第Ⅱ部 溶接・接合工学の最近の動向

Ⅲ 継手性能の評価

5. 溶接変形および残留応力評価

芹 澤 久*

Evaluation of Welding Distortion and Residual Stress

by SERIZAWA Hisashi*

キーワード：溶接，接合，変形，残留応力，予測，シミュレーション，測定，精度管理

5.1 はじめに

溶接をはじめとしてガス切断やガスによる板曲げ，さらには摩擦攪拌接合（FSW）などの加工は，局所的に熱を与えるプロセスであるため，変形だけでなく残留応力をも生成する．熱加工による変形は構造物製造時の寸法精度管理に問題を及ぼすとともに，残留応力は製造後の構造物の強度にも影響を及ぼすため，これらの高精度な計測ならびに予測が強く求められている．溶接力学に基づけば，熱加工による変形および残留応力の生成因子は，熱加工により生成する永久ひずみ（固有ひずみ）であり，有限要素法を用いて数値解析的に予測可能である¹⁾．近年の計算機器の計算能力の高速化および大容量化，ならびに非線形問題に対する汎用有限要素ソフトの解析速度および安定性の向上により，溶接変形および残留応力の定量的予測ならびに計測結果との比較検討だけでなく，解析結果に基づいた現状の問題解決への指針確立や新技術の開発が積極的に行われている．また，数値解析予測技術のさらなる高精度化，高速化，および改良も進められている．さらに，数値解析技術を活用した計測技術の高度化も行われている．一方，溶接割れの問題に対しても，数値解析技術を活用した現象の理解とともに，改善に向けた指針の確立も行われている．

ここでは，過去2年間の溶接学会論文集および溶接学会全国大会講演概要集を中心に，公表文献に基づいて，これらの溶接変形および残留応力に関する最近の話題・動向に関して紹介する．

5.2 変形・残留応力の詳細予測および評価

熱加工後の変形および残留応力を高精度に予測するためには，熱加工時の過渡的な温度履歴を詳細に解析し，その結果に基づいて機械的な応力およびひずみの変化を解析する，熱弾塑性解析法を活用することが望ましく，汎用有限要素ソフトを用いて，様々な構造部材の残留応力評価が行われている．例えば，原子力機器の厚板構造

部材の溶接後残留応力²⁾，原子炉压力容器の肉盛溶接後の残留応力³⁾，配管円周溶接における溶接始終端部の残留応力^{4, 5)}，ステンレス鋼管突合せ溶接継手近傍の残留応力⁶⁾，薄板の電子ブーム溶接継手の残留応力⁷⁾，補修溶接後の配管溶接部の残留応力⁸⁾の解析において実験結果と良い一致が報告されている．また，残留応力ならびに変形の低減を最終目標として，様々な熱加工条件に関する検討も，実験だけでなく熱弾塑性解析法を用いた解析的手法により進められている．例えば実験の検討としては，溶接中の裏焼きによる角変形低減効果⁹⁾，溶接入熱パラメータと角変形との関係に関する考察¹⁰⁾，構造部材作製時における溶接変形のバラツキに及ぼす諸条件の影響¹¹⁾，アルミニウム接合部材の組立てにおける変形把握¹²⁾，アークおよびレーザー溶接部における溶接変形・残留応力に及ぼす熱源特性の影響に関する考察¹³⁾，平板突合せ溶接における溶接順序の違いによる溶接変形の特徴¹⁴⁾，水冷法による溶接変形・残留応力の低減手法に関する検討¹⁵⁾などが報告されている．あわせて数値解析的検討として，局所冷却法を用いた溶接変形の低減効果¹⁶⁾，原子炉配管溶接部における残留応力の不確かさ評価に基づく確率論的構造健全性評価¹⁷⁾，同時平行すみ肉溶接で生じる変形・残留応力の特徴¹⁸⁾，すみ肉溶接で生じる面外変形の準定常状態¹⁹⁾，多層溶接の溶接変形に及ぼす外的拘束の影響²⁰⁾，大型構造物円周溶接の変形解析に及ぼす解析条件の影響²¹⁾，FSWにおける接合変形に関する検討²²⁾，コンプレッサー作製時の溶接変形に関する検討²³⁾，ノズル部周溶接の変形・残留応力に及ぼす溶接方向に関する検討²⁴⁾，自動車部材の溶接変形に関する検討²⁵⁾，溶接中の線状加熱付与による縦収縮変形制御法に関する検討²⁶⁾，次世代の発電システムである核融合に向けた国際熱核融合実験炉（ITER）用構造部材の溶接変形制御に関する検討²⁷⁾，FSWにおける圧延付与による残留応力・変形制御に関する検討²⁸⁾，異材接合継手における入熱量が残留応力に及ぼす影響²⁹⁾，溶接前部材間の仮付けの影響に関する検討³⁰⁾，ショットピーニングが残留応力に及ぼす影響に関する検討³¹⁾などが報告されている．

