

# 高耐食・高耐熱ステンレス鋼用溶接金属の 凝固、変態の予測技術

## Prediction of Solidification and Phase Transformation in Weld Metals for Welding of High Performance Stainless Steels

小 関 敏 彦<sup>\*<sup>(1)</sup></sup> 井 上 裕 滋<sup>\*<sup>(2)</sup></sup> 森 本 裕<sup>\*<sup>(2)</sup></sup> 大 北 茂<sup>\*<sup>(2)</sup></sup>  
Toshihiko KOSEKI Hiroshige INOUE Hiroshi MORIMOTO Shigeru OHKITA

### 抄 録

ステンレス鋼は、様々な腐食環境、高温、低温などで、幅広く用いられるが、それぞれの環境に対応する鋼材と同時に、適合する溶接材料、溶接技術のタイムリーな開発と提供が重要である。ステンレス鋼の溶接性及び溶接金属の諸特性は、その凝固モードに大きく依存する。したがって、凝固とそれに続く固相変態を制御し、最適な溶接技術を確立するために、モデリングを含む凝固・変態挙動の予測技術が肝要となる。特に、高性能ステンレス鋼に適用する溶接金属は、一般に冶金的オーバーマッチ（母材より高合金）が必要であり、それゆえ広い成分設計範囲での検討が要求されるが、その中で最適な溶接金属組成を迅速に決定するためには、溶接凝固・変態の予測技術の利用が不可欠である。本報では、多元系合金での平衡計算を組み込んだ凝固・固相変態の解析モデルの開発と、それによる $\gamma$ 系ステンレス鋼溶接金属の凝固及び組織の予測について述べた。又、凝固実験と計算熱力学の併用から、種々の実用ステンレス鋼での溶接部の凝固・固相変態を解析し実際に制御した例、高合金溶接金属の凝固まま組織で金属間化合物の析出を解析、予測した例についても述べた。

### Abstract

Stainless steels are widely used in various severe conditions such as in corrosive environment and at elevated or cryogenic temperature, and the expedited development of a welding technology compatible with each steel grade and its application are practically important. Since weldability and welding performance of the stainless steels are greatly affected by the solidification mode of the welds, controlling and predicting the solidification and subsequent solid-state transformation in the welds would play an important role to attain an appropriate welding technology. In case of welding a high performance stainless steel, the weld metals should be generally higher alloyed than the corresponding base metal to achieve a good welding performance, which requires an extensive investigation into chemical compositions of the weld metals in a wide range. Therefore, the application of a predicting system for the solidification and transformation of the welds would be indispensable for promptly developing a suitable welding technology. This report describes the development of a numerical model for solidification and transformation with regard to multi-component alloys, and the prediction of the solidification and final microstructure of the weld metals for austenitic stainless steel. Further, it presents some examples of the analysis and control of the solidification and transformation at various stainless steel welds practically in use as well as the precipitation of intermetallic compounds in as-solidified high-alloyed weld metals, by carrying out solidification experiments as well as applying a computational thermodynamics.

## 1. 緒 言

ステンレス鋼は、様々な腐食環境、あるいは極低温から高温まで、幅広く用いられており、適用される鋼種もオーステナイト系、フェライト系、二相系、マルテンサイト系と多い。その多くは溶接構造物として適用されるため、溶接時の耐高温割れ性など良好な溶接性の確保に加え、各種環境で溶接部の特性確保が構造物全体の使用性

能の点から重要である。凝固ままで使用される溶接部は、圧延、熱処理を経た同組成の母材と比較すると、凝固による溶質偏析や組織の不均質性に起因して特性的に劣る。特に、この傾向は、海水利用や排煙脱硫など厳しい腐食環境や、極低温や超高温など、使用環境が過酷になるほど顕著になる<sup>1)</sup>。従って、高性能ステンレス鋼の溶接金属の成分設計では、凝固組織と諸特性の関係を把握した上に、最適な溶接凝固及び凝固組織を達成することが肝要である。

\*<sup>(1)</sup> 技術開発本部 鉄鋼研究所 接合研究センター 主任研究員  
Sc.D.

\*<sup>(2)</sup> 技術開発本部 鉄鋼研究所 接合研究センター 主任研究員

このような背景から、溶接分野を中心にステンレス鋼の凝固が活発に検討され、最終組織の metallographic な特徴を決定する凝固モードが系統化されてきた<sup>2-5)</sup>。同時に、溶接性や溶接部の諸特性と各凝固モードや凝固組織の関係についても、広く明らかにされてきた。これらの検討が最も重点的に進められたオーステナイト ( $\gamma$ ) 系ステンレス鋼について、各凝固モードの模式図を図1に示す。溶接時に問題となる高温割れ性は、凝固時に晶出する  $\delta$  フェライトにより軽減され、特に FA モード等の初晶  $\delta$  フェライト凝固で最も低い<sup>5)</sup>。一方、極低温靱性や高温での脆化には、凝固組織中に残留する  $\delta$  の有無、その量、分布、形態の影響が大きい<sup>6,7)</sup>。また、凝固による溶質のミクロな正・負偏析、あるいは  $\delta/\gamma$  二相の凝固組織中の溶質分布は、溶接部の局部腐食の主要因になるとともに、溶接熱サイクル中の脆化相析出も促進する<sup>1,8,9)</sup>。これら特性に及ぼす凝固の影響は、基本的には、Ni 基までの高合金溶接金属、あるいは二相ステンレス鋼溶接金属においても同様である。従って、溶接性の確保及び溶接部の材質制御には、溶接金属の凝固の予測、それによる凝固とその結果の組織の制御が極めて重要である。

