



## 実験室 X 線を用いた中性子照射模擬材の熱回復挙動その場観察に基づく熱回復幅推定法に関する一考察

A Discussion about Thermal Recovery Zone Estimation Based on Lab X-ray In-situ Observation of Thermal Recovery Behavior of Neutron Irradiation-Simulated Materials

大阪大学大学院工学研究科	天谷 元紀	Motoki AMAYA	Student Member
大阪大学大学院工学研究科	岡野 成威	Shigetaka OKANO	Member
橋本鉄工株式会社	橋本 匡史	Tadafumi HASHIMOTO	Member
関西電力株式会社	日下 浩作	Kousaku KUSAKA	Member
関西電力株式会社	平野 伸朗	Shinro HIRANO	Member
関西電力株式会社	千種 直樹	Naoki CHIGUSA	Member
大阪大学大学院工学研究科	望月 正人	Masahito MOCHIZUKI	Member

In this study, a lab X-ray in-situ measurement technique was applied to quantify variation in Full Width at Half Maximum (FWHM) of pre-strained low alloy steels under high temperature environments. The pre-strain was introduced for simulating neutron irradiation-induced hardening of materials. The variation behavior of FWHM under high temperature environments can be substituted for thermal recovery behavior of materials. From the observation results, time-dependent thermal recovery behavior of materials was formulated from the Jonson-Mehl kinetic equation to estimate it assuming the welding thermal cycles. It can be considered from the estimation results that thermal recovery behavior due to welding thermal cycles is strongly influenced by highest temperature. The welding experiment was then performed to confirm the highest temperature-dependent thermal recovery behavior estimation. Based on the dependence of thermal recovery behavior on highest temperature, a welding procedure optimization guideline for reproduction of the Charpy impact specimen was derived from welding thermal conduction theory.

**Keywords:** Thermal Recovery, In-situ Measurement Technique, Full Width at Half Maximum, Vickers Hardness, Welding

### 1. 緒言

我が国では、1970年代に建設され運転開始から長期間を経過している原子力発電所もあり、材料の経年変化を考慮した安全性の確保と適切な運転管理が求められている[1]。材料の経年劣化には様々な事象が知られているが、原子炉圧力容器に用いられる低合金鋼における中性子照射脆化は、原子力発電プラントの構造健全性を評価する上で極めて重要な事象の1つである。この低合金鋼の中性子照射脆化の把握には監視試験片を用いた破壊試験による評価が行われている。これらの監視試験片は原子炉の運転開始時に装荷されており、運転開始当初に想定されていた40年の評価期間を超え、原子力規制委員会の認

可を受けた60年間の運転期間を想定した場合には、装荷された監視試験片の不足が生じることが懸念されている。

そこで、シャルピー衝撃試験などの破壊試験に使用した後の試験片の残材（試験による影響がない部分）をインサート材として利用し、中性子照射を受けていないタブ材と接合して試験片を再生する方法が提案されている[2]。その際、溶接・接合時に生じる熱サイクルに起因した材質変化（熱影響による硬化や熱回復による軟化）が再生試験片を用いた試験の信頼性に影響を及ぼしてはならない。このような観点から、試験片再生時の標準接合法や標準接合条件における熱影響（硬化）・熱回復（軟化）領域の寸法が定量化されており、熱回復パラメータによる熱回復幅の推定方法が規定されている[2]。しかしながら、ファイバーレーザ溶接などの高エネルギー密度熱源を用いた高品質な接合方法の発展や溶接・接合プロセス制御技術の高度化を踏まえると、熱回復幅推定法の再検証や更なる高度化も望まれるところである。

連絡先:岡野成威

大阪大学大学院工学研究科マテリアル生産科学専攻  
〒565-0871 大阪府吹田市山田丘 2-1

E-mail: okano@mapse.eng.osaka-u.ac.jp

本報では、予ひずみを付与して原子炉の中性子照射による硬化を模擬した低合金製試験片を対象として、実験室 X 線を用いた高温その場測定技術（以後、その場測定技術）を活用した熱回復挙動の詳細な観察を行い、熱回復パラメータによる熱回復挙動の推定方法の有用性を改めて確認するとともに、溶接熱サイクルを想定した熱回復挙動の推定方法の高度化について考察する。なお、金属材料の照射脆化は、中性子照射によって生じる空孔と格子間原子の拡散や、それらと溶質原子の相互作用を通じておこるマイクロな組織変化およびマイクロな組成変化が原因であるため、空孔と格子間原子の拡散による熱回復挙動を模擬する上で、中性子照射模擬材として予ひずみ材を用いることに大きな問題はないと考えられる。