一方，熱加工による残留応力を低減するために熱処理が用いられるが，熱処理条件の最適化を最終目標として，熱加工後の残留応力解析結果を初期条件に，熱処理にともなうクリープ変形を考慮した解析も行われている．例えば，原子炉压力容器肉盛溶接部における溶接及び溶接後熱処理（PWHT）による残留応力分布評価³²⁾，異材継手におけるPWHTの残留応力低減効果^{33, 34)}，厚板多層突

原稿受付 平成23年4月13日

*正 員 大阪大学接合科学研究所 Member, Joining and Welding Research Institute, Osaka University

合せ溶接部の PWHT 後の残留応力解析³⁵⁾, Ni 基合金溶接金属をクラッド溶接した低合金鋼異材部の残留応力解析³⁶⁾, 鋼材の焼入れ後の PWHT による応力低減効果予測解析³⁷⁾, 異材狭間先多層溶接継手の PWHT による残留応力低減効果³⁸⁾などが報告されている。また, 残留応力の高精度な予測のために, 材料学的な相変態挙動を積極的に考慮した解析も行われている。例えば, 変態膨張による拘束力緩和挙動に及ぼす変態温度に関する解析³⁹⁾, 高張力鋼の変態超塑性を考慮したレーザ溶接時の変形・残留応力解析^{40, 41)}, Ni-Cr 系高強度溶接金属を用いた割れ試験における力学的挙動解析⁴²⁾, 原子炉圧力容器クラッド境界部の残留応力評価^{43, 44)}, 溶接金属の低温度変態による残留応力低減効果解析⁴⁵⁾, 高張力鋼の変態挙動が溶接変形に及ぼす影響⁴⁶⁾などが報告されている。さらには熱加工における熱源に焦点を置いた研究も行われており, 移動熱源の影響に注目した入熱パラメータと角変形の関係に関する考察⁴⁷⁾や, 溶接変形解析におけるアーク物理に基づいた熱源モデリングに関する検討^{48, 49)}などが報告されている。

その他, 有限要素ソフトを用いた変形および残留応力解析における解析手法の改善により, 予測の高精度化を図る研究も積極的に行われている。例えば, すみ肉溶接による T 継手の未溶着ルート部を考慮した数値解析手法の検討⁵⁰⁾, ビードオンプレート溶接の三次元有限要素熱弾塑性解析⁵¹⁾, 厚板溶接残留応力解析におけるモデル化範囲の影響に関する研究⁵²⁾, 死荷重作用下の補修補強溶接で生じる残留応力⁵³⁾, 熱弾塑性大変形解析で得られる溶接不整の力学的意義⁵⁴⁾, 熱弾塑性解析ソフトの比較検討⁵⁵⁾, 国際溶接学会 (IIW) ラウンドロビン計画に基づいた三次元残留応力解析・計測⁵⁶⁾, 新たな接触を模擬する要素を用いた溶接時の拘束条件を再現する解析法の開発⁵⁷⁾などが報告されている。

5.3 変形・残留応力予測および計測技術の開発

近年のソフトウェアおよびハードウェアの能力向上により, 複雑な熱加工変形や残留応力が熱弾塑性解析を用いて推定可能になってきてはいるが, 今なお, 解析時間や解析モデルの大きさに制限がある。そのため, 熱弾塑性解析法の改良, 要素分割法の改良, 解析手順の簡便化などに関する検討も行われている。例えば熱弾塑性解析法の改良については, 理想化陽解法 FEM による溶接力学解析法の開発⁵⁸⁻⁶³⁾, メッシュレス法による溶接力学解析手法の開発⁶⁴⁻⁶⁶⁾, 反復サブストラクチャー法を用いた解析法の開発^{62, 67, 68)}などが行われている。また, 要素分割法の改良としては, 三次元シェル要素を用いた熱弾塑性解析法の開発⁶⁹⁾, 厚板多層盛溶接の簡便化の影響⁷⁰⁾, 多層溶接の再分割法の適用性⁷¹⁾, 要素分割数の簡便化の影響⁷²⁾, 二次元および三次元シェル要素を用いた簡便化⁷³⁾などが報告されている。

