

# 鋼のベイナイト変態温度の実験式による推定

邦武 立郎\*・岡田 康孝\*<sup>2</sup>

The Estimation of Bainite Transformation Temperatures in Steels by the Empirical Formulas

Tatsuro KUNITAKE and Yasutaka OKADA

**Synopsis :** The empirical formula showing the relation of the  $B_s$  temperature to the chemical composition of steels was obtained from published isothermal transformation diagrams. The bainite transformation temperatures on the continuous cooling at the critical cooling rates corresponding to the beginning of the pearlite region and to the appearance of the fully pearlitic stage transformation were obtained from published CCT diagrams, and these temperatures ( $B_1$  and  $B_2$ ) were correlated to the chemical composition of steels for the wide range of the steel composition.

**Key words :** bainite ;  $B_s$  temperature ; transformation ; alloying elements ; empirical formula ; isothermal transformation diagram ; continuous cooling transformation diagram ; heat treatment ; low alloy steels.

## 1. はじめに

鋼のベイナイト変態には上限温度が存在することが知られており、 $B_s$ 温度と呼ばれている。鋼の化学成分と $B_s$ 温度の関係については、Steven, Haynesの実験式<sup>1)</sup>が知られている。一方、マルテンサイト変態の上限温度の $M_s$ 点と鋼の化学成分の関係については多くの実験式が提唱されているが、 $B_s$ 温度についてはSteven, Haynesの実験式が知られているだけである。彼らの実験式は、鋼の化学成分の比較的広い範囲において適用可能とされているが、C, Ni, Crの比較的高い一部の鋼については推定値が実測値から大きく外れることがある。著者らは既存の等温変態図のデータを用いて、実験式の再検討を行った。また、鋼の熱処理において等温変態よりも一層実用的な、連続冷却時のベイナイト変態温度を鋼の化学成分から推定することを試みた。

## 2. $B_s$ 変態温度

$B_s$ 変態温度は、パーライト段階とベイナイトの両変態領域が分離し、かつベイナイト変態開始温度が等温保持の長時間側において一定値に達するような形を有する等温変態図から求めることができる。そのような等温変態図の一例をFig. 1に示した<sup>2)</sup>。各国の等温変態図集<sup>2-6)</sup>から、このような条件を満たす等温変態図31を選び、 $B_s$ 点を求め、多重回帰分析を行った。31の鋼の化学成分系とデータ源をTable 1に示した。今回の解析の特徴は次の通りである。

1) 上記の形態を有する等温変態図 (Fig. 1 参照) に限定。

なお、オーステナイト化温度において、炭素および合金元素はオーステナイトに完全に固溶していること。

2) なるべく亜共析鋼に限定するため、C%は0.6%以下に、炭化物の難溶を避けるため、Vは0.13%以下に限定。

3) オーステナイト結晶粒度をほぼ一定とするため粒度番号7~9のものを選んだ (Stevenらの扱ったデータではオーステナイト結晶粒の大きさには触れていない)。

4)  $B_s$ 温度は1°Cの位までCCT図から読み取った (Stevenらは、 $B_s$ 温度を10°C単位で丸めている)。

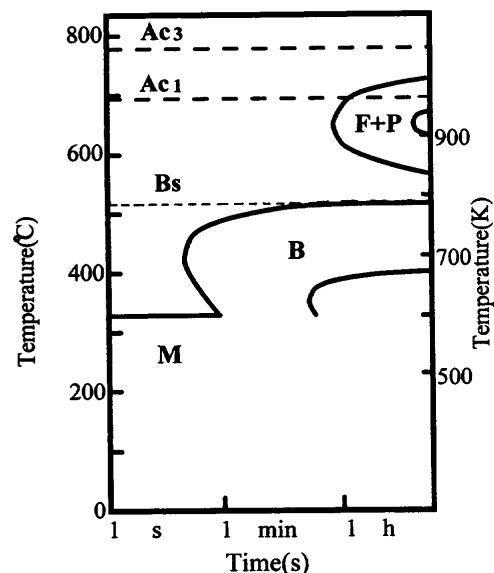


Fig. 1.  $B_s$  temperature in the isothermal transformation diagram. (Steel : 0.32%C-2.5%Ni-Cr-Mo)

平成9年7月9日受付 平成9年9月17日受理 (Received on July 9, 1997; Accepted on Sep. 17, 1997)

\* (1-6-22-301 Sumiyoshi-Higashimachi Higashinada-ku Kobe, 658)

\* 2 住友金属工業(株)総合技術研究所 (Corporate Research & Development Laboratories, Sumitomo Metal Industries, Ltd.)

