

## 第 12 節 高輝度放射光 X 線と機械学習技術による溶接凝固過程の詳細解析

(国研) 物質・材料研究機構 北野 萌一, 柳樂 知也

はじめに

近年, 放射光の利用は様々な分野で進展している。さらに国内では高エネルギーの硬 X 線を供給する SPring-8 に加え, 最近では低～中エネルギーの軟 X 線を供給する NanoTerasu の運用が始まり, 放射光を活用した研究の機運はますます高まっている。大型放射光施設で供給される放射光の特徴の一つは, 高い輝度と平行度である。この特徴により, 一般的な放射光と比べて, 材料内部の現象を高い時間分解能と空間分解能で評価することが可能である。

本節では, 我々が進めている放射光 X 線を用いたアーク溶接凝固過程を高い時間分解能と空間分解能で評価可能な凝固組織評価, ひずみ挙動評価に関する研究成果を紹介する。以降の内容の一部は, 既報<sup>1)</sup>の記述や図表を日本語訳したものが含まれている。

### 1. アーク溶接技術の概要と凝固過程理解の重要性

アーク溶接技術は, 電極-材料間に発生するアーク放電を熱源として利用し, 材料を局所的に溶融することで, 材料同士を接合する技術である。アーク溶接技術はリベット接合などの他の接合技術と比べて, 高速かつ低コストで金属を接合できるという利点があり, 構造物や機械部品の製造, 修理, 改修など幅広い産業分野で欠かせない役割を果たしている。

ただし, アーク溶接技術にも課題がある。それは, アーク溶接部の金属組織や力学特性が元の材料から変化したり, 割れや空孔などの欠陥が生じたりすることである<sup>2-5)</sup>。これらは, 主に溶接部の凝固過程における凝固組織形成や力学挙動に起因して生じるものである。そのため, アーク溶接による材料の劣化(材質の変化)や破壊(割れや空孔の発生)を深く理解するためには, 凝固過程で生じている現象を評価することが極めて重要である。

以降では, 我々が開発した高輝度放射光 X 線を活用したアーク溶接部の凝固組織形成過程のその場観察技術<sup>6-8)</sup>と, その場観察像を活用したひずみ挙動の評価手法の概要について, Fe-15Mn-10Cr-8Ni-4Si (FMS) 合金<sup>6,9-12)</sup>のアーク溶接部評価へと適用した結果と併せて紹介する。FMS 合金は近年制震ダンパー用材料として開発された材料であるが, 溶接による割れ発生が課題となっている材料であり, 溶接中の凝固組織形成過程やひずみ挙動の評価, 割れ形成過程理解の需要が高い材料である。

### 2. 高輝度放射光 X 線を用いたアーク溶接部凝固過程のその場観察

#### 2.1 その場観察技術の概要<sup>1)</sup>

図 1 に我々が開発したその場観察システムの概要を示す。この図に示す通り, 本システムにおいて, 入射 X 線は TIG (Tungsten Inert Gas) 溶接中の試料板 (50 × 50 × 厚さ 0.2 mm) を通過した後に, 2 次元 X 線検出器に到達し, 透過像として撮影される。現状, 観察領域は最大 2 mm 角で, 解像度は最小 0.5 mm/pixel, 撮影速度は最大 50 fps である。透過像の明暗は, 試料の厚さが一定であるとする X 線照射部の X 線吸収率により決まる。FMS 合金の凝固部では, 暗い領域が凝固デンドライト中心部近傍, 明るい領域は不純物元素等が偏析しているデンドライト間領域であると考えられることができる。観察は SPring-8 (ビームライン番号: BL20XU) にて実施した。また, 高速度カメラによる可視光撮影を同時に実施し, 可視光像から 2 色法を用いて温度場を算出することにより, 観察領域の温度分布の評価も可能となっている。

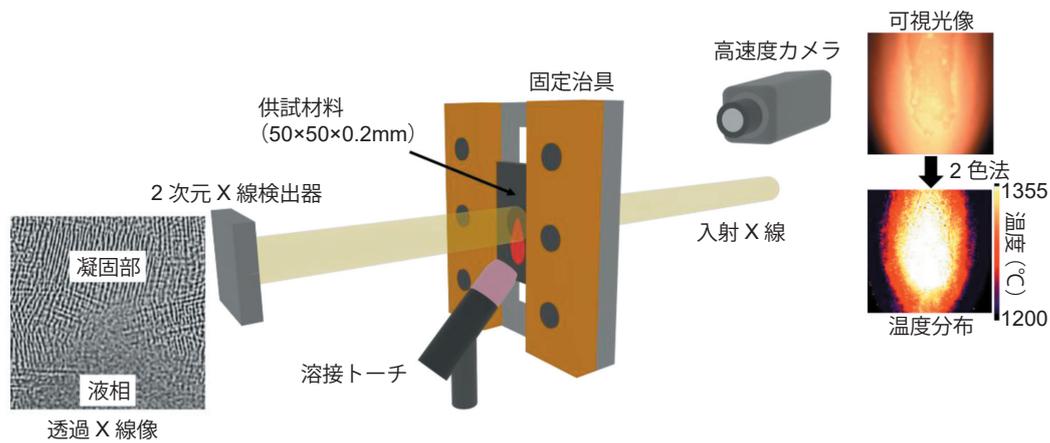


図1 その場観察システムの概要<sup>1)</sup>

## 2.2 その場観察結果例

図2に、FMS合金を対象に、観察システムを用いて得られたその場観察像の一例を示す。観察は、50 fpsで行った。溶接条件として、溶接電流および溶接速度をそれぞれ6 A、10 mm/sとし、シールドガスには純Arガス（流量8L/min）を用いた。図は左から順に1フレーム毎（20 ms 毎）の観察像であり、下部には青矩形領域を拡大した画像を示している。黒破線は2色法で算出された温度分布を参考に決定した、固相と液相の境界である。

