

熔融亜鉛浸漬中に発生する鋼平板の熱ひずみと温度変化

On Thermal Strains and Temperature Variation of Steel Plates by Dipping into Molten Zinc

○今野 貴史* 岩崎 正二** 出戸 秀明** 宮本 裕***

Takafumi KONNO, Shoji IWASAKI, Hideaki DETO, Yutaka MIYAMOTO

* 日本電炉株式会社・東北ガルバセンター (〒025-0301 岩手県花巻市北湯口 18-26-17)

** 工博 岩手大学 工学部建設環境工学科 助教授 (〒020-8551 岩手県盛岡市上田 4-3-5)

*** 工博 岩手大学 工学部建設環境工学科 教授 (〒020-8551 岩手県盛岡市上田 4-3-5)

Member of hot dip galvanized steel structures may encounter crack accidents caused by high thermal strain during hot dipping work. These accidents are supposed to occur because of unusual thermal stresses in hot dipped steel members, which would arise by internal temperature difference between earlier dipped portions and later dipped portions. This temperature difference is owing naturally to the sudden immersion into the molten zinc. In this paper, we are introducing measured results of time series relations between thermal strains and temperature variations, and also illustrating comparisons with other analytic approaches like the analysis of thermal stresses.

Keywords: Hot dip galvanizing, thermal strain, heat diffusivity, temperature distribution

キーワード: 熔融亜鉛めっき, 熱ひずみ, 熱拡散率, 温度分布

1. はじめに

メンテナンスフリーで長期防錆効果が期待できる熔融亜鉛めっきされた鋼構造物は、電力・通信、建築等の幅広い分野に採用されている。送電鉄塔はほとんどすべて熔融亜鉛めっきが施されており、鉄を錆から守るという目的もあいまって省資源・自然環境保護の観点からも熔融亜鉛めっきの市場は拡大している。そして現在は建築・土木関係の本体だけでなく、高力ボルト等の全てに熔融亜鉛めっきを施した鋼構造物が見受けられるようになってきている¹⁾。

熔融亜鉛めっきは鋼部材を約 440~450℃の熔融亜鉛中へ浸漬させて鉄-亜鉛の合金層を形成させ、鉄を錆から守る処理のことである。鋼構造物に熔融亜鉛めっきを施工する場合、鋼部材が約 440~450℃の熔融亜鉛中へ浸漬されるため急激な温度変化が与えられ、先に浸漬する部分と後から浸漬する部分との間に温度差が発生し、部材内に非定常熱応力が生じる。特に、大型の鋼構造物では、部材内に発生する温度分布の落差は大きくなる傾向にあるため、それに伴って生じる熱応力も大きくなる。また、鋼材が高温のため降伏点が低下し、ひずみが大きくなるた

め、めっき後に残留変形が残ることもある。また、実際の残留変形は部材の冷却過程との間連付けが必要であることや、溶接部等の応力集中、溶接残留応力等の複雑な影響因子が絡むこともある。

その一例を示したものが、写真 1 である。写真 1 は、熔融亜鉛めっき後に撮影した板桁であり、急激な温度変化によって溶接部にめっき割れが生じることはないが、変形が生じていることは確認できる。

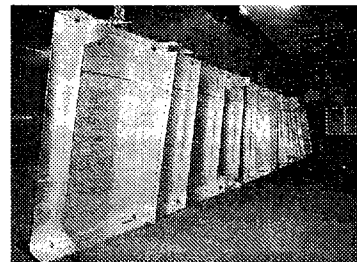


写真 1 熔融亜鉛めっき後に熱変形した製品

この熔融亜鉛めっきによる急激な温度変化が生じた場合の既往の研究も数編あり、阿部等^{2) 3)}は非分割箱桁や実物に近い I 桁モデルを用いて熔融亜鉛めっき施工試験や理論的解析を行い、発生する熱応力の

変化や溶接部のめっき割れ防止等に関する研究を行っている。それらによると、薄板構造の場合、溶融亜鉛に漬けられた時に局部的に大きな変形を生じるが、それはめっき割れの直接的な原因ではなく、その後の全体の温度均一化による変形の戻りが重要な因子であり、この現象は溶融金属脆性に強い材料でも発生し得ると述べている。また、板厚の大きな構造の場合には、溶接時の熱変形が拘束されることと鋼材の溶融亜鉛脆性が相まって、めっき割れの原因と考えられ、そのメカニズムは薄板構造の場合と異なるが、ある程度は鋼材の改善で防ぐことが可能であると述べている。さらに、菊池等⁴⁾は鋼管の溶融亜鉛めっき時に発生する熱変形や熱応力の変化について有限要素法を用いて計算し、試験結果とよく一致することを示している。また、鋼管を傾けて浸漬する場合の浸漬速度が熱変形や熱応力に大きな影響を与えることを明らかにしている。

しかし、どのような条件の下でめっき割れや熱変形の現象が起きるのかは、製品の寸法、形状、構造、溶接方法、残留応力、浸漬速度、液体金属脆化等の種々考えられる要因が、単独あるいは複合的に関連して発生すると考えられる。したがって、設計ディテール、鋼材、浸漬方法などを適切に選べば実用的にめっき割れを防止できるものと思われる。本論文では複数の要因の中から製品の寸法、形状、浸漬速度に着目し、めっき割れや熱変形の原因を解明するための基礎的データを得ることを目的とした。

鋼平板に急激な温度変化を与える溶融亜鉛浸漬試験を実施し、熱ひずみや温度の時刻歴応答を計測した。モデルは溶接物を2種類、鋼板のみを1種用意した。特に著者等は文献⁵⁾において鋼板のみのモデルについて板厚を5種類使用し、鋼板表面と板厚中央部の温度を測定した。この結果から最適化手法により熱伝導方程式を解析的に解いて温度分布を計算した。本論文では、さらに求められた温度分布をもとに、一般的に用いられている板モデルではなく立体要素モデルによる有限要素法を用いて熱ひずみを計算し、試験結果と比較検討を加えたので報告したい。

2. 溶融亜鉛浸漬試験

2.1 小型溶接鋼板モデル試験

はじめに、著者等は送電用鉄塔などで使われる溶接継手部分に着目し、溶接による拘束の与える影響を見るためにT継手を有する小型の溶接鋼板モデル

を製作した。そのモデルを図-1に示す。モデルの材質はSS400鋼材を使用し、下側の板を基板、これに垂直に溶接されている板を付属板と呼ぶ。溶接部は付属板長手方向をすみ肉溶接、付属板板厚方向を廻し溶接とした。

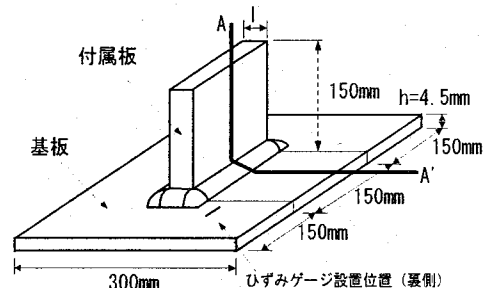


図-1 小型溶接鋼板モデル

基板と付属板の板厚比 (l/h) が大きいほど溶接部付近のめっき割れが生じやすいという事例に基づき、表-1に示すように $l/h=1.0$ および 5.0 の二つのケースについて試験を実施している。

