低変態温度材料と残留応力の生成についての考察*

—レーザースペckルによるひずみ測定法の溶接への適用 (第7報)—

村松 由樹**, 黒田 聖治**, 山本 純司***, 金 裕哲****

Low Transformation Temperature Materials and Welding Residual Stress*

—Application of the Laser Speckle Method to Strain Measurement in the Welding Process (Report 7)—

by MURAMATSU Yoshiki**, KURODA Seiji**, YAMAMOTO Junji*** and KIM You-Chul****

Recently, materials with low transformation temperature have been investigated for improvement of reliability in welded joint. Due to the introduction of compressive residual stress by using the material, fatigue strength or resistance to cold cracking are improved. In this report the authors examined the effects of phase-transformational behavior on residual stress and their distribution using some basic models and some types of the behavior. Expansions and temperature range of phase-transformation detected in the previous report using the laser speckle strain measurement are also used in this report. Results show that reduction of residual stress from tensile to compressive occurs only with severe restraint condition and low transformation temperature, especially low M_f temperature. In the previous report, the authors suggested the possibility of superplasticity during phase-transformation. Experimental results of residual stress distribution indicated the necessity of consideration for superplasticity by using the low transformation temperature materials.

Key Words: Residual stress, Phase-transformation, M_s temperature, M_f temperature, Superplasticity, Laser speckle strain measurement, Stress history

1. 緒 言

溶接に伴う残留応力が疲労強度の低下や低温割れなどの発生をもたらすことは継手信頼性を左右する古くからの問題である。最近、低変態温度材料の使用により溶接部に圧縮残留応力を導入することが試みられている¹⁻²⁾。これにより、溶接継手の疲労強度の向上や低温割れ防止に効果があることが報告されている。

圧縮残留応力導入のメカニズムは冷却途中において溶接部の収縮が拘束により阻止され、引張りの残留応力が生成されつつあるときにマルテンサイト変態により溶接部が膨張し応力を圧縮に転じさせるものであると説明されている。したがって、低い温度で変態を生じさせることが必要となる。しかし、両端固定棒が均一に加熱・冷却のサイクルを受ける途上で棒全体が同時に変態する理想的な場合は上記のことは完全に正しいが、局部加熱・冷却の場合は必ずしも圧縮残留応力が生成されるとは限らない。また、低変態温度溶材を用いても母材との希釈による変態開始温度の上昇などの問

題も生じるものと考えられる。

一方、著者等はこれまでの研究³⁻⁴⁾でレーザースペckルひずみ測定法を用いると溶接部の冷却途中における相変態を検出でき、変態温度域や変態途中の膨張量が求められることを報告している。特に前報⁴⁾で低変態温度材料の変態挙動に関する情報を同手法により得ることができた。こうして得られた変態挙動が残留応力におよぼす影響を検証することが次に重要となる。

そこで本報では基本的な数種類のモデルを用いて、変態挙動や拘束距離、材質などのパラメータを変化させて、それらが応力発生履歴におよぼす影響を調べ、圧縮残留応力生成に効果的な条件について検討する。さらに残留応力分布の実測も行い、新たに開発された低変態温度材料の残留応力軽減の効果について計算とともに検討する。その際、実測と比較のための計算には前報⁴⁾でレーザースペckルひずみ測定法により求めた低変態温度材料を含む各種材料の変態挙動を用いた。

2. 計算および実験方法

2.1 計算モデルおよび計算上の仮定

計算の対象としたのはFig. 1に示す4種のモデルである。①の均一冷却モデルは全体が均一温度のまま、つまり温度分布のない状態のまま冷却し、変態を生じる場合は全体が同時に変態を開始・終了する。②の短冊形モデルは中心線上幅方

*原稿受付 平成15年2月14日 平成13年度秋季全国大会で発表

**正 員 (独)物質・材料研究機構 Member, National Institute for Materials Science

***正 員 日立建機(株) Member, Hitachi Construction Machinery Co., Ltd.

****正 員 大阪大学 Member, Osaka University

Fig. 1 Models and specimens for computation and experiment.

Fig. 2 Thermal dependences of physical and mechanical properties.

