極低炭素溶接金属におよぼす合金元素の影響(第4報)*

—0.04% C 铸造鋼におよぼす合金元素の影響—

益本 功**, 松本健男***, 尾崎弘憲****

Effects of Alloying Elements on the Extremely Low Carbon Weld Metal (Report 4)*

—Effects of Alloying Elements on the 0.04% C Cast Steel—

by Isao Masumoto**, Takeo Matsumoto*** and Hironori Ozaki****

In order to get higher strength and toughness of steel weld metal, the effects of single or double addition of alloying elements such as Al, Ni, Cr, Mo or B on the strength and toughness of 0.03-0.05 %C as-cast steel specimens in stead of steel weld metal have been investigated. This carbon content made the toughness of as-cast steel specimens containing 0.35 %Si and 1.5 % Mn highest in previous report.

The results obtained as follows;

- 1: No single addition of Al, Ni, Cr, Mo or B improve the toughness of as-cast low carbon steel.
- 2: Double addition of 0.34 %Ni and 0.09 %Mo is effective on the improvement of mechanical properties of as-cast steel.

In this case, the tensile strength is 46 kg/mm, and the impact energy transition temperature is -40°C .

1. 緒 言

第1報の铸造極低炭素鋼におよぼす炭素含量の影響について調べた結果によれば、炭素含量の減少と靱性の向上とは直線的な関係でなく、炭素含量0.04%で遷移温度はもっとも低くなる。しかし、炭素含量0.04%の溶接金属では、十分な強さを期待しがたい。そこで、本報では、この炭素含量0.04%の铸造極低炭素鋼を基本として、機械的性質におよぼすアルミニウム、クロム、モリブデンあるいはボロンの単独添加ならびに複合添加の効果について調べた。

2. 実験方法

目的とする铸造鋼および铸造方法ならびに試験片の形状は既報¹⁾と同様で、サブマージ溶接金属と同等の冷却速度を与える銅鑄型に各組成の溶湯を鑄込んだ。そして、得られた鋼塊から引張試験片、シャルピー標準衝撃試験片および顕微鏡観察用試料を採取した。

3. 実験結果

3.1 炭素含量の影響

第1報¹⁾で得られた0.04% C 铸造鋼の衝撃値遷移温度がもっと低いという実験結果を再確認するため Fig. 1

Fig. 1 Effect of carbon content on the toughness of cast steel specimens

*原稿受付 昭和51年6月23日 (昭和49年度 春季全国大会にて発表)

**正 員 名古屋大学工学部 Member, Faculty of Engineering Nagoya University

***正 員 住友重機械工業(株) Member, Sumitomo Shipbuilding & Machinery Co., Ltd.

****正 員 川崎重工業(株) Member, Kawasaki Heavy Industries Co., Ltd.

Table 1 Chemical analysis of cast steel specimens, single alloying

Marks	Elements (wt%)									
	C	Si	Mn	P	S	Al	Ni	Cr	Mo	B
C3	0.04	0.30	1.13	0.004	0.009					
4AL1	0.04	0.15	0.61	0.003	0.008	0.004				
4AL2	0.03	0.15	0.51	0.003	0.008	0.005				
4AL3	0.05	0.28	0.88	0.003	0.008	0.061				
4AL4	0.05	0.38	1.27	0.003	0.009	0.19				
4NI1	0.04	0.25	0.88	0.003	0.008		0.21			
4NI2	0.04	0.22	0.66	0.003	0.008		0.38			
4NI3	0.04	0.20	0.62	0.003	0.008		0.63			
4NI4	0.04	0.20	0.62	0.003	0.008		1.12			
4CR1	0.04	0.17	0.45	0.003	0.009			0.11		
4CR2	0.04	0.29	0.76	0.003	0.009			0.22		
4CR3	0.04	0.22	0.66	0.003	0.008			0.33		
4CR4	0.04	0.03	0.80	0.003	0.008			0.52		
4MO1	0.04	0.26	0.78	0.003	0.008				0.08	
4MO2	0.04	0.17	0.50	0.003	0.009				0.12	
4MO3	0.04	0.16	0.48	0.003	0.008				0.22	
4MO4	0.04	0.22	0.59	0.003	0.008				0.33	
4B1	0.04	0.26	0.89	0.003	0.008					0.0014
4B2	0.04	0.26	0.89	0.003	0.008					0.0035
4B3	0.04	0.26	0.80	0.003	0.009					0.0050

Table 2 Mechanical properties of 0.03–0.05 %C cast steel specimens containing various aluminum content

