

サイドビード試験を用いた低放射化フェライト鋼 F82H の レーザ溶接部における凝固割れ感受性評価

大阪大学大学院工学研究科 ○森 裕章
大阪府立大学大学院工学研究科 前田新太郎
本藤 裕佑
生島 一樹
柴原 正和

Evaluation of Solidification Crack Susceptibility in Laser Beam Welds of Reduced Activation Ferritic Steel F82H using Side-bead Test

by Hiroaki MORI, Shintaro MAEDA, Yusuke HONDO,
Kazuki IKUSHIMA, Masakazu SHIBAHARA

1. 緒 言

先の大震災以降，原子力発電に代わる高効率で安定供給が可能な発電システムが求められている．そのような次世代の電力供給システムの一つとして核融合発電が期待されている¹⁾．核融合は，現在の原子力発電とは異なり，核分裂の連鎖反応／暴走が無く，高密度の放射性廃棄物も出ず，また重水素と三重水素の反応を用いることから，基本的には発電に使う燃料は無尽蔵といえる，といったメリットを有する．さらに，安定した反応を維持することにより，現在の再生可能エネルギーと比べて電力の安定供給も可能であると考えられる．核融合発電では，炉内での核融合反応（D-T 反応）において中性子が 14MeV ものエネルギーを持つようになることから，これを熱エネルギーに変換して発電に用いることとなる．このエネルギーを取り出す方法として，ブランケットモジュールと呼ばれる装置を炉体内部に張り巡らせ，中性子の持つエネルギーを熱エネルギーに変換させるシステムが考案されている²⁾．このブランケットモジュールでは，前述のエネルギー変換に加えて，高エネルギーを有する中性子の外部への漏れの遮断も重要な機能として想定されていることから，同装置に用いられる構造材料には，高温強度や中性子照射による放射化の低減などの特性が求められている．このような観点から，9Cr-1Mo 鋼をベースに低放射化特性を付与することを企図して低放射化フェライト鋼 F82H が開発された³⁾．しかしながら，同鋼の溶接方法については未だ十分に検討されたとは言えない状況である．本研究では，同鋼の薄板や細径のパイプなどへの適用が想定されているレーザ溶接について，サイドビード試験を用いて低放射化フェライト鋼 F82H のレーザ溶接部における凝固割れ感受性を評価した結果について報告する．

2. 供試材料および実験方法

2. 1 供試材料

本研究では，日本原子力研究開発機構（(現)量子科学技術研究開発機構）で開発された 9Cr-1Mo 鋼をベースに低放射化特性を付与するため Ta が添加された低放射化フェライト鋼である F82H を用いた．とくに，本稿で報告する実験結果は Table 1 に示す鋼種の中でも約 0.08% の Ta を含有する T08LN を用いた結果である．

Table 1 Chemical compositions of reduced activation ferritic/martensitic steel F82H (mass%)

	C	Si	Mn	P	S	Cr	W	V	Ta	B	N	O	Fe
T02LN	0.098	0.10	0.44	<0.003	0.0003	7.78	1.85	0.20	0.016	0.0010	0.0014	0.0034	Bal.
T04LN	0.098	0.10	0.44	<0.005	0.0004	7.81	1.88	0.19	0.037	0.0010	0.0013	0.0032	Bal.
T06LN	0.097	0.10	0.44	<0.007	0.0004	7.81	1.86	0.20	0.058	0.0010	0.0014	0.0028	Bal.
T08LN	0.095	0.10	0.44	<0.009	0.0004	7.80	1.84	0.20	0.076	0.0010	0.0013	<0.0010	Bal.
T010LN	0.093	0.11	0.44	<0.011	0.0004	7.76	1.84	0.20	0.096	0.0010	0.0023	<0.0010	Bal.
T012LN	0.092	0.11	0.44	<0.013	0.0004	7.77	1.84	0.20	0.120	0.0010	0.0016	<0.0010	Bal.