向に瞬間線熱源を与えたものである。①とは温度分布が存在する点が異なる。③および④はやや実際の溶接に近いモデルであり、中心線上長手方向に移動熱源を置くものとする。熱源長は全長（モデル③）および実測との比較のための小型試験片の中央 60 mm（モデル④）の 2 ケースとした。

計算の対象とした材質（機械的性質および物理定数）には第 3 節では傾向を調べることを目的として SUS304 ステンレス鋼のもの、また第 4 節の実測との比較ではそれぞれの鋼種のものを使用した。それらの物理定数と機械的性質の温度依存性を Fig. 2 に示す。残留応力におよぼす変態挙動の影響を検討するため、第 3 節では仮想的に SUS304 の材質を持つ材料に種々の変態挙動すなわち変態開始温度 (M_s)、変態終了温度 (M_f)、変態膨張などを与えることとした。また温度分布はあらかじめ差分法で計算しておいたものを用い、モデル全体がほぼ一定温度になった後は 0°C (室温) まで強制的に温度を下げた (モデル②～④)。拘束の強さを変化させる場合はモデルの拘束長 (GL) によって変化させた (モデル②および③)。ただし、モデルが同じであれば拘束長を変化させた場合もメッシュ分割および温度分布は同じものを用いた。変態は等方的なものとし、加熱時に A_3 温度 (本研究ではすべて 750°C とした) を上回った要素に冷却途中において所定の温度範囲でこれも所定の全変態膨張ひずみ (第 3 節では 0.75% 一定とした) を線形に与えた。また、変態期間中はその要素の線膨張係数は 0 とした。計算で与えた入熱量および第 3 節の変態挙動を Fig. 1 中に併記する。モデル②～④の計算では変態は溶接線 (加熱線) から 5 mm 以内の要素に生じた。

本報告の計算では簡単なモデルで変態の影響を調べることを主眼として、平面応力状態を仮定し、要素は線形の三角形メッシュを用いた簡便な解析を行った。したがってモデル②～④は薄板であり、温度分布は 4 mm 厚として Fig. 1 中の入熱で計算した。

2.2 実験方法

実験は矩形の薄板 (上記モデル④に相当、板厚 4 mm) の中央 60 mm を GTA で局部加熱し、冷却後この試験片の加熱線を含む中心線上の表裏面にひずみゲージを貼付けた。その後、試験片を切断して応力解放を行い、その前後のゲージの読みの差より残留応力に換算した。加熱条件は $I=100\text{ A}$ 、 $v=120\text{ mm/m}$ とした。供試材料の化学成分を Table 1 に示す。この内、B、A および R 材は低変態温度溶材として開発され

た材料であり、この順に変態温度が低くなる。前報⁴⁾でモデル④の試験片を用いて測定した M_s 温度を表中に併記する。この実測結果と比較するための計算には、前報においてレーザースペックルひずみ測定法によりモデル④と同寸法の試験片中央で得られた各鋼材の変態挙動を用いた。

3. 残留応力と変態挙動の関係

3.1 単純なモデルを用いた残留応力生成機構の考察(1)

均一冷却モデル (Fig. 1 のモデル①) ではモデル全体を均一温度のまま $900 \rightarrow 0^\circ\text{C}$ と冷却させた。変態を生じる場合は全体が同時に変態を開始・終了する。したがってモデルのどの位置においても同一応力履歴を示し、その履歴は拘束距離と無関係となる。また、本節では変態期間中の全変態膨張率は 0.75% 一定としたので変態持続温度範囲に応じて変態膨張率は異なる。Fig. 3 に計算結果を示す。図中(a), (b)および(c)はそれぞれ $M_f=M_s-50^\circ\text{C}$ (変態挙動 1) または $M_f=0^\circ\text{C}$ (挙動 2) として M_s 温度を変化させた場合と $M_s=500^\circ\text{C}$ として M_f を変化させた場合 (挙動 3) の応力履歴 (長手方向の応力) であり横軸はモデルの温度である。

