-a} = D_s(1 + m \cdot a) \dots\dots\dots (2)$$

ここで m は元素 X に固有な定数。

これを変形すると (3) 式が得られる。

$$D_{I-a} / D_S = 1 + m \cdot a = (1/m + a) / (1/m) \dots\dots\dots (3)$$

(3)式は Fig. 1 に示すように原点 O から $-1/m$ 離れた X 軸上に点 P をとれば, $\triangle PD_S O$ と $\triangle PD_{I-a} a$ とは相似になることを示している. すなわち, 点 P, D_S , D_{I-a} は同一直線上にあることになる. D_S が D_S' に変わっても(3)式が成立する限り, D_{I-a} は P と D_S' を結んだ延長線 (Q) 上を動くことを意味する. GROSSMANN の式が適当かどうかは D_I と X との関係がある定点から出発する直線として整理できるかどうかで見ることができ.

本実験では代表的な合金元素として Mn, Cr, Mo を選び, それぞれの合金系ごとに基本成分が異なる複数の成分系を用意し, 上述の直線関係が成立するかどうかを調

べた. 検証の際, 次に示す GROSSMANN の式を参考に用いた.

$$D_I = 0.3\sqrt{C} \times (1 + 0.7 Si)(1 + 3.3 Mn) (1 + 0.36 Ni)(1 + 2.16 Cr)(1 + 3.0 Mo) \dots\dots\dots (4)$$

これはオーステナイト粒度が ASTM-No. で 7 番のときの焼入性の計算式である.

3. 実験結果および考察

3.1 B-free 鋼における検討結果

これまで報告されているように, B と他の元素 X との間に相互作用がある⁶⁾⁷⁾¹⁰⁾¹¹⁾ とすれば, 焼入性倍数 f_X は B 鋼と B-free 鋼との間で異なる可能性がある. そのため本実験では B 鋼と B-free 鋼にわけて実験を行った.

Fig. 2 は B-free 鋼の焼入性と Mn との関係を示した図である. 焼入性は 50% マルテンサイト焼入性 D_{I-50} で示した. Fig. 2 に示された各鋼の化学成分および D_{I-50} の測定値は Table 1 に示した. Fig. 2 には $f_{Mn} = 1 + 3.3Mn$ が得られたときの GROSSMANN の実験データもあわせて示した. GROSSMANN は 0.6% C 鋼を用い, Mn を 0.8~1.0% の範囲で変化させてこの f_{Mn} の式を得ている. この図からわかるとおり, 鋼の成分が異なっても D_S が GROSSMANN の場合に等しいか, あるいはそれより小さいところでは, 我々の結果と GROSSMANN の結果は一致することがわかる. ところが D_S が大きくなると(図中の○印), Mn と D_{I-50} との関係は P 点を起点とする直線にのらないことがわかる.

つぎに Cr, Mo について調べた結果を Fig. 3, 4 に示す. いずれの場合も先の Mn の場合と同様, D_S が

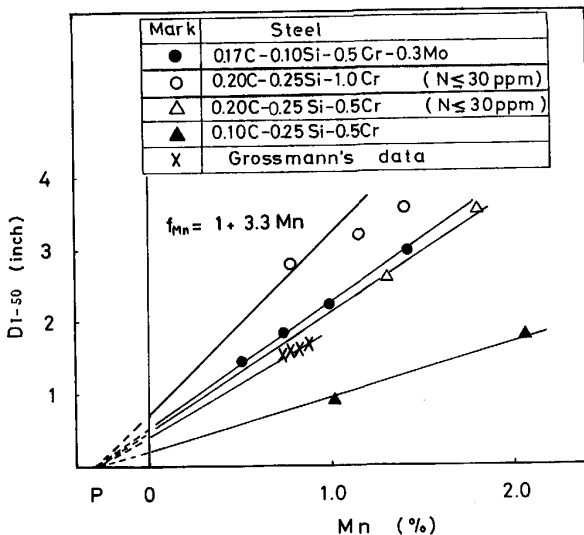


Fig. 2. Effect of Mn on hardenability of B-free steels.