ステンレス鋼及び Ni 基を含む高合金は、基本的には溶質濃度の高い多元系合金 (Fe-Cr-Ni-...) であり、実際の凝固解析や凝固のモデリングにおいても、多元系の相平衡に関する情報が不可欠である。この点は、凝固に関しては溶質相互間の作用が比較的弱く、凝固挙動の解析を Fe 基二元系から外挿しうる低合金鋼の場合とは大いに異なる。例えば、溶質の固液間分配係数は、溶質間の相互作用によって必ずしも二元系から導出される値とは同一ではない上、包・共晶凝固など多相凝固を含む凝固パスも複雑である。また、凝固初晶などの相の安定性も溶質濃度の多変数関数であり、多元系状態図からの情報が必要である。

多元系合金の凝固を状態図との関係で解析する試みはこれまでも行われてきたが、三元系の比較的簡略な系に限られている。そこで、より多元系の実用鋼では、経験的に各溶質の効果を含む Cr 当量式、Ni 当量式を求め、Fe-Cr-Ni 三元系状態図に適用したり、Schaeffler 図<sup>10)</sup>などの実験状態図に適用して、凝固やその組織を予測してきた。一方、近年、計算機による多元系状態図の計算 (CALPHAD; CALculation of PHase Diagram) に関する研究の活性化に伴い、はん用の多元系平衡計算プログラムが種々開発され、凝固などのモデリン

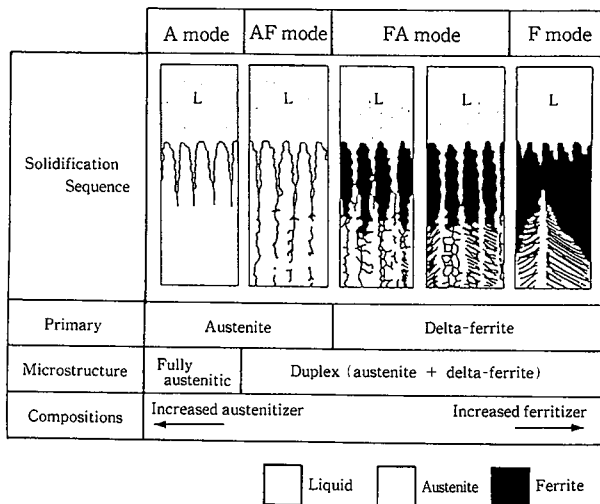


図1 オーステナイト系ステンレス鋼の凝固モード模式図

グへの適用も可能となりつつある<sup>11,12)</sup>。また高合金を中心に、電子論からの相安定性の計算法 (PHACOMP ; PHase COMPutation) も凝固解析への適用が検討されている<sup>8,13)</sup>。

凝固及び凝固後の冷却中の変態、析出の精度の良い予測は、ステンレス鋼溶接金属の凝固、組織の最適化を図り、合金設計をする上で極めて重要である。同時に、溶接技術開発の迅速化、効率化にも有効である。高性能ステンレス鋼に適用する溶接金属は、共金 (母材同組成) では母材と性能格差が大きく、そのため冶金的オーバーマッチ (母材より高合金) が必要であり、その結果、広い組成範囲での検討が要求される。例えば、高耐食高 Mo ステンレス鋼では、Mo の著しいミクロ偏析のため共金溶接金属の耐食性は著しく低下する<sup>1,9)</sup>。溶接金属は母材以上の高 Mo 化が必要であるが、それによる脆化相の析出を防ぐため、Ni 基をも含む広い成分範囲で成分の最適化の検討が必要である。凝固、変態の予測技術は、これらに伴う実験数や溶接技術の開発期間を低減するために非常に有効である。

このような背景から、新日本製鐵ではこれまで、ステンレス鋼、高合金の溶接金属の凝固・変態予測及び制御に向けて、計算機による解析モデルの開発、凝固実験と多元系熱力学計算あるいは相安定性計算の併用による実用合金の凝固解析、それによる組織制御の指標の導出などを進めてきた。これらにより、非常に多い鋼種に加え、それぞれに対応する溶接材料の冶金的オーバーマッチを含む広い成分設計の検討範囲の中から、溶接材料、溶接技術の迅速な開発が可能であり、順次、実際の高性能ステンレス鋼の溶接技術開発に適用されてきた。本報では以下にそれらを紹介する。

