

ニオブのレーザー溶接技術*

久保 貴寛**、桑嶋 孝幸**、園田 哲也**

超伝導加速空洞等で使用されるニオブは、主に電子ビーム溶接で接合されている。本研究では、電子ビーム溶接に代わるニオブの接合法としてレーザー溶接で溶接試験片を作製し、溶接条件が断面組織や引張強さ等の機械的特性に与える影響について調べた。レーザー出力一定の条件では、溶接速度が遅くなるほど、溶接金属及び熱影響部が粗大な組織となったが、引張強さは上昇する傾向が見られた。これらは溶接時に酸素や窒素を吸収した影響によるものと考えられる。

キーワード：ニオブ、レーザー溶接、活性金属

Laser Beam Welding Technology for Niobium

KUBO Takahiro, KUWASHIMA Takayuki and SONODA Tetsuya

Key words : Niobium, Laser welding, Active metal

1 緒言

ニオブは、高融点、高耐食性のため、その特性を生かし、反応槽や配管のライニング、電極等に使用されている。また、元素の中では、高い超伝導転移温度を持ち、従来の銅より表面抵抗が小さく、高い加速性能を得られることから、超伝導加速空洞にも使用されている。この超伝導加速空洞は、現在、国内誘致が検討されている国際リニアコライダー（ILC：International Linear Collider）で、電子及び陽電子のビームの加速を行う重要な部品であり、ILCが誘致された際には、16,000～18,000台が必要になると言われている¹⁾。その為、製造コスト低減策が求められている。

この超伝導加速空洞の組立は、電子ビーム溶接（EBW：Electron Beam Welding）で接合される。この、EBWは高コストな接合法であるため、より安価な接合法の開発が求められている。ニオブの接合は、EBW以外に、TIG溶接²⁾や真空ろう接³⁾について報告されている。TIG溶接はEBWと比較してエネルギー密度が小さいため、熱影響や変形が大きく、真空ろう接は装置による寸法の制限や接合に要する時間が長いといった課題がある。そこで、高エネルギー密度で高速な溶接が可能なレーザー溶接の適用が考えられるが、ニオブをレーザー溶接した報告は、ほとんど見当たらない。本研究では、レーザー溶接によりニオブの溶接を行い、溶接条件が溶接部組織や引張強さ等の機械的特性に与える影響について検討した。

2 実験方法

2-1 供試材

本試験では、純度99.9%のニオブ板を使用した。図1に、試験片の模式図を示す。ワイヤー放電加工により、

試験片の開先を段型（幅0.5mm、厚さ0.85mm）に加工し、試験に供した。溶接は、2枚の試験片の開先を互い違いに重ね合わせて溶接した。

2-2 溶接方法

レーザー溶接には、ビーム径0.6mmの半導体レーザー装置（Laserline社製LDF6000-40VG6）を用いた。溶接条件は、出力5150W一定とし、試験片両面をアルゴンでガスシールドした。溶接速度は0.5～5.0m/minの範囲で変化させて溶接した。

2-3 評価方法

接合部の評価のために、溶接部を切断・研磨後、フッ酸：硝酸：リン酸=1：1：2の混酸で腐食して、光学顕微鏡で組織観察を行った。組織の硬さは、マイクロビッカース硬さ試験（試験力0.05kg）で評価した。また、接合したサンプルはワイヤー放電加工で、幅10mm、長さ15mmの平行部をもったダンベル型に加工し、1つの溶接条件につきサンプル数N=3で引張試験を行った。一部、

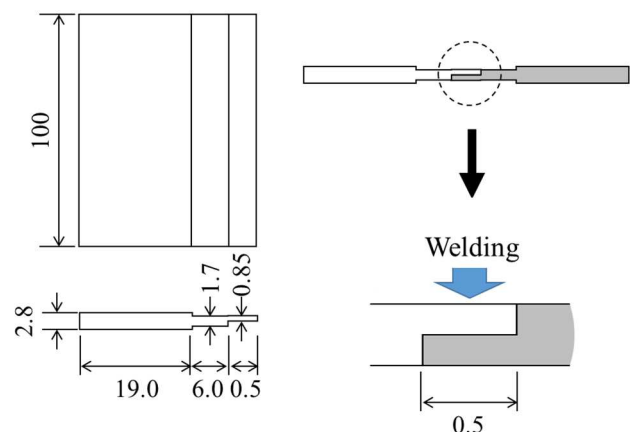


図1 溶接試験片の寸法形状

* 平成30年度技術シーズ創生研究事業（プロジェクトステージ）

** 機能表面技術部（現 素形材プロセス技術部）

溶接金属破断したため、走査型電子顕微鏡（日本電子製 JCM-6000）で破面観察した。

酸素・窒素分析は、試料を幅 1.7 mm、長さ 10 mm に切り出し、表層から 100 μm の厚さを除去するため、フッ酸：硝酸：リン酸＝1：1：2 の混酸でエッチング後、アセトン中で超音波洗浄し、乾燥した試験片を用いた。分析は、酸素・窒素同時分析装置（LECO 社製 TC-500）を用いて行った。