各図で曲線 1 は変態を生じない場合であり、 0°C に冷却したときに SUS304 の降伏値をやや上回る応力が残留する。この変態なしの場合の履歴を基本として、これに変態が生じた場合の応力履歴が各図の 2 番以降の曲線である。変態開始とともにモデルはそれまでの引張りの塑性状態から弾性に戻って圧縮方向に応力が増加し、圧縮の塑性状態を経て変態が終了する。(a)および(c)では再び弾性状態に戻ったモデルは冷却とともに引張り方向に応力を増加させるが、 M_f 温度の高低によっては再び引張りで降伏するか弾性のままで室温に達するかの 2 ケースに分かれる。再降伏した場合は変態なしの履歴に戻ったことになり、残留応力軽減の効果はない。一方(b)では M_f 温度を 0°C (室温) としているので圧縮応力状態のまま室温に達する。結局、このモデルでは変態によって少しでも残留応力が軽減されるかどうかは変態終了後すなわち M_f から 0°C までの間に応力履歴が変態なしの場合の履歴 (降伏曲面) に戻るか否かによって決まる。したがって、高温で変態が終了するほど変態なしの場合の履歴に戻り易くなり残留応力軽減の効果が無くなる。特に圧縮残留応力生成のためには室温に近い温度で変態が開始するか、あるいは変態が室温近くまで持続することが必要となる。Fig. 3 中(d)

Table 1 Chemical compositions (%) and M_s temperature ($^\circ\text{C}$) of materials.

	M_s temp	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo	Nb	O	N
B	245	0.048	0.23	0.67	0.010	0.005	6.49	11.03	0.307	0.001	0.003	0.0022
A	145	0.046	0.22	0.69	0.010	0.006	9.51	11.05	0.296	0.001	0.003	0.0020
R	104	0.046	0.22	0.70	0.012	0.007	9.48	12.54	0.298	0.001	0.003	0.0030
9% Ni	410	0.050	0.08	0.60	0.002	0.001	9.44	-	-	-	-	-
SUS304	-	0.040	0.48	0.91	0.027	0.002	8.43	18.24	-	-	-	-

Fig. 3 Stress histories, relation between residual stress and Ms, Mf temperature in Model1-1 (Uniform cooling type model).

～(f)は本モデルにおける Ms, Mf 温度と残留応力の関係を示したものであり、それぞれ左の(a)～(c)の履歴と対応している。(d)および(f)の場合では Ms または Mf 温度がある温度以下になると残留応力軽減の効果が急に現れ始める。これは、これ以下の Ms または Mf では履歴が変態なしの履歴に戻れるからである。(e)の場合では Ms に無関係に残留応力は圧縮状態になるが、これは室温まで変態を持続させたことと ($Mf=0^{\circ}\text{C}$) 変態中の全変態膨張は 0.75 % 一定としたためである。ところで、変態中の膨張率を一定とすると、Ms が低くなると残留応力は引張り側に、すなわち変態なしの場合に近づく。

3.2 単純なモデルを用いた残留応力生成機構の考察(2)

本節では Fig. 1②の短冊形モデルの場合を考える。本モデルでは長手方向中心線上に熱源を置く（瞬間熱源とする）。均一冷却モデルと異なる点は、変態する要素が熱源周辺に限られること、温度分布が生じることにより拘束長さの影響を受けることである。モデルの材質、変態挙動は前記均一冷却

モデルと同じであるが、本モデルでは拘束距離 (GL) の影響を受けるので $GL=60\text{ mm}$ および 10 mm (いずれも片側) について考察する。なお、GL が変化しても熱サイクルは同じものを用いる。また、局部加熱であるため y 方向 (幅方向) の応力 σ_y がわずかに生じるが考察は省略する。

本モデルは基本的に RRC 試験 (Rigid Restraint Cracking Test) と同じであり、拘束距離 (GL) によって変態のない場合でも応力履歴が異なる⁵⁾。Fig. 4 以下に本モデルによる応力履歴および変態温度と残留応力の関係等を示す。Fig. 4 は GL の長短に応じたモデル中央部 (Fig. 1 の○印位置) の応力履歴の模式的なパターンであり、 $GL=10\text{ mm}$ では拘束位置より外へ早期に熱が伝導するため直ちに引張り応力が増加し、モデルは引張りの塑性状態となる。一方 $GL=60\text{ mm}$ では熱が拘束位置まで伝導するのに時間を要するので応力増加開始が遅くなり、図のようになかなか低温になってから GL 外へ熱が抜け始め応力は急上昇する。しかし最終的にはモデルが降伏するため残留応力値に大きな差はない。

Fig. 5 は本モデルにおいて変態が生じる場合の履歴を変態

挙動および拘束距離別に示したものである。いずれの変態挙動でも $GL=10\text{ mm}$ では M_s , M_f 温度によって残留応力の大きさにかなり差が生じる。しかし, $GL=60\text{ mm}$ では変態なしの場合の残留応力に対して変態による軽減効果が多少見られるが M_s , M_f による差はほとんどない。また, $GL=10\text{ mm}$

Fig. 4 Schematic view of stress histories in Model-2 (Strip type model).

