

溶接チタン管の高速造管技術と高強度チタン管

宮本淳之(工博)*・鈴木栄一**・高村博之**

*鉄鋼カンパニー・チタン技術部 **神鋼特殊鋼管株式会社

High-speed manufacturing Process of Welded Titanium Tubes and High-strength Titanium Tubes

Dr. Yoshiyuki Miyamoto・Eiichi Suzuki・Hiroyuki Takamura

New technologies recently developed by Kobe Steel include a high-speed tube manufacturing process that was developed from original Kobelco techniques such as "multi-torch TIG welding" and "a symmetrical forming". This new process produces tubes at over 10 m/min., the highest speed in the world. The typical mechanical properties of trial high-strength titanium tubes made of KS85, KS100 and Ti-3Al-2.5V are also reported in this paper. These kinds of tubes are expected to be used in new applications other than conventional heat exchanger tubing.

まえがき = チタンの主力製品である溶接チタン管は、海水を冷却水とする発電所の復水器や海水淡水化装置、あるいは化学プラントの伝熱管として大量に使用されている。

本製品の第一次ブームは 1975 年以降 1980 年代にあった。この時期には、火力、原子力発電所において世界的にチタン管の需要が定着し、中近東の海水淡水化装置にも大量のチタン管が使用された。それ以降の需要はむしろ安定的に推移してきたが、最近、国内の発電所の建設計画が相次いでおり、一方では東南アジアや東欧でも発電所建設が増えるとの予測から、従来より一段上の需要増が見込まれている。また、最近の動向として、従来の JIS 2 種チタン管とは別に、伝熱管以外の用途に高強度チタン管を検討する例が増えている。

以上のような市場環境変化に対して、当社では 1978 年に造管ラインを従来の 1 基から 3 基に増設して生産能力を増強した。さらに、今回の需要増にあたっては、造管速度を大幅に上昇させることで能力アップを果たし対応している。造管高速化への取り組みでは、従来の量産速度 3.5~4m/min を世界トップレベルの 10m/min 程度にまで高めることを目標とした。きわめて大幅な高速化ゆえにいくつかの困難な問題点に直面したが、「多電極 TIG 溶接法」や「非対称成形法」など新しい発想の独自技術を開発・実用化することで、高度な高速造管プロセスを完成させた。

本稿では、以上のような高速造管プロセスの概要を紹介するとともに、最近注目され始めた高強度チタン溶接管の特性調査結果についても触れることとする。

1. 溶接チタン管の高速造管技術

1.1 高速化にあたっての問題点

溶接チタン管は、たとえば第 1 図に模式的に示すような造管ライン上で帯板を連続的にロール成形し、TIG (Tungsten Inert Gas) 溶接法によりシーム溶接して製造される。従来から使用されているもっとも基本的なライン構成は、ブレイクダウンロール(4 段)、フィンパスロール(3 段)、サイジングロール(4 段)、および単一のスクイズロールと単電極 TIG 溶接の組合わせであるが、このような基本的な構成で造管の高速化を図った場合、以下のような問題点に直面した。

