論文

マッシュシーム溶接部の段差平坦化に及ぼす
クロススウェーピングの影響

——マッシュシーム溶接機の連続冷延プロセスへの適用 第3報——

斎藤 武彦* 富永 憲明* 河角 知美*

田方 浩智** 湯川 伸樹*** 石川 孝司***

Effect of Cross Swaging on Flattening of Mash Seam Welding

——Application of Mash Seam Welder to Continuous Cold Rolling Process: 3rd Rep.——

Takehiko SAITO*, Noriaki TOMINAGA*, Tomomi KAWASUMI*,

Hiroto TAGATA**, Nobuki YUKAWA*** and Takashi ISHIKAWA***

(Received on June 19, 2013)

Mash seam welders are not applied in continuous cold rolling lines, because rolling fracture occurs under conditions of high reduction owing to the presence of residual steps at the edge of the lap seam. The flattening mechanism of residual steps has mainly been investigated. The shear force of crossing the upper and lower swaging wheels smoothens the steps without forming double-lapped defects. However, the theory of preventing double-lapped deformation remains unclear. On the basis of experimental analysis and FEM, in this report the effect of cross swaging on the flattening of mash seam welds is discussed. Double-lapped defects occur parallel to the sheet surface in the early stage of swaging, because bulging deformation at the edge of the lap seam cannot be prevented. The double-lapped deformation is prevented as follows: (1) Because of the high-temperature zone within the welded sheets after welding, shear deformation due to cross swaging occurs easier than bulging. (2) As tensile force in the longitudinal direction owing to thermal shrinkage occurs within the sheets immediately after welding, plastic flow in the longitudinal and thickness directions by cross swaging is enhanced.

Key words: cold rolling, FEM, model simulation, deformation behavior, mash seam welding, cross swaging.

1. 緒言

冷延鋼板の製造プロセスでは生産性向上のため、コイル状に巻かれた鋼板の先端部と後端部を溶接し、連続的にコイルを処理する生産方法^{1), 2)}が導入されてきた。このような冷延鋼板の連続製造プロセスで用いられる溶接機には、マッシュシーム溶接機(MSW)³⁾、フラッシュバット溶接機(FBW)³⁾およびレーザービーム溶接機(LBW)⁴⁾がある。各溶接方法で特徴、適用ライン^{2), 5)}は異なるが、適切な溶接条件で施工された溶接部は、引張試験において母材相当の強度を有している⁶⁾。しかし、MSWは圧下率が最大85%程度

におよぶ連続冷間圧延ラインへ適用されていない。

MSWは重ね合わせ抵抗溶接であり、FBWまたはLBWより電気設備が小規模で、突き合わせ面の精度管理も不要であるため、連続冷延プロセスへMSWを適用するメリットは大きい。これまで適用されなかった理由は、明確に論じられていないが、重ね合わせ溶接段差の残存、溶融領域外の拡散接合不良、溶融領域内の欠陥など⁷⁾が高圧下率の下で板破断を引き起こすためと考えられる。筆者らは、これらの中からマッシュシーム溶接部に特徴的な溶接後段差に着目し、圧延によって段差が亀裂状の折れ込みみきずとなり、きずから圧延破断に至るプロセスを解明した⁸⁾。また、溶接後に溶接段差を溶接線方向に圧延する狭幅のスウェーピングロールを上下でクロスして、段差折れ込み変形を防止したマッシュシーム溶接機(CSW)を開発した⁹⁾。しかし、溶接と連動するスウェーピングロールのクロス付与効果のメカニズム解明には至っていない。

そこで本報では、クロススウェーピングによる段差折れ

* 三菱日立製鉄機械(株) 〒733-8553 広島市西区観音新町 4-6-22
Mitsubishi-Hitachi Metals Machinery, Inc., 4-6-22 Kanonshin-machi, Nishi-ku,
Hiroshima 733-8553, Japan.

** 三菱重工業(株) 技術統括本部 〒733-8553 広島市西区観音新町 4-6-22
Technology & Innovation Headquarters, MITSUBISHI HEAVY INDUSTRIES,
LTD., 4-6-22 Kanonshin-machi, Nishi-ku, Hiroshima 733-8553, Japan.

*** 名古屋大学大学院工学研究科 〒464-8603 名古屋市中区千種区不老町
Department of Materials Science and Engineering, Nagoya University,
Furo-cho, Chikusa-ku, Nagoya 464-8603, Japan.

