

# M12 相変態を考慮した溶接変形・残留応力解析

濱田 雅規 (指導教員 柴原, 伊藤)

Analysis of Welding Residual Stress and Deformation Considering Effect of Phase Transformation

by Masaki Hamada

## Abstract

Recently, it is desirable to increase the use of high tensile steel having more than 800 MPa in tensile strength to reduce the weight of structure. Large-scale steel structures such as ships are commonly constructed using welding. In the welding of those structures, it is well-known that welding deformation have influence on the manufacturing accuracy and residual stress have a significant influence on the life of structures. Furthermore, by using high strength steel, phase transformation such as the martensitic transformation occurs at relatively low temperature during cooling. Martensitic phase transformation has a significant effect on the residual stress and deformation that may cause a cold cracking in the heat affected zone and welding metal.

In this study, phase transformation model is introduced to the simulation of welding residual stress and deformation. The influence of phase transformation is investigated by applying the simulation method to the analysis of multi-pass butt welding in various conditions such as welding speed, heat input, martensitic temperature. Furthermore, the influence of phase transformation on welding deformation and residual stress and its mechanism are investigated.

## 1. 緒 言

近年、構造物の大型化に伴い鋼構造物の軽量化が求められ、それを可能とする高張力鋼が様々な鋼構造物に使用されている。例えば輸送用機器においては、現在のコンテナによる遠距離貨物輸送の増大を背景に、コンテナ船の大型化が急速に進んでいる。船体の大型化による縦曲げが増加するため、80~100mm程度のより一層の厚手化が進行することになるが、厚手化は接合部における靱性低下を招き、船体構造の信頼性を損なう恐れがある。そこで、造船業においても板厚の軽減・構造の軽量化を目的とし、引張強さが800MPaを超えるような高張力鋼の使用の拡大が望まれている。また、コンテナ船以外の各船舶についても、高品質な船舶の需要を背景に高張力鋼の使用が図られている。

上述の船舶に限らず大規模鋼構造物は、溶接施工によって製作されるのが一般的であり、溶接構造物の製作では、溶接施工時に生じる溶接変形が製作精度に影響を与えると共に、溶接残留応力は構造物の寿命に大きな影響を与えることが知られている。さらに、高張力鋼を使用することにより、冷却中の比較的低い温度においてマルテンサイト変態などの相変態と呼ばれる現象が生じ、これらが溶接変形や残留応力の生成に大きな影響を及ぼし、特に溶接金属や溶接熱影響部においては挙動が複雑になることも報告されている。

また、近年では熟練技術者の不足や若年労働者の確保の困難さから、溶接設備の機械化・自動化が積極的に押し進められているが、溶接変形等の予測は熟練技術者の経験に頼るところが大きく、溶接変形のみならず残留応力を定量的に予測するための基礎的な研究の必要性が強く認識されるようになってきている。

しかし、これまでの多くの研究は主として軟鋼材の被覆アーク溶接による溶接変形・残留応力について取り扱っており、最近の溶接用構造材料の多様化に対応して溶接問題を系統的に論じた報告は多くなく、また、相変態が溶接変形・残留応力に及ぼす影響について体系的に結論づけるような研究が少ないことも事実である。

一方で、近年のコンピュータの演算能力及び解析技術の著しい発展に伴い実用構造物の力学解析にFEM(Finite Element Method, 有限要素法)をはじめとする数値シミュレーションがよく用いられるようになった。数値シミュレーションを用いることで、工学問題の物理的な状態を事前に把握することが可能となり、研究のみならず設計段階においても幅広く導入されてきている。近年では、従来の静的陰解法FEMと比べて、計算時間・メモリ使用量の点で有利な理想化陽解法FEMの開発が行われ、その有用性が示されている。

そこで、本研究では、高張力鋼の相変態を考慮可能なシミュレーション手法の開発を目的として、相変態モデルの構築を行い、理想化陽解法FEMへ適用する。さらに、構築した相変態モデルを実装した理想化陽解法FEMを溶接変形・残留応力問題の解析に対して適用し、入熱条件や相変態温度および厚板多層溶接に至る種々の条件下における数値解析を通して、相変態が溶接変形・残留応力及ぼす影響について検討するとともに、その発生メカニズムについて考察を行う。

