HAZ 割れ感受性に及ぼす均質化熱処理の影響*

—Inconel 718 鋳造合金の溶接性に関する研究 (第3報)—

西本 和俊**, 禹 仁秀***, 田中 勝之****, 白井 誠*****

Effect of Homogenization Heat treatment on HAZ Cracking Susceptibility*

—Study on weldability of Cast Alloy 718 (Report 3)—

by Kazutoshi NISHIMOTO**, Insu WOO***, Katsuyuki TANAKA**** and Makoto SHIRAI*****

The purpose of this study is to clarify the effect of homogenization heat treatment on HAZ cracking susceptibility of cast alloy 718. Homogenization heat treatment was conducted at 1368 K and 1378 K with varying holding time. HAZ cracking susceptibility was evaluated using Longitudinal-Varestraint test at three different strain levels. The test results showed that the number and length of cracks decreased by homogenization heat treatment. HAZ cracking susceptibility was found to be most improved at the heat treatment condition of 1378 K×10.8 ks. According to the isothermal liquation test, grain boundary liquation was suppressed in heat treated samples. Microscopic observation indicated that the number and size of Laves cluster on the grain boundary decreased by homogenization heat treatment. On the basis of these results, the improvement of HAZ cracking susceptibility by homogenization heat treatment was considered to be attributed to mainly the reduction of Laves cluster on the grain boundary.

Key Words: Homogenization heat treatment, HAZ cracking susceptibility, Cast alloy 718, Longitudinal-Varestraint test, Isothermal liquation test, Laves cluster

1. 結 言

前報¹⁾において、Inconel 718 鋳造合金の HAZ 割れ感受性は結晶粒の微細化により改善できることを示した。本報告では、Inconel 718 鋳造合金の HAZ 割れ感受性の改善に対する他の方策を模索するため、溶接前の均質化熱処理の影響について検討を行った。

Inconel 718 鋳造合金において、HAZ 割れ感受性と均質化熱処理との関連性は、主に Thompson ら²⁾ および Huang ら³⁾ により研究が行われている。Thompson らは 1363 K×3.6 ks で熱処理した均質化熱処理材が鋳放し材に比べて割れ感受性が高くなることを示した。これに対して、Huang らは均質化熱処理により電子ビーム溶接部の HAZ 割れ感受性が改善されることを報告している。このように、HAZ 割れ感受性に対する均質化熱処理の効果に

ついては、必ずしも統一的な見解をみるに至っていない。

そこで、本研究では、Inconel 718 鋳造合金の HAZ 割れ感受性の改善策に関する基礎的知見を得ることを目的とし、鋳放し材および従来から一般に実施されている均質化熱処理条件である 1368 K×5.4 ks ならびに本報告の予備的検討で決定した 1378 K×10.8 ks の二条件で熱処理した均質化熱処理材について、ロンジバレストレイン試験および等温液化試験を行い、HAZ 割れ感受性に及ぼす均質化熱処理の影響を検討した。この結果に基づき、均質化熱処理を行った場合の HAZ 割れ感受性の改善機構について考察を行った。

2. 供試材料および実験方法

2.1 供試材料

本研究に使用した供試材料は Inconel 718 鋳造合金である。この合金の化学組成を Table 1 に、均質化熱処理条件を Fig. 1 に示す。本研究では、鋳放し材を A、1368 K×5.4 ks および 1378 K×10.8 ks で熱処理した均質化熱処理材をそれぞれ AH および AH' と表記する。

2.2 ロンジバレストレイン試験

各供試材料の HAZ 割れ感受性はロンジバレストレイン試験を用いて評価した。試験に際して、Fig. 2 に示すように

*原稿受付 平成11年3月23日 平成9年度秋季全国大会で発表

**正 員 大阪大学大学院工学研究科生産科学専攻 Member, Graduate school, Osaka university

***学 生 員 大阪大学大学院工学研究科生産科学専攻 Student Member, Graduate school, Osaka university

****正 員 新明和工業(株) Member, SinMaywa Industries, Ltd.

*****正 員 宇宙開発事業団 Member, National Space Development Agency of Japan

Table 1 Chemical composition of cast alloy 718 (mass%).

