

Ni-Ti合金細線の接合に関する技術支援と成果

北海道職業能力開発大学校

廻 文 広
 瀧 田 大 亮
 中 村 典 正
 上 村 友 弘
 福 地 正 明
 村 田 光 昭*

Technical Supports and Results on High Pressure Upset Welding of Ni-Ti Alloy Fine Wires
 Fumihiro MAWARI, Daisuke TAKITA, Norimasa NAKAMURA Tomohiro UEMURA,
 Masaaki FUKUCHI and Mitsuaki MURATA

要約 地場企業に対する相談援助の一例として、Ni-Ti合金細線の接合に関する技術支援について、支援の背景と内容および接合機の試作とそれによる接合結果の評価などを報告した。接合機の試作や接合線の評価はその一部をアビリティコースの応用課題や専門課程の総合制作実習のテーマとして取り上げて実施した。試作接合機は細線接合部の組織損傷が少ない高加圧の突合わせ抵抗圧接を可能にしている点に特徴がある。これまでは接合前に細線端面を平滑加工したあと酸化防止環境中で接合作業を行っていたが、加圧力が充分高い場合には、不活性ガスを使わなくても、また細線端面が平坦でないニッパ切断端面のままでも直接接合できるなど、これまでの接合工程を簡略化しても製品としての使用に充分耐える接合強度を持つことが明らかになった。

I はじめに

本校周辺には小樽市銭函工業団地をはじめ中小規模の工業団地が幾つか立地しているが、これらの団地内企業を含めた周辺企業から本校に寄せられる技術開発や製品開発に関わる支援依頼のニーズは少なくない。

また、製品の自社管理が必要になったPL法施行後は、本校所有の測定器や試験機などを中心とした機器設備の利用ニーズも増えている。これらのニーズに如何に対応するかは本校の存在意義と無関係ではなく、これまでも能力開発セミナーや総合制作実習（卒業研究）のテーマとして取り上げ、種々のニーズに応えられるように努力してきた。特に、学生の関与する専門課程の総合制作実習や応用課程の開発課題実習でこの様なニーズを取り上げることは、地域産業界が抱えている諸問題の一つに学生自身が直接触れる機会にもなり、就業のための実学教育訓練としても効果的である。地域産業界の本校に対する期待と能力開発セミナーや総合制作実習との関わりについて、生産技術科が主に関係したテーマは、職業能力開発に関する相談援助事

例としてこれまでもその一部を報告してきた^{(1)~(6)}。ここでは、Ni-Ti合金細線の接合に関する相談に応えた接合機を試作するなどの技術支援について、支援の背景、内容、取り組み方法、および得られた成果などを報告する。

II 技術支援の背景と内容

Ni-Ti合金細線の接合加工を外製から内製に切り替えてつある当該企業では、現在自社製小型接合機を用いた手動による単発接合を行っており、製造ラインの不具合を改善しながら将来的には生産性向上のためにこの製造ラインの自動化を進めたいと考えている。本校生産技術科ではこれまでもステンレス細線など高合金細線の接合に関する種々の相談を受け、可能な内容については技術的な支援をしてきた。本報に関わる具体的技術支援の内容は、現状の製造ラインを維持したまま改良や自動化を進めるために新たにNi-Ti合金細線用接合機を試作することであった。その際、金属箔や細線の接合に都合が良いとされるマイクロスポット

溶接電源を組み込むこと、その使用法や使用条件を把握して当該企業に提供することなども含まれた。したがって、接合機を試作するだけでなく、接合条件や接合後の細線（これを接合細線と称する）について引張り強度など接合細線の特性を調べることも支援内容になった。

