

Cr-Mn-Ni オーステナイト系ステンレス鋼の 凝固組織に及ぼす合金元素の影響

大嶋 貴之*・木村 厚志*²・濱田 辰巳*・羽原 康裕*・黒田 光太郎*³

Effects of Alloying Elements on Solidification Structures in Cr-Mn-Ni Austenitic Stainless Steels

Takayuki OSHIMA, Atsushi KIMURA, Tatsumi HAMADA, Yasuhiro HABARA and Kotaro KURODA

Synopsis : The effects of alloying elements on solidification structures in ingots were investigated in five types of Cr-Mn-Ni austenitic stainless steels: 14%Cr-1.2%Ni-10%Mn-0.13%N, 15%Cr-4%Ni-8%Mn-0.05%N, 15%Cr-4%Ni-8%Mn-0.12%N, 17%Cr-4.5%Ni-3.5%Mn-0.3%Mo-0.10%N and 17%Cr-4%Mn-6.5%Ni-0.05%N.

Delta-ferrite contents in ingots were increased with the increase of Cr contents and were decreased with the increase of Ni and Cu contents, and the each tendency in these alloying elements was almost equal regardless of types of steel, moreover the effect of Mo was the same as Cr. On the top of that, the relationship between Mn and delta-ferrite contents could be approximated by quadratic function. And different Mn contents in each type of steel produced different minimum delta-ferrite contents. Therefore it was obtained that the role of Mn, austenite or ferrite former, was changed by the balance between other alloying elements.

In some steels, martensite in solidification structures increased with the decrease in Ni, Cu and Mn contents. Finally, in Cr-Mn-Ni austenitic stainless steels, the predictable equation of delta-ferrite contents in ingots, Cr and Ni equivalents were obtained by regression analysis between compositions and delta-ferrite contents.

Key words : Cr-Mn-Ni austenitic stainless steel; solidification structure; delta-ferrite; Ni equivalent; Cr equivalent; constitution diagram.

1. はじめに

近年のNi原料の高騰によって、Cr-Ni オーステナイト系ステンレス鋼（以下、Cr-Ni系）のNiの一部、または全部をMnやNなどで代替したCr-Mn-Ni オーステナイト系ステンレス鋼（以下、Cr-Mn-Ni系）が注目されている。そして、これまでもCr-Mn-Ni系の研究開発は、Ni原料価格の高騰等とともに過去にも行われてきた¹⁻⁶⁾。

Cr-Ni系の代表であるSUS304は、加工性および耐食性に優れた鋼種であるため、多くの用途で使用されている。しかし、用途によってはSUS304の特性すべてが必要とは限らない。よって、今後のCr-Mn-Ni系の開発は、Cr-Ni系の特性の一部を代替し、用途にあった成分設計を行うことである。そのために、Cr-Mn-Ni系の特性に及ぼす合金元素の影響を把握することは重要である。

オーステナイト系ステンレス鋼の δ フェライトを含めた凝固組織に関する研究では、各種合金元素のオーステナイト形成力をNi当量（以下、 Ni_{eq} ）として、フェライト形成力をCr当量（以下、 Cr_{eq} ）として、Schaeffler以来、多くの研究者によって提案され⁷⁻¹³⁾、 δ フェライト量の予測式が

得られている。

一般に、Mnはオーステナイト形成元素⁷⁻¹¹⁾として知られているが、多量のMnはフェライト形成元素となることがいくつか報告され^{9,12,13)}、Mnの作用が複雑であることが指摘されている。Cr-Mn-Ni系において、MnはNiの代替として主に使用されるので、そのオーステナイト形成能力を把握することは重要である。

さらに、従来の凝固組織、特に δ フェライト量に関する研究は、溶接金属のように、その凝固時の冷却速度が数100°C/s以上¹⁴⁾と速い場合が多い。しかし、オーステナイト系ステンレス鋼の凝固組織、特に δ フェライトの存在は、熱間圧延時の割れにも影響することが知られている¹⁵⁻¹⁷⁾。熱間圧延素材は、比較的大きなインゴットを使用するため、その凝固時の冷却速度は数10°C/s以下¹⁴⁾であり、溶接金属に比べて非常に遅い。そのため、従来の Ni_{eq} や Cr_{eq} 、また δ フェライト量を予測する式が適用できない可能性がある。さらに、インゴット組織は、その後の金属組織にも影響し、凝固時の δ フェライト量によっては、製品である冷延板の組織中に δ フェライトが残留する。

そこで、本研究では、Cr-Mn-Ni系のインゴットにおけ

平成17年11月4日受付 平成18年1月20日受理 (Received on Nov. 4, 2005; Accepted on Jan. 20, 2006)

* 日本金属工業（株）研究開発本部商品開発部 (Products Development Department, Research and Development Division, Nippon Metal Industry Co., Ltd., 1 Hama-cho Hekinan Aichi)

* 2 日本金属工業（株）衣浦製造所 (Kinuura Works, Nippon Metal Industry Co., Ltd.)