Material	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Cu	Mo	Al	Ti	B	Fe	Co	Ta	Ti+Al	Nb+Ta
Inconel 718	0.05	<0.01	<0.01	0.001	0.002	51.98	19.28	<0.01	3.02	0.50	0.77	0.003	17.81	<0.01	0.05	1.27	5.24

Fig. 1 Thermal cycles of heat treatment (AH: 1368 K×5.4 ks, AH': 1378 K×10.8 ks).

100^t×80^w×5^tの試験片を曲げ治具の上に固定した。その後、試験片中央部のAからTIGによるビードオンプレート溶接を行い、アークがBにきたときに2個のヨークを同時に急激に落下し、2 sec 経過後、アークを停止させた。付加ひずみ量は0.98, 1.9, 2.9%の3段階に変化させた。溶接条件は溶接電流100 A, アーク電圧14 V, 溶接速度1.67 mm/sである。試験後、光学顕微鏡を用い、試験片の表面部について割れ発生状況を調査した。

2.3 粒界液化率の測定方法

HAZに見られる粒界液化現象を再現するため、以下に示す等温液化試験を行った。まず、各供試材料より作製した5 mm^t×5 mm^w×5 mm^tの試験片を高周波誘導加熱装置によりAr雰囲気中で、各ピーク温度まで50 K/sの加熱速度で急速加熱した後、その温度で約5 sec保持し、水冷により急冷する熱サイクルを付加した。その後、試験片中央部の断面についてSEMを用いた観察に供した。粒界液化率は1000倍の倍率で観察した任意の10視野でFig. 3に示すように結晶粒界の総長さ(ΣL_g)と粒界上の液化部分の総長さ(ΣL_i)を測定して次式により評価した。

$$\text{粒界液化率}(\%) = (\Sigma L_i / \Sigma L_g) \times 100$$

Fig. 2 Schematic illustration of Longitudinal-Varestraint test.

L_i: length of grain boundary liquation

L_g: length of grain boundary

$$\text{Liquation ratio}(\%) = \Sigma L_i / \Sigma L_g \times 100$$

Fig. 3 Schematic illustration of grain boundary liquation and definition of liquation ratio on grain boundary.

3. 実験結果

3.1 適正均質化熱処理条件に関する検討

Inconel 718 鋳造合金のHAZ割れ感受性を改善するためには、基本的には母材の粒界に存在するLaves clusterの量を減少させることが有効であると考えられる。そのための一つの手法として、Laves clusterを固溶させるための均質化熱処理が有効と考えられる。

まず、鋳放し材Aを対象として均質化熱処理条件の検討を実施した。適正均質化熱処理条件を決定するため、その初段階として、一般にInconel 718 鋳造合金に幅広く使用

(a) as cast A

(b) Heat treated AH

Fig. 4 SEM structures of as cast A and heat treated AH (1368 K×5.4 ks).

されている均質化熱処理条件1368 K×5.4 ks⁴⁻⁵⁾を用い、熱処理を行った。Fig. 4は熱処理前後の鑄放し材Aおよび均質化熱処理材AHの典型的なSEM組織を示す。熱処理前の母材内の生成相は複数の相が混合した Laves cluster およびその周りに存在する NbC に分類される。第1報⁶⁾の結果より、Laves cluster は共晶状の Laves 相、針状の δ -Ni₃Nb および針状の白色相間に存在する γ' + γ'' の混合相で構成されていることが判明している。AH 材は熱処理前のA材の組織に比べて Laves cluster が大幅に減少しているが、完全に消滅しておらず粒界に存在する様子がみられる。

そこで、粒界の Laves cluster を完全に消滅できる均質化熱処理条件を調査するため、熱処理温度を1378 Kとし、保持時間を変化する熱処理を行った。ここで、熱処理温度を1378 Kとしたのは、前報⁶⁾の結果より、Laves cluster の液化開始温度が約1383 Kであり、その温度よりも若干低い温度に設定することにより、熱処理過程で Laves cluster を液化させず、Laves cluster を固溶させるのを意図したことによる。Fig. 5は熱処理温度1378 Kでの保持時間の変化

Fig. 5 SEM structures of AH' alloy heated to a peak temperature of 1378 K and quenched after an isothermal hold of 3.6 ks, 7.2 ks and 10.8 ks.