2. 2 実験方法

適切なレーザ溶接条件を選定するために、レーザ溶接によるビードオンプレートを実施し、断面マクロ観察およびミクロ組織観察を行った。また、レーザ溶接部における高温割れ感受性を評価する方法として、サイドビード試験を採用した。それらの詳細を以下に示す。

2. 2. 1 レーザ溶接（ビードオンプレート）方法

レーザ溶接には定格出力 4kW の IPG 社製ファイバーレーザを用い、Table 2 に示すように、ビーム径やシールドガス（アルゴン）流量を、それぞれ 0.2mm と 40L/min で一定とし、溶接速度を 2m/min から 7m/min まで変化させてビードオンプレートを行った。溶接後、断面に対し、研磨および腐食を行い、実体顕微鏡でのマクロ観察および電子顕微鏡を用いたミクロ組織観察を行った。

Table 2 Laser beam welding conditions

Power (kW)	Beam spot size (mm)	Ar gas flow rate (L/min)	Welding speed (m/min)
4.0	0.2	40	2, 3, 4, 5, 6, 7

2. 2. 2 サイドビード試験方法

レーザ溶接部の高温割れ感受性を評価するために、沓名らにより報告されているサイドビード試験を用いた⁴⁾。本試験では Fig. 1 に示す試験片の端部近傍から斜めにレーザ溶接を施す。このとき、試験片端部においては不均一な温度場が形成されることによって試験片端部に面内変形（回転変形）が生じる。溶接部の温度が脆化領域にある時間内に発生する変形量が、凝固割れに要する変形量を上回った際に、凝固割れが発生・進展することになる。試験片端部から溶接部までの距離が増大するにしたがい試験片の剛性が向上し、これにより面内変形が抑制され、やがて割れの進展が停止することになる。変化させるパラメータは溶接開始位置の端部からの距離（図中 a）と溶接する角度 θ である。試験終了後、割れの長さや試験片端部から割れ先端までの距離を測定し、割れ感受性として定量的に評価した。なお、本試験においては、シールドガスを同軸と 45° 方向からそれぞれ流量 20L/min でレーザ照射部に吹き付けてシールドした。

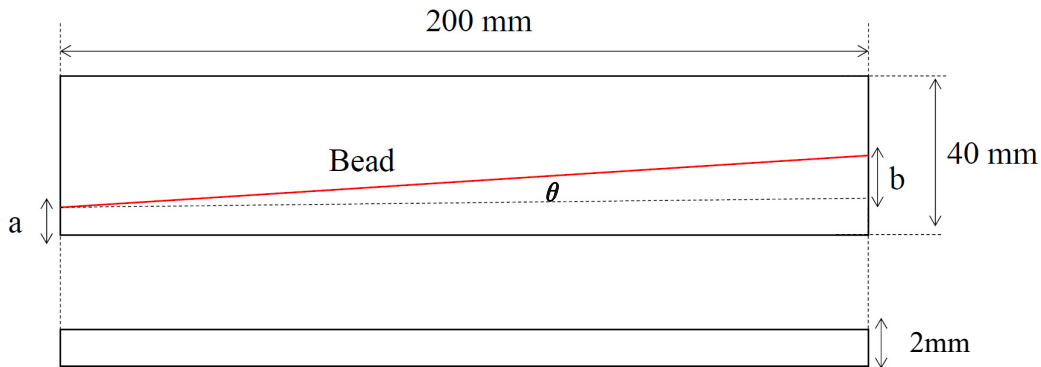


Fig. 1 Schematic illustration of the specimen for the side-bead test (a and b are variable)

3. 実験結果および考察

3. 1 適切なレーザ溶接条件に関する検討

レーザ溶接は低入熱で局所的な入熱が可能である。そのため、熱影響部を狭小化し、1 パスで深溶け込みを得ることができる。しかしながら、F82H に対する、レーザ溶接継手の健全性については、未だ議論の余地がある。そこで、溶接欠陥のない貫通ビードが得られる溶接条件の選定を試みた。

板厚が異なる（ここでは、3, 4, 5mm と変化させた）試験片に対し、溶接速度を前述のように変化させてレーザ溶接（ビードオンプレート）を行った後の断面の観察結果の一例（板厚：4mm）を Fig. 2 に示す。今回設定したいずれの条件においても割れの発生は認められなかったが、溶接速度が速く、部分溶込みになると、一部の条件でポロシティが発生しているのが観察された。とくに、板厚が 5mm の場合、その傾向が顕著に認められた。これに対し、板厚が 3 mm の場合、今回設定したいずれの溶接条件においても貫通ビードを得ることができた。とくに 2~4m/min で欠陥のない良好な継手を作製することができたことから、サイドビード試験においてもこの情報を参考にして溶接条件を選定した。