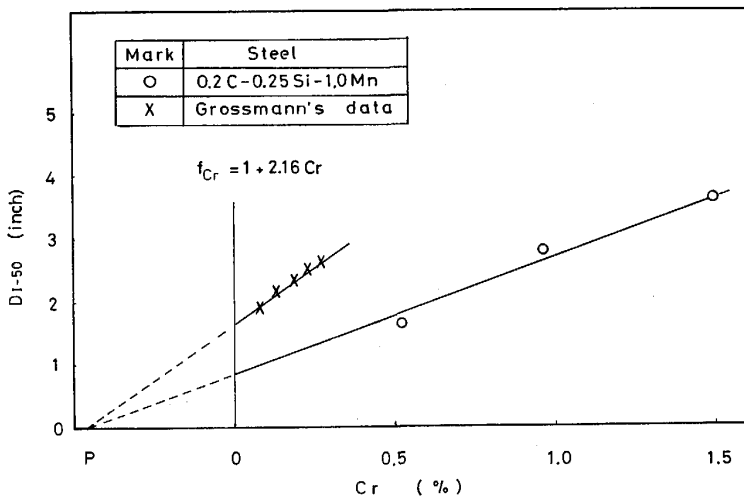


Fig. 3. Effect of Cr on hardenability of B-free steels.

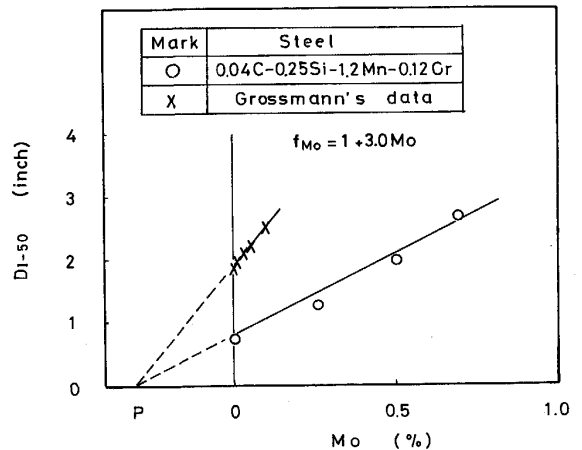


Fig. 4. Effect of Mo on hardenability of B-free steels.

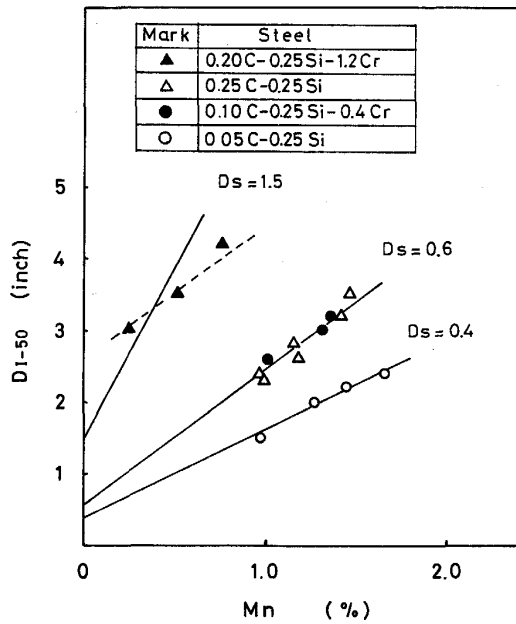


Fig. 5. Effect of Mn on hardenability of B-added steels.

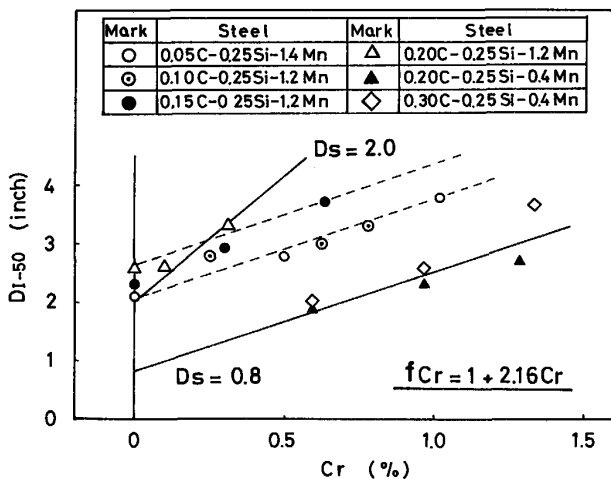


Fig. 6. Effect of Cr on hardenability of B-added steels.

