

CO₂ ガス被包アーク溶接用鋼ワイヤの開発と実用化*

秋 田 正 弥**・浅 田 千 秋***

Study and Development of Electrode Steel Wires for Gas Shielded Metal Arc Welding

Masaya AKITA and Chiaki ASADA

Synopsis:

The study of CO₂ gas shielded arc welding process invented by. H. SEKIGUCHI, was begun in 1953 to develop it in wide practical use, and it has been conducted with regard to the following three phases:

(1) study and development of electrode steel wires for CO₂ (or CO₂-O₂) gas shielded arc welding process; improved arc-stability and notch toughness of weld metal and developed many kinds of commercial wire.

(2) development of wire manufacturing techniques; improved wire feedability, prevented wire-curling and developed automatic wire spooling machine.

(3) application to welded structures and expanding applications; proved the usefulness of the process in application to rear axle-housings and idlers.

1. 緒 言

大同製鋼(株)は表題の研究を 1953 年に開始した。その頃わが国の溶接はほとんどが被覆アーク溶接棒を用いる手溶接法であり、サブマージアーク溶接法と MIG 溶接法とが導入されて、アーク溶接による自動化への道が開かれつつあった。

関口春次郎博士は、溶接金属の脱酸に関する独自の理論を応用して、CO₂ アーク溶接法とひきつづいて CO₂ アーク溶接法を考案された¹⁾(以後、これらの溶接法を総称して CO₂-O₂ アーク溶接法と言う)。大同製鋼(株)は、これらの溶接法が将来の溶接自動化にもつとも大きく貢献できると考えた。そして、この溶接法に用いるワイヤの開発、その製造、および溶接構造物への適用など、この溶接法の実用化につとめた。以下にこれらの要点を記述する。なお参考として、CO₂ アーク溶接法用のワイヤ*の年度別生産推移をみると、Fig. 1**のように、ほかの自動溶接用ワイヤよりも著しく高い成長率で普及してきた。

2. ワイヤの研究開発

2.1 55 kg/mm² 級高張力鋼までの一般用ワイヤ(DSI)

脱酸性元素である Si と Mn 両量を系統的に変化させた数 10 チャージのワイヤを試作して、名古屋大学関口研究室へ提供した。同室での詳細な研究の結果、CO₂ アーク溶接法のワイヤとして望ましい Si と Mn の成分範囲が求められた²⁾³⁾。

しかし、CO₂ アーク溶接法は他の溶接法に比べて、溶接中にスパッタが多く発生すること、溶接ビードの外観が劣ることなど、この溶接法の普及を妨げる欠点があった。これらの欠点を改善するためには、まずアークを安定させる必要があると考えて、合金元素としての Ti の利用を検討した。結果の一例を Fig. 2 に示す⁴⁾⁵⁾。この図で縦軸は、使用した溶接ワイヤが溶着金属になつた比率(溶着率)を示し、この値が高いほどスパッタ損失が少ないことを意味する。Si-Mn 系ワイヤでは、溶着率が溶接電流によつてかなり大きく変化するが、含 Ti ワイヤではその変化が少なく、かつ高水準にある。すなわち、含 Ti ワイヤは溶滴の移行現象が安定し、スパッタが少なくなることを示している。これに関連して溶接

* JIS Z3312(1974)では鋼ワイヤとあるが本稿では略してワイヤとする。

** 溶接ニュースの特集号統計数値による。

* 昭和 49 年 9 月 25 日受付 (Received Sept. 25, 1974)

第 20 回大河内記念技術賞受賞

** 大同製鋼(株) (Daido Steel Co., Ltd.)

*** 大同製鋼(株) 工博 (Daido Steel Co. Ltd., 11-18, 1-chome Nishiki Nakaku Nagoya 460)

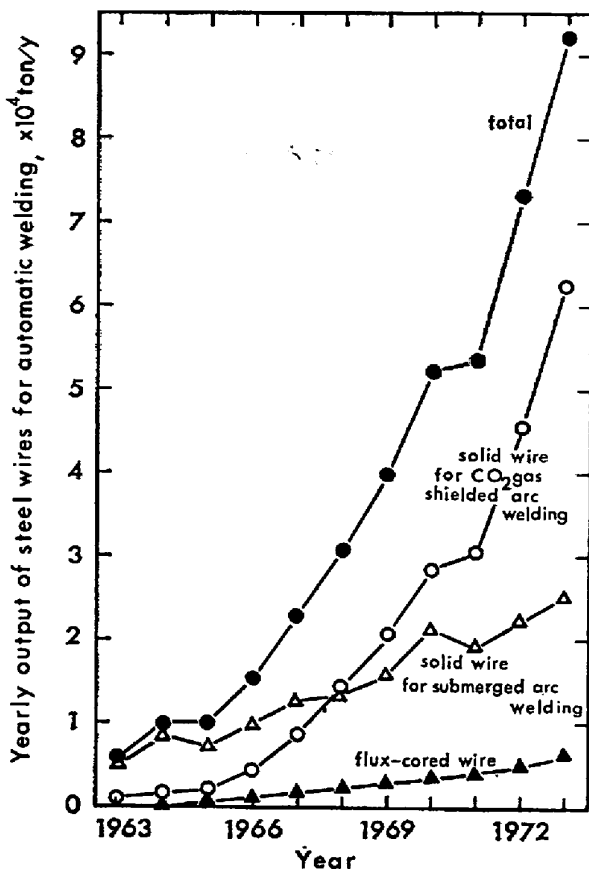


Fig. 1. Growth of steel wires for automatic welding in Japan 1963-1973.

