拘束緩和式 U 型高温割れ試験による各種合金の高温割れ感受性の比較*

—Ni 基耐熱超合金のレーザ溶接性に関する研究 (第2報)—

篠崎 賢二**, 羅 湘軍***, 有吉 秀文****, 黒木 英憲**, 白井 誠*****

Comparison of Hot Cracking Susceptibilities of Various Ni-base Superalloys by U-type Hot Cracking Test*

—A study on Laser Weldability of Ni-base Superalloys (Report 2)—

by Kenji SHINOZAKI**, Xiangjun LUO***, Hidefumi ARIYOSHI****, Hidenori KUROKI**, Makoto SHIRAI*****

This study was carried out quantitatively to evaluate the hot cracking susceptibilities of various Ni-base superalloys and the effect of grain size on hot cracking susceptibility during laser welding.

Ni-base superalloys used were Inconel 718, Inconel X-750, Inconel 617, Inconel 625, Nimonic 90 Waspaloy, Hastelloy X. The grain size of Inconel 718 varied from about 10 to 110 μm . In this study, the hot cracking susceptibility was evaluated by a modified U-type hot cracking tester during CO₂ laser welding. Samples were solution heat-treated before welding and welded with laser powers of 3 and 5 kW and with a traveling speed of 0.5 to 3 m/min.

The hot cracking occurring in the weldment during the bead on plate test was reproduced on the U-type hot cracking test. Consequently, the liquation cracking susceptibilities of various Ni-base superalloys decreased in the order of Waspaloy, Inconel 617, Inconel 718, Hastelloy X, Inconel 625, Inconel X-750 and Nimonic 90. Liquation cracking susceptibility of Inconel 718 increased with an increase in grain size.

Key Words: Ni-base superalloy, CO₂ laser beam welding, Hot cracking, Hot cracking test

1. 緒 言

レーザ溶接は現在, Al 合金やステンレス鋼などの比較的薄い板の高速溶接法として適用されているが, Ni 基耐熱超合金などを含む多くの材料の溶接方法として今後高い需要が見込まれている。

一般に, これらの材料は高温割れ感受性が高いと言われており¹⁾, 前報²⁾において Inconel 718 に対しレーザ溶接によるビードオンプレート溶接を行った結果, 溶け込み形状はネールヘッド状となり, そのくびれ部の溶接熱影響部

(HAZ)に液化割れが発生しやすく, この液化割れの発生頻度は溶け込み形状に依存することを明らかにした。

このようにレーザ溶接時の溶接条件, 材料要因等に依存する高温割れ感受性を比較検討するには定量的に高温割れ感受性を評価できる試験方法が必要である。従来より高温割れ試験方法としてバレストレイン試験法や自拘束式割れ試験法などがあるが, いずれも薄板のレーザ溶接には不向きであり, 新たな試験方法の開発が望まれる。

本研究では, レーザ溶接における高温割れ試験方法として, 松田ら³⁾の開発した拘束緩和式U型高温割れ試験法を一部改良し, 各種 Ni 基耐熱超合金について高温割れ感受性の評価を行った。また, 従来より, 高温割れ感受性には結晶粒径が影響を及ぼすことが報告されている⁴⁾。そこで, 高温割れ感受性に及ぼす結晶粒径の影響についても調査した。

2. 使用材料および実験方法

2.1 供試材料

母材には Ni 基耐熱超合金である Inconel 718, Inconel X-750, Nimonic 90, Inconel 617, Inconel 625, Waspaloy および Hastelloy X の7種類を用いた。このうち Inconel

*原稿受付 平成10年7月22日 平成8年度秋季全国大会で発表

**正 員 広島大学工学部 Member, Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Hiroshima University

***学 生 員 広島大学工学部大学院 Student Member, Graduate School of Engineering, Faculty of Engineering, Hiroshima University

****学 生 員 広島大学工学部大学院(現:三菱製紙㈱) Student Member, Graduate School of Engineering, Faculty of Engineering, Hiroshima University (present address: Mitsubishi Paper Mills Ltd.)
***** 宇宙開発事業団 National Space Development Agency of Japan

Table 1 Chemical compositions of Ni-base superalloys used (mass%).