表-1 溶接鋼板モデルの板厚比

付属板の板厚 l (mm)	基板の板厚 h (mm)	板厚比 l/h
4.5	4.5	1.0
22.0	4.5	5.0

菊池等⁴⁾は発生する熱応力には浸漬速度が大きく影響を与えることを述べている。浸漬方法は使用したホイスト式クレーンの性能により速度が変えられないため、連続浸漬と断続浸漬の二つのケースについて行った。連続浸漬とは、8.4m/min (高速) の浸漬速度でモデルを連続的に浸漬させることである。浸漬速度は使用したホイスト式クレーンの巻き下げ速度に依存している。また、断続浸漬とは最初にモデルを基板のみ浸漬させて30秒間停止し、その後に付属板中央まで浸漬させて、さらに30秒間停止させ、最後にモデル全体を浸漬させる方法である。試験での浸漬時間は180秒であり、浸漬開始を0秒とし、2秒間隔で熱ひずみと温度を測定した。

熱ひずみの測定にはカプセル型高温ひずみゲージ (東京測器 AWH-8-4A-11.0) を、温度の測定には K 型被覆熱電対を使用し、データローガ (東京測器 TDS-303) を用いて計測を実施した。熱電対は付属板長手方向の中央部 (図-1・A-A' 線) に設置した。図-2に中央断面図を示している。熱電対は基板、溶接内

部、付属板の中央部に各1個ずつの計3個を設置した。高温ひずみゲージを事前のFEM解析を考慮して図-2に示す基板下面の廻し溶接部付近に付属板長手方向と平行に1個設置した。

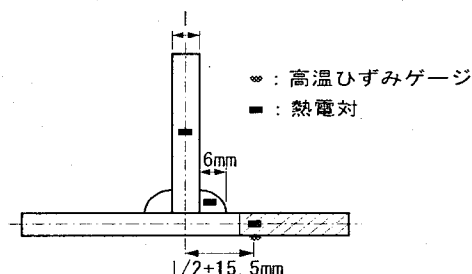


図-2 高温ひずみゲージと熱電対設置位置

熱ひずみを求めるには温度補正が必要なため、本試験終了後に図-2の基板斜線部を切り出し、その部分を再度本試験と同じ条件で浸漬させる補正試験を行い、熱ひずみと温度を測定した。補正の方法は、補正試験の結果から「時間-ひずみ曲線」と「時間-温度曲線」が求められるため、この2つの曲線より「温度-ひずみ曲線」を求め、この関係より本試験と補正試験の同一温度における熱ひずみの測定値を差し引いて補正した。

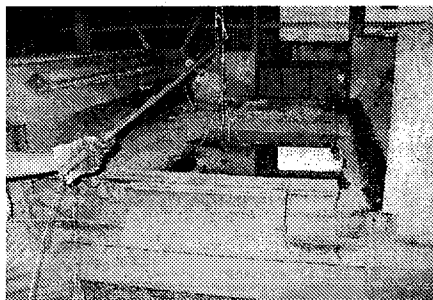


写真-2 小型溶接鋼板モデルの浸漬試験状況

2. 2 中型溶接鋼板モデル試験

小型の溶接鋼板モデルの試験では温度計測点が少なく、部材全体の詳細な温度分布について得られていないことで、熱伝導解析に必要な温度分布に検討を加える必要があった。また、著者等⁶⁾の導出した解析手法が中型の構造物に適用可能かどうかを検討するために、サイズを大きめにした中型のT継手を有する溶接鋼板モデルを使用して、より詳細な温度分布を計測すると共に解析手法を検討した。

中型の溶接鋼板モデルを図-3に示す。モデルの寸法は異なるが、材質や溶接方法は小型モデルの試験と同様である。また、溶接モデルの板厚比 (l/h) も表-1と同様に二つのケースとしている。

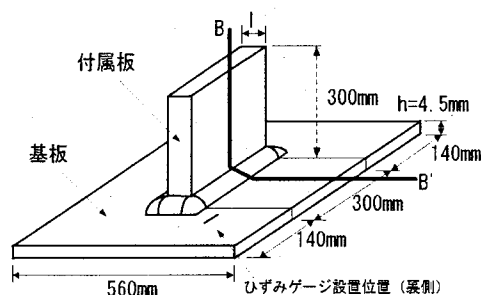


図-3 中型溶接鋼板モデル

なお、中型モデルは小型モデルの倍以上の寸法で製作する予定だったが、ひずみゲージの取付後、ゲージ補正を行う装置に入らないために図-3の寸法となった。

中型モデルでは、浸漬時に使用するクレーンの巻き下げ速度を変化させることができるようになったため、2種類の速度（2.4m/min（以下、低速と呼ぶ）と0.5m/min（以下、微速と呼ぶ））で実作業に則して連続的に熔融亜鉛浴へ浸漬させることとした。

測定時間は140秒、試験開始を0秒とし、2秒間隔で試験片モデルの熱ひずみと温度を測定した。計測機器は小型モデルの試験と同様である。熱電対は付属板長手方向の中央部（図-3・B-B'線）に設置した。図-4に中央断面図を示している。熱電対は基板に5個と付属板に5個ずつ各板厚の中心部に設置した。また、溶接部内にも $l/h=5.0$ の場合は3個、 $l/h=1.0$ の場合は2個を設置した。板厚比により個数が異なるのは、付属板の厚みの都合によるものである。

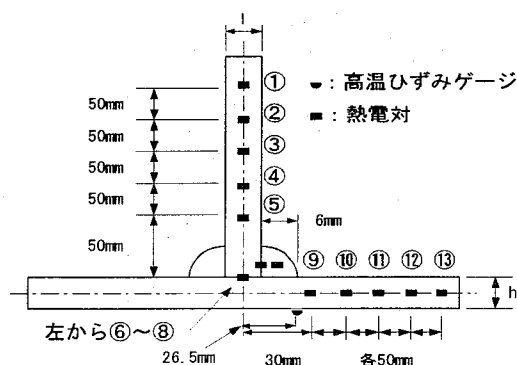


図-4 高温ひずみゲージと熱電対設置位置

小型モデルと同様にゲージの温度補正が必要なため、本試験終了後にひずみゲージ周囲に切り込みを入れ、応力を開放した状態で再度本試験と同条件で浸漬させ、補正試験を行った。

2. 3 付属板単独モデル試験

溶接鋼板モデルを用いた試験では鋼部材中央部の温度のみを測定しており、鋼部材表面の温度や板厚を表-1 以外に変化させたものについては測定をしていない。そこで、熱歪みのメカニズムを解明するため時間経過によっていろいろな温度変化を見せる付属板に着目し、その詳細な温度分布を測定する溶融亜鉛浸漬試験を実施した。

この試験で使用した付属板単独モデルを図-5 に示す。材質はSS400 である。また、付属板単独モデルの板厚及び寸法を表-2 に示す。

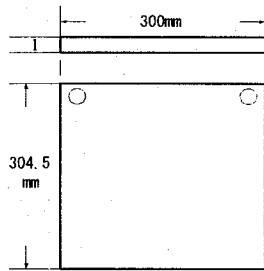


図-5 付属板単独モデル

表-2 付属板単独モデルの板厚と個数

板厚 l (mm)	寸法 (mm)	個数
4.5	304.5×300	各 1 個
9.0		
16.0		
22.0		
32.0		

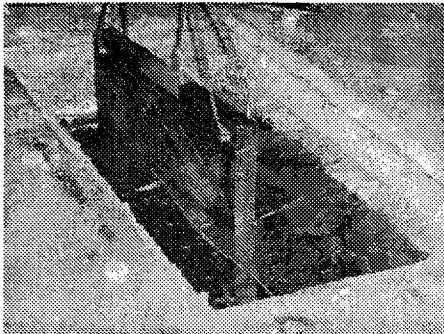


写真-3 付属板単独モデルの浸漬試験状況

溶接モデルの試験と同様に、付属板単独モデルを中型溶接鋼板モデルの場合と同様に、低速と微速の2種類で連続的に溶融亜鉛浴へ浸漬させ、測定時間を180秒、試験開始を0秒とし、2秒間隔で付属板単独モデルの温度をK型被覆熱電対で測定した。熱電対は図-6に示すように、板厚中央部(1/2)の①～⑤と頂部表面の⑥、鋼平板表面の⑦～⑨および底部表面の⑩の合計10点に設置した。

