

# 鉄と鉄をつなぐ(上)

我々の身の周りで加工が簡単にできる材料には、紙、木材、布などがある。これらは好みの形に、はさみやのこぎりで簡単に切断できる。さらに、糊、かなづちと釘、針と糸を使うことで目的とする形に簡単に組み立てることができる。このように「使いやすい材料」とは、「切断と接合」が簡単であることが大切だ。鉄は、あらゆる溶接法(図1)がすべて適用できる唯一の金属だ。強度やリサイクル性などの優れた特性に加え、切断と接合が容易という、モノづくりに際し最も重要な要件を備えた材料だということがわかる。

本号から2回にわたり、「溶接のメカニズム」と、新日鉄の「鉄と鉄をつなぐ」優れた技術を紹介する。

## 金属の中でも希有な特徴 溶断も溶接も容易な 鉄鋼材料

鉄は可燃ガスと酸素ガスボンベさえあれば、どこでも簡単に切断できる。可燃ガスで鉄を加熱し、鉄と酸素を反応させると酸化鉄が生成される。酸化鉄は、鉄よりも溶融温度が低いため、酸素ガスを吹き付けた部分だけが溶ける。したがって、外部から力を加えることなく切断が進行する。これを「溶断」という。最近ではレーザービームによる切断が増してきたが、この場合も酸素ガスを付加して切断効率を高めている。

鉄以外のすべての金属は、酸化するとその溶融温度は高くなる。(図2)すなわち、鉄以外のすべての金属はガス溶断ができないのである。鉄の酸化物は鉄よりも溶融温度が低いという、金属としては希有の特徴がある。つまり、鉄は金属のなかで切断が最も簡単にできるということだ。

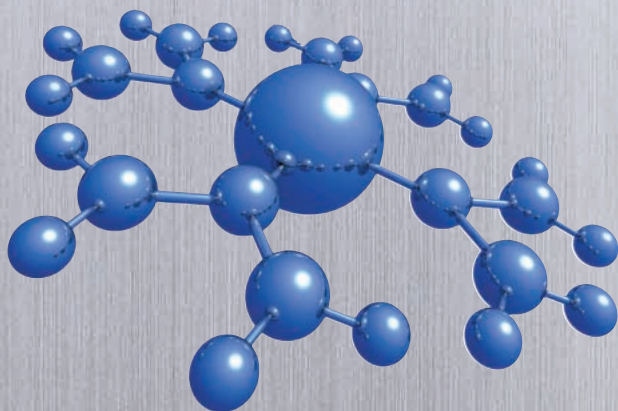
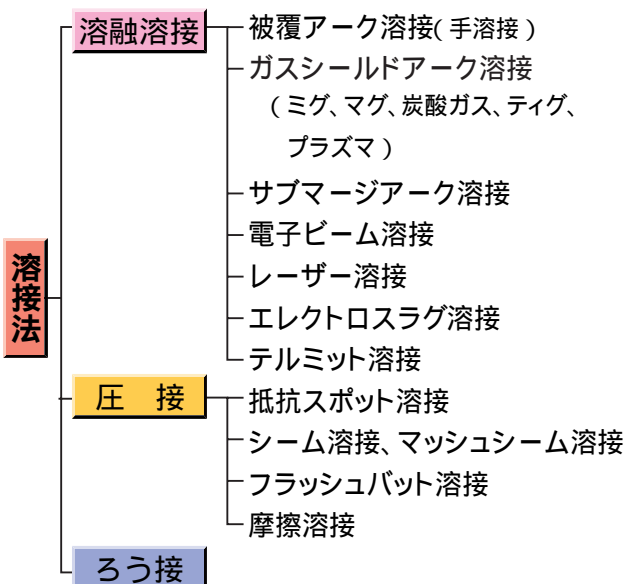
「溶断できる」という性質は、モノを壊すときにも有利だ。以前、アルミ合金製の列車が転覆して運転手をなかなか救出できないことがあった。もし列車が鋼製であれば山奥でもガス切断で直ちに運転手を救出できたはずだ。

