

溶接残留応力入門

梅本 忠宏 Tadahiro UMEMOTO
原電事業株式会社 敦賀支社
施設部 設計グループ

1. はじめに

残留応力は設計時には考慮されないことが多いが、日本機械学会発行の「機械・構造物の破損事例と解析技術」¹⁾に上げられた事例（応力腐食割れ、疲労破壊、ぜい性破壊、バックリングなど）中、残留応力が関与していると思われるものは（筆者の判断も入れ）約33%にも及ぶ。このように残留応力は多くの破損に関与しているので、機器の保全（破損の予想、予防を含む）には、その知識を欠くことは出来ないと考えている。

ところが残留応力の発生メカニズムは、まだ充分解明されていないところもあり、難解である事も事実である。しかし、いくつかの法則らしきものがあり、それを理解すると残留応力の発生や、その大きさ、作用する方向などもある程度予測できるようになる。

科学技術はすべて正確なデータベースによって裏づけされるのが好ましいが、現実には、無数の境界条件があり個々にデータを要求することは難しいことでもある。したがって、技術者には予測する能力が問われ、これがいわゆる「勘」と言うものである。「勘」というと、非科学的に考えられる方も居られるかもしれないが、広い知識や経験と深い洞察力に裏付けられた「勘」は、よく的中し、問題発生防止や、原因究明などに非常に役立つものである。

ここでは、若い技術屋さんには、残留応力に関する「勘」を醸成していただくことが出来れば…と思い、主として溶接残留応力発生メカニズムについて、浅学を省みず、筆者の独断も含め解説してみることにした。出来る限り平易に説明したつもりなので、機械工学を専門にしない方でも気楽にお読みいただけることを期待している。

2. 残留応力発生メカニズム入門

2-1) 金属材料の予備知識

金属棒を引張るときの挙動を図-1に示す。横軸は

棒の伸び、縦軸は棒に加わる力（引張軸力）を示している。棒に加わる力が小さい間（図中の「Y」まで）は、加えた力と伸びは比例関係にあり、力を取り除くと元の長さに復帰する。しかし、力をもっと加えて行くと、力と伸びの比例関係が成り立たなくなる限界がある。これを弾性限界（≒降伏点：Yで表現）と呼んでいる。降伏点を越えるまで力を加え、棒を伸ばした後、力を除くと、棒は元の長さには戻らず、**少し長くなった状態**で留まる。この伸びを永久伸び（塑性伸び）という。

金属の棒を圧縮する場合も、棒が伸びる代わりに縮むこと以外は、引張の場合とほぼ同様である。すなわち、圧縮力が小さい間は、棒の縮み（ちぢみ）と力は比例関係にあり、さらに強い力を加え、降伏点を越えて、大きく棒を縮めると、力を除いても棒は元の状態までは戻らず、**少し縮んだ状態**で留まる。すなわち元の長さより小さくなってしまふ。

このように金属材料は、その降伏点を越えるような大きな力を受けると、元の状態より伸びてしまったり、縮んでしまったりする。実は、このような現象が局部的に生じることによって、残留応力が生じるのである。

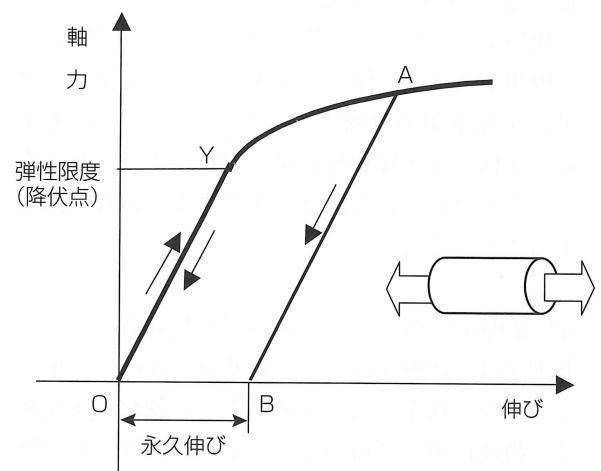


図-1 金属丸棒の引張（弾性限度と永久変形）

ここで、「応力」というのは、部材に加わっている力を「単位断面積あたりに加わる力」として表現したもので、 $[\text{kgf}/\text{mm}^2]$ や $[\text{MPa}=\text{N}/\text{mm}^2]$ 等の単位で示される。応力の概念は、大きさ（断面積）の異なる部材の強度評価等に便利で常用される。

2-2) 残留応力発生の簡単な例

両端を剛体によって完全に拘束された金属棒を加熱するとしよう。この棒の熱膨張は、剛体によって完全に拘束され、また温度による物性値の変化はないものとする。

拘束を受けていない時、金属棒は、元の長さ (L) に線膨張係数 (α) と温度上昇 (ΔT) を掛け合わせた量 (ΔL) だけ伸び、全長は：

$$L + \Delta L = L + \alpha \cdot \Delta T \cdot L \quad [m]$$

この金属棒が完全に拘束されているということは、この膨張した状態 ($L + \Delta L$) から元の長さ (L) まで圧縮した状態と考えてもよい。従って圧縮ひずみ (ε_c) は

$$\varepsilon_c = -\Delta L/L = -\alpha \cdot \Delta T \cdot L/L = -\alpha \cdot \Delta T$$

となる。即ち、加熱部の温度が上昇するに従い、圧縮ひずみが増え、引いては応力も増える。この様子を図-2で説明しよう。温度上昇に伴って、圧縮ひずみが増え、応力はO点からY_c点まで弾性的に圧縮され、引き続き塑性変形を伴いながらP₁点にまで圧縮される。この点 (P₁) は、ひずみ $= -\alpha \Delta T_1$ に相当する所であり、従って、P₁点の位置は、加熱温度が高い (T₂) と、左に移動しP₂点に達する。低い場合は右方向に移動する。