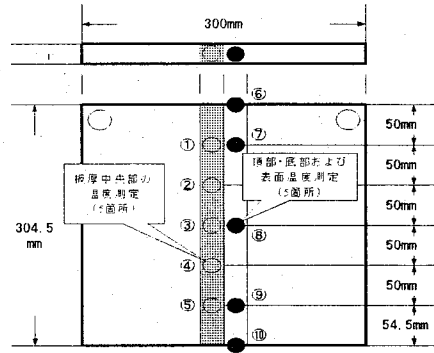


図-6 付属板単独モデルの熱電対設置位置

3. 浸漬試験結果

3. 1 小型溶接鋼板モデル

小型溶接鋼板モデルにおける連続浸漬試験と断続浸漬試験の熱ひずみの履歴曲線をそれぞれ図-7 と図-8 に示す。

板厚比 $l/h=5.0$ の場合には、連続浸漬試験・断続浸漬試験ともに、一度圧縮側でピークを示し、その後、ゼロ付近に収束する挙動を示した。しかし、 $l/h=1.0$ の場合には、連続浸漬試験では圧縮側に、断続浸漬試験で引張側に収束する挙動を示した。これは、 $l/h=1.0$ の場合では溶接時の残留変形が大きく、 $l/h=5.0$ の場合では残留変形がほとんど生じていないことが要因の一つとして考えられる。

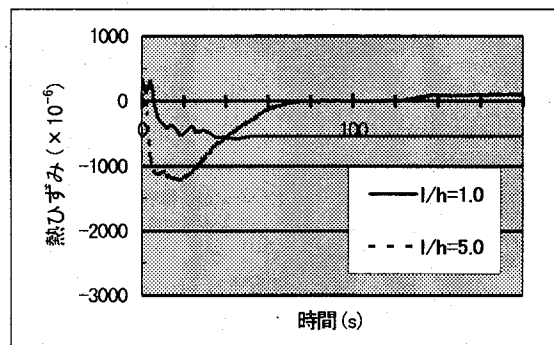


図-7 連続浸漬試験の熱ひずみ履歴曲線

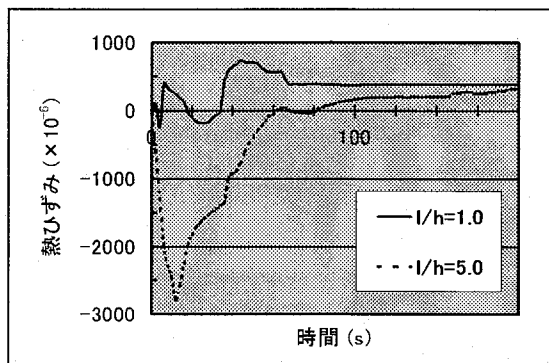


図-8 断続浸漬試験の熱ひずみ履歴曲線

図-9 は $l/h=1.0, 5.0$ の場合の連続浸漬試験での試験体各点における温度変化を示している。

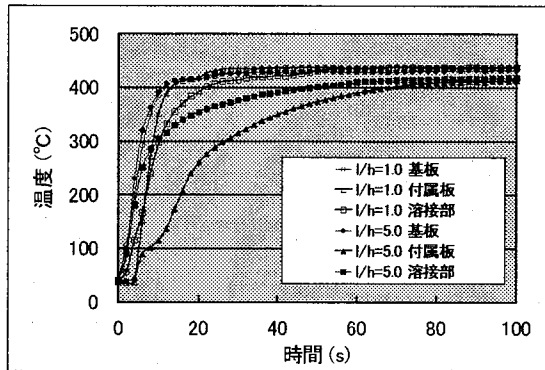


図-9 連続浸漬試験の温度履歴曲線

$l/h=1.0$ の場合では、浸漬後すぐに付属板の温度が急激に上昇している。これは、付属板の板厚が 4.5mm であり、基板と同じ厚さのため熱がほぼ同じくらいの速さで全体に伝わったためと考えられる。

$l/h=5.0$ の場合、基板、溶接部、付属板と浸漬する順に温度が上昇する。しかし、基板と溶接部に比べて付属板の温度上昇が遅くなる傾向がある。付属板の板厚が 22mm と基板の 4.5mm に比べて厚く、熱の伝わりが遅いためと考えられる。

図-10 に $l/h=1.0, 5.0$ の場合の断続浸漬試験での各点の温度変化を示す。断続浸漬試験における 0～30 秒間は基板のみ、30～60 秒間は付属板中央まで、60 秒以後は全体が浸漬した状態を表している。

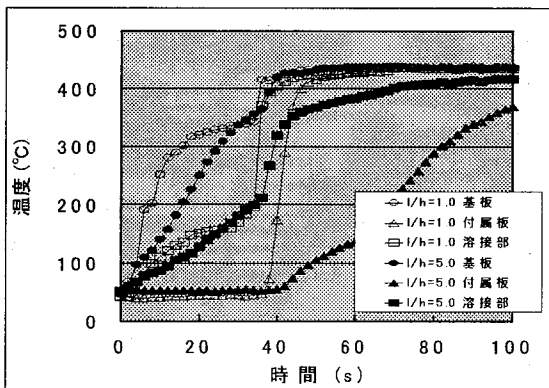


図-10 断続浸漬試験の温度履歴曲線

$l/h=1.0$ および 5.0 とともに、基板、溶接部、付属板と溶融亜鉛に浸漬する順に温度が上昇していることが確認できる。特に、 $l/h=1.0$ の場合、30～60 秒間に急激に温度が上昇し、基板、溶接部、付属板ともに一定値に収束している。

3. 2 中型溶接鋼板モデル

熱ひずみは小型溶接鋼板モデルの試験で $l/h=1.0$ のときに残留変形の影響を受けたため、中型溶接鋼板モデルは残留変形の影響を受けにくい $l/h=5.0$ の熱ひずみだけを測定した。

図-11 は $l/h=5.0$ の溶接鋼板モデルを低速および微速で亜鉛浴に浸漬させた場合の熱ひずみ履歴曲線を示している。

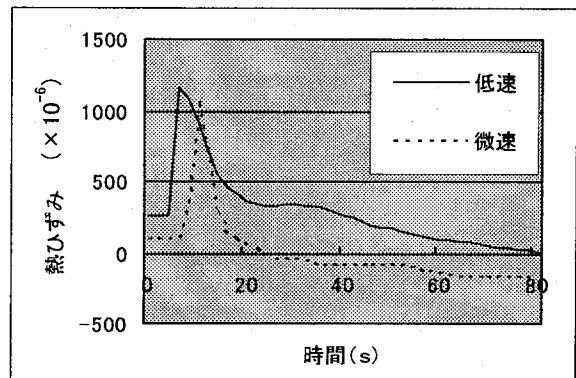


図-11 $l/h=5.0$ の熱ひずみ履歴曲線

低速・微速浸漬試験ともに、引張側でピークを示した後にゼロ付近へと収束するような挙動を示している。低速と微速でピークの時間が異なるのは、浸漬した時刻が微速の方が遅いためである。3.1 の小型溶接鋼板モデルの試験結果では圧縮側でピークを示してからゼロ付近に収束する結果を得ているので、熱ひずみの挙動は両モデルで大きく異なる結果となった。はっきりとした原因は不明であるが、小型溶接モデルは瞬時に溶融亜鉛に浸漬するため、溶接による残留応力の影響も含めて熱衝撃的な挙動を示したものと考えられる。