## 2. 熱回復挙動の観察試験方法・条件

### 2.1 供試材料および試験片形状・寸法

供試材料は Mo-Mn-Ni 系低合金鋼 SQV2A であり、その化学組成と機械的性質を Table 1 と Table 2 に示す。引張試験は、JIS Z 2241:2011「金属引張試験方法」に基づいて実施した。初期の公称ひずみ速度を  $0.0005 \text{ s}^{-1}$  とした一定のクロスヘッド変位速度で、標点間距離を 60 mm とし公称ひずみが 1、3、5、10% となるまでひずみを付与し、除荷した。なお、予ひずみ未付与材用の 1 枚を除き、1% 予ひずみ材用に 3 枚、3% 予ひずみ材用に 3 枚、5% 予ひずみ材用に 4 枚、10% 予ひずみ材用に 4 枚の計 14 枚の引張試験片に対して予ひずみを付与した。X 線測定用試験片は、Fig. 1 に示すように、引張試験後に標点間距離内から 2 枚切り出した。また、予ひずみ未付与材についても予ひずみ付与材と同じ大きさに切り出した。各試験片に対して X 線照射領域における表面加工層を除去するため、Fig. 1 に示す範囲に 5% 過塩素酸メタノール溶液を攪拌・冷却しながら 1.5 A の電流で 10 分間の電解研磨を施した。

Table 1 Chemical composition of SQV2A (wt%)

C	Si	Mn	Ni	P	Cr
0.12	0.26	1.43	0.53	0.006	0.01
S	Ca	Mo	Al	Fe	
0.002	0.02	0.51	0.038	Bal.	

Table 2 Mechanical properties of SQV2A (wt%)

Yield stress (MPa)	Tensile strength (MPa)	Elongation (%)
540	638	25

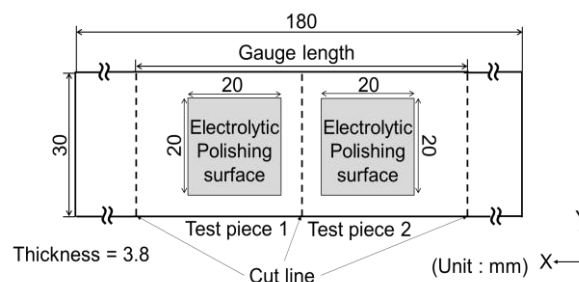


Fig. 1 Preparation of test piece to be measured by X-rays

### 2.2 等温保持中の熱回復挙動の観察試験

前節で作製した試験片に対して、実験室 X 線高温その場測定技術を活用し、等温保持中の半価幅の変化挙動を測定した。半価幅は結晶のマイクロひずみ（塑性ひずみ）に対応するため[7,8]、半価幅の変化挙動を捉えることで、材料に導入された転位によるマイクロひずみの消失挙動、すなわち、熱回復に伴う軟化挙動を把握することが可能である。実験室 X 線高温その場測定には、Rigaku 社製の MSF/PSPC を使用し、測定条件は Table 3 に示す通りである。なお、実験室 X 線高温その場測定技術の詳細に関しては既報[9]に示されている。等温保持試験の条件を Table 4 に示す。Fig. 2 に示すように、昇温速度  $1800 \text{ }^\circ\text{C/h}$  で所定の温度まで昇温し、所定温度に到達した時間を 0 s とし、 $t=0, 300, 600, 900, 1200, 1500, 1800, 2400, 3600 \text{ s}$  に達した時点（図中の各プロットの時点）で近接する 3 つの  $\psi$  角で半価幅を迅速に測定し、その平均値を測定値とした。また、昇温前の室温（ $20 \text{ }^\circ\text{C}$  程度）および測定終了後に室温まで冷却した状態でも同様に半価幅を測定した。加えて、等温保持試験終了後の各試験片と試験未実施の試験片に対してビッカース硬さ試験を、荷重 1gf で保持時間 15 秒として実施し、24 回の測定値から大小 2 点ずつ除去した計 20 回の平均値を測定値とした。

Table 3 X-ray measurement conditions

Apparatus	MSF/PSPC (Rigaku)
Method of X-ray incident	$\Omega$ -diffraction method
Scanning method	Fixed $\psi_0$ method
Wave length (nm)	0.22910 (CrK $\alpha$ )
Power (kV, mA)	30, 10
Diffraction angle ( $^\circ$ )	150.648 - 155.845
Diffraction plane	{211}
Measuring time (s)	60
$\psi$ angle ( $^\circ$ )	0, 0.1, 0.2
Peak search method	FWHM midpoint method

Table 4 Conditions in isothermal holding test

Holding temperature (°C)	Prestrain level (%)			
	1	3	5	10
300	—	—	—	○
350	—	—	—	○
400	—	○	○	○
500	—	○	○	○
600	○	○	○	○

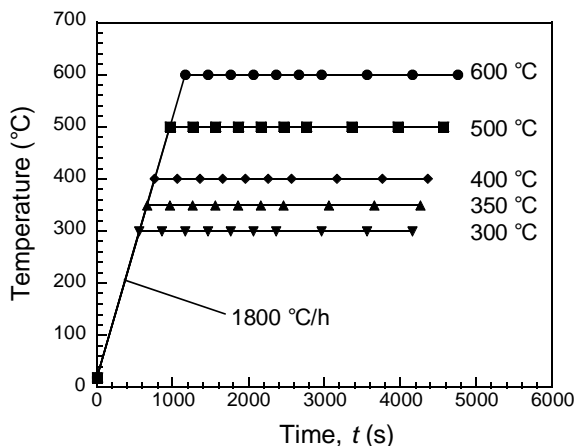


Fig. 2 Temperature profiles in isothermal holding test

### 3. 熱回復挙動の観察実験結果・考察

#### 3.1 熱回復パラメータの有用性確認

中性子照射をうけて硬化・脆化した金属材料の再生接合時に熱回復が生じる領域を推定するための指標として、熱回復パラメータが定義されている[3]。再生接合時のインサート部の温度履歴  $T$  (K) を熱伝導解析や実測により求めることで、式(1)により算出することができる。

$$\theta(y) = \log \left[ \int_{t_1}^{t_2} \exp \left\{ -\frac{E}{\kappa T(y, t)} \right\} dt \right] \quad (1)$$