* 3 名古屋大学大学院工学研究科量子工学専攻 (Department of Quantum Engineering, Faculty of Engineering, Nagoya University)

Table 1. Chemical compositions. (mass%)

series		C	Si	Mn	Ni	Cr	Mo	Cu	N
Steel A	Base	0.075	0.27	9.54	1.21	14.43	<0.01	1.87	0.153
	Min.	0.075	0.26	0.35	0.01	14.43	<0.01	0.01	0.122
	Max.	0.088	0.33	19.08	3.05	16.91	<0.01	3.94	0.153
Steel B	Base	0.051	0.45	7.71	4.03	15.21	<0.01	1.62	0.056
	Min.	0.042	0.44	0.10	0.01	15.21	<0.01	0.01	0.042
	Max.	0.050	0.50	11.76	6.06	18.15	<0.01	4.00	0.060
Steel C	Base	0.048	0.47	7.88	3.96	15.23	<0.01	1.50	0.116
	Min.	0.044	0.45	0.08	0.01	15.23	<0.01	0.01	0.107
	Max.	0.051	0.51	11.66	6.02	18.04	<0.01	3.99	0.135
Steel D	Base	0.061	0.54	3.62	4.55	17.32	0.27	2.57	0.114
	Min.	0.055	0.53	0.16	3.09	15.07	0.08	0.90	0.084
	Max.	0.063	0.62	5.94	7.05	18.93	0.95	4.11	0.114
Steel E	Base	0.057	0.43	3.97	6.50	17.15	<0.01	2.03	0.052
	Min.	0.053	0.43	0.02	4.43	15.14	<0.01	0.01	0.039
	Max.	0.066	0.49	6.12	9.02	18.98	<0.01	4.01	0.053

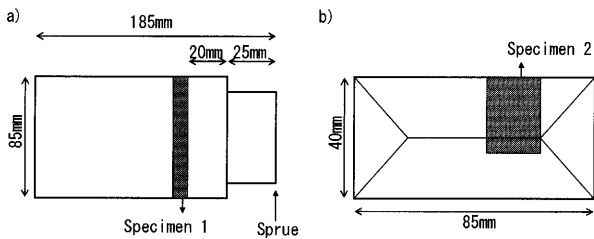


Fig. 1. Schematic illustrations of ingot; (a) ingot, (b) cross section of specimen 1.

る凝固組織および δ フェライト量に及ぼす合金元素の影響を調査した。

2. 実験方法

高周波溶解炉を用いて溶解し、銅製の鋳型に鋳込み、約40mm×85mm×185mmで約5kgのインゴットを製作した。Table 1にインゴットの成分を示す。5種類の基本成分に対して、Mn, Ni, Cr, Cuを変化させた。また、Steel Dについては、Moについても変化させた。なお、C, SiおよびNの成分範囲はばらつきを示している。さらに、各成分系とも、Pは0.030%以下、Sは0.0050%以下であった。

Fig. 1に示すように、インゴットの後端部（湯口側）約45mmの位置から、約10mm厚のサンプル(Specimen 1)を採取した。そして、インゴット断面のフェライト量をFISCHER製FERITSCOPEで測定した。なお、フェライト量は、サンプル断面に5mm間隔の格子線を引き、その交点上で測定した値の平均とした。Fig. 2にインゴットのフェライト量に対する測定値のばらつきを示す。インゴット中のフェライト量が増加すると、そのばらつきも大きくなった。

また、サンプルから、t×20mm×25mmの試験片(Specimen 2)を切り出し、表面を鏡面研磨した後、硝酸電解エッチングし、凝固組織を光学顕微鏡で観察した。

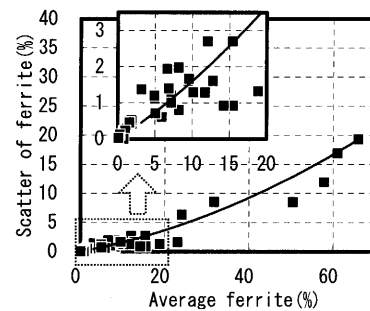


Fig. 2. Scatter of measured ferrite content to average ferrite content in ingots.

