

数値解析を活用した破損事故解析の高度化に関する研究

Advanced failure accident analysis by use of numerical analysis.

山際謙太*1, 山口篤志*1, 本田尚*1, 佐々木哲也*1

機械システム安全研究グループ*1

■YAMAGIWA Kenta, YAMAGUCHI Atsushi, HONDA Takashi, SASAKI Tetsuya

近年の災害調査の傾向として、災害発生前に作用した応力などを推定するという量的な調査結果が求められている。第13次労働災害防止計画においても「科学的根拠、国際動向を踏まえた施策推進等」と記載されているように、量的なデータを元に災害を調査していくことは、科学技術の発展のみならず行政的には客観性のある基準、規格作りなどを行えるという点で有効である。一方で、クレーンなどの産業機器においては経年機と呼ばれる長期に使用された機械が増加している。こうした機械は設計者が想定していない場所などで腐食または疲労などで破壊することがある。こうした背景の元、本研究では、破損事故解析により定量性を持たせた結論を導けるよう、1)材料破断面の数値解析手法の開発、2)実験力学の援用による数値応力解析の高度化というサブテーマを構成して研究を行った。材料破断面の数値解析手法の開発においては、1)金属破断面データベースの構築と2)ディープラーニングを活用した破断面の自動分類というシステムを開発を行った。これにより破断面解析は解析初心者にはデータベースによる破断面の効率的な検索が可能になり、また、判断の指標として自動分類のシステムを活用することができることになった。従って、従来より効率的かつ定量性のある結論が導けるようになったという点で高度化したと言える。次に、実験力学の援用による数値応力解析の高度化では、デジタル画像相関法と呼ばれる非接触で広範囲の変位分布を取得できる方法を利用して、実荷重を受ける構造物の変形量を取得し、得られた変位情報を有限要素解析に援用することで、構造物に生じる実際の変形を考慮した応力解析を行った。従来から行われてきた荷重の入力のみによる応力解析に比べ、境界条件として実際の変形を考慮して応力解析を行えることが高度化した点として挙げられる。以上のことから、機械構造物の破壊に起因した事故の解析においては、本研究で開発したシステムを元に、技術者の経験に依存していた部分を自動化または定量化していくことができ、破損事故解析は高度化したと言える。

1 研究の背景

近年の事故調査は、特に材料の破壊に起因する事故の場合（以下、破損事故）、事故の前に作用していた応力などの定量値を推定し、その上で再発防止策などを検討することが求められている。例えば第12次労働災害防止計画（以下、12次防）の中においても、重点施策の中で「科学的根拠、国際動向を踏まえた施策推進」と記載されているように、通達・法案なども科学的根拠を持って立案することが必要とされている。第13次労働災害防止計画の中では、8つの重点項目の中の「死亡災害の撲滅を目指した対策の推進」において「製造業における施設、設備、機械等に起因する災害等の防止」とか、「国民全体の安全・健康意識の高揚等」において「科学的根拠、国際動向を踏まえた施策推進等」という記載がなされている。

図1にクレーンと移動式クレーンの死亡災害の発生状況を示す。主にクレーン、移動式クレーンと使用している吊り具の破損などを原因とした事故として「崩壊・倒壊」と「落下」を中心に分析すると、1999年～2019年の間に崩壊・倒壊を原因としては延べ56名（年平均2.8名）が死亡している。落下を原因としては、142名（年平均7.1名）が死亡している。これらの災害については減少していない。また、高度経済成長期に製造されたプラントで使用されている配管、压力容器などは設置後30～40年というものも多い。こうした長期間使用している産業機器を経年機と呼ぶ。そして、経年機の数は国内では増加していることから、事故はクレーンに限らず増える可能性がある。

こうした破壊、損傷に対する科学的根拠に基づいた説明が求められているという背景のもと、山際らは特定の破壊機構における破断面の数値解析手法により応力を推定する手法などの開発^{1) 2)}、配管に生じる減肉部の形状評価³⁾など損傷部の評価についての研究を行ってきた。また、山口らは減肉配管の有限要素解析と破裂試験などを

*1 労働安全衛生総合研究所 機械システム安全研究グループ
連絡先：〒204-0024 東京都清瀬市梅園 1-4-6
労働安全衛生総合研究所 機械システム安全研究グループ 山際謙太
E-mail: yamagiwa@s.jniosh.johas.go.jp

実施し、残存強度について評価⁴⁾している。

しかしながら、現在でも破断面解析であれば、未だに推定することが困難である応力などがある。また、事故を起こした機器の応力状態を把握するために実施する有限要素解析は1)モデル化に時間を必要とする、2)事故直前の状態が不明であるため、境界条件が限定しきれないなどの問題点が残っている。その一方で画像相関を利用した変位計測法(Digital Image Correlation: DIC)なども近年は盛んに行われている。