Materials	Thickness (mm)	Chemical composition (mass%)																
		C	Si	Mn	Ni	Cr	Co	Mo	W	Nb+Ta	Ti	Al	B	Zr	Cu	P	S	Fe
Inconel 718-1	2	0.04	<0.05	0.11	Bal.	19.17	<0.05	3.06	-	5.24	1.13	0.52	0.003	-	0.05	<0.005	<0.003	19.21
Inconel 718-2	5.7	0.02	0.04	0.05	Bal.	18.5	0.21	3.0	-	4.93	1.01	0.52	0.001	-	0.05	0.007	0.0005	18.3
Inconel X-750	2	0.04	<0.05	<0.05	Bal.	15.24	<0.05	-	-	0.94	2.48	0.69	-	-	<0.05	-	0.001	7.05
Nimonic 90	2	0.1	0.12	0.3	Bal.	19.49	16.94	-	-	-	2.37	1.47	0.003	0.03	<0.05	-	0.001	0.21
Inconel 617	2	0.03	0.43	0.04	Bal.	20.5	12.0	8.5	-	0.35	1.20	0.003	-	-	-	0.004	0.005	-
Inconel 625	2	0.015	0.35	0.27	Bal.	21.26	0.37	8.85	-	3.66	0.28	0.19	-	-	-	<0.005	0.001	3.44
Waspaloy	2	0.04	0.05	<0.05	Bal.	19.2	13.0	4.26	-	-	2.87	1.46	0.006	0.075	-	<0.005	<0.001	0.11
Hastelloy X	2	0.06	0.33	0.66	Bal.	20.64	1.04	8.94	0.58	-	0.05	0.13	0.001	-	0.09	-	0.005	17.98

Table 2 Solution treatment condition and grain size of Ni-base superalloys used.

Materials	Temperature (K)	Holding time (ks)	Cooling procedure	Grain size number	Grain size (μm)
Inconel 718-1	1340	3.6	A.C.	ASTM #4	84
Inconel 718-2	1243	1.8	W.Q.	ASTM #10	12
Inconel X-750	1420	7.2	A.C.	ASTM #5	49
Nimonic 90	1350	28.8	A.C.	ASTM #7	28
Inconel 617	1448	1.8	W.Q.	ASTM #4	75
Inconel 625	1420	7.2	W.Q.	ASTM #4	57
Waspaloy	1350	14.4	A.C.	ASTM #4	72
Hastelloy X	1448	1.8	W.Q.	ASTM #5	47

W.Q.: Water quenching, A.C.: Air cooling

Table 3 Solution treatment condition and grain size of Inconel 718-2.

Materials	Temperature (K)	Holding time (ks)	Cooling procedure	Grain size number	Grain size (μm)
Inconel 718-2A	As-received	-	-	ASTM #10	12
Inconel 718-2B	1318	0.3	W.Q.	ASTM #7	24
Inconel 718-2C	1318	0.6	W.Q.	ASTM #4	60
Inconel 718-2D	1318	0.9	W.Q.	ASTM #3	110

W.Q.: Water quenching

Fig. 1 Configuration of U-type hot cracking device.