この図より、凝固組織性状や凝固直後に生じる割れである凝固割れの発生が、明瞭に観察できていることがわかる。このような観察は高輝度放射光X線を使用して、初めて可能になるものであり、凝固 dendrait の成長速度や割れ発生部の組織状態に関する詳細な理解に繋がる結果である。

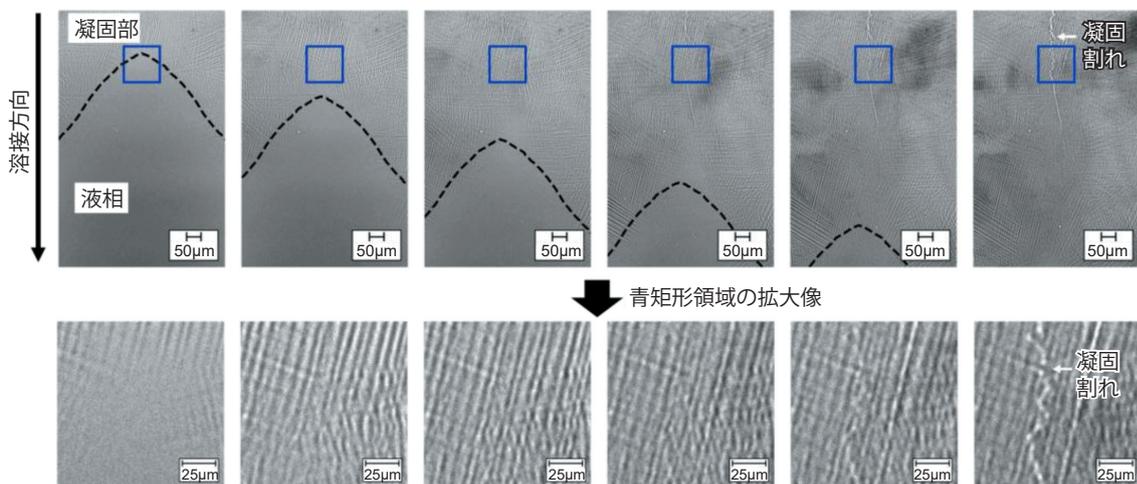


図2 その場観察結果例（左から右に向けて20 ms ずつ時間が進行）

## 3. 高輝度放射光X線その場観察像を用いたひずみ挙動の評価手法の開発

### 3.1 ひずみ評価手法の概要<sup>1)</sup>

その場観察像の活用として、特に凝固割れ発生部のひずみ挙動を理解することを目的に我々が開発したひずみ評価手法の概要を図3に示す。凝固割れは、アーク溶接部の凝固過程において凝固直後に生じる割れで、同組成の材料であれば、その支配因子は、液相線温度から固相線温度までの高温域で生じるひずみ量であると考えられている。し

かし、従来の技術では、このようなひずみ量を直接評価することは困難であったため、開発手法により評価可能とすることを目指した。

開発手法では、時系列その場観察像（入力画像）に対して、上段、中段、下段に示す3つの処理を行う。上段では、機械学習モデルを用いたデノイズ処理が行われる。中段では、同様に機械学習モデルを用いたコントラスト補正処理が行われる。下段では、TVL1 オプティカルフロー<sup>13,14)</sup>を用いた変位場の算出と、各ピクセルのひずみ値、すなわちひずみ分布、ひずみ履歴の評価が行われる。各段ではメイン処理の前後でパッチ分割とパッチ統合を行う。両処理の概要を図4に示す。これらの処理の目的は画像サイズが異なっても同じ機械学習モデルの使用を可能にすることと、各段の処理を安定化することである。

デノイズ処理とコントラスト補正処理を行う目的は、その場観察像の生データにはノイズや輝度値の時間方向のドリフトが確認されたためである。機械学習モデルによる画像処理を行うのは、溶接条件や観察像の解像度が異なっても、同じ手順で適切な処理を行えるようにするためである。Bilateral filter<sup>15)</sup>や Contrast limited adaptive histogram equalization<sup>16)</sup>といった古典的な画像処理手法を用いる場合には、溶接条件や観察像の解像度、最悪の場合には時刻毎に処理パラメータの調整が必要となる可能性がある。

TVL1 オプティカルフローは、連続画像内の全ピクセルの変位を評価する画像処理技術である。一般的に、連続画像のひずみ場は、Digital image correlation (DIC)<sup>17)</sup>により評価される場合が多いが、予備検討においてDICを適用すると、残留ノイズや固相-液相界面の存在により適切なひずみ評価が困難であることが確認された。そこで本研究では、TVL1 オプティカルフローを採用した上で、TVL1 オプティカルフロー算出結果に大きな影響を及ぼす Attachment parameter ( $\lambda$  in<sup>14)</sup>)を自動調整アルゴリズムにより調整することとした。以降で、デノイズ処理、コントラスト補正処理、Attachment parameterの自動調整方法、ひずみ場の算出方法について説明する。