ここで、 $y$  : 接合面からの距離 (mm)、 $t$  : 時間(s)、 $t_1$  : 温度が照射温度(290 °C)を超え始める時刻、 $t_2$  : 温度が照射温度(290 °C)を下回り始める時刻、 $\kappa$  : ガス定数 ( $0.86184 \times 10^4$  eV/K)、 $E$  : 熱回復の活性化エネルギーの計測値(2.77 eV)である。なお、熱回復が生じ始める熱回復パラメータの値は-42 とされている[3]。本検討で実施した1時間の等温保持試験における熱回復パラメータを式(1)により算出し、ビッカース硬さの測定値との関係を整理して Fig. 3 に示す。従来知見と同様に、熱回復パラメータがおよそ-42 よりも大きくなると硬さが低下していく傾向

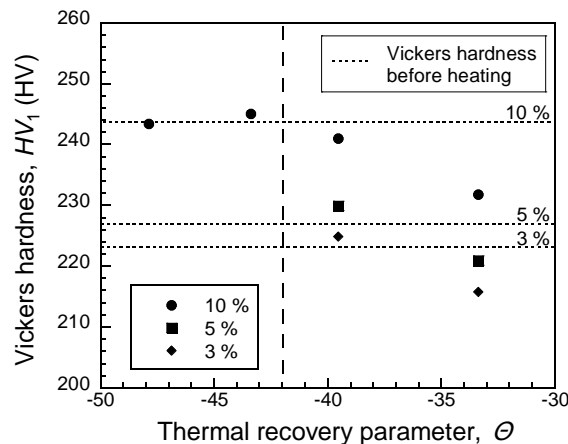


Fig. 3 Relationship between measured Vickers hardness and thermal recovery parameter

が見られ、熱回復パラメータの有用性が確認できる。

#### 3.2 等温保持中の熱回復挙動の X 線的評価

実験室 X 線高温その場測定技術を活用した熱回復挙動の観察に際して、まず、熱回復挙動を半価幅の変化挙動として捉えることの有用性を確認する。等温保持試験未実施および実施済の全ての試験片に対し、ビッカース硬さと半価幅の相関を確認した結果を Fig. 4 に示す。等温保持試験の有無や保持温度の違い、予ひずみ付与量に関わらず、半価幅とビッカース硬さには強い相関が見られ、半価幅と硬さを対応付けられることが示唆される。

続いて、等温保持試験中の半価幅の変化挙動を測定した結果の一例を Fig. 5 に示す。ここでは 10% 予ひずみ材の結果を示している。なお、所定温度に達した時点をも  $t=0$  としている。本図より、昇温前 (20 °C) から所定の温度まで昇温した際に半価幅が大きく低下しており、温度変

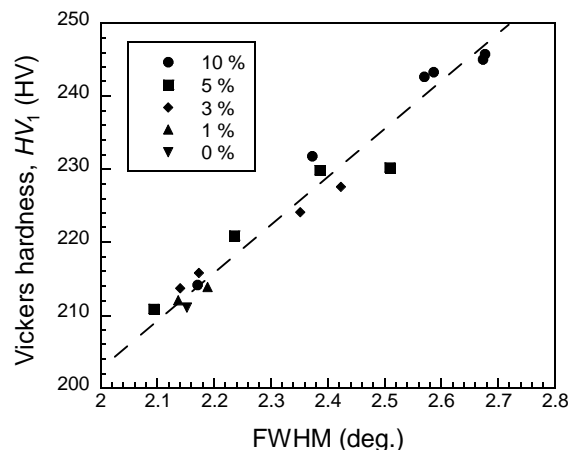


Fig. 4 Relationship between Vickers hardness and FWHM

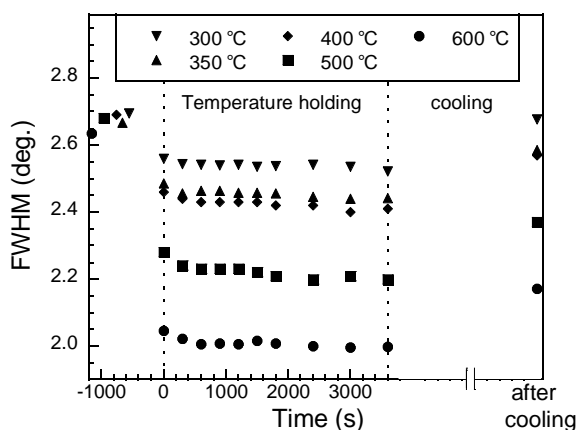


Fig. 5 Variation in FWHM during isothermal holding test (Prestrain level : 10%)