## 2. 計算による凝固解析・予測

多元系合金の凝固を、共晶や包晶の多相凝固も含めて解析するため、多元系平衡計算プログラムである Thermo Calc<sup>14)</sup>を用い、それと結合した凝固解析モデルを開発した<sup>12)</sup>。モデルは、デンドライト凝固において、熱バランス及び界面での局所平衡仮定から凝固の進行を評価し、同時に固相内の溶質拡散、 $\delta/\gamma$  固相変態を解析した。本モデルで考慮した凝固デンドライトの形状と計算対象領域を図2に、計算のフローチャートを図3に示す。熱伝導はデンドライト主軸方向、固相内拡散はデンドライト半径方向と仮定した。固液界面及び  $\delta/\gamma$  界面では局所平衡を仮定し、その解析に必要な多元系の相平衡データは、モデル計算中、随時 Thermo Calc により計算し取り込ん

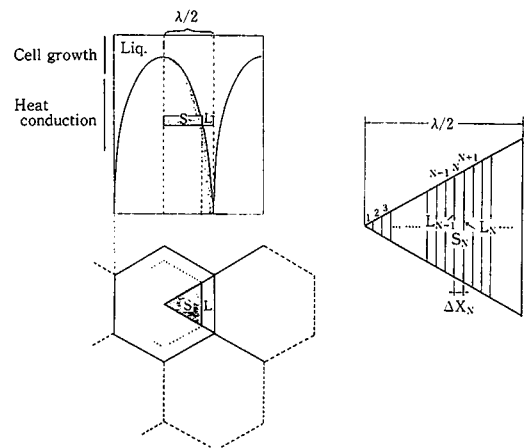


図2 (a)多元系合金の凝固解析モデルで考慮した凝固セルの長手及び横断面図；(b)凝固セル断面中の計算対象領域とその差分メッシュ分割

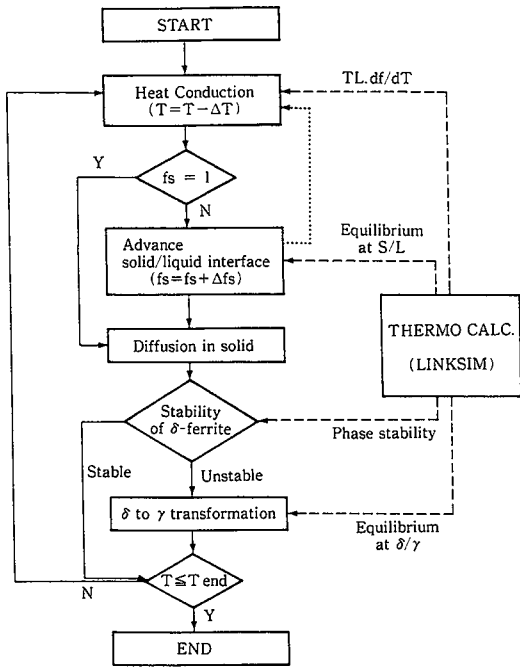


図3 多元系平衡計算ソフトウェア Thermo Calc と結合した凝固解析のフローチャート

だ。有限差分要素中のマイクロな  $\delta/\gamma$  変態は、要素間のマクロな平衡及びマクロ物質移動と独立して、それぞれの要素内で Clyne-Kurz 型の解析式<sup>15)</sup>を用いて解いた。

次に、本モデルを Fe-Cr-Ni 合金に適用し解析した例を述べる<sup>12)</sup>。図4及び図5は、それぞれ Fe-18Cr-12Ni 及び Fe-18Cr-10Ni の凝固パスの解析結果を、三元系状態図の液相面投影したものである。初晶  $\gamma$  及び  $\delta$  凝固から共晶凝固への遷移が示され、それぞれ図1に示した AF モード<sup>2)</sup>、FA モード<sup>3)</sup>の凝固パスを再現している。このような凝固中の液相組成の共晶組成への突入、そこでのパスの屈曲、更に共晶の谷のトレース等は、状態図計算を凝固解析に取り入れることで初めて可能であり、従来の解析モデルから大きな改善といえる。また、図4から、 $\gamma$  凝固では樹芯から樹間への Cr の濃度変化が大きく Ni のそれは小さい、共晶分率0.2に比べパスがかなり長い、等が示される。逆に図5からは、 $\delta$  凝固の場合は樹芯から樹間へ Ni の偏析が支配的であることが示される。これらは、AF 及び FA 凝固