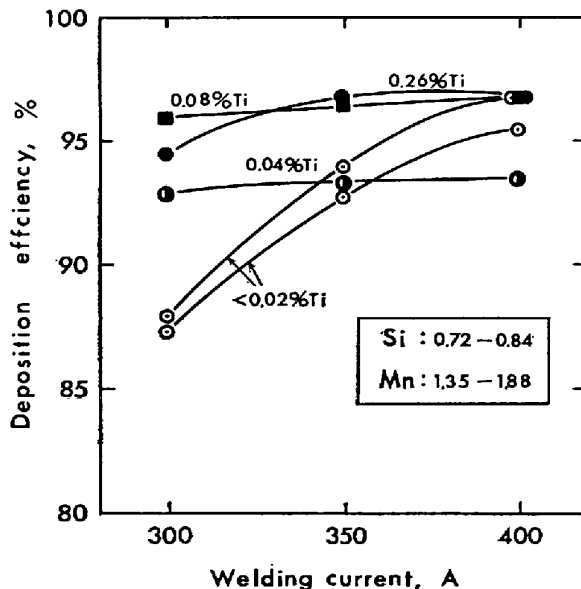


Fig. 2. Effect of Ti content of electrode steel wire and welding current on deposition efficiency for CO₂ gas shielded arc welding.

ビード外観も改善された。また、Ti は強力な脱酸、脱窒元素であり、結晶粒微細化に影響する元素でもあるから、溶接金属のじん性改善に効果がある。しかし、過

剰の添加はかえってじん性を劣化させるので、CO₂ アーク溶接法用のワイヤには約 0.15% が適量であることを見出した⁴⁾。この Si-Mn-Ti 系ワイヤ DS1 (化学組成は Table 1) の開発によつて CO₂ アーク溶接法がわが国で普及しはじめた。そして現在においても、わが国での需要量の約 1/2 がこの種のワイヤで占められている。ワイヤ中の Ti の効果については、益本教授の指導のもとに要約され、1973 年度 IIW 年次大会で発表した⁴⁾。

2.2 60 kg/mm² 級高張力鋼用ワイヤ (DS 60)

DS1 につづいて、1957 年から 60~70 kg/mm² 級高張力鋼用のワイヤを開発する目的で研究を行ない、1958 年に DS 60 を実用化させた⁶⁾。その代表的組成は Table 1 に示すように、Si-Mn-Mo-Ti 系であり、溶接金属のじん性が DS1 よりも高く、かつ耐熱間割れ性が良好である。このワイヤは、中炭素鋼の溶接にも適し、後述するように、リヤ・アクスルハウジングのチューブエンドの溶接にまず使用されて、予熱しなくても健全な溶接ができることが実証された。

2.3 短絡アーク溶接用ワイヤ (DS 1A)

CO₂ アーク溶接法を比較的低電流で行なうと、ワイヤ先端に形成された溶滴が母材と短絡して、溶鋼の表面張力、重力および溶接電流によるピンチ力の作用で母材へ移行する、いわゆる短絡移行現象があることが知られるようになった。この移行現象を利用すると、薄板の溶接や、立向、上向などのすべての姿勢での溶接が可能となる。初期の頃にはこの溶接にも DS1 が用いられていたが、溶接作業性は必ずしも満足できるものではなかった。

短絡アーク溶接の場合は、短絡時に大きな電流が流れるので、その電流の立ち上り速度を適当にするように、溶接機の改善が進められ、溶接機器の面から作業性の改善が行なわれたが、われわれはワイヤについての検討を行なつて、短絡アーク溶接に適する DS1A の開発を行なつた。

短絡移行現象を良くするには、要するに短絡時の溶滴を大きくしないことが望ましく、アーク電圧の広い範囲で作業できるようにすることである。この場合、アークを安定させる目的で利用した Ti は、短絡アーク溶接中のアークを長くし、Fig. 3⁵⁾ に示すように、単位時間当りの短絡回数 (単位長さのワイヤを溶融移行させるときの溶滴の数にほぼ相当する) を減少させて、かえつて大粒で移行する。したがつて、立向、上向などの溶接作業性にはむしろ有害となる。希土類元素を添加した場合には、その傾向がなお著しくなることは Fig. 3 から明ら

Table 1. Electrode steel wires for CO₂(CO₂-O₂) gas shielded arc welding.