形状記憶合金は「形状記憶効果」と「超弾性」という2つの特性をもっており、この特性が、パイプの継ぎ手、エアコンのフラップ、歯列矯正用やブラジャーのワイヤ、メガネのフレーム、携帯電話のアンテナ等に応用されてきた。特に医療分野では、超弾性のしなやかさが人体に適しているため、ステント、リーマ、カテーテル挿入用ガイドワイヤ等その応用開発が近年盛んに行われている。現在最も実用化されている形状記憶合金はNi-Ti合金（商品名ニチノール、50at%Ti組成近傍で各種）であるが、一般に難加工材として知られており、例えばその接合に関する技術ノウハウを持つ企業はごく一部に限られている。本支援の対象となったNi-Ti合金細線は加工硬化した超弾性線材で、当該企業では本校の支援により独自の技術ノウハウを持つことを期待した。

Ⅲ 接合計画と圧接機の試作

溶接・接合技術は製造分野での構造化を支える最も重要な基盤技術の一つである。特に溶融接合は機械的接合法に代わって中心的な接合技術になったといわれているが、鉄道レールや鉄筋コンクリート用棒鋼の接合の95%以上が接合部の組織損傷が少ないガス圧接になってきている。溶かす溶接では、溶融部の凝固組織とそれに隣接する熱影響部が母材とは異なる材質となり、これが原因で接合部の破損が生じる可能性が考えられる⁽⁷⁾からである。このような理由で、本報で対象としたNi-Ti合金線の接合ではできれば溶かさない溶接、例えば圧接様の接合を計画した。

当該企業が行っている細線接合法は突き合わせ抵抗溶接であるが、接合前に切断細線端面を平滑に仕上げ、端面間の接触を良くすると共に、接合時には端面の酸化を防止するために不活性ガス(Ar)中で接合作業を行うなど、接合工程が複雑になっている。本校試作機では今後の省力化・自動化を進めやすいように、接合工程簡略化のため不活性ガスを使わずに細線の切断面を直接接合することにした。この為には平滑でない端面が押し潰され、できれば融解せずに接合する高加圧圧接を接合原理とした。この接合の様子を図1に概

念図として示したが、この接合過程では(1)から(4)の状況が瞬間的に生じる。(1)平滑でない細線端面は(2)加圧・通電により接触・発熱し、(3)温度上昇による軟化と加圧力により塑性流動する。(4)この塑性流動により接合端面にある酸化被膜などの汚染物は細線外に排出される。これが実現するならば端面平滑工程と不活性ガスは不要になり、溶融現象が生じなければ極めて健全な接合が可能になるであろう。接合部の再結晶など組織損傷を抑えるには加熱温度を低くし、加圧力を高くする必要がある。

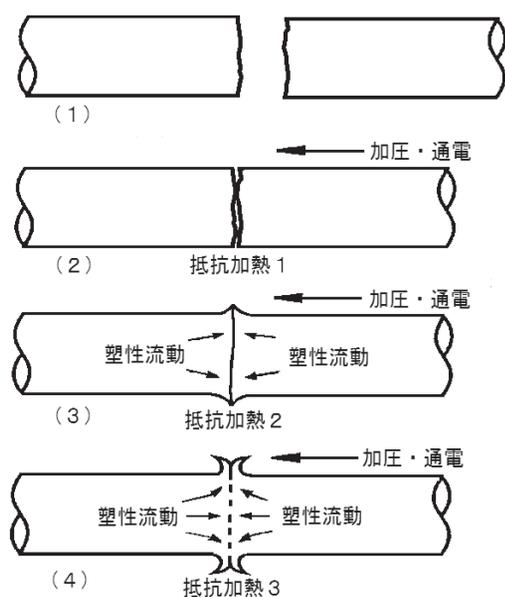


図1 突き合わせ抵抗圧接の概念図

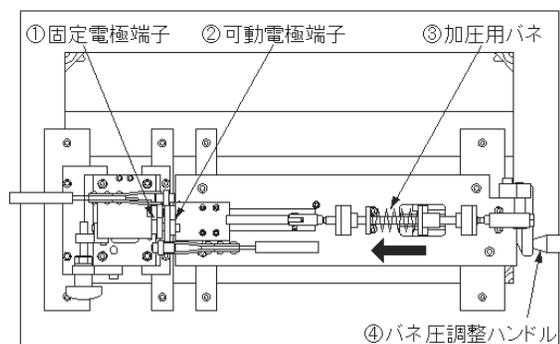


図2 高加圧圧接機の構造図(平面図)