GROSSMANN の場合に等しいかあるいは小さいと f_x は GROSSMANN が求めた結果と一致することがわかった。

3.2 B鋼での検討結果

B鋼を用いて行つた実験結果を Fig. 5~7 に示す。Fig. 5 に Mn と D_{I-50} との関係を示す。供試鋼の化学成分は Table 2 に示した。図中の実線は Fig. 2 に示した P 点 (-1/3.3, 0) を起点とする直線である。この図からわかるとおり B鋼でも先の B-free 鋼と同じ現象が見られた。すなわち、 D_s が比較的小さいところでは GROSSMANN の式に従うが、 D_s が大きいところではこの直線関係から外れてくる。

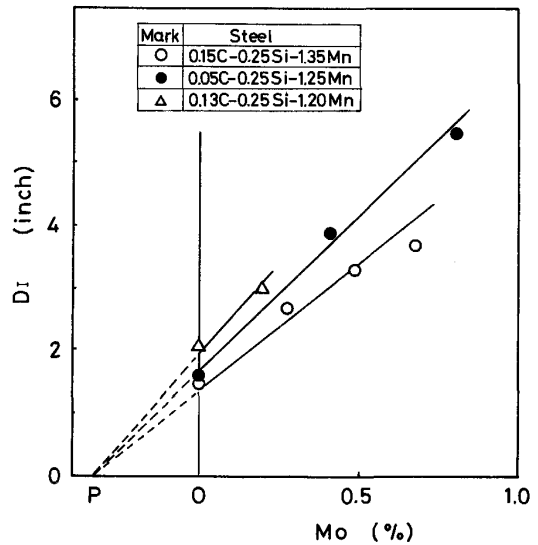


Fig. 7. Effect of Mo on hardenability of B-added steels.

D_s が大きくなると合金添加量と焼入性との関係が P 点を起点とする直線関係から外れてくる現象は次の Cr, Mo の場合にも観察された。

Fig. 6, 7 にそれらの実験結果を示す。これらの図中に示した実線は GROSSMANN が求めた式に対応する直線である。これらの図からわかるとおり、 D_s が小さいところでは GROSSMANN の式に対応して焼入性は変化するが、 D_s が大きいところでは直線から外れることが確認された。

以上、本実験で得られた知見を整理すると次のようになる。

(1) 焼入性倍数は合金元素の一次関数 $f_x = 1 + m \cdot X$ で表せるが、その係数 m は D_s に依存する。 D_s が大きくなると m は小さくなる。

(2) D_s が小さく (ほぼ 2 inch 以下)、かつ合金添加後の焼入性が 3~3.5 inch 以下の場合には従来の焼入性倍数を用いて焼入性は計算できる。

(3) 以上の現象は B の有無には関係しない。つまり、 f_x が D_s に依存する現象は鋼の一般的現象と思われる。

以上述べたように、 f_x は D_s にも依存するから GROSSMANN の式は一般的には成立しないといえる。もし幅広い成分範囲で使用できる焼入性倍数を求めるとすれば、それは D_s を含む関数として表さねばならない。ところが D_s も同じ理由で合金元素の関数となるから、 f_x は複数の合金元素の関数となる。この関数は原理的には実験で求めることができるが¹⁹⁾、そうすると GROSSMANN の式の一つの特徴である簡便性が失われることになる。簡便性を犠牲にしてまで GROSSMANN の式の精度向上を

はかることが実用的見地から見て意味があるかどうかは疑問がある。

3.3 Bの焼入性倍数

一般に焼入性倍数はその元素の濃度の関数であるのに対し、 f_B 値はBがある一定量以上になるとB量に依存しなくなる。しかし、定数にはならない。前報¹⁷⁾において我々はこの f_B 値は基本成分 (B-free 鋼) の焼入性 D_I° の逆数の関数になることを指摘した。そしてこれを根拠に GROSSMANN の式の妥当性に対して問題提起をした。このように前報¹⁷⁾の結果は非常に重要なので、本実験でも前報での結果の普遍性を確かめることにした。

まず f_B 値と D_I° との関係を調べる前に、 f_B 値がおおよそどの程度の値になるのかを知るために、B鋼とB-free 鋼の焼入性の関係を調べた。

Fig. 8 の横軸は B-free 鋼の焼入性を、縦軸はこれらの鋼にBを添加したときの焼入性を示す。B鋼の焼入性 (D_{I-obs}) は実測値であり、その値は Table 2~4 に示した。これらの鋼のB添加前の焼入性は次の理由から計算で求めた。