解析に用いた鋼のBs温度は371~550°C(644~823K)の範囲にあった。次のような形の簡単な線形相関式を求めることとした。

$$B_s = \sum k_i \cdot X_i + K_0$$

X<sub>i</sub>は元素iの質量%, k<sub>i</sub>は元素iについての係数,  
K<sub>0</sub>は一定値(°CまたはK)である。

31のデータについて解析したところ,まずVに有意差が認められなかった。そこで, V含有の3鋼を除いて解析し,更に

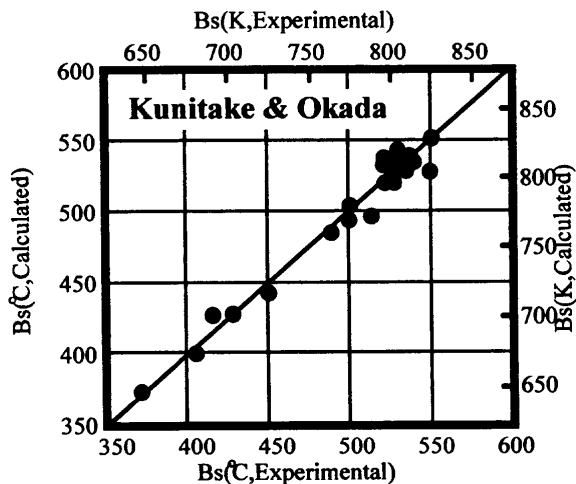
Table 1. Steels used in the analysis of B<sub>s</sub> temperature and data source.

Range	Steel (Alloy System)	Number of Steels	
		Initial	Final
Bs = 371-550 °C (644-823K) G.S. = 7-9	Ni-Cr-Mo	20	17
	Cr-Mo	3	2
	Ni-Cr	2	2
	Ni-Cr-Mo-V	2	0
	Mn-Mo	1	1
	Mn-Ni-Mo	1	1
	Mn-Mo-V	1	0
	Mn-Ni-Cr-Mo	1	1
Total		31	24
Data Source		Number of Steels	
		Initial	Final
Britain <sup>3)</sup>		18	16
U.S.A. (ASM) <sup>4)</sup>		2	1
France (IRSID) <sup>5)</sup>		2	1
Germany (Max-Planck-Inst.) <sup>6)</sup>		1	1
Others <sup>7)</sup>		8	5
Total		31	24

Table 2. Results of the analysis on B<sub>s</sub> temperature.

Bs	Coefficient	k <sub>i</sub> (°C/mass% or K/mass%)						K <sub>0</sub>
		C	Si	Mn	Ni	Cr	Mo	
		-202	216	-85	-37	-47	-39	732 °C (1005K)
	Deviation*	21	53	13	3	4	11	
	Range in alloy content (n=24)	0.11 ~ 0.56	0.14 ~ 0.40	0.34 ~ 1.49	0.23 ~ 4.33	0.14 ~ 4.80	0.07 ~ 1.99	
Bs = ∑ k <sub>i</sub> · x <sub>i</sub> + K <sub>0</sub> , R <sup>2</sup> =0.97, σ=10.5								

\*standard deviation, σ



(a) According to Kunitake & Okada's equation.

28のデータ中実測値からはずれの大きい4点を除いて解析したところ(最終的に用いたデータの数は24となる, Table 1参照), 良好な関係式が得られた(多重回帰分析における2乗相関, R<sup>2</sup>=0.97)。B<sub>s</sub>点の推定式の係数X<sub>1</sub>, およびK<sub>0</sub>をTable 2にとりまとめた。すなわち,

$$B_s = -202X_c + 216X_{Si} - 85X_{Mn} - 37X_{Ni} - 47X_{Cr} - 39X_{Mo} + 732(°C)$$