当該企業で稼働中の接合機を参考に図面を起し、不具合部分を改良して製作した細線用高加圧圧接機の構造図(平面図)を図2に示す。図中の①は固定電極端子で②は可動電極端子である。これらの電極端子は、トグルクランプにより細線を締固固定する端子にもなっている。また、突き合わせ位置を微調整できるように固定電極①は前後に、また可動電極②は上下に微

動可能な構造とした。電極材にはCu-W合金を使用した。電極間距離は細線の加熱温度や塑性流動量に関係し極めて重要であるが、試作機では $0.7\pm 0.1\text{mm}$ とした。

圧接動作は以下の手順による。①と②の電極端子に細線をセットした後、③のバネ圧をハンドル④で調整して突き合わせの加圧力を設定し、電極②の細線を電極①の細線に押し付ける。この状態で電流を流し、細線の抵抗加熱下で加圧接合する。抵抗加熱の電源には(株)セイワ製作所製のトランジスタ制御マイクロスポット溶接電源を用いた。この電源は出力を $0\sim 9.99\text{V}$ 、通電時間を $0\sim 9.99\text{ms}$ の範囲で設定でき、金属箔や極細線の溶接に開発された電源とされる。

部品加工の一部と組立て作業はアビリティコース(平成16年度の機械技術システム科)の機械加工実習の応用課題とし、製品を組み上げる過程の一部を実際に体験させながら試作機を完成させた。試作機の性能や接合条件の調査および接合線の強度等の評価については平成17年度の総合制作実習のテーマとし、生産技術科の4名の学生が取り組んだ。総合制作実習では当該企業技術者と意見交換しながら試作機の不具合の調整やトラブル対策として一部部品の再加工と再組立ても行った。試作機をパソコン用テーブル(700mm×700mm)の上に配し、実機として使用可能な状態に仕上げた細線用高加圧圧接機を図3に示す。

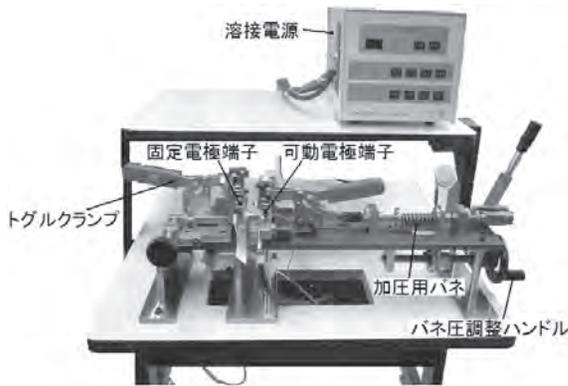


図3 試作した細線用高加圧圧接機

IV 接合条件の調査と接合線の特性評価

線径 $\phi 0.67\text{mm}$ の加工硬化型超弾性 Ni-Ti合金線を用いて試作機の接合能力検査を行った。細線端面はニッパ切断面とした。接合条件は負荷電圧 $2\sim 10\text{V}$ 、通電時間 $0.5\sim 5\text{ms}$ とし、Arガスは使用せず大気中で加圧接合した。加圧力は $57\sim 151\text{N}$ の範囲とした。

接合細線は巻き付け試験、引張り試験、組織観察に

より評価した。巻き付け試験は初期接合性評価法として行い、接合直後の細線を $\phi 15\text{mm}$ の丸棒に巻き付けて接合部破断の有無を確認した。破断しない接合細線は接合良好線と称し、引っ張り試験によりその接合強度を調べた。試験機は島津製作所(株)製オートグラフ2000Aとして最大荷重 4903.325N (500kgf)のロードセルを使用した。掴み具のチャック間距離は50mm、クロスヘッドスピードは $2\text{mm}/\text{min}$ とした。また、接合状態などを検討する目的で組織観察を行った。全体の様子を観察する場合は低倍率の実体顕微鏡(株)ニコン製SMZ-2T)を使用した。高倍率で表面の凹凸などを細部まで観察する場合には走査型電子顕微鏡(SEM:日本電子(株)製JSM-T220)を加速電圧 25kV で使用した。