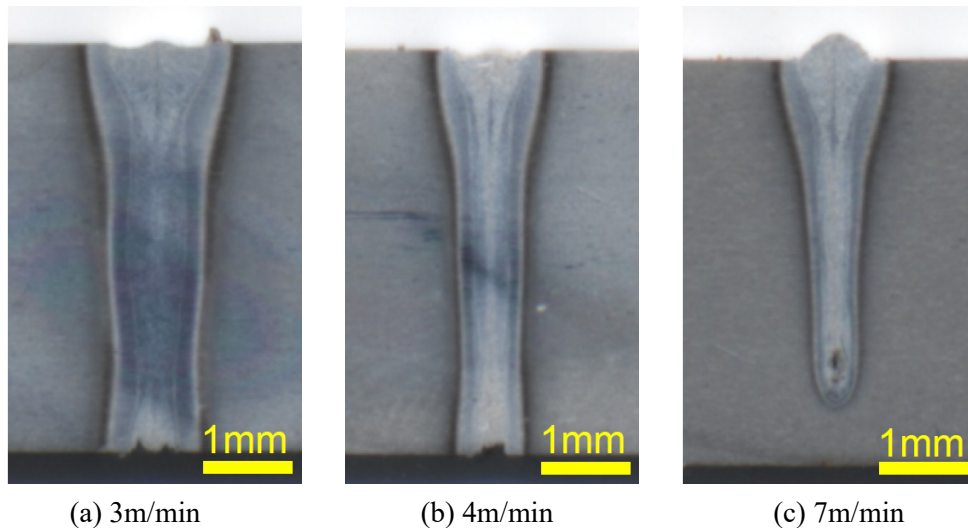


Fig. 2 Cross sectional view of weld bead with varied welding velocities (Thickness : 4mm)

一方, Fig. 3 に示すように溶接部近傍のミクロ組織観察を行った結果, 適切な条件を選定することにより, 溶接金属の幅が 1mm 以下で, HAZ の幅も 0.2mm 程度に抑えられていることがわかった. また, HAZ において熱影響により若干粒径が大きくなってはいるものの, 母材のそれとの差は小さく, 粗粒化も抑制されていることが明らかとなった.

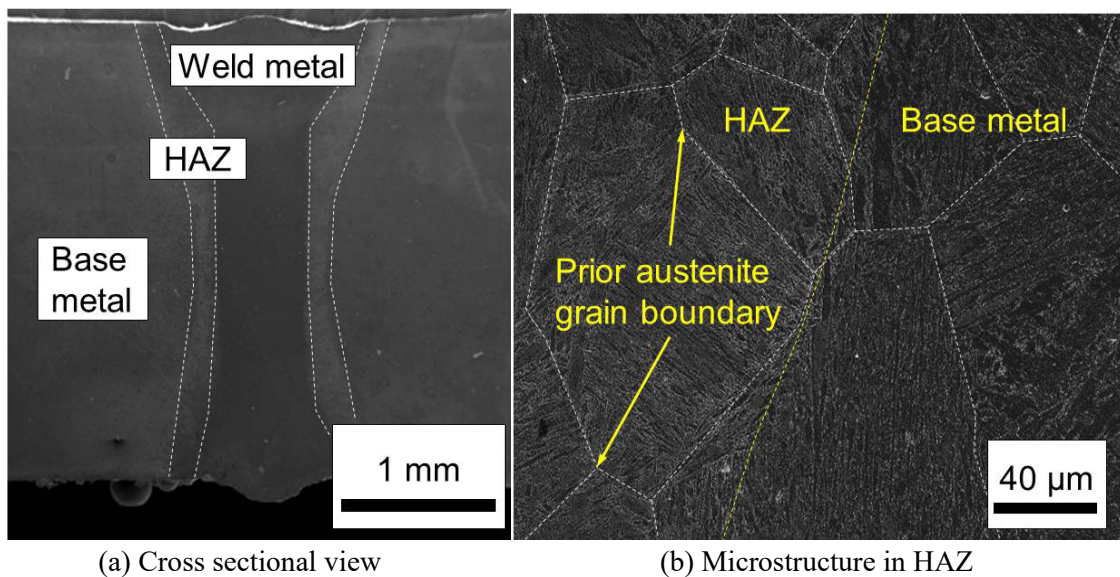


Fig. 3 Cross sectional view and microstructure in HAZ of a welded joint

3. 2 サイドビード試験による高温割れ感受性の評価

レーザ溶接時における高温割れ感受性を評価するために, Fig. 1 に示すサイズの試験片に対してサイドビード試験を行った. 試験片の外観のうち始端部近傍に微細な割れが発生したケースを Fig. 4 に, 試験片の中央部付近まで大きく割れが進展したケースを Fig. 5 にそれぞれ示す. これらの図から, 割れが始端部のビード中央部から発生し, 進展している様子がうかがえる. また, 割れは溶接金属中央の柱状晶の会合部で発生しており, センターラインクラックであると判断される.