Marks	Al%	σ_B (kg/mm ²)	$\sigma_{0.2}$ (kg/mm ²)	φ (%)	ψ (%)	Hv(10)
C3	—	43.0	28.0	42	70	170
4AL1	0.004	42.0	28.0	—	—	—
4AL2	0.005	42.0	28.0	44	78	146
4AL3	0.061	44.0	30.0	40	73	170
4AL4	0.19	48.0	31.0	35	62	198

に示す組成の鑄造試験片を用い、同じ実験を繰返した。その結果を Fig. 1 に示す。Fig. 1 に示すように、0.04 %C 鑄造鋼試験片の衝撃値遷移温度は -30°C で、第 1 報で示した -40°C に比べて 10°C ほど高くなっているが、0.04 %C で遷移温度がもっとも低くなる傾向は同様である。

本実験で基本組成とした 0.04 %C 鑄造鋼の機械的性質は、引張強さ：43 kg/mm²，耐力：28 kg/mm²，伸び 42 %（標点間距離 = 20 mm）および絞り約 70 %であった。

3.2 合金元素単独添加の効果

Table 1 に合金元素を単独添加した場合の鑄造鋼試験片の化学分析値を示す。同表に示すように、炭素含量は 0.03～0.05%，マンガン含量は 0.45～1.27% およびい素含量は 0.15～0.38% の範囲にある。りんおよびいおう含量はできるだけ低くしたが、それぞれ、0.003～0.004 % および 0.008～0.009% となっている。

Table 2 および Fig. 2 に鑄造鋼試験片の機械的性質におよぼすアルミニウム添加の影響を示す。

Table 2 に示すように、アルミニウム含量の増加に伴い、試験片の引張強さ、耐力および硬さは増加する傾向にあり、アルミニウム含量 0.19 % では、引張強さは 48 kg/mm²，耐力は 31 kg/mm² およびビッカース硬さは 198 となっている。一方、伸びおよび絞りはアルミ

Fig. 2 Effect of aluminum content on the toughness of 0.03–0.05 %C cast steel specimens

ニウム含量の増加に伴い低下する傾向にある。

Fig. 2 の衝撃値におよぼす影響を見れば、アルミニウム含量 0.061 % まで遷移温度は $-30 \sim -20^{\circ}\text{C}$ の間にある。さらに、アルミニウム含量が 0.19 % に増加すると脆化が著しく、遷移温度は上昇する。

Table 3 Mechanical properties of 0.04 % C cast steel specimens containing various nickel content

Marks	Ni%	σ_B (kg/mm ²)	$\sigma_{0.2}$ (kg/mm ²)	φ (%)	ψ (%)	Hv(10)
C3	—	43.0	28.0	42	70	170
4N I 1	0.21	42.5	28.5	40	65	168
4N I 2	0.38	43.0	30.5	41	76	168
4N I 3	0.63	45.0	31.0	39	76	174
4N I 4	1.12	43.0	29.0	40	76	171

Fig. 3 Effect of nickel content on the toughness of 0.04 % C cast steel specimens **Fig. 4** Effect of chromium content on the toughness of 0.04 % C cast steel specimens

なお図中の点線で示す遷移曲線は基本とした鑄造鋼試験片のもので、また、斜線部は衝撃値遷移温度のばらつきの範囲を示す。

Table 3 および Fig. 3 に、それぞれ最大1.12%までのニッケル添加の静的機械的性質および衝撃値におよぼす影響を示す。

Table 3 に示すように、鑄造鋼試験片の引張強さ、耐力、絞りおよび硬さに、ニッケル1.12%までの添加はあまり影響せず、無添加のものとはほぼ同等である。

衝撃値遷移温度は、Fig. 3 に示すように、ニッケル1.12%までの添加で $-30 \sim -20^\circ\text{C}$ の範囲にあり、基本組成のものに比べニッケル添加の効果は認め難い。

最大0.52%までのクロム添加の鑄造鋼試験片の静的機

械的性質および衝撃値におよぼす影響をTable 4 および Fig. 4 に示す。

Table 4 に示すごとく、0.33および0.52%のクロム添加のもの（試験片 4CR3 および 4CR4）の引張強さ、耐力、伸び、絞りおよび硬さは0.11%クロム添加のもの（試験片 4CR1）よりやや高い。これはクロムのみならずマンガン含量の相違によるものと思われる。同様に、C3 のクロム無添加のもの（1.13 % Mn）とクロム0.52%添加したもの（0.80 % Mn）との差がないのもマンガン含量の相違によるものと思われる。

靱性は、Fig. 4 に示すように、クロムの添加によりかえって低下する傾向にあり、0.33%までのクロムの添加で遷移温度は無添加の -30°C から $-20 \sim -10^\circ\text{C}$ に

