特集

世界に視る溶接・接合科学技術のフロンタライン

第Ⅲ部 溶接・接合技術のフロンタライン

先進的部材安全評価のための溶接力学*

Dieter Siegele**

Advanced Simulation (and/or Measurement) of Welding Deformation and Residual Stress*

by Dieter Siegele**

キーワード 溶接力学, プロセス, 材料特性, 欠陥, 溶接変形, 残留応力, 供用適合性評価

1. 緒 言

溶接力学とは溶接工程ならびに溶接金属における、力学および材料学的現象を対象にした工学である。溶接に対する研究のみならず実施工の現場においては、溶接プロセスの違いの影響、溶接による材料組織の変化、溶接継手部の剛性・強度・靱性等の機械的特性、ならびに溶接構造物全体の機能、これら全ての事象が検討項目であるが、特に溶接により生成される残留応力や欠陥の有無が重要な問題である。溶接構造物に対する、先進的な供用適合性評価法における、プロセス、特性（力学・材料特性）、欠陥という三種類の因子は、相互に関連するものであり、図1のように示すことができる。

溶接構造物に生じる変形や残留応力は、生産性のみな

図1 溶接力学における主要三因子の関係図

らず構造物の機能にも影響を及ぼす可能性がある。したがって、溶接変形や残留応力の低減は重要な課題である。溶接法、溶接前工程、溶接速度、相変態、治具による拘束条件など、様々な要因が溶接後の結果に影響を及ぼすとともに、場合によっては溶接変形や残留応力が大きく変化する場合もある。

溶接構造物における材質変化や変形を把握し最適化を図るために、試行錯誤を実験的に行うことは可能である。しかしながら、そのような工程は非常に費用がかかるとともに、多大な時間を浪費することになるだけでなく、溶接後の結果に影響を及ぼすと考えられる様々な因子の影響を区別することが困難である。上述のような実験的な試行錯誤に対して、有限要素を用いた溶接プロセスの解析では、個々の因子の影響を区別することができるだけでなく、溶接による変形や残留応力に及ぼす様々な影響についても詳しい理解を得ることが可能になる。

近年、計算科学的手法により、溶接の結果生じる変形や残留応力を予測することが数多く行われている。最先端の有限要素解析ソフトの一つである SYSWELD では、溶接による変形や応力が予測可能であるだけでなく、昇温速度や冷却速度の違いによって生じる材料組織の変化も予測可能である。一般に有限要素法を用いた溶接問題を対象とした解析においては、溶接における非定常温度場解析と力学的解析とを連成した解析は行われず、解析で得られた温度場を起因として荷重を算出し、この荷重に基づいて応力場の解析を行う。多くの溶接問題の場合、力学的な変形が溶接中の非定常温度場に及ぼす影響は小さいため、上述のような解析方法でも、実際の現象と比較して妥当な結果を得ることができる。

しかしながら、このような有限要素解析で必要となる、材料の高温での熱的および力学的物性値や、溶接時の構造物に付与される入熱量は、多くの場合、不明瞭である。

*原稿受付 平成22年12月14日
** Fraunhofer Institute for Mechanics of Materials IWM, Wöhlerstr. 11, 79108 Freiburg, Germany

そのため、それらの不明瞭な材料物性を適切に決める必要があるとともに、解析結果を実験結果と比較して検証する必要がある。なお、実験との検証には、熱電対による温度計測結果、位置検出器を用いた変位計測結果、ならびに溶接後の溶け込み形状断面観察結果が用いられる。

溶接においては、レーザ、電子ビーム、あるいはアークという局所的にエネルギーが集中する熱源が材料表面上を移動することにより、局所的に材料が熔融した部分（熔融池）が形成され、その熔融池周りの材料を溶けることにより接合が行われる。また、熔融池が移動することにより形成される非定常な温度分布により、塑性変形や材料組織の変化が生じ、その結果として溶接変形や残留応力が生成されるため、非定常温度分布は溶接変形ならびに残留応力の主要因となる⁹⁾。熔融池内の現象解析には、流体力学に基づいた複雑なモデルが用いられ、そのモデルは、溶接電圧・電流、溶接速度、溶接棒の送り速度、溶接トーチの位置や傾きなどの影響を受けるが、有限要素法に基づいた構造解析においては、この熔融池の複雑なモデルのみならず、熱源の種類が異なることの影響を考慮することはない。その代わりに、実際の溶接プロセスで計測される幾何的形狀や熱量を再現することが可能な等価な熱源モデルを、有限要素法における入熱として用いる。具体的には、溶接中の溶接部近傍の非定常温度場計測結果、ならびに溶接金属部の断面組織観察に基づいた溶け込み形状が再現可能な熱源モデルを用いる。しかも、有限要素解析で得られる溶接変形や残留応力の信頼性を確保するためには、入熱モデルにより推定される非定常温度場および溶け込み形状と実験結果とが