化に起因した半価幅の変化が確認できる。その後、等温保持中に徐々に半価幅が低下した後、試験終了後に室温まで冷却する過程で半価幅は大きくなる傾向が確認できる。ここで、昇温・降温時の半価幅の変化挙動の原因を調査するために、予ひずみを付与していない試験片を用いて同様に連続昇温試験を行った結果、昇温に伴って半価幅が減少し、室温まで冷却した際には昇温前の値に戻ることが確認できた。そのため、ここで見られた昇温・降温に伴う半価幅の変化は装置に依存する特性（装置関数）といえる。予ひずみ材では、これらの温度に応じた変化を除いても、等温保持試験終了後に室温まで冷却した際の半価幅は試験前とは異なっており、昇温温度が高いほど小さい値となっていることが確認できた。これにより、昇温温度が高いほど温度保持中に熱回復に伴う軟化（マイクロひずみの消失による半価幅の低下）が大きく生じたことが示唆される。

以上のように、実験室 X 線高温その場測定技術を活用することで、高温に保持した状態での半価幅の経時変化挙動、すなわち、熱回復挙動を把握することができたといえる。

### 3.3 熱回復挙動の速度論的評価

溶接熱サイクルのような短時間の熱サイクル過程での半価幅の変化挙動の推定に向けて、前節で得られた等温保持中の半価幅の変化挙動に対して速度論的評価を試みる。

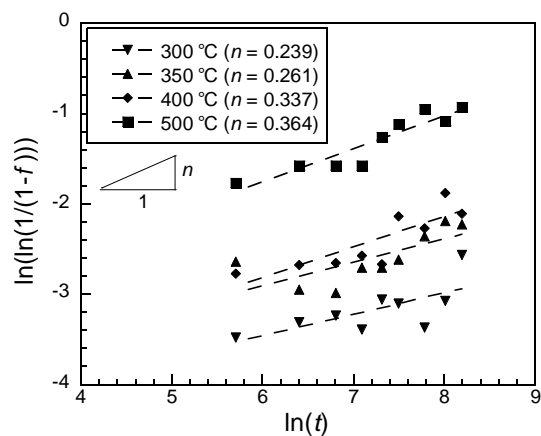


Fig. 6 Johnson-Mehl plot (prestrain level : 10%)

まず、半価幅の低下挙動を定量化する上で、半価幅の低下率 $f_{FWHM}$ を以下の式(2)のように定義する。

$$f_{FWHT} = \frac{FWHT_{\text{before}} - FWHT_{\text{aged}}}{FWHT_{\text{before}} - FWHT_{\text{after}}} \quad (2)$$

ここで、 $f_{FWHM}$ ：半価幅低下率、 $FWHM_{\text{aged}}$ ：各温度における半価幅の測定値、 $FWHM_{\text{before}}$ ：各所定の温度まで昇温させた直後( $t=0$ )の半価幅、 $FWHM_{\text{after}}$ ：予ひずみ未付与材における各所定温度での半価幅である。なお、ここでの評価は高温状態において温度一定で時間経過させた場合に熱回復挙動が徐々に進行する仮定に基づいている。半価幅低下率 $f_{FWHM}$ がJohnson-Mehl型の速度式[10]に従うものとする、以下の式(3)が得られる。

$$\ln \left\{ \ln \left( \frac{1}{1-f_{FWHT}} \right) \right\} = n \ln K + n \ln t \quad (3)$$

ここで、 $K$ ：速度定数 ( $s^{-1}$ )、 $t$ ：時間 (s)、 $n$ ：アブラミ指数である。式(3)に基づいて、各予ひずみ付与試験片の半価幅低下率 $f_{FWHM}$ のJohnson-Mehl型プロットを行った。ここでは10%予ひずみ材の結果を一例として示しているが、半価幅の低下率はどの温度においても比較的直線的に変化しており、速度論的評価が可能であることが確認できている。

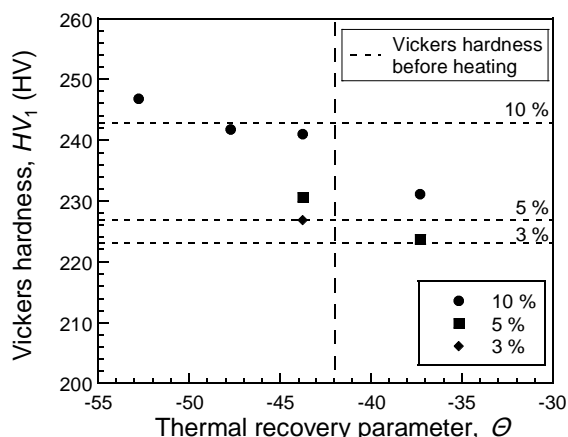
### 3.4 溶接熱サイクルを想定した熱回復挙動の推定

前節で示した熱回復挙動の速度論的評価に基づいて、溶接熱サイクルのような短時間の熱サイクル過程での熱回復挙動の推定方法を検討する。今後の監視試験片再生に適用が想定されるレーザ溶接や電子ビーム溶接などの低入熱・高エネルギー密度熱源を用いた溶接・接合プロセスでは、最高到達温度に到達し冷却過程に入るまでの時間は極めて短く1秒に満たない場合も多いと想定され