図-12 は、中型溶接鋼板モデルにおける $l/h=5.0$ の場合の低速浸漬試験における各点の温度変化を示している。

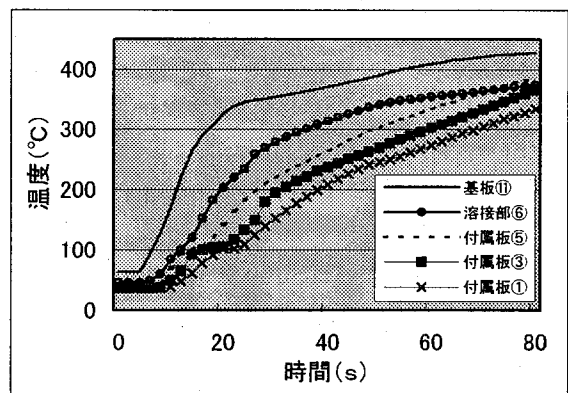


図-12 $l/h=5.0$ の温度履歴曲線 (低速)

図-12より基板、溶接部、付属板と溶融亜鉛に浸漬する順に温度が上昇している。

図-13は $1/h=5.0$ の場合の微速浸漬試験における各点の温度変化を示している。

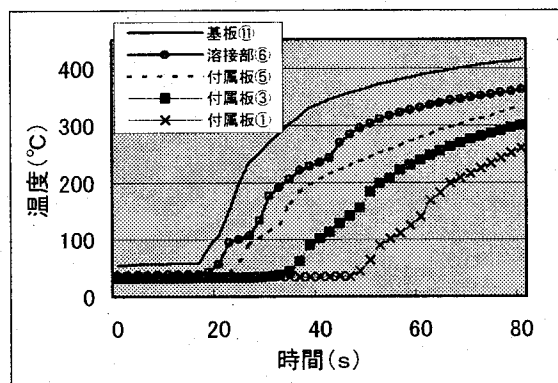


図-13 $1/h=5.0$ の温度履歴曲線（微速）

図-13より低速時と同様に基板、溶接部、付属板と溶融亜鉛に浸漬する順に温度が上昇しているのが確認できる。

図は省略するが、 $1/h=1.0$ も低速・微速とも同様の傾向となる。しかし、 $1/h=1.0$ は浸漬開始して数秒後に付属板の温度が溶接部の温度を超えていく傾向がある。これは、付属板より溶接部の方が肉厚になるため、熱の伝わりが遅くなってしまうためと思われる。ただし、浸漬速度が遅くなると追い越しの傾きは緩やかになる。

3.3 付属板モデル試験

図-14は板厚 $l=9.0\text{mm}$ 、図-15は $l=22.0\text{mm}$ の低速浸漬試験における温度の時刻歴応答曲線であり、縦軸は温度(°C)、横軸は時間(sec)である。なお、測定点は10箇所、測定時間は180秒間だが、グラフを見やすくするために測定点は代表的な5点、測定時間50秒までを示している。

図-14より、溶融亜鉛に浸漬していくと共に鋼平板底部⑩から⑤、③、①、頂部⑥の順で温度が上昇していくことがわかる。これらは時間の経過と共に溶融亜鉛の温度(440°C前後)へと近づいていく。しかし、図-15では溶融亜鉛に浸漬していく順ではなく、鋼平板底部⑩の次に温度上昇が早いのは頂部⑥である。鋼平板の内部の⑤、③、①はその後から温度が上昇してくることがわかる。これは板厚 l が厚くなることで内部への熱の伝わりが遅くなってしまうが、頂部表面は溶融亜鉛に直接接するため温度上昇が早くなると考えられる。なお、この傾向は微速

の場合でも同様に見受けられる。また、図は省略するが、付属板モデルの温度上昇は中型溶接鋼板モデルの付属板部分の傾向と全体的に類似している。ただし、溶接部の影響と考えられるが、下側の温度上昇に若干の差が見受けられる。

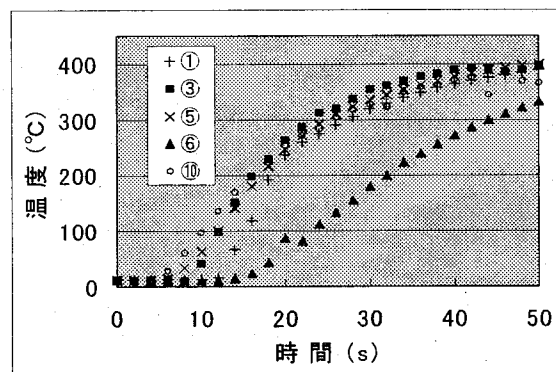


図-14 $l=9.0\text{mm}$ の温度履歴曲線（低速）

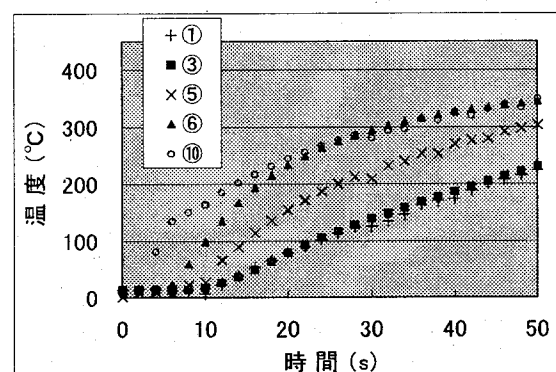


図-15 $l=22.0\text{mm}$ の温度履歴曲線（低速）

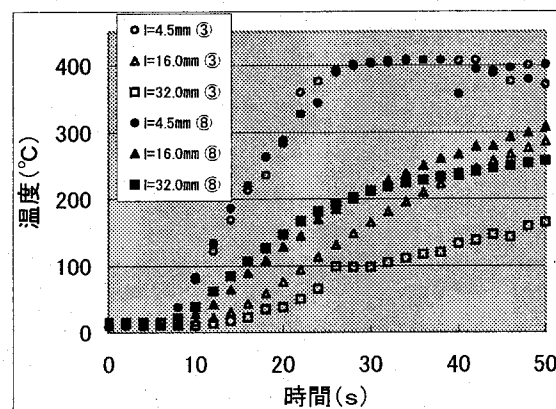


図-16 板厚中央部③と表面⑧の温度比較

図-16は、板厚中央部と表面の温度変化を板厚毎にまとめたグラフである。

図-16より、板厚が 4.5mm の場合には板厚中央部と表面の温度差がほとんどないが、板厚が 16mm になると溶融亜鉛に浸漬した直後から板厚中央部と表面の温度差が広がっていき、徐々にその温度差が縮ま

っていく傾向が見られる。また、32 mmになるとその差が 100℃以上に広がり、板厚中央部の温度が表面の温度に近づくにはかなりの時間がかかる（実測では 150 秒前後）。これらから、板厚が厚くなるほど内部への熱の伝わりが遅くなることが確認できた。