良い一致を示すことが、まず必要である。

本解説では、溶接力学の分野において得られている最新の実験ならびに解析結果を紹介する。そして、自動車、原子力、パイプライン製造現場での例をもとに、溶接構造物に対する先進的な供用適合性評価法における、プロセス、特性、欠陥という三因子の相互バランスの保ち方を紹介する。

2. 自動車のアルミニウム溶接継手部材における溶接変形制御のためのプロセス解析

溶接変形や溶接残留応力は、高精度な製造や組み立て工程の障害になるだけでなく、溶接部材ならびに構造物全体の強度や寿命を損なう場合もある。薄板軽量構造の自動車部材を例に、その影響を紹介するとともに、最新の材料モデルおよび有限要素解析法を用いた定量的予測結果についても紹介する。

対象とする自動車部材は、AUDI 社の車のフレーム部材であり、AlMgSi0.5 (ENA W6060, T7) の押出し材である屋根部と改良型 AlSi10Mg (ENAC4300) の鋳造品である AURAL-2 製の B 型ピラー部とをレーザ溶接により三カ所溶接した部材である。ただし、量産品では一般的な S-AlSi12 が用いられており、溶接後熱処理も行われていない。

溶接工程および構造解析には、汎用有限要素解析ソフトの SYSWELD を用いたが、このソフトは力学的解析とともに熱履歴にともなう材料学的変化も考慮に入れた解

図2 AUDI A2 のフレーム構造図および B 型ピラー部と屋根部との接合部の詳細

図3 ENAW6060, T7 材のレーザ溶接部の各相における降伏応力の温度依存性、ならびに室温から 500℃ までの真応力-ひずみ線図

図4 自動車部品のレーザー溶接時の解析および計測温度履歴結果

図5 溶接部の溶け込み形状に関する解析および観察結果

図6 レーザ溶接時の非定常温度分布に関する解析結果例

析ソフトである。解析に必要な物理的ならびに力学的物性値の温度依存性については、解析対象である溶接継手から放電加工により切り出した小型試験片を用いた試験から同定した。なお実験では、母材、溶接部ならびに熱影響部の三領域を区別して計測を行った。計測結果例として、図3にレーザー溶接を行った押出し材の降伏応力の温度依存性、ならびに真応力-真ひずみ曲線図を示す。

溶接時の複雑な熱伝達、溶融、トーチや溶融池における流体力学現象を模擬するための熱源モデルには、溶接実験中に熱電対で計測した温度分布、ならびに溶接金属部の断面組織写真観察から同定した溶け込み形状を再現可能な移動熱源モデルを用いた。溶融池内の熱伝導が溶接線方向よりも溶接線垂直方向の方が低いと想定し、熱源モデル内のエネルギー密度分布がガウス分布形状を持つような一般的な熱源モデルを用いることにより、解析で得られる最高到達温度や冷却速度は、実験結果と良い一致を示す。溶接線中央部から離れたいくつかの点で熱電対により計測した温度の時刻歴と、熱源モデルを調整した結果得られた、同じ点における有限要素解析結果とを図4に示す。また、溶接金属部の溶け込み形状を数値解析により再現した、溶接部の等温温度分布図を図5に示す。

解析対象であるB型ピラー部、屋根部ならびに三カ所のレーザー溶接部は、8節点の立体要素でモデル化し、要素数はおおよそ155000要素である（なお、溶接金属部は幅方向に4分割とした）。対流や放射による熱伝達現象をモデル化するためシェル要素を用いた。製造工程における治具拘束は、拘束点にばね要素をつなげることによりモデル化し、溶接が終了し完全冷却後には、この治具拘束に相当する節点の拘束条件を開放した。その結果得られ

図7 溶接後に治具拘束を開放した結果得られた溶接変形解析結果、および溶接前形状

た、溶接変形ならびに残留応力を評価対象とした。64ビットコンピュータ（メモリ容量10GBのHP Alpha ServerES40）を用いて、三カ所のレーザー溶接部の解析に、約110時間を要した。