**Table 5** Decrease rate of FWHM estimated

Holding temperature (°C)	$f_{FWHM}$		
	3 %	5 %	10 %
300	—	—	0.007
350	—	—	0.011
400	0.005	0.009	0.008
500	—	0.014	0.020



**Fig. 7** Relationship between Vickers hardness estimated and thermal recovery parameter

る。そこで、最高到達温度での保持時間を安全側に 1 秒と見積もり、Fig. 6 に示した Johnson-Mehl プロットから各保持温度で 1 秒保持した際の半価幅の低下率を求める。各予ひずみ付与試験片に対する結果を Table 5 に示す。10% 予ひずみ材の保持温度が 400 °C の際に傾向にずれが見られるものの、全体的には保持温度が高いほど半価幅の低下率が大きくなる傾向が確認できる。

続いて、半価幅とビッカース硬さの関係 (Fig. 4) に基づいて半価幅の低下率からビッカース硬さを推定し、熱回復パラメータの計算値との関係を求めて Fig. 7 に示す。図より、熱回復パラメータがおよそ -42 を境に硬さの低下が生じ始めていることが改めて確認できる。なお、熱回復パラメータを計算する際、昇温速度と冷却速度は共に 1800 °C/h としたが、これらを 0.5、2 倍にしても熱回復パラメータの計算値に与える影響はここで得られた関係性にほとんど影響しない程度であることを確認している。言い換えれば、溶接施工時の急峻な溶接熱サイクルを想定した場合、熱回復挙動には最高到達温度の影響が支配的となることが想定される。

ここで、溶接熱サイクルを想定して、昇温速度と冷却速度を共に無限大と仮定し 1 秒間の温度保持のみを考慮

して熱回復パラメータが -42 となる保持温度を算出すると 480 °C 程度であった。従来、熱回復パラメータを算出するには熱履歴を取得して式(1)による計算が必要であるが、急峻な熱サイクルを生じる溶接を想定した場合、最高到達温度のみから熱回復挙動をより簡易に推定できる可能性が示唆された。

#### 4. 中性子照射模擬材に対する溶接による検証

前章で示唆された溶接熱サイクル中の最高到達温度と熱回復挙動の対応関係について、溶接実験ならびにその数値シミュレーションによって検証する。

##### 4.1 溶接方法・条件

10% 予ひずみ付与試験片を対象として、その標点間距離内から Fig. 8 に示す寸法の溶接用試験片を切り出した。板長 65 mm の中央 50 mm の範囲に、点 O から x 軸正方向へ TIG アークによるメルトラン溶接を施した。ここで、レーザ溶接ではなくアーク溶接を採用したのは、熱影響および熱回復の両領域をより大きく生じさせることができ、検証の観点から適していると考えたためである。試験片の板厚を考慮して、溶接入熱条件は、溶接速度  $v$  を 5 mm/s、溶接電流  $I$  を 75 A、アーク長を 3 mm、突き出し長さを 5 mm とし、シールドガスには流量 15 l/min の Ar ガスを用いた。

溶接実験を模擬した数値シミュレーションには、ABAQUS/Standard Ver. 6.13-4 を使用した。実験と同じ寸法の平板を解析対象とし、解析モデルには Fig. 9 に示す SQV2A を想定した材料特性を与えた。初期温度を 27 °C とし、境界条件として空気との熱伝達 (雰囲気温度 27 °C、熱伝達率 25 W/m<sup>2</sup>K) とステファン-ボルツマン則に従った熱放射 (熱放射率 0.4) を考慮している。TIG アーク溶接を模擬した熱源モデルには、高精度な溶接温度場シミュレーションが可能であるガウス分布を有する表面熱源モデル[13]を採用した。実験における溶接入熱条件に対応させて、熱源の強さ  $q=617.5$  J/s、ガウス分布半径  $R=2.625$  mm のガウス分布とした。入熱領域のメッシュを十分に細かくするため、xy 平面を一辺が 0.5 mm の正方形にメッシュ分割し、z 方向には等間隔に 12 分割した。