Trade mark	Typical composition of wire (%)										Applications	Patent
	C	Si	Mn	P	S	Cu	Ni	Cr	Mo	Others		
DS1	0.09	0.75	1.70	0.013	0.009	—	—	—	—	Ti 0.15	General use for mild and HT50 steels	
DS1A	0.04	0.85	1.53	0.008	0.018	—	—	—	—		All position welding for mild and HT50 steels	
DS1E	0.09	0.80	1.80	0.008	0.009	—	—	—	—	B 0.003	For high notch toughness	Patented
DS60	0.10	0.70	2.20	0.010	0.008	—	—	—	0.50	Ti 0.10	For 60~70 kg/mm ² high tensile steel	
DS80	0.08	0.90	2.00	0.011	0.012	—	1.85	0.20	0.50	Ti 0.10 B 0.003	For 80~90 kg/mm ² high tensile steel	
DD50	0.07	0.60	1.20	0.011	0.007	—	—	—	—		For bending and/or machining after welding	
DS1W	0.08	0.80	1.40	0.012	0.010	0.30*	—	0.30	—	Ti 0.15	For weather-proof steel	
DS250	0.14	0.70	2.20	0.017	0.014	—	—	1.10	0.50		For hardfacing Hv 250~350	
DS350	0.17	0.80	2.20	0.015	0.013	—	—	2.60	1.00		For hardfacing Hv 350~400	
DS450	0.25	0.90	2.20	0.016	0.012	—	—	2.20	0.80	V 0.35	For hardfacing Hv 450~500	Patent pending

* Including plated copper.

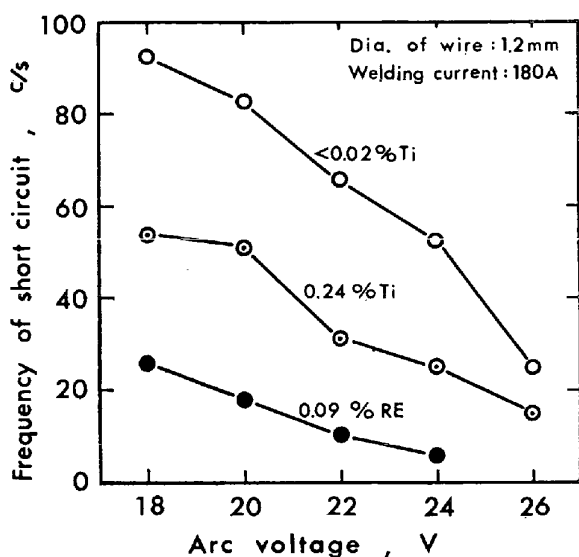
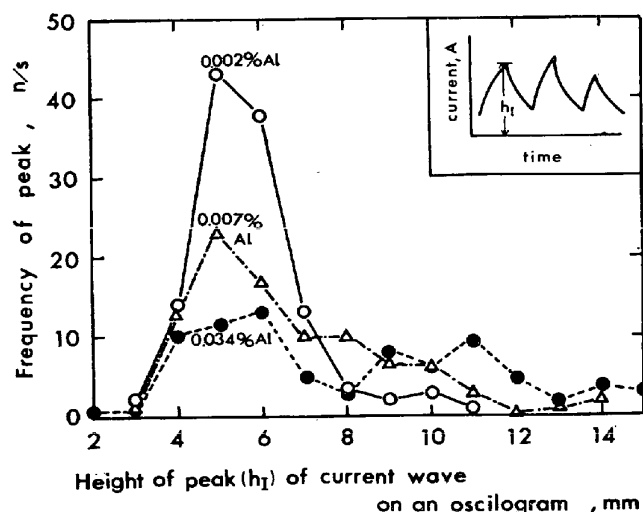


Fig. 3. Effect of Ti and rare earth elements on the frequency of short circuit.

かである。

以上のことから Ti を添加しない Si-Mn 系ワイヤでは、溶滴を小さくすることはできたが、アーク安定性は十分でなかった。主成分の調整だけでは満足なものとはならなかったため、さらに検討を進め、ワイヤ中の微量

Fig. 4. Effect of Al content of wire on fluctuation of peak current of short circuiting CO₂ gas shielded arc welding.

の不純物、ガス、ワイヤの表面状態などが影響することが順次明らかになった。たとえば、製鋼時の脱酸に用いて微量残存する Al が溶滴移行を不規則にすることも明らかになった。Fig. 4 は短絡アーク溶接時の電流波形をオシログラフにとり、各波形の最大値を横軸にとつて、