サイドビード割れ試験において, 割れの長さは単位溶接長当たりの入熱量と剛性 (変形領域における板幅) が大きく影響を及ぼすものと考えられたことから, 単位溶接割れ長さに及ぼす入熱量の割れ感受性に及ぼす影響を明らかにするために, 測定した割れ長さと計算により求めた単位溶接長当たりの入熱量の関係を調査した. その結果を Fig. 6 に示す. この図より, 溶接する角度 θ に関わらず, 入熱量が大きくなるほど割れ長さが長くなることがわかる. ただし, θ が 3° の場合は試験片端部の剛性が溶接過程ですぐに大きくなるため, θ が 2° の場合と比べて割れがそれほど大きく進展していない. したがって, この場合, 割れ感受性の評価には, θ を 2° としたサイドビード試験が有効であると考えられる.

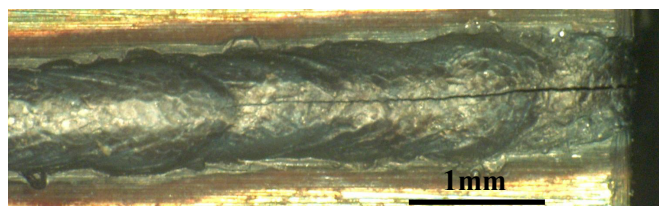
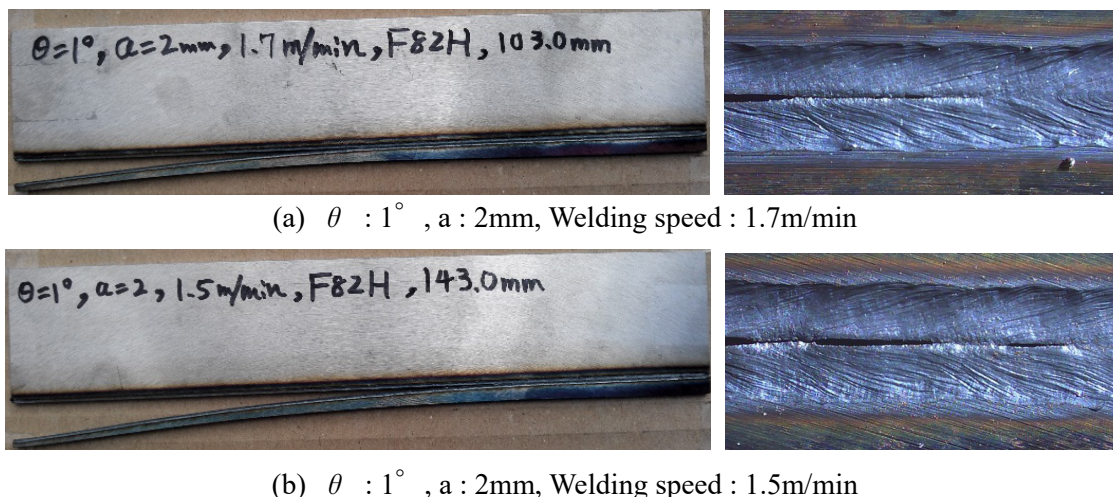