使いやすい材料とは、接合も簡単にできる材料だ。「溶融溶接」は、一般に溶接材料(溶加材)を使用し溶接材料と接合すべき母材と一緒に溶かすことで、母材と母材をつなぐ。「圧接」は、母材と母材を十分に加熱してから圧力を加えてつなぐ。圧接では溶加材は用いない。「ろう接」は、はんだ付けで知られているように、母材を溶かさずろう(溶加材)だけを溶解して母材同士をつなぐ。

鉄は、あらゆる溶接法(図1)がすべて適用できる唯一の金属だ。例えば、ドラム缶の製造には「シーム電気抵抗溶接」、レールの現場敷設接合には「テルミット溶接」、というようにそれぞれの加工に適した溶接メニューが適用可能だ。ところが、酸化しやすいアルミやチタンの場合は溶接方法が限定されてしまう。溶融溶接では「ミグ・ティグ溶接」(純アルゴンをシールドガスに用いる方法)か「電子ビーム溶接(真空中溶接)」しか適用できない。高強度アルミ合金の場合は溶融溶接は一切適用できず、航空機は未だにリベット接合で組み立てられている。

### 溶接方法の種類

図1



鉄はその優れた物理的性質に加え、「切断と接合が簡単」という、モノづくりに際し最も重要な要件を備えた材料だということがわかる。

## 溶接の種類とメカニズム

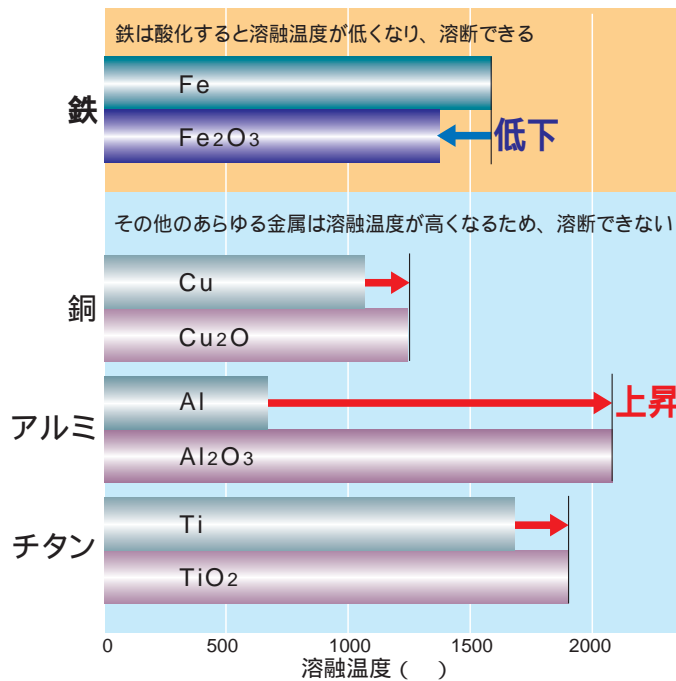
溶接は、接合すべき部分のみを熱し局部的に溶解して接合するため、集中熱源を用いる。アーク、レーザービーム、電気抵抗熱、摩擦熱、テルミット（酸化鉄と純アルミ粉末の爆発的化学反应熱）などのさまざまな方法が適用される。

電気を通しやすい二つの導体をお互いに近づけ電圧をかけた場合、導体同士が接触するとスパークが発生するが、適当な間隔に保つと導体間に弧状のアークが発生し持続される。アークの中では気体が電子と陽子に電離した状態、「プラズマ」になっている。アーク中の温度は1万度近くにも達し、太陽の表面温度に近い高温が手軽に得られ、溶融温度の高い金属を溶かす溶接に専ら用いられてきた。

多くの溶融・溶接法のうち、最も一般的に用いられるのが、「ガスシールドアーク溶接」だ（図3）。高温のアークによりワイヤ（溶加材）先端が溶け、それが溶滴となって母材に衝突し、母材も一部溶かすことによって溶融溶接が進行する。アーク中に空気が巻き込まれると、溶滴は酸化・窒化され溶接金属が脆くなる。そのため、アルゴンや炭酸ガスで空気を遮断（シールド）することが必要となる。被覆アーク溶接では溶接棒を被覆しているフラックス（鉱物の粉体）が燃えてガスを発生させシールドし、サブマージアーク溶接はスラグ（溶融フラックス）でアークを覆いかぶして空気を遮断して溶接する。