Table 4 Mechanical properties of 0.04 % C cast steel specimens containing various chromium content

Marks	Cr%	Mn%	σ_B (kg/mm ²)	$\sigma_{0.2}$ (kg/mm ²)	φ (%)	ψ (%)	Hv(10)
C3	—	1.13	43.0	28.0	42	70	170
4CR1	0.11	0.45	39.5	26.0	—	—	147
4CR2	0.22	0.76	—	—	—	—	—
4CR3	0.33	0.66	42.0	29.0	40	—	164
4CR4	0.52	0.80	42.0	29.5	37	79	167

Table 5 Mechanical properties of 0.04 %C cast steel specimens containing various molybdenum content

Marks	Mo%	σ_B (kg/mm ²)	$\sigma_{0.2}$ (kg/mm ²)	φ (%)	ψ (%)	Hv(10)
C3	—	43.0	28.0	42	70	170
4MO1	0.08	41.0	27.0	39	79	160
4MO2	0.12	42.5	29.0	39	75	165
4MO3	0.22	44.0	31.0	—	75	188
4MO4	0.33	45.0	31.0	—	75	172

Fig. 5 Effect of molybdenum content on the toughness of 0.04 %C cast steel specimens **Fig. 6** Effect of boron content on the toughness of 0.04 %C cast steel specimens

上昇し、さらに、0.52 %クロムの添加により、 -10°C で $2 \text{ kg}\cdot\text{m}/\text{cm}^2$ 以下の衝撃値に脆化している。

Table 5 および Fig. 5 にモリブデン添加の静的機械的性質および衝撃値におよぼす影響を示す。

Table 5 に示すごとく、引張強さ、耐力および絞り はモリブデン 0.33 % の添加 (試験片 4MO4) でわずかに増加する傾向にある。伸びは逆にわずかに低下している。硬さはモリブデンの添加により、ばらつきはあるが、あまり変化しないようである。

衝撃値遷移温度は Fig. 5 に示すように、モリブデン 含量 0.12 % で -30°C ともっとも低いが、無添加の場合と同等である。その他の含量でも遷移温度は -30°C と -20°C の間にあり、0.04 %C 铸造鋼の場合には、モリ

ブデン添加による切欠脆性の改善効果は認め難い。

Table 6 および Fig. 6 に铸造鋼試験片の機械的性質におよぼすボロン含量の影響を示す。

Table 6 に示すように、引張強さ、耐力および伸びはボロン量 0.050 % (試験片 4B3) まであまり変化していない。絞りはボロン無添加の場合の 70 % に比べて 80 % と 10 % 増加している。硬さは無添加の場合に比べてわずかに低下している。

衝撃値遷移温度は、Fig. 6 に示すごとく、ボロン含量 0.0035 % で -30°C および 0.005 % で -20°C となっており、ボロン添加による靱性改善の傾向は認められない。

ミクロ組織におよぼす各合金元素単独添加の影響を調

Table 6 Mechanical properties of 0.04 %C cast steel specimens containing various boron content

Marks	B %	σ_B (kg/mm ²)	$\sigma_{0.2}$ (kg/mm ²)	φ (%)	ψ (%)	Hv(10)
C3	—	43.0	28.0	42	70	170
4B1	0.0014	42.0	29.0	41	75	161
4B2	0.0035	42.0	29.0	41	80	162
4B3	0.0050	41.0	27.5	42	80	160

Table 7 Chemical analysis of cast steel specimens, double alloying

Marks	Elements (wt.%)							
	C	Si	Mn	P	S	Ni	Mo	B
4N12	0.04	0.22	0.66	0.003	0.009	0.38		
4NM1	0.03	0.29	0.95	0.003	0.008	0.34	0.03	
4NM2	0.04	0.26	0.75	0.003	0.009	0.34	0.09	
4NM3	0.04	0.18	0.61	0.003	0.009	0.34	0.13	
4NB1	0.04	0.25	0.72	0.003	0.008	0.29		0.0004
4NB2	0.04	0.29	0.88	0.003	0.008	0.34		0.0012
4NB3	0.03	0.28	0.84	0.003	0.008	0.35		0.0024
4MO2	0.04	0.17	0.50	0.003	0.008		0.12	
4MN1	0.04	0.28	0.74	0.003	0.009	0.17	0.12	
4MN2	0.04	0.30	0.89	0.003	0.008	0.24	0.12	
4MN3	0.04	0.18	0.61	0.003	0.009	0.34	0.13	
4MB1	0.04	0.17	0.64	0.003	0.008		0.12	0.0013
4MB2	0.04	0.22	0.64	0.003	0.008		0.12	0.0029
4MB3	0.04	0.32	0.89	0.003	0.009		0.13	0.0065