込み変形防止のメカニズム解明を目的とし、アルミ材による冷間スウェーピング試験、溶接と溶接直後スウェーピングの連続工程における材料の応力測定、3次元FEMによるクロススウェーピングの変形解析を行う。

2. 冷間スウェーピング試験

2.1 試験方法

Fig. 1は、MSWの構造を示したものである。MSWには、通電しながら押圧回転する電極輪と押圧回転するだけのスウェーピングロールが一体フレームに装備されている。フレーム全体が板幅方向に走行し、素材はクランプ装置によって固定されている。スウェーピングロールには、電極輪で溶接された直後の溶接部を溶接線方向に圧延して押しつぶす効果がある。Fig. 2は、スウェーピングロールのクロス機構を示したものである。上下のスウェーピングロールの回転軸を進行方向（溶接方向）に対して角度 θ クロスすることによって、材料表面にせん断力を付与できる。

Fig. 3は、板厚2mmのSPHC材に対して溶接およびスウェーピングを行った断面を示したものである。Fig. 3(a)は溶接直後、Fig. 3(b)は従来型スウェーピング($\theta=0^\circ$)後、Fig. 3(c)はクロススウェーピング後の板厚方向断面である。クロススウェーピングによって、折れ込みみずや段差を残さずに重ね合わせ溶接部を平坦化できる。このようなクロススウェーピング過程における変形メカニズムを解明するために、熱間温度領域の流動応力を模擬したアルミニウム材(A1050-H24)でスウェーピング試験を実施した。

Fig. 4(a), (b), (c)は試験片形状、Table 1は試験片各部の詳細寸法およびスウェーピング条件を示したものである。試験片Aは、Fig. 3(a)に示す薄板($t_0=2\text{mm}$)の溶接直後の断面を模擬し、試験片Bは、 $t_0=4\text{mm}$ から6mm程度の比較的厚い板材の溶接直後の断面⁹⁾を模擬している。また、試験片Cは、底部に溝を加工し金属補修材を充填することで、板材内部の変形抵抗差を模擬している。

スウェーピングロールに付与するクロス角はFig. 2に示

Fig. 1 Schematic diagram of mash seam welder

Fig. 2 Schematic diagram of cross swaging device

す方向であり、各試験片の上面左側において、段差平坦化の変形挙動を観察することができる。Fig. 5は、スウェーピング前後の段差近傍断面を模式的に示したもので、 C_1 、 C_2 は初期段差のコナ部である。スウェーピング後の上面左側段差コナ部 C_1 における折れ込み変形の発生有無や、 C_1 と C_2 の板厚方向距離 d （きず深さ）、長手方向距離 w_2 によって、スウェーピングによる段差押圧効果や折れ込み変形防止効果を評価する。また、 d_1 は真の折れ込みみず深さを表し、きず深さ d から開口きず深さを減じたものである。

2.2 試験結果

Fig. 6は、スウェーピング後のきず深さ d に及ぼすクロススウェーピング角度 θ_s の影響を示したものである。段差の初期角度 θ が 90° の場合、クロススウェーピング角度 θ_s の影響はほとんどなく、初期段差 d_0 の45%から50%深さの

Fig. 3 Section of welding area before and after swaging⁹⁾

Fig. 4 Shape of experimental swaging specimen

Table 1 Conditions of experimental swaging (A1050-H24)

Specimen	A	B	C
Thickness t_0 /mm	2	4	4
Height of steps d_0 /mm	0.2	0.2, 0.4 0.8, 1.2	0.8
Distance of steps w_1 /mm	6	5	8
Angle of steps θ /°	60, 90	60, 90	60
Angle of cross swaging θ_s /°	0, 3, 5	3, 5	3

Fig. 5 Definition of defective depth and formed step width

きずが残存する。他方、段差の初期角度 θ が 60° の場合は、クロス角 θ_s を付与しなくても、残存きず深さは $\theta=90^\circ$ の場合よりも浅くなる。さらに、クロス角 θ_s を付与することで、初期段差 d_0 の25%程度まできず深さが低減されることがわかった。