に伴う粒界の組織変化を示す。保持時間が7.2 ks以下のものでは、粒界上に Laves cluster および NbC が存在しているのに対して、10.8 ksでは Laves cluster がみられない。この結果により、熱処理温度1378 Kでは10.8 ks保持することで、粒界上の Laves cluster がマトリックスへほぼ完全に固溶することがわかる。

一方、均質化熱処理に際しては、粒界移動により結晶粒が成長する可能性が考えられる⁷⁾。Inconel 718 鑄造合金のHAZ割れ感受性は結晶粒径に大きく依存する。従って、HAZ割れ感受性に対する均質化熱処理の単独の影響を評価するためには、均質化熱処理材の結晶粒の変化を調査しておくことが必要である。そこで、熱処理前後の試験片に

ついて結晶粒径を測定した。その結果を Fig. 6 に示す。いずれの均質化熱処理材も鑄造し材に比べて結晶粒径が若干

Fig. 6 Effect of heat treatment conditions on the grain growth.

増加しているもののその差は僅かといえる。このことより、本研究で採用する均質化熱処理条件に基づく、熱処理材を用いて HAZ 割れ感受性と均質化熱処理との関連性を定量的に評価できるものと考えられる。

以上の結果より、適正均質化熱処理条件として Laves cluster をほぼ完全に固溶させることができる 1378 K×10.8 ks に決定し、以下の実験でこの条件を用いた。

3.2 ロンジバレストレイン試験結果

(1) HAZ 割れの組織学的検討

1378 K×10.8 ks で熱処理した AH' 材の割れ感受性を評価するため、ロンジバレストレイン試験を行った。なお、AH' 材の割れ感受性と比較するため、鑄造し材 A および 1368 K×5.4 ks で熱処理した AH 材についても検討を行った。

ロンジバレストレイン試験により得られた AH' 材の溶接部の割れ発生状況を Fig. 7 (a) に示す。溶接割れは溶接金属部内では認められず、全て HAZ で発生している。これらの HAZ 割れは溶融境界線に対して垂直な方向の母材の結晶粒界に沿って伝播している様子がうかがえる。また、Fig.

(a) General appearance of HAZ cracks

(b) Higher magnification of A in (a)

Fig. 7 HAZ cracks observed in Longitudinal-Varestraint test.

(a) Crack surface in lower magnification

(b) Higher magnification of A in (a)

(c) Higher magnification of B in (a)

Fig. 8 Fractograph of HAZ crack obtained in Longitudinal-Varestraint test.

- (a) Crack surface in lower magnification
 (b) Higher magnification of A in (a)
 (c) Higher magnification of B in (a)

7(a)に示す HAZ 割れ発生部の A 部分を拡大したものを Fig. 7(b)に示す。この図より、割れによって開口した部分の溶融境界線近傍では、融液が侵入して割れの一部分が塞がれる、いわゆるヒーリング現象が発生しているのが認められる。

これらの割れをより詳細に調査するため、HAZ に発生した割れのうちで、比較的長い割れを対象に割れ破面解析を行った。Fig. 8 は AH' 材の HAZ 割れについて破面観察を行った結果である。Fig. 8(a)は割れ破面のマクロ写真である。割れ破面は全体的に滑らかな粒界破面となっている。また、Fig. 8(a)に示す HAZ 割れ発生部の高温側である A 部分および低温側の B 部分を拡大したものをそれぞれ Fig. 8(b)および Fig. 8(c)に示す。割れ破面のいずれの部分の表面も、細い起伏を持った滑らかな様相となっている。これらの特徴から、AH' 材の HAZ 割れ発生時には粒界に薄い液膜が存在していたものと推察される。

一方、A 材および AH 材でも、前述の割れとほぼ同様な破面形態が観察され、均質化熱処理の有無ならびに条件の違いによる明瞭な相違が認められなかった。以上のことより、

ロンジバレストレイン試験により得られた割れは、鋳放し材および均質化熱処理材のいずれの試料においても、HAZ の液化割れであることがわかった。

(2) HAZ 割れ感受性の定量的評価

ロンジバレストレイン試験により得られた鋳放し材および均質化熱処理材の HAZ 割れについて、割れ発生数および最大割れ長さを調査した結果を Fig. 9 に示す。いずれの材料においても、付加ひずみが大きくなるに伴い、割れ発生数および最大割れ長さが増加しているものの AH' 材は A 材および AH 材に比べて割れ発生数および最大割れ長さが減少する傾向が認められる。このことより、1378 K × 10.8 ks で熱処理した AH' 材は鋳放し材 A および均質化熱処理材 AH に比べて HAZ 割れ感受性が改善されているといえる。

次に、HAZ 割れ感受性と均質化熱処理との関連性をより詳細に検討するため、割れ発生温度範囲による定量的評価を行った。割れ発生温度範囲は前報⁹⁾で示した次式に示す実験式を用いて求めた。

(a) Number of cracks

(b) Maximum crack length

Fig. 9 Effects of augmented strain and heat treatment on the HAZ cracking susceptibility.