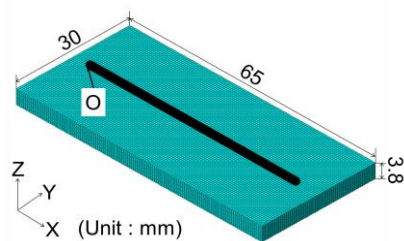


Fig. 8 Configuration of test specimen to be welded

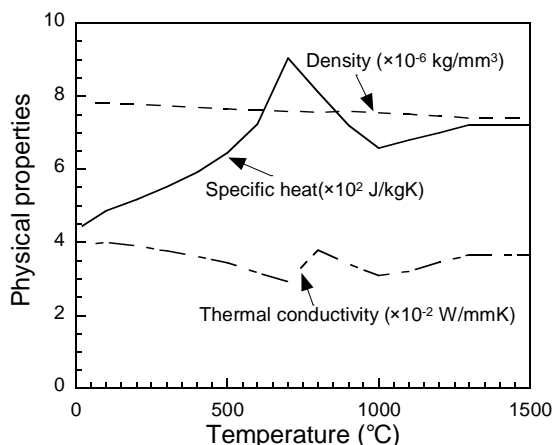


Fig. 9 Material properties with temperature dependency

#### 4.2 溶接部の硬さと最高到達温度の分布特性比較

予ひずみ付与試験片にメルトラン溶接を施した後の試験片中央の板厚断面において、硬さ分布を実験的に取得するとともに、数値シミュレーションを活用して最高到達温度分布を解析し、それらの関係を比較考察する。

溶接後の試験片中央の板厚断面において、Fig. 10 に示すように、4つの評価線を設定した。なお、これら4つの評価線は、最高到達温度がSQV2A鋼の変態点付近となる位置での硬さ分布を調査できるように設定した[12]。これら4つの評価線上での硬さ分布と最高到達温度分布の評価結果を纏めてFig. 11(a)、Fig. 11(b)にそれぞれ示す。溶接位置から近い位置では最高到達温度が高く、熱影響による硬化や熱回復に伴う軟化が示唆される箇所も見られる。そこで、これら4つの評価線上の全ての評価位置での硬さと最高到達温度の対応関係を整理した結果をFig. 12に示す。ここで、最高到達温度が300°C以下で熱回復が生じないことは既に確認できているので、安全側の評価として最高到達温度が260°C以下の領域を母材とみなし、この領域の100点に対して平均値と標準偏差を求めた。そして、300°C以上の温度域で判定値(平均値から標準偏差の2倍を差し引いたもの)を下回る点が連続で確認された場合、熱回復が生じたと判定することとし

た。これにより得られた熱回復が生じ始める最高到達温度は493°Cとなり、前章の実験で得られた480°C程度とおおよしく一致することが確認できた。

以上のように、溶接熱サイクルを想定した場合、熱回復パラメータを必ずしも計算せずとも、最高到達温度によって熱回復挙動を簡易に推定できる可能性が示された。

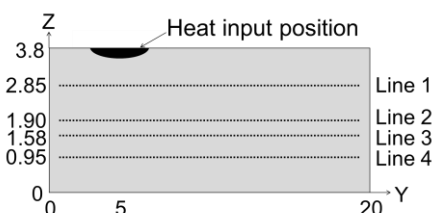
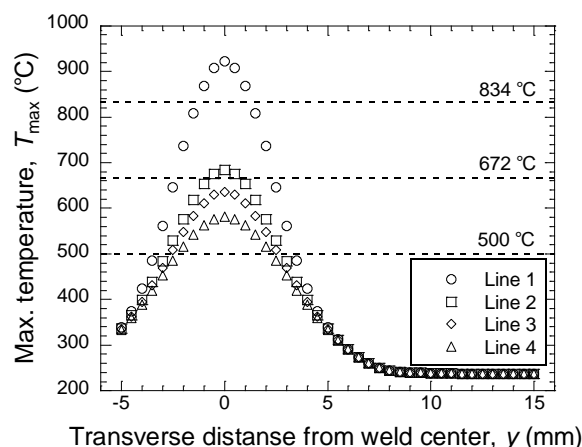
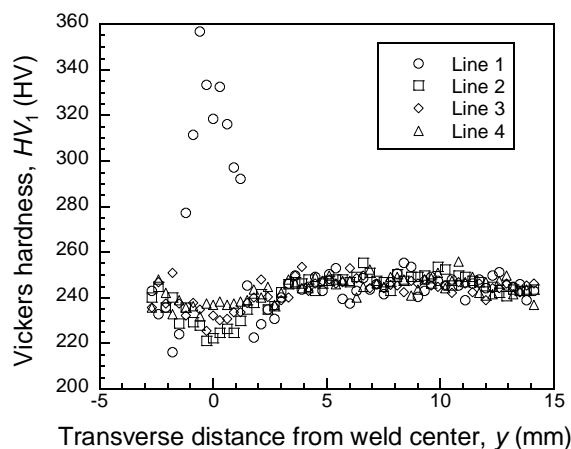