1. 接合条件の検討

同一接合条件の接合数に対して得られた接合良好線の割合をその条件の接合率として接合率の高くなる最適条件を検討した。接合条件として加圧力、負荷電圧、通電時間の3つのパラメータと接合時に流れた電流を主な対象とした。接合時に流れた電流は溶接電源に観測された値を使用した。また、各条件での接合本数を5本とした。

負荷電圧を 5V 、通電時間を 0.8ms とした場合の加圧力と接合率の関係を図4に示す。加圧力が高い程、接合率も高い。加圧力を本試作機の実用限界に近い 166.7N とし、通電時間を 0.8ms とした場合の負荷電圧と接合率の関係を図5に、また負荷電圧を 5V とした場合の通電時間と接合率の関係を図6に示した。負荷電圧は $5\sim 10\text{V}$ で良好な結果が得られた。また通電時間はこれらの条件では 1ms 前後で良好な結果が得られた。

なお、細線に流れた電流は $700\sim 800\text{A}$ の時に接合率が高いことが分かった。加圧力が高いほど良い結果が得られたのはニッパ切断面が塑性流動して接合するのに高加圧力が効果的で、接合をより容易にしたからと考えられる。また、通電時間に最適値が存在するのは通電時間が短すぎると接合に必要な温度上昇が少なく、長すぎると温度が上昇し過ぎ、溶融も含めた組織損傷が大きくなり過ぎるからと思われる。電流が $700\sim 800\text{A}$ で良好な接合が行われたのも同じ理由によると考えられる。