熱解析および力学解析は連成解析とはせず、独立に行った。図6に三カ所のレーザー溶接中の非定常温度場の例を示す。

力学解析には簡便化したGrongモデルを用い、実験で計測した力学物性値の温度依存性から、完全弾塑性体として解析を行った。溶接終了後に拘束を開放した後に得られた変形の結果を、溶接前の形状と比較して図7に示す。特に屋根部に収縮力により生じた大きな変形が認められる。実生産現場においては4mm程度の変形が認められており、この解析結果が部分解析結果であることを鑑みると、極めてよい解析結果であると考えられる。

図8 レーザ溶接後の B 型ピラー部における溶接線垂直方向および溶接線方向の残留応力の数値解析ならびに計測結果

図9 解析による屋根部の溶接終了後の最大溶接変形に及ぼす諸因子の影響⁵⁾

三カ所のレーザ溶接部における三番目の溶接部での溶接線方向ならびに溶接線垂直方向の残留応力について、解析結果と X 線回折による計測結果とを比較した結果を図 8 に示す。解析においては、溶接線垂直方向の残留応力は極めて小さいが、溶接線方向の残留応力は、溶接部では非常に大きな引張り応力を、また母材部では小さな圧縮応力を示す結果となった。一方、実験結果は同じような傾向を示すものの、溶接線垂直方向については小さな違いが、溶接線方向では大きな差が認められる結果となった。この違いの原因としては、押出し材ならびに鋳造部品の溶接前に存在する残留応力や、レーザ照射の衝撃力が考えられる。

解析で得られる変形に及ぼす影響因子を調べるため、改良型の熱源モデル（溶融池内の熱伝導性に異方性を仮定することで、実験で得られた温度分布ならびに溶け込み形状を再現したモデル）を用いて一連の解析を行った。図 9 に代表的な結果を示す。

レーザ溶接の代わりに MIG 溶接を仮定することで、入熱量を大きくした場合には変形が 50% も増加する結果が得られた。力学的解析においては入熱量が荷重となるため、入熱量が不正確であれば、解析結果の信頼性も低くなる。次に重要な因子は材料物性値である。完全弾塑性の代わりに等方加工硬化を仮定した場合には、解析結果は 16% も増加する。特に、(アルミニウムに対するレー

ザ溶接の場合には) 溶接部と熱影響部の材料物性値を母材と同じとした場合には、12% もの違いが認められた。また、製造工程のける溶接終了時から治具による拘束を開放するまでの時間を短くした場合にも、明確な影響が認められた。つまり、解放するまでの時間を短くした場合には、溶接部における塑性変形の緩和が十分に行われないため、変形が大きくなる結果となる。さらに溶接順番が実際とは逆の場合にも、10% もの変形の違いが認められた。そして、温度場解析における 1 ステップ当たりの時間間隔を変化した場合にも、溶接変形および残留応力解析結果が変化する結果が認められたが、この時間間隔を溶融池長さを溶接速度で割った値の半分以下に設定した場合には、十分に妥当な解析結果が得られることが分かった。

つまり、この事例より、解析に用いる材料物性値が正確であり、熱源モデルも実験で得られる温度場ならびに溶け込み形状を再現可能である場合には、例え対象とする構造物が複雑であっても、溶接残留応力や変形が予測可能であることが分かる。さらに、このような有限要素解析により、溶接時に想定される様々な因子が、変形や残留応力に及ぼす結果を評価することが可能であり、しかも、製造工程の最適化を解析結果に基づいて図ることが可能であることが分かる。

3. 被覆溶接における残留応力推定解析

被覆面内のき裂に対する健全性評価のためには、被覆面内のみならず母材部の残留応力分布を把握することが重要である。オーステナイト鋼による被覆面とフェライト鋼からなる母材とでは、線膨張係数が異なるだけでなく、被覆面を作製するために肉盛溶接を用いるため、残留応力の推定のためには、これらの影響を考慮する必要がある⁹⁾。これまでに行われている、被覆面内の残留応力推定に関する研究では、様々な仮定が設定されている⁶⁻⁸⁾。また、様々な手法を用いて計測された残留応力分布も、計測方法の違いにより、しばしば異なる結果となっており、特に被覆面直下の母材部では、その違いが顕著である。つまり、非破壊検査法による残留応力計測では、被覆面と母材部との間の急激な残留応力変化を再現することが可能であるが、試料の切断をとまなう検査法では、切断工程をとまなうため、応力分布の変化は緩やかになる⁹⁾。