このP₁点の位置は、降伏応力を超えているから、図-1で説明したように、応力を開放し温度も下げると、金属棒は元の長さより短くなっている (永久縮みが出ている)。即ち、同図の点Q₁の状態となっている。しかし、この金属棒は両端を完全に拘束されているから、見かけ上、永久圧縮ひずみが無い状態 (横軸が“0”の点：R₁) まで伸ばされる。即ち、点R₁の引張残留応力を生じたことになる。同様に、T₂まで加熱されて時は、R₂の残留応力を生じる。

拘束された金属棒の加熱と似た状態は、金属板の一部を加熱する (例えば溶接する) 時にも生じる。と言うのは、加熱部 (溶接部) に比べまわりの非加熱部 (母材部) が大きいので、加熱部 (溶接部) の熱膨張

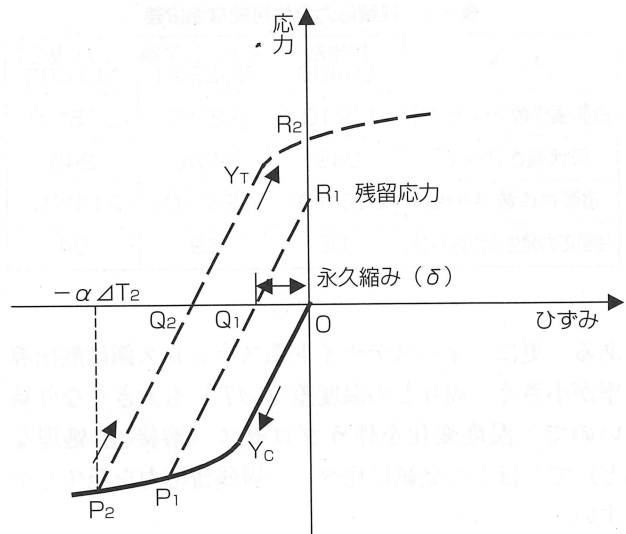


図-2 拘束金属棒の加熱・冷却に伴う残留応力

をほぼ完全に拘束してしまうからである。

以上の現象を一般化して言うと、「局部加熱を受けたところには、引張の残留応力が残る」ということになる。

2-3) 残留応力を発生に必要な温度差

それでは次に、どの程度の加熱 (周囲との温度差) を受けたら残留応力が発生するのかを簡単に予測してみよう。残留応力が発生するかどうかの判断は、既に述べたように、熱膨張による応力 (熱応力という) が弾性範囲を超え降伏するかどうかで判断する。従って次式で限界を表す。

$$\text{熱応力の絶対値} \geq \text{降伏応力の絶対値}$$

で与えられる。応力 $[\sigma]$ は、ひずみ $[\varepsilon_c]$ に縦弾性係数 $[E]$ を掛けることで得られるから、

$$\sigma = E \alpha \Delta T \geq \sigma_y \quad (\text{降伏応力})$$

この計算を、炭素鋼、オーステナイト系ステンレス鋼、ニッケル基合金について行った結果を表-1に示す。各材料の物性値は温度依存性を示すが、簡単のため常温での値を用いている。

表から分るように、炭素鋼では100℃以上の温度差が無ければ残留応力を発生しないが、オーステナイト系ステンレス鋼では70℃足らずの温度差で残留応力を発生することになる。ニッケル基合金は両者の中間で

表-1 残留応力発生可能な温度差

材 料	炭素鋼 SS400	ステンレス鋼 SUS304	ニッケル合金 NCF600
線膨張係数 [m/m/°C]	11.5×10^{-6}	15.2×10^{-6}	12.15×10^{-6}
降伏強さ [MPa]	245	205	245
縦弾性係数 [MPa]	203×10^3	195×10^3	214×10^3
残留応力発生温度差 [°C]	105	69	94

ある。更に、オーステナイト系ステンレス鋼は熱伝導率が小さく、周りとの温度差 (ΔT) も大きくなり易いので、温度変化を伴うプロセス (溶接、熱処理など) で、ほかの金属に比べ、一層残留応力を発生しやすい。

2-4) 残留応力の大きさ (1)

再び図-2で説明する。加熱温度が高く、大きな永久縮みを伴った時 (P_2 点まで至った時) は、加熱部が冷却される際に、引張り側での弾性限 (σ_y) を越え、若干の塑性ひずみを伴って、 R_2 点に到達する。塑性域に入ってから応力の増加はあまり大きくないので、通常「残留応力の最大値は、大略その材料の降伏強さにはほぼ等しい」と言える。

例えば、薄板 (10mm程度) の炭素鋼の溶接部の残留応力は、後述するように大体降伏応力レベルである。

2-5) 残留応力の大きさ (2)

前述の局部加熱による昇温・降温サイクルが $0 \rightarrow \Delta T \rightarrow 0 \rightarrow \Delta T \rightarrow 0 \dots$ のように繰り返し加わるような場合 (例えば、多数パスで溶接を行う場合など)、材料には繰り返し応力ひずみサイクルが加わる。この場合、材料によっては、1サイクル目より、2サイクル目、更に3サイクル目の方が、材料が硬く (強く) なって行く現象がある。

例えば、図-3に於いて、0から圧縮ひずみ: $-\alpha \Delta T$ のサイクルを繰り返す場合を考える。1サイクル目は、温度上昇と共に、応力は、0から曲線 (1) に沿って S_1 まで進む。次に、温度差が減少すると、応力は弾性的に開放され、曲線 (1) [太線] に沿って進み、見かけのひずみゼロの R_1 点に至る。再び温度上昇させると、曲線 (2) [細線] に沿って圧縮され、曲線 (1) を超えたところで降伏し S_2 に至る。すなわち1回目の応力より (絶対値で) 大きな圧縮応力を発生する。この状態から、冷却してゆくと、応力は再び弾性