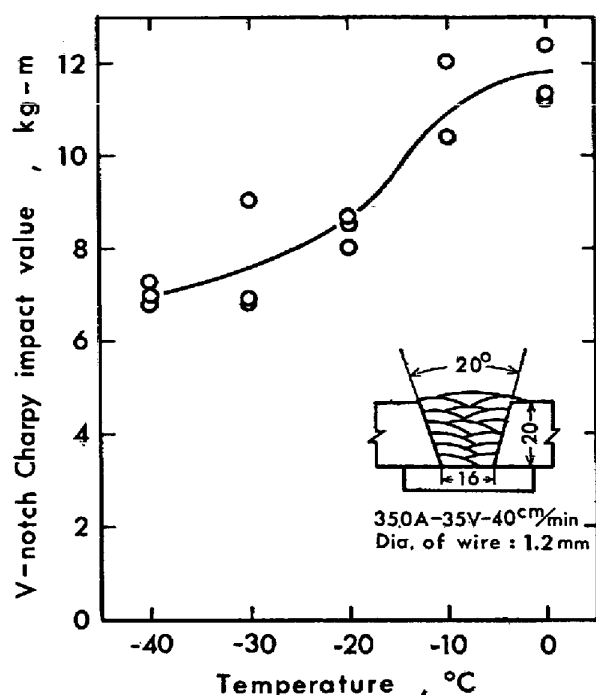


Fig. 5. Impact value of weld metal with DSIE electrode wire.

1 sec 間の度数分布を図示したものであり、Al 量の増加につれて、最大電流値は広い範囲にばらつくようになる。すなわち、溶滴が短絡している時間が不規則で、溶滴の大きさが不揃いであることを意味している。

以上の各要因を製鋼方案と線材二次加工工程の製造条件に反映させることで、短絡移行条件に適した DS1A を実用化できた。代表組成は Table 1 に示すごとくである。

2.4 切欠じん性改善用ワイヤ (DS1E)

CO₂ アーク溶接法による溶接金属の切欠じん性は、他の溶接法に比べていくぶん低い欠点があった。もちろん一般的な溶接条件では実用上とくに問題になることはないが、高入熱溶接条件下ではかなり低くなる。この問題の解決のために、ワイヤ中の各種合金元素の影響を系統的に調べた。その結果、微量の B 添加が著しい効果を示すことを見出した⁷⁾⁸⁾。そして、DS1 の高じん性用の改良型として Table 1 に示す組成の DS1E を実用化させた。このワイヤは Fig. 5 に見られるように、低温の切欠じん性が高く、Fig. 6 に示すように、高入熱で溶接してもじん性の劣下が少なく、DS1 の 2.3~3 倍の衝撃値が得られる。同時に、微量の B 添加は溶接金属の耐割れ性を改善することも認められ、溶接条件を同一にした拘束割れ試験の結果では DS1 では従来割れ不良率が 10~20% であつたが DS1E では皆無となつた。

DS1E を開発した成果は DS80 の開発も達成させる

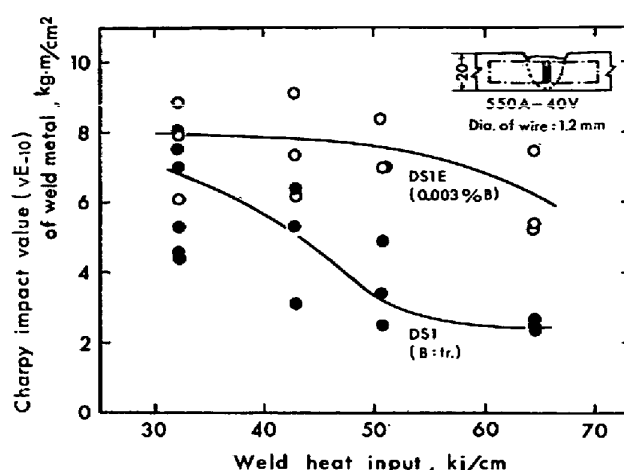


Fig. 6. Effect of boron addition on impact value of weld metal by CO₂ gas shielded arc welding.

ことになつた。これらの B の活用に関する特許は 1968 年に公告され⁷⁾、特許として登録された^{*}。その後 1971~1974 年のわが国の特許公告または公開公報によれば、CO₂ を始め各種の被包ガスを用いるガス被包アーク溶接用のソリッドワイヤ以外の、被覆アーク溶接棒、フラックス入りワイヤ、サブマージアーク溶接用、あるいはエレクトロガス溶接用のフラックスやワイヤに B を添加する数多くの特許が申請されている。B による改善効果については、溶着金属のガス含有量、フェライト粒度、非金属介在物、ミクロ組織などを調べた範囲では、改善機構はまだよく判らない状態である。しかし、その効果は相ついで公表された他社の特許からも確認されたといえる。

2.5 その他のワイヤ (DS80, DD50, DS1W, DS250, DS350, DS450)

CO₂ アーク溶接法が普及するにつれて、需要家から前記以外のワイヤも開発するよう要望された。それに応じて以下のような各種のワイヤを開発し実用に供した。

DS60 にひきつづき、80 kg/mm² 級高張力鋼用ワイヤとして Si-Mn-Ni-Cr-Mo-B 系の DS80 を開発した。

軟鋼の溶接継手を機械加工あるいは塑性加工する用途には、溶接金属のかたさができるだけ低くなるようにした DD50 を開発した。このワイヤは CO₂ と Ar との混合ガスを用いて溶接に供されることが多く、溶接後のスラグ除去が容易であつて、溶接後メッキする部品の溶接にも使われている。