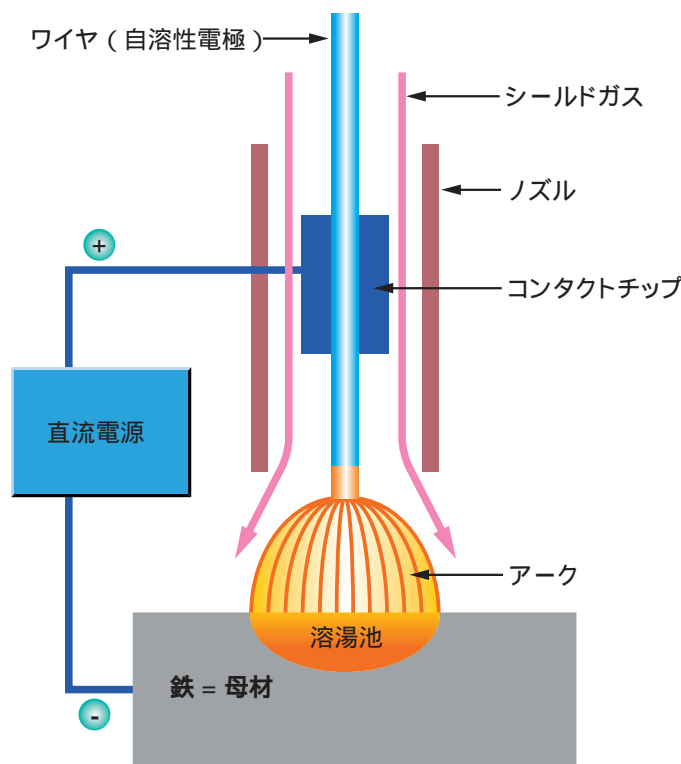
自動車用鋼板など薄板溶接には、「電気抵抗スポット溶接」が適用される（図4）。二枚に重ねた鋼板を上下から銅電極で押さえつけて通電し、その抵抗発熱で鋼板接触部を加熱し溶解して接合する方法だ。溶接は数秒で完結する。押さえの電極が回転円盤であればシーム溶接でありドラム缶製造などに適用される。シーム溶接のうち、鋼板を押しつぶすほどに加圧力を増したのが「マッシュシーム溶接」で、飲料缶製造に適用される。例えば、スチール飲料缶で筒の印刷が施されていないところに走っているのが、マッシュシーム溶接線だ。

## 身近な金属とその酸化物の溶融温度 図2



鉄の酸化物は鉄よりも溶融温度が低く、そのために溶断が容易にできる。そうした特性をもつのは、あらゆる金属の中で鉄だけである。

## ガスシールドアーク溶接の原理 図3



ワイヤ電極先端と溶接すべき母材の間隔が10mm程度に保たれ、アークが発生する。高温のアークによりワイヤの先端が溶けて、母材も一部溶かし溶融溶接が進行する。

## 溶接は原子と原子の結合

溶接では、母材の一部を溶かして溶接金属を形成し、それが冷えて固まり、母材同士が接合される。(図5 / 上) すなわち金属原子同士がくっついた状態となっている。

第2次世界大戦以前には、ごく一部の潜水艦や橋梁にアーク溶接が用いられたが、鋼構造物のほとんどは「リベット構造」(図5 / 下) だった。真っ赤に熱したリベットを、母材とあて板の穴に通してリベットの頭をたたき、リベットが冷却するときの収縮力で強固に接合する方法だ。溶接のような原子と原子の結合ではなく、母材とあて金が機械的に密着している状態なので、当然高圧には耐えきれない。水密性と気密性の点と重量減の点から溶接構造は格段に優れており、戦後リベット構造は姿を消した。