## 2. 相変態モデルの提案

### 2.1 相変態の数値モデル

溶接による局所的な入熱によって温度・相分率が変化し、それらに伴い応力・ひずみは複雑な挙動を示し、構

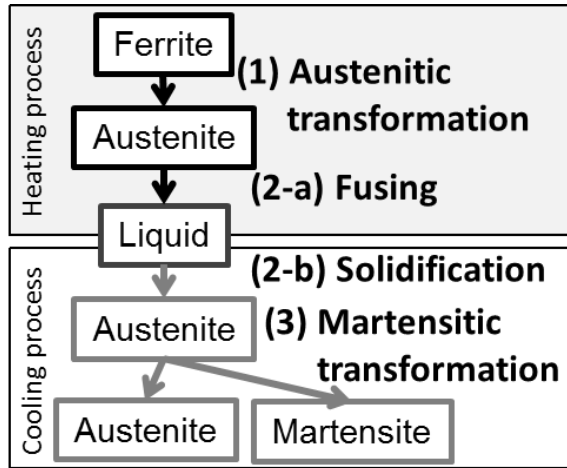


Fig. 1 Conceptual diagram of phase transformation.

造物の性能に大きく影響を及ぼす。本研究で構築した相変態モデルにおいては、鋼の初期の相は全てフェライト相であるとする。溶接熱によって加熱されたフェライト相が  $A_{C1}$  変態温度に達するとオーステナイト相が発生し始め、 $A_{C3}$  変態温度においてフェライト相が全てオーステナイト相となりオーステナイト変態が終了する。さらに加熱が進むと、オーステナイト相は力学的溶融温度  $T_M$  を超え液相となる。入熱が終了し冷却過程となると液相が冷やされ固相へと変態する。この時に生成する固相は全てオーステナイト相であるとする。さらに冷却が進むと  $M_S$  変態温度においてマルテンサイト相が発生し始めるが、このマルテンサイトは無拡散型相変態であることから、冷却速度が速い、つまり急冷である時ほど多く発生する。本研究では Fig. 1 の様に、(1)フェライト相からオーステナイト相への相変態、(2-a)オーステナイト相から液相への相変態、(2-b)液相からオーステナイト相への相変態、(3)オーステナイト相からマルテンサイト相への相変態について取り扱うこととする。

**2.1.1 フェライト相からオーステナイト相への相変態**

オーステナイト化は、 $A_{C1}$  点と呼ばれるオーステナイト変態開始温度と  $A_{C3}$  点と呼ばれるオーステナイト変態終了温度の間で発生する。オーステナイト変態が発生する場合、その変態ひずみにより鋼の体積が収縮する。また、変態開始・終了の温度は、鋼の組成によって算出することができる。以下で示される<sup>1)</sup>。

$$A_{C1} = 723 - 10.7Mn - 16.9N + 29Si + 16.9Cr + 290As + 6.4W \quad (1)$$

$$A_{C3} = 912 - 203\sqrt{C} - 15.2Ni + 44.7Si + 107V + 31.5Mo + 13.1W - 30Mn - 11Cr - 20Cu + 700P + 400Al + 120As + 400Ti \quad (2)$$

本研究では  $A_{C1}$  から  $A_{C3}$  においてフェライトおよびオーステナイト相分率が、式(3)に示す様に、線形的に減少および増加する形でモデル化を行った。なお、 $\xi_a$  は現在の温度におけるオーステナイト相分率、 $T$  は現在の温度を表す。

$$\xi_a(T) = \frac{T}{A_{C3} - A_{C1}} \quad (3)$$

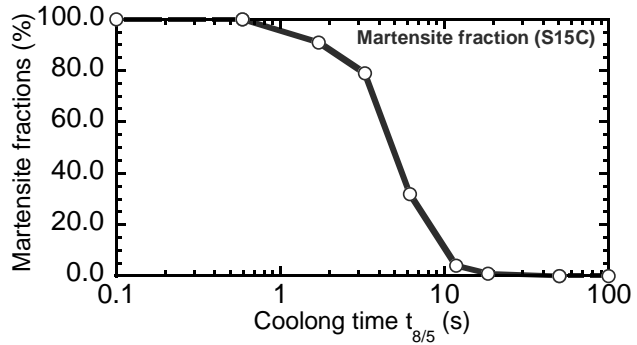


Fig. 2 Relationship of Martensite fractions and cooling time  $t_{8/5}$ .