耐候性鋼板の溶接には、DS1W を開発した。長期間の耐候性試験の結果から、薄板の継手はもちろん、多層盛した厚板の溶接継手も母材と同等の耐候性を示すこと

* 特許登録番号 696444

が確認されている。

また、硬化肉盛溶接用ワイヤとして DS 250, DS 350⁹⁾ および DS 450 の 3 種類のワイヤも生産されている。これらは、溶接のままの肉盛かたさがそれぞれ Hv 250, 350 および 450 になるようにデザインされている。とくに、DS 450 の開発に当たっては、高炭素鋼製の部品への肉盛溶接に際して融合線付近に発生し易い気孔を防ぐこと、そして多層盛の場合に先着ビードが後続パスの溶接熱によつて軟化することを抑えることに留意した。結局、炭化物生成傾向が強く、かつ焼もどし軟化抵抗性を与える元素である V や Nb の適量をワイヤに添加することで両問題とも解決することができた。

3. ワイヤ製造技術の開発

CO₂ アーク溶接法は自動車部品、家庭電器部品、建設機械など典型的な量産品に次第に活用されるようになった。このような量産品の場合には、生産の流れを阻害するような、たとえば、コンタクトチップやコンデットチューブでのワイヤの詰まり、トーチ出口でのワイヤ先端の曲がり、スパッタによるノズルの閉塞などが起ると、溶接継手の品質の保証ができないだけでなく、生産ラインの能率低下をもたらす重大問題となる。したがって、このようなことを起さない良質のワイヤを製造する研究を行なった。その内容は、溶接部の特性と直接に関係のないワイヤの引張強さ、寸法精度、表面品質、梱包状態などについてのものであつたが、これらの問題を解決することにより、多種の自動溶接機の異つた送給性能に適応できるワイヤの製造技術を確立したのである。

3.1 送給性の改善

ワイヤを溶接部へ向けて送給する際に、溶接機の送給モートルに過負荷を与えないで、溶接の開始から終了まで所定の速度でむらなく送給される性能を良好な送給性と呼んでいる。この性能を調べるために特殊な試験装置を考案した。これによつてワイヤ送給時に送給モートルにかかる負荷を測定した。その一例を Fig. 7 に示す。送給性の良いワイヤによる場合は、(a) 図に示すように、負荷はほぼ一定の値を保つが、送給性の悪いワイヤによる場合は (b) 図に示すように、大きな負荷がかかり、かつその変動が大きく、時には送給が停止することもある。この方法によつてワイヤの送給性に及ぼす要因を調べた。

3.1.1 ワイヤの引張強さ

CO₂ アーク溶接法に用いるワイヤは一般に直径 0.6 ~ 2.4 mm であり、1.2 mm が最も多く使われている。このような細いワイヤを一般にはプッシュ式の装置で送

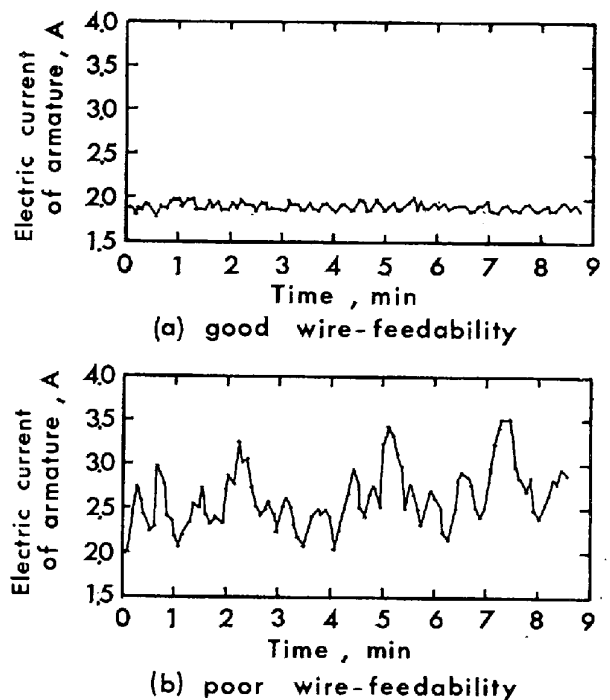


Fig. 7. Examples showing good and poor wire-feedability.