Fig. 7は、スウェーjing後のきず深さ d に及ぼす初期段差高さ d_0 の影響を、段差の初期角度 θ 、クロススウェーjing角度 θ_s の条件ごとに示したものである。全ての条件において、初期段差高さ d_0 ときず深さ d はほぼ比例関係にあり、初期段差高さ d_0 が、きず深さ d に大きく影響している。また、段差の初期角度 θ が 60° の場合には、クロススウェーjingを行うことで、初期段差 d_0 が高くても、スウェーjing後のきず深さ d を浅くできることがわかった。しかし、アルミ材を用いた冷間スウェーjing試験では、クロススウェーjingを施しても、亀裂状の折れ込みきずが残存し、溶接直後スウェーjingと同様の効果を再現するには至らなかった。

2.3 考察

折れ込みきずの発生過程を明らかにするため、スウェーjingの初期過程における段差断面の形状変化を観察した。Fig. 8は、スウェーjingロールの接触弧長内における段差コーナ C_1 付近の幅方向断面を、スウェーjing出側から見たものである。スウェーjingロールの投影接触長の20%の初期段階において、既に段差端面が張り出し、亀裂状の折れ込みきずが水平方向に発生している。この時点における C_1 は深さ方向に殆ど変位していない。その後、スウェーjingロールの投影接触長40%の段階において、 C_1 を先端とする亀裂状の折れ込みきずが板厚および水平方向に形成されていることがわかった。

このように冷間アルミ材によるモデル試験では、材料の張出方向とは逆方向にクロスせん断力を付与しても、板厚

Fig. 6 Influence of cross swaging on defective ratio in cold swaging with specimen A

Fig. 7 Influence of initial step height on defective depth in cold swaging with specimen B

方向の変形より水平方向自由表面側への張出変形が先行する。このような変形は、材料温度が均一な冷間材特有と考えられ、表面よりも内部温度が高い状態では変形挙動が異なると考えられる。実際、溶接直後のビードをクロススウェーjingする場合は、溶接施工部を中心に内部温度が約 1000°C 以上あり¹⁰⁾、表面近傍よりも内部に塑性変形しやすい領域が存在する。そこで、Fig. 4(c)に示すような溝加工付き試験片を作製し、A1050-H24よりも流動応力が低い金属補修材を充填して溶接直後の流動応力分布を模擬した。

Fig. 9は、試験片BとCのクロススウェーjing後の断面を示したものである。材料内部に高温溶接部を模擬した試験片Cでは、スウェーjing初期の張出変形よりも板厚方向とクロスせん断力方向への流動が容易になり、 d は d_0 の10%、真の折れ込み変形深さ d_1 は d_0 の5%まで低減される。なお、試験片BとCでは段差距離 w_1 に差異はあるが、段差高さ d_0 に比べて6倍以上大きく、段差コーナ C_1 における局所変形には影響しない。Fig. 10は、段差コーナ C_1 から下面溝部までの水平距離 w_c がきず深さに及ぼす影響を示したものである。 w_c が概ね1mmより小さくなると、きず深さ d が0に漸減する傾向にあり、また、適切な溶接条件下では、段差近傍まで接合界面温度が 1000°C 近傍に達することから¹⁰⁾、内部の高温領域が、クロススウェーjing

Fig. 8 Deformation process of cold swaging with specimen B around corner C_1 ($\theta=90^\circ$, $d_0=1.2\text{mm}$, $\theta_s=3^\circ$)

Fig. 9 Double lapped defect ($\theta=60^\circ$, $d_0=0.8\text{mm}$, $\theta_s=3^\circ$)

Fig. 10 Influence of distance from step corner on double lapped defective ratio in cold swaging with specimen C

グの折れ込み変形防止に大きく寄与していると推察できる。

3. 溶接部の応力状態

3.1 試験方法

マッシュシーム溶接は、突き合わせ溶接とは異なり、材料を重ね合わせて圧縮変形を伴いながら溶接するのが特徴である。溶融溶接部近傍では、圧縮塑性変形、溶融凝固、熱収縮が連続的に繰り返されており、突き合わせ溶接時の応力状態¹¹⁾に比べて不明点が多い。そこで、マッシュシーム溶接および直後クロススウェーピングの連続工程中に作用する板材の長手方向(溶接方向と直角方向)応力を測定し、スウェーピング施工時の応力状態を明らかにする。

Fig. 11 は、ひずみゲージ(東京測器 AW-6-350-11-01LT)および温度補償用K型熱電対の貼付位置を示したものであり、電極輪やスウェーピングロールによって塑性変形を受けない領域で弾性ひずみと温度を測定した。上下面合計20か所で測定し、上下面の測定値を平均して曲げの影響を排除し、応力換算用ヤング率は温度依存性を考慮した。例えば、測定位置L3における応力 σ_{L3} は、

$$\sigma_{L3} = \alpha \cdot E \cdot (\varepsilon_{L3_upside} + \varepsilon_{L3_underside}) / 2 \quad (1)$$