4. 一次元熱伝導方程式による温度解析

既往の研究として日笠等³⁾ はめっき時の鋼桁の温度を一次元非定常熱伝導問題と二次元非定常熱伝導問題として取り扱い、前者は一次元非定常微分方程式の級数解により鋼桁任意点の平均温度を求め、それを節点温度とし、平面弾性問題の有限要素法により熱応力度を計算している。後者は温度と応力度の両者を有限要素法により求めている。いずれの方法でも、鋼桁を構成するフランジ、ウェブの板厚方向の温度は一定と仮定している。

また、阿部等²⁾³⁾ および菊池等⁴⁾ の論文では、モデルが溶融亜鉛に浸漬する際、溶融亜鉛面に到達していない部分は溶融亜鉛面に到達するまで温度上昇せず、到達と同時に急速に上昇するとして、到達していない部分は部材初期温度と仮定し、一次元非定常熱伝導問題として温度分布を求めている。日笠等は他の文献⁹⁾ で鋼板の端面近傍では端面からの熱伝達の影響を強く受けるが、端部から離れた点では二次元的（面内二次元）な影響は少ないと述べていることから、本研究のような温度測定部分がモデル中央部にある場合には端部からの影響が少ないと考え、溶融亜鉛面に到達後のモデルの温度変化については阿部等²⁾³⁾ および菊池等⁴⁾ の論文で用いている一次元熱伝導方程式から求められる解を採用する。

本研究での試験片モデルの座標系を図-17に示す。

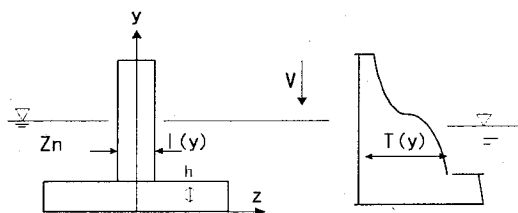


図-17 溶接鋼板モデルの座標系

板の両面から加熱される場合の非定常熱伝導基礎方程式は式 (1) で表される。

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \kappa \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \quad \dots (1)$$

ここで、Tは求める温度、tは時間、 κ は熱拡散率、

zが板厚方向の座標である。また、

$$\kappa = \frac{\lambda}{c\rho} \quad \dots (2)$$

であり、比熱 c、密度 ρ および熱伝導率 λ は材料によって定まる定数である。

境界条件は、 $z = \pm B/2$ のとき次式のようにになる。

$$\frac{\partial T}{\partial z} = H(T_0 - T) \quad \dots (3)$$

ただし、 $H (= \alpha / \kappa)$ は鋼板外面と溶融亜鉛との境界における相対熱伝達率、 T_0 は溶融亜鉛温度、B は板厚、 α は熱伝達係数である。

$t=0$ で $T=T_1$ の初期条件で式 (1) を解き、板の両側面から熱伝達がある場合の板の温度は式 (4) で与えられる。

$$T(z,t) = (T_0 - T_1) \left\{ 1 - 2 \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\sin \delta_n e^{-\delta_n^2 t/B^2} \cos(2\delta_n z/B)}{\delta_n + \sin \delta_n \cos \delta_n} \right\} + T_1 \quad \dots (4)$$

ここで、 T_1 は部材初期温度、 δ_n は式 (5) より求めた $\delta_1, \delta_2, \dots$ である。

$$HB = 2\delta_n \tan \delta_n \quad \dots (5)$$

式 (4) より板厚方向 z に対する時間 t における温度を求めることができ、板厚方向の平均温度は

$$\bar{T} = \frac{2}{B} \int_0^{B/2} T(z,t) dz \quad \dots (6)$$

となる。

温度分布は、既往の研究⁷⁾ では I 桁の場合、溶融亜鉛めっき時には I 桁の各部位が溶融亜鉛液面に到達するまでは温度が上昇せず、液面到達後に板の両面からのみ加熱されると仮定して桁中心の温度分布を求めているが、著者等は鋼平板の下端部を基準とし、一定速度 V でめっきする場合の、ある時刻 t における y 方向および z 方向の温度分布を式 (7) と式 (8) のように表した。

$$t' < 0 \text{ のとき} \quad T(w,t') = T_1 \quad \dots (7)$$

$$t' \geq 0 \text{ のとき}$$

$$T(w,t) = (T_0 - T_1) \left\{ 1 - 2 \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\sin \delta_n e^{-\delta_n^2 t/B^2} \cos(2\delta_n w/B)}{\delta_n + \sin \delta_n \cos \delta_n} \right\} + T_1 \quad \dots (8)$$

ただし、

$$t' = t - \frac{y}{V} \quad \dots (9)$$

なお、上式で時間 t は鋼平板の下端部が溶融亜鉛液面に到達した瞬間を 0 とし、基板のとき $w=y$ 、付属板のとき $w=z$ し、板厚方向座標 w と時間 t' で温度分布 $T(w, t')$ を表す。なお、板厚 B は基板のときは h 、付属板のときは l となる。

式 (7) および (8) より、式 (10) のように板厚方向に積分することで、板厚方向には平均温度で w 方向のみ温度分布をもつ一次元温度分布が得られる。

$$T = \frac{2}{B} \int_0^{B/2} T(w, t') dw \quad \dots (10)$$

5. 最適化手法を用いた熱拡散率の同定

著者等はこれまで溶接モデルの基板と付属板の各点の温度変化について解析結果と試験結果を比較検討してきた。しかし、前項の式 (2) で示される一般的な鋼材の熱拡散率 κ ($0.042 \text{ m}^2/\text{s}$) と既往の文献⁷⁾ で得られている相対熱伝達率 H ($50 \text{ kcal}/\text{m}^2 \text{ h}^\circ\text{C}$) を用い、熱伝導方程式を解析的に解いて得られた結果は試験結果と全く合わなかった。その結果を図-18 の $H=50$ の線で示す。

熱拡散率 κ は基本的に材料の物性値から求められ、材料の温度が時間とともに変動する場合の解析に現れる物性値であり、物質内部を温度変化が伝わっていく速さを表す定数と考えられる。それに比べ相対熱伝達率 H は溶融亜鉛流体、潜熱の影響を受けるので、材料特性値ではないことがわかっている。そこで、本論文では熱拡散率 κ と相対熱伝達率 H の最適化を行った。

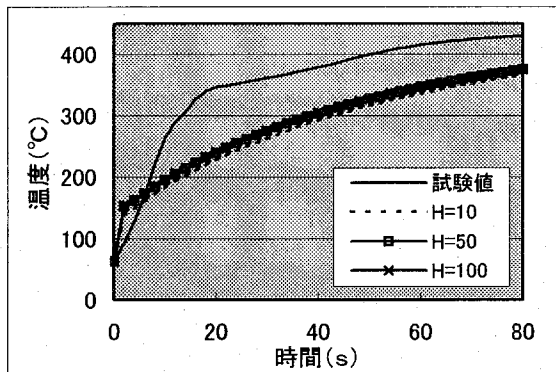


図-18 相対熱伝達率 H を変化させた場合の温度履歴曲線 ($\kappa=0.042 \text{ m}^2/\text{s}$)

まず、一般的な鋼材の熱拡散率 κ ($0.042 \text{ m}^2/\text{s}$) を用い、相対熱伝達率 H を変化させて計算値を求め、試験値と比較したグラフが図-18 である。

図-18 は $l/h=5.0$ の基板①における低速浸漬試験結果を示しているが、相対熱伝達率 H を変化させても計算値はほとんど変化しなかった。なお、他の結果も同様の傾向が見られた。