Fig. 10 Positions for evaluating temperature profiles and hardness



(a) Maximum temperature distribution



(b) Vickers hardness distribution

Fig. 11 Distributions of maximum temperature and hardness on weld cross-section

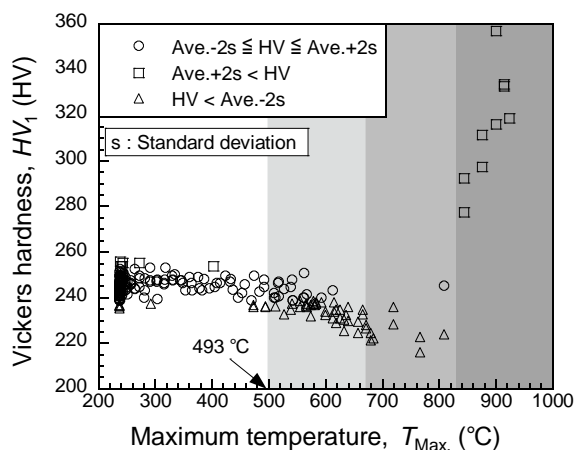


Fig. 12 Relationship between Vickers hardness and maximum temperature

### 4.3 貫通溶接を想定した熱回復幅縮小のための施工条件範囲に関する一考察

以上で得られた知見を踏まえて、今後の適用が想定されるファイバーレーザーや電子ビームなどを用いた 1 パス貫通溶接を前提として、現状の標準接合法・条件と比較して熱影響・熱回復幅を縮小できる施工条件範囲に関して考察を行う。

再生溶接の熱伝導シミュレーションのモデルを Fig. 13 に示す。溶接入熱条件に応じて熱回復寸法評価に必要なモデル寸法 (Y 方向) は変化するため、ここではシャルピー衝撃試験片と同じ寸法で固定することとした。なお、今回の溶接入熱条件範囲では、熱反射などの影響を安全側に考慮しても、最大で 15 mm 程度以上あれば評価結果に影響は及ぼさないといえる。使用した材料特性は前節と同様であり、本検討で想定したレーザー溶接条件は Fig. 14 内に示す 6 条件とした。なお、入熱径は全て 0.01 mm である。この全 6 条件について、試験片中央断面で対称面から幅方向に最高到達温度分布を取得するとともに、熱サイクルから熱回復パラメータを算出し、両者の関係を整理した結果を Fig. 14 に示す。さまざまなレーザー溶接条件において最高到達温度と熱回復パラメータの関係はおおよそ 1 本の曲線で統一的に整理されており、最高到達温度と熱回復パラメータが対応することが改めて確認できる。なお、本関係に基づいて、熱回復が生じ始める熱回復パラメータの閾値である -42 に対応する最高到達温度を求めた結果、前章および前節で得られた結果とおおよそ良く一致する 500 °C 程度と見積もられた。

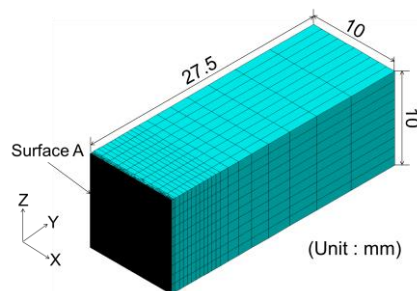


Fig. 13 1/2 symmetric model used in FE analysis

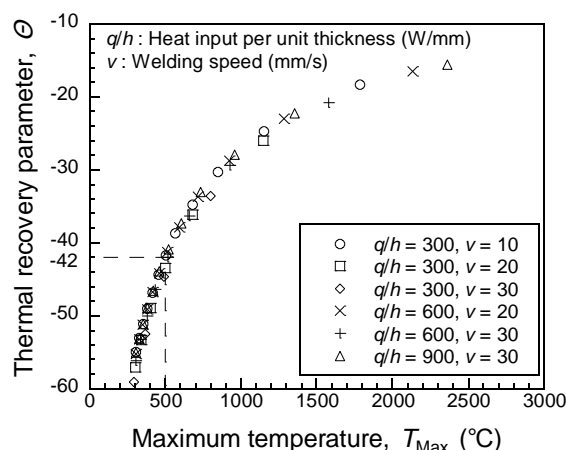


Fig. 14 Relationship between maximum temperature and thermal recovery parameter

そこで、貫通溶接を想定して最高到達温度分布と溶接入熱条件の関係の定量的評価を試みる。移動線熱源を近似的に瞬間平面熱源として扱った際の温度上昇式から最高到達温度を求める式(4)は以下のように表される[14]。

$$T_{MAX} - T_0 = \frac{1}{\sqrt{2\pi e}} \cdot \frac{1}{c\rho} \cdot \frac{q/v}{hy} \quad (4)$$

ただし、 $T_0$  : 初期温度、 $q$  : 単位時間当りに与えられる入熱量 (J/s)、 $v$  : 溶接速度 (mm/s)、 $c$  : 比熱 (J/g K)、 $\rho$  : 密度 (g/mm<sup>3</sup>)、 $h$  : 板厚 (mm)、 $y$  : 熱源中心からの板幅方向位置 (mm) である。本式より、最高到達温度はパラメータ  $hy/(q/v)$  と反比例の関係にあるといえる。実際、数値シミュレーション結果を整理した Fig. 15 に示す関係から分かるように、レーザー溶接条件に関わらず、最高到達温度はパラメータ  $hy/(q/v)$  と反比例の関係にある。ここで、最高到達温度が 500 °C 程度に達しないことと対応させると、熱回復が生じない条件は  $hy/(q/v) \geq 0.1$  であるといえる。既往研究[3]によると、YAG レーザ溶接を用いた標準接合条件 (2 パス接合) では、熱回復幅は溶接面から片側 2.5 mm であるとされている。本図より、標準接合条件 ( $y=2.5$  mm) よりも熱回復幅を縮小できる条件は、シャ