にて換算した。ただし、 α はヤング率の温度依存性換算係数¹²⁾、 E は室温でのヤング率、 ε_{L3_upside} および $\varepsilon_{L3_underside}$ は、上面側、下面側の弾性ひずみ測定値である。このようにして、クランプで把持され重ね合わされた接合部の塑性変形および熱変形による周辺の弾性応力変化を測定した。

3.2 試験結果

Fig. 12 は、板幅方向中心位置L3における長手方向応力を示したものである。L1側板端部から溶接が開始され、約

Fig. 11 Dimension of attached strain gauge and thermocouple

Fig. 12 Transition of longitudinal stress in process of welding and swaging

3秒で電極輪、その後、約4秒遅れてスウェーピングロールが到達する。電極輪の通過とともに材料が長手方向固定クランプ側に排斥されるため圧縮応力が180MPa作用している。同時に溶接部は1000℃近傍まで温度上昇するため、圧縮降伏応力は20MPaまで低下している。電極輪通過後、温度低下による熱収縮で100MPa相当の引張応力に変化して、スウェーピングロールが通過する。スウェーピングロールの通過時は、板厚方向に圧縮され長手方向固定クランプ側へ材料が排斥されるため、応力は一時圧縮側に推移するが、継続した熱収縮でその直後に引張側に変化する。

Fig. 13 は、スウェーピングロールがL1～L5, R1～R5位置を通過する直前の応力値を示したものであり、板幅位置 $x_s=35\text{mm}$ (L1, R1)と $x_s=515\text{mm}$ (L5, R5)の計測時刻には6秒の時間差がある。板端部から40mm程度の範囲では圧縮、それ以外では、引張応力が作用している。このことから、溶接と連動したクロススウェーピング過程では、板端部領域を除いて、スウェーピング通過初期に長手方向に引張応力が作用した状態で段差を圧縮し、クロスせん断力による段差の折れ込み防止効果を高めていると考えられる。

3.3 考察

Fig. 3(c)は、溶接直後にクロス角を付与してスウェーピングを行った一例であるが、次の3つの状態で段差の折れ込み変形防止と表面の平坦化が両立したと考えられる。①材料内部に高温領域が存在し、温度が低い表面より内部変形が容易である。②熱収縮によって長手方向に引張力が作用し、板厚方向に圧縮変形され易い。③クロスしたスウェーピングロールから、段差の張出変形を抑制する方向にせん断力が作用している。他方、熱収縮過程が考慮されないアルミ材の冷間スウェーピングの場合は、上記状態①、②が欠如して、クランプ装置で固定された材料の長手方向に継続的に圧縮応力が作用し、溶接直後スウェーピングと同様の折れ込みみず抑制効果が得られなかったと考えられる。

Fig. 13 Distribution of longitudinal stress at swaging passage

4. クロススウェーピング変形解析

4.1 解析方法

前章の検討結果をもとに、長手方向の応力状態が段差折れ込みみずの発生に及ぼす影響を検討するために、汎用の弾塑性FEMコード「ANSYS」を用いて3次元解析を行った。Fig. 14は解析モデルの概要を示している。ただし、既報^{8), 9)}と同様にロールは剛体、材料の変形抵抗は、 $\sigma=717(0.002+\varepsilon)^{0.207}\text{MPa}$ に従うものとし、スウェーピングロールと材料の摩擦係数 μ は0.3とした。図内斜線部に接触する

面の境界条件は、板幅（スウェーピング）方向と板厚方向の変位を 0 とし、(1)長手方向に引張荷重を付与し、溶接後の熱収縮過程を模擬する場合と、(2)長手方向の変位を 0 にし、冷間状態を模擬する場合を検討した。

4.2 解析結果

Fig. 15 は、端部境界面に長手方向の引張応力 $T=100\text{MPa}$ を付与し、スウェーピングを施工した際の断面を示している。ただし、折れ込み変形は圧下の初期段階で生じることから、スウェーピングロールの投影接触長 40%の段階を表している。クロス角 θ_s を付与することで、初期角度 $\theta=75^\circ$ の段差の折れ込み変形を防止し、開口状態に成形している。他方、クロス角 θ_s を付与しない場合は、段差コーナ部 C_1 にて、段差角度が 90° を超え、折れ込む直前の状態になっていることがわかる。