B<sub>s</sub>(K)ではK<sub>0</sub>=1005となる。

実験式による推定値と実測値の関係をFig. 2 (a)に示した。

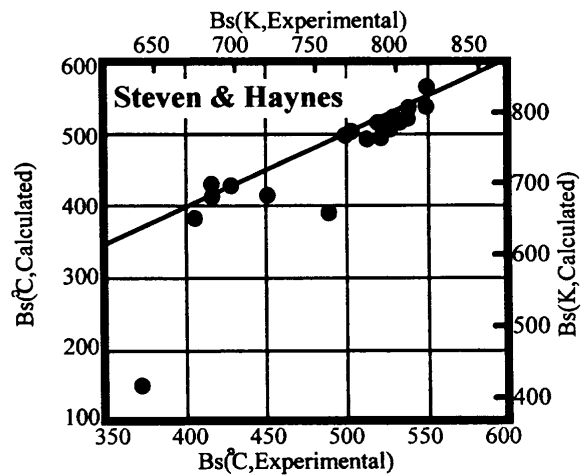
実験式を求めた鋼の成分範囲並びに係数について今回の結果と, Stevenらの結果をTable 3に対比した。Fig. 2 (b)は, 今回の解析に用いた鋼(n=24)について, Stevenらの実

Table 3. Comparisons of present results with published ones.

	Bs	k <sub>i</sub> (°C/mass% or K/mass%)						K <sub>0</sub>	R <sup>2</sup>
		C	Si	Mn	Ni	Cr	Mo		
Present investigation (n=24)	371~550 °C (644~823K)	-202	216	-85	-37	-47	-39	732 °C (1005K)	0.97
		0.11	0.14	0.34	0.23	0.14	0.07		
		~	~	~	~	~	~		
Steven & Haynes <sup>1)</sup> (n=48)	370~640 °C (643~913K)	-270	0	-90	-37	-70	-83	830 °C (1103K)	-
		0.1	0.1	0.2	~	~	~		
		~	~	~	~	~	~		
Bs = ∑ k <sub>i</sub> · x <sub>i</sub> + K <sub>0</sub>		0.55	0.35	1.7	5.0	3.5	1.0		

Table 4. Estimation of B<sub>s</sub> temperature according to present formula and Steven & Haynes' one.

Steels (mass%)						Bs, Measured (°C)	Bs, Calculated (°C)	
C	Si	Mn	Ni	Cr	Mo		Present investigation	Steven & Haynes
0.56	0.18	0.47	4.55	1.16	0.18	405	401	383
0.11	0.24	0.47	0.23	4.48	0.52	489	484	393
0.28	0.40	0.34	0.32	4.80	1.99	371	373	149



(b) According to Steven & Haynes' equation.

Fig. 2. Calculated and experimental B<sub>s</sub> temperatures.

験式による計算値と実験値の関係を示し、Fig. 2 (a) と対比した。Fig. 2 (a), Fig. 2 (b)におけるR<sup>2</sup>はそれぞれ 0.97, 0.74; 標準誤差はそれぞれ 9.1, 44.5である。また、供試データの中でStevenらの実験式による推定値が実験値から大きく外れた鋼3件について、今回の推定値と比較すればTable 4のようになる。Stevenらによる推定値は大きく外れているのに対して、今回の推定値は実測値に極めて近い。

### 3. 連続冷却時のベイナイト変態開始温度

連続冷却時のベイナイト変態温度として連続冷却変態図(以下CCT図という)上の二つの変態開始温度を選び、鋼の化学成分との関係を解析する事にした。すなわち、Fig. 3に例として示したCCT図<sup>6)</sup>上のB<sub>1</sub>, B<sub>2</sub>をパラメーターとして選んだ。B<sub>1</sub>はパーライト段階の変態開始の臨界冷却速度におけるベイナイト変態の開始温度で、パーライト段階の変態開始に到るまでのベイナイト変態開始の最高温度である。一方、B<sub>2</sub>はベイナイト変態領域の最小冷却速度におけるベイナイト変態開始温度である。すなわち、ベイナイトを含む変態組織から完全にパーライト段階の変態組織だけとなる臨界冷却速度におけるベイナイト変態開始温度である。

解析に用いた30の鋼の化学成分とデータ源をTable 5に示す。信頼できるデータ源としてドイツMax-Planck-Institut für Eisenforschungのアトラス<sup>6,7)</sup>を用いた。