定量性を持った調査を実施するために、新しい数値解析手法や新しい計測方法を導入する事で、破損事故解析をより高度にすることが望まれている。

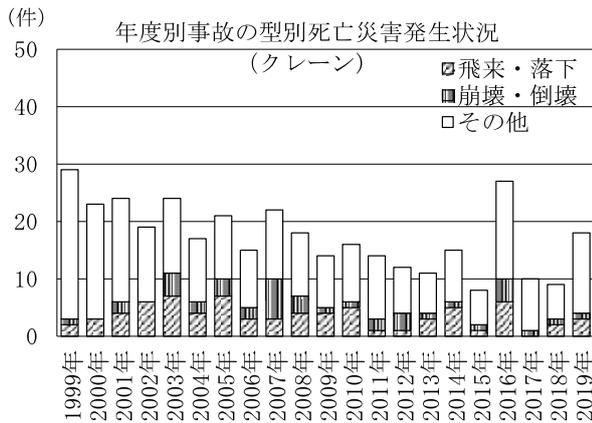


図1 クレーン等の事故による年間死亡者数

現在のところ、破損事故の解析については、図2に示すようなフローチャートにより実施されている。

こうした調査の中で特に高度な調査が期待できる領域は、フラクトグラフィ、応力解析と再現実験の領域である。このことから、本研究では2本のサブテーマを実施する。

I. 材料破断面の数値解析手法の開発

II. 実験力学の援用による数値応力解析の高度化

Iはフラクトグラフィに関連したサブテーマである。フラクトグラフィは破断面の模様から破壊機構または亀裂の進展の様子などを推定する手法であるが、観察者の経験などに依存して解析する部分が多い。結果として導

かれる結論は観察者に依存し、定量性に欠けている。本サブテーマでは、この点について定量化された手法を開発することで高度化を押し進める。



図2 破損事故発生から原因推定までのフロー

IIは応力解析および再現実験に関連したサブテーマである。応力解析の中でも特に有限要素解析(FEM)は、モデル及び境界条件の設定により結果が大きく異なることがある。一方でこれらの設定の仕方は技術者の意思または計算資源などに左右されてくる。また、実験データと解析結果を組み合わせた検証と妥当性の評価(V&V)についても考慮していく必要がある。本サブテーマでは産業機器の応力解析を行う上で、実験データとの整合性を取れるように実験データと有限要素解析を組み合わせたモデル及び境界条件を設定するフレームワークの構築を目指す。

2 研究の概要

1) 材料破断面の数値解析手法の開発

フラクトグラフィでは大きく2種類の手法がある。

- ① 破断面の模様を観察して破壊機構を推定する手法 (定性的解析)
- ② 1により推定された破壊機構を元に、破断面の形状、模様のおおきさなどから作用した応力、繰り返し数または亀裂進展速度などを推定する手法 (定量的解析)

どちらの手法においても破壊機構の推定が最初であり、観察により破壊機構などを推定するところが結果の導出に重要な役割を果たしている。

一方で、観察には経験が必要であるが、観察に熟練した技術者の数は年々減少している。従って、解析初心者に対するサポートが必要となっている。こうした背景の中、本テーマでは次のシステムの開発を行った。

- (1) 金属破断面データベースの構築
- (2) ディープラーニングを活用した破断面の自動分類

金属破断面データベースは、破断面の図鑑のような仕組みである。破断面の画像と観察するポイントなどをデータシートの形式の取りまとめた。これをインターネット上で公開することで、ブラウザ上で閲覧することを可能にした。観察するポイントなどをまとめることで、

観察者の知見などが電子化かつ保存されることで知識が溜まっていく。その上で観察初心者はそれを検索などしながら読むことができ、知識伝承を補助する役割をこのデータベースは担っている。

ディープラーニングを活用した破断面の自動分類については、観察者が破壊機構推定を行う作業を自動化する仕組みである。破壊機構を推定する際に、図鑑もしくは前述のデータベースで類似した材料または破壊機構の破断面写真を見ながら観察者は自身が観察している破断面と見比べての破壊機構を推定していく。本システムはディープラーニングを活用してその見比べて推定していく作業を数値解析に置換するシステムである。