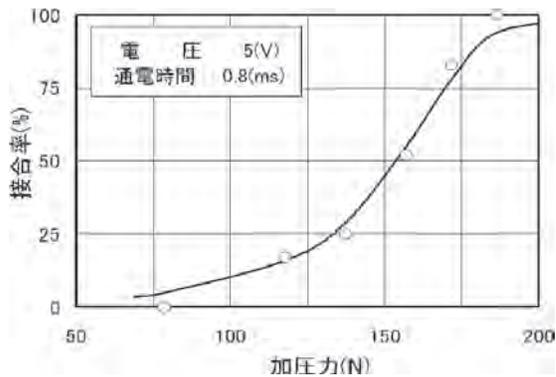


図4 加圧力と接合率の関係例

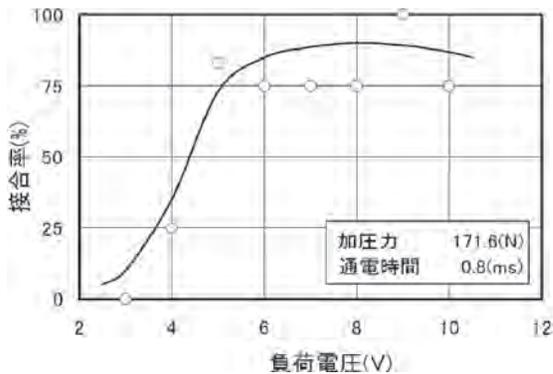


図5 負荷電圧と接合率の関係例

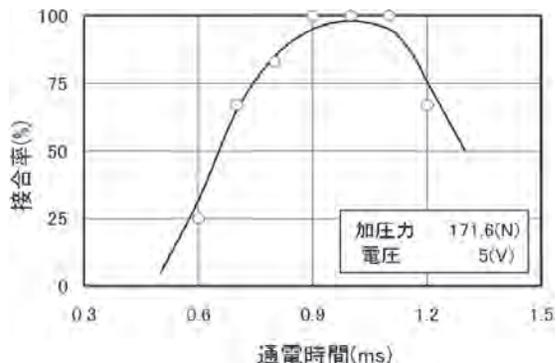


図6 通电時間と接合率の関係例

2. 接合線の引張り挙動

引張り試験により記録紙の荷重-伸び曲線に観察された加工硬化Ni-Ti合金細線の引張り挙動の一例を図7に示した。(a)図は接合線で、(b)図は母材の無接合線である。縦軸の尺度が違うので、(b)図には(a)図の接合線の荷重-伸び曲線も重ねて点線で示し、比較しやすくした。接合線(a)図は137N(14kgf)近辺(点線で囲んだ部分)に軟鋼の降伏点に似た現象が現れ、約186N(19kgf)で破断している。接合線の平均的な破断強度は137~196N(14~20kgf)でバラツキはあったが、これらの値は当該企業が期待している接合強度108N(11kgf)を十分に上回っている。図7(b)に示した無接合細線(母材)の変形挙動には超弾性特有の水

平段挙動⁽⁸⁾は加工硬化に隠されて目立たないが、392N(40kgf)近辺にその名残が多少現れていることや破断強度が588N(60kgf)弱であることなどが見て取れる。接合線には降伏点様の現象が見られ、その破壊強度は母材の1/3程度である。後述するように接合線の破断は全て接合部で生じているから、接合線の強度が母材より低いのは、接合強度が低いか熱影響による母材強度の低下によると考えられる。熱影響により加工硬化の回復が生じるなら接合部の母材強度は低下し、水平段挙動が降伏点様の現象となって現れても良いであろう。今後の検討課題である。

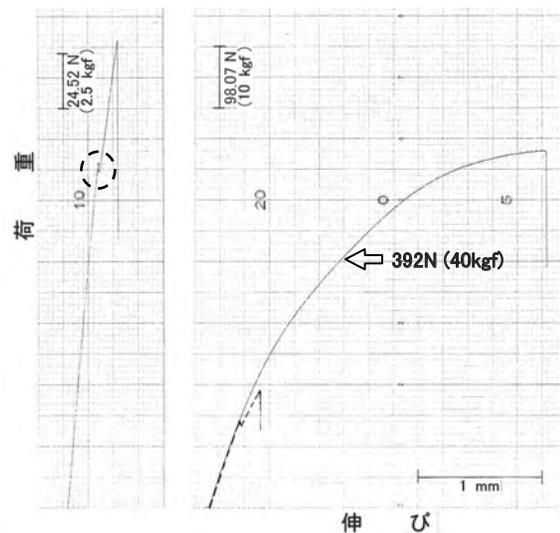


図7 加工硬化Ni-Ti合金細線の荷重-伸び曲線

3. 組織観察

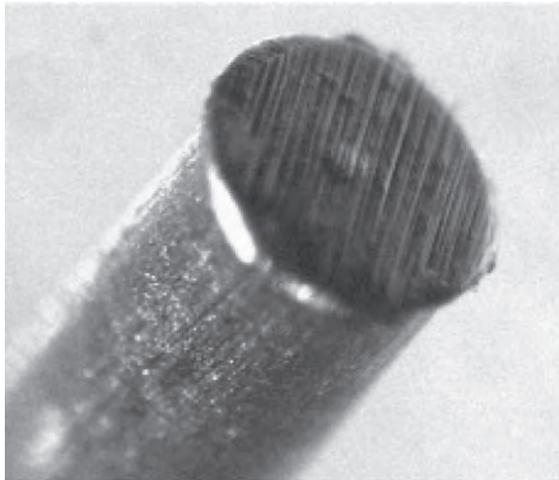
3-1 突合せ端面の形状

接合前の細線端面について、その実体顕微鏡写真を図8に示した。(a)は平滑面仕上げであり、(b)はニッパ切断面である。(b)に示したニッパ切断面は、脆性的な破面形状で比較的平滑である。この切断面形状のために、接合時の突合せ位置のずれがほとんど無く、切断端面を直接突き合わせた接合が可能であったと考えられる。参考までにステンレス細線のニッパ切断面を(c)に示す。切断面が傾斜面からなる延性材の一般的切断面の様子が見られるが、もしこの状態で突合せ加圧するならば傾斜したせん断破面による突合せ位置のずれが生じ、その対策が必要になったと判断される。