ここでは、最新のドイツの原子力発電所に用いられている線状肉盛溶接による被覆面作製時の溶接残留応力を、実験計測ならびに有限要素法解析により推定した結果を紹介する。22NiMoCr37 鋼で作製された原子炉圧力容器部品から抽出した 700 x 300 x 74 mm の二枚の板材を母材として用いた。板材の表面に幅 60 mm のオーステナイト鋼による被覆面を、二層の線状肉盛溶接により作製した。肉盛溶接にはサブマージアーク溶接法を用い、電流 700 A、電圧 28.5 V、溶接速度 12 cm/min の条件で溶接を行った。肉盛溶接は、DIN EN 287-1 規格に基づいて、溶接姿勢 PA の条件で実施した。なお、これらの溶接条件は、参考文献¹⁰⁾に記載されている肉盛溶接に対する推奨条件に基づいて決定した。

図10 二層肉盛溶接部および熱影響部に関する板断面観察図

図11 降伏応力の温度依存性

図12 引張り強度の温度依存性

図13 熱伝導率の温度依存性

図14 熱ひずみの温度依存性

被覆溶接後の、板断面観察結果を図10に示す。二層盛りによる被覆層、ならびに熱影響部が明確に分かる観察結果となっている。熱影響部層の最大厚さは10mm程度であり、また二層肉盛溶接層の厚さはそれぞれ約4mmであり、参考にした推奨溶接条件¹⁰⁾通りの結果であった。

・数値溶接解析

溶接問題を対象にした数値解析では、室温から融点に至るまでの、熱的および力学的物性値が入力値として必要不可欠である。つまり、本研究における有限要素解析では、解析対象となる材料（母材 (BM), 熱影響部 (HAZ) ならびに二層の肉盛溶接層 (clad 1, clad 2) の熱的および力学的物性値の温度依存性を決定する必要がある。

各材料の降伏応力、引張強さ、熱伝導率ならびに熱ひずみ（線膨張係数）を図11～図14に示す。図11より、母材よりも熱影響部の引張り特性が高いことが、また肉盛溶接層の降伏応力が低く、特に一層目よりも二層目の方がその低下が顕著であることが分かる。引張強さについても、ほぼ同じような傾向が認められる（図12を参照）。図14には、母材と肉盛溶接層の熱ひずみに関する温度依存性のみを示している。オーステナイト鋼である肉盛溶接層については、熱ひずみは線形の温度依存性を示しているが、マルテンサイト相からなる母材は、昇温時には約700°Cで冷却時には約600°Cで相変態にともなう挙動が認められる。また、この相変態の影響は図13に示すように熱伝導率の温度依存性にも認められる。

非定常温度場を有限要素法により解析する場合には、熱容量、熱伝導率ならびに線膨張係数という熱的物性値の温度依存性を入力値として用いた。肉盛溶接過程をできるだけ詳細に再現するために、解析には三次元有限要素モデルを用い肉盛りに応じて要素が生成する機能を利用した。なお、熱源モデルには同じく三次元の移動熱源モデルを用い、三次元有限要素の積分点に、熱源分布に応じた熱量を負荷する形で解析を行った。また、熱影響部で生じる可能性のある相変態についても考慮した解析を行った。さらに二層肉盛溶接の解析においては、一層目の肉盛溶接部が二層目の溶接により再溶融される過程も考慮した解析を行った。

いくつかの点で、一層目の肉盛溶接中の温度履歴を計測した結果とともに、同計測点における解析結果を図15に示す。肉盛溶接部に一番近い点において、最も高い温

図15 解析および計測温度履歴結果

度が計測され、溶接部から離れるにしたがって、最高温度が低くなる結果が得られた。図15に示すように、冷却速度については計測と解析とが良い一致を示したが、最高温度についてはわずかに違いが認められる。なお、熱電対の計測位置に不明瞭な点があること、ならびに肉盛溶接中に熱電対が電氣的影響を受けたことが、この違いの主な原因である。

10パスの肉盛溶接を行った後の残留応力解析結果を図16ならびに17に示す。溶接線方向の残留応力分布については、被覆層内に引張り応力が、被覆層直下には圧縮応力が、さらにその下の板内部には引張り応力が生成する

図16 板中央における溶接線方向残留応力結果

図17 板中央における溶接線垂直方向残留応力結果

図18 溶接後熱処理後の残留応力分布

結果となった。また溶接線方向に垂直方向の残留応力についても、溶接線方向と同じ傾向が認められたが、生成する残留応力の絶対値は、溶接線方向よりも小さい結果となった。さらに興味深い結果として、直前に行われた肉盛溶接部における残留応力が、続いて行われる肉盛溶接により緩和する結果が認められた¹¹⁾。