①3.2 で述べたように、焼入性が比較的小さい成分系においてはこれまでの GROSSMANN の式が成立すること。

②本実験に使用したB鋼に対応する B-free 鋼の焼入性はその合金濃度からみて低い値しか期待できないので、実測値は大きい誤差を含む値となる可能性があること。

本実験条件下で得られる γ 粒度を調べたら

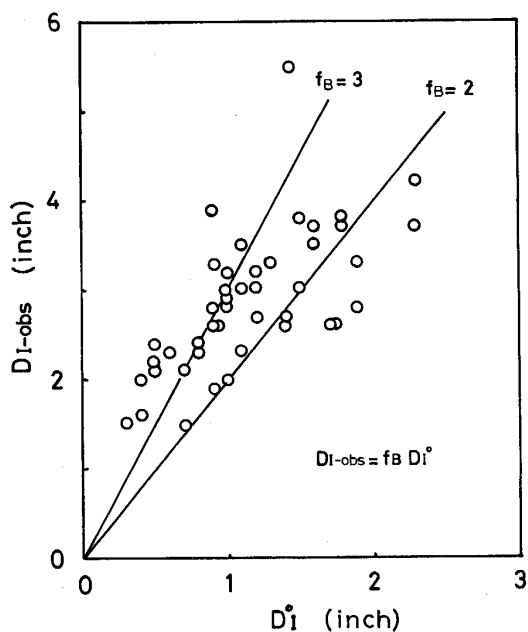


Fig. 8. Relation between D_I° and D_{I-obs} of B-added steels.

ASTM-No. で 7~8 番であつたので、焼入性の計算には (4) 式をそのまま用いた。この計算結果を Table 2~4 の D_{I-cal} の欄に示した。

GROSSMANN の定義によると、B鋼と B-free 鋼との焼入性の関係は f_B 値を用いて $D_{I-obs} = f_B \times D_I^\circ$ と書き表すことができる。もし f_B 値が一定であれば当然のことながら D_{I-obs} と D_I° との間には一本の直線関係が成立する。ところが Fig. 8 からわかるとおり、両者の間には明確な直線関係はなく、 f_B 値は 1.5~4.0 の値になることがわかる。

続いてこのような範囲で変化する f_B 値が前報で指摘したように D_I° の関数として説明できるかどうかの検討を行った。

Table 2~4 に示した焼入性から f_B 値を計算し、この値と D_I° との関係を調べた結果を Fig. 9 に示す。前報¹⁷⁾の結果に基づき両者の関係を $f_B = 1 + K/D_I^\circ$ で表し、Fig. 9 から定数 K の値を求めると (5) 式が得られる。

$$f_B = 1 + 1.6 / D_I^\circ \dots\dots\dots (5)$$

以上の結果、 f_B 値は定数にならず D_I° の逆数となることが確認された。また (5) 式から研究者が同一の成分を用いて f_B 値を求めない限り、 f_B 値は一致しないことが容易にわかる。

3.4 GROSSMANN の式に代わる焼入性の計算式

Fig. 6 において焼入性倍数で合金元素の焼入性効果は必ずしも表示できないことを示した。一方、前報¹⁷⁾において焼入性を臨界冷却速度で表示すると、Bの効果はこの臨界冷却速度の比で表せることを示した。もしこの関係がBに限らず一般の元素にも当てはまるものであれば、合金元素と焼入性との関係は次式で表せることになる。

$$V(x) / V_0 = F(x) \dots\dots\dots (6)$$

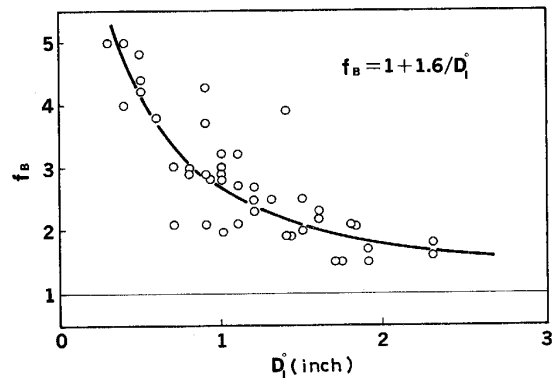


Fig. 9. Relation between calculated D_I of B-free steel (D_I°) and f_B .

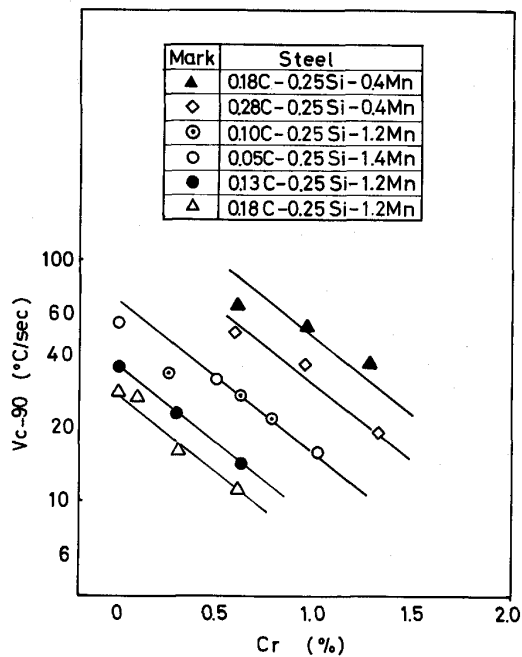


Fig. 10. Relation between $\log V_{C-90}$ and Cr content.