718 に関しては、チャージの異なる Inconel 718-1 (板厚 2 mm) および Inconel 718-2 (板厚 5.7 mm) の 2 種類を用いた。これらの化学組成を Table 1 に示す。溶接に先立ち、母材には Table 2 に示す条件で溶体化処理を施した。溶体化処理後の母材の結晶粒度番号および平均結晶粒径を Table 2 に示す。

高温割れ感受性に及ぼす結晶粒径の影響を検討するため、以下のように母材の結晶粒径を変化させた。すなわち、Inconel 718-2 については、溶体化処理後に、Table 3 に示すように熱処理温度 1318K で 0.3, 0.9 および 3.6 ks 間保持し、平均粒径 12, 24, 60 および 110 μm の 4 段階 (Inconel 718-2A, 2B, 2C, 2D) にそれぞれ結晶粒径を変化させた。

2.2 拘束緩和式 U 型高温割れ試験法

Fig. 1 に拘束緩和式 U 型高温割れ試験 (以下、単に U 型高温割れ試験と略す) 治具の形状および寸法を示す。二つの拘束梁の間に試験片を設置し、レーザ溶接が可能なように設計している。Fig. 2 に液化割れ感受性を評価するために用いた試験片の形状および寸法を示す。液化割れを発生させやすくするため、板幅を 10 mm とし、荷重負荷方向を溶接方向に対して平行とした。

本試験法の手順を以下に示す。すなわち U 型高温割れ治

Fig. 2 Specimen of U-type hot cracking test.

具では試験片を取り付ける拘束梁が弾性的にたわむため、溶接前に拘束梁を適量たわませたまま、試験片を固定する。Fig. 3 (a) はその状態を模式的に示した図である。これにより試験片には、引張荷重が負荷されたままになっている。したがって、この状態で試験溶接を行った場合、試験片の温度上昇に伴い、試験片に負荷された応力により試験片は高温で伸びる。このひずみにより、割れが発生する。溶接前に負荷する変位、すなわち、拘束梁のたわみ量を大きくすれば、試験片に負荷される引張荷重が大きくなり、溶接部の高温でのひずみが大きくなるため、割れ発生量が多く

Fig. 3 Principle of U-type hot cracking device.

なると考えられる。なお、Fig. 3(a)に示すような溶接前の拘束梁のたわみ量 d_i は(1)式で求められる。また、Fig. 3(b)に示すように溶接終了後の拘束梁の間隔 W_f を測定し、(2)式に示すような値 Δ を試験片の伸び量と定義した。

但し、

$$d_i = (W_i - W_e) / 2 \quad (1)$$

$$\Delta = W_f - W_e \quad (2)$$

d_i : 初期たわみ量 (mm)

W_i : 試験片をセットする前の拘束梁間隔 (mm)

W_e : 溶接前の拘束梁間隔 (mm)

W_f : 溶接後の拘束梁間隔 (mm)

Δ : 試験片の伸び量 (mm)

拘束板および拘束梁の材料として引張強さ780 MPa 級の高張力鋼を採用した。なお、拘束梁および押さえ板には試験片のすべり防止のための溝加工が施されている。この治具で試験片に負荷できる最大荷重は約22 kN、拘束梁の最大たわみ量は約6 mm である。

Inconel 718-2 を除く合金については、液化割れがビード断面のくびれ部分で比較的多く発生しているため、全溶接長に渡っての割れ状況を調査するため、板厚中央部分まで表面に平行に研磨して測定面とし、この面における液化割れの総数を総ビード長さで除した単位ビード長さ当たりの割れ個数を、Inconel 718-2 については、ビード断面9 断面の液化割れ総数をそれぞれ液化割れ感受性の評価パラメータとした。

2.3 レーザ溶接方法

前述したU型高温割れ試験治具に試験片をセットし、Inconel 718-2 を除く合金に対しては、定格出力3 kW の低次マルチモード3 軸直交型炭酸ガスレーザ発振器を用い、

Table 4 Laser welding conditions.