ここで求められる相分率を用いて、オーステナイト変態ひずみを与える。

**2.1.2 オーステナイト相から液相への相変態と逆変態**

オーステナイト相が力学的溶融温度  $T_M$  以上に加熱された場合、液相へと相変態が起こる。この際、ヤング率・降伏応力・ポアソン比等の材料の力学的挙動が大きく変化するが、本研究においては  $T_M$  を閾値として材料定数を液相のそれに対応付けている。なお、 $T_M$  は一般的な鋼を参考に  $T_M=1000^\circ\text{C}$  とした。液相からオーステナイト相への逆変態も同様に  $T_M$  を境に同様の取り扱いを行う。

**2.1.3 オーステナイトからマルテンサイト相への相変態**

オーステナイト相が急冷された場合に発生する相がマルテンサイト相である。そのマルテンサイト変態は、 $M_S$  点と呼ばれるマルテンサイト変態開始温度において発生し始める。 $M_S$  点の温度は  $A_{C1}$ 、 $A_{C3}$  点と同様に鋼の組成によって下式(4)により算出することができる。

$$M_S = 561 - 474C - 33Mn - 17Ni - 17Cr - 21Mo \quad (4)$$

完全冷却後のマルテンサイト相分率  $\xi$  は連続冷却変態(CCT)線図より導出する。この際、冷却速度の評価は  $800 \sim 500^\circ\text{C}$  における冷却時間  $t_{8/5}$  を用いて行い、例として S45C 材のマルテンサイト相分率と冷却速度の関係を Fig. 2 に示す様に、 $t_{8/5}$  に応じたマルテンサイト相分率  $\xi$  を対応付けてモデル化を行った。 $M_S$  点以下での各時間におけるマルテンサイト相分率  $\xi_m$  は JMAK 式を基に Koistinen, Marburger が提案した式(5)<sup>2)</sup>を用いてモデル化する。

$$\xi_m(T) = \xi [1 - \exp\{-k(M_S - T)\}] \quad (5)$$

ここで  $k$  は材料に依存する定数である。式(5)を用いることによりマルテンサイト相分率が指数関数的に増加する挙動を再現することができる。また、マルテンサイト変態ひずみ  $\epsilon_c^{\Delta V}$  は膨張のひずみであり、この膨張のひずみが溶接変形および残留応力に大きな影響を及ぼすと考えられる。なお、マルテンサイト化に至らない冷却速度のオーステナイト相は残留オーステナイトとして常温までその組織を保つものとした。

**3. 相変態による溶接変形・残留応力への影響**

**3.1 解析モデルおよび解析条件**

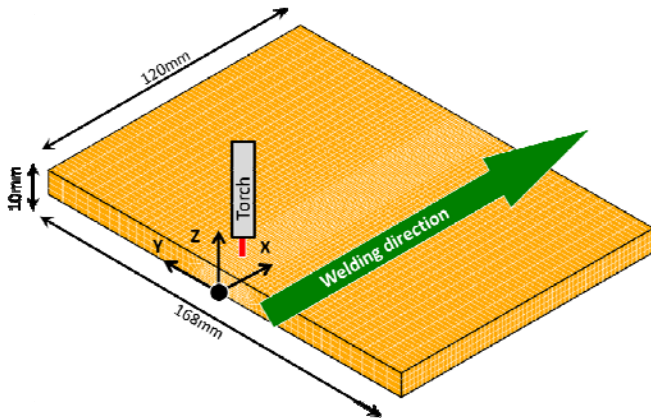


Fig. 3 FE mesh and size of analysis model.

Table 1 Chemical of AQV2A steel, wt%.