3 結果及び考察

3-1 溶接部外観及び断面組織

図 2 にレーザ溶接したニオブの外観及び断面写真を示す。外観は、いずれの条件においても、試料裏面まで溶け込んでおり、溶接速度が速くなるにつれて、溶け込み幅は減少した。また、酸化の影響を受けて、部分的に黄色あるいは青色に変色した。断面組織は、溶接金属 (WM: Weld Metal) と熱影響部 (HAZ: Heat Affected Zone) の結晶粒が粗大化し、溶接速度 0.5 mm/min では、1 mm 以上の結晶も見られた。ニオブは拡散係数が低く、粒界の移動度が小さいことから、熱処理により再結晶に先行して回復が進行し、粗大な組織となることが報告されている⁴⁾。レーザ溶接においても、熱影響により回復が進行し、入熱量が大きくなる溶接速度が遅い条件ほど、粗大な組織となったと考えられる。

3-2 溶接部組織の機械的特性

溶接部組織の機械的特性や溶接の健全性を確認するため、溶接部組織の硬さ試験と引張試験を行った。図 3 に、硬さ試験の結果を示す。いずれの条件でも、熱影響部は、50HV 程度と母材と同程度となったが、溶接金属

は上昇した。溶接金属の硬さは、溶接速度が遅くなるほど、上昇する傾向が見られ、3.0 m/min 以上では溶接金属の硬さは 100HV 程度となるが、1.0 m/min 以下では、180HV 程度まで上昇した。

図 4 に溶接金属の硬さと引張強さの関係を示す。いずれの条件でも、母材より大きい引張強さとなった。溶接金属の硬さが大きくなると、引張強さも上昇する傾向が見られた。引張試験で溶接金属破断となった破面の形状が溶接速度で異なった。図 5 に破面の SEM 写真を示す。溶接速度 5.0 m/min では、延性的な破面となっていた。破面の一部に開先が残っていた。これは、溶接速度が速いため、部分的に十分な溶け込みが得られなかったことが原因と考えられる。一方、溶接速度 0.5 m/min の破面は、脆性的な破面となっていた。これは、溶接金属が硬くなったことで、延性が低下したためと予想される。溶接速度 1.0 及び 3.0 m/min の条件では、すべて母材破断となった。

以上の結果から、引張試験で母材破断となるニオブのレーザ溶接条件を確認した。ここで、溶接部組織と引張強さの関係について着目すると、図 2 から分かるように、溶接速度が遅くなるほど、溶接金属及び熱影響部の組織が粗大化したが、引張強さは上昇する傾向が見られた。ニオブの TIG 溶接において、溶接金属中の酸素及び窒素濃度が高くなるほど、溶接金属が硬く、また引張強さが上昇することが報告されている^{2,3)}。レーザ溶接でも、溶接金属の酸素あるいは窒素の上昇が原因であると考えられる。図 6 に、溶接速度 1.0 m/min の酸素・窒素分析した結果を示す。酸素濃度に着目すると母材 (BM: Base Metal) は 50 ppm 程度であり、熱影響部も同程度の値となった。

Welding speed [m/min]	Appearance of weld bead		Cross-section image
	Face bead	Back bead	
0.5			
1.0			
3.0			
5.0			

図 2 溶接試験片の外観及び断面写真 (出力: 5150 W)