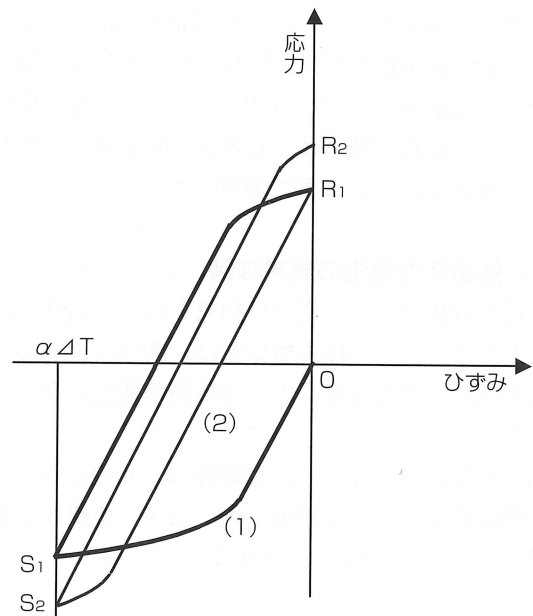


図-3 繰返し負荷サイクルを受ける場合の残留応力

的に開放され、曲線 (2) に沿って上昇し、曲線 (1) を超えたところで、降伏し R_2 に至る。

この様にサイクルを繰り返すごとに、前の状態より硬く (降伏点が高く) なる現象を、繰返しひずみ硬化と言う。繰返しひずみ硬化は、オーステナイト系ステンレス鋼や、ニッケル合金の溶接熱サイクルでも現れ、溶接残留応力も降伏応力に比べかなり高く400~500MPaにも達することもある。

3. 溶接残留応力

溶接時には、接合部が金属の溶融点まで急加熱され、室温に急冷される。前に述べたように炭素鋼の場合であっても、100°Cを超える急激な温度差があると、ほぼ降伏応力を発生し、残留応力を生じる。溶接の場合、鋼の溶融温度と室温との温度差は、ほぼ1500°C程度にも達するから、降伏応力を大きく上回る熱応力が発生することが容易に想像できる。

しかし、正確にはこの表現は適切ではない。というのは、金属はその溶融点に至るはるか手前の再結晶温度 (焼鈍温度にほぼ相当し、炭素鋼で約650°C、オーステナイト系ステンレス鋼で、約1050°C) で、明確な降伏強度はなくなり、その温度を超える高温部分は熱応力発生にはあまり寄与しない。

この過程を簡単なモデルで説明する。図-4では、

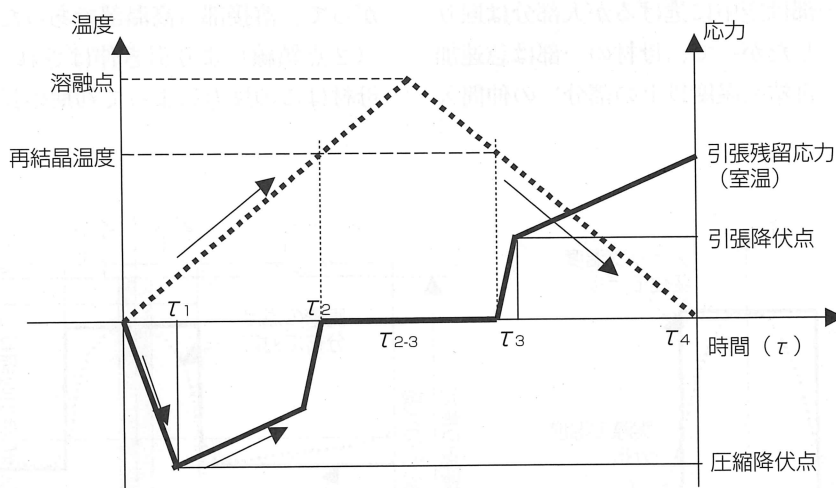
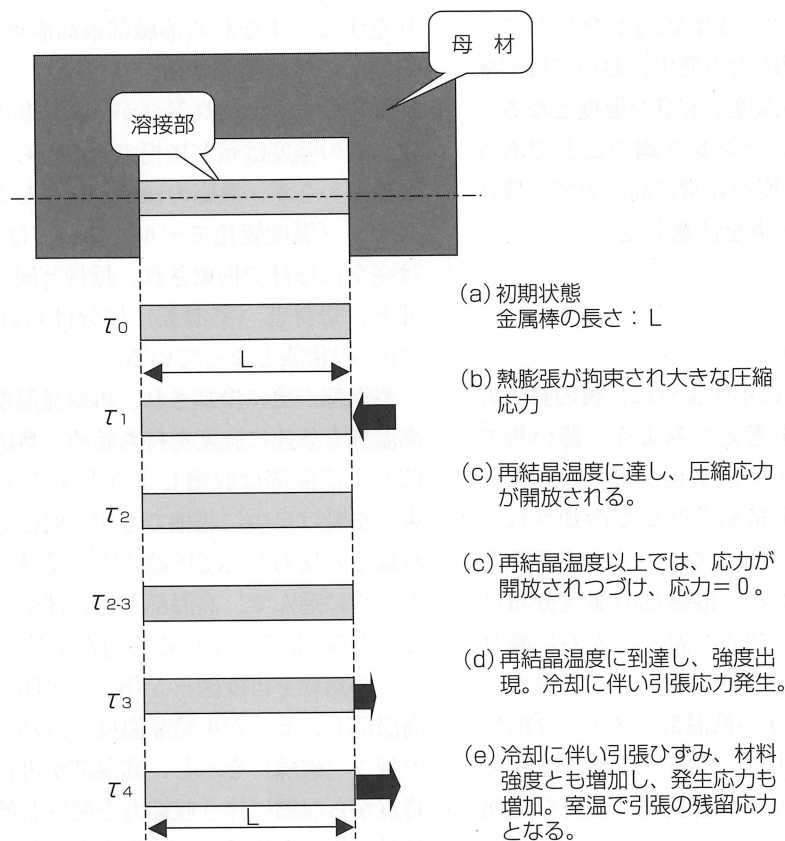