Steel	$A_{c1}$ (°C)	$A_{c3}$ (°C)	$M_s$ (°C)	$\epsilon^{\Delta V}_h$	$\epsilon^{\Delta V}_c$
SQV2A	775	850	500	$-4.0 \times 10^{-3}$	$2.0 \times 10^{-3}$

Fig. 3 に本研究に用いた解析モデルの要素分割を示す。ここでは基礎的検討として板長 120mm, 板幅 120mm, 板厚 10mm のビード溶接モデルを用いた。また, 溶接線方向, 板幅方向, 板厚方向にそれぞれに x, y, z 軸を取り, x 軸上を正の方向に溶接するものとした。要素分割は x 軸方向に等分割で 60 であり, y, z 方向については溶接線から離れるにつれ疎となるように節点を配置し, 27,755 節点; 31,860 要素とした。解析に用いた材料は Table 1 に示す SQV2A 材である。また, 溶接条件としては溶接電流を 140A, 電圧を 10.8V, 溶接速度を 1.0mm/s とした。

### 3.2 溶接変形についての検討

Fig. 4(a), (b)はそれぞれ相変態を考慮しない場合と相変態を考慮した場合の面外変位分布を示す。また, Fig. 5 に溶接線垂直方向の面外変位分布を示す。同図において□印が相変態を考慮した場合, △印が相変態を考慮しない場合である。両図から, 相変態を考慮した場合, 板全体に渡り面外変形量が小さくなっていることが分かる。これはマルテンサイト相の変態膨張によって, 溶接部の収縮が低減されたことに起因すると考えられ, 相変態による溶接変形への影響が顕著に表れていると言える。

### 3.3 残留応力についての検討

Fig. 6(a), (b)にそれぞれ溶接線直角方向の溶接線近傍における x 方向残留応力および y 方向残留応力の相変態を考慮した場合および考慮しない場合と実験値の比較を示す。実験値は柳田らによる残留応力の測定結果を引用している。両図より, 相変態を考慮した場合においてマルテンサイト相の変態膨張による母材の溶接部付近における応力の低下が確認でき, 実験値と定性的に一致していることが分かる。以上の検討により, 構築した相変態モデルの有用性が確認できた。

## 4. 突合せ多層溶接における検討

### 4.1 解析モデルおよび解析条件

Fig. 7(a)に多層溶接解析モデルの要素分割を示し, Fig. 7(b)に全 6 層 9 パスの溶接順序を示す。板長 400mm, 板幅 200mm, 板厚 30mm の厚板 V 開先溶接継手である。この溶接継手は, 母材および溶接金属に S45C 材を使用し,

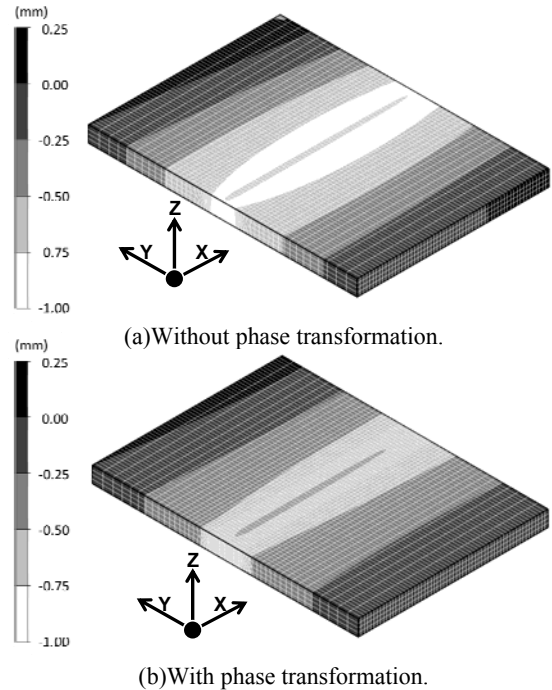


Fig. 4 Distribution of deformation in z-direction.