解析に選んだデータの特徴は次の通りである。

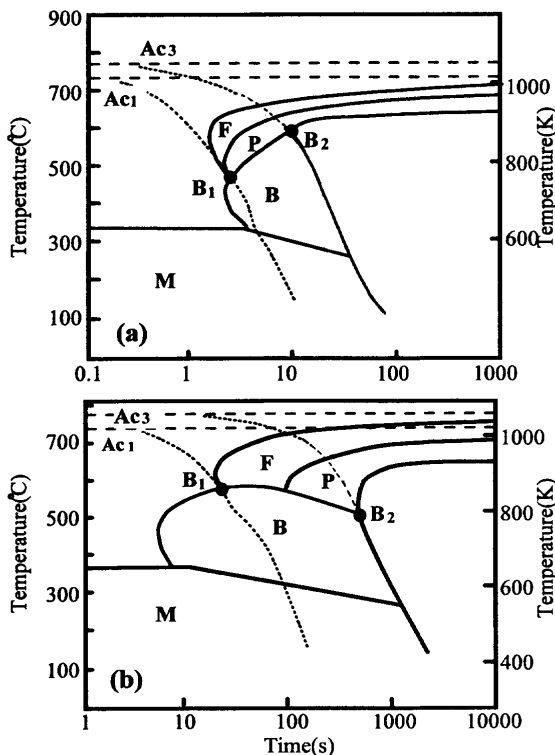


Fig. 3. B<sub>1</sub> and B<sub>2</sub> temperatures in the continuous cooling transformation diagrams. (Steel: (a) 0.44%C (b) 0.38%C-1%Cr-Mo)

1) B<sub>s</sub>の場合と同様に、鋼のC%は0.6%以下、Vは0.13%以下に限定。

2) オーステナイト結晶粒度は粒度番号7~9のものに限定。

3) B<sub>1</sub>, B<sub>2</sub>温度はB<sub>s</sub>同様、1°Cの位まで読み取った。

B<sub>1</sub>, B<sub>2</sub>についてもB<sub>s</sub>と同様に線形相関式を用いることとした。解析の経緯を次に示す。

B<sub>1</sub>: まず、30のデータについて解析。計算値が実験値よりも大きく外れたものを除いて再計算。しかし、SiとVについては係数が有意でなくなった。そこで、SiとVを高く含む1鋼種を除いて再計算した。データ数19についてR<sup>2</sup>=0.94の結果が得られた。

B<sub>2</sub>: まず、30のデータについて解析。次に、推定値と実測値の差の大きいもの3点を除いて解析。27のデータについてR<sup>2</sup>=0.91の結果を得た。

各元素についての係数とその標準誤差(σ)、実験式を求めた鋼の成分範囲をTable 6に示す。すなわちB<sub>1</sub>, B<sub>2</sub>は次のように表される。

$$B_1 (^{\circ}\text{C}) = -233X_c + 45X_{\text{Mn}} - 68X_{\text{Ni}} + 65X_{\text{Cr}} + 175X_{\text{Mo}} + 548$$

$$B_2 (^{\circ}\text{C}) = 21X_c - 44X_{\text{Si}} - 33X_{\text{Mn}} - 15X_{\text{Ni}} - 69X_{\text{Cr}} - 101X_{\text{Mo}} - 522X_v + 634$$

(B<sub>1</sub>(K), B<sub>2</sub>(K)の場合、定数項は、それぞれ、821, 907となる)

B<sub>1</sub>, B<sub>2</sub>について実測値と計算値の対比をFig. 4に示す。

Bodnarら<sup>8)</sup>は、発電用材料のNi-Cr-Mo鋼について、連続冷却時のベイナイト変態開始温度がほぼ一定値を示すとし、化学成分との関係式を求めている。すなわち、ベイナイト

Table 5. Steels used in the analysis of B<sub>1</sub> and B<sub>2</sub> temperatures and data source.

Range	Steel (alloy system)	Number of Steels		
		initial	Final(B <sub>1</sub> )	Final(B <sub>2</sub> )
B <sub>1</sub> =427~628 °C (700~901K)	Carbon steel	1	0	0
	Mn	3	0	2
B <sub>2</sub> =439~609 °C (712~882K)	Mn-Mo, Mn-Cr, Mn-V	20	16	19
	Ni-Cr, Cr-Mo, Cr-V	5	2	5
	Mn-Cr-V, Ni-Cr-Mo	1	1	1
G.S.=7~9	Mn-Ni-Cr-V	1	1	1
	(Total)	30	19	27