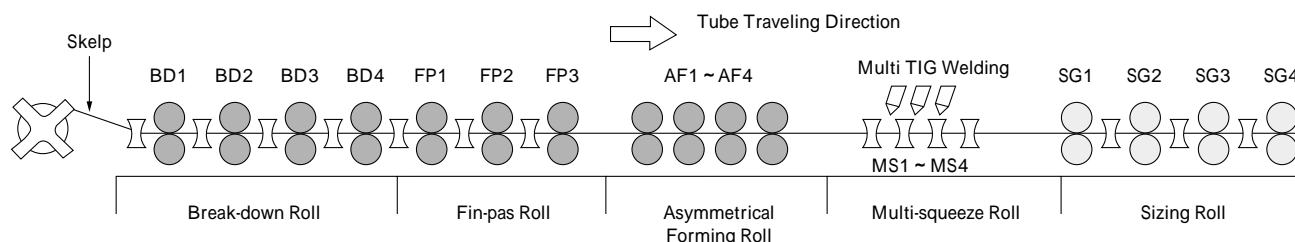
TIG 溶接での溶け込み不良またはビードアンダーカットの発生

ビード部マイクロ欠陥の発生

ビード形状不良による歩留まりの低下

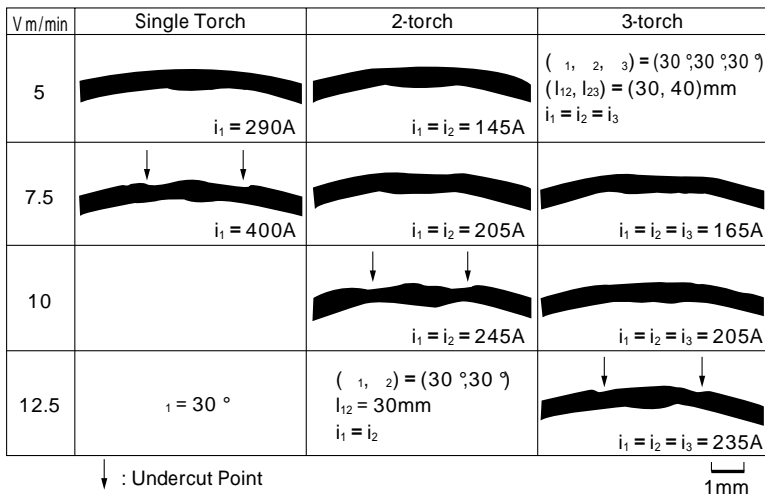
以上の 3 要因のうちどの項目が造管速度を律するかにについては溶接管の肉厚に依存し、一般に厚肉管から薄肉管になるにしたがって、問題が顕在化してくる。結果的に、もっとも代表的な 25.4 x t 0.5mm 管で見ると、従来の量産ベースでの造管速度は 3.5~4m/min が限界となっていた。

以上のような従来技術に対して大幅に造管速度を向上させるためには、上記 ~ の問題点の克服が必須の条件となる。そこで当社では、最終的に 10m/min 級の造管速度を目標として、~ の問題点を解決するための独自技術の開発に取組み、以下に示すような高速造管プロセスの開発・実用化に成功した。



第 1 図 高速造管ライン模式図

Fig. 1 Schematic diagram of the high-speed tube making line



第2図 ビード断面形状に及ぼす電極数および造管速度の影響
Fig. 2 Effects of welding velocity and the number of torches on cross-sectional bead shape

1.2 多電極 TIG 溶接法

1.2.1 ビードアンダーカットの抑制

チタンの造管では単一の電極により TIG 溶接をおこなうのが通常である。しかし、この方法で単純に高速化していくと、ビード内面までの溶け込み不良やビード表面のアンダーカットの問題（前記）が生じてくる。高速溶接では高いアーク電流が必要となるが、低過ぎると内面ビードが形成されなくなり、それを避けるために電流を上げるとアーク圧力が過大になってアンダーカットが発生しやすくなる。

第2図に 25.4 × t 0.7mm 管を速度を変えて造管した場合のビード断面形状を示す。単一電極と、2 電極または 3 電極をシリーズに並べて溶接した場合、それぞれ 7.5, 10, 12.5m/min の速度でビード外表面に明瞭なアンダーカット発生が認められる（矢印で示す）