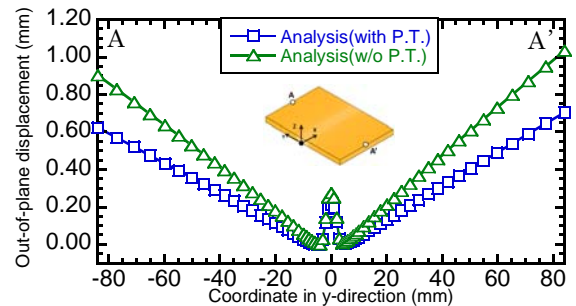
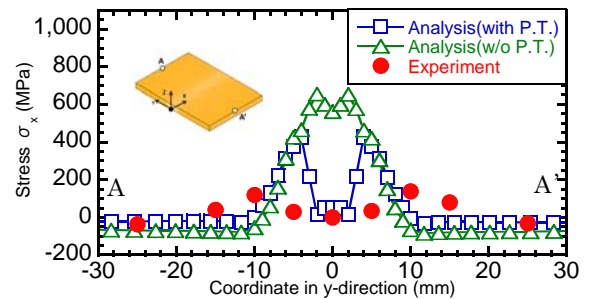
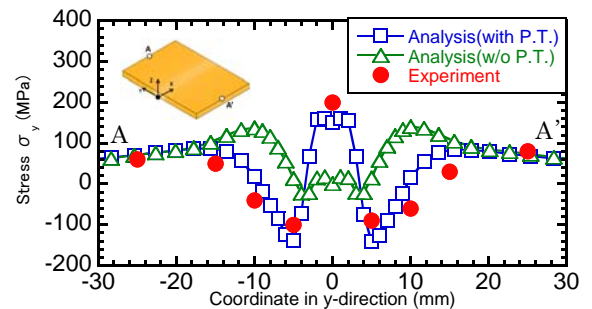


Fig. 5 Comparison of out-of plane displacement.



(a) Residual stress in x-direction  $\sigma_x$ .



(b) Residual stress in y-direction  $\sigma_y$ .

Fig. 6 Distribution of residual stress.

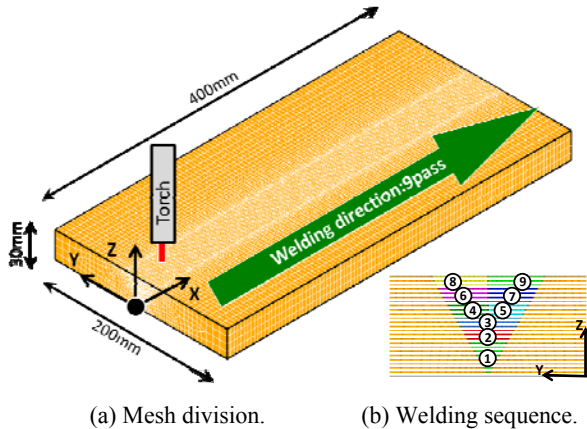


Fig. 7 Analysis model.

Table 2 Chemical of S45Csteel, wt%.

Steel	$A_{c1}$ (°C)	$A_{c3}$ (°C)	$M_s$ (°C)	$\epsilon^{\Delta V}_h$	$\epsilon^{\Delta V}_c$
S45C	724	783	328	$-2.88 \times 10^{-3}$	$8.0 \times 10^{-3}$

相変態温度および変態ひずみを Table 2 に示す。また、溶接条件は溶接電流を 400A、電圧を 25V、溶接速度を 2.9mm/s とした。

4.2 相変態を考慮した突合せ多層溶接解析結果

Fig. 8 に各パス終了後の溶接線中央部における角変形量を示す。同図より、多層溶接においても相変態を考慮した場合に溶接変形が小さくなっていることが分かる。しかし、4 パス目以降においては相変態を考慮した場合および考慮しない場合の双方の増分に差がないことが見て取れる。ここで、中央横断面の溶接部近傍における相変態の相分率を Fig. 9 に示す。同図(a), (b)はそれぞれオーステナイト相分率およびマルテンサイト相分率である。これらから、4 パス目以降では 20~40%程度のオーステナイト相が生成しており、オーステナイト変態による収縮がマルテンサイト変態に起因する膨張を抑制したと考えられる。

Fig. 10 に最終パス終了時における溶接線中央断面の相変態の考慮の有無による x 方向残留応力分布の比較を示す。同図より、板厚方向内部に圧縮応力が生じ、表面および裏面部においては引張応力が発生していることが確認できる。また、相変態を考慮した場合において、応力の絶対値が減少していることが確認できる。さらに、Fig. 11 に溶接線中央断面における x 方向残留応力の分布を示す。同図から、相変態を考慮した場合において板の表裏面での応力が小さくなっており、影響が顕著に表れているといえる。