溶接問題を対象にした数値解析で得られた残留応力には、溶接後熱処理 (PWHT) の影響は含まれていない。なお、溶接後熱処理により母材部の残留応力は著しく低下する。そこで、溶接過程の数値解析の後、溶接後熱処理におけるクリープ現象にともなう応力緩和過程を模擬した解析を有限要素解析ソフトであるABAQUSを用いて行った。なお、解析に用いたクリープ則は、母材および肉盛に用いたオーステナイト鋼を対象に行った、応力緩和試験結果より同定した。溶接後熱処理 (600℃で6時間保持) を対象とした解析の結果、図18に示すように、母材部の残留応力は圧縮応力に変化するが、被覆層内には引張りの残留応力が残る結果となった。なお、この引張り残留応力は、主に、母材と肉盛溶接材との熱膨張係数が異なることが原因で生じる¹²⁾。

4. 沸騰水型原子炉 (BWR) のシュラウド溶接部内にき裂と残留応力を有する場合の供用適合性評価

沸騰水型原子炉 (BWR) シュラウドコア溶接部においては、腐食や照射の可能性があることから、き裂状欠陥の発生および進展を完全に排除することはできない。そのため、ライフタイムを通して構造健全性を保証するために、非破壊検査と破壊力学ベースの欠陥評価が要求される。検出された欠陥あるいは想定欠陥にとって、溶接残留応力は主要負荷として働く。それゆえに、溶接残留応力の分布とその大きさを計測あるいは計算により知っ

ておくことは、シュラウドの予寿命評価に最も重要である。ここでは、構造要素の破壊力学解析を実施するために、その入力データとして使用するために必要な溶接残留応力の情報を得るために実施した溶接プロセスシミュレーションの結果について紹介する¹³⁾。

図19は、周溶接によってフランジリングに取付けられた1.4550 (X10CrNiNb18 9) 鋼で作製された炉心を取り巻く二枚の薄肉シェルを有するシュラウドコア断面の有限要素モデルを示している。溶接プロセスの数値シミュレーションには有限要素解析コード ABAQUS を用い、

図19 溶接パスと有限要素メッシュを示したシュラウドコアの形状

図20 室温と供用温度におけるフランジ溶接部内の軸方向残留応力

図21 コア上部溶接部の外表面熱影響部に存在する一定深さの全周き裂に対する応力拡大係数
—右図：41.3 mm の深いき裂をにより再分布された軸方向残留応力

軸対称モデルを用いて解析を行った。

実際に実施した溶接条件に従い、MMA (手溶接) あるいは SAW (サブマージアーク溶接) による総数95パスの溶接を構造モデルの上部および下部溶接部に連続的に施した。このとき、熔融温度を1600℃とし、1パスあたりの保持時間を考慮に入れて計算している。材料の硬化則には、応力緩和処理と溶接ルート部のグラインダー処理後の残留応力を保守的に評価するために、非線形の移動硬化則を採用した。この材料パラメータは、室温から1000℃の間で行った引張試験により決定した。図20は、計算で得られた軸方向の残留応力の結果を示したものである。き裂の無い断面において、シリンダー表面において最大で250MPaの引張応力が、またシェル壁の中央部においては圧縮の応力となる自己平衡分布が得られている。

残留応力場における破壊解析を行うにあたり、上部溶接部の熱影響部に外表面から導入される深さ一定の全周き裂を想定した。き裂深さが異なる場合の応力拡大係数は重み関数法を用いて計算した¹⁴⁾。このような解析解の妥当性は、節点解放法とCMOD (き裂末端開口変位) からの外挿法により数値計算された結果との比較からも検証している。図21に見られるように、解析解と数値解析解は非常に良い一致を示している (図20に見られたように、き裂無しの状態では圧縮の応力を示していた断面部においてさえ、計算した全ての深さのき裂に対して応力拡大係数は正の値を示しており、また開口したままである (右側の図参照))。応力拡大係数はき裂貫通時にはゼロになる傾向にある。また、図21は、材料硬化則によって応力拡大係数分布が異なることを示している。より現実的な非線形硬化則の方が線形硬化則よりも高い応力拡大係数を与える傾向にあることがわかる。

以上のことをまとめると、残留応力解析と破壊力学解析を組み合わせた溶接シミュレーションに基づいて、実験室レベルの試験で得られる応力拡大係数の関数である材料のき裂成長曲線 da/dt (成長き裂長さの時間増分) を積分することで、シュラウドコア溶接部における粒界応力腐食割れ進展を予測できる。これらの結果は、監査機関や技術規格が要求する安全性を満たすかどうかを決定する非破壊検査時の基準として活用される。