の各変態挙動による応力履歴は拘束距離内がすぐに均一温度になるにもかかわらず挙動 2, 3 (図の b-2 および c-2) に見られるように高温から室温近くまで変態を持続させると, 応力があまり圧縮側に向かわず前節の均一冷却モデルと異なる場合がある。これは $GL=10\text{ mm}$ としてもなお拘束距離内で変態する要素としない要素が混在し相互に影響するためである。すなわち, 変態膨張により生じる圧縮方向の応力増分と変態しない要素の熱収縮による引張り方向の応力増分とが相殺することが考えられる。本モデルの加熱条件では変態するのは溶接線から片側 5 mm 以内の要素であり, 拘束距離をさらに短くすると均一冷却モデルの履歴に近づくことを確認している。変態による応力軽減の効果は各履歴が最終的に変態なしの場合の履歴 (降伏曲面) に戻るかどうかで決まることは均一冷却モデルと同様である。

Fig. 6 は本モデルにおける M_s , M_f 温度と残留応力の関係を示したものである。 GL が短いこと, すなわち拘束が厳しいことならびに変態温度範囲, 特に M_f が低いことが残留応力軽減に効果的であることがわかる。しかし, 均一冷却モデルでは全体が同一温度で同時に変態するため, 応力履歴や残

Fig. 5 Stress histories in Model-2.

Fig. 6 Relation between residual stress and Ms, Mf temperature in Model-2.

Fig. 7 Relation between residual stress and restraint length (GL) in Model-2.

留応力に対する効果の有無が極端に現れたが、それに比して短冊形モデルでは効果はより限られてくる。GLと残留応力の関係をFig. 7に示す。応力の軽減、さらには圧縮残留応力の導入にはかなり短いGLが必要なことがわかる。

3.3 単純なモデルを用いた残留応力生成機構の考察(3)

3.3.1 突合せモデル

本項では突合せ溶接を模したモデルを用い、熱源は移動熱源とする。このモデルでは溶接線と直角(x)および溶接線(y)両方向ともに応力が生じるため、両応力成分(σ_x , σ_y)の履歴を求める(Fig. 1の○印位置)。Fig. 8は本モデルの変態なしの場合の試験片中央に予想される応力履歴の模式図であり、溶接線と直角方向(x)の履歴は短冊モデルと同じくGL(拘束長)によって2種の基本パターンが見られるが、溶接線方向(y)ではGLの長短によらず基本パターンは一つに限られ、均一冷却モデルあるいは短冊モデルのGLが短い場合に相当する。これは溶接線に沿った膨張・収縮をその外側の部分が拘束するためである。

これら基本パターンに前節までと同じ変態挙動を与えた結果をFig. 9およびFig. 10に示す。なお、ここでは変態挙

Fig. 8 Schematic view of stress histories in Model-3 (Butt joint type model).

Fig. 9 Stress histories for transformation type-1 in Model 3.

Fig. 10 Stress histories for transformation type-2 in Model 3.

動 1 ($M_f = M_s - 50^\circ\text{C}$) の x 方向と挙動 2 ($M_f = 0^\circ\text{C}$) の x, y 方向のみを示す。各変態挙動における応力履歴は GL, 応力成分に応じてより単純な均一冷却モデルあるいは短冊モデルにおけるどれかのパターンに類似しており、それらのいずれとも大きく異なることはなかった。突合せモデルでも変態する要素は中心線から片側 5 mm 以内に限られるので応力履歴はその影響を受ける。特に x 方向 (溶接線と直角方向) に拘束されているので, σ_x については短冊モデルと同様に溶接線付近の変態膨張時に非変態部は冷却途上で収縮するために変態による応力軽減効果が小さくなる場合が見られる。一方, y 方向 (溶接線方向) の変態膨張は非変態部の収縮により拘束されるため GL に依らず均一冷却モデルのような様相を呈し, M_s または M_f 温度が低いと σ_y の応力軽減は大きくなる。また σ_x では先行して変態した部分の影響が特に高温で変態する場合に現れ, 例えば Fig. 9 中の * $\rightarrow$ で示した箇所のように曲線に乱れが生じる。しかし, この乱れは瞬間熱源を用いて計算すると解消する。

Fig. 11 に M_s , M_f 温度と残留応力の関係を示す。ここには無拘束 ($GL = \infty$ に相当, Free と表示) の場合も含んでいる。これまでと同様に GL が短いことと変態温度範囲が低いことが残留応力軽減に効果的であるが溶接線方向 (σ_y) に関しては外的拘束が無くても変態温度範囲が低ければ軽減効果が現れている。

Fig. 11 Relation between residual stress and M_s , M_f temperature in Model-3.