図-4 溶接部の一要素モデル

溶接部を金属棒に、周囲の母材を剛体にモデル化している。同図の下のグラフでは、金属棒の温度を点線で、発生応力を実線で模式的に表現している。溶接が始まり τ_1 秒後に溶接部は圧縮の降伏点に到達し、引き続き加熱で温度上昇するが、降伏点が温度上昇と共に低下するので、発生応力は低下して行く。そして、 τ_2 秒後に再結晶温度に到達すると、発生応力はほと

んど“0”となる。溶接部は更に温度上昇し熔融状態となる。次に冷却行程に入り、収縮するが、応力は“0”の状態でも推移する。 τ_3 秒を経過し、再結晶温度まで冷却されると、材料が有意な強度を持ち始めるから収縮に伴う応力を発生する。更に冷却が進むと、収縮と同時に、溶接部の降伏強度も上昇するので、発生する応力は増加してゆく。そして室温まで冷却され

た時には、室温の降伏強度の残留応力が発生している。このように、溶接残留応力の発生においては溶融点の温度ではなく、再結晶温度が有意な温度となる。また、オーステナイト系ステンレス鋼のことであるが、炭素鋼に比べ再結晶温度が非常に高いので、残留応力も高くなる傾向にある事を注意したい。

3-1) 薄い板の残留応力

(a) 残留応力の発生過程

薄い2枚の板が、図-5に示すように、板の長手方向に溶接接合される場合を考えてみよう。薄い板では、板厚方向の熱容量が小さく、裏面まで熱が速く拡散されるので、溶接部が再結晶温度まで冷却された時、板厚方向の温度差はほとんどなく、表面も裏面もほとんど同じ温度分布となる。溶接部の温度分布は(a)に示すように、溶接中央部で高く、左右に離れるに従って急激に低下する。簡単のため、この分布を実線で示すように、高温部から低温部へステップ的に変化するとモデル化する(以下、ステップ温度変化モデルという)。なお、簡単のため溶接線に直角な方向の伸びや応力は無視する。

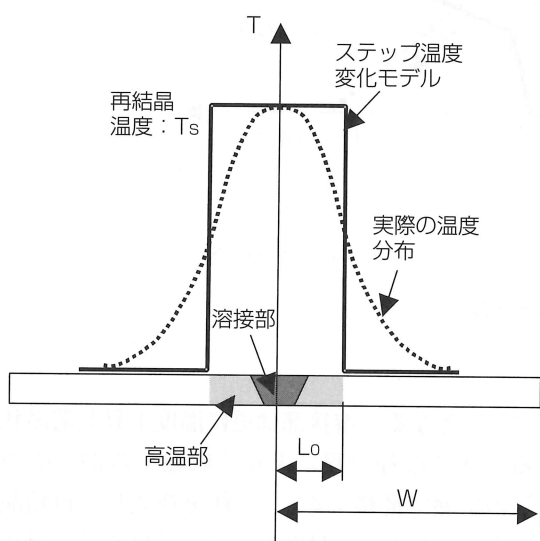
溶融部の熱は、一部は空中に逃げるが大部分は回りの母材に拡散する。したがって、母材の一部は急速加熱を受け、高温部(再結晶温度以上の部分)の仲間入

りをする。すなわち溶融部最高温度の低下に伴って、高温部の幅は増加する。

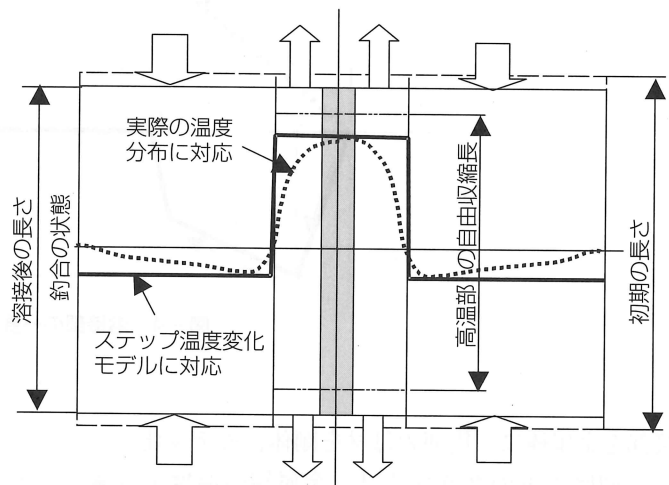
前述のように、高温部が、再結晶温度より高温の間は、その強度は殆ど無視できるから、温度差はあるにもかかわらず、熱応力は殆ど発生しない。すなわち、ステップ温度変化モデルに於いては、高温部の熱膨張は完全に母材で拘束され、母材と同じ長さを持つ高温部と、母材部(室温部)に分けられ、互いに熱応力“0”の状態となっている。

高温部が更に冷却され、再結晶温度以下になると、高温部も急速に強度を持ち始め、熱応力が発生する。即ち、高温部は収縮しようとするが母材の抵抗(拘束)を受け自由に収縮できず、引張応力を発生し、母材はその反力として圧縮応力を受ける。このプロセスがさらに進んで、高温部と母材部が殆ど均一な温度になった時、発生している応力が溶接残留応力である。