Data Source	Number of Steels		
	initial	Final(B <sub>1</sub> )	Final(B <sub>2</sub> )
Germany (Max-Planck Inst.) <sup>6,7)</sup>	30	19	27

Table 6. Results of the analysis on B<sub>1</sub> and B<sub>2</sub> temperatures.

		k <sub>i</sub> (°C/mass% or K/mass%)							K <sub>1</sub> or K <sub>2</sub>
		C	Si	Mn	Ni	Cr	Mo	V	
B <sub>1</sub>	Coefficient	-233	0	45	-68	65	175	-	K <sub>1</sub> = 548 °C (821K)
	Deviation	32	-	20	10	15	35	-	
	Composition	0.13	~	0.50	~	0.08	~	-	
	Range(r=19)	0.56	~	1.67	2.02	1.95	0.44	-	
B <sub>2</sub>	Coefficient	21	-44	-33	-15	-69	-101	-522	K <sub>2</sub> = 634 °C (907K)
	Deviation	24	22	19	6	11	28	123	
	Composition	0.13	0.21	0.46	~	~	~	~	
	Range(r=27)	0.56	1.05	1.67	2.06	1.95	0.44	0.13	

$$B_1 = \sum k_i \cdot x_i + K_1$$

$$B_2 = \sum k_i \cdot x_i + K_2$$

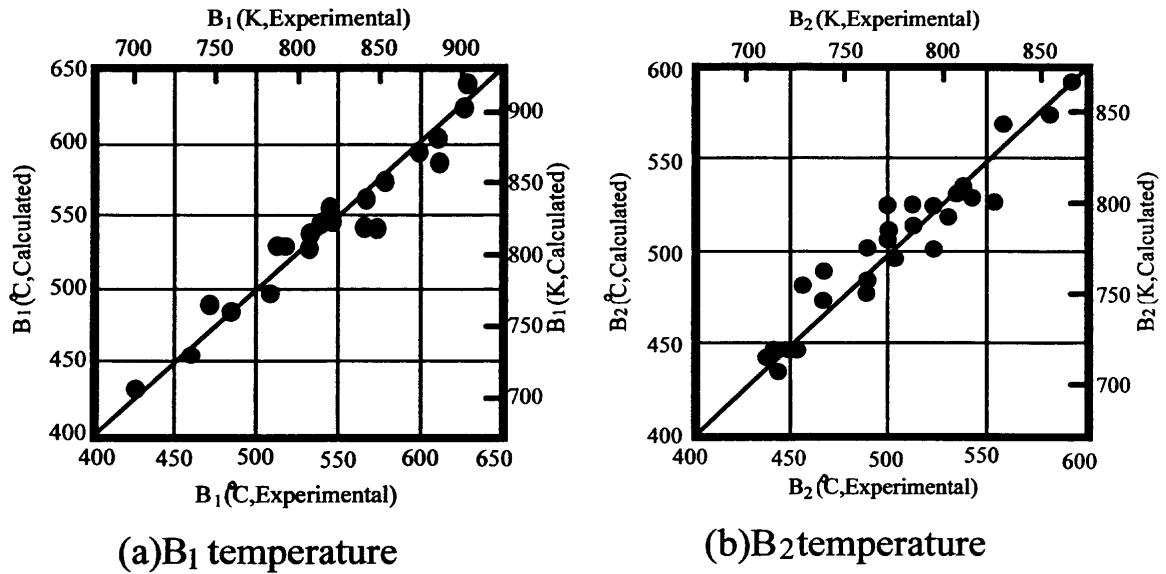


Fig. 4. Calculated and experimental B<sub>1</sub> and B<sub>2</sub> temperatures.

Table 7. Comparison of present results on cooling transformations with published results.

		R <sup>2</sup>	σ	k <sub>i</sub> (°C/mass%)							K <sub>n</sub> (°C)
				C	Si	Mn	Ni	Cr	Mo		
Present investigation	B <sub>1</sub>	0.94	16	-233	0	45	-68	65	175	548 (821K)	
	B <sub>2</sub>	0.91	15	21	-44	-33	-15	-69	-101	634 (907K)	
Bodnar et al. <sup>9)</sup>	B <sub>s</sub> '			-597		-63	-16	-78		844 (1117K)	

$$B_1 = \sum k_i \cdot x_i + K_1 \quad (B_2, B_s': \text{same as } B_1)$$

Table 8. Composition ranges of steels used in various analyses.