図-18 より、相対熱伝達率 $H=50 \text{ kcal}/\text{m}^2 \text{ h}^\circ\text{C}$ を 2 倍の $100 \text{ kcal}/\text{m}^2 \text{ h}^\circ\text{C}$ にしても計算値にほとんど差がなく、相対熱伝達率 H をさらに大きく変化させても影響度が少ないことが分かった。この傾向は熱拡散率 κ を変化させても変わらなかった。

そこで著者等は、本来は材料パラメータである熱拡散率 κ が材料の急激な温度変化によって変化するのではないかと考えた。

そのため、熱伝導方程式内の材料パラメータである熱拡散率 κ の値を、基板と付属板の板厚中心での温度履歴曲線に一致するように熱拡散率 κ を逆算して求めた。得られた熱拡散率 κ のうち、中型溶接鋼板モデルの低速浸漬試験の基板と付属板の各中央部での時間変化曲線を図-19 に示す。

図-19 より、熱拡散率 κ は時間に対して定数と仮定して解析するのが一般的であるが、時間に若干依存していることが分かった。また、温度履歴曲線に対する影響度が相対熱伝達率 H より熱拡散率 κ に依存している傾向が強いことがわかるとともに、 $l/h=5.0$ における付属板の熱拡散率 κ が他のケースに比較して大きく算出されるという結果が得られた。なお、微速試験でも同様な結果を得ている。

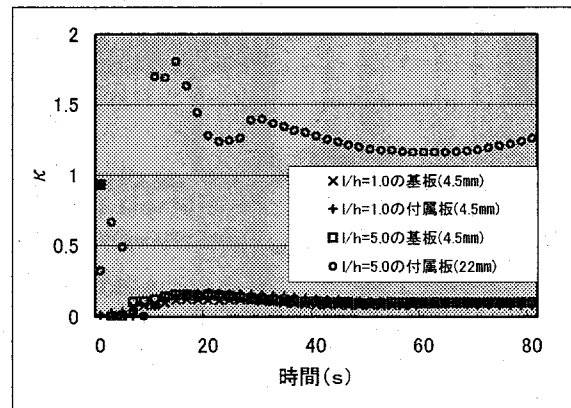


図-19 熱拡散率 κ の時間変化曲線 (基板①、付属板③)

そのため、時間変化する熱拡散率 κ の中から、今回の試験結果を近似できる基板と付属板の熱拡散率

κ の値を求めた。この時の相対熱伝達率 H は既往の文献⁶⁾での $50\text{kcal/m}^2\text{h}^\circ\text{C}$ を使用した。表-3、4は、それぞれこの最適化手法により求めた小型溶接鋼板モデル、中型溶接鋼板モデルの基板と付属板の熱拡散率 κ を示したものである。

表-3 小型溶接鋼板モデルの
基板と付属板の熱拡散率 κ (m^2/s)

板厚比	測定点	κ (連続浸漬・高速)
1.0	基板	0.4
	付属板	0.4
5.0	基板	0.4
	付属板	2.5

表-4 中型溶接鋼板モデルの
基板と付属板の熱拡散率 κ (m^2/s)

板厚比	測定点	κ ・低速時	κ ・微速時
1.0	基板	0.08	0.10
	付属板	0.14	0.09
5.0	基板	0.10	0.09
	付属板	1.1	1.0

求められた熱拡散率 κ を用いて計算した中型溶接鋼板モデルの値と試験値とを比較した温度履歴曲線の一例を図-20に示す。実際は浮力等により浸漬速度が若干変化するため計算値と試験値の温度上昇開始時間がずれるが、両者を比較するためにこの開始時間を合わせる補正を行っている。

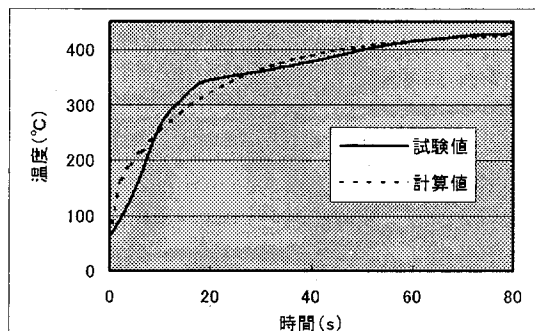


図-20 中型溶接鋼板モデルの基板①の
温度時刻歴応答曲線 ($l/h=5.0$ ・低速)

図-20より、熔融亜鉛浴に低速で浸漬し、一定時間が経過し、温度の上昇が安定してきている部分ではよく近似されているものの、浸漬直後の計算値と試験値には差が見受けられ、熱拡散率 κ と相対熱伝達率 H の最適化の適否については他の実験など別途の方法で確認すべきであり、今後さらなる検討が必要である。

図-21は、この最適化手法により求めた付属板モデルの低速浸漬試験での板厚中央部①と表面⑦の熱拡散率 κ を、図-22は板厚中央部⑤と表面⑨の熱拡散率 κ を板厚毎にグラフ化した一例である。

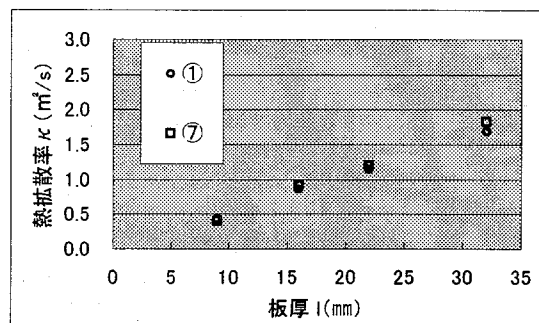


図-21 付属板モデル測定点①・⑦における
熱拡散率 κ (低速)

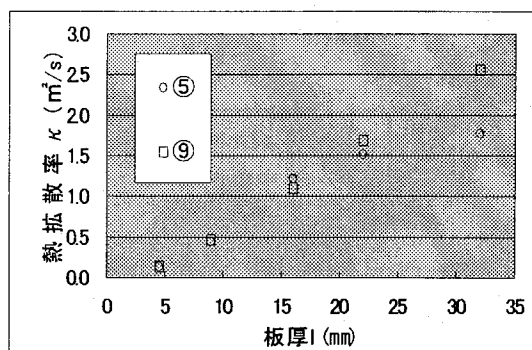


図-22 付属板モデル測定点⑤・⑨における
熱拡散率 κ (低速)

全体的に鋼板の板厚 l が薄いほど熱拡散率 κ の値が小さくなる傾向を示している。また、板厚 $l = 16.0\text{mm}$ までは熱拡散率 κ は鋼材表面および内面ではほぼ同じ値を示す。しかし、 $l = 22.0\text{mm}$ 以降の場合には、熔融亜鉛に早く浸漬する⑤と⑨の熱拡散率 κ の差が広がり、上部の①と⑦ではその差があまり見られなくなることから、浸漬が早い下部からの熱影響を受けていると考えられ、熱拡散率 κ が温度に依存しているのではないかと推測される。

これらの結果から、熱拡散率 κ を板厚が薄い場合 ($16 \sim 22\text{mm}$ 以下) では一次元熱伝導解析解を実測温度に収束させる最適化手法を用いて逆算することが可能である。板厚が厚い (22mm 以上) の場合には、厚さ方向で熱拡散率が変化する結果となり、一次元熱伝導解析においても数値解法 (差分法等) が必要となる。また、断面内二次元熱伝導解析解を用いることも検討する必要があると思われる。