べたところ, モリブデン0.12%あるいはボロン0.0038%の添加によりフェライト粒は細かくなっていた。これらモリブデン0.12%あるいはボロン0.0038%は, それぞれの合金元素系列で, 試験片の遷移温度をもっとも低くしたものである。また, クロム添加の場合には炭化物が他の合金元素の場合より多く認められた。

以上, 0.04% C 铸造極低炭素鋼の機械的性質におよぼすアルミニウム, ニッケル, クロム, モリブデンおよびボロンの単独添加の影響を調べた結果をまとめて見れば, 引張強さおよび耐力はこれらの合金元素の添加によりほとんど影響されない。また, 衝撃値 遷移温度も, もっとも低い場合 (0.38% Ni, 0.12% Mo あるいは 0.0035% B) で -30°C で, 合金元素無添加のものと同じである。

したがって, 0.04% C 铸造極低炭素鋼の場合には, 第1報¹⁾の0.01% C 铸造極低炭素鋼において認められた。合金元素の単独添加による機械的性質および靱性改善の効果はほとんど認められないようである。

3.3 合金元素複合添加の効果

Table 7 に供試铸造鋼試験片の化学分析値を示す。基本としたのはニッケル0.29~0.35%またはモリブデン0.12~0.13%を含む0.03~0.04% C 铸造極低炭素鋼である。このニッケルおよびモリブデン含量は合金元素単独添加の実験結果により, 铸造鋼試験片の衝撃値 遷移温度 -30°C を与えたものである。

Table 7 に示すように, ニッケル0.29~0.38% を含

Fig. 7 Effect of molybdenum content of the toughness of 0.03-0.04% C cast steel specimens containing 0.34-0.38% Ni

む铸造鋼試験片に, モリブデンおよびボロン, また, モリブデン0.12~0.13%を含む铸造鋼試験片にニッケルおよびボロンをそれぞれ添加して実験を行なった。

Table 8 および Fig. 7 に0.34~0.38%ニッケルを含む試験片の機械的性質におよぼすモリブデン添加の影響を示す。同表中の铸造試験片 4N12 はニッケル含量0.38%の基本組成の機械的性質を示す。

Table 8 Effect of molybdenum content on the mechanical properties of 0.03-0.04% C cast steel specimens containing 0.34-0.38% Ni

Marks	Mo%	σ_B (kg/mm ²)	$\sigma_{0.2}$ (kg/mm ²)	φ (%)	ψ (%)	Hv (10)
4N12	—	43.0	30.5	41	76	168
4NM1	0.03	41.0	29.0	—	—	356
4NM2	0.09	41.0	29.0	—	83	160
4NM3	0.13	42.0	29.0	40	80	175

Table 9 Effect of boron content on the mechanical properties of 0.03–0.04 %C cast steel specimens containing 0.29–0.38 %Ni

Marks	B%	σ_B (kg/mm ²)	$\sigma_{0.2}$ (kg/mm ²)	ψ (%)	ϕ (%)	Hv(10)
4NI2	—	43.0	30.5	41	76	168
4NB1	0.0004	42.0	27.5	—	—	158
4NB2	0.0012	43.0	31.0	—	—	166
4NB3	0.0024	42.0	30.0	42	80	175

Table 8 に示すように、モリブデン含量0.13% (試験片 4NM3) まで引張強さおよび0.2%耐力はほとんど変化していない。また、絞りおよび硬さはモリブデン含量の変化と一定の関係にないようで、明確な傾向はつかみ難い。

衝撃値遷移温度は、Fig. 7 に示すように、モリブデン0.09%で-40°Cで、モリブデン無添加の場合に比べて10°C低い。しかし、0.13%モリブデン添加は逆に遷移温度を上昇させている。

Fig. 8 Effect of boron content of the toughness of 0.03–0.04 %C cast steel specimens containing 0.29–0.38 %Ni

Table 9 および Fig. 8 に0.29～0.38%ニッケルを含む铸造鋼試験片の機械的性質におよぼす0.0004～0.0024%ボロン添加の影響を示す。

Table 10 Effect of nickel content of the mechanical properties of 0.04 %C cast steel specimens containing 0.12–0.13 %Mo

Marks	Ni%	σ_B (kg/mm ²)	$\sigma_{0.2}$ (kg/mm ²)	ψ (%)	ϕ (%)	Hv(10)
4MO2	—	42.5	29.0	39	75	165
4MN1	0.17	44.0	31.0	40	78	165
4MN2	0.24	46.0	34.0	—	74	171
4MN3	0.34	46.0	29.0	39	—	180