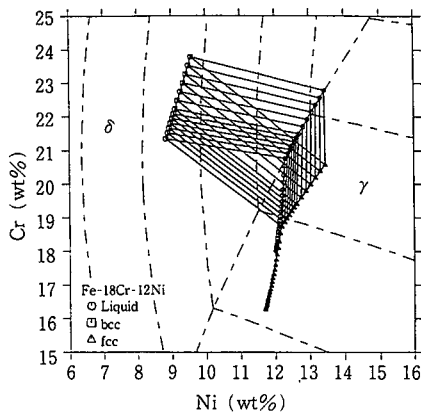


図4 Fe-Cr-Ni状態図の液相面に投影した Fe-18Cr-12Ni合金の凝固パス解析結果

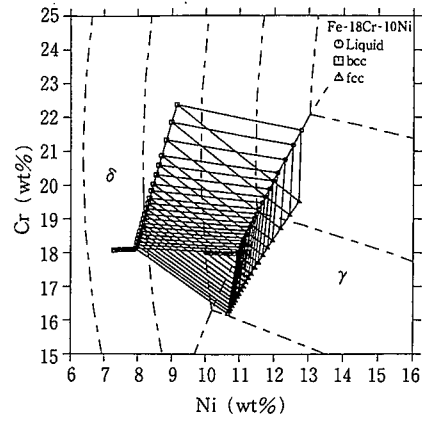


図5 Fe-Cr-Ni状態図の液相面に投影した Fe-18Cr-10Ni合金の凝固パス解析結果

のステンレス鋼溶接部で実際に観察される偏析傾向、溶質分布と良く一致する。写真1はAF凝固した溶接金属の室温組織像であり、図6は樹芯 ( $\gamma$ ) から樹間  $\delta$  にかけての溶質分布を走査型透過電顕 (STEM) により測定した結果<sup>4)</sup>と、本モデルで解析した結果の比較例である。樹間の共晶  $\delta$  での Cr の濃化、Ni の欠乏、 $\delta/\gamma$  間溶質分配に、実験と計算でよい対応が見られる。溶質分布に関する実験と解析との対応は、同様に A モード、FA モード凝固の溶接金属でも得られた。図7に  $\gamma$  系溶接金属中の残留  $\delta$  量の実測とモデルによる予測との比較を示すが、本モデルにより残留  $\delta$  量も比較的よく予測できることが分かった。

より多元系の実用ステンレス鋼においても同様の検証を行った。図8<sup>16)</sup>はFA凝固した316ステンレス鋼 (Fe-18.5Cr-11.5Ni-2.2Mo) 溶接金属中の樹芯から樹間への Cr, Ni, Mo の分布を計算と実測と比較した図である。樹芯に位置する初晶  $\delta$  中での Cr, Mo の濃化、Ni の欠乏など良い対応を示す。また、残留  $\delta$  量についても比較的よく予測できることも分かった。特に、耐熱鋼用溶接金属においては、残留  $\delta$  量とそこでの溶質濃化が、高温使用中の  $\sigma$  相などの脆化相析出に大きく影響することから、その予測は重要である。

これまでの検討から、本解析モデルの妥当性、及び実用鋼への適用可能性がかなり検証できてきた。更なる予測精度向上のために、多元系の熱力学データベースの精度向上、デンドライト二次枝や溶鋼流動の影響の取込みなどを今後進める。一方、本解析モデルは、ステンレス鋼、高合金のみならず低合金鋼側の包晶反応も解析できることが確認されており、鋼全般の凝固解析モデルとして期待できる。また、同解析手法を改良してマイクロ偏析と同時に、鋼の製造時

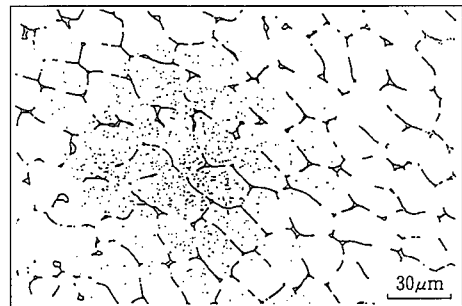


写真1 初晶オーステナイト凝固 (AFモード) の典型的な凝固組織 (Fe-24.6Cr-17.5Ni)

のマクロ偏析の解析に適用する試みも進められている。

### 3. 実験から導出される凝固・変態予測

凝固解析モデルの開発と並行して、実験に Thermo Calc による熱力的な解析を加え、ステンレス鋼の溶接凝固の検討を進めてきた。そしてそこから溶接凝固・変態予測技術を得て、関連する溶接技術開発に適用してきた。以下、それらを紹介する。