Fig. 4 Surface appearance of weld bead in side-bead tested specimen



(a) $\theta : 1^\circ$, $a : 2\text{mm}$, Welding speed : 1.7m/min

(b) $\theta : 1^\circ$, $a : 2\text{mm}$, Welding speed : 1.5m/min

Fig. 5 Surface appearances of weld beads in side-bead tested specimens

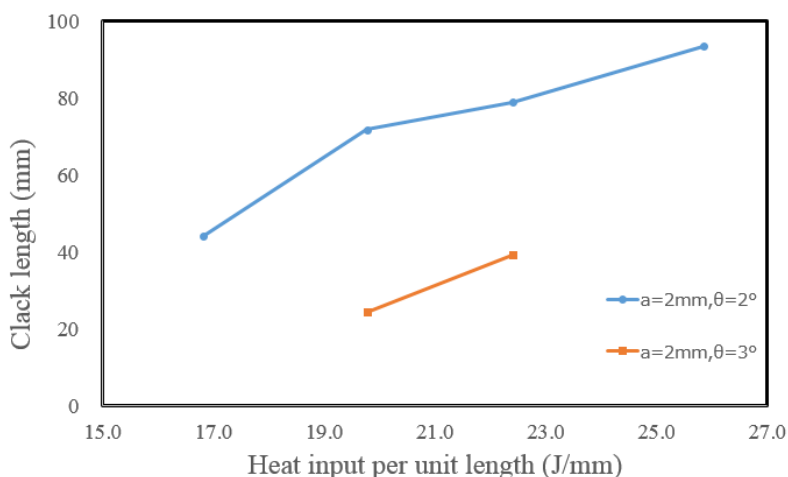


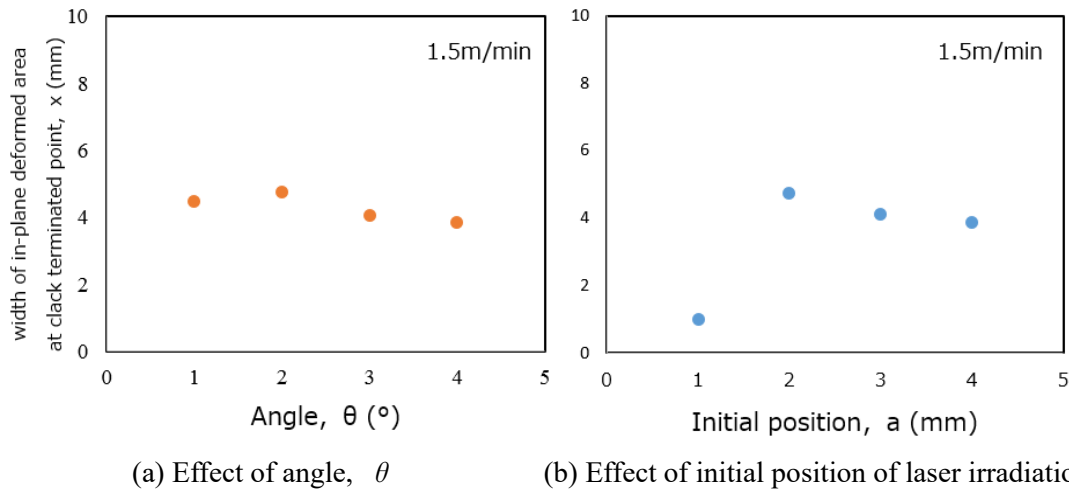
Fig. 6 Relation between heat input per unit length and crack length

割れ長さに及ぼす剛性の影響を明確にするため、実験結果を割れ停止位置での板幅と角度の関係として整理したものを Fig. 7(a)に、割れ停止位置での板幅と初期位置の関係として整理したものを Fig. 7(b)にそれぞれ示す。ただし、レーザを照射する初期位置が 1mm の場合は、端部が溶け落ちたためデータが取得できていない。これらの結果より、ビードを置く角度や初期のレーザ照射位置が変化したとしても、割れ停止位置での板幅はほぼ同じ値に収束している様子がうかがえる。この結果から、剛性は角度や初期位置に依存せず、変形領域における板幅 x によって決まるものと考えられる。

これらのことから、サイドビード試験における高温割れは、溶接速度に依存する入熱量、剛性に影響を与える変形領域における板幅 x に依存することが予想される。

一方、このサイドビード試験時に発生するセンターラインクラックを引き起こす限界歪を求めるために、境界要素を考慮した熱弾塑性解析を行った⁵⁾。長さ対象とした F82H 鋼の各種物性値に温度依存性を考慮し、レーザ溶接部の溶込み形状を含めて可能な限り実際のサイドビード試験を忠実に解析モデルとして再現することを試みた。その解析結果の一例を Fig. 8 に示す。この図より、試験片端部において面内変形が生じてい