また, 大規模構造物の熱加工変形予測法としては, これまでも固有ひずみ (あるいは固有変形) を用いた弾性解析法が用いられているが, 近年では, この弾性解析法で必要不可欠な固有ひずみを, 実験からだけでなく, 熱弾塑性解析により同定する研究が行われており, 入熱条件と固有ひずみの存在領域に関する検討⁷⁴⁾, 材料特性と固

有ひずみの分布に関する検討⁷⁵⁾, 局面板の線状加熱変形に対する固有変形の同定⁷⁶⁾, ABAQUS を用いた逆解析による固有ひずみの同定⁷⁷⁾などが報告されている。さらに, 固有ひずみを用いた弾性解析法についても, 数多くの改良や改善方法が提案されている。例えば, 界面要素を用いて, 部材間のギャップや目違いを考慮した解析法の開発⁷⁸⁻⁸³⁾, 熱弾塑性解析結果に基づいた三次元固有ひずみ分布を利用した弾性解析^{84, 85)}, 理想化陽解法 FEM による大型船体ブロックの固有ひずみ解析⁸⁶⁾, 修正係数を用いた固有変形弾性解析法の開発⁸⁷⁾などが行われている。その他にも, 同様の概念を拡張して, ローカル/グローバルという領域分けを用いた解析法^{88, 89)}や, 熱加工領域を熱弾塑性解析法により, 大規模構造物全体は弾性解析する手法^{90, 91)}が報告されている。

一方, 残留応力や溶接変形の高精度計測のためにも, 熱弾塑性解析法や固有ひずみを用いた弾性解析法は用いられており, 解析能力の向上を活用した計測の高精度化に関する研究も進められている。例えば, 原子炉圧力容器などの厚板構造物内の残留応力を固有ひずみ法により計測する手法⁹²⁻⁹⁷⁾, Deep-Hole Drilling (DHD) 法による溶接残留計測法⁹⁸⁾, デジタルカメラおよびステレオ画像法を用いた溶接変形計測法⁹⁹⁻¹⁰³⁾などが報告されている。

5.4 関連新技術の開発

熱加工による変形および残留応力を予測する解析手法の高精度化にともない, 関連する新技術の開発も行われている。例えば, レーザ加熱による薄板の加工技術であるレーザフォーミングに関する研究¹⁰⁴⁻¹⁰⁸⁾, レーザ外面加熱残留応力改善法に関する研究¹⁰⁹⁻¹¹³⁾, ウォータージェットピーニングによる残留応力低減効果に関する研究^{114, 115)}などが行われている。また, 熱弾塑性解析結果に基づいて, ITER に関する溶接施工試験法の改善^{116, 117)}や, 現設計案に関する改善指針の確立¹¹⁸⁻¹²⁰⁾なども行われている。さらに, 熱弾塑性解析で予測される残留応力に基づき, 材料学的な微視的挙動を推定する手法に関する研究¹²¹⁻¹²⁵⁾や, 溶接構造物の組立・搭載工程に関する研究^{126, 127)}なども進められている。

5.5 溶接割れ現象に関する解析

溶接割れの問題は, 材料学的および力学的現象が複合した問題であり, 割れの抑制のためには, 両者を考慮した解析が必要である。熱加工変形や残留応力の予測と同様に, 熱弾塑性解析法の解析精度の向上を積極的に活用した研究が進められている。例えば, 温度依存型界面要素を用いた T 継手溶接時の梨形ビード割れの発生予測¹²⁸⁾, 狭間先溶接における梨形ビード割れの三次元解析¹²⁹⁾, 繰返し荷重下における溶接施工性の検証¹³⁰⁾, 高温割れに関する力学モデルの構築¹³¹⁾, CuCrZr 合金の高温割れ現象の解析¹³²⁾, レーザによる厚板溶接時の割れ発生現象に関する解析¹³³⁾, Fe₃Al 合金溶接時の割れ発生危険性に関する解析¹³⁴⁾などが報告されている。また, 材料学的および力学的因子の両者の影響を考慮した, 新たな延性低下割れ判断指標として, DTR 塑性ひずみ (延性低下温度域で蓄積