Fig. 12 Relation between residual stress and Ms, Mf temperature in Model-4 (Local heating type model).

3.3.2 局部加熱モデル

これは前項のモデルを小型にして中央 60 mm に移動熱源を置いたものであり、後のべる残留応力の実測に用いた試験片と加熱条件を合わせたものである。モデル中心の応力履歴は前項の大型のものと傾向の上では大差ない。Fig. 12 に本モデルにおける Ms 温度と残留応力の関係を示す (Mf=Ms-50°C とする)。

4. 残留応力の実測結果と計算との比較

4.1 SUS304 および 9 % Ni 鋼の場合

本項では SUS304 および 9 % Ni 鋼について残留応力分布の実測と計算結果との比較を行う。試験片は前項と同じ Fig. 1 のモデル④を用いた。まず、最も単純な例として変態を生じない SUS304 ステンレス鋼の場合を Fig. 13 に示す。図で縦軸は試験片下部からの長手方向の距離、横軸は中心線 OO' に沿った残留応力値である。またプロット点○印が溶接線と直角方向の残留応力成分 (σ_x)、●印が溶接線方向の残留応力成分 (σ_y) の実測値、太実線および細実線はそれぞれ σ_x および σ_y の計算結果である (以下 Fig. 18 まで同様)。実測は計算と傾向が良く一致しており、定量的にも比較的近い値が得られている。変態がない、あるいは高温で変態する材料では残留応力分布のパターンはこの図ようになる。

次に 9 % Ni 鋼についての結果を Fig. 14 に示す。先にも述べたように計算に用いた変態挙動は前報において同一条件でレーザースペックル法により測定したものである。 σ_x には変態の効果が無いが、 σ_y には SUS304 に比べてその効果が現れており、前節までの計算で考察したことを裏付けている。しかし、 σ_y では計算結果はやや実測を下回っている。著者等は第 3 報³⁾ および第 6 報 (前報)⁴⁾ で冷却途上の過渡的な応力による超塑性現象に触れている。これがために残留応力の絶対値が低くなっている可能性が考えられる。それについては低変態温度材料の結果を述べてから考察すること

Fig. 13 Residual stress distributions of SUS304 along the center line OO'.

Fig. 14 Residual stress distributions of 9% Ni steel.

にする。

4.2 低変態温度材料の場合

Fig. 15, Fig. 16 および Fig. 17 は低変態温度材料 B, A および R 材での測定および計算結果である。いずれの材料でも中央部では σ_x は ± 100 MPa 以下である。 σ_y に関してはこれ

Fig. 15 Residual stress distributions of Material B.

Fig. 17 Residual stress distributions of Material R.

Fig. 16 Residual stress distributions of Material A.

Fig. 18 Residual stress distributions of Material A considering superplasticity.

らの材料が非常に低い変態温度を持つことから計算では圧縮側にかなり大きな値を示した。しかし、実測値は B, A, R の順に約 -200, -100, -50 MPa 程度であった。これらは 9% Ni 鋼の結果よりはるかに計算結果とかけ離れている。そこでこれを変態中の超塑性現象のために応力の絶対値が減少したものと仮定して A 材について変態する要素に超塑

性現象を入れた計算を試みた。超塑性を計算に考慮する方法であるが、変態が生じる要素では Ms 温度でヤング率と降伏値をゼロ近くまで落とし、その後 Mf 温度までの間に直線的に回復させる⁶⁾。そして Mf 温度に達した変態要素では節点に節点力を逆方向に加える方法で応力をゼロクリアする。計

Fig. 19 Comparison among residual stress, materials and computational method.