これも第2次世界大戦中だが、米国は欧州戦と太平洋戦と戦線を同時拡大し、戦略物資を供給する補給船を大量に製造する必要に迫られていた。各造船所はリベットに換えて溶接を初めて採用し、生産効率を格段に向上させ、「戦時標準船」(設計と製造法が同じ) を短期間に製造することに成功した。ところが、全溶接船は船体の端から端まで金属結合しているため、一部で受けた衝撃(波)が、一瞬の間に全船体に伝わってしまう。

写真1は静かな港に停泊していた戦時標準船(全溶接船)の一隻が、突然真二つに破壊したときの姿を写している。船体のどこかに加わった力が、最も弱い所に集中して生じた脆性破壊だった。当時の関係者は、多数の標準船を徹底的に調査し、脆性損傷を受けた船とそうでないものを統計処理して、母材のシャルピー値が0で15ft-lb (21J) 以上あれば損傷の率は極めて低いことが分かった。現在でもこの値は鋼材規格の重要な尺度となっている。

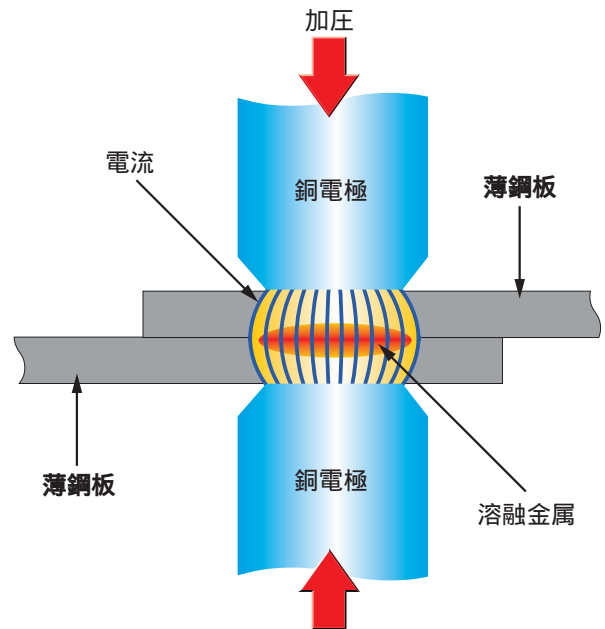
## 造船業の発展を支える 大入熱溶接用鋼

船舶の外板同士の接合には、「サブマージアーク溶接」が用いられる。フラックスを散布するため水平に配置しなければならず、上からしか溶接できないという欠点があるが、強烈なアー