3. 結果

3.1 凝固組織の変化

各基本成分のインゴット組織は δ フェライトとオーステナイトであった。また、ポロシティが観察されることもあったが、その大きさは数10 μ m以下であったため、フェライト量の測定値のばらつきには、ほとんど影響しなかった。

そして、すべての成分系で、CrおよびMoの増加とNiの減少によって組織中の δ フェライトは増加したが、Cuの変化による δ フェライトの変化は明らかではなかった。

Fig. 3にSteel Bにおいて、Mnを変化させた場合の組織変化を示す。Mnが増加すると、 δ フェライトの増加する場合が認められた。

また、Fig. 4にSteel Bにおいて、Mnを変化させた場合の組織の微分干渉像を示す。Mnが減少すると、Fig. 3ではオーステナイト相と思われた組織の中に、マルテンサイトと思われる組織が観察されるようになった。このような組織は、Steel Eを除く成分系で観察され、さらに、各成分系の低Ni材や低Cu材でも観察されることがあった。

3.2 フェライト量の変化

Fig. 5にフェライト量に及ぼす合金元素の影響を示す。

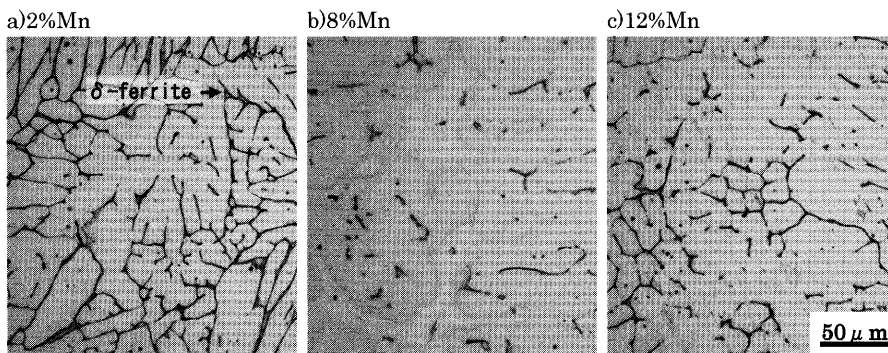


Fig. 3. Effect of Mn on microstructure of ingot in Steel B series.

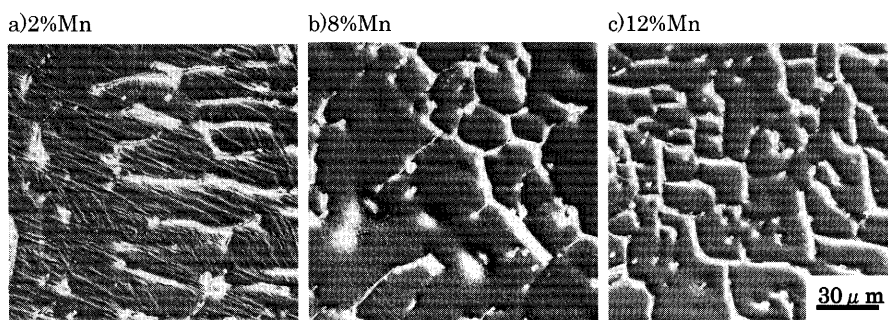


Fig. 4. Effect of Mn on microstructure of ingot by differential interference microscopy in Steel B series.