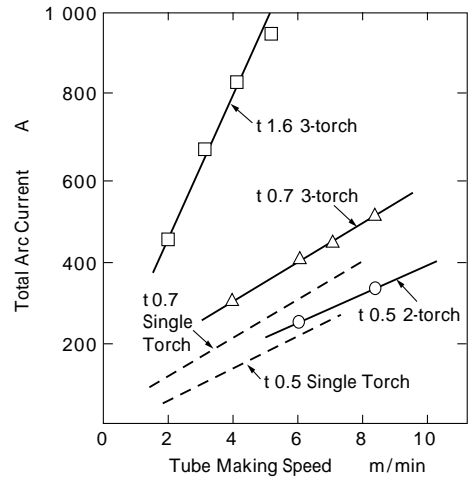
アンダーカットは 1 電極あたりの溶接電流が過大になると発生してくるので、電極数を増加させて入熱を分配させることがアンダーカットの抑制と溶接速度向上にきわめて有効であることが明らかである。とくに、3 電極溶接をおこなった場合は 10m/min でもアンダーカットの発生が認められず、溶接の高速化に有効であることがわかる。

1.2.2 適性溶接電流

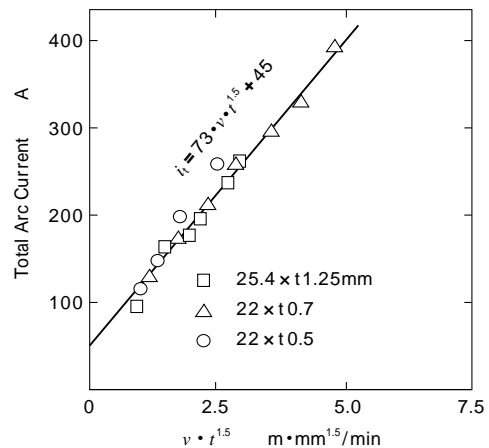
2 電極および 3 電極 TIG 溶接で健全なビード形状をえるための造管速度と適正トータル溶接電流との関係を第3図に示す。同一肉厚のチタン管を造管する場合のトータル電流は、破線で示した単一電極にくらべて若干高くなる。しかし、電極数が増えるほど 1 電極あたりの電流が大幅に減少するので、上述のようなアンダーカットの抑制効果がえられる。なお、肉厚の異なる溶接管に対する適正トータル溶接電流は、第4図に示すように、次式で与えられることが明らかになっている。

$$i_t = 73 \cdot v \cdot t^{1.5} + 45$$

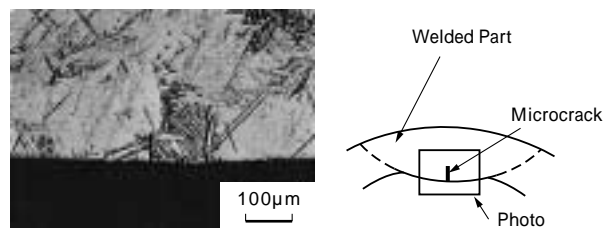
ただし、 i_t : トータル溶接電流 (A), v : 造管速度 (m/min), t : 肉厚 (mm)



第3図 多電極 TIG 溶接における造管速度と適正トータル溶接電流の関係
Fig. 3 Relationship between tube making speed and optimum total arc current under multi-torch TIG welding ($i_1 = i_2 = i_3$)



第4図 多電極 TIG 溶接における $v \cdot t^{1.5}$ と適正トータル溶接電流の関係
Fig. 4 Relationship between $v \cdot t^{1.5}$ and optimum total arc current under multi-torch TIG welding (v : tube making speed, t : tube thickness, $i_1 = i_2 = i_3$)

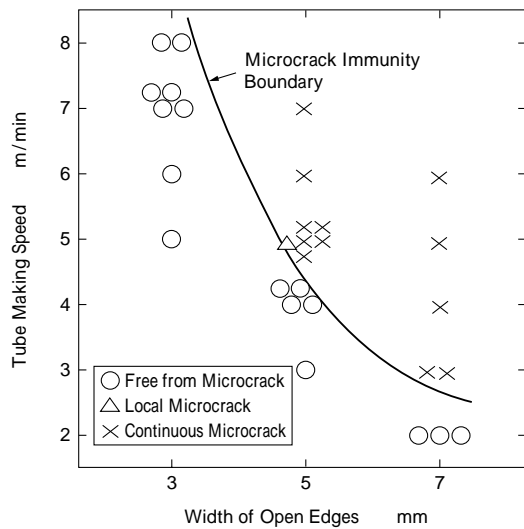


第5図 ビード部マイクロ欠陥の例（横断面マイクロ組織）
Fig. 5 Example of microcrack on weld bead (transverse micro-structure)