この過程を再度図-5(b)で説明しよう。母材部も高温部も、それが再結晶温度に冷却されるまでは、元の長さ(破線)を示し、高温部が再結晶温度に達した時点から収縮に伴う収縮力を発生し始める。しかし、母材の拘束を受けるので自由には収縮できない。したがって、溶接部(高温部であった所)は自由収縮長さ(2点鎖線)より引き伸ばされ(引張残留応力が)、母材はこの反力によって初期の長さより縮められ圧縮



(a) 温度分布



(b) 残留応力の発生と分布

図-5 平板の残留応力の発生モデル

残留応力が発生し、実線の状態で釣り合う。

実際の温度分布は、ステップ温度変化ではなく、同図 (a) に点線で示すように、なだらかな分布となるから、残留応力のほうも、同図 (b) の点線のようになだらかな分布となる。

(b) 残留応力を左右する因子

上述のように、残留応力の原因となる高温部の熱ひずみは、高温部が再結晶温度 (T_s) まで冷却された時の (高温部温度 - 母材温度) で左右されるから、次式で表される。

$$\text{熱ひずみパラメータ} = a(T_s - T_a) \quad (1)$$

ただし、 T_a : 溶接予熱温度 [°C]

拘束の強さは、母材部と高温部との比 (比が大きいほど拘束が大きく残留応力は高い可能性が出る) で決まるから、次式で表される。

$$\text{拘束パラメータ} = W/L_0 \quad (2)$$

W : 板幅 [m]、 L_0 : 高温部幅 [m]

L_0 はこのモデルに対し次式で表される。(溶接入熱により、幅 : $2L_0$ の部分を T_a から T_s まで温度上昇させるから、入熱量と温度上昇分の熱量が等しいとお

く事で得られる)

$$L_0 = 0.5 \frac{Q}{c\rho(T_s - T_a)h} \quad (3)$$

Q : 溶接入熱 [J/m]、 c : 比熱 [J/kg/°C]、
 ρ : 比重 [kg/m³]、 h : 板厚 [m]

式 (1) および (3) は、残留応力を小さくするための手立てを示唆している。これらの式の中で a 、 T_s 、 c 、 ρ は物性値であり材料で決まってしまう。

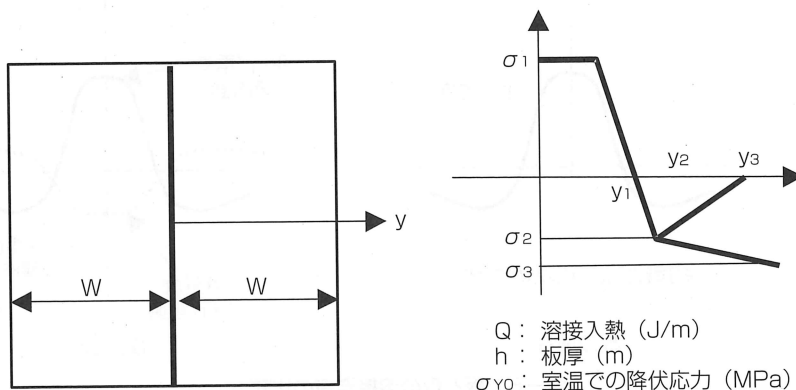
例えば、オーステナイトステンレス鋼は炭素鋼に比べ、 c 、 ρ はほぼ同じであるが、線膨張係数が大きく、再結晶温度も約1050°Cと高い。したがって、熱ひずみパラメータは大きく、また、高温部幅 : L_0 は (分母が大きいので) 小さくなる。即ち、熱ひずみは大きく、式 (2) の拘束の強さも大きくなり、残留応力は高くなる。

一方、 T_a や Q/h は溶接施工パラメータであり、施工者によって選択出来る。予熱温度 (T_a) を高くし、溶接入熱 (Q) を大きくすると、 L_0 が大きくなり、式 (2) は小さくなることから、残留応力が下がる事を示している。

佐藤ら^[3]は、薄肉炭素鋼板 (SS400相当) の溶接残留応力に対するパラメータサーベイを行い、推定式を表-2のように提案している。この表に於いても、 Q/h

表-2 SS41 (現SS400) の薄肉鋼板の残留応力^[3]

板幅 (m)	残留応力 (MPa)	位置 (m)
$W \geq 2.4 \times 10^{-9} Q/h$	$\sigma_1 = (1.0 \sim 1.1) \sigma_{y0}$ $\sigma_2 = -0.25 \sigma_{y0}$ $\sigma_3 = 0$	$y_1 = 1.44 \times 10^{-10} Q/h$ $y_2 = 4.8 \times 10^{-10} Q/h$ $y_3 = 26.4 \times 10^{-10} Q/h$
$W \leq 2.4 \times 10^{-9} Q/h$	$\sigma_1 = (0.9 \sim 1.1) \sigma_{y0}$ $\sigma_2 = -0.1 \sigma_{y0}$ $\sigma_3 = -0.8 \sigma_{y0}$	$y_1 = 0.18W$ $y_2 = 0.4W$ $y_3 = W$



h (ひいては L_0) と W がパラメータとなり、 W と Q/h の比 (W/L_0) が小さい方が、残留応力 (σ_1) は若干低くなる。(この場合、材料が炭素鋼一種類で予熱も考慮していないので、熱ひずみパラメータに関しては表に出てこない)

3-2) 薄肉の管

薄肉管についても、熱の移動に関しては、ほぼ平板と同じである。しかし溶接変形に対する拘束状況は、図-6に示すようになり異なる。特に管の溶接では、溶接の縦収縮が管の絞り(溶接部の管半径の減少)として現れるので、薄肉管であっても、溶接に直角な方向の残留応力(薄板の場合は低い)が大きく