5. 結 言

本研究では、フェライト・オーステナイト・マルテンサイト変態の相分率を考慮した相変態についてモデル化を行い、理想化陽解法 FEM に実装した。また、提案した相変態モデルを用いた数値解析の妥当性を確認するため、実験値との比較を行った。さらに相変態を考慮した数値解析を用いて、基礎継手モデルおよび多層溶接継手モデルにおける溶接変形・残留応力問題についての数値解析を実施し、考察を行った結果、以下の知見を得た。

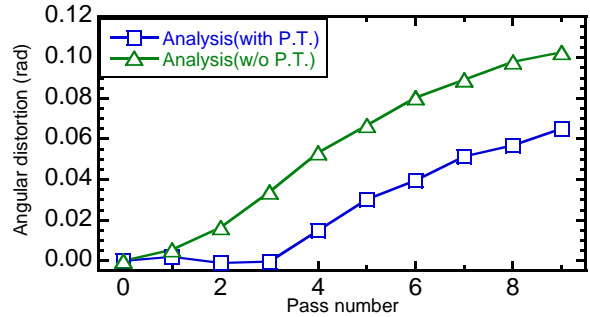


Fig. 8 Relation between Angular distortion and pass number.

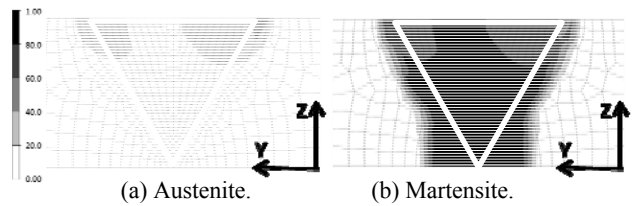


Fig. 9 Phase fraction.

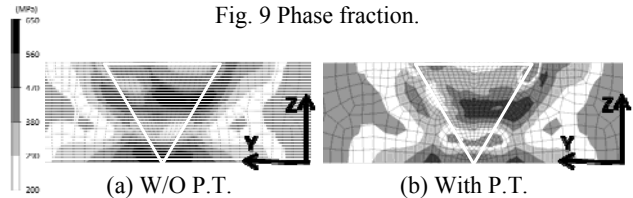


Fig. 10 Distribution of residual stress in x-direction.

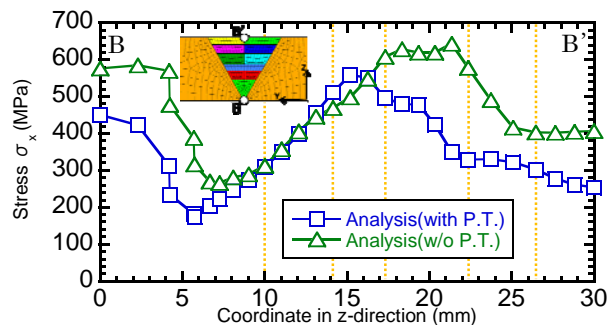


Fig. 11 Distribution of residual stress in x-direction  $\sigma_x$ .

- 1) 構築した相変態モデルを用いることにより、ビード溶接モデルにおいて相変態が溶接変形・残留応力に大きく影響を与えることを示した。
- 2) 相変態モデルを用いた熱弾塑性解析結果は実験結果の残留応力と良好に一致することから、構築した相変態モデルの妥当性を確認した。
- 3) 溶接変形の挙動が相分率の変化に依存して大きく変化することを示した。

参考文献

- 1) 柳田信義, 齊藤高一: 低合金鋼平板の残留応力に及ぼす溶接条件および溶接後熱処理条件の影響, 日本機械学会論文集(A 編), 79 巻 802 号(2013-6), p.847-862
- 2) Koistinen, D. P. and Marburger, R. E., "A general equation prescribing the extent of the austenite martensite transformation in pure iron-carbon alloys and plain carbon steels," Acta Met., Vol. 7(1959), pp. 59-60.