される塑性ひずみ量)を定義し, 690 合金に対する多層盛溶接時の割れ感受性を評価した解析¹³⁵⁾も報告されている。

5.6 おわりに

溶接変形および残留応力に関する最近の話題・動向として, 広く熱加工による変形および残留応力を, 最新の詳細予測および評価, 予測および計測技術開発, 関連新技術の開発, ならびに溶接割れ現象に関する解析の四つに分類してまとめた。近年の目覚ましいソフトウェアならびにハードウェア技術の向上により, 熱加工による変形ならびに残留応力を数値解析的に高精度に予測することが可能になってきた。しかしながら, 熱加工プロセス学や材料学との連携については, まだまだ十分ではなく, 熱加工を用いて作製する構造物の最適な作製方法から, 作製された構造物の強度や信頼性までを全て数値解析により予測することは不可能である。今後は, それぞれの分野で蓄積された英知の連携が必要不可欠であるが, そのためには, それぞれの分野の英知を習得した人材を育成し, その人材間の連携を強めることが最も重要であると考えられる。また, そのような人材育成は, 大学における教育活動だけでなく, 産業界ならびに関係学協会との連携も必要不可欠である。例えば, 大阪大学・接合科学研究所が工学研究科マテリアル生産科学専攻と協力して進めている, IIW 認定の国際溶接技術者 (IWE) コース¹³⁶⁾は, その一役を担っているが, このような人材育成活動を通じて, 熱加工による変形および残留応力に関する予測技術が, ますま高精度化されるとともに, 関連新技術の開発も促進すると期待される。

文 献

- 1) 上田ら:「溶接変形と残留応力」攻略マニュアル, (2007) 産報出版
- 2) A. Maekawa et al.: 論文集, 27-2 (2009), pp.240s-244s
- 3) H. Nishikawa et al.: 論文集, 27-2 (2009), pp.245s-250s
- 4) 長谷川ら: 講演概要, 84 (2009), pp.30-31
- 5) 水野ら: 講演概要, 84 (2009), pp.32-33
- 6) 勝山ら: 講演概要, 85 (2009), pp.76-77
- 7) 菅ら: 講演概要, 86 (2010), pp.198-199
- 8) 勝山ら: 講演概要, 87 (2010), pp.68-69
- 9) S. Okano et al.: 論文集, 27-2 (2009), pp.231s-234s
- 10) 岡野ら: 論文集, 28-1 (2010), pp.97-107
- 11) 伊藤ら: 講演概要, 84 (2009), pp.28-29
- 12) 海読ら: 講演概要, 85 (2009), pp.4-49
- 13) 山田ら: 講演概要, 85 (2009), pp.82-83
- 14) 寺崎ら: 講演概要, 87 (2010), pp.42-43
- 15) 仲元ら: 講演概要, 87 (2010), pp.48-49
- 16) 岡野ら: 論文集, 28-1 (2010), pp.72-79
- 17) 勝山ら: 論文集, 28-2 (2010), pp.193-202
- 18) 金ら: 講演概要, 84 (2009), pp.38-39
- 19) 李: 講演概要, 85 (2009), pp.50-51
- 20) 上谷ら: 講演概要, 85 (2009), pp.60-61
- 21) 張ら: 講演概要, 85 (2009), pp.66-67
- 22) D.Y. Yan et al.: Proceedings of the International Symposium on Visualization in Joining & Welding Science through Advanced Measurements and Simulation (Visual-JW2010), 1 (2010), pp.75-76
- 23) Y. Li et al.: Proc. Visual-JW2010, 1 (2010), pp.89-90
- 24) K. Ogawa et al.: Proc. Visual-JW2010, 1 (2010), pp.95-96
- 25) R. Thater et al.: Proc. Visual-JW2010, 1 (2010), pp.245-246
- 26) A. M. A. Pazooki et al.: Mathematical Modelling of Weld Phenomena 9 (MMWP9), (2010), pp.391-414
- 27) M. Jary et al.: MMWP9, (2010), pp.427-443
- 28) S. W. Wen et al.: MMWP9, (2010), pp.579-610
- 29) E. Ranjbarnodeh et al.: MMWP9, (2010), pp.637-650
- 30) M. Urner et al.: MMWP9, (2010), pp.667-674
- 31) M. Rahman et al.: MMWP8, (2010), pp.863-882
- 32) 宇田川ら: 論文集, 28-3 (2010), pp.261-271
- 33) 伊藤ら: 講演概要, 85 (2009), pp.74-75
- 34) 伊藤ら: 講演概要, 86 (2010), pp.202-203
- 35) 中谷ら: 講演概要, 85 (2009), pp.80-81
- 36) 柳田ら: 講演概要, 87 (2010), pp.56-57
- 37) 福谷ら: 講演概要, 87 (2010), pp.70-71
- 38) S. Courtin et al.: MMWP9, (2010), pp.651-665
- 39) Y. Mikami et al.: 論文集, 27-2 (2009), pp.235s-239s
- 40) 金ら: 論文集, 28-3 (2010), pp.281-287
- 41)