なる。また、この絞りのため、管の内外面で軸方向残留応力の符号が変わる事が多い。

もう少し詳しく説明すると、溶接部の収縮に関する拘束パラメータは管壁の曲げ剛性： β が関与する^[4]。この値は薄肉管の解析より次の様に与えられる。

$1/\beta$ の詳しい説明は省略するが、管に周溶接を行った時、溶接変形を強く受ける範囲にほぼ等しいと考えてよい。したがって拘束のパラメータは

$$\text{拘束のパラメータ} : 1 / (\beta L_0)$$

となる。

小口径薄肉配管では、 $1/\beta$ すなわち $0.778 \sqrt{ah}$ は、

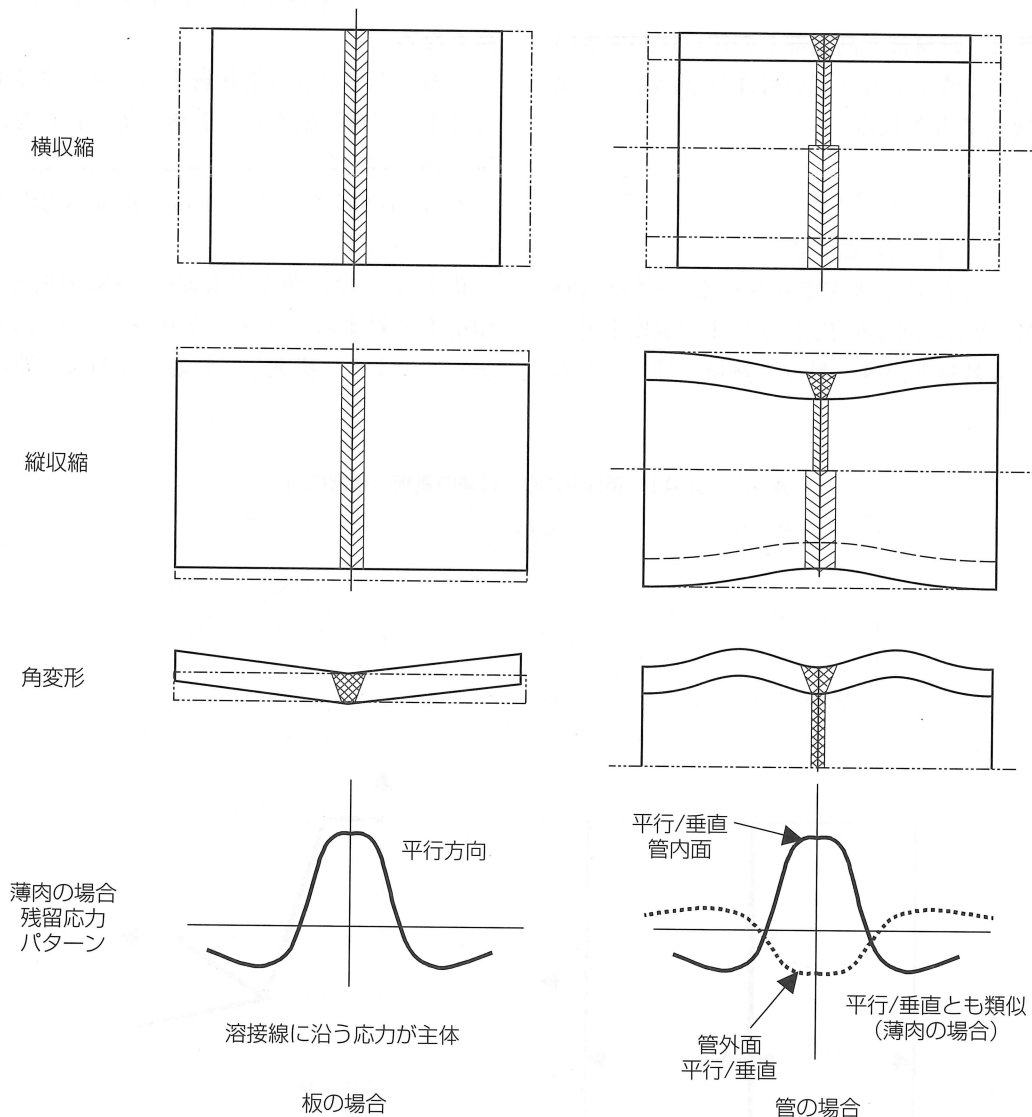


図-6 板と管の溶接拘束の比較

半径も、肉厚も小さな値であるから、小さくなる。一方、肉厚が小さくなるので、同じ入熱でも L_0 は、大きくなる。すなわち小口径の配管では、拘束パラメータが小さくなるので、残留応力が小さくなる傾向にある。特に板厚： h は、 β と L_0 の両方に影響するから残留応力には強い影響を表す。図-7には、板厚の影響を調べた実験結果の例^[4]を示すが、板厚の減少と共に、軸方向残留応力の最大値が減少してくるのがわか

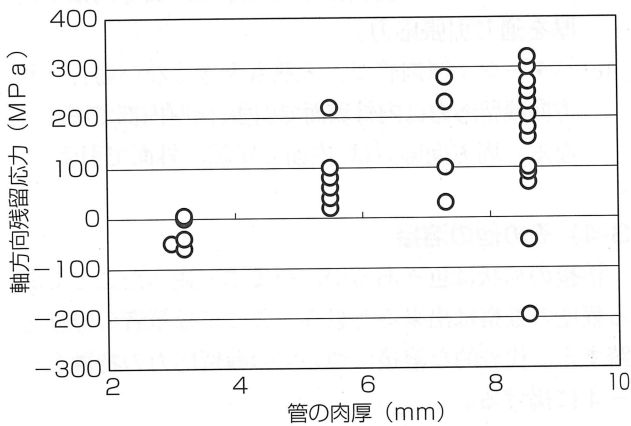


図-7 管の内厚による残留応力の変化 (SUS304、入熱：20kJ/cm)