1.3 非対称成形法

1.3.1 ビード部マイクロ欠陥の発生

チタン管で高速造管をおこなうと管内面側、ビード中央部に第5図のようなマイクロ欠陥が発生することがある。この種の欠陥は、造管速度と溶接直前のオープン管のスプリングバック量（オープンエッジ開き量で評価）が大きくなると発生することが明らかとなっている。たとえば 22 × t 0.7mm 管では第6図のようにマイクロ欠陥



第6図 22×t0.7mm チタン管のマイクロ欠陥発生状況
Fig. 6 Microcrack/Immunity region in case of 22×t0.7mm tube

の発生条件を明瞭に区別できる。造管速度を速くした場合、第7図に模式的に示したように溶融プールが長くなり、最終凝固点がスクイズロール中心から後方に離れるために、ここにスプリングバックによる円周方向応力が働いてマイクロ欠陥が発生してくる。したがって、マイクロ欠陥を防止して造管速度を上げるには、溶接前段での成形でスプリングバックを極力抑えておくことが重要である。

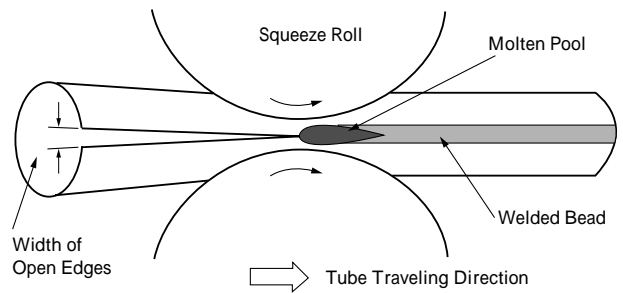
1.3.2 非対称成形法の概要

溶接管の成形でスプリングバックを抑制する方法として、まったくユニークな非対称成形法を考案した。第8図は非対称成形用ロール群を模式的に示したものであり、第9図には非対称孔型形状の詳細を示した。本プロセスでは、素材の左右の領域を交互に小半径に成形することにより、溶接前のオープン管のスプリングバックを抑制した。第9図の R_2 で示す領域が小半径に成形する領域であるが、 R_2 の設計値としては、スプリングバック後に素材が製品の外周半径(R_1 に一致)となるような曲げ半径見込み値を採用した。第9図から明らかのように、小半径で成形する領域が全円周の90%以上と非常に広範囲に及ぶことが非対称成形の最大の特徴である。

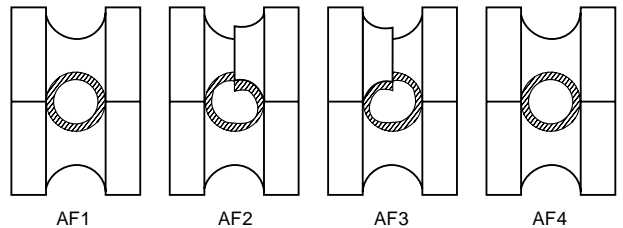
第8図に示す4段のロールはスクイズロールの直前、第1図のAF1~AF4に示す場所に配置した。