給するので、適当な強さをもつワイヤでないと、送給経路内での抵抗を受けてワイヤは座屈しやすくなる。結局約 100 kg/mm² の引張強さにすれば好ましいことがわかつた。これよりも強過ぎると後述の線ぐせが出やすくなる。約 100 kg/mm² の強さは現在でもほぼ妥当なものとされている。ワイヤの引張強さを最終製品で一定の許容差内に入れるために、ワイヤの線材圧延後の引張強さをもとにして、鋼種ごとの熱処理条件、線引加工率などの製造基準を求めた。

3.1.2 表面品質

ワイヤの強さのほかに、表面品質も送給性に大きく影響する。ワイヤに錆が発生するのを防ぎ、かつコンタクトチップからワイヤの通電性を良くする目的で銅メッキを行なっている。初期には硫酸銅溶液による浸漬メッキを行なっていたが、密着性がよくなく、錆を発生し易く、しかも能率が上らなかつたので、シアン化銅を用いる電気メッキ法（ストランドタイプ）に変更した。メッキ後伸線するまでに長時間放置すると、メッキ層の酸化による変色など、メッキ品質が低下するので、前処理、メッキ、仕上げ線引きを連続化して品質の向上をはかつた。さらにこれらの諸条件の検討の結果、メッキ速度を大幅に改善できた。

メッキ厚さについては、防錆性、溶着金属の機械的性質への影響などを調査して、0.7 μm を標準にすればよいことがわかつた¹⁰⁾。

また、銅メッキ後の仕上線引きに使う潤滑剤には、アミン系防錆剤を加え、そのほか若干の工夫を入れて、錆の発生を抑え、かつ銅メッキの表面を滑らかにした。

以上の検討により、送給性を一般的には改善できたが、一部のものには、銅メッキ層が剝離して送給経路内に堆積し、ワイヤの送給を阻害することがあった。その原因を追求した結果、メッキ前のワイヤ表面に粒界が酸化したごく薄い層があり、これを完全に除去しないままメッキすると、ワイヤ送給中にこれが起因して表層が剝離し易くなることが明らかになった。

酸素との親和力がとくに大きい Si, Mn を比較的多く含む DS ワイヤは、焼なまし中に表面層が粒界酸化を受け易い。そこで、焼なましの最高加熱温度を 750°C 以下にして粒界酸化を抑制するとともに、ある温度から空冷してこの酸化層がワイヤ表面に残らないようにして解決できた。

3.2 線ぐせ発生の防止

スプールに巻取ったワイヤには円周方向に曲がりぐせがついている。このぐせは溶接機の矯正ロールでほぼ真直ぐに修正できる。しかし、横方向への曲がりぐせや、ねじれの矯正は容易ではない。このような矯正困難な曲がりぐせを線ぐせと呼んでいる。線ぐせのあるワイヤはトーチから送り出されたとき、ワイヤ先端が溶接線上に向かなかつたり、あるいは蛇行して、所定の溶込みが得られなくなる。

この線ぐせの判定方法は、製品から数メートルのワイヤを切り出して床面に置いたとき、ワイヤの一部が床面から 50 mm 以上跳ね上らないとき合格としている。

この線ぐせは、ワイヤの強さにばらつきが大きい場合に出やすい。これはスプールへの巻取りの際に、巻取機に付属する矯正機における矯正力をワイヤの強さとサイズに応じて予め調節しているので、ワイヤ強さが管理範囲を超えると矯正効果が出にくくなるのである。矯正の点から言えば軟かいワイヤのほうがよいが、前述のように送給性を考慮して約 100 kg/mm^2 を最適値としたので、巻取る前のワイヤの強さ、サイズなど、状況に適應した矯正作業の標準を設けて線ぐせを防止している。

3.3 ワイヤの自動巻取り技術の開発*

ワイヤの多くはスプールに巻取られた状態で使用される。この場合、溶接時に円滑に引き出されるには、ワイヤを整列状態に巻取っておくことが必要であり、この作業は、永年人力に頼らざるを得なかつた。これを自動化するために各種の実験を繰返した結果、油圧トラバース

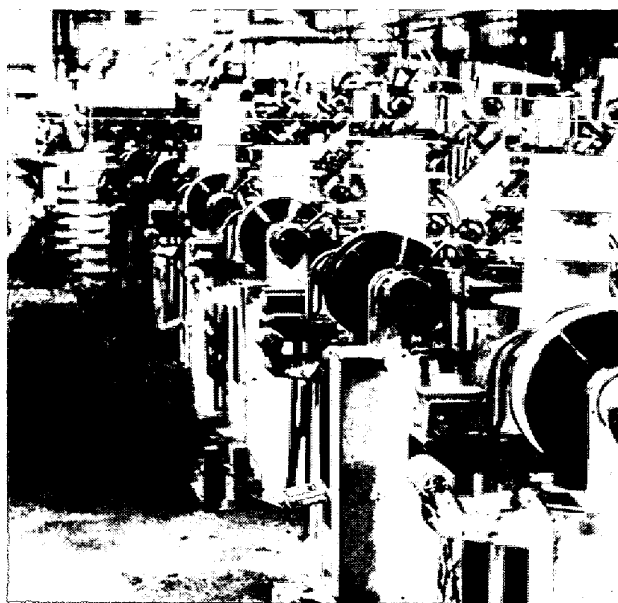


Photo. 1. Automatic wire spooling machines.