ることが見られるとともに、溶融池の後を追うように割れが進展している様子がうかがわれ、サイドビード試験が数値シミュレーションとして再現できているものと考えられる。溶接速度と発生した割れの長さの関係について、計算値と実測値を比較した結果、Fig. 9 に示すように、かなり高い精度で一致している。



(a) Effect of angle, θ (b) Effect of initial position of laser irradiation, a
Fig. 7 Effects of angle and initial position of laser beam welding in side-bead test on width of in-plane deformed area at crack terminated point

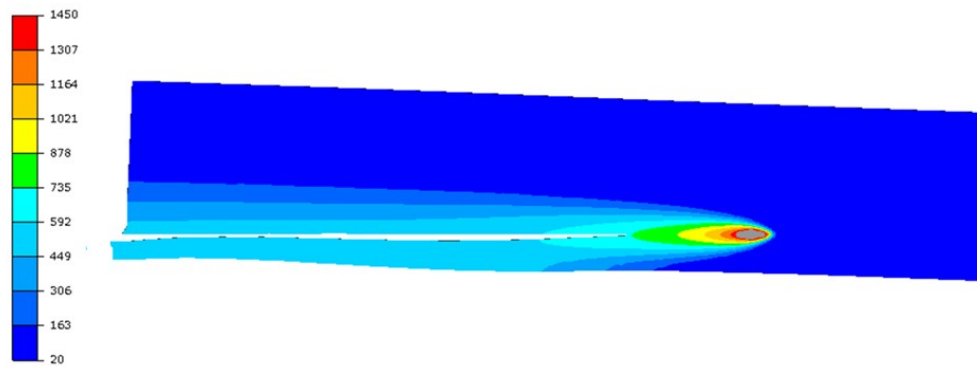


Fig. 8 Calculation to simulate the side-bead test by the thermal elastic-plastic analysis considering with the temperature dependent interface element

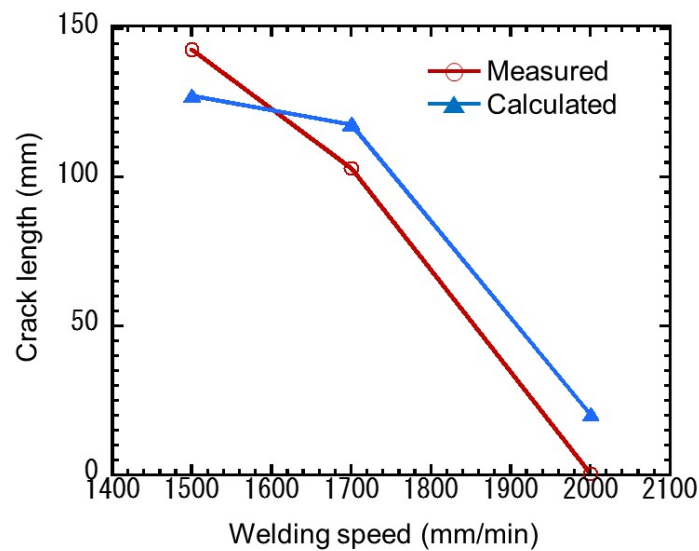


Fig. 9 Comparison between calculation and measurement of crack length considering the effect of welding speed as the variable in the side-bead tested specimens

さらに、この数値解析モデルを用いて割れの進展に関する限界歪を求めるため決めるため、割れ先端での割れ開口を決める面内変形の限界値、すなわち限界曲率半径を求めることを試みた。サイドビード試験における割れ長さを決定付けるのは変形領域における板幅 x と割れ先端での回転変形と考えられることにより、割れ先端での曲率 $1/\rho$ を用いて実験結果を整理した。割れ停止位置での曲率と変形領域における板幅 x の関係を Fig. 10 に示す。点線は、各溶接速度における板幅 x を変化させて算出した曲率である。この図より、溶接速度、変形領域における板幅が変化したとしても、割れが停止した曲率はほぼ等しい値を示している。このことから、曲率が高温割れ感受性を定量的に評価できる指標であると考えられる。また、曲率 $1/\rho$ がある値、すなわち限界曲率 $1/\rho_{cr}$ （ここでは、約 2×10^{-4} ）が存在し、曲率 $1/\rho$ がその値より小さい範囲では、高温割れを抑制することができるものと推察される。