1.3.3 ミクロ欠陥防止効果

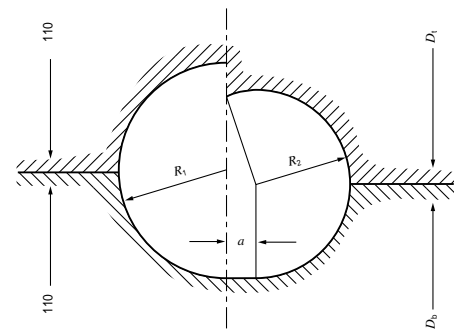
フィンパスロールの圧下を強くしてスプリングバックを抑制する従来の成形法と、開発した非対称成形法で成形したオープン管の断面形状を第1表に示す。非対称成形法をもちいると従来法よりも小さなスプリングバック()を達成している。22×t0.7mm管の例では=2.5mmとなり、第6図のマイクロ欠陥発生限界と対比してみても、10m/min級の造管速度に十分耐えうる高速化技術であることがわかる。また、第1表によると、オープン管の形状は従来法の縦長($d_y/d_x > 1$)から非対称成形では横長($d_y/d_x < 1$)となっており、これがスクイズロール近傍での素材エッジの突き合わせ形状を改善



第7図 溶接管プロセスの溶接域近傍模式図
Fig. 7 Schematic diagram of welding zone in tube making process



第8図 非対称成形ロール群の概略図
Fig. 8 Illustration of asymmetrical forming rolls



第9図 非対称成形ロールの caliber 形状
Fig. 9 Caliber configuration of asymmetrical forming roll

第1表 従来法および非対称成形法で成形したオープン管の断面形状 (25.4管)

No.	Forming Condition		Geometry of Open Tube		Free Open Tube
	Thickness mm	Forming Process	mm	d_y/d_x	
1	0.5	Conventional	6.0	1.05	
2		Asymmetrical	4.5	0.96	
3	0.7	Conventional	4.0	1.02	
4		Asymmetrical	3.0	0.95	

し、ひいては高速造管でのビード形状改善にきわめて有効なことが明らかになっている。

1.4 造管ラインの更新

当社では1997年以降2基の造管ラインの更新をおこなってきた。更新にあたっては、上述のような開発技術を盛り込むことはもちろん、高速化によって顕在化が予想される、ビード品質や歩留まりの低下を防止するための対策を十分考慮したものとした。スタンド構成については第1図に示したとおりであるが、非対称成形をおこなうために、フィンパスロールとスクイズロールの間に4段の水平ロールスタンドを設けた。また、多電極溶接をおこなうために溶接電源とトーチを増設するとともに、複数のトーチ下でエッジ突き合わせを保持するため

第 2 表 高強度チタン溶接管の代表的な機械的性質

Table 2 Typical mechanical properties of high strength titanium welded tubes

Tested Specimen	Mechanical Properties		KS85		KS100		KS3-2.5	KS50
			As-welded	Annealed	As-welded	Annealed	As-welded	As-welded
Skelp	1) Tensile Test 0.2%PS TS EI.	N/mm ² N/mm ² %	491		622		531	259
			645		765		693	393
			24		20		16	41
Welded Tube	2) Tensile Test 0.2%PS TS EI. 3) Flattening Test : Min. Height mm 4) Flaring Test : Limiting Expand Ratio 5) 180° Reverse Flattening Test	N/mm ² N/mm ² %	546	500	670	625	626	346
			684	670	826	795	744	421
			26	35	22	26	21	38
			14	13	18	19	12	4
			1.24	1.26	1.09	1.12	1.3	1.4

: Comparative Material Commonly Used

: No Crack

に多段スクイズロールを適用した。ビード品質，歩留まり対策としては，機械精度と駆動モータの速度制御精度を極力上げるような方式を選択し，成形荷重や外径測定センサなど操業監視装置についても積極的に取入れ，良好な結果をえている。

2. 高強度チタン溶接管

2.1 高強度溶接管の試作

従来のチタン溶接管には大部分 JIS 2 種の純チタンが使用されていたが，近年，高強度チタン溶接管に対する引き合いが多くなってきている。高強度管の造管ではスプリングバックが大きくなるために，ビード部マイクロ欠陥やビード形状不良がとくに発生し易くなる。また，造管後に管の曲がりをも十分に矯正できるかどうか懸念される。このような観点から，当社のメニューにある以下の 3 種類の材質について溶接管を試作し，基本的な機械的特性を調査した。