シャルピー試験：衝撃破壊試験。脆性破壊に対する材料の抵抗力、すなわち材料の靱性値を計る試験。

## 電気抵抗スポット溶接の原理

図4

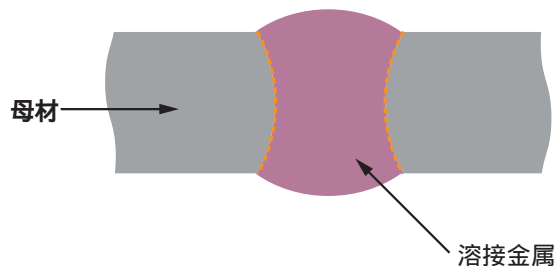


二枚を重ねた鋼板を上下から銅電極で押さえつけて通電し、その抵抗発熱で鋼板接触部を加熱し溶解して接合する方法。

## 溶接構造とリベット構造

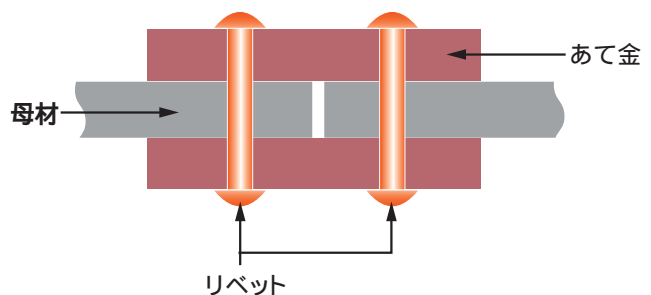
図5

### 溶接構造



溶接部は、溶接金属を介して母材同士が金属結合し、金属原子同士がくっついた状態となっているため、強固な構造。水密性と気密性、重量減の点から優れた構造となっている。

### リベット構造



溶接のような原子同士の結合ではなく、母材とあて金が機械的に密着している状態なので、高圧には耐えきれず、戦後リベット構造は姿を消した。

## 戦時標準船（全溶接船）

写真1

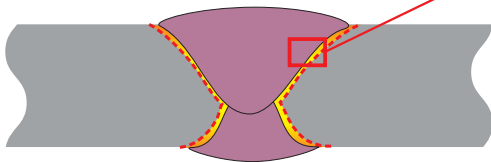
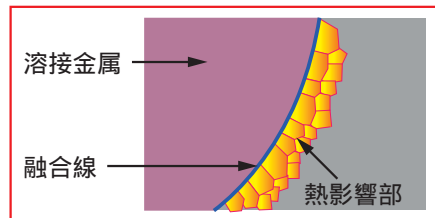


静かな港に停泊していた戦時標準船の一隻が、突然真二つに破壊した様子。船体のどこかに加わった力が、最も弱い所に集中して生じた脆性破壊だった。

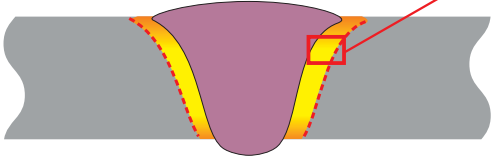
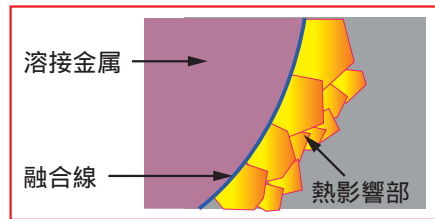
## 熱影響部の結晶粒比較

図6

### 両面サブマージアーク溶接の場合



### 片面サブマージアーク溶接の場合



大入熱溶接の場合、特に熱影響部（溶接金属との境界に近い部分）の結晶が粗大になる。結晶粒が粗大になると、その部分が脆くなり、シャルピー値は低下し規格を満足できなくなる。

ク光をフラックスが覆ってくれるので、大電流を使用でき溶接生産性は極めて高い。外国の造船所では両面溶接（片側を溶接してから、大板をひっくり返してまた他の面を溶接する方法）を行うが、日本の造船所は板が厚くとも片面から超大電流で一気に溶接してしまう。投入熱量が大きいので「大入熱溶接」という。

大入熱溶接は生産性は高いが、母材で溶接熱の影響を受けた部分、とくに溶接金属との境界に近い熱影響部の結晶が粗大になる。（図6）結晶粒が粗大になるとその部分が脆くなり、シャルピー値は低下し規格を満足できなくなる。

そこで、1970年代、新日鉄は大入熱溶接でも脆くならない鋼材の開発に取り組んだ。鋼にチタンを添加し、チタンと窒素の化合物であるTiNを鋼材に析出分散させ、この析出物によって熱影響部での結晶成長を止めて脆化を抑制する大入熱溶接用鋼の製造に成功した。

日本は人件費が高く、製造業は他国を凌駕する生産性を確保しなければ、生き残れない。片面サブマージアーク溶接技術がその一例だ。これは大入熱溶接用鋼の開発があってこそ適用できる技術で、日本の造船業と鉄鋼業は、鋼材開発と一体となって片面溶接技術を協力して開発してきた。韓国が両面溶接で製造している理由は、大入熱溶接用鋼が手に入らなかったからである。

次号では、「溶接」から生まれた新日鉄の優れたオキサイドメタラジーと、それをベースに発展してきたトップクラスの鋼材開発、溶接技術を紹介する。



監修 新日本製鉄(株)顧問 百合岡 信孝（ゆりおか のぶたか）

#### プロフィール

1940年生まれ、大阪府出身。

1965年入社。1995年フェローを経て、2001年より顧問。

1998年：(社)日本鉄鋼協会 浅田賞

1999年：(社)溶接学会 佐々木賞

2003年：文部科学大臣賞 科学技術功労者賞