#### 3.1 高窒素ステンレス鋼の凝固における窒素の効果<sup>6)</sup>

既に述べたように、 $\gamma$ 系ステンレス鋼において初晶の制御は、耐溶接高温割れ性の観点のみならず、残留 $\delta$ の形態、量にも影響を与え、

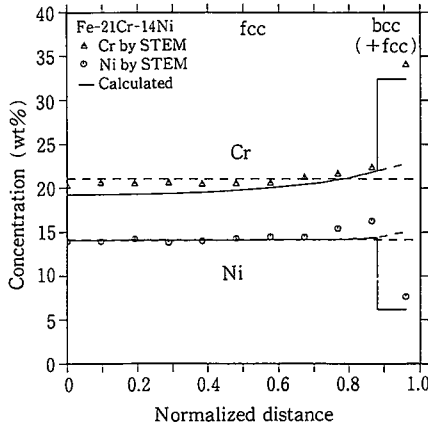


図 6 初晶オーステナイト凝固(AFモード)した dendrite 中の Cr, Ni 分布の実測とモデルによる解析結果の比較

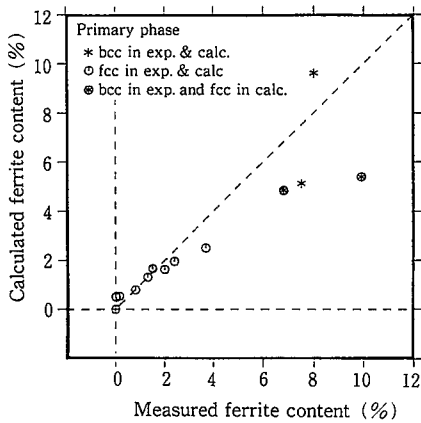


図 7 各種 Fe-Cr-Ni 合金の凝固後の残留 $\delta$ フェライト量の実測とモデルによる解析結果の比較

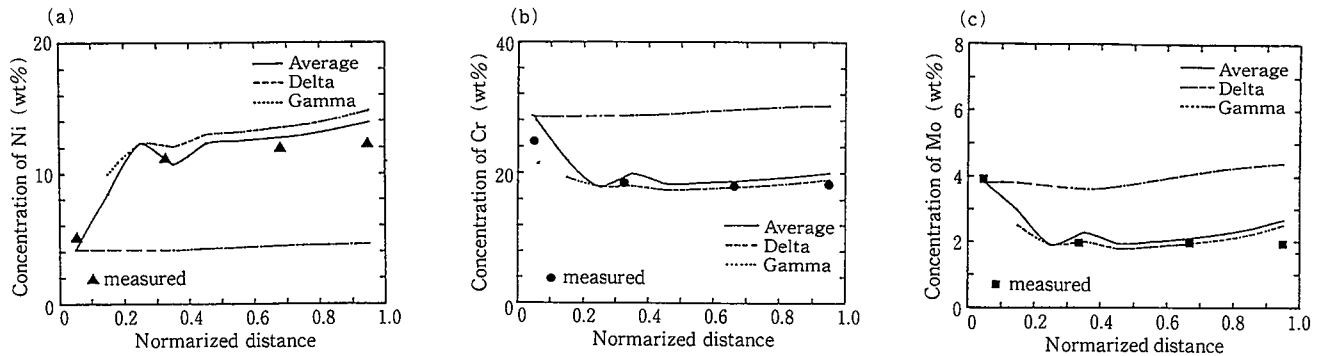


図 8 SUS316系ステンレス鋼(Fe-18.5Cr-11.5Ni-2.2Mo)溶接金属における dendrite 中の溶質分布の実測とモデルによる解析結果の比較

特性の観点からも重要である。近年、各種の高窒素(1 000~4 000 ppm)含有 $\gamma$ 系ステンレス鋼の開発に伴い、その溶接凝固制御では、凝固モードや残留 $\delta$ 量に及ぼす窒素の影響の定量的な評価が必要である。図9<sup>6)</sup>は、種々の高窒素ステンレス鋼溶接金属の凝固モードを、窒素量とそれを除いたNi当量からなる座標系にプロットしたものである。図中、点線及び実線は、A-AF, AF-FAの各凝固モード境界であり、特に、実線は多元系高窒素ステンレス鋼における初晶 $\delta$ と初晶 $\gamma$ の間の共晶の谷に相当する。実線の傾きは、Niと比較した窒素の相対的な $\gamma$ 相安定化能に対応し、Niの18倍と評価される。それを用いて凝固を記述するため、Cr当量=Cr+1.5Si+Mo, Mod.Ni当量=Ni+30C+0.5Mn+18Nとすると、AF-FAモード境界はCr当量/Ni当量比=1.36、これ以上で初晶 $\delta$ のFAモード、以下で初晶 $\gamma$ の凝固モードとなる。これにより高窒素ステンレス鋼溶接金属の凝固モードの制御が可能である。一方、室温組織で残留する $\delta$ 量は、従来のDeLongによるNi当量<sup>17)</sup>を用いて予測できることが明らかとなり、その場合の窒素の係数は30であった。凝固モードを記述する場合と最終組織中の $\delta$ 量を予測する場合で、Niとの相対比で窒素の $\gamma$ 生成能が異なることを示した。これはThermo Calcを用いた状態図的な検討からも示唆される上、固相中で相対的に速い窒素の拡散力という速度論的な観点からも支持される。特に、図9から導出された窒素のNi当量中の係数18は、Fe-Cr-Ni系とFe-Cr-Ni-N系の状態図の比較から、示唆される値と極めて近い。

これらの高窒素ステンレス鋼溶接金属の凝固モード、凝固組織の制御の考え方は、極低温用の高強度高窒素ステンレス鋼<sup>7)</sup>、及び高耐食用の窒素含有ステンレス鋼の溶接技術に適用された。