2) 実験力学の援用による数値応力解析の高度化

産業機械の破損による災害の原因究明において、有限要素解析などの数値解析は、破損原因となった箇所を視覚的に捉えることが可能であり、破損原因の究明に貢献している。しかし、有限要素解析は解析モデル作成に多大な労力と時間が必要なだけでなく、実構造物の応力分布を得るために、実荷重や変位境界条件を適切に決定することは困難である。適切な変位境界条件を設定するためには、実験力学で得られた構造物の変形または応力状態と数値解析により得られた変形または応力状態を照らし合わせていく必要がある。

そこで、本テーマでは、デジタル画像相関法とよばれる構造物などの変形を非接触かつ広範囲に計測可能な方法に注目した。デジタル画像相関法は、変形前後のデジタル画像の変化から、変位量およびひずみ量が計測される方法であり、測定対象部の変形量に対して、ランダムパターンのサイズやサブセットサイズなどといった計測条件を設定する必要がある。実験力学試験を行うことで、これら計測条件が測定精度に大きく影響を及ぼすことが明らかとなったが、一方で、適切な計測条件を設定できれば、ひずみゲージにより計測されたひずみ量と同等の精度で計測ができることを明らかにした。これまで実験力学における構造物の変位やひずみ測定には、ひずみゲージを貼付する方法が広く行われてきているが、貼付した箇所、いわゆる局所的な箇所の計測しか行えない。一方、デジタル画像相関法では、測定対象部の画像があれば、測定範囲においては3次元的にひずみ量を取得できることから、デジタル画像相関法を用いることで、実験力学における変位量およびひずみ量の計測において高度化が図れた。

次に、本テーマでは、実構造物を使用されている状態の変位分布をデジタル画像相関法により計測し、得られた変位分布を有限要素解析に援用することで、実構造物に発生する応力を評価した。使用した実構造物は脚立と天井クレーンであり、計測箇所は構造物の一部分である。それぞれ、作業者が脚立を使用した状態、天井クレーンが荷を吊り上げた状態の変位分布をデジタル画像相関法で計測し、さらに得られた変位分布を有限要素解析に援用して、応力分布を計算した。本テーマでは、有限要素

解析においては簡易モデルで検証したが、実構造物を使用されている状態の変位分布を利用した応力解析を行うことによって、得られる応力分布には妥当性があり、ひいては危険部位の推定ができることを確認した。本テーマで得られた解析結果は、従来から行われてきた荷重の入力のみによる応力解析に比べ、境界条件として実際の変形を考慮した応力解析を行えることが高度化した点として挙げられる。このような、実験力学と数値解析を組みあせた応力評価方法は、設計時における応力評価の精度向上や実働荷重作用時の応力評価、さらには災害の予防や災害原因究明に伴う再発防止に貢献できると考えられる。

3 今後の課題

サブテーマ「材料破断面の数値解析手法の開発」の中で開発された金属破断面データベースについては、データのさらなる拡充が求められる。実機の破断面については、必ず公開の是非が付き纏うため多くのデータシートを掲載できないが、積み重ねていく必要がある。またディープラーニングの活用であるが、2020年現在、横浜国立大学において「フラクトグラフィとディープラーニングの融合研究コンソーシアム(FraD)」という研究コンソーシアムを立ち上げ、開発したソフトウェアのさらなる充実とデータの収集を行っている。破断面に対するディープラーニングの応用はまだ始まったばかりであり、例えば起点推定用のシステムなど様々な応用先がある。こうした活動を通じて本システムの拡充を行う予定である。

サブテーマ「実験力学の援用による数値応力解析の高度化」では、実験力学と数値解析を組み合わせることで、変形を考慮した応力解析を行えることを示した。本テーマでは2次元要素を用いたFE解析を主に行っているが、3次元要素のみを用いたFE解析を行うことで、評価対象物の内部応力状態が得られることができ、これは今後の課題である。また、実験力学においては、き裂発生のおよびき裂進展速度の評価も盛んに行われている。き裂発生およびき裂進展は、破損事故解析における破壊の過程として評価できる。今後は、実験力学において、き裂発生およびき裂進展速度の評価を行い、得られた結果を数値応力解析に援用することで、残存強度評価や交換時期の予測評価について検討していくとともに、破損事故解析におけるこれまでの成果をさらに発展させていく。

参考文献

- 1) 山際謙太, 高梨正祐, 泉聡志, 酒井信介(2005), 二次元局所Hurst数を利用した破面特性化手法とストレッチゾーン幅の定量解析への応用, 日本機械学会論文集 A編, Vol. 71, No. 705, pp. 749-754, 2005.