6. 実測温度分布との比較

図-23 は、小型溶接鋼板モデル $1/h=1.0$ の基板下面から付属板高さ方向の平均温度分布を示す。図中の実線は計算値を、破線は実測値を表している。計算値と実測値を比較すると、 100°C 以上の大きな差が見受けられる。特に付属板部分の温度は $0\sim 6$ (s) で 200°C 近く離れている。しかし、浸漬後は付属板と基板の境界すなわち溶接部を境に急激な温度変化が生じる挙動は共通している。

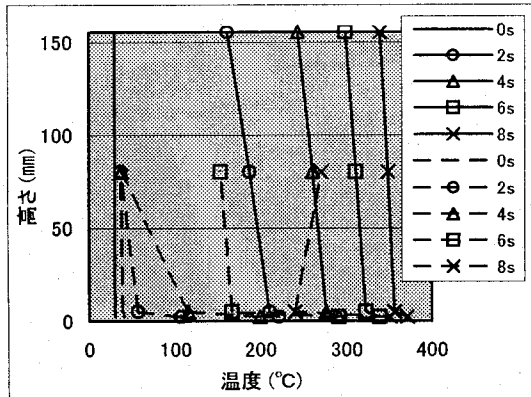


図-23 $1/h=1.0$ の温度分布 (小型溶接モデル)

図-24 は、中型溶接鋼板モデルの計算で求めた温度分布を示す。図-24 も基板下面から付属板高さ方向の平均温度分布について示したグラフである。図中の実線は計算値、破線が板厚中央部の実測値を示している。

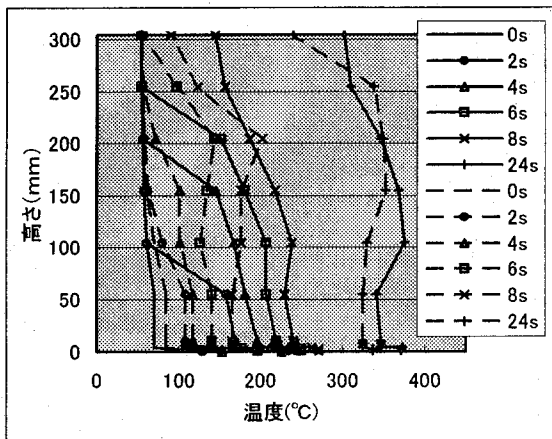


図-24 $1/h=1.0$ の温度分布
(中型溶接モデル・低速)

図-24 に示すようにモデルの浸漬直後から 8 秒までは計算値と実測値に差があるが、24 秒では若干の差があるものの似た温度分布を示すようになる。図

-23 と 24 から付属板と基板の境界で急激な温度変化が生じている傾向は同じである。計算値の平均温度分布は、小型溶接鋼板モデルの場合にはモデルが高速で瞬時に溶融亜鉛に浸漬するため温度分布が直線的になるのに対し、中型溶接鋼板モデルの場合には浸漬速度に合わせて段階的に温度分布が変化していくことがわかる。

図-25 は付属板単独モデルの温度分布のうち、板厚 9.0 mm の板厚中央部の温度分布を示している。グラフは底面から高さ方向の温度分布を示しており、実線が計算値、破線が実測値を示している。

図-24 および 25 に示すように、ある程度恒温になるまでの約 20 秒間は計算値と実測値に平均 50°C 程度の差が生じるが、20 秒以降はその差が縮まり、時間経過と共に計算値と実測値は似たような温度分布を示すようになる。差が生じた原因として、モデルが溶融亜鉛に浸漬した直後に鋼材表面付近の溶融亜鉛温度が低下し、熱収支のバランスが計算と実測で異なるためと考えられる。なお、解析ではこの溶融亜鉛温度の低下は考慮されておらず、常に溶融亜鉛温度が一定温度で熱を供給している。

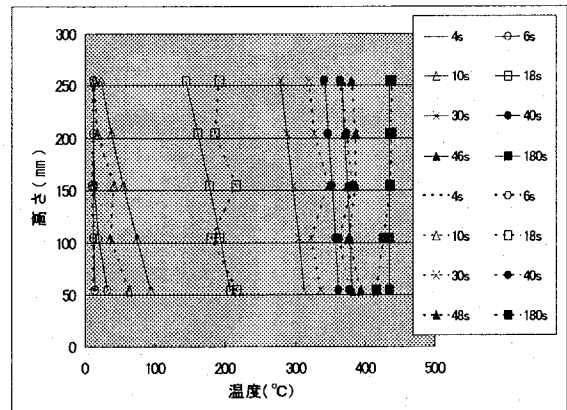


図-25 $1=9.0\text{mm}$ (板厚中央部) の温度分布
の実測値と計算値

次節ではこのようにして求めた平均温度分布を用いて、 $1/h=5.0$ の熱ひずみを三次元有限要素法で求め、試験結果と比較検討している。

今後、温度分布再現にあたっては改善すべき点が多々あると思われるが、詳細な温度分布を再現できれば、それ以外の溶接残留応力や材質、形状的影響因子を考慮することにより、熱応力分布等を求めることが可能になり、めっき割れや変形の位置をある程度を明らかにできるとと思われる。

7. 熱応力解析結果と実測結果の比較検討

阿部等²⁾は、溶融亜鉛中の1桁の熱弾塑性有限要素解析を行い、ウェブ面にはらみ変形が生じることを明らかにしている。しかし、これらの解析は板要素に基づくものであり、本研究のような小型・中型の溶接鋼板モデルと付属板モデルには適用しにくい。著者等は文献⁵⁾で浸漬試験と同条件で熱伝導解析を行い、得られた温度分布を用いてモデルの熱ひずみを有限要素法により計算している。今回も $1/h=5.0$ の中型溶接鋼板モデルを構造の対称性に考慮して、図-26に示すように4分の1モデルとして熱ひずみの計算を行った。境界条件はそれぞれの境界面で x 方向、 y 方向変位を固定した。有限要素は図-27に示す20節点アイソパラメトリック立体要素を用いた。総節点数は513、全要素数は62である。なお、計算モデルの温度分布は板厚方向に一定としている(平均温度を入力)。また、弾性係数の温度依存性については考慮しなかった。ひずみの評価は、節点でのひずみは精度が良くないため、ガウスの積分点で行った。

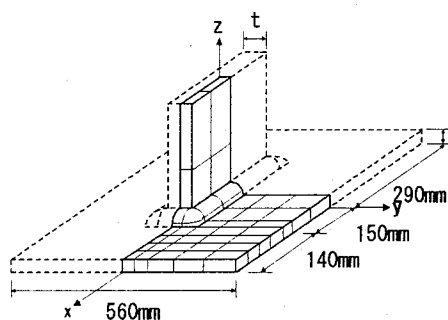


図-26 中型溶接鋼板の計算モデル

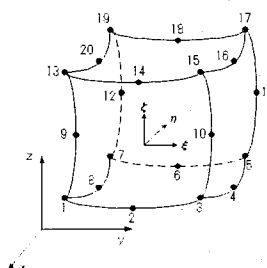


図-27 20節点アイソパラメトリック要素

図-28は小型溶接鋼板モデルの $1/h=5.0$ の場合における熱ひずみの履歴曲線について試験結果と計算結果を比較したものである。図より、 $1/h=5.0$ の場合の計算における圧縮側の最大値は連続浸漬試験結果と異なるものの、一度ピークを示し、その後、ゼロ付近に収束するという共通の挙動を示した。