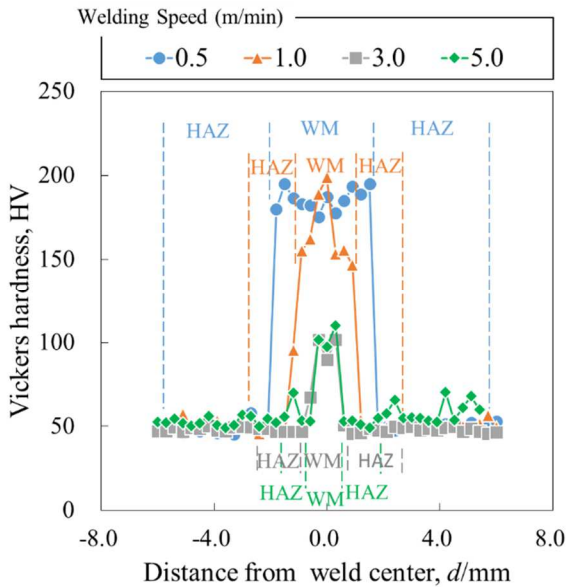


図3 溶接中心からの距離と硬さの関係

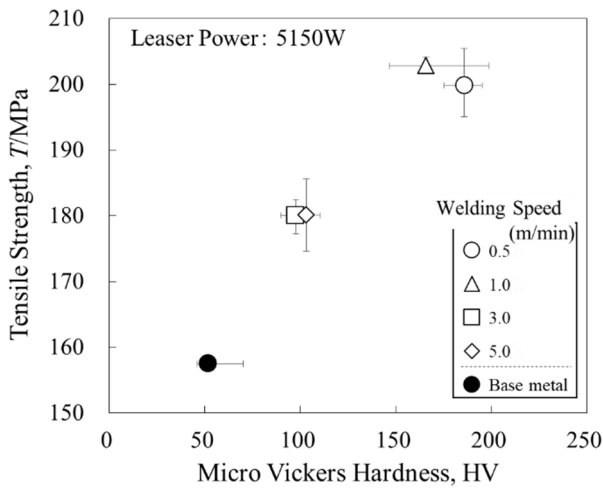


図4 溶接金属の硬さと引張強さの関係

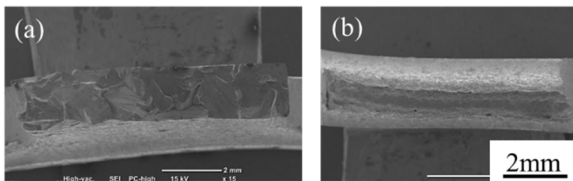


図5 溶接金属破断面SEM写真
(出力5150 W, 溶接速度(m/min) ; (a) 0.5, (b) 5.0)

一方、溶接金属では、260 ppm 以上の値に増加した。窒素についても、同様に溶接金属で著しく増加していた。溶接速度が遅くなると、溶接中の溶融時間も長くなり、溶接金属中の酸素や窒素の量も増加するため、溶接金属

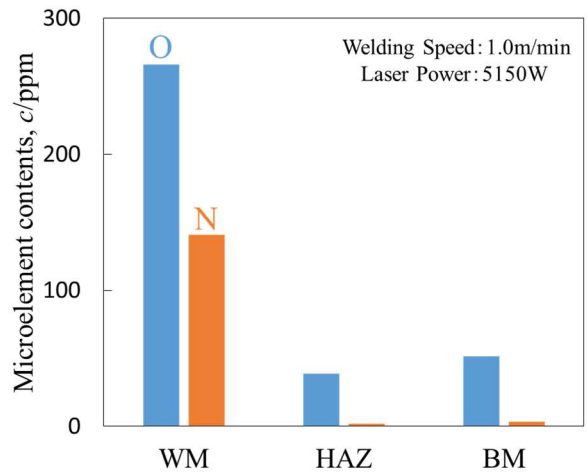


図6 酸素・窒素分析の結果

の硬さと引張強さが上昇したと考えられる。また、溶接金属の組織が粗大化したにも関わらず、引張強さが上昇したのは、結晶粒径の粗大化よりも、酸素や窒素の吸収による影響が大きいためと考えられる。

4 結 言

ニオブにレーザー溶接を施し、溶接条件がニオブの溶接部組織や強度等に与える影響について調査した。

- (1) レーザ出力 5150 W、溶接速度 1.0 及び 3.0 m/min の条件で、引張試験で母材破断となる溶接が可能であることを確認した。
- (2) 溶接速度が遅くなる（入熱量が大きくなる）ほど、溶接金属及び熱影響部の組織が粗大化した。
- (3) 溶接金属組織が粗大化したにも関わらず、引張強さは溶接速度が遅くなるほど上昇する傾向が見られた。これは、酸素や窒素の吸収による影響が大きいためと考えられる。

文 献

- 1) 佐伯学行, “KEK における ILC のための超伝導 9 セル空洞製造の研究”, 高エネルギーニュース, Vol.32, No.3 (2013), pp.178-184
- 2) 鈴木春義, 橋本達哉, 松田福久, “ニオブとタンタルの電子ビーム溶接と TIG 溶接に関する研究”, 溶接学会誌, Vol.32, No.3 (1963), pp175-186.
- 3) 依田連平 “Nb について(I)”, 日本金属学会誌, Vol.3, No.7 (1964), pp.347-357
- 4) 山口裕太, 泉拓水, 湯浅元仁, 宮本博之, 山中将, “超伝導加速空洞用高純度ニオブの再結晶挙動と集合組織”, 日本金属学会誌, Vol.82, No.7 (2018), pp.262-268