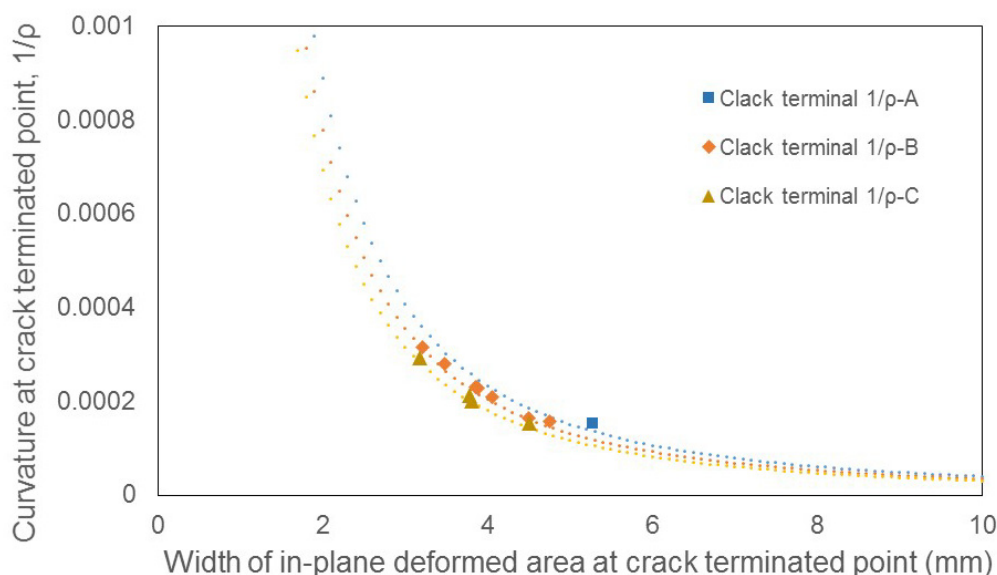


Fig. 10 Comparison between calculation and measurement of crack length considering the effect of welding speed as the variable in the side-bead tested specimens

4. 結言

核融合炉内に設置されるブランケットモジュール用の構造材料である低放射化フェライト鋼 F82H のレーザ溶接技術の確立に向けた取り組みの一環として、レーザ溶接部の高温割れ感受性をサイドビード試験を用いて評価した結果、同試験において発生する割れが高温割れの中でも凝固割れの一種として分類されるセンターラインクラックであることが判明した。また同試験において変量させるパラメータである溶接開始位置の試験片端部からの距離や溶接する角度 θ にかかわらず、割れ先端が試験片端からある一定の距離に達すると割れの進展が停止することが明らかとなった。このことから、割れ先端においてレーザ溶接時に発生する面内変形を抑制し得る剛性が確保された時点で割れが停止するものと判断された。さらに、割れの進展を決定付ける評価パラメータとして、割れ先端での曲率 $1/\rho$ が有効であると考えられ、 $1/\rho$ の値をある限界曲率 $1/\rho_{cr}$ よりも低く抑えることにより、割れの進展を停止させることができるものと推察された。

参考文献

- 1) E.E.BLOOM, R.W.CONN, J.W.DAVIS, R.E.GOLO, R.LITTLE, K.R.SCHULTZ, I.L.SMITH, and F.W.WIFFEN : Low activation materials for fusion applications, Journal of Nuclear Materials, 122-123, (1984), 17-26.
- 2) H.Tanigawa, H.Sakasegawa and R.L.Klueh : Irradiation Effects on Precipitation in Reduced-Activation Ferritic/Martensitic Steels, Mater. Trans., 46-3, (2005), 469-474.
- 3) H.Tanigawa, E.Gaganidze, T.Hirose, M.Ando, S.J.Zinkle, R.Lindau and E.Diegele : Development of benchmark reduced activation ferritic/martensitic steels for fusion energy applications, Nuclear Fusion, 57, (2017), 092004.
- 4) M.KUTSUNA, K.SHIDOU and T.OKADA : Solidification Crack Susceptibility in Laser Welding of Aluminium Alloys by Side-Bead Cracking Test, 溶接学会全国大会講演概要, 72, (2003-4), 148-149. (in Japanese)
- 5) M.Shibahara, H.Nagaki S.Takaba, H.Serizawa and H.Murakawa: Prediction of Hot Cracks of T-Joints in Full-Penetration, Welding in the world, 53, 11-12, (2009), 312-321.