る。なお、図示はしていないが、周方向残留応力も全く同じ傾向にある^[4]。

3-3) 厚肉の配管

配管の肉厚自身が大きくなると、薄肉管と変わる点が二つ出てくる。

- (1) 一層での溶接が出来ず、多数パスの溶接を行うことになる。
- (2) 溶接時の温度分布は、板厚方向にもかなりの温度勾配を持つことになる。

多数パスの溶接に於いては、それぞれの溶接パスごとに残留応力が、熱弾塑性的（温度上昇による機械的性質の変化も考慮した熱応力による弾塑性応力-ひずみ過程的）に加算されてくる。しかし、前のビードによる残留応力は、引き続き溶接ビードの加熱・冷却過程で緩和されるので、最終の残留応力状態に最も大きい影響を及ぼすのは、最終層の溶接と近似的に考えられる。

上記(2)の板厚方向温度勾配については、簡単のため、図-8に示すように、溶接部を輪切りにした（軸方向断面）モデルで考える。最終層の溶接時に

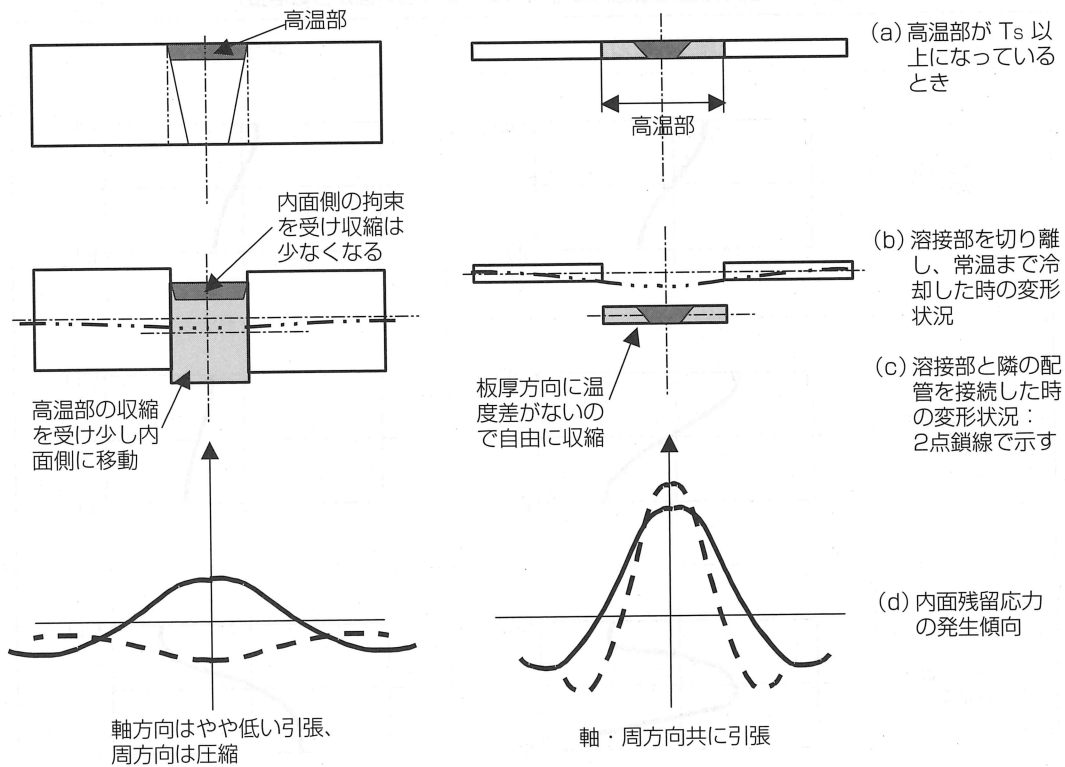


図-8 薄肉管と厚肉管の残留応力の違い

は、配管の外面が高温で、内面は低温となる。高温部は当然金属の再結晶温度以上に昇温するから、その状態では強度を持たず、殆ど熱応力を伴わないまま、母材と同じ周長を維持することになる。溶接部が再結晶温度以下に冷却されると、強度を急速に持ち始めるので、溶接部の収縮に伴う応力が発生する。すなわち、母材部は最終層溶接部からの締め付けを受けるので、圧縮応力を発生し、最終層はその収縮の大部分を母材で阻止されるので、引張応力を発生する。この様なわけで、厚肉管の周方向溶接部は、内面では圧縮、外面では引張りとなることが多い。

軸方向の温度分布については、薄肉管とほぼ同じ考えが成立する。したがって、軸方向応力に関しては、管内面で引張りとなることが多い。しかし、溶接収縮が少ないので、応力値は低くなる。

もう少し詳細な検討を行った結果^[5]によると、次に示す無次元入熱： F_r が厚肉管の周方向溶接による残留応力の管壁内分布パターンを支配する。

$$F_r = \frac{Q}{2\pi c\rho(T_s - T_a)h^2} \quad (4)$$

ここに、 π ：円周率、他の記号は前出のとおりである。

参考として、溶接線上での代表的な分布パターンを表-3に示す。パラメータは、上記(4)式による。

- (a)パターン：入熱が非常に大きいか、肉厚がかなり薄い場合。軸方向、周方向応力残留応力とも小さく内面引張、外面圧縮のパターン。
- (b)パターン：薄肉管であるが、入熱が低い場合。軸方向、周方向ともに残留応力は高。軸方向は曲げパターンで、内面引張り外面圧縮。周方向は全肉厚を通じ引張応力。
- (c)パターン：厚肉管で、入熱も大きくない場合。軸方向残留応力は内外表面で引張、肉厚内部で圧縮となる。周方向応力は、内面で圧縮、外面で引張。