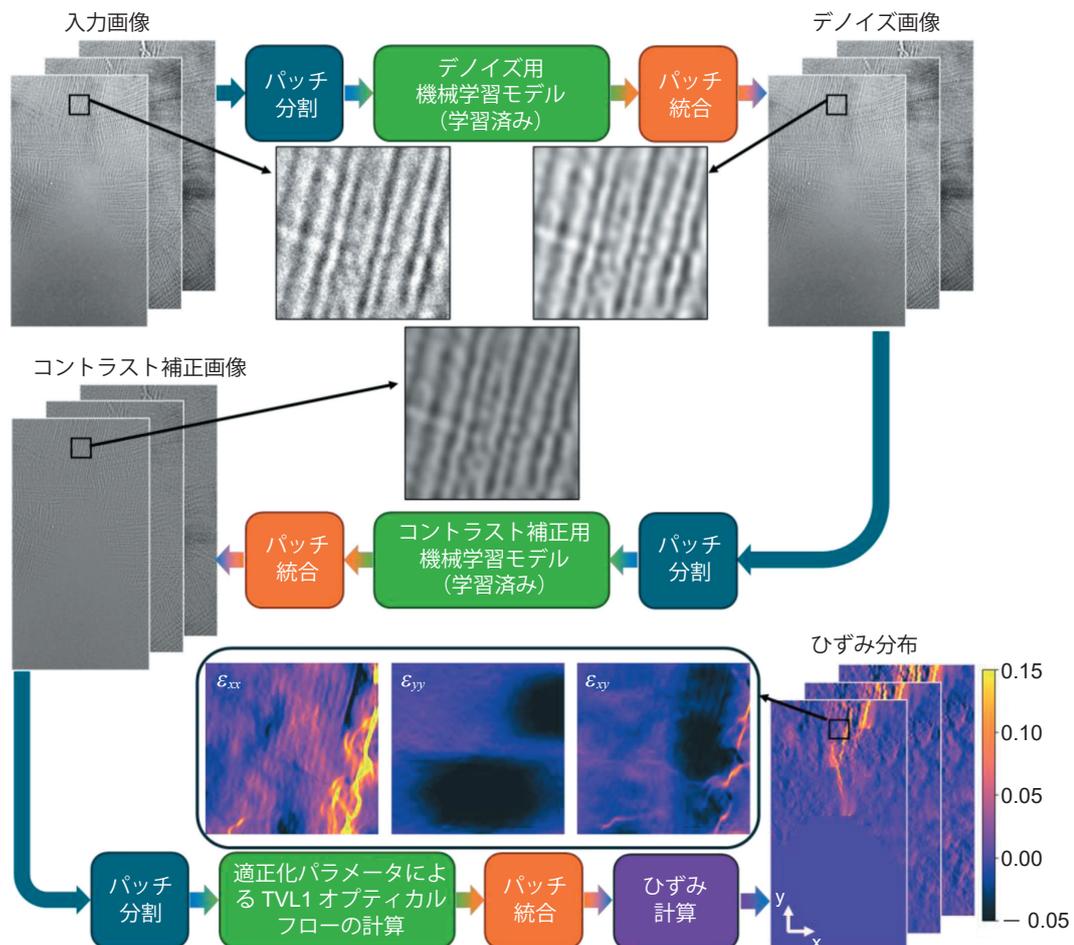


図3 その場観察像を用いたひずみ挙動評価手法の概要<sup>1)</sup>

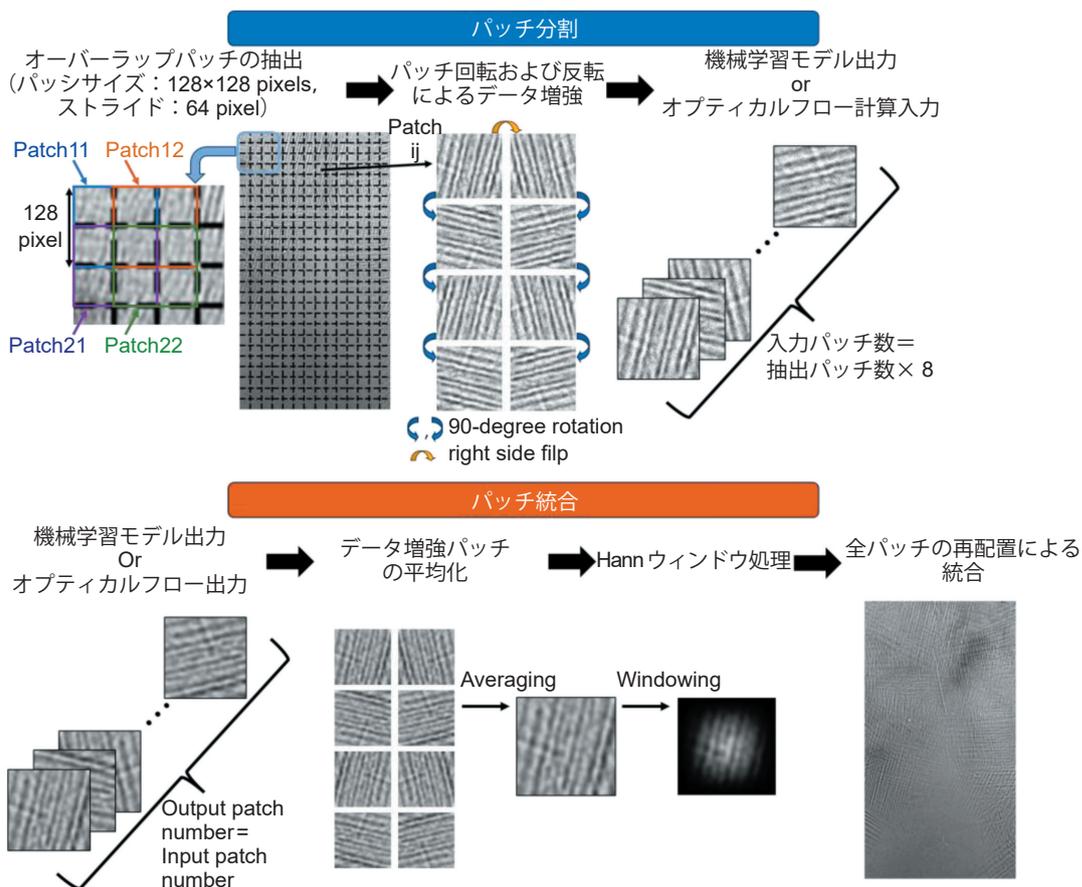


図4 パッチ分割およびパッチ統合の概要<sup>1)</sup>

### 3.1.1 デノイズ処理方法

デノイズ処理は、パッチ分割、学習済みデノイズモデルによる画像処理、パッチ統合の3つの処理で実行される。デノイズモデルの学習は、Batsonらが提案した教師無し学習アプローチである Noise2Self<sup>18)</sup>を参考にして行った。デノイズモデルの学習フレームワークを図5に示す。学習用の入力画像パッチは、時系列その場観察像から、128 × 128 pixelsの画像パッチを無作為な位置から抽出して作成した。画像パッチの抽出はパッチ全体が固相と見做せる位置のみから行った。モデルアーキテクチャは、一般的な画像処理モデルに準じ、畳み込み層、ReLU活性化層、Max pooling層を含むエンコーダ部分と、畳み込み層、ReLU活性化層、逆畳み込み層から構成されるデコーダ部分から成る構造を採用した。

モデルパラメータの更新は、ランダムに設定した対象ピクセルにドーナツ型平滑化カーネルを適用して得られた輝度値と、出力画像の対象ピクセルにおける輝度値の差に基づく $L_2$ 損失によって行った。この時、対象ピクセル以外のデータは損失計算から除外した。この損失計算方法は、Noise2Selfの公式実装<sup>19)</sup>と同等である。

訓練データセットとバリデーションデータセットは、それぞれ各フレームの画像からランダムに5枚ずつ抽出された画像パッチで構築した。モデルパラメータの最適化には、AdamWアルゴリズム(重み減衰パラメータ： $10^{-5}$ 、学習率： $10^{-3}$ )を採用した。全1000回の訓練ステップの内、10ステップごとにバリデーションデータセットにおける $L_2$ 損失を評価し、最も小さい損失値となったモデルパラメータを学習結果とし、そのモデルパラメータを用いたモデルを学習済みデノイズモデルとして用いた。