	Apparatus 1	Apparatus 2
Materials	Inconel 718-1 Inconel X-750 Nimonic 90 Inconel 617 Inconel 625 Waspaloy Hastelloy X	Inconel 718-2A~2D
Power(kW)	3	5
Weld speed (m/min)	0.5, 1, 2, 3	1
Focal length (mm)	127	150
Diameter of nozzle (mm)	20	4
Defocal length (mm)	+2	-3
Gas flow rate at nozzle (l/min)	60(He)	33(Ar)
Gas flow rate (backing shielding) (l/min)	24(Ar)	20(Ar)
Gas flow rate (after shielding) (l/min)	-	50(Ar)

Table 4 に示すような溶接条件でビード長約55 mm のビードオンプレート溶接を行った。なお、溶接部の酸化を防止するため、ビード表面側は同軸シールド方式、裏面側はバックシールド方式により、溶接部のガスシールドを行った。

Inconel 718-2 に対しては、装置2の定格5 kW の高速軸流型炭酸ガスレーザ発振器を用い、Table 4 に示すような溶接条件でビードオンプレート溶接を行った。

3. 実験結果および考察

3.1 液化割れ感受性の評価

前報²⁾で報告したように、レーザによるビードオンプレ

Fig. 4 Liquation crack occurred at Region 2 of HAZ (Inconel 718-2).

ート溶接では、ビード断面のくびれ部である Region 2 の領域で液化割れが多く発生し、これには粒界液化現象が関与していた。そこで、U型高温割れ試験によりこのような液化割れが再現できる得るか否かについて、割れの発生位置、破面の観点から調査した。

3.1.1 割れ発生位置

Fig. 4 に U 型高温割れ試験法により発生した割れを示す。割れはビード断面のくびれ部近傍で発生しており、ビードオンプレート溶接の場合と同様の割れ発生位置である。

Fig. 5 にビード断面領域別の割れ数を示す。なお、母材は Inconel 718-2C および 2D であり、割れ数は、領域別に各ビードの全 9 断面の割れ総数で表した。これより、両合金とも Region 2 および Region 2 と 3 の境界に近い Region 3 領域で割れが多く発生しており、ビードオンプレート溶接の場合と同様の結果である。U 型高温割れ試験では、溶接方向に平行に引張荷重が負荷されるので、割れは、ビード断面領域に依存せず、全領域に発生することも予想されたが、結果的に、くびれ部に近い Region 2 および 3 領域で多く発生しており、この領域がなぜ割れ易いのか、今後検討していく必要がある。

3.1.2 割れ破面

Fig. 6 は、U 型高温割れ試験法で溶接ビードに発生した割れの破面である。破面は、比較的表面の凹凸が小さく、表面が滑らかな形態および表面が滑らかで起伏の激しいデンドライト状の形態が認められ、前報²⁾で報告したビードオンプレート溶接部の液化割れ破面と同様の破面形態とな

Fig. 5 Total number of liquation cracks at each region of cross section (Inconel 718-2).

っている。

以上の結果より、U 型高温割れ試験法により、ビードオンプレート溶接時に発生する液化割れを再現できることがわかった。

Fig. 6 Fractured surface of liquation crack of Inconel 718-2.

Fig. 7 Relation between an initial deflection of the restraint beam and expansion of specimen.

3.1.3 たわみ量の影響

U型高温割れ試験法を用いて液化割れを定量的に評価す

るため、レーザ出力および溶接速度を一定にして、初期たわみ量を変化させ、Inconel 718-1 について試験を行った。

Fig. 7 は、溶接中の試験片の伸び量と初期たわみ量の関係を示す。初期たわみ量の増加と共に試験片の伸び量はほぼ直線的に増加する。したがって、拘束梁の初期たわみ量を増すことにより試験片の伸び量（ひずみ）を増やすことができる。

この初期たわみ量を変化させたときの液化割れ総数は、Fig. 8(a)に示すように、初期たわみ量の増加とともに増加しており、液化割れ総数は初期たわみ量により制御することが可能である。

液化割れ総数と試験片の伸び量との関係を Fig. 8(b)に示すが、液化割れ総数は、伸び量の増加とともに増加しており、拘束梁の初期たわみ量を増すことにより試験片の伸び量（ひずみ）が増え、液化割れが発生しやすくなると言える。

3.2 液化割れ感受性に及ぼす諸因子の影響

3.2.1 溶接速度

Inconel 718-1 についてレーザ出力を一定にして溶接速度を変化させU型高温割れ試験を行った。Fig. 9(a)および(b)に試験片の伸び量および液化割れ感受性に及ぼす溶接速度の影響を示す。なお、Fig. 9(b)中の模式図は、矢印で示し

Fig. 8 Effect of an initial deflection of the restraint beam and an expansion of the specimen on the total number of liquation cracks of Inconel 718-1.