- 42) Y. C. Kim et al.: Proc. Visual-JW2010, 1 (2010), pp.87-88
- 43) 伊與田ら: 講演概要, 84 (2009), pp.40-41
- 44) 西川ら: 講演概要, 87 (2010), pp.58-59
- 45) M. Nawafune et al.: Proc. Visual-JW2010, 1 (2010), pp.77-78
- 46) X. Yang et al.: Proc. Visual-JW2010, 1 (2010), pp.79-80
- 47) 岡野ら: 論文集, 28-3 (2010), pp.272-280
- 48) 岡野ら: 講演概要, 85 (2009), pp.68-69
- 49) M. Mochizuki et al.: MMWP9, (2010), pp.551-578
- 50) 上玉利ら: 講演概要, 85 (2009), pp.62-63
- 51) 津乗ら: 講演概要, 85 (2009), pp.70-71
- 52) 高倉ら: 講演概要, 85 (2009), pp.78-79
- 53) 李ら: 講演概要, 86 (2010), pp.162-163
- 54) 金ら: 講演概要, 87 (2010), pp.34-35
- 55) Y. Wang et al.: Proc. Visual-JW2010, 1 (2010), pp.101-102
- 56) T. Loose et al.: MMWP9, (2010), pp.369-390
- 57) T. Schenk et al.: MMWP9, (2010), pp.675-698
- 58) 生島ら: 講演概要, 85 (2009), pp.72-73
- 59) 生島ら: 講演概要, 86 (2010), pp.160-161
- 60) 南ら: 講演概要, 86 (2010), pp.162-163
- 61) 壺井ら: 講演概要, 87 (2010), pp.76-77
- 62) 生島ら: 講演概要, 87 (2010), pp.78-79
- 63) K. Ikushima et al.: MMWP9, (2010), pp.941-954
- 64) 堀ら: 講演概要, 85 (2009), pp.52-53
- 65) 堀ら: 講演概要, 87 (2009), pp.72-73
- 66) T. Hori et al.: MMWP9, (2010), pp.967-981
- 67) N. Tanaka et al.: Proc. Visual-JW2010, 1 (2010), pp.97-98
- 68) L. Zhang et al.: Proc. Visual-JW2010, 1 (2010), pp.205-206
- 69) X. Zhang et al.: Proc. Visual-JW2010, 1 (2010), pp.91-92
- 70) K. Zhang et al.: Proc. Visual-JW2010, 1 (2010), pp.93-94
- 71) H. Huang et al.: Proc. Visual-JW2010, 1 (2010), pp.103-104
- 72) T. Schenk et al.: MMWP9, (2010), pp.523-549
- 73) S. W. Wen et al.: MMWP9, (2010), pp.611-636
- 74) 池崎ら: 講演概要, 87 (2010), pp.44-45
- 75) 山田ら: 講演概要, 87 (2010), pp.46-47
- 76) A. Vega et al.: Proc. Visual-JW2010, 1 (2010), pp.99-100
- 77) H. Zhao et al.: Proc. Visual-JW2010, 1 (2010), pp.117-118
- 78) 村川ら: 講演概要, 85 (2009), pp.64-65
- 79) 村川ら: 講演概要, 86 (2010), pp.156-157
- 80) J. Wang et al.: Proc. Visual-JW2010, 1 (2010), pp.105-106
- 81) H. Murakawa et al.: Proc. Visual-JW2010, 1 (2010), pp.115-116
- 82) D. Deng et al.: Proc. Visual-JW2010, 1 (2010), pp.119-120
- 83) N. Ma et al.: Proc. Visual-JW2010, 1 (2010), pp.121-122
- 84) 望月ら: 講演概要, 84 (2009), pp.26-27
- 85) 伊藤ら: 講演概要, 85 (2009), pp.54-55
- 86) 畑ら: 講演概要, 87 (2010), pp.74-75
- 87) J. Li et al.: Proc. Visual-JW2010, 1 (2010), pp.109-110
- 88) V. Robin et al.: MMWP9, (2010), pp.445-464