- 2) Kenta Yamagiwa, Testuya Sasaki(2012), "Estimation of Stress Ratio from Striation Observed Fatigue Fracture Surface using Frequency Analysis", Fifth International Conference on Engineering Failure Analysis (ICEFA V), The Hague.
- 3) 山際謙太(2014), フラクタルの概念に基づいた配管外部減肉部と減肉模擬剤の三次元形状定量評価, ボイラ研究, 第 388, pp. 16-24.
- 4) 山口篤志, 吉田展之, 戒田拓洋(2014), API579-1/ASME FFS-1 供用適性評価による模擬腐食配管の残存強度評価, ボイラ研究, Vol. 52, No. 2, pp. 72-80.

研究業績リスト

課題名：数値解析を活用した破損事故解析の高度化

平成28年度（2016年）		
1	原著論文	Masayuki KAMAYA, Keiji KUBUSHIRO, Yohei SAKAKIBARA, Seichi SUZUKI, Hirobumi MORITA, Rika YODA, Daisuke KOBAYASHI, Kenta YAMAGIWA, Tomoya NISHIOKA, Yasuhiro YAMAZAKI, Yasuhiro KAMADA, Takeshi HANADA and Toshihiro OHTANI, (2016) Round robin crystal orientation measurement using EBSD for damage assessment. Mechanical Engineering Journal, Vol.3, No.3, pp. 16-00077.
2	原著論文	Kenta Yamagiwa (2016) THREE-DIMENSIONAL ANALYSIS OF CORROSION SURFACE ON OUTER SURFACE OF PIPING BY USE OF FRACTAL CONCEPT. 2016 ASME Pressure Vessels and Piping Division Conference, Proceedings of PVP2016.
3	国際学術集会	Kenta Yamagiwa (2016) Failure analysis of carbon fiber pendant rope. Seventh International Conference on Engineering Failure Analysis.
4	国際学術集会	Kenta Yamagiwa(2017) Method to obtain 3D geometry of fracture surface, 16th Holistic Structural Integrity Process (HOLSIP16).
5	特別講演, パネルディスカッションなど	Tetsuya Sasaki (2016) Occupational Safety and Health Research in the Society of Decreasing Birth Rate and Aging Population. International Workshop on Industrial Safety and Health 2016 (IWISH2016) , p. 17.
6	総説他	吉川直孝, 堀智仁, 山際謙太, 高梨成次, 伊藤和也(2016) トンネル建設工事における労働災害の各種発生要因 および安全対策に関する検討. 建設業安全衛生年鑑(平成28年版), p. 96.
7	総説他	山際謙太, 浅野拓也(2016) 天井クレーン用エキスパート操作支援装置. クレーン, Vol.54, No.631, pp. 10-16.
8	総説他	山際謙太(2016) 炭素繊維ペンダントロープの歪み計測. クレーン, Vol.54, No.626, pp. 10-15.
9	総説他	山際謙太(2016) 破断面解析支援データベースの試作. クレーン, Vol.54, No.627, pp. 19-26.
10	総説他	山際謙太(2017) もう一度確認したいはしごの安全性. クレーン, Vol.55, No.634, pp. 43-45.
11	総説他	谷口 運, 山際謙太(2017) ワイヤロープ技術発展の系統化調査の報告(2). クレーン, Vol.55, No.636, pp. 11-20.
12	国内学術集会	本田尚, 山口篤志, 山際謙太, 佐々木哲也(2016) クレーン用ワイヤロープの疲労寿命に及ぼす影響因子の検討. 第49回安全工学研究発表会, 講演予稿集, pp. 173-176.
13	国内学術集会	本田尚, 山口篤志, 山際謙太, 佐々木哲也(2016) クレーン用ワイヤロープのS字曲げ疲労寿命に及ぼすD/dの影響. 平成28年度資源・素材関係学協会合同秋季大会, 予稿集, CD-ROM.
平成29年度（2017年）		
	国際学術集会	Kenta Yamagiwa(2017) Introduction Of Effort About Construction For Fractography Database In Japan. ICF14.
	国際学術集会	Atsushi Yamaguchi (2017) Investigation of burst pressure in T-Joints with wall-thinning by using FEA. ASME Pressure Vessels and Piping conference 2017, pp. PVP2017-66127(CD-ROM)
	国際学術集会	Kenta Yamagiwa(2018) Challenge of the automatic classification of fracture surface by using deep learning. 17th Holistic Structural Integrity Process (HOLSIP) .
	総説他	谷口 運, 山際謙太(2017) ワイヤロープ技術発展の系統化調査の報告(3). クレーン, Vol.55, No.637, pp. 11-22.
	総説他	谷口 運, 山際謙太(2017) ワイヤロープ技術発展の系統化調査の報告(4). クレーン, Vol.55, No.638, pp. 11-20.
	総説他	谷口 運, 山際謙太(2017) ワイヤロープ技術発展の系統化調査の報告(5). クレーン, Vol.55, No.639, pp. 11-22.
	総説他	谷口 運, 山際謙太(2017) ワイヤロープ技術発展の系統化調査の報告(6). クレーン, Vol.55, No.640, pp. 4-15.
	総説他	山際謙太(2017) 月刊誌クレーン編集委員長就任と委員会活動. クレーン, Vol.55, No.641, p. 1.