(a) Number of cracks

(b) Maximum crack length

$$T_m = \frac{111285}{(8.23 + \gamma')^2}$$

ここで、 T_m は最高到達温度、 γ' は溶融境界線から母材側へ向けての距離を示す。

Fig. 9 に示した各材の最大割れ長さを上式より温度に換算し、付加ひずみとの関係で整理した結果を Fig. 10 に示す。この図より、割れ発生温度範囲は A 材、AH 材、AH' 材順に小さくなるのがわかる。すなわち、付加ひずみ 2.9% において、AH' 材の HAZ 割れ終端部温度が約 1430 K であ

Fig. 10 Effect of heat treatment on crack temperature range.

るのに対して A 材および AH 材はそれぞれ約 1375 K および 1400 K となっている。さらに、割れ発生温度範囲は、AH' 材の HAZ 割れは約 213 K であり、A 材および AH 材の HAZ 割れが約 268 K および 243 K であるのに対して、それぞれ約 55 K および 30 K 減少することがわかる。

以上の結果から、Inconel 718 铸造合金を 1378 K × 10.8 ks で均質化熱処理することにより、従来、広く行われている均質化熱処理よりも HAZ 割れ感受性を一層改善することが明らかとなった。

3.3 等温液化試験結果

前報¹⁾で明らかにしたごとく、供試合金の HAZ 割れ感受性と高温加熱時の粒界液化率とは密接な関連があることが判明している。そこで、本節では、均質化熱処理により割れ感受性が改善される原因を明らかにするため、等温液化試験により、各供試材料の粒界液化現象について調査した。

Fig. 11 は保持温度 1473 K で熱処理した各試材の組織変化を示す。Fig. 4 および Fig. 5 に示した等温液化試験前の組織に比べて、等温液化試験後は粒界での白色相の生成量が増加する様子が見られる。前報⁶⁾の結果より、白色相は、液化した粒界で見られる共晶状の Laves 相 (Fe_2Nb) であることが判明している。また、粒界液化中に残留した生成相の形状より、A 材および AH 材では Laves cluster および NbC が、AH' 材は NbC がそれぞれ液化した様相が認められる。このことより、A 材および AH 材の粒界液化には Laves cluster と NbC の液化、AH' 材の粒界液化は NbC の液化により発生するものと推察される。

次に、各保持温度における粒界液化率を測定した結果を

Fig. 11 SEM structures of grain boundary liquation in the isothermal liquation test (Peak temperature: 1453 K).

Fig. 12 に示す。図中の直線は実測値を最小二乗法により回帰したものである。いずれの材料においても、保持温度の上昇とともに、粒界液化率が増加する。また、粒界液化率は A 材, AH 材, AH' 材順に減少することがわかる。このことより、均質化熱処理により割れ感受性が改善されるのは、粒界液化率の減少に起因するものであることが推察される。

一方、各合金の粒界液化開始温度についてみると、AH' 材は約 1425 K, A 材および AH 材はそれぞれ 1380 K およ

Fig. 12 Relationship between heat treatment and liquation ratio on the grain boundary.

び 1395 K であり、AH' 材は A 材および AH 材に比べて粒界液化開始温度がそれぞれ約 45 K および 30 K 上昇することがわかる。この事実は、均質化熱処理による粒界液化率の減少が、単に生成物の量の変化のみならず、粒界の性質にも影響をうけていることを示唆するものといえる。

以上の結果から、均質化熱処理により、HAZ 割れ感受性が改善されるのは、粒界液化率の減少および粒界の性質の変化に起因するものと推察される。

4. HAZ 割れ感受性の改善機構に関する考察

4.1 粒界の生成相に及ぼす均質化熱処理の影響

前節までの結果より、均質化熱処理により HAZ 割れ感受性が改善されるのは、粒界液化率の減少が主たる原因となることがわかった。そこで、本節では、粒界液化に及ぼす生成相の影響について考察を行う。