	Steel	n	Chemical composition (mass%)						
			C	Si	Mn	Ni	Cr	Mo	V
Present investigation	B <sub>1</sub>	n=19	0.13 ~ 0.56		0.50 ~ 1.67	~ 2.02	0.08 ~ 1.95	~ 0.44	-
	B <sub>2</sub>	n=27	0.13 ~ 0.56	0.21 ~ 1.05	0.46 ~ 1.67	~ 2.06	0.08 ~ 1.95	~ 0.44	-
Bodnar et al. <sup>9)</sup>	B <sub>s</sub> '	n=14	0.15 ~ 0.29	0.01 ~ 0.23	0.02 ~ 0.77	0.21 ~ 3.61	1.13 ~ 2.33	0.44 ~ 1.37	-
Borisov <sup>9)</sup>	Ar <sub>81</sub>	n=27	0.03 ~ 0.47		0.25 ~ 0.6	~ 5	~ 4		~ 0.1

変態開始温度をB<sub>s</sub>'とすれば,

$$B_s' = -597X_c - 63X_{Mn} - 16X_{Ni} - 78X_{Cr} + 844 (°C)$$

これは、連続冷却において求められたものであり、また Bodnarらの鋼の一部にはベイナイト変態に先行してフェライト変態を生じているものがあり、彼らの求めたB<sub>s</sub>'はB<sub>s</sub>温度とは異なると解すべきであろう。またBorisov<sup>9)</sup>は、C, Ni, Crを変化せしめた27種類のNi-Cr-Mo-V鋼について、3種類の冷却速度(1,000°C/h, 100°C/h, 25°C/h)におけるベイナイト変態開始温度を求め、化学成分と冷却速度を取り入れた実験式を提唱している。その式はCその他の合金元素相互の干渉項も取り入れた複雑なものである。

Bodnarらと本報の実験式における係数の比較をTable 7に、また、これにBorisovのものを加えた3者について実験

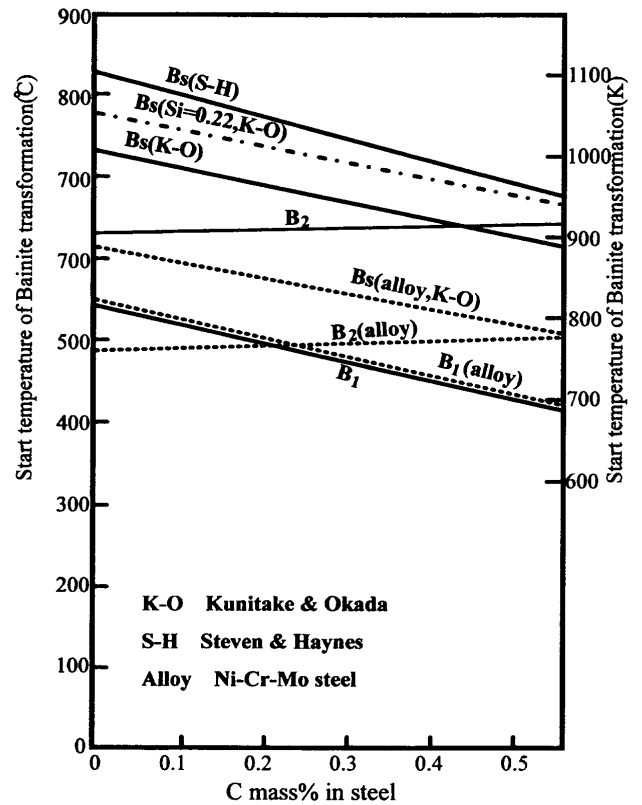


Fig. 5. Bainite transformation temperatures vs. carbon % in steel.

式を求めた鋼の成分範囲をTable 8にとりまとめた。実際に際してどの実験式を用いるべきかは、対象とする鋼によって判断すべきであり、例えば発電用大型鍛鋼材のNi-Cr-Mo鋼に対しては、Bodnarらの実験式を用いるのがよからう。本報の実験式はCCT図との関連が明瞭なベイナイト変態のパラメータを選び、広く実用鋼に適用できる簡単な実験式を提唱したところに特徴がある。