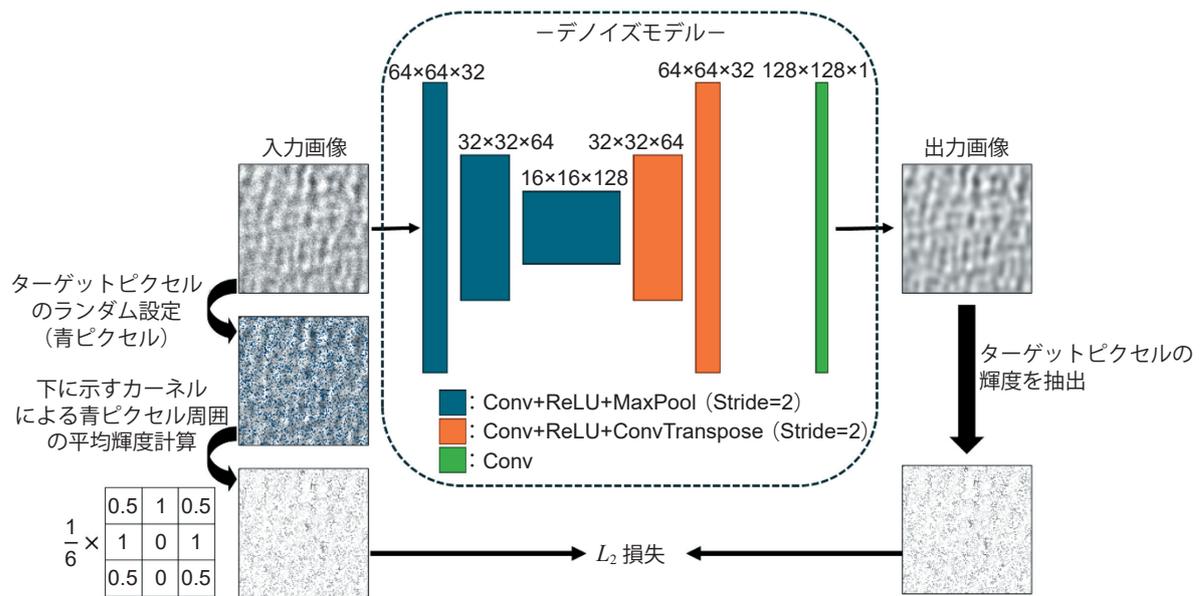


図5 デノイズモデルの学習フレームワーク<sup>1)</sup>

### 3.1.2 コントラスト補正処理方法

コントラスト補正処理もデノイズ処理と同様に、パッチ分割、学習済み機械学習モデルによる画像処理、パッチ統合の3つの処理で実行される。コントラスト補正用機械学習モデルの学習は、デノイズ処理を行った後の画像、すなわち図3中のデノイズ画像を対象として行った。コントラスト補正モデルの学習フレームワークを図6に示す。学習用入力画像パッチの取得方法、訓練データセットとバリデーションデータセットの構築方法は3.1.1に示した方法と同様にした。モデルアーキテクチャもデノイズ用モデルと同一である。

モデルパラメータの更新は、以下に示す損失関数 ( $loss_{cont}$ ) によって行った。

$$loss_{cont} = \frac{1}{n} \sum \{entr + (1 - SSIM)\} \quad (1)$$

ここで、 $entr$  は出力画像のエントロピー、 $SSIM$  は入出力画像パッチ間の Structural similarity index measure<sup>20)</sup>、 $n$  はデータセットのサンプル数である。式(1)の損失関数を用いることで、 $entr$ の減少による輝度ムラの低減と、

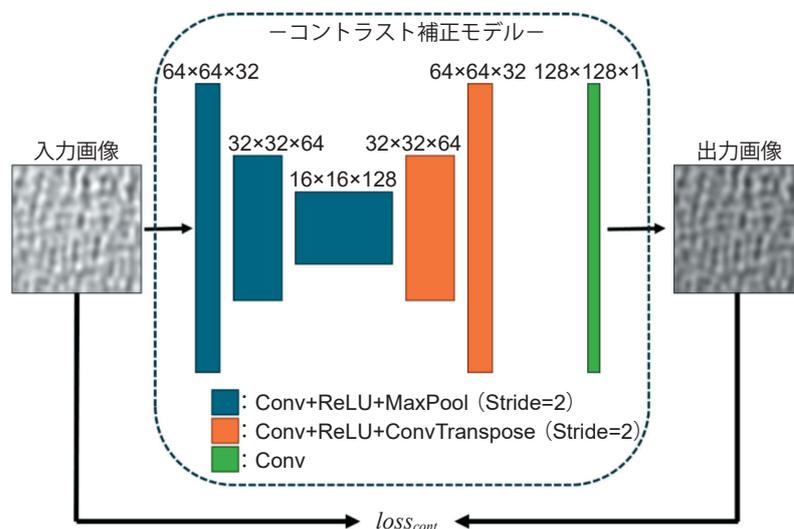


図6 コントラスト補正モデルの学習フレームワーク<sup>1)</sup>

SSIMの増加による入力画像パッチ構造の保持を両立した画像処理を達成するモデルが構築される。全1000回の訓練ステップの内、10ステップごとにバリデーションデータセットにおける $loss_{cont}$ を評価し、最も小さい損失値となったモデルパラメータを学習結果とし、そのモデルパラメータを用いたモデルを学習済みコントラスト補正モデルとして用いた。

### 3.1.3 TVL1 オプティカルフローにおけるパラメータ自動調整アルゴリズム

TVL1 オプティカルフローにおけるパラメータ自動調整は、コントラスト補正を行った後の画像、すなわち図3中のコントラスト補正処理画像を対象として行った。適正パラメータ探索のための入力画像パッチの取得方法は、3.1.1に示した方法と基本的には同様であるが、計算時間の制限から、各フレームの画像からランダムに1枚ずつ画像パッチを取得し、次のフレームの画像の同一位置の画像パッチへのオプティカルフローを計算した。

Zachらが述べている通り、TVL1 オプティカルフローの算出結果に最も大きな影響を及ぼすパラメータは、Attachment parameter  $\lambda$  である<sup>14)</sup>。このパラメータは、得られる変位場の滑らかさを制御するパラメータであり、評価対象画像に応じて調整すべきパラメータであるとされている。

開発手法では、この Attachment parameter の適正値を図7に示すフレームワークによって探索した。具体的には、順方向変位として時刻  $t$  から時刻  $t+1$  への各ピクセルの  $x$  方向変位、 $y$  方向変位をそれぞれ  $u_f, v_f$  として計算し、逆方向変位として時刻  $t+1$  から時刻  $t$  への各ピクセルの  $x$  方向変位  $y$  方向変位をそれぞれ  $u_b, v_b$  として計算する。そして、理想的な条件化では、 $u_f + u_b, v_f + v_b$  はそれぞれ0になることを踏まえ、以下の損失関数  $loss_{disp}$  を定義し、 $loss_{disp}$  をを最小にする適正 Attachment parameter を探索した。

$$loss_{disp} = \frac{1}{n} \sum \left[ \left\{ \frac{(u_f + u_b)^2}{u_f^2 + u_b^2} \right\} + \left\{ \frac{(v_f + v_b)^2}{v_f^2 + v_b^2} \right\} \right] \quad (2)$$