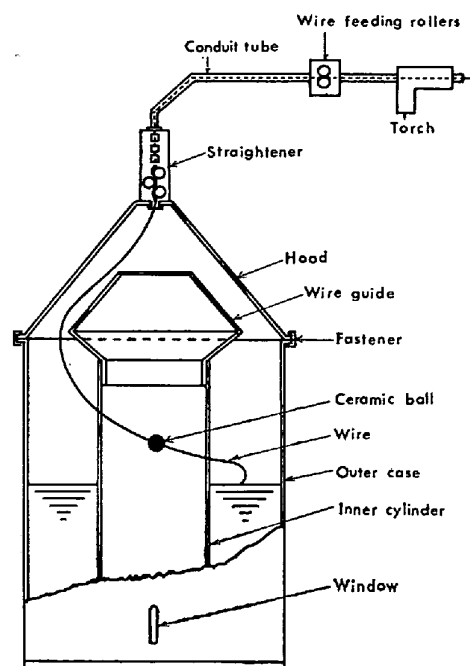


Fig. 8. Pail-pack fitted with Daido's K-3 pay out device.

機構とダブルブロック機構とを組み合わせた自動巻取り装置の開発とスプール形状に特殊な工夫をこらすことで解決できた。同装置の工場での稼動状況を Photo. 1 に示す。

3.4 ペイルパックの実用化**

スプール型式ではワイヤ巻取量が少ないのが欠点である。たとえば長時間連続生産する自動車部品工場などでは、スプール取替えのためのライン停止が生産性を損

* 特許公告 1 件，特許出願中 1 件，実用新案登録 1 件，実用新案出願中 1 件。

** 9 件の実用新案出願中。

う。そこで 250 kg の大量梱包可能なペイルパック方式を採用して、Fig. 8 に示すようなワイヤの引き出しの方法とその治具を開発した¹¹⁾。これによつて DS ワイヤの全生産量の約 25% がこの方式で使用されるに至つた。

4. 溶接構造部品への適用

1957 年に DS ワイヤの生産を開始したが、1960 年頃までは需要は極めて少なかった。したがつて、CO₂ アーク溶接法が有用で信頼できることを実際に適用例を以つて示すことに努めた。このためにワイヤとその製造技術の研究開発に並行して自動車用リヤ・アクスルハウジング、ブルドーザ用アイドラ、鋤山用機器、フォークリフト用マストなどについて溶接設計や溶接施工法の研究を行なつた。

4.1 自動車用リヤ・アクスルハウジングへの適用

1956 年頃までのリヤ・アクスルハウジングはほとんど鋳鋼製であつた。その後 1959 年頃には一部でサブマージアーク溶接法と手溶接法との組合せ加工品が製作されていた。1959 年に CO₂ アーク溶接法を活かしてこれを鋁金溶接加工品化する検討を始めた。本体およびチューブエンドの材質選定、溶接設計、溶接継手の機械的性質や疲労強さの基本的なデータ採取、溶接部の X 線あるいは超音波検査法の検討などを進め、1960 年に本格的な試作に入つた。

製造工程の概要は Fig. 9 のごとくである¹²⁾。本体は 1.5% Mn 系 55 kg/mm² 高張力鋼板（大同製鋼，ST 1 Y. P. ≥ 36 kg/mm²，T. S. ≥ 55 kg/mm²，El (JIS 1 号 $\geq 18\%$ ，熱間圧延状態)を短冊形に打抜き、これをプレス成形した後、2 個の素材を突合せ溶接する。開先面は

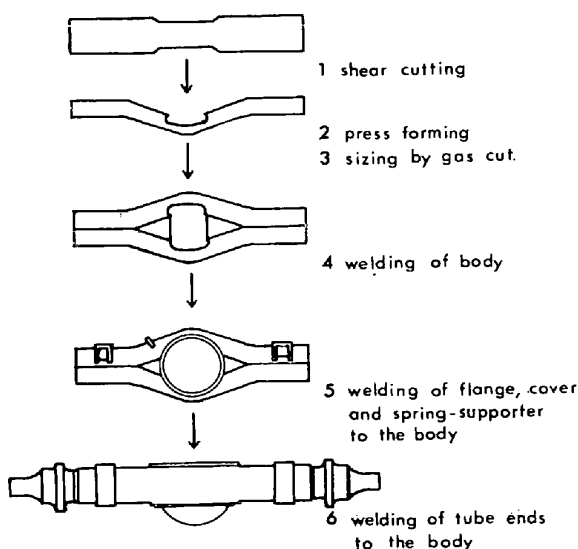


Fig. 9. Outline of production steps for rear-axle housing.