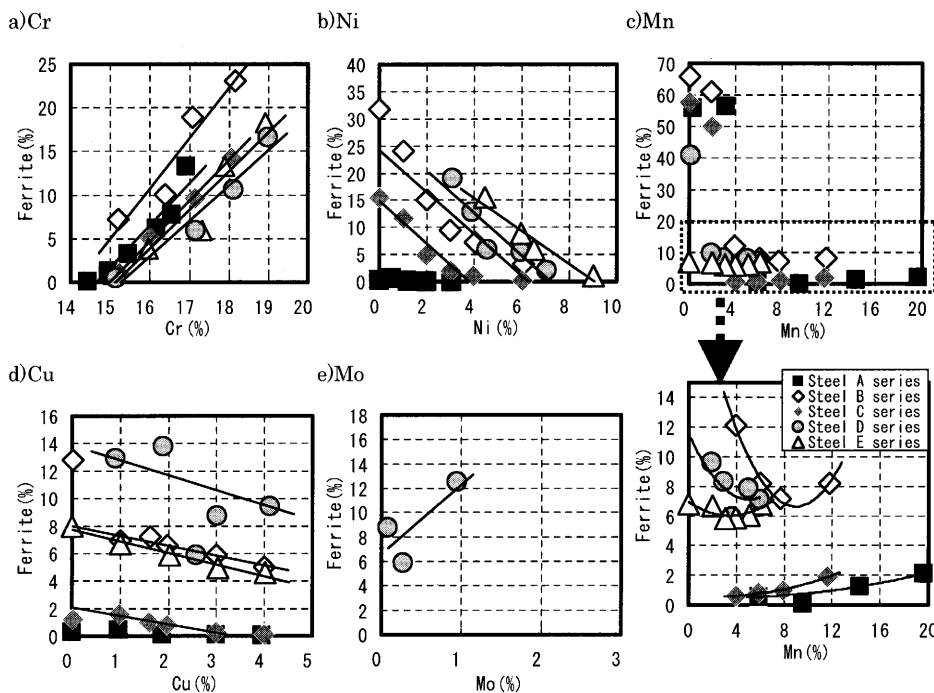


Fig. 5. Effects of Cr, Ni, Mn, Cu and Mo on ferrite content in ingots of Cr-Mn-Ni austenitic stainless steels.

Crの増加は、いずれの成分系においても、フェライト量を増加させた。しかもその勾配はいずれの成分系もほぼ同じであった。

NiおよびCuの増加は、Steel A系を除く成分系で、フェライト量を低下させた。しかもその勾配はいずれもほぼ同じであった。なお、Steel A系は、0% Niおよび0% Cuでも

フェライト量がわずかであったため、勾配を検出するには至らなかったと思われる。

Mnの影響はやや複雑であった。まず、Steel A系、Steel B系およびSteel C系の3% Mn以下では、フェライト量が50%以上に、Steel D系の0% Mnでは、フェライト量は約40%になった。これらは組織観察の結果から、マルテンサ

イトが多く生じているためと考えられる。一方、Steel E系では、0% Mnでもフェライト量は10%以下であった。

なお、Ni、CuとMnを変化させたときの組織観察において、マルテンサイト組織が確認されながら、フェライト量の少ない場合があった。これは観察されたマルテンサイト組織が、研磨で生じた加工誘起マルテンサイトであり、その存在が研磨面の極表層に限り存在したため、フェライト量にはあまり影響しなかったと考えられる。

一方、マルテンサイトが生じていなかった成分範囲では、フェライト量を最小とするMn量が存在した。すなわち、Mn添加量が多くなるとフェライト量が増加した。また、フェライト量を最小にするMn量は成分系によって異なっていた。

最後に、Moの増加は、フェライト量を増加させた。なお、0.3% Moのフェライト量が、0.1% Moよりも少なくなったが、これは0.3% Mo材のN量が0.114%とその他の試料より約0.2%多く含有していたためと思われる。

4. 考察

4.1 δフェライト量の予測

凝固組織、特にδフェライト量は後工程の熱延時の割れに影響することが知られている¹⁴⁻¹⁶⁾。このため、凝固組織中のδフェライト量を予測するために、δフェライト量を成分の線形一次式で表現することが行われている^{6,13)}。本報告においても、δフェライト量と成分の関係を回帰分析によって、算出することを試みた。なお、フェライト量が40%以上となった成分は、マルテンサイト組織であったため、分析から除外した。さらに、Fig. 7の結果から、MnはMn²の項を設けた。その結果、式(1)の結果が得られた。そして、Fig. 6に、計算フェライト量と実測のフェライト量の関係を示す。

Calculated ferrite (%)

$$= -32.1 - 135C + 4.7Si - 0.043Mn + 0.0135Mn^2$$

$$- 3.3Ni + 4.3Cr + 3.1Mo - 0.66Cu - 119N, \quad R^2 = 0.94$$

.....(1)