ここで $V(x)$ は合金元素を $x(\%)$ 添加したときの焼入性, x_0 は $x=0(\%)$ のときの焼入性, $F(x)$ は x だけの関数を示す.

(6)式の両辺の対数をとれば(7)式が得られる.

$$\log V(x) = f(x) + C \dots\dots\dots (7)$$

ただし, $f(x) = \log F(x)$, $C = \log V_0$ である.

もし我々の予測が正しければ Fig. 6 の結果は(7)式で整理できるはずである. そこで Fig. 6 の D_I 値に代わって焼入性を臨界冷却速度で表し, この値と Cr 濃度との関係を調べた. その結果を Fig. 10 に示す. この場合の焼入性は前報との関係で 90% マルテンサイト組織に基づく焼入性とした. この図からわかるとおり, 鋼の基本成分が異なっても $\log V_{C-90}$ と Cr 量との間には直線関係が成立し, その傾きは一定であることがわかる.

Fig. 10 からこの傾きを求めると Cr 添加による焼入性の変化は次式で表すことができる.

$$\log V_{C-90} = C - 0.60 \text{ Cr}(\%) \dots\dots\dots (8)$$

(8)式は我々の予測が正しかったことを示している.

Cr に限らず合金元素一般にこのような定数が存在すれば, 焼入性 V_{C-90} はこれらの定数が存在すれば, 焼入性 V_{C-90} はこれらの定数と合金元素濃度の一次結合式として表されることを示唆している. この方法で求めた焼入性の計算式については次報²⁰⁾で報告する予定である.

4. 結 論

これまで広く用いられてきた GROSSMANN の式が合理的かどうかを検証するため, 焼入性倍数と合金元素との関係を調べた. その結果, 次のことが明らかとなった.

(1) 焼入性倍数 f_x は元素だけの関数ではなく, その元素を添加する前の焼入性に依存する.

(2) f_B 値についていえば, f_B 値は B 添加前の焼入性 D_I° の関数として次の式で表される.

$$f_B = 1 + 1.6 / D_I^\circ$$

(3) したがって GROSSMANN の式は一般的には成立しない. この式が成り立つのは B-free 鋼で焼入性が D_I 値にして 3~3.5 inch 以下の場合である.

(4) 汎用性のある焼入性倍数を求めようとするれば, それは複数元素の関数となる. その結果, GROSSMANN の式の特長である簡便性が失われる.

(5) f_B 値は D_I° の関数であるから, 異なる成分の鋼を用いて求められたこれまでの f_B 値が一致しないのはむしろ当然といえる.

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) W. CRAFTS and J. L. LAMONT: Trans. Metall. Soc. AIME, **158** (1944), p. 157
- 5) R. A. GRANGE and T. M. GARVAY: Trans. ASM, **37** (1946), p. 136
- 6) D. G. RAHRER and C. D. ARMSTRONG: Trans. ASM, **40** (1948), p. 1099
- 7) R. A. GRANGE and J. B. MITCHELL: Trans. ASM, **53** (1961), p. 157
- 8) B. M. CAPADIA, R. M. BROWN and W. J. MURPHY: Trans. Metall. Soc. AIME, **242** (1968), p. 1689
- 9) 山田雄康: 三菱技報, **2** (1968) 1, p. 32
- 10) D. H. BREEN and C. H. WALTER: Met. Prog., **102** (1972) 12, p. 42
- 11) R. F. KERN: Met. Prog., **103** (1973) 3, p. 90
- 12) G. F. MELLO, P. R. SLIMMON and P. P. PODGURSKY: Metall. Trans., **4** (1973), p. 2279
- 13) D. T. LLEWELLYN and W. T. COOK: Met. Technol., **1** (1974) p. 517
- 14) 土生隆一, 宮田政祐, 関野昌蔵, 合田 進: 鉄と鋼, **60** (1974), p. 1470
- 15) K. YAMANAKA and Y. OHMORI: Trans. Iron Steel Inst. Jpn., **18** (1978), p. 404
- 16) F. NAKASATO and M. TAKAHASHI: Met. Technol., **6** (1979), p. 102
- 17) 上野正勝, 伊藤亀太郎: 鉄と鋼, **74** (1988), p. 910
- 18) 上野正勝, 中村勝治, 伊藤亀太郎, 峰松祐行: 鉄と鋼, **68** (1982), p. 155
- 19) 金沢正午: 鉄と鋼, **67** (1981), p. 295
- 20) 上野正勝, 伊藤亀太郎: 鉄と鋼, 投稿中