算結果を Fig. 18 に示す。A 材の結果は σ_y が顕著に実測値に近づいた。他の材料についても同様の計算を行い、これまでの結果と比較して Fig. 19 に示す。図は試験片中央の残留応力 σ_x および σ_y を超塑性計算の有無で比較したものである。図中、棒グラフが計算結果、プロット点が実測値である。 σ_y については計算で超塑性を考慮すればいずれの材料も実測値にかなり近づき、なお差はあるもののその効果が認められる。

実溶接継手では多パスの場合、パス数と積層方法によっては単パスより厳しい拘束になり溶接線に直角方向でも変態による残留応力軽減効果がある程度現れる可能性はある。しかし、低変態温度材料を用いても母材との希釈によりかなり変態温度が上昇する。前報⁴⁾でレーザースペckルひずみ測定法によるその測定例を報告したが、例えば R 材では 500 MPa 級母材との約 50 % の希釈率で Ms 温度が 150℃ 以上上昇している。そのことが残留応力生成にも当然影響すると考えられる。

5. 結 論

本研究では、変態が残留応力におよぼす効果を明らかにするため、単純なモデルを用い計算と実測結果を基本として考察した。低変態温度材料を用いて溶接部の残留応力を軽減あるいは圧縮残留応力を導入して継手性能の向上を図ることが盛んに行われているが、どのような材料、変態挙動および拘束状態でその効果がより顕著になるかを検討することが重要である。本報告の結果はその方向に活用できるものと考え

えられる。以下にその結果を要約する。

(1) 変態がない場合、単パスの突合せ溶接における溶接線中央部の応力履歴はより単純なモデルのそれでほぼ説明できる。すなわち、溶接線中央部の溶接線方向応力成分 (σ_y) の履歴はすべて単純な均一冷却モデルに対応する。また、溶接線直角方向応力成分 (σ_x) の履歴はその拘束距離に応じた短冊モデルの履歴に対応する。

(2) 冷却途中で変態が生じた場合、変態挙動に応じて、前記の履歴が変化する。これも、単純なモデルのいずれかに対応している。そして、変態なしの場合と比較した残留応力軽減の効果は応力履歴が同じ拘束状態で変態のない場合の履歴（降伏曲面）に最終的に戻るかどうかで決まる。

(3) 単パスの突合せ溶接継手の条件では変態による溶接線と直角方向の応力成分 (σ_x) 軽減効果は拘束が非常に厳しく、さらに変態温度特に Mf 温度が低い場合に現れる。溶接線方向成分 (σ_y) には比較的容易に圧縮残留応力が生成でき、軽減効果の確認ができる。

(4) SUS304 ステンレス鋼や 9 % Ni 鋼などでは、ひずみゲージによる残留応力の実測データは数値計算結果と傾向の上で良く合い、また定量的にも比較的近い値が得られている。しかし、低変態温度材料では溶接線方向の残留応力成分 (σ_y) に実測と計算でかなりの差が見られた。これは冷却途中の過渡的な応力による超塑性的現象の可能性があると示唆している。

(5) この超塑性を考慮した計算を行った結果、なお差は残るものの計算結果はかなり実測に近づくことがわかった。

参 考 文 献

- 1) A. Ohta et al. : Fatigue Strength Improvement of Box Welded Joints by Using Low Transformation Temperature Welding Material, Quar. J. of JWS, 18-1 (2000), 141-145. (in Japanese)
- 2) A. Ohta et al. : Fatigue Strength Improvement of Box Welds by Using Low Transformation Temperature Welding Material - Tripled Fatigue Strength by Postweld Heat Treatment -, Quar. J. of JWS, 19-2 (2001), 373-376. (in Japanese)
- 3) Y. Muramatsu, S. Kuroda, H-G Gros: Detection of Strain Behavior during Phase-Transformation in Welds by the Laser Speckle Method - Application of the Laser Speckle Method to Strain Measurement in the Welding Process (Report 3) -, Quar. J. of JWS, 14-4 (1996), 741-747. (in Japanese)
- 4) Y. Muramatsu, S. Kuroda, J. Yamamoto, Y.C. Kim: Detection of Phase-transformation during Welding Procedure - Application of the Laser Speckle Method to Strain Measurement in the Welding Process (Report 6) -, Quar. J. of JWS, 22-1 (2004), 101-106. (in Japanese)
- 5) K. Satoh, S. Matsui : Development of Reaction Stress and Weld Cracking under Restraint, J. of JWS, 36-10 (1967) 1095-1109. (in Japanese)
- 6) Y. Ueda, Y.C. Kim et. al. : Mathematical Treatment of Phase Transformation and Analytical Calculation Method of Restraint Stress-Strain, Quar. J. of JWS, 2-1 (1984), 89-97. (in Japanese)