Fig. 9 Effect of a traveling velocity on expansion of specimens and liquation cracking susceptibility of Inconel 718-1.

たプロットでのビード断面形状である。

溶接速度の増加とともに、試験片の伸び量は若干、減少することがわかる。これは、溶接速度の増加とともに、入熱が減少し、試験片が高温に保持される時間が短くなったためと考えられる。これに対し、液化割れ感受性は、Fig. 9 (b)に示すように、溶接速度の増加とともに、一旦増加し、その後、低下する傾向が認められる。Fig. 9 (a)の結果から判断すると、むしろ、溶接速度の増加とともに、溶接入熱量

が少なくなり、試験片の伸び量は減少するため、液化割れ感受性は低下することが予想されるが、Fig. 9 (b)の結果は、その逆になっており、液化割れ感受性がビード断面形状に強く依存することを示唆している。この結果は、前報²⁾でのビードオンプレート溶接を行った場合と同様である。よって、U型高温割れ試験においても液化割れ感受性に及ぼす溶接速度の影響、換言するとビード断面形状の影響が明らかに認められる。

3.2.2 結晶粒径

R. G. Thompson ら⁴⁾によれば, Inconel 718 の TIG 溶接における液化割れの総割れ長さは, 母材結晶粒径の減少とともに直線的に減少し, 結晶粒径を小さくすることは液化割れ感受性を低下させるのに有効であることを報告している。そこで, レーザ溶接を用いた場合の液化割れ感受性に及ぼす結晶粒径の影響を U 型高温割れ試験法を用いて調査した。

Fig. 10 に, Inconel 718-2 における液化割れ数に及ぼす母材結晶粒径の影響を示す。なお, U 型高温割れ治具の初

期たわみ量は 3 mm とした。また, 液化割れ数は各ビードの全 9 断面における液化割れ総数で表した。これより, 母材結晶粒径の減少にともない液化割れ数はほぼ直線的に減少している。これより, レーザ溶接においても, 液化割れ感受性は母材の結晶粒径の減少にともない減少し, 結晶粒径を小さくすることにより, 液化割れを防止できることがわかる。

従来より, 液化割れ感受性が母材結晶粒径に比例して増大する理由として, 粗粒になるに従い粒界面積が減少し, (1)粒界に実質的に負荷されるひずみが大きくなる, (2)粒界

Fig. 10 Effect of grain size on liquation cracking susceptibility.

Fig. 11 Effect of grain size on expansion of specimens by U-type hot cracking test.

Fig. 12 Liquation cracking susceptibilities and liquefied temperature range of various Ni-base superalloys.

偏析が大きくなり、低融点フィルムが形成されやすくなるなどの効果が挙げられている⁴⁾。Fig. 11に各試験片の伸び量に及ぼす結晶粒径の影響を示しているが、結晶粒径が小さくなるほど、試験片の伸び量は小さくなっており、結晶粒径が小さいほうが変形しにくいと言える。一般に常温では結晶粒径が小さいほど、降伏強度が高いことが知られているが、本試験において、溶接部周辺では、この傾向が維持されており、結晶粒径が小さいほど、高温降伏強度が高く、試験片の伸び量が低下し、溶接熱サイクルにより割れ発生温度領域周辺において、負荷されるひずみが実質的に減少し、結果として、割れ発生温度領域においても、そのひずみが減少することになり、液化割れが起きにくくなると考えられる。