図22 FKM ガイドライン「破壊力学に基づく強度評価法」第3版（2009）の構成¹⁷⁾

5. ドイツ FKM ガイドライン「破壊力学に基づく強度評価法」を用いたパイプラインの欠陥評価

近年, 他の国々との共同開発活動と並行して, “FKM Bruchmechanik-Richtlinie” がドイツにて開発された^{15), 16)}。

この“FKMガイドライン：破壊力学に基づく強度評価法”は機械工学研究委員会（FKM）にて実施された学術機関, 研究所, 産業界の共同活動の結果として, ドイツ産業研究協会連合“Otto von Guericke”（AIF）による助成を受けて策定されたものである。本ガイドラインは, フェライト鋼やアルミニウム合金の静的強度や疲労

強度さらには腐食強度を含めた強度評価システムの一部となるものである。初版は2001年に出版されたが, 2009年に最新版として, 例えば混合モードや動的（衝撃）荷重などの新しいトピックスを加えて, またアプリケーション例を追加して第3版として出版された¹⁷⁾。なお, 評価の手順や解法については, コンピュータプログラム Fracsafe¹⁸⁾に組み入れられている。現在, 本ガイドラインはドイツの産業界において広く利用されている。

本ガイドラインの構成を図22に示している。General（Chap.0）にリストアップされているように, 異なる項目を同じ概念に基づいて同じ手順で取り扱うことができる。強度評価のための“基本概念”（Chap.1）は, 例えば API 579（2000）, SINTAP（1999）に採用されている

図23 スパイラル溶接鋼管にける欠陥評価 (FKM ガイドライン¹⁷⁾, 適用事例 No. 7)

図24 溶接部に欠陥を含むスパイラル鋼管の破壊力学に基づく強度評価

ように、弾塑性パラメータ K_t と L_r およびき裂の発生、安定き裂成長と不安定進展の開始限界である材料パラメータ K_{mat} (応力拡大係数で評価した破壊靱性値; $K_t = K/K_{mat}$) を用いた破壊評価線図法 (FAD) の適用である。疲労負荷に対しては、応力拡大係数範囲 ΔK と、材料定数であるき裂成長速度 da/dN や下限値 ΔK_{th} を用いて線形破壊力学が適用される。主たる評価手順は以下のとおりである。

◆ 入力情報の収集と記述 (Chap.2)

- 非破壊検査による欠陥情報 (製造中や供用中に発生した欠陥, あるいは仮想欠陥)
- 負荷情報 (外力や外モーメント, 内部圧力, 熱応力および残留応力)
- 材料情報 (規定供用条件下での材料特性)

◆ 構造要素のモデル化 (Chap.3)

き裂を有する対象構造を, 本ガイドラインの付録7.4に掲載されている選択肢 (数式) によって, K_t と L_r といった FAD パラメータが算定可能な構造モデルに置き換え, その構造に作用する主応力に垂直な参照面に単純形状化された面状き裂に置き換える。破壊靱性 K_{mat} と, 形状には依存しないが材料固有の破壊評価線は, 破壊力学靱性試験や他の試験結果との相関式から算定する必要がある。なお, これらは全て, 評価結果が保守的となるようにモデル化される必要がある。

- ◆ 特定形状 (構造および欠陥) および負荷条件に対する構造状態 (破壊or 非破壊) の計算 (Chap.4)
- ◆ 基本評価線あるいは, 材料 (あるいは溶接部) の強度特性に依存した破壊評価線との比較による構造状態の評価 (Chap.5)

最新版では, 脆性破壊あるいは塑性崩壊に対する安全マージンの定量評価および確率的取扱いが可能である。

さらに, 本ガイドラインで与えているシャフト, 板材, パイプライン, ケーシングやトラックといった代表的な構造要素を包括する蓄積された20もの適用事例と, 8項目の付録は, ユーザーが設計, 品質保証, 供用適合性評価や破壊解析を行う上で多いに参考になる。

以下に, 本ガイドラインの適用例の一つとして, スパイラル鋼管の欠陥評価事例について紹介する。これは, パイプラインの検査中に検出された, パイプ外側の溶接余盛除去中に局所冷間成形されて生じた欠陥に対する評価である。欠陥領域は, 長さ数十 mm 以上におよんでおり, 外表面から最大 20 mm の深さに達していた。最も危険な状態を想定して, これらの領域を全て欠陥としてモデル化している。

図23は, 適用した構造モデルの形状と負荷条件を示したものである。ガイドラインの手順に従って評価すると, 7.6 MPa の内圧下における 16 mm 厚のパイプの限界き裂深さ a_c が 3.4 mm であることが算定された。この結