前節の等温液化試験結果より、各供試材料の粒界液化は、Laves cluster および NbC の組成的液化に起因することがわかった。そこで、等温液化試験前の試材について、Laves cluster および NbC の粒界上での析出状態について検討を行った。各生成相の粒界占有率を測定した結果を Fig. 13 に示す。均質化熱処理により Laves cluster の粒界占有率は大幅に低下しているが、NbC の粒界占有率はほとんど変化が認められない。このことより、均質化熱処理により粒界液化率が低下するのは、NbC に比べて液化開始温度が低い Laves cluster の粒界占有率の減少に起因するものであることが推察される⁹⁾。

このことをより明確にするため、保持温度1473 K で各試験片の粒界液化率と Laves cluster の粒界占有率との関係を調査した。その結果を Fig. 14 に示す。図で、点線は粒界液化率に及ぼす NbC の粒界占有率の寄与量を示す。Laves cluster の粒界占有率が大きくなるに従って粒界液化率は直線的に増加しており、両者は良好な対応関係があることがわかる。

これらの結果より、均質化熱処理による粒界液化率の低下には、Laves cluster の粒界占有率の減少が一つの要因となることがわかった。特に、1378 K×10.8 ks で熱処理した AH' は、等温液化試験前に粒界上の Laves cluster がほぼ完全に消滅することにより粒界液化率が大幅に低下したも

のといえる。

4.2 粒界液化開始温度に及ぼす均質化熱処理の影響

粒界液化には、前述の粒界上の Laves cluster の析出量とともに、粒界自体の液化開始温度も考慮すべき要因となるものと考えられる。すなわち、粒界液化温度は粒界上の析出物のみならず、粒界上の不純物偏析等による粒界自体の融点にも依存する。

このことを検討するために、まず、粒界上の Laves cluster および NbC の析出量と粒界液化率との関係を調査した。その結果を Fig. 15 に示す。図で、各生成相の析出量あたりの粒界液化率は、保持温度1473 K で各試験片の粒界液化率を加熱前の Laves cluster および NbC の析出量で除した値とした。この図より、Laves cluster の析出量あたりの粒界液化率は NbC のそれに比べて大きいことがわかる。このことより、AH' 材が A 材および AH 材に比べて粒界液化率が顕著に減少するのは、NbC に比べて液化温度が低い Laves cluster の減少により、粒界の液化開始温度が上昇する結果とみることもできる。

しかしながら、Fig. 15 に示すごとく AH 材および A 材の Laves cluster の析出量あたりの粒界液化率は前者が3.76 %であるのに対して、後者のそれが3.94%であり、約0.18 %差がある。この事実は、均質化熱処理により、粒界上の Laves cluster の析出量の減少と同時に、残留した Laves cluster 周囲の粒界の液化開始温度も上昇することを示唆するものである。

Fig. 13 Effect of heat treatment on percentage of secondary phases on grain boundary.

Fig. 14 Relationship between grain boundary liquation and Laves cluster on grain boundary.

Fig. 15 Effect of Laves cluster and NbC on the grain boundary liquation: Percentage of grain boundary liquation (%) = (Percentage of grain boundary liquation at the peak temperature 1473 K) / (Volume of Laves cluster, NbC on the grain boundary).

Fig. 16 SEM structures and elemental scanning images of as cast A and heat treated AH.

Fig. 17 Effect of heat treatment on the S segregation.

そこで、均質化熱処理により、Laves cluster 周囲の粒界液化開始温度が上昇する原因について以下検討を行った。

前報¹⁾の結果より、Laves cluster の液化開始温度は不純物元素である S の偏析量と密接な関係があることが明らか

となっている。そこで、鑄造材 A および均質化熱処理材 AH について EPMA を用い、S の偏析について調査を行った。Fig. 16 は A 材および AH の母材に存在する Laves cluster の SEM 組織および EPMA 面分析結果である。この図より、S は主として Laves cluster 内部に偏析されていることがわかる。S の偏析量を定量的に測定するため、20 個の Laves cluster について点分析を行い、その結果を Fig. 17 に示す。この図より、AH 材が A 材に比べて Laves cluster 内部の S の偏析量が減少しており、熱処理により Laves cluster 内部の S 量が低下していることがわかる。このことより、均質化熱処理により Laves cluster の液化開始温度が上昇するのは、S の偏析量が減少すること起因するものと考えられる。