#### 3.2 高耐食高Moステンレス鋼の溶接金属の組織制御<sup>8)</sup>

耐食用のMo含有ステンレス鋼の溶接での問題は、凝固組織中のMoのマイクロ偏析が著しく、樹心の負偏析部分で耐食性が大きく損なわれる点にある。図10<sup>9)</sup>は、均質な母材と溶接金属の耐食性を比較したものである。縦軸は塩化物環境での孔食の発生温度(CPT: Critical Pitting Temperature)、横軸は成分的な耐孔食性の指標であるPitting Index: Cr+3.3Mo+13Nである。凝固の負偏析域に起因して母材と同組成(同Pitting Index値)では、溶接部の耐食性は母材と比較し極めて低い。そのため、溶接金属の耐食性を確保するには、母材以上の高Mo化、それに伴う組織の最適化が必要である。

図11<sup>8)</sup>に溶接部のマイクロ偏析に及ぼすNiの影響を示すが、Ni量の増加とともに耐食性に有効なCr, Moの偏析傾向が低減する。一方、図12<sup>8)</sup>に溶接凝固組織に及ぼすNiとMoの影響を示すが、Fe基での高Mo化は $\sigma$ 相などの脆化相析出につながり、特に凝固中に $\delta$ を晶

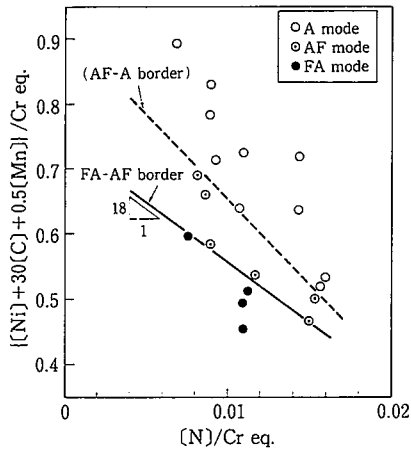


図 9 高窒素ステンレス鋼溶接金属の凝固モードに及ぼす窒素(N)とその他のオーステナイト生成元素の影響

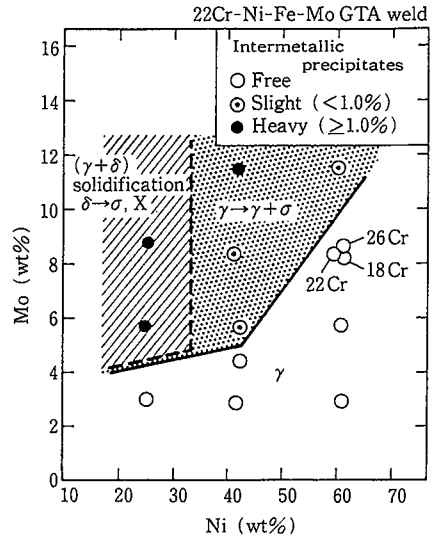


図 12 Cr-Ni-Fe-Mo合金溶接金属の凝固ま組織に及ぼすNi, Moの影響

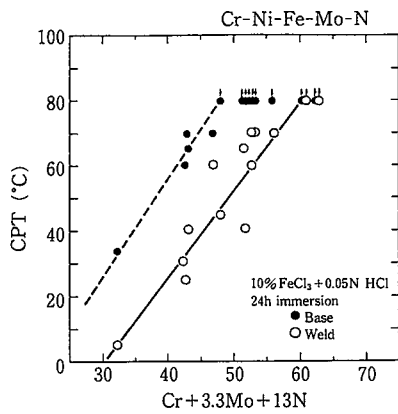


図 10 各種Cr-Ni-Fe-Mo合金母材及びその溶接部の10%塩化第二鉄水溶液中での臨界孔食発生温度(CPT)とPitting Index (Cr+3.3Mo+13N)値の関係

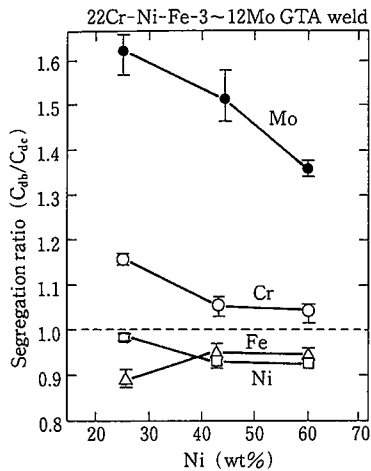


図 11 Cr-Ni-Fe-Mo合金溶接金属中のマイクロ偏析比(デンドライト樹間濃度/樹心濃度)に及ぼすNiの影響

出する系ではδからの脆化相析出が著しい。しかしNi基への移行により、高Mo含有でも脆化相の析出は抑えられる。更に窒素の添加は、図12中の脆化相析出フリーの組成領域を高Mo側に拡大することが明かとなった。