- 89) M. F. Zaeh et al.: MMWP9, (2010), pp.855-862
- 90) J. A. G. Guijarro et al.: MMWP9, (2010), pp.465-481
- 91) A. Prihodovsky et al.: MMWP9, (2010), pp.493-522
- 92) 中長ら: 論文集, 27-1 (2009), pp.104-113
- 93) 中長ら: 論文集, 27-4 (2009), pp.297-306
- 94) 小川ら: 論文集, 28-2 (2010), pp.208-215
- 95) 中長ら: 講演概要, 87 (2010), pp.64-65
- 96) 中長ら: 講演概要, 87 (2010), pp.66-67
- 97) A. Maekawa et al.: Proc. Visual-JW2010, 1 (2010), pp.85-86
- 98) C. E. Truman et al.: Proc. Visual-JW2010, 1 (2010), pp.83-84
- 99) 柴原ら: 論文集, 27-1 (2009), pp.81-88
- 100) 柴原ら: 論文集, 28-1 (2010), pp.108-115
- 101) 恩田ら: 講演概要, 85 (2009), pp.56-57
- 102) 伊藤ら: 講演概要, 86 (2010), pp.158-159
- 103) 恩田ら: 講演概要, 87 (2010), pp.36-37
- 104) 秋山ら: 論文集, 27-1 (2009), pp.61-66
- 105) 秋山ら: 論文集, 27-2 (2009), pp.139-144
- 106) 秋山ら: 論文集, 28-1 (2010), pp.22-27
- 107) 阿部ら: 講演概要, 87 (2010), pp.38-39
- 108) 篠原ら: 講演概要, 87 (2010), pp.40-41
- 109) 太田ら: 論文集, 27-4 (2010), pp.307-315
- 110) 太田ら: 論文集, 27-4 (2010), pp.316-324
- 111) 太田ら: 論文集, 27-4 (2010), pp.325-332
- 112) 太田ら: 論文集, 27-4 (2010), pp.333-342
- 113) 太田ら: 論文集, 27-4 (2010), pp.343-351
- 114) 橋本ら: 講演概要, 87 (2010), pp.50-51
- 115) 橋本ら: 講演概要, 87 (2010), pp.52-53
- 116) 仲村ら: 講演概要, 85 (2009), pp.84-85
- 117) H. Serizawa et al.: MMWP9, (2010), pp.415-425
- 118) 仲村ら: 講演概要, 86 (2010), pp.200-201
- 119) 仲村ら: 講演概要, 87 (2010), pp.54-55
- 120) S. Nakamura et al.: Proc. Visual-JW2010, 1 (2010), pp.249-250
- 121) 曾我部ら: 講演概要, 84 (2009), pp.34-35
- 122) 三上ら: 講演概要, 84 (2009), pp.36-37
- 123) 曾我部ら: 講演概要, 87 (2010), pp.62-63
- 124) Y. Mikami et al.: Proc. Visual-JW2010, 1 (2010), pp.247-248
- 125) Y. Mikami et al.: MMWP9, (2010), pp.699-713
- 126) 若松ら: 講演概要, 84 (2009), pp.24-25
- 127) 成願ら: 講演概要, 85 (2009), pp.58-59
- 128) 柴原ら: 論文集, 27-1 (2009), pp.73-80
- 129) 柴原ら: 論文集, 27-1 (2009), pp.81-88
- 130) 上野ら: 論文集, 28-4 (2010), pp.436-442
- 131) 有村ら: 講演概要, 86 (2010), pp.164-165
- 132) J. M. Drezet et al.: MMWP9, (2010), pp.997-1010
- 133) M. Gebhardt et al.: MMWP9, (2010), pp.1011-1033
- 134) H. Neumann et al.: MMWP9, (2010), pp.1035-1044
- 135) H. Murakawa et al.: Proceedings of International Symposium on the Ageing Management & Maintenance of Nuclear Power Plants (ISAg2010), (2011), pp.221-229
- 136) <http://www.jwri.osaka-u.ac.jp/iwe/IWE.PDF>