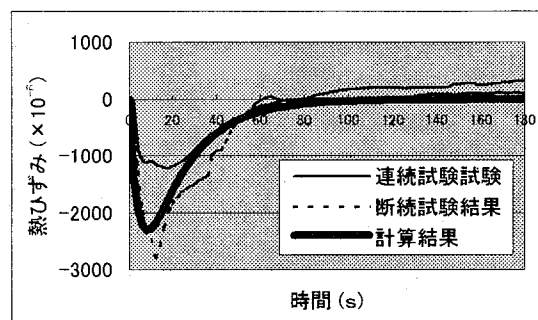


図-28 $1/h=5.0$ の場合の熱ひずみ履歴曲線
(小型溶接鋼板モデル)

図-29は中型溶接鋼板モデルにおける $1/h=5.0$ の低速試験の場合における時間と熱ひずみの関係について試験結果と計算結果を比較したものである。

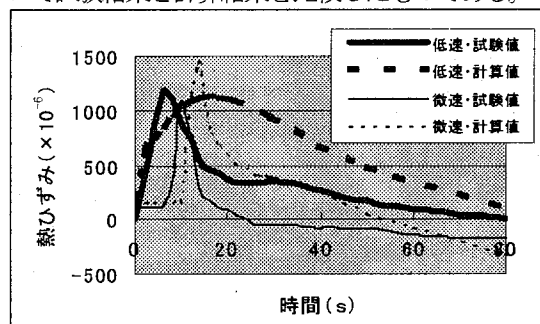


図-29 $1/h=5.0$ の場合のひずみ履歴曲線
(中型溶接鋼板モデル)

低速試験の場合、引張側の最大値は試験結果とほぼ一致しているがピークになる時刻が試験結果より遅れている。微速試験の場合、引張側の最大値は計算結果のほうが試験結果よりやや高く、ピークの時刻も若干遅れている。図-29に示すように、最大値の値やピーク時に差が見られるのは、計算平均温度分布と試験温度分布の初期時で差が生じているためと考えられる。したがって、熱ひずみや熱応力の再現には熱応力解析に先んじて、出来るだけ正確な温度分布の再現が必要と思われる。

さて、著者等はこれまでモデルの温度分布を様々に仮定し、図-26に示すような計算モデルで変位型三次元有限要素法を用い、溶接鋼板モデルに対する熱応力分布を求め、基板下面の廻り溶接部の位置で最大の熱応力が発生することを確認している⁶⁾。

図-30は小型溶接鋼板モデル試験、図-31は中型溶接鋼板モデル試験における最大応力の発生時の熱応力分布をそれぞれ示している。なお、グラフの左上に付属板がある。

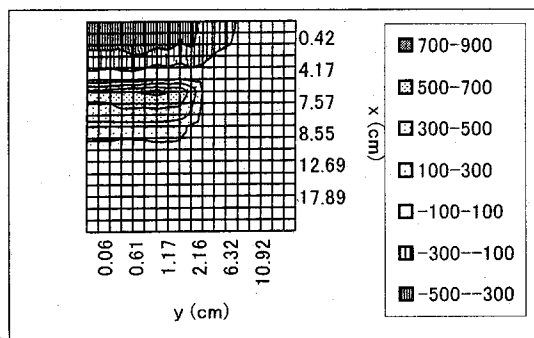


図-30 基板下面の熱応力分布 σ_x
($1/h=5.0$ ・小型溶接鋼板モデル)

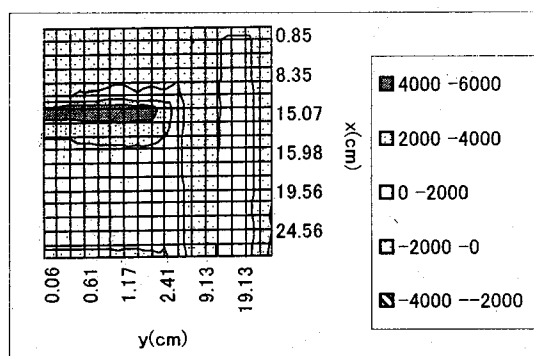


図-31 基板下面の熱応力分布 σ_x
($1/h=5.0$ ・中型溶接鋼板モデル)

熱応力分布図を作成することにより、溶接部付近における熱応力の発生範囲を特定することが可能になった。また、三次元有限要素法による熱応力解析を用いて、小型と中型の溶接鋼板モデルの熱ひずみの挙動の違いを（最大応力が圧縮側と引張側に分かれること）再現することができた。

8. まとめ

本研究では、急激な温度変化を伴う溶融亜鉛浸漬試験を2種類の溶接鋼板モデルと1種類の鋼板モデルを用いて行い、それぞれの温度分布・熱ひずみの挙動を比較検討した。また、一次元熱伝導方程式解を計測温度の履歴曲線に一致させる最適化手法により逆算した熱拡散率 κ を用いて温度分布を推定する手法を提案した。推定した温度分布から三次元有限要素法により熱応力分布を求め、溶接部付近における熱高応力の発生範囲を特定することにより、めっき割れの発生箇所を予想すると共に、小型と中型の溶接鋼板モデルの熱ひずみの挙動の違いを定性的に明らかにすることができた。しかし、温度分布の計算値と実測値の初期時の差が熱ひずみの計算値と実

測値の差に大きな影響を与えることから、今後、その要因として考えられる常温鋼平板の亜鉛浴浸漬による溶融亜鉛の温度低下の影響について検討を加えたい。本研究は、めっき割れや熱変形のアプローチに送電用鋼管鉄塔のデータを利用したため、めっき割れが生じる可能性が高い試験体を製作し、実験を開始した。そのため、橋梁I桁のような基板板厚が10 mm以上の大型構造物とは異なる試験体になっている。これまでの実験ではめっき割れを生じなかったが、鋼材温度の履歴を解析的に求め、熱ひずみや熱応力分布を算出する一連の流れを提案することができた。この流れは構造の違いに関わらず、共通していると考えられる。この流れの中で、最適化手法を用いて κ の傾向を求めることは材料や伝熱の見地等からもさらに検討を加えていく必要がある。また、橋梁桁材をはじめとする実物大の大型構造物（基板板厚10 mm以上）を用いての実験に発展させる必要もあると考えており、この実験データも含めて総合的にめっき割れ・熱変形のメカニズムを解明していきたい。

【参考文献】

- 1) 日本鋼構造協会編：建築用溶融亜鉛めっき構造物の手引き，1998
- 2) 阿部英彦等：非分割箱桁橋の亜鉛めっき割れ防止に関する基礎的研究，構造工学論文集，vol. 42A，pp955-963，1996
- 3) 阿部英彦等：橋梁の亜鉛めっき割れ防止に関する熱弾塑性解析と鋼材の基礎的研究，構造工学論文集，vol. 43A，pp1161-1170，1997
- 4) 菊池昌利等：溶融亜鉛めっき時における鋼管の変形挙動，材料，第30巻，pp322-329，1981
- 5) 今野貴史等：最適化手法による溶融亜鉛浸漬中における鋼平板の温度分布再現，鋼構造年次論文報告集，第13巻，pp317-324，2005
- 6) 今野貴史等：鋼平板の溶融亜鉛浸漬試験中に発生する熱ひずみと温度変化，鋼構造年次論文報告集，第10巻，pp217-224，2002
- 7) (株)バコーポレーション，(株)巴技研：解説・溶融亜鉛めっき大型鋼構造物のめっき割れ現象とその防止法，2001
- 8) 日笠隆司等：溶融亜鉛めっき桁の熱応力解析，土木学会関西支部年次学術講演会，1990
- 9) 日笠隆司：溶融亜鉛めっき桁に関する基礎的研究（その1），第40回土木学会年次学術講演会，I-45，1985

(2005年9月10日受付)