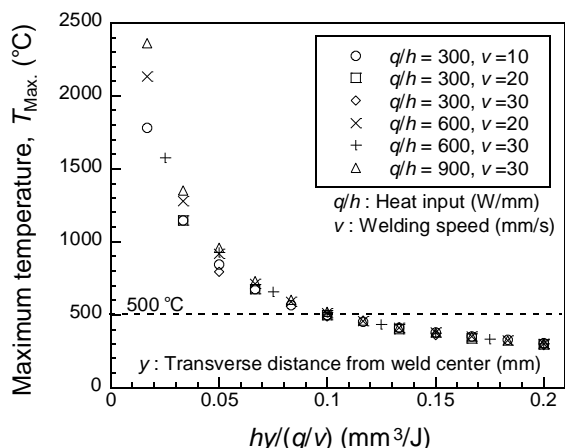


Fig. 15 Relationship between maximum temperature and parameter of  $hy/(qv)$

ルピー衝撃試験片の厚さが 10 mm であることを考慮すると、 $qv \leq 250$  (J/mm) であるといえる。以上のように、今後の適用が想定されるファイバーレーザや電子ビームなどを用いた 1 パス貫通溶接を想定して、現状の標準接合法・条件と比較して熱回復幅を縮小できる条件範囲に関する 1 つの設定指針を得ることができた。

## 5. 結言

予ひずみを付与して中性子照射による硬化を模擬した圧力容器用鋼材を対象に、実験室 X 線高温その場測定技術による熱回復挙動の観察とそれに基づく溶接熱サイクルにおける熱回復挙動の推定方法について考察した。以下に、得られた結論を示す。

1. 実験室 X 線高温その場測定技術を活用し、硬さと相関のある半価幅を測定することで、熱回復挙動に対応する半価幅の経時変化挙動を定量化した。
2. 半価幅の経時変化挙動の速度論的評価に基づいて、溶接熱サイクルのような短時間の熱サイクル過程での熱回復挙動を推定する方法を提案した。
3. 溶接熱サイクルを前提とした場合、熱サイクルパラメータを必ずしも計算せずとも、最高到達温度によって熱回復挙動をより簡易的に推定できることを示した。
4. 貫通レーザ溶接を想定した溶接熱伝導理論解析に基づき、溶接入熱条件と熱回復幅の関係を定量化し、現状の標準接合法・条件と比較して熱影響・熱回復が生じる領域を縮小できる施工条件範囲を提示した。

## 参考文献

- [1] 三島良績, “金属材料の照射損傷とその対策”, 日本金属学会会報, 第 17 巻, 4 号(1978), pp. 330 - 334
- [2] 独立行政法人 原子力安全基盤機構 規格基準部, “原子炉圧力容器監視試験片の再生に関する調査報告書 JNES-SS レポート”, (2006.4)
- [3] 井形直弘, “核融合炉材料”, 培風館(1986), pp. 178-226
- [4] 電気技術規定 “JEAC 4201-2007 C: 原子炉構造材の監視試験方法”, 日本電気協会, (2007), pp. 23 - 33
- [5] X線材料強度部門委員会, “X線応力測定法標準(2002年版)―鉄鋼編―”, 日本材料学会
- [6] 日本工業規格, “JIS Z 2244:2009 ビッカース硬さ試験―試験方法”
- [7] 西谷弘信, 藤村顕世, 福田幸雄, 福田孝之, “炭素鋼の疲労過程における疲労被害と X 線半価幅の関係”, 日本機械学会論文集 A 編, 第 55 巻, 510 号(1989), pp. 192 - 197
- [8] 秋庭義明, 天野雅大, “回折プロファイルに及ぼす X 線照射領域内のひずみ分布の影響”, 材料, 第 61 巻, 7 号(2012), pp. 620 - 626
- [9] 岡野成威, 橋本匡史, 谷口優, 望月正人, “高温環境下における機械的表面改質層圧縮残留応力緩和挙動の実験室 X 線その場測定”, 非破壊検査, 68 巻, 5 号(2019)
- [10] J.Burke, 平野賢治 訳, 堀仁 訳, “金属層変態速度論入門”, 共立出版株式会社(1972), pp. 48 - 52
- [11] 市川慧太, 藤山一成, 田中啓介, “X 線回折法による耐熱鋼および耐熱合金のクリープ損傷評価”, 日本機械学会, (2009.7)
- [12] Jinsun Liao, Kenji Ikeuchi, Fukuhisa Matsuda, “Toughness investigation on simulated weld HAZs of SQV-2A pressure vessel steel”, Nuclear Engineering and Design, vol.183(1998), pp. 9 - 2
- [13] S. Okano, M. Tanaka and M. Mochizuki: Arc Physics Based Heat Source Modeling for Numerical Simulation of Weld Residual Stress and Distortion, Science and Technology of Welding & Joining, 16-3 (2011), 209-214.
- [14] 佐藤邦彦, 向井喜彦, 豊田政男, “溶接工学”, 理工学社(1979), pp. 1 - 30

(2020 年 7 月 1 日受理、2020 年 9 月 14 日採択)