## 4. 考察

各種ベイナイト変態温度の実験式の鋼のC%に対する関係を図示すればFig. 5 のようになる。Stevenらの $B_s$ 温度の実験式ではSiの係数は0となっている。彼らの用いた鋼のSi量の変化の範囲は比較的小さく、平均Si量は0.22%である。今回著者らの求めた $B_s$ 温度の式にこのSi%を用いると、Stevenらの式に近づくことは興味深い。しかし、合金元素に関してMn, Niの効果についてはほぼ一致しているが、Cの他、Cr, Moの効果については大きく異なる結果を与えている。

各種ベイナイト変態温度の間には、 $B_s > B_1$ あるいは $B_2$ の関係がある。 $B_1$ と $B_2$ については、冷却速度上からは、 $B_2 > B_1$ となるが、 $B_2$ については先行パーライト段階変態の影響によって一般に低下するので、両者の関係は一概には論じられない。JISのSNCM4XX相当のNi-Cr-Mo鋼(0.30Si, 0.75Mn, 1.8Ni, 0.8Cr, 0.23Mo)について $B_s$ ,  $B_1$ ,  $B_2$ のC%による変化を図に示す。 $B_1$ と $B_2$ の高低の関係は中炭素で逆転している。低炭素側では、 $B_1 > B_2$ となっているが、低炭素側では多量のフェライトを先行変態として生成し、未変態のオーステナイト中のC%が濃縮されることを考えれば肯定できる。

## 5. まとめ

従来の変態図集をデータ源として用い、ベイナイト変態温度を鋼の化学成分から求める実験式を提出した。すなわち、等温変態図から求めた $B_s$ 温度と鋼の化学成分の関係を示す次の実験式を得た。

$$B_s = -202X_c + 216X_{Si} - 85X_{Mn} - 37X_{Ni} - 47X_{Cr} - 39X_{Mo} + K_0$$

$K_0$ は $B_s$ (°C)では、732、 $B_s$ (K)では1005となる。従来、Stevenらの実験式が知られているだけであるが、今回の実

験式によって、一層信頼出来る $B_s$ 点の推定が可能となった。

一方、連続冷却時のベイナイト変態温度については、CCT図と関連づけた $B_1$ ,  $B_2$ のパラメーターを設定し、鋼の化学成分との関係を示す実験式を求めた。すなわち、 $B_1$ ,  $B_2$ はそれぞれ、パーライト段階の変態開始の臨界冷却速度におけるベイナイト変態の開始温度、ベイナイトを含む組織から完全にパーライト段階の変態組織だけとなる臨界の冷却速度におけるベイナイト変態の開始温度である。

$$B_1 = -233X_c - 45X_{Mn} - 68X_{Ni} + 65X_{Cr} + 175X_{Mo} + K_1$$

$$K_1(°C) = 548, K_1(K) = 821$$

$$B_2 = 21X_c - 44X_{Si} - 33X_{Mn} - 15X_{Ni} - 69X_{Cr} - 101X_{Mo}$$

$$- 522X_v + K_2$$

$$K_2(°C) = 634, K_2(K) = 907$$

従来よりもより汎用性のある実験式といえる。

## 文 献

- 1) W. Steven and A.G. Haynes: J. Iron Steel Inst. **183** (1956), 349; Iron and Steel, **29** (1956), 634.
- 2) Atlas of Time-Temperature Transformation Diagrams for Iron and Steel, ed. by G.F. Vander Voort, ASM, Materials Park, (1991).
- 3) Atlas of Isothermal Transformation Diagrams of B.S. En Steel, The Iron and Steel Institute, Special Report No.56, (1956).
- 4) Atlas of Isothermal and Cooling Transformation Diagrams, ASM, Materials Park, (1977).
- 5) Coube de Transformation des Aciers de Fabrication Française, IV G. Delbart, A. Constant and A. Clerc, IRSID, (1960).
- 6) Atlas zur Wärmebehandlung der Stähle, Max-Planck-Institut für Eisenforschung, Teil I F. Wever, A. Rose, Teil II A. Rose, W. Peter, W. Strassburg, L. Rademacher 1954, 1956, 1958.
- 7) Atlas zur Wärmebehandlung der Stähle, Max-Planck-Institut für Eisenforschung, Band 2 A. Rose, H. Hougardy, 1972.
- 8) R.L. Bodnar, T. Ohhashi and R.I. Jaffee: Met. Trans. A, **20A** (1989), 1445.
- 9) I.A. Borisov: Met. Sci. Heat Treat. (USSR), **38** (1996), 104.