3-2 接合部形状

接合良好線の接合部形状には図9に示すように2種類のパターンが認められた。(a)の場合は温度が比較的低温で塑性流動が少なかったことが考えられる例であり、(b)は温度が高めで、場合によっては溶解を伴っ

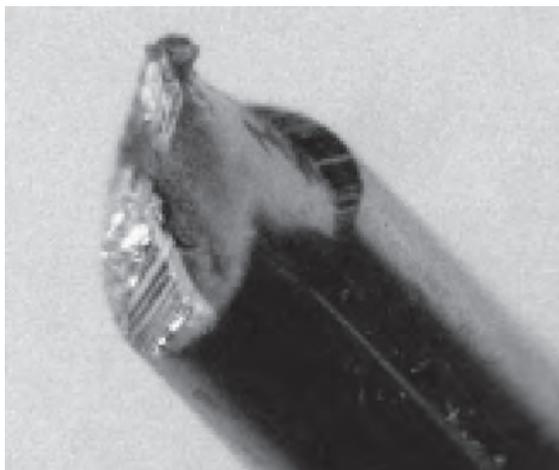
て接合したとも考えられる例である。前述のように引張強度にはバラツキがあり、接合部形状と強度との関係は不明である。



(a) Ni-Ti 合金細線の平滑仕上げ端面

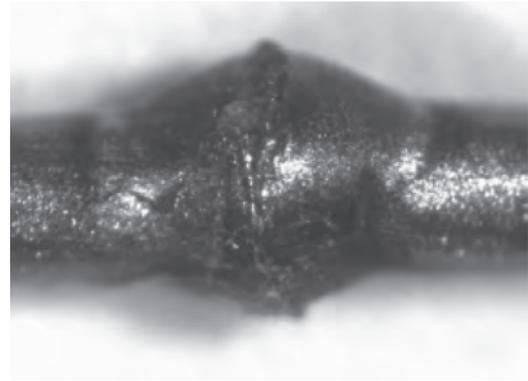


(b) Ni-Ti 合金細線のニッパ切断端面

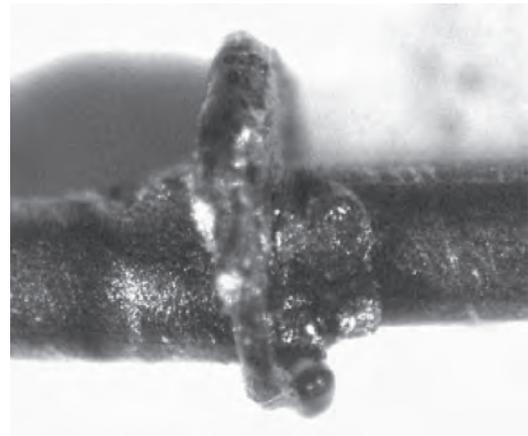


(c) ステンレス細線のニッパ切断端面

図8 突き合わせ接合前の細線端面



(a) 接合温度が低い接合

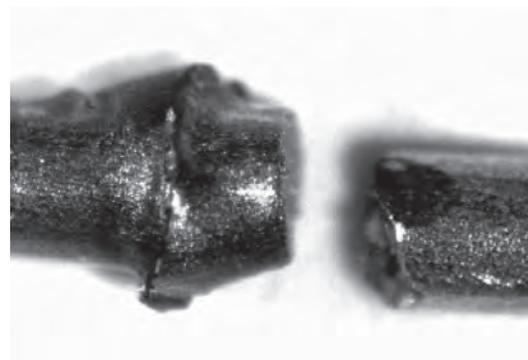


(b) 接合温度が高い接合

図9 細線の接合部外形例



(a) 接合部での破断



(b) 接合部近傍での破断

図10 接合細線の破断例

3-3 接合線の破断

引張試験による接合線の破断位置は図10に示すように、接合部(a)かその付近の熱影響部(b)であった。破断状態が図10(a)の場合は破断強度が低いときに多く、(b)の場合は一般に高いときに多く見られた。SEM観察によると(a)の破面には図11の円内に示すように欠陥が存在しており、昇温が十分でないため接合端面の酸化被膜や汚れが排出されずに接合が完了したと考えられる。この場合には接合が十分でなく強度は低くなる。一方、図10(b)の場合は母材の加工硬化組織が熱影響により回復し、母材熱影響部の強度が低下したことによりその部分が破断場所になったと考えられる。本合金の接合線の強度は、接合が完全に行われたとしても熱影響を強く受けるならば低下すると推測される。強度の高い接合線を得るためには加工硬化状態を維持する、より低温の接合を心掛ける必要があるが、その方策については今後の課題である。