3-4) その他の溶接

溶接の形状は色々あるが、いままで述べたことである程度の推察は出来ると思う。ここでは筆者の経験を踏まえ、代表的な溶接についての残留応力の特徴を表-4に掲げる。

表-3 管の溶接残留応力の分布パターン (管外面からの溶接)⁽⁵⁾

無次元パラメータ	軸方向応力	周方向応力
パターン(a) 32.		
パターン(b) 3.2		
パターン(c) 0.04		

表-4 色々の溶接残留応力

符 号	概略図	特 徴
(a) 内面からの周溶接	厚肉管 (薄肉管は外面からと同じ) 	内面： 周方向は非常に高い引張 軸方向はかなり高い引張 外面： 外面圧縮または弱い引っ張り
(b) 内外面からの周溶接	内面を後に溶接 外面を後に溶接 	内面を後に溶接 (a)とほぼ同じ。但し、外面の応力は、引張側に移行 外面を後に溶接 外面からの溶接にほぼ同じ。但し、内面の残留応力は引張側に移行
(c) ソケット溶接		ソケット溶接 疲労試験で、SRしたものに比べ低い疲労強度を示す。 割れは矢印の部分で発生。(引張残留応力がある) 形状効果もあり、疲労に不利
(d) ノズルのセットオン溶接		ノズル内面 周方向応力が大きい (特に母管の横方向断面内：↔印部) 母管内面 薄肉 (≤10mm程度)：ノズル周方向と同じ 厚肉：薄肉よりやや低い。
(e) セットイン溶接		母管肉厚大きい場合 ノズル溶接部内面 (→部) の周方向応力が非常に高い。 内面の軸方向応力は溶接端部近辺で引張 (あまり大きくない) 母管の肉厚が薄い場合 母管、ノズル共に、溶接線に沿う応力が非常に高い。 (セットオンノズルに比べてかなり高い)
(f) プラグ溶接		周囲に完全に拘束された溶接であるので、高い残留応力を発生する。溶接の周囲に垂直な応力が高く、応力腐食割れなどは、円周状に出る。
(g) 部分補修溶接		部分補修溶接は、局所的な溶接であるため、補修溶接時の拘束が強く、高い引張り残留応力を生じる。内面からの補修は、内面残留応力を更に高める。
(h) 外面バタリング溶接		管内面の残留応力を、軸・周方向共に圧縮とする。施工時管の内面は冷却する。L、hは次の制限を受ける。 $L \geq \sqrt{a \cdot t}$ $h \geq 0.18 \cdot t$

表中、ソケット溶接については、疲労損傷事例が多く、疲労強度減少係数を求める実証試験も行われている^[6]。通常のソケット溶接をすると、溶接ルート部と管側の溶接トウ部のところに引張り残留応力が発生し、それらの部分から早期に疲労き裂が入る。しかし、応力除去熱処理を行った場合寿命はかなり改善される。

プラグ溶接は周囲をほぼ完全に拘束された場合に相当し、残留応力が非常に高くなる。アークストライクなども、範囲は狭いが、これに近い状態で高い引張り残留応力を残す。特に高張力鋼では、アーク熱による焼入れ硬化と残留応力が重なって、割れを起こすことがあるので、完全に除去するのが一般である。また、高張力鋼の仮付け溶接も同じことが起き易いので、予熱やビード長を30mm以上にすることなどが大切である。

一般に溶接継ぎ手に欠陥が出ると、それを除去して、除去部を再度溶接する。この場合、除去部の大きさは、欠陥が除去できる最小限にとどめられることが多い。そこに溶接補修すると、補修溶接部はプラグ溶接部に近いので、大きな残留応力を残し、応力腐食割れなどを発生し易くすることが多い。

外面バタリング溶接（周溶接）を管の外面に比較的広い範囲で行うと、管の内面での応力を圧縮にすることが出来る。圧縮残留応力を発生するためには、肉盛の範囲： W_B を少なくとも下記の様にする必要がある^[7]。

$$W_B \geq \sqrt{rh}$$

ここに、 W_B ：肉盛の軸方向幅 [m]、

r ：管の平均半径 [m]、 h ：管の肉厚 [m]

この方法を適用する場合は、内面と外面に大きな温度差が取れるように内面を冷却しながら外面の溶接を行う必要がある。

4. あとがき

溶接残留応力の発生は色々の要因が絡み合い複雑な現象で理解しにくい場合が多い。それだけに、多くの方が研究され多くの論文も出ている。しかし、複雑な現象も二次的と思われる部分をはぎ落とし、単純化してゆくことで理解しやすくなるので、ここではそれを主眼に述べた。このモデル化の際には、独断も入っているが、私自身今までこのようなモデルで考え、大き

く外れたことは無かった。それ故ここに紹介したが、読者の方に多少でもお役に立てば幸いです。

参考文献

1. 日本機械学会：構造物の破損事例と解析技術、日本機械学会（1993）。
2. 糸ら：オーステナイト系ステンレス鋼管の溶接残留応力について、溶接学会全国大会講演概要第20集、（1977）。
3. 佐藤邦彦、寺崎俊夫：溶接学会誌、45（1976）、42。
4. 梅本忠宏、田中伸治：石川島播磨技報、23（1983）、527。
5. T. Umemoto and S. Furuya: Nuclear Engineering and Design, 111（1989）、159。
6. 佐藤長光ほか：火力原子力発電、49（1998）、333。
7. 火力原子力発電技術協会：外面バタリング法に関する指針、（1985）。

（平成16年1月28日）