溶質偏析の改善、析出傾向の低減に及ぼすNi, 窒素の効果は、Thermo Calcによる平衡分配係数や相安定性の計算と良い対応を示した。このことから、溶接凝固という非平衡プロセスにおいても、固液間分配、偏析場における析出等の挙動が平衡的な駆動力や局所的な相安定性に支配されているのが分かった。

高耐食用の溶接金属で最適な組織を達成するためには、高Ni・高Mo化が不可欠であり、更にFe基母材とのマッチング、希釈部分での耐食性、組織の健全性を確保するために窒素の含有が有効である。これらの知見は、海水淡水化装置をはじめ各種の高耐食高Moステンレス鋼の溶接に適用されている<sup>9)</sup>。

### 3.3 二相ステンレス鋼溶接金属の組織制御<sup>18,19)</sup>

二相ステンレス鋼はMo, Nを含み、良好な強度と耐食性のバランスから、その適用が活発である。母材の微細δ/γ二相組織は、二相域での熱間圧延、熱処理により達成されるため、凝固ままの溶接金属でいかにδ/γバランスを確保し、母材との組織格差をカバーするかが溶接技術での課題である。

二相ステンレス鋼溶接金属の凝固はδ単相であり、凝固後δ/γ変態により二相組織に至る。よって、粗大なδ粒と、その粒界からのWidmanstatten状のγからなる組織となるが、母材と同組成ではδ richであり、同時に粗大δ粒内に多数の窒化物が析出する。溶接凝固・変態の検討から、溶接金属ではγ生成が窒素の拡散支配のpara平衡的であること、高窒素化により母材並のδ/γバランスが確保され、発達したWidmanstatten組織により、δ内の窒化物生成も抑えられることが分かった。δ/γのpara平衡を、Thermo Calcによる計算状態図上で検討した例を図13<sup>10)</sup>に示す。これら変態制御の知見に基づき、母材と溶接部のδ/γ間の溶質分布の違い、孔食発生挙動の違いも説明でき、溶接金属における高窒素化かつ相バランス確保の重要性を示した(図14<sup>10)</sup>参照)。

### 3.4 高合金溶接金属中の金属間化合物の析出予測

高耐食や高耐熱用に、ステンレス鋼が更に高合金化されるに伴い、対応する溶接金属では、凝固ままでの金属間化合物の析出抑制が課題となる。耐食性、耐酸化性、高温強度のためにCr, Mo, Si, Nb等の増加が有効であるが、これらは凝固時の偏析傾向が強く、そこからσ相, χ相, Laves相などの有害な脆化相が析出しやすい。

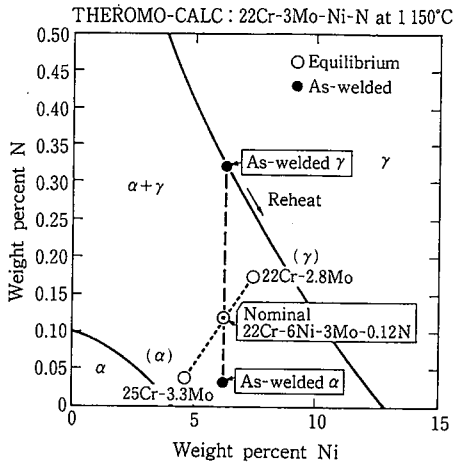


図 13 二相ステンレス鋼溶接部におけるフェライト/オーステナイト間の溶質分配と状態図との比較

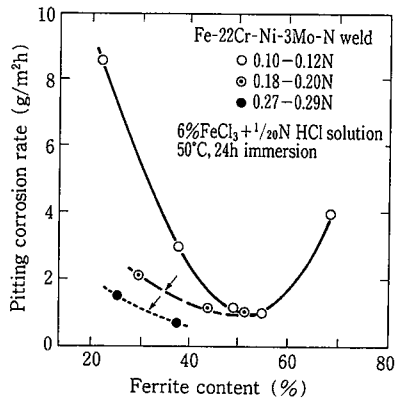


図 14 二相ステンレス鋼溶接部の孔食による腐食速度に及ぼすフェライト量及び窒素の影響

Cieslak ら<sup>13)</sup>は、Hastelloy 系 Ni 基合金の溶接金属中の  $\sigma$  相などいわゆる TCP 相の析出を、Morinaga ら<sup>20)</sup>が提案した電子論からの相安定性理論 (Md-PHACOMP) を適用して説明を試みた。筆者らは、先に述べたステンレス鋼、高合金の溶接金属の凝固の基礎検討から、凝固時の固液間分配及び相安定性挙動に局所的な平衡が成り立つことを示した。その知見を基に、Cieslak らの試みを Fe 基を含むステンレス鋼、高合金の溶接金属に拡張した。すなわち、多元系合金の相安定性と相関のある Md 値を凝固ミクロ偏析場に適用し、樹芯から樹間にかけての Md 値変化と、樹間での凝固ままの TCP 相析出の傾向を対比した。ここで Md 値は各溶質濃度とその d 軌道エネルギーの積の総和である。図15<sup>9)</sup>に、樹間での Md 値と TCP 相析出率の関係を示すが、Fe 基合金も含めて、樹間での Md 値が臨界値(約0.92)を越えると樹間析出が起こることが分かった。ただし窒素含有系ではこの傾向が小さい。溶接金属のミクロ偏析の予測が apriori にできれば、析出のない溶接金属の合金設計が可能であり、その意味で前述の凝固モデルあるいは凝固検討は更に有用性を増す。