KS85 管 35 × t 1.0mm : JIS 4 種相当

KS100 管 35 × t 1.0mm : 当社独自の低合金高強度チタン

Ti-3Al-2.5V 管 38 × t 1.0mm

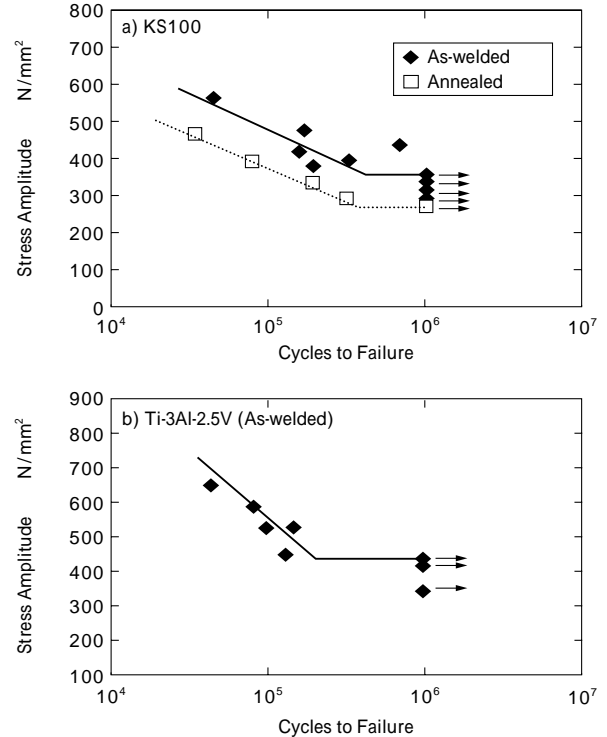
試作にあたっては前述のようなスプリングバック対策技術を適用し，曲がり矯正にはロータリー式のロール矯正装置を使用した。3 種類の材質とも特別な問題もなく製造できるようになっている。

2.2 高強度溶接管の特性

3 種類の高強度溶接管の機械的特性を，もっとも代表的な KS50 管 (JIS 2 種相当) のそれとともに第 2 表に示す。第 2 表中には溶接管の素材となる帯板の引張性質も同時に示した。また，溶接管に繰り返し曲げ応力を負荷して実測した疲労特性の結果を第 10 図に示す。これらの結果から，3 種類の高強度溶接管の主な特性は以下のように順位付けできる。

- ・強度レベル : KS85 < Ti-3Al-2.5V < KS100
- ・引張伸び : Ti-3Al-2.5V < KS100 < KS85
- ・押広げ拡管率 : KS100 < KS85 < Ti-3Al-2.5V
- ・疲労強度 : KS85 < KS100 < Ti-3Al-2.5V

KS100 は強度レベルがもっとも高く，Ti-3Al-2.5V は溶接部の延性と疲労特性に優れるとの特徴が見出せる。使



第 10 図 高強度チタン溶接管の代表的な疲労特性

Fig. 10 Typical fatigue property of high strength titanium welded tubes

用条件やコストを考慮して，以上のような特徴が生かせる用途への適用を提案していく予定である。

むすび = 当社の最近の溶接チタン管関連技術として，量産ベースで完成させた高速造管プロセスと，新開発の高強度チタン管について紹介した。

高速造管プロセスについては，独自に開発した「多電極 TIG 溶接法」および「非対称成形法」を基本とするもので，造管ラインの改良・更新も含めて，世界に例のない 10m/min 級の造管速度を達成している。関連特許取得は 7 件であり，各種ノウハウを蓄積後 1997 年から量産への適用を開始している。

高強度チタン管については 3 種類の試作管の特性を示した。自転車や車椅子のフレーム，スポーツ用品など，今後新しい用途で需要が拡大していくものと期待している。