この結果、計算フェライト量と実測フェライト量は良い相関が得られた。

合金元素の影響を見ると、Cr、MoおよびSiのフェライト形成元素の増加はδフェライトを増加させ、C、N、NiおよびCuのオーステナイト形成元素の増加は、δフェライトを減少させることになる。この式で特徴的なのは、Mnである。Mnはその添加量が少ないと、オーステナイト形成元素になり、その添加量が多くなると、フェライト形成元素になることを示している。このようなMnのフェライト形成効果はいくつか報告されている^{9,12,13)}。

高Mn含有オーステナイト系ステンレス鋼で開発された従来のδフェライト量の予測式^{6,13)}と比較すると、NiよりもCr、NよりもCが、δフェライト量への影響度は大きく、MnやCuの影響度が小さいという点では一致している。

4.2 Ni当量(Ni_{eq})およびCr当量(Cr_{eq})

オーステナイト系ステンレス鋼の凝固組織に関して、各種合金元素の効果をNiとCrの効果に換算する実験式が

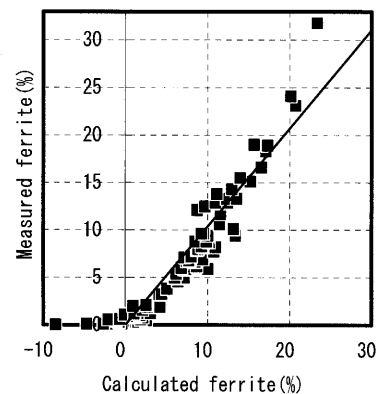


Fig. 6. Relationship between measured ferrite content and calculated ferrite content.

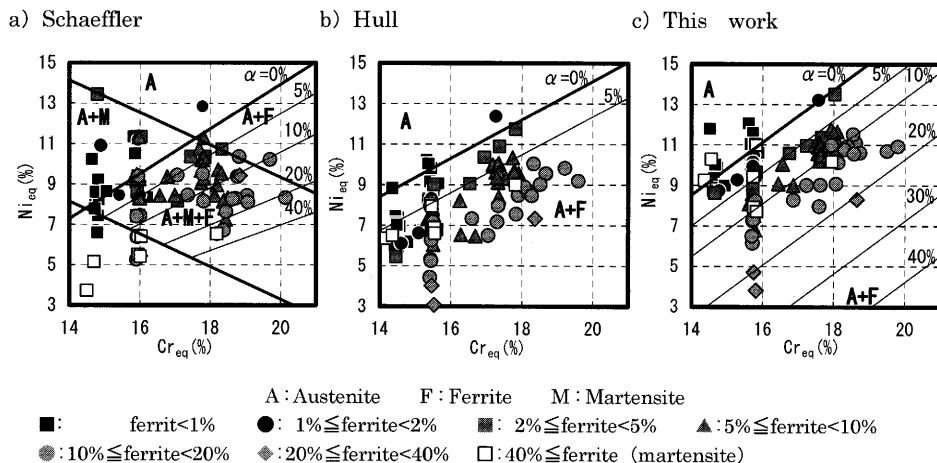


Fig. 7. Constitution diagrams of ingots in Cr-Mn-Ni austenitic stainless steels.

Table 2. Various Ni equivalents and Cr equivalents.

	Ni _{eq}					Cr _{eq}		
	C	N	Ni	Mn	Cu	Si	Cr	Mo
Schaeffler ⁷⁾	30	-	1.0	0.5	-	1.5	1.0	1.0
DeLong ⁸⁾	30	30	1.0	0.5	-	1.5	1.0	1.0
Hull ⁹⁾	24.5	18.4	1.0	*1	0.44	0.48	1.0	1.21
Hammar ¹¹⁾	22	14.2	1.0	0.31	1.0	1.5	1.0	1.37
This work	41	36	1.0	*2	0.20	1.1	1.0	0.72

*1 : 0.11Mn-0.0086Mn² *2 : 0.013Mn-0.0041Mn²

Schaeffler 以来、多くの研究者によって提案されている⁷⁻¹¹⁾。本報告では、式(1)において、-係数をオーステナイト形成元素と+係数をフェライト形成元素と見ることが出来る。なお、Mnはオーステナイト形成元素とみなし、Ni_{eq}へ入れた。その結果、Cr_{eq}およびNi_{eq}は式(2)および式(3)となる。

$$Cr_{eq} = Cr + 1.1Si + 0.72Mo \dots \dots \dots (2)$$

$$Ni_{eq} = Ni + 41C + 36N + 0.20Cu + 0.013Mn - 0.0041Mn^2 \dots (3)$$

Table 2に、これまでに報告されている主なCr_{eq}およびNi_{eq}の係数を示す。本研究のCr_{eq}とNi_{eq}のCとNに関しては、従来と同様の結果となった。一方、MnとCuは、研究者によって、大きく異なり、本研究では、いずれも従来の研究結果よりも小さくなった。