Fig. 16 は、引張境界条件が初期段差幅 w_0 (C_1 - C_2 間水平距離) の変形に及ぼす影響をクロス角 θ_s の条件ごとに示したものである。どちらのクロス角設定においても初期の段差幅 w_0 がスウェーピングによって長手方向(水平方向)に伸

Fig. 14 Schematic diagram of FEM simulation

Fig. 15 Swaging deformation of $d_0=0.5\text{mm}$ and $\theta=75^\circ$ step in tensile boundary conditions with $T=100\text{MPa}$ (FEM)

Fig. 16 Influence of tensile stress at boundary on formed step width (FEM)

Fig. 17 Swaging deformation of $d_0=0.5\text{mm}$ and $\theta=75^\circ$ step in boundary conditions with displacement constraint (FEM)

ばされているが、クロス角を付与する方がより長く引き伸ばされ段差の平坦化効果が高いと言える。また、クロス角を付与しない場合においても、材料を長手方向に大きく引っ張ることで、段差折れ込み防止、段差平坦化の効果が得られると考えられるが、長手方向引張りは、溶接条件に依存する熱収縮で生じるため、実際は任意に変更することは不可能である。

Fig. 17 は、端部境界面における長手方向の変位を 0 にし、スウェーピングを施工した際の断面を示している。この条件は、2 章に示した冷間スウェーピングを概ね模擬しており、クロス角 θ_s を付与しても折れ込み変形の防止には至らないことがわかる。クロススウェーピングによって、きず深さ d_2 の低減、段差幅 w_2 の延伸効果はあるが、初期段差角度 θ が 75° と大きいため、その効果は 10%程度であり、Fig. 6 に示した $\theta=60^\circ$ の場合の効果 15%と比べて小さい。

5. 結 言

マッシュシム溶接部の段差平坦化手法であるクロススウェーピングの折れ込み変形防止メカニズムを明らかにするため、冷間スウェーピング実験、応力測定試験、FEM 解析を行い以下の結論を得た。

- 1) 段差の折れ込み変形は、スウェーピングの初期段階に段差端面の張出変形を抑制できない場合に発生し、その方向は板表面とほぼ平行である。
- 2) 材料内部に溶接後の高温領域が存在すると、クロススウェーピングによってせん断方向の変形が生じやすく、段差端部の折れ込み変形が防止される。
- 3) 溶接に連動したクロススウェーピングでは、クロススウェーピングによるせん断力と溶接後の熱収縮による長手方向引張力が作用し、板厚方向圧縮時の長手方向の塑性流動性が高まり、折れ込み変形が防止される。

参 考 文 献

- 1) 鎌田正誠：塑性と加工，32-366(1991)，837-843.
- 2) 湯浅博康・中西敏修・竹野忠吉・田渕衛・山本和明・小松富夫：鉄と鋼，74-3(1988)，473-480.
- 3) 浜崎正信：溶接学会誌，37-3(1968)，239-248.
- 4) 弦田登・相原正樹・佐々木弘明・田渕衛・菅沼七三雄：鉄と鋼，71-14(1985)，1677-1684.
- 5) 戸田健三・原田利夫・安藤成海・尾崎康二・勝谷良碩・西村輝彦・臼田松男：鉄と鋼，61-13(1975)，2863-2876.
- 6) 内原正人・栗田真人・広瀬洋三・福井清之・福岡弘：溶接学会全国大会講演概要，59(1996)，336-337.
- 7) 内原正人・福井清之：溶接学会全国大会講演概要，61(1997)，250-251.
- 8) 斎藤武彦・富永憲明・加賀慎一・田方浩智・湯川伸樹・石川孝司：塑性と加工，54-627(2013)，368-372.
- 9) 斎藤武彦・富永憲明・湯川伸樹・石川孝司・田方浩智・佐藤恵一：塑性と加工，54-626(2013)，267-271.
- 10) 富永憲明・石井久義・田所寛樹・佐藤恵一・田方浩智・渡辺裕二郎：三菱重工技報，49-4(2012)，38-46.
- 11) 田村博：溶融加工，(1982)，77，森北出版.
- 12) 日本機械学会編：金属材料の弾性係数，(1980)，75，丸善.