図25 スパイラル鋼管における溶接部欠陥からの確率論的破壊評価—欠陥サイズおよび破壊靱性値 K_{mat} の統計的分布の影響

果は、実際の溶接熱影響部から採取した CTOD 試験片で得られた最小破壊靱性値 $K_{mat} = 20 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$ を用いて、破壊評価線図法から得られたものである。保守的に深さ $a_0 = 2 \text{ mm}$ の無限長の初期き裂を想定して疲労解析を行った結果、パイプラインに寿命の二倍という極端な繰返し内圧変動を与えても限界き裂深さ ($a_c = 3.4 \text{ mm}$) に達しないことがわかった。算出された荷重裕度、欠陥寸法裕度および靱性裕度は図24に示すとおりであり、2mm 深さの欠陥は安全で十分に許容される結果として見積もられている。

限界状態関数（破壊評価線）として、SINTAP（欧州で開発が進められた構造健全性評価手法）に準拠して不連続降伏挙動を有する材料に対する関数を用いている。このような決定論的評価結果を補足する上で、欠陥（検出確率（POD）、き裂深さ）や材料抵抗（破壊靱性）といった入力データが、ある統計的バラツキを有することを考慮に入れた確率論的アプローチで評価された。荷重（パイプにおいては内圧）はむしろ決定論的パラメータとして扱ったが、残留応力やランダムな疲労荷重振幅の不確かさは統計的手法により合理的に決定することができる。モンテカルロシミュレーションを用いることで、き裂深さ、1次および2次応力、降伏応力および引張強さ、破壊靱性値の統計分布を想定して破壊確率を算出した。その結果を図25に示すように、 10^3 から 10^6 回のモンテカルロシミュレーションを実施することで、平均的なき裂深さが $\mu_a = 2 \text{ mm}$ と $\mu_a = 3 \text{ mm}$ の場合において、最も低い靱性を想定してもそれぞれ破壊確率が $P_f = 4 \times 10^{-3}$ と $P_f = 3 \times 10^{-2}$ という非常に小さな値が得られる結果となった。

まとめると、ドイツ FKM ガイドライン“破壊力学に基づく強度評価法”は、国内および国際引用規格や最新の研究成果に基づいて策定されたものであり、この2009年の第3版¹⁷⁾は、疲労における波形や過大荷重の効果、混合モード負荷、動的（衝撃）負荷、応力腐食割れ、そして破壊力学計算における確率論的特性といった新しいトピックスを考慮可能な形で編集されている。

6. 結 言

溶接力学分野において得られている最新の実験ならび

に数値解析結果を紹介した。例としては、自動車、パイプラインならびに原子力分野での結果を紹介したが、特に、溶接構造要素の機能に影響を及ぼす、「プロセス」、「特性（力学・材料特性）」、「欠陥」という三因子に注目した例を紹介した。

自動車のドアピラーと屋根部との接合部を対象とした例では、有限要素解析ソフト SYSWELD を用いて、必要となる材料物性値とともに先進熱源モデルを採用することで、レーザ溶接過程を数値解析により再現可能であること紹介した。具体的には、解析で得られた溶接残留応力ならびに変形が、量産品を対象とした計測結果と定量的に良い一致を紹介した。また、この数値解析法を用いて、溶接過程に及ぼす影響を系統的に調べることが可能であり、しかも、その結果を用いて生産工程の最適化を図ることが可能であることを紹介した。

肉盛溶接により被覆層を対象とした数値解析では、被覆層に引張りの残留応力が、被覆層直下の母材には圧縮の残留応力が生成することを紹介した。また、この解析結果が X 線回折法で計測された残留応力結果と一致することも紹介した。さらに、溶接後熱処理により、残留応力が著しく緩和し、実験結果と同様、母材には圧縮の残留応力だけが、被覆層内には引張りの残留応力だけが残ることを紹介した。

MMA/SAW による多層溶接の数値シミュレーションでは、欠陥評価に使用する残留応力を算定できることを実証した。このような結果を用いて、実験室レベルの試験で得られる残留応力に誘起される応力拡大係数の関数である材料のき裂成長曲線 da/dt （成長き裂長さの時間増分）を積分することで、シュラウドコア溶接部における粒界応力腐食割れ進展を定量的に予測できることを紹介した。これらの結果は、監査機関や技術規格が要求する安全性を満たすかどうかを決定する非破壊検査時の基準として活用され得る。

最後に、最新版のドイツの FKM ガイドライン“破壊力学に基づく強度評価法”を紹介し、その基礎となる破壊力学手法がスパイラル溶接鋼管の欠陥評価に適用できるとの事例について、入力パラメータである欠陥寸法と破壊靱性値の確率論的取扱いを含めて紹介した。