Fig. 7に、これらCr_{eq}とNi_{eq}を用いた組織図を示す。Suutala¹⁸⁾は溶接金属を用いて様々な成分のδフェライト量を測定し、Cr_{eq}とNi_{eq}を用いて、組織図を作成した。そして、5% Mn以上では、Hullの式と良い相関があり、それ以下では、SchaefflerまたはDeLongの式と良い相関のあることを報告している。

今回の実験でも、Schaeffler⁷⁾のNi_{eq}およびCr_{eq}では、Cr-Mn-Ni系の凝固組織中のδフェライト量を表現することは出来ないことが明らかとなった。

これらに比べ、Hull⁹⁾のNi_{eq}とCr_{eq}では、概ねδフェライト量を表現しているが、十分とは言えない。これは、Hullと本研究の凝固時の冷却速度の違いが影響していると考えられる。本研究の凝固時の冷却速度は、表層から約10mmにおけるデンドライト2次アーム間隔から、およそ30°C/s以下と見積もられたが、Hullのチル組織の凝固時の冷却速度は不明である。しかし、Hullは、直径約6mmの銅製鋳型で得られるピンサンプルのため、その凝固時の冷却速度は本研究のそれよりも大きいと予想される。凝固時の冷却速度は、δフェライトの形態¹⁷⁾や凝固モード¹⁴⁾に影響することから、δフェライト量にも影響したと考えられる。

一方、本報告のNi_{eq}およびCr_{eq}では、ほぼδフェライト量を表現できていると思われる。しかし、マルテンサイト(40%≦ferrite)を含む組織図としては、適用できないことは明らかであり、今後、検討を要する。

Table 3. Relationships between ferrite content and Mn.

Series	ferrite(%)=a(Mn-b) ² +c
Steel A	ferrite(%)=0.0057(Mn-3.0) ² +0.51
Steel B	ferrite(%)=0.21(Mn-9.0) ² +6.6
Steel C	ferrite(%)=0.016(Mn-2.6) ² +0.58
Steel D	ferrite(%)=0.17(Mn-5.0) ² +7.2
Steel E	ferrite(%)=0.081(Mn-3.4) ² +6.0

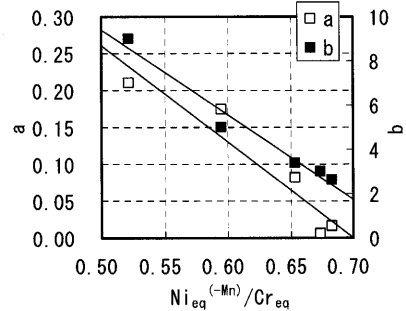


Fig. 8. Effects of Ni_{eq}^(-Mn)/Cr_{eq} on coefficient of a and b.

4.3 δフェライト量に及ぼすMnの影響

4.1項で、δフェライト量を成分の線形式で記述することを試み、式(1)で良い相関が得られ、実用的には十分に適用できると考えられる。

しかし、いずれの成分系も、Mnとδフェライト量の関係は放物線となる点では共通するが、成分系によって、δフェライト量に及ぼす影響度が異なっている。よって、厳密に言えば、δフェライト量のMnの係数は式(1)のような単純なものではないと考えられる。

Table 3に各成分系のδフェライト量をMnの2次関数で近似した場合の関係式を示す。ここで、b(%)がフェライト量を最小にするMn量、cがその時の最小フェライト量、aが係数である。なお、フェライト量が40%以上となったマルテンサイト組織を多く含む成分系は除外した。Table 7に示すように、成分系によって、δフェライト量が最小となるMn量や、放物線の係数が異なっている。