#### 4. 結 言

ステンレス鋼の溶接において溶接金属の凝固、変態を予測、制御することは、溶接部の特性確保、更には溶接構造物全体の使用性能確保の点から極めて重要である。特に、鋼材が高性能化し高合金化

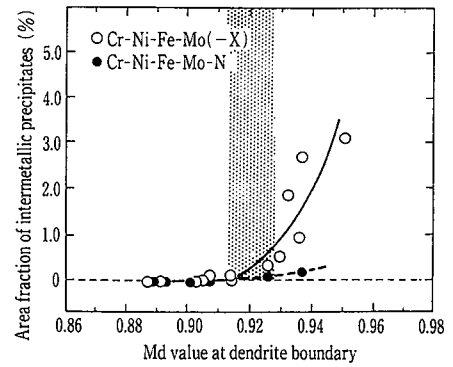


図 15 Cr-Ni-Fe-Mo合金溶接金属の凝固まま組織中の金属間化合物析出と dendrite 樹間の Md 値の関係

する程、上述のような冶金的なアプローチを通しての凝固、組織の制御が必要となる。

本稿では、それらの現状を、多元系合金の凝固解析モデルの開発と応用、実用合金における予測・制御技術の適用例などを紹介しながら述べた。また、それらの凝固、変態の予測技術は、各種高性能ステンレス鋼の溶接技術開発を効率的に進める上で有効であった。一方、溶接プロセスの多様化とともにプロセスからの組織制御の可能性の検討も重要である。溶鋼の過冷却や急冷により、準安定相の生成も含めた組織制御の可能性が、基礎的な検討から示唆されている<sup>21,22)</sup>。それによる溶接部の高性能化技術の可能性や、高密度エネルギー溶接を含む様々な凝固プロセスへの応用の可能性を、上述の冶金的なアプローチと合わせ今後検討していく必要がある。

#### 参 照 文 献

- 1) Garner, A.: Mater. Perform. 21(8), 321 (1982)
- 2) Takalo, T., Suutala, N., Moioio, T.: Metall. Trans. A. 10A(8), 1173 (1979)
- 3) Suutala, N., Takalo, T., Moioio, T.: Metall. Trans. A. 11A(5), 717 (1980)
- 4) Brooks, J.A., Williams, J.C., Thompson, A.W.: Metall. Trans. A. 14A(1), 23(1983)
- 5) Brooks, J.A., Thompson, A.W., Williams, J.C.: Weld. J. 63(3), 71s (1984)
- 6) Ogawa, T., Koseki, T.: Weld. J. 67(1), 8s (1988)
- 7) Ogawa, T., Koseki, T., Ohkita, S., Nakajima, H.: Weld. J. 69(6), 205s (1990)
- 8) 小関, 小川: 溶接学会論文集. 9(1), 143 (1990)
- 9) 小川, 小関: 溶接学会論文集. 9(1), 154 (1990)
- 10) Scaeffler, A.L.: Weld. J. 26(10), 601s (1947)
- 11) Chen, S.-W., Chuang, Y.-Y., Chang, Y.A., Chu, M.G.: Metall. Trans. A. 22A(12), 2837 (1991)
- 12) Koseki, T., Matsumiya, T., Yamada, W., Ogawa, T.: Metall. Trans. A. 25A(6), 1309 (1994)
- 13) Cieslak, M.J., Knorovsky, G.A., Headley, T.J., Romig, A.D.Jr.: Metall. Trans. A. 17A(12), 2107 (1986)
- 14) Sundman, B., Jansson, B., Andersson, J.-O.: CALPHAD. 9, 153 (1985)
- 15) Clyne, T.W., Kurz, W.: Metall. Trans. A. 12A, 965 (1981)
- 16) 大北, 森本, 井上, 田中: 溶接冶金委資料. WM-1501-93 (1993)
- 17) Long, C.T., DeLong, W.T.: Weld. J. 52(6), 281s (1973)
- 18) Ogawa, T., Koseki, T.: Weld. J. 68(5), 182s (1989)
- 19) Ogawa, T., Koseki, T., Inoue, H.: Weldability of Materials. Materials Park OH, ASM, 1990, p.135
- 20) Morinaga, M., Yukawa, N., Adachi, H.: J. Phy. Soc. Jpn. 53(2), 653 (1984)
- 21) 井上, 田中: 溶接学会講演概要. 54, 236 (1994)
- 22) Flemings, M.C., Koseki, T.: Proc. Turkdogan Sympo. Pittsburgh PA, Iron and Steel Soc., 1994, p.207