以上のように、信頼性の高い構造要素の供用適合性評価を行うためには、「プロセス」、「特性（力学・材料特

性)」、[「欠陥」という三因子の相互作用をバランスよく取扱うことが必要である。

(訳：大阪大学 芹澤 久，大畑 充)

参考文献

- 1) Radaj, D. Welding residual stresses and distortion, revised edition of the original German edition entitled: Eigenspannungen und Verzug beim Schweißen-Rechen und Messverfahren, Fachbuchreihe Schweißtechnik Band 143, DVS-Verlag, Düsseldorf 2002.
- 2) Hemminger W., Cammenga C. Methoden der thermischen Analyse, Springer-Verlag, Berlin 2001, ISBN 3540150498.
- 3) Brand, M., Petz, M., Tutsch, R., Wohlfahrt, H., Michailov, V., FE-welding simulation and distortion measurement during welding using optical object grating method, Mathematical Modelling of Weld Phenomena 7, Graz 2005, ISBN 3-901351-99-X, Technische Universität Graz.
- 4) Siegele, D. Brand, M. and Veneziano, C.: Numerical welding simulation of an aluminium automotive component, IIW Doc. X-1599-2006.
- 5) Veneziano, C. et al: Numerische Simulation von Verzug und Eigenspannungen geschweißter Komponenten aus Al-Guss und -Strangpressprofilen, Project AIF 13.716N/DVS 9.032, Report S6/ 2006 Fraunhofer IWM Freiburg Febr. 2006.
- 6) Keim, E., et al., 2001, "Life Management of Reactor Pressure Vessels under Pressurized Thermal Shock Loading: Deterministic Procedure and Application to Western and Eastern Type of Reactors", Int. J. Pressure, Vessels and Piping 78 (2001), 85-98.
- 7) Siegele, D., Varfolomeyev, I., Nagel, G. (2001): >>Untersuchungen zur Tragfähigkeit der Plattierung für große Unterplattierungsrissspostulate von RDB<<, 27. MPA-Seminar (2001), S. 7.1-7.14.
- 8) Roos, E., Schuler, X., Nagel, G., König, G.: >>Bruchmechanikanalyse des RDB mit Berücksichtigung der Eigenspannungen<<, Veröffentlichung zu MPA/VGB Forschungsvorhaben 3.1.2.6.
- 9) Gripenberg, H., Keinänen, H., Ohms, C., Hänninen, H., Stefanescu, D., and Smith, D., Prediction and Measurement of Residual Stresses in Cladded Steel, Materials science forum, European conference on residual stresses No6, Coimbra, Portugal (10/07/2002), vol. 404-407, pp. 861-866.
- 10) Deutscher Verband für Schweißtechnik, Taschenbuch DVS-Merkblätter und -Richtlinien - Düsseldorf 1992, Fachbuchreihe Schweißtechnik Band 109, ISBN 3-87155-126-0.
- 11) Siegele, D. and Brand, M.: Numerical simulation of residual stresses due to the cladding process, Proc. 2007 ASME Pressure Vessels and Piping Conf. (San Antonio, TX, July 22-26, 2007), CD-ROM.
- 12) Hohe, J., Brand, M., Siegele, D., Experimental and numerical investigations on sub-clad and surface cracks in cladded components, Proceedings of PVP2008, 2008 ASME Pressure Vessels and Piping Division Conference July 27-31, 2008, Chicago, Illinois, USA.
- 13) Varfolomeyev, I., Siegele, D. and Beukelmann, D.: Analysis of residual stresses and assessment of postulated cracks in a core shroud weld, ASME Pressure Vessels & Piping Conference, PVP, Vancouver, 4-8 August 2002.
- 14) Varfolomeyev, I.: Weight function for external circumferential cracks in hollow cylinders subjected to axis-symmetric opening mode loading, Engng. Fracture Mechanics, Vol.60, pp333-339.
- 15) Blauel, J.G., Burget, W., Hodulak, L., Siegele, D.: Assessment of defects in pipelines using the German FKM-Guideline >>Fracture Mechanics Proof of strength<<, WTIA Conf. Sydney2005.
- 16) Berger, C., Wurm, B., Blauel, J.G., Hodulak, L., Gerdes, C.P.: Fracture mechanics proof of strength of engineering components - A general guideline, ICF 10, 2000.
- 17) FKM Guideline "Fracture mechanics proof of strength for engineering components", version 3, 2009, VDMA Publisher house.
- 18) FracSafe, Software for FKM Guideline "Fracture mechanics proof of strength for engineering components", Version 2.1, 2009.