Laves cluster の液化開始温度に及ぼす S の影響は次のように考察される。前報¹⁾に示したごとく、Laves 相は凝固最終段階で Nb が濃縮された残留融液から晶出するものと考えられる。そこで、Inconel 718 合金の主成分である Ni-Fe-Cr と Nb の四元共晶点を熱力学データベース (SSOL) を用いて、計算した。その結果、共晶点の組成は Ni (28 wt%) - Fe (27 wt%) - Cr (25 wt%) - Nb (20 wt%) であることがわかった。Laves cluster を形成する直前の融点が一

Fig. 18 Pseudo-binary diagram of (Ni, Fe, Cr, Nb)-S.

共晶組成になっているか否かは不明である。少なくとも、それに近い組成であることが推察される。次に、残留融液の融点に及ぼすSの影響を明らかにするため、共晶点の組成とSとの擬二元系状態図を計算により求めた。その結果をFig. 18に示す。Sの量が増加するに従って液相線の温度が急激に低下することがわかる。

以上の結果より、均質化熱処理により粒界液化開始温度が上昇する要因としては、Laves cluster 内部のSの偏析量が減少することにより固相線の温度が平衡時の γ +Laves相の共晶点の温度に近接し、Laves cluster の液化温度が上昇することが寄与しているものと考えられる。

5. 結 言

HAZ 割れ感受性の改善策に関する基礎的知見を得ることを目的とし、鑄造材、1368 K $\times$ 5.4 ks および1378 K $\times$ 10.8 ks で熱処理した均質化熱処理材について、ロンジバレストレイン試験および等温液化試験を行い、割れ感受性に及ぼす均質化熱処理の影響を調査した。得られた結果を以下に要約する。

- (1) ロンジバレストレイン試験により得られた HAZ 割れは液化割れであることがわかった。
- (2) ロンジバレストレイン試験結果より、HAZ 割れ感受性は均質化熱処理により改善されることがわかった。また、本研究で採用した均質化熱処理条件1378 K $\times$ 10.8 ks で熱処理することにより HAZ 割れ感受性を一層改善できることが明らかとなった。
- (3) 均質化熱処理により HAZ 割れ感受性が改善されるのは、Laves cluster の粒界占有率の減少および粒界液化開始温度の上昇に起因した粒界液化率の減少が主たる原因となることがわかった。
- (4) 均質化熱処理により Laves cluster の液化開始温度が上昇するのは、Laves cluster が存在する部分の融点を下げるS量が減少することに起因するものと推察された。

謝 辞

本研究の遂行に際して、多大の御援助をいただき宇宙開発事業団に対して深く感謝致します。

参 考 文 献

- 1) 西本和俊, 禹 仁秀, 田中勝之, 白井 誠: “HAZ 割れ感受性に及ぼす結晶粒径の影響”, 溶接学会論文集 (投稿中)。
- 2) R.G. Thompson, D.E. Mayo and B. Radhakrishnan: “The Relationship Between Carbon content, Microstructure, and Intergranular Liquation Cracking in Cast Nickel Alloy 718”, Metall. Trans. A, vol. 22 (1991), 557-567.
- 3) Xiao Huang, M.C. Chaturvedi, and N.L. Richards: “Effect of Homogenization Heat Treatment on the Microstructure and Heat-Affected Zone Microfissuring in Welded Cast Alloy 718”, Metall. Trans. A, vol. 27 (1996), 785-790.
- 4) W.J. Mills: “Effect of Heat Treatment on the Tensile and Fracture Toughness Behavior of Alloy 718 Weldments”, W. J., 63-10 (1984), 237s-245s.
- 5) R.G. Thompson: “Microfissuring of Alloy 718 in the Weld Heat-Affected Zone”, J. Metals, July (1988), 44s-48s.
- 6) 禹 仁秀, 西本和俊, 田中勝之, 白井 誠: “Inconel 718 鑄造合金における HAZ 割れの特徴”, 溶接学会論文集 (投稿中)。
- 7) B. Radhakrishnan AND R.G. Thompson: “Kinetics of Grain Growth in the Weld Heat-Affected Zone of Alloy 718”, Metall. Trans. A, vol. 24 (1993), 2773-2785.