これらは、Mnのオーステナイト形成力はその他の元素の影響を受けていることを示唆している。そこで、式(3)のNi_{eq}からMn項を除いたNi当量(以下、Ni_{eq}^(-Mn))とCr_{eq}との比であるNi_{eq}^(-Mn)/Cr_{eq}と、δフェライト量を最小にするb(%)および係数aの関係を検討した結果、Fig. 8が得られた。そして、実質的にδフェライト量に及ぼすMnの効果を式(4)のMn当量(Mn_{eq})として定義する。この結果、δフェライト量に及ぼすMnの影響は、その他の元素のバランスによって変化することが明らかとなった。

$$\delta\text{-ferrite}(\%) = Mn_{eq} + C \text{ (定数)}$$

$$Mn_{eq} = 1.3(0.70 - Ni_{eq}^{(-Mn)}/Cr_{eq}) \times \{Mn - 38.4(0.74 - Ni_{eq}^{(-Mn)}/Cr_{eq})\}^2 \dots \dots \dots (4)$$

$$Ni_{eq}^{(-Mn)} = Ni_{eq} - (0.013Mn - 0.0041Mn^2) \dots \dots \dots (5)$$

$$Cr_{eq} = Cr + 1.1Si + 0.72Mo \dots \dots \dots (6)$$

このように Mn の効果が、 $Ni_{eq}^{(-Mn)}/Cr_{eq}$ によって異なる原因については不明である。しかし、凝固組織において、Ni 当量と Cr 当量の比は、凝固モードの解析に度々利用される^{10,18-20}ため、Mn の効果も凝固モードが関係している可能性がある。

4.4 Mn の Ni 当量

Cr_{eq} 、 $Ni_{eq}^{(-Mn)}$ および Mn_{eq} とインゴットのフェライト量の回帰分析を行った結果、式(7)が得られ、 Ni_{eq} は式(8)となる。さらに、式(8)から Mn の項を抽出すると Mn の Ni 当量 (以下、 Ni_{eq}^{Mn}) を示す式(9)が得られる。そして、ここでは、 $Ni_{eq}^{(-Mn)}/Cr_{eq}$ が変化したときの Ni_{eq}^{Mn} の変化を検討した。

$$\delta\text{-ferrite}(\%) = 3.1Cr_{eq} - 2.2Ni_{eq}^{(-Mn)} + 0.15Mn_{eq} - 23.9 \dots \dots (7)$$

$$Ni_{eq} = Ni + 41C + 36N + 0.20Cu - 0.07Mn_{eq} \dots \dots \dots (8)$$

$$Ni_{eq}^{Mn} = -0.09(0.70 - Ni_{eq}^{(-Mn)}/Cr_{eq}) \times \{Mn^2 - 76.8(0.74 - Ni_{eq}^{(-Mn)}/Cr_{eq})Mn\} \dots \dots \dots (9)$$

Fig. 9 に、 Ni_{eq}^{Mn} に及ぼす $Ni_{eq}^{(-Mn)}/Cr_{eq}$ と Mn 影響を示す。 $Ni_{eq}^{(-Mn)}/Cr_{eq} > 0.7$ の範囲では、Mn の増加とともに Ni_{eq}^{Mn} は増加するため、Mn はオーステナイト形成元素であることを示している。一方、 $Ni_{eq}^{(-Mn)}/Cr_{eq} < 0.7$ の範囲では、Mn の増加とともに Ni_{eq}^{Mn} は増加するが、ある Mn 量以上では減少し、その Mn 量は $Ni_{eq}^{(-Mn)}/Cr_{eq}$ によって異なっている。そして、この範囲では、 $Ni_{eq}^{(-Mn)}/Cr_{eq}$ が増加すると、最大となる Ni_{eq}^{Mn} が低下することから、Mn のオーステナイト形成力もその他の成分元素の影響を受けていると考えられる。

ところで、Fig. 9 には、Hull⁹⁾ および Schaeffler⁷⁾ の Ni_{eq}^{Mn} も示してあるが、Hull の Ni_{eq}^{Mn} の変化も、本研究と同様に、約 6.4% Mn 以上の Mn 添加では、 Ni_{eq}^{Mn} は減少する。しかし、Hull の場合、その他の成分元素の影響を受けないことが、本研究と異なる。なお、Hull の曲線は、本研究における $Ni_{eq}^{(-Mn)}/Cr_{eq} = 0.57$ に相当する。一方、Schaeffler の場合、Mn の増加とともに、 Ni_{eq}^{Mn} は直線的に増加するのみである。これらは、高 Mn 含有ステンレス鋼を含まない試験結果から算出された当量であるため、Mn のフェライト形成効果が現れなかったと考えられる。

5. まとめ

高周波溶解で製作した 5 種類の Cr-Mn-Ni オーステナイト系ステンレス鋼のインゴットにおける凝固組織および δ フェライト量に及ぼす合金元素の影響を調査した。そして、以下の結果が得られた。