静的機械的性質は、Table 9 に示すように、ボロン0.0024% (試験片 4NB3) までの添加によりあまり変化せず、ボロン無添加のもの (試験片 4NI2) とほぼ同等になっている。

衝撃値遷移温度はボロン含量0.0012%および0.0024%で-30°Cとなっており、ニッケル0.38%を含む0.004%C铸造鋼試験片の遷移温度と同じである。

Fig. 9 Effect of nickel content on the toughness of 0.04 %C cast steel specimens containing 0.12–0.13 %Mo

0.12～0.13%モリブデンを含む試験片の引張強さおよび衝撃値におよぼすニッケル添加の影響を Table 10 および Fig. 9 に示す。

Table 10 に示すごとく、ニッケル含量0.34%の試験片 (4MN3) の引張強さは 46 kg/mm² で、モリブデン

Table 11 Effect of boron content on the mechanical properties of 0.04 %C cast steel specimens containing 0.12~0.13 %Mo

Marks	B%	σ_B (kg/mm ²)	$\sigma_{0.2}$ (kg/mm ²)	φ (%)	ψ (%)	Hv(10)
4MO2	—	42.5	29.0	39	75	165
4MB1	0.0013	42.0	31.0	40	78	165
4MB2	0.0029	44.0	32.0	37	74	171
4MB3	0.0065	50.0	—	—	—	180

Fig. 10 Effect of boron content on the toughness of 0.04 %C cast steel specimens containing 0.12~0.13 %Mo

含量0.12%のニッケル無添加の 4MO2 試験片の引張強さ 42.5 kg/mm² と比較して増加している。耐力、伸びおよび絞りはいずれも変化していない。

衝撃値は Fig. 9 に示すように、ニッケル含量の増加に伴い低下する傾向にある。すなわち、ニッケル含量0.17%で試験片の衝撃値遷移温度は-30°C と -20°C の間にあるが、ニッケル含量0.34%で著しい脆化を示している。

Table 11 および Fig. 10 に、0.12~0.13%モリブデンを含む铸造鋼試験片の機械的性質におよぼす0.0013~0.0065%ボロン添加の影響を示す。

Table 11 に示すごとく、引張強さはボロンの添加により増加する傾向にある。

また、Fig. 10 によれば、ボロン含量0.0029%の 4MB2 試験片の遷移温度は-30°C で、ボロン無添加の 4MO2 試験片と同様であるが、これ以上あるいはこれ以下のボロン含量では遷移温度は上昇している。合金元素複合添加の場合のミクロ組織観察結果によれば、モリブデン0.13%およびボロン0.0065%の複合添加によるフェライト粒の微細化がとくに顕著であった。

Fig. 11 に 0.03~0.04 %C 铸造鋼試験片の機械的性質におよぼす合金元素複合添加の効果を比較して示す。

Fig. 11 Effects of double alloyed elements on the strength and toughness of 0.03~0.04 %C cast steel specimens

点線は合金元素無添加の 0.04 %C 铸造鋼試験片の結果で、斜線部は遷移温度のばらつきの範囲を示す。

同図によれば、ニッケル0.34%およびモリブデン0.09%を含む試験片の衝撃値遷移温度は基本組成のものに比べ、10°C 低く、-40°C である。ただし、この場合、引張強さの上昇は認められない。

モリブデン含量0.12%およびボロン含量0.0029%のものは基本組成に比べ靱性は同程度であるが、強さがやや高い。

4. 結 言

十分な強さと高い靱性の溶接金属の組成を明らかにする目的で、既報の実験からもっとも高い切欠靱性が期待できる炭素含量0.04%の铸造極低炭素鋼を基本組成として、これにアルミニウム、ニッケル、クロム、モリブデンあるいはボロンを単独添加ならびにニッケルとモリブデン、ニッケルとボロンおよびモリブデンとボロンを複合添加して強さと靱性におよぼす影響を調べ、次の結果を得た。

- 1) 0.03~0.05 %C 铸造鋼へのアルミニウム、ニッケル、クロム、モリブデンあるいはボロンの単独添加による靱性改善は得られなかった。
- 2) 0.04 %C 铸造鋼へのニッケル0.34%およびモリブデン0.09%の複合添加は強度と靱性の改善に効果があり、引張強さを 46 kg/mm²、衝撃値遷移温度を -40°C にした。

参 考 文 献

- 1) 益本, 篠田, 木内, 尾崎: 「極低炭素溶接金属におよぼす合金元素の影響(第1報)」, 溶接学会誌, Vol. 40 (1971), No.10, p. 72~77