TVL1 オプティカルフローの計算には、pythonの画像処理ライブラリであるscikit-imageのoptical\_flow\_tv11関数<sup>21)</sup>を用いた。Attachment parameter以外のパラメータは固定値とし、(tightness = 0.3, num\_warp = 50, num\_iter = 10, prefilter = True)を設定した。適正 Attachment parameterの探索には、pythonの数値処理ライブラリであるScipyのminimize\_scalar関数<sup>22)</sup>を用いた。Attachment parameter  $\lambda = (0.1, 10)$ の範囲でBrentアルゴリズムにより、適正 Attachment parameterを決定した。

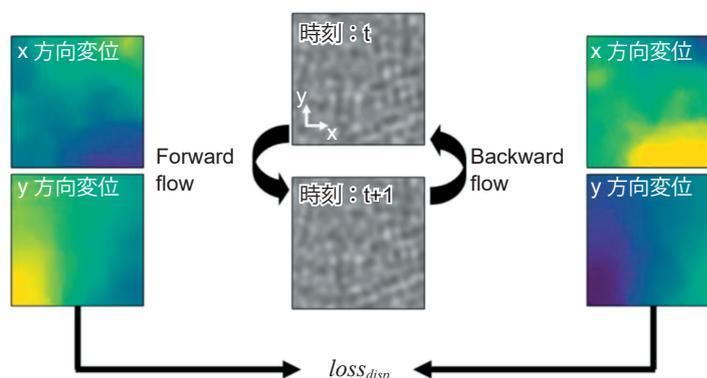


図7 TVL1 オプティカルフローパラメータの探索フレームワーク<sup>1)</sup>

### 3.1.4 ひずみ場の計算手法

ひずみ計算は図3下段のパッチ統合まで実施して得られる、フレーム毎の変位場を対象として行った。具体的には、まず、フレーム毎の変位場を用いて、初期画像から各フレームまでの総変位量を求め、総変位量から各フレームのひずみ場を計算した。

総変位量の計算では、まず、初期画像（時刻  $t=0$ 、ひずみ 0 を仮定）の全ピクセル位置に節点を配置した。この時、画像の高さ方向ピクセル数を  $H$ 、幅方向ピクセル数を  $W$  とし、 $i$  行  $j$  列目の節点番号を  $ij$  とすると、 $ij$  番目の節点の初期  $x$  座標  $x_{ij}^0$  および  $y$  座標  $y_{ij}^0$  はそれぞれ、

$$x_{ij}^0 = j, y_{ij}^0 = i \quad (i=1, \dots, H, j=1, \dots, W) \quad (3)$$

となる。次に、時刻  $t$  におけるフレーム毎の  $x$  方向、 $y$  方向変位場  $u^t, v^t$  を用いて各節点の時刻  $t$  における  $x$  座標  $x_{ij}^t$  および  $y$  座標  $y_{ij}^t$  を、以下の式で計算した。

$$x_{ij}^t = x_{ij}^0 + \sum_{t=1}^t u^t(x_{ij}^t, y_{ij}^t), y_{ij}^t = y_{ij}^0 + \sum_{t=1}^t v^t(x_{ij}^t, y_{ij}^t) \quad (4)$$

ここで、非整数値の  $(x_{ij}^t, y_{ij}^t)$  における  $u^t, v^t$  は、3 次のスプライン関数による内挿により計算した  $x_{ij}^0, y_{ij}^0, x_{ij}^t, y_{ij}^t$  を用いることで、時刻 0 から  $t$  までの、 $x$  方向および  $y$  方向総変位量  $U^t, V^t$  は、以下の式で計算される。

$$U^t = x_{ij}^t - x_{ij}^0, V^t = y_{ij}^t - y_{ij}^0 \quad (5)$$

ひずみ場の計算では、以下の式により、時刻  $t$  における各節点の面内ひずみ  $(\varepsilon_{xx})_{ij}^t, (\varepsilon_{yy})_{ij}^t, (\varepsilon_{xy})_{ij}^t$  を求めた。

$$\varepsilon_{xx}^t = \frac{\partial U^t}{\partial x}, \varepsilon_{yy}^t = \frac{\partial V^t}{\partial y}, \varepsilon_{xy}^t = \frac{1}{2} \left\{ \frac{\partial U^t}{\partial y} + \frac{\partial V^t}{\partial x} \right\} \quad (6)$$

ここで、式中の偏微分は 5 点差分により計算した。固相-液相界面で区切られた領域間では、凝固後も変位の不連続が見られたため、領域を跨ぐ差分計算は行わず、片側差分を用いた。画像端部においても片側差分を用い、それ以外の領域は中心差分を用いた。

## 3.2 ひずみ挙動評価結果<sup>1)</sup>

図8に、図2に示したその場観察像に開発手法を適用して得られた面内ひずみ  $\varepsilon_{xx}, \varepsilon_{yy}, \varepsilon_{xy}$  の分布をコントラスト補正画像と併せて 2 フレーム毎 (40 ms 毎) に示す。図中の赤点線は、2 色法により得られた温度分布を参考に決定した各フレームの固液界面を示し、黒点線は前フレーム固液界面を示している。TVL1 オプティカルフローによる変位計算は、前フレームと現フレームのパッチ画像内の全域が固相と見なせる場合のみ行い、それ以外の領域は変位 0 を仮定している。そのため、パッチの取得領域が黒点線より下部 (溶接進行方向) の領域を含む場合、全てのひずみが 0 と計算される。