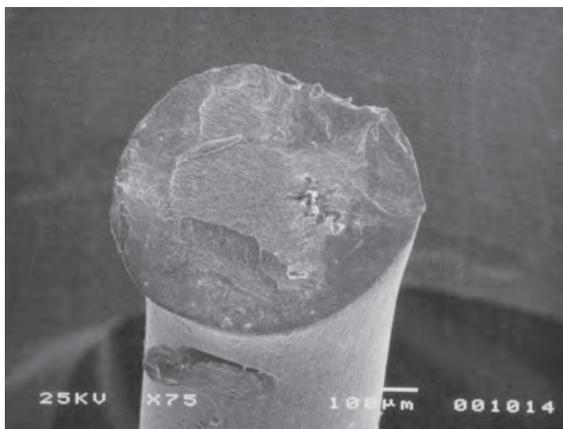


図11 接合線の破断面上に観察される欠陥

場合の細線固定法や電極の摩耗対策など、現場で使用する上での問題点も指摘されており、その対策としての改善策も引き続き検討している。

なお、平成18年3月卒業の上田淳也、加賀谷進、佐々木寛明、平山貴宏の4君は、平成17年度の総合制作実習で本論文に関わる課題に取り組んでいただいた。ここに記して感謝申し上げます。

【参考文献】

- (1) 瀧田大亮：北海道職業能力開発大学校紀要、p.31、24(2005)。
- (2) 福地・吉野・榮花：平成12年度北海道職業能力開発大学校校内研究発表会予稿集、p.19、(2001)。
- (3) 廻・福地：移動大学講座技術シンポジウム予稿集、p.12、(2005)。
- (4) 福地・吉野・野田・原田：北海道職業能力開発大学校紀要、p.21、(2002)、vol.21。
- (5) 福地・中根・小林・江戸：技能と技術、p.18、6(2002)、vol.37。
- (6) 福地・中根・小林・江戸：北海道職業能力開発大学校紀要、p.31、(2000)、vol.19。
- (7) 溶接学会編、溶接・接合の基礎、丸善、1993年、p p.5-6
- (8) 清水謙一、入江正浩、唯木次男：記憶と材料、共立出版、1986年、p p.87-88

V おわりに

地場企業に対するNi-Ti合金細線の接合に関する技術支援の一つとして、超弾性合金細線の場合の支援の背景と内容、接合計画と圧接機の試作、試作機を用いて行った接合条件の調査や接合線の強度評価などの結果を報告した。試作接合機の特徴は、接合部の組織損傷が少ない理想的な接合を行うことを目指した高加圧の突合わせ抵抗圧接を可能にしている点にある。

その結果、加圧力が充分高い場合には不活性ガスを使わなくても、また細線端面が平坦でないニッパ切断端面のままでも直接接合できるなど、これまでの接合工程を簡略化しても十分な強度を持つ接合線が得られることが明らかになった。本機は現在当該企業の接合ラインで2号機として稼動中であるが、線径が異なる