ガス切断のままとした。これはガス切断のままの、わずかに酸化した接合面でも気孔を発生することがなく、溶込みが深いという CO₂ アーク溶接法の特長を活かしたものである。

ついで、フランジ、蓋、バネ受けなどを順次溶接によつて取付ける。これらも自動および半自動溶接化し、生産性の向上に著しく寄与した。

本体の両端にはチューブエンドが溶接される。自動車の重要保安部品であるハウジングの溶接のうちでも、車軸を支持するチューブエンドの溶接はとくに安定した品質を要求される。チューブエンドの材質は S 40 C または S 45 C の焼入れ焼もどし品である。割れや気孔発生に敏感なこれらの中炭素鋼の溶接に、溶接金属の水素量が極めて少ない CO₂ アーク溶接法とワイヤ DS 60 とに組合せて健全な溶接継手が得られた。また溶接に当つては、本体にエンドを内部嵌合して、CO₂ アーク溶接法により全周を自動溶接することによつて、継手部の疲労強度が高く、ひずみの少ない溶接ができた。さらに、ひずみが少ないことから、本体、エンドともに溶接前に機械仕上げを済ませておけるので、工程の自動ライン化が容易であつた。チューブエンドの溶接状況を Photo. 2 に示す。

4.2 ブルドーザ用アイドラへの適用

1960 年当時、アイドラは中炭素マンガン鋳鋼製であつた。重量軽減、製造原価の低減を目的として、鋁金溶接構造にすることを考えた。アイドラの断面略図を Fig. 10 に示す。円周を構成するリムは 0.35 C-0.85 Mn、または 0.36 C-1.35 Mn 鋼の異形圧延帯鋼をリング状に

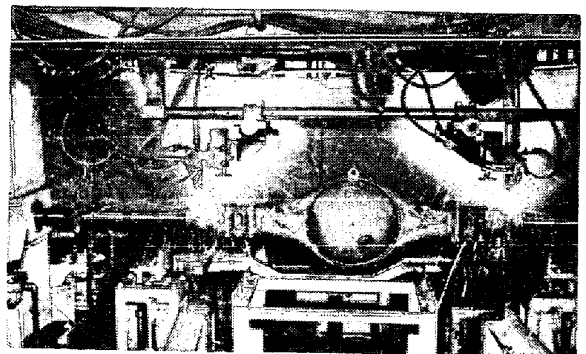


Photo. 2. Welding of tube end to the housing body.

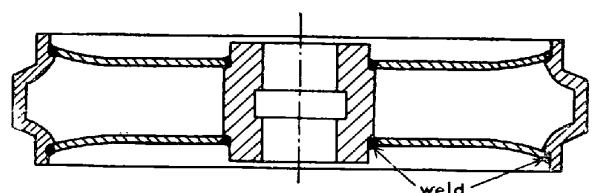


Fig. 10. Cross-sectional illustration of idler.

成形し、断面をフラッシュバット溶接したものである。ディスクは SM 41 鋼板をシャリング後、プレス成形する。中心軸用のボスは S 20 C または S 35 C の押出成形、機械加工品である。

溶接はすべて円周すみ肉溶接であり、溶接部には大きな応力が発生する。しかも、材質的に溶接割れが発生しやすいこともあつて、この溶接はかなり困難が予想されたが、予熱効果と、CO₂ アーク溶接法の特長を活用した施工法とによつて、満足な継手が安定して得られるようになった¹³⁾。

5. 結 言

大同製鋼での表題に関する約 20 年間の研究開発内容をワイヤ、その製造技術、および溶接構造物への適用を大別して述べた。著者らは、この業績に対して 1974 年 3 月に大河内記念技術賞を受賞する榮に浴したが、この受賞は決して単に著者ら 2 名に対するものではなく、当社の研究、製造、販売などの各部門の総力の結集の成果に対してなされたものであることを銘記したい。今後われわれはワイヤ供給者の立場から、一層の製品改良や新製品の研究開発に努めて、いささかでも斯界に寄与したいと願っている。

終りに、本法の創始者である関口博士と、その協力者益本博士に深い敬意を表するとともに、本法の発展に協力された溶接機器、ガスの両メーカ、扱い商社および需要家に対しても深甚なる謝意を表する次第である。

文 献

- 1) 関口, 益本: 溶接学会誌, 25 (1956) 11, p. 608
- 2) 関口, 益本: 溶接学会誌, 25 (1956) 12, p. 674
- 3) 関口, 益本: 溶接学会誌, 26 (1957) 1, p. 14
- 4) 益本, 関口(晃), 川崎: IIW Doc. XII-B-135-73, (1973)
- 5) 関口(晃): 電気製鋼, 41 (1970) 1, p. 41
- 6) 関口, 益本, 岡田: 溶接学会誌, 28 (1959) 1, p. 39
- 7) 保田, 岡田, 関口(晃), 関口: 特許公報, 昭 43-12258
- 8) 関口(晃), 竹内: 溶接学会全国大会講演概要, 第 8 集 (1971), p. 205
- 9) 竹内, 関口(晃), 岡田, 保田: 電気製鋼, 37 (1966) 1, p. 10
- 10) 益本, 栗林, 山田, 保田, 竹内: 溶接学会誌, 35 (1966) 3, p. 282
- 11) 及部: 電気製鋼, 44 (1973) 3, p. 213
- 12) 岡田: 溶接界, 14 (1962) 10, p. 660
- 13) 飯田, 小沢: 電気製鋼, 36 (1965) 2, p. 75