図8の結果から、凝固割れ発生部に大きな溶接線幅方向の引張ひずみ  $\varepsilon_{xx}$  が生じており、その値は 0.15 以上となっている。 $\varepsilon_{yy}$  および  $\varepsilon_{xy}$  については、 $\varepsilon_{xx}$  ほど顕著なひずみの集中は見られない。これは、凝固割れの開口方向が  $x$  方向 (溶接線幅方向) であるためである。またフレームカウント 4 内の青矩形領域は、その時点では顕著な凝固割れが生じていないが、その 2 フレーム後には凝固割れが発生している領域である。すなわち、青矩形領域内の  $\varepsilon_{xx}$  は、凝固割れが発生する直前のおおよそのひずみ値を表しており、その領域内平均は約 0.028 である。本研究で使用した合金と同様に、Cr および Ni 含有量の多いオーステナイト系ステンレス鋼の凝固割れ発生ひずみの下限値は約 0.02 ~ 0.09 と言われており<sup>2,23)</sup>、上記の平均ひずみ値は妥当な大きさであると考えられる。

以上の通り、開発ひずみ評価手法を用いて、高輝度放射光 X 線によるその場観察像から従来知見からみても妥当なひずみ分布を得ることができた。その上で、開発手法は時刻毎の全ピクセルのひずみが算出可能な手法であり、このような手法は現状では他になく、開発手法の意義は非常に高いといえる。

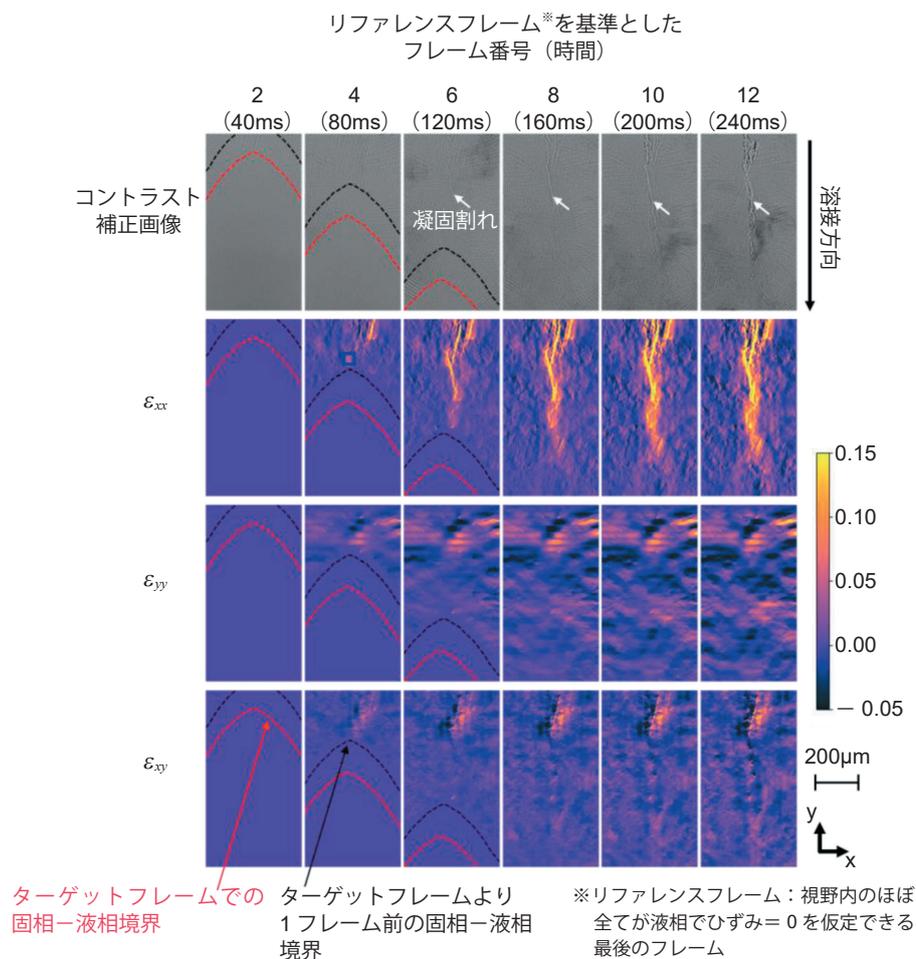


図8 ひずみ評価結果例 (左から右にむけて 40 ms ずつ時間が進行)<sup>1)</sup>

#### おわりに

本節では、高い時間分解能と空間分解能で材料状態を評価することが可能な高輝度放射光 X 線を活用した技術として、アーク溶接部凝固過程の組織形成過程やひずみ挙動を評価する手法について紹介した。今後、本節で紹介した技術を活用して、種々の材料におけるアーク溶接部の劣化や破壊現象に関して理解を深めるための研究を進めて行く予定である。

本節が、これから高輝度放射光 X 線を活用した金属材料研究を行う読者諸氏の参考になれば幸いである。

#### 謝辞

本研究は JSPS 科研費 JP24K01220 および JP23H01731 の助成を受けたものです。また、本節に示した成果を得るに当たり、物質・材料研究機構 吉中奎貴氏、澤口孝宏氏、大阪大学接合科学研究所 山下享介助教、青木祥宏特任講師、藤井英俊教授には試料の提供や共同での実験、有意義なご指摘を賜りました。ここに謝意を表します。