(1) いずれの成分系も、Cr 量の増加とともにフェライト量は直線的に増加し、Ni 量および Cu 量の増加とともにフェライト量は直線的に減少した。

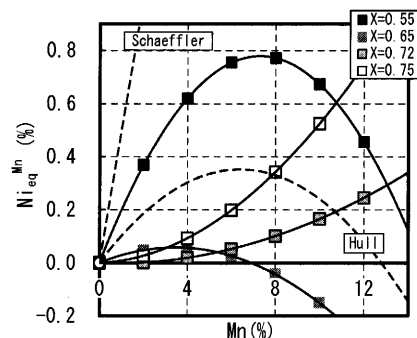


Fig. 9. Effects of Mn and X ($=Ni_{eq}^{(-Mn)}/Cr_{eq}$) on Ni_{eq}^{Mn} .

(2) いずれの成分系も、Mn 量に対して、フェライト量は放物線 (2 次関数) となり、フェライト量を最小にする Mn 量が存在したが、その Mn 量は成分系で異なった。

(3) δ フェライト量と成分との回帰分析をした結果、下式が得られた。そして、Cr 当量 (Cr_{eq}) および Ni 当量 (Ni_{eq}) も得られた。

$$\delta\text{-ferrite}(\%) = -32.1 + 4.3Cr_{eq} - 3.3Ni_{eq}$$

$$Cr_{eq} = Cr + 1.1Si + 0.72Mo$$

$$Ni_{eq} = Ni + 41C + 36N + 0.20Cu + 0.013Mn - 0.0041Mn^2$$

(4) 凝固組織中のフェライト量と Mn の関係は、Mn を除いた Ni 当量 ($Ni_{eq}^{(-Mn)}$) と Cr 当量 (Cr_{eq}) の比 ($=Ni_{eq}^{(-Mn)}/Cr_{eq}$) と相関が認められた。そして、凝固時の Mn のオーステナイト形成力が、その他の成分の影響を受けることが明らかとなった。

文 献

- 1) F.M.Becket: Year Book Am. Iron Steel Int., (1930), 173.
- 2) R.Franks, W.O.Binder and J.Thompson: *Trans. Am. Soc. Met.*, **47** (1955), 231.
- 3) R.A.Lincoln: *Iron Age*, (1953), 129.
- 4) D.J.Carney: *Steel*, **137** (1955), 138.
- 5) A.Makino: *The Special Steel*, **19** (1970), 55.
- 6) M.Arakawa, M.Yamaguti, T.Nishida, H.Sumitomo, Y.Sawatani and K.Ooka: *Seitetsu Kenkyu*, **292** (1977), 29.
- 7) A.L.Schaeffler: *Weld. J.*, **26** (1947), 601s.
- 8) W.T.DeLong, G.A.Ostrom and E.R.Szumachowski: *Weld. J.*, **35** (1956), 521s.
- 9) F.C.Hull: *Weld. J.*, **52** (1973), 193s.
- 10) O.Hammar and U.Svensson: *Solidification and Casting of Metals*, The Metal Society, London, (1979), 401.
- 11) D.J.Kotecki and T.A.Siewert: *Weld. J.*, **71** (1992), 171s.
- 12) A.Backman and B.Lundqvist: *Weld. J.*, **56** (1977), 23s.
- 13) A.D.Schino, M.G.Mecozzi, M.Barteri and J.M.Kenny: *J. Mater. Sci.*, **35** (2000), 375.
- 14) U.Siegel, H.-J.Spies and H.-J.Eckstein: *Steel Res.*, **57** (1986), 25.
- 15) T.Kawasaki, I.Takada, H.Ohtsubo and S.Suzuki: *Kawasaki Steel Gihou*, **17** (1953), 306.
- 16) M.Saito, M.Imamura and Y.Ito: *Denki Seiko*, **52** (1982), 179.
- 17) M.Abe, T.Takeshita, M.Ueda, S.Yamguchi and F.Kurosawa: *CAMP-ISIJ*, **2** (1989), 861.
- 18) N.Suutala: *Metall. Trans. A*, **13A** (1982), 2121.
- 19) G.K.Allan: *Ironmaking Steelmaking*, **22** (1995), 465.
- 20) N.Suutala: *Metall. Trans. A*, **14A** (1983), 191.