	総説他	山際謙太(2017) 特集記事の掲載にあたって. クレーン, Vol.55, No.641, p. 21.
	総説他	谷口 運, 山際謙太(2017) ワイヤロープ技術発展の系統化調査の報告(7). クレーン, Vol.55, No.641, pp. 4-16.
	総説他	谷口 運, 山際謙太(2017) ワイヤロープ技術発展の系統化調査の報告(8). クレーン, Vol.55, No.642, pp. 4-12.
	総説他	山際謙太, 山口篤志(2017) 玉掛け用ベルトスリングの破断試験. クレーン, Vol.55, No.642, pp. 21-27.
	総説他	谷口 運, 山際謙太(2017) ワイヤロープ技術発展の系統化調査の報告(9). クレーン, Vol.55, No.643, pp. 4-11.
	総説他	谷口 運, 山際謙太(2017) ワイヤロープ技術発展の系統化調査の報告(10). クレーン, Vol.55, No.644, pp. 4-12.
	総説他	谷口 運, 山際謙太(2017) ワイヤロープ技術発展の系統化調査の報告(11). クレーン, Vol.55, No.645, pp. 4-11.
	総説他	谷口運, 山際謙太(2018) ワイヤロープ 技術発展の系統化調査の報告(12). クレーン, Vol.56, No.646, pp. 4-10.
	総説他	山際謙太(2017) "つり具 べからず集". 安全衛生のひろば, 平成29年7月号. Vol.58, No.7, pp. 9-19.
	特別講演, パネルディスカッションなど	佐々木哲也(2017) クレーン分野における信頼性評価の導入と展開. 日本機械学会 2017 年度年次大会, 先端技術フォーラム, DVD.
	国内学術集会	吉田展之, 山口篤志 (2017) 外面減肉配管の破裂試験によるFFS評価精度の検証. 溶接構造シンポジウム.
	国内規格などの発行協力	JIS B 9955:2017 機械製品の信頼性に関する一般原則 制定.
平成30年度 (2018年)		
	国際学術集会	Kenta Yamagiwa(2018) Application of deep learning for automatic classification of fracture surface's SEM Image. ICEFA8.
	国際学術集会	Atsushi YAMAGUCHI(2018) Evaluation for remaining strength of pipes with wall thinning by FFS assessment. Eighth International Conference on Engineering Failure Analysis.
	国際学術集会	Atsushi Yamaguchi, Nobuyuki Yoshida(2018) EVALUATION OF STRENGTH OF PIPE WITH METAL-LOSS DUE TO CUI BY FFS AND FEA WHICH CONSIDERED THE FRACTURE DUCTILITY. ASME Pressure Vessels and Piping conference, CD-ROM, PVP2018-84741, pp. 1-6.
	特別講演, パネルディスカッションなど	酒井信介, 岩崎篤, 佐々木哲也, 宮崎信弥, 石崎陽一(2018) 局部減肉健全性評価の信頼性工学的取扱い. 安全工学シンポジウム2018パネルディスカッション, 講演予稿集, pp. 14-17.
	国内学術集会	酒井信介, 岩崎 篤, 佐々木哲也, 宮崎信弥, 石崎陽一(2018) 局部減肉信頼性管理のための部分安全係数表の 作成. 日本高圧力技術協会平成30年度春季講演会.
	国内学術集会	佐々木哲也(2018) 移動式クレーン限界状態設計規格の現状. 安全工学シンポジウム 2018, 講演予稿集, pp. 22-23.
	国内学術集会	本田尚, 山口篤志, 山際謙太, 佐々木哲也(2018) クレーン用ワイヤロープの疲労寿命に及ぼす曲げ方式の影響. 安全工学シンポジウム2018, 講演予稿集, pp. 364-365.
	国内学術集会	大口浩平, 山口篤志, 山際謙太, 佐々木哲也, 辻裕一(2018) デジタル画像相関法におけるキャリブレーション枚数が及ぼす変位測定精度への影響. 第51回安全工学研究発表会講演予稿集, pp. 79-82.
	国内学術集会	山口篤志(2018) 供用適性評価による矩形減肉配管の運転圧力の評価. 第51回安全工学研究発表会講演予稿集, pp