#### 文 献

- 1) Kitano H, Nagira T, Yoshinaka F, et al. Development of a method to evaluate strain in weld solidification using in-situ observations with high-brightness synchrotron X-rays. Science and Technology of Advanced Materials : Methods. 2024 ; 4 (1) : 2403964
- 2) Coniglio N, Cross CE. Initiation and growth mechanisms for weld solidification cracking. International Materials Reviews. 2013 ; 58 (7) : 375-397

- 3) Matsunawa A, Mizutani M, Katayama S, et al. Porosity formation mechanism and its prevention in laser welding. *Welding International*. 2003 ; 17 (6) : 431-437
- 4) Molak RM, Paradowski K, Brynk T, et al. Measurement of mechanical properties in a 316L stainless steel welded joint. *International Journal of Pressure Vessels and Piping*. 2009 ; 86 (1) : 43-47
- 5) Tweed JH, Knott JF. Micromechanisms of failure in C-Mn weld metals. *Acta Metallurgica*. 1987 ; 35 (7) : 1401-1414
- 6) Nagira T, Nakamura T, Yoshinaka F, et al. Direct observation of solidification behaviors of Fe-Mn-Si alloys during TIG spot welding using synchrotron X-ray. *Scripta Materialia*. 2022 ; 216 : 114743
- 7) Nagira T, Yamashita D, Kamai M, et al. Time-resolved X-ray imaging of solidification cracking for Al-Cu alloy at the weld crater. *Materials Characterization*. 2020 ; 167 : 110469
- 8) Nagira T, Yamashita D, Kamai M, et al. In situ observation of solidification crack propagation for type 310S and 316L stainless steels during TIG welding using synchrotron X-ray imaging. *Journal of Materials Science*. 2021 ; 56 (17) : 10653-10663
- 9) Nagashima N, Yoshinaka F, Sawaguchi T. Study on Extremely-Low-Cycle Fatigue of Fe-15Mn-10Cr-8Ni-4Si Alloy. *MATERIALS TRANSACTIONS*. 2023 ; 64 (2) : 548-554
- 10) Nagira T, Nakamura T, Sawaguchi T, et al. Friction Stir Welding of Fe-15Mn-10Cr-8Ni-4Si Seismic Damping Alloy. *ISIJ International*. 2023 ; 63 (12) : 2056-2065
- 11) Sawaguchi T, Tomota Y, Yoshinaka F, et al. Evidence supporting reversible martensitic transformation under cyclic loading on Fe-Mn-Si-Al alloys using in situ neutron diffraction. *Acta Materialia*. 2023 ; 242 : 118494
- 12) Yoshinaka F, Sawaguchi T, Takamori S, et al. Transformation-induced plasticity via  $\gamma \rightarrow \epsilon \rightarrow \alpha'$  and  $\gamma \rightarrow \epsilon \rightarrow \gamma$  martensitic transformations in Fe-15Mn-10Cr-8Ni-4Si alloy. *Materials Science and Engineering : A*. 2022 ; 833 : 142583
- 13) Wedel A, Pock T, Zach C, et al., editors. *An Improved Algorithm for TV-L1 Optical Flow. Statistical and Geometrical Approaches to Visual Motion Analysis* ; 2009 2009//; Berlin, Heidelberg : Springer Berlin Heidelberg
- 14) Zach C, Pock T, Bischof H, editors. *A Duality Based Approach for Realtime TV-L1 Optical Flow. Pattern Recognition* ; 2007 2007//; Berlin, Heidelberg : Springer Berlin Heidelberg
- 15) Tomasi C, Manduchi R, editors. *Bilateral filtering for gray and color images. Sixth International Conference on Computer Vision (IEEE Cat. No. 98CH36271)* ; 1998 7-7 Jan. 1998
- 16) Pizer SM, Amburn EP, Austin JD, et al. Adaptive histogram equalization and its variations. *Computer Vision, Graphics, and Image Processing*. 1987 ; 39 (3) : 355-368
- 17) Pan B. Recent progress in digital image correlation. *Experimental mechanics*. 2011 ; 51 : 1223-1235
- 18) Batson J, Royer L, editors. *Noise2self : Blind denoising by self-supervision* 2019 : PMLR
- 19) Noise2Self : Blind Denoising by Self-Supervision. Available from : <https://github.com/czbiohub-sf/noise2self>
- 20) Zhou W, Bovik AC, Sheikh HR, et al. Image quality assessment : from error visibility to structural similarity. *IEEE Transactions on Image Processing*. 2004 ; 13 (4) : 600-612
- 21) `skimage.registration.optical_flow_tv11`. Available from : [https://scikit-image.org/docs/stable/api/skimage.registration.html#skimage.registration.optical\\_flow\\_tv11](https://scikit-image.org/docs/stable/api/skimage.registration.html#skimage.registration.optical_flow_tv11)
- 22) `scipy.optimize.minimize_scalar`. Available from : [https://docs.scipy.org/doc/scipy/reference/generated/scipy.optimize.minimize\\_scalar.html](https://docs.scipy.org/doc/scipy/reference/generated/scipy.optimize.minimize_scalar.html)
- 23) Matsuda F, Nakagawa H, Nakata K, et al. Quantitative Evaluation of Solidification Brittleness of Weld Metal during Solidification by Means of In-Situ Observation and Measurement (Report I : Development of the MISO Technique (Materials, Metallurgy & Weldability). *Trans JWRI*. 1983 ; 12 (1) : 65-72