3.3 各種 Ni 基耐熱超合金の液化割れ感受性

各種 Ni 基耐熱超合金の液化割れ感受性の比較を行うために、各合金を用いて U 型高温割れ試験を行った結果を Fig. 12 に示す。なお、各材料間では、溶け込み形状は、ほぼ同じであった。また、Nakao⁵⁾らが TIG 溶接を用いたバレストレイン試験により求めた各種 Ni 基合金の液化割れ発生温度範囲 ΔT_c も Fig. 12 に併示する。なお、U 型高温割れ治具の初期たわみ量は約 1.5 mm とした。

Fig. 12 の右図により、Waspaloy, Inconel 617, Inconel 718-1, Hastelloy X, Inconel 625, Inconel X-750, Nimonic 90 の順に液化割れ感受性が低くなることがわかる。Fig. 12 の左図の液化割れ発生温度範囲 ΔT_c の結果と比較すると、必ずしも、 ΔT_c が大きい方が、レーザ溶接時の液化割れ感受性が高いとは言えない。U 型高温割れ試験法はその試験の原理上、実施工での溶接に近い試験と考えられることから、材料固有の特性値と考えられる ΔT_c で、必ずしも、実施工での溶接割れ感受性を予測することができないことを示唆している。

4. 結 言

本研究では、主たる Ni 基耐熱超合金として Inconel 718 並びに比較材として各種 Ni 基耐熱超合金を用いてレーザ

溶接を行い、レーザ溶接時の溶接割れ感受性を定量的に評価するために、拘束緩和式 U 型高温割れ試験法を提案し、それにより溶接割れ感受性に及ぼす結晶粒径の影響ならびに各種 Ni 基耐熱超合金での溶接割れ感受性の比較を行った。

以下に得られた結果を要約する。

1) レーザ溶接時の溶接割れ感受性を定量的に評価するための試験方法として拘束緩和式 U 型高温割れ試験方法を提案し、その有効性を調べた結果、溶接における液化割れ感受性の評価を行うことができることがわかった。

2) 拘束緩和式 U 型高温割れ試験法を用いて、レーザ溶接性に及ぼす母材結晶粒径の影響について調べた結果、液化割れ感受性は、母材結晶粒径の増加とともに高くなることがわかった。

3) 拘束緩和式 U 型高温割れ試験法を用いて、各種 Ni 基耐熱超合金である Inconel 718-1, Inconel X-750, Nimonic 90, Inconel 617, Inconel 625, Waspaloy および Hastelloy X のレーザ溶接時の液化割れ感受性を調べた結果、Waspaloy, Inconel 617, Inconel 718-1, Hastelloy X, Inconel 625, Inconel X-750, Nimonic 90 の順に液化割れ感受性が低くなることがわかった。

参 考 文 献

- 1) 篠崎賢二：超合金の溶接・接合の要点、—Ni 基超合金を中心として—、溶接技術、43(8)、60 (1995)。
- 2) 篠崎賢二、羅 湘軍、有吉秀文、黒木英憲、白井 誠：Inconel 718 レーザ溶接性に及ぼす溶接条件の影響、—Ni 基耐熱超合金のレーザ溶接性に関する研究 (第 1 報)—溶接学会論文集、17-2 (1999)。
- 3) 松田福久、中川博二、張 月嬌：薄板用高温割れ治具(応力緩和式 U 型高温割れ治具)の開発、溶接学会全国大会講演概要、38、136 (1986)。
- 4) R. G. Thompson, J. J. Cassimus, D. E. Mayo and J. R. Dobbs: The relationship between grain size and microfissuring in alloy 718, Welding Journal, Vol. 64, No. 4, 1985, p. 91s.
- 5) Y. Nakao and K. Shinozaki: Hot cracking susceptibilities of Nickel-base superalloy weld zones, High Temperature Materials for Power Engineering 1990, Proceedings of a conference held in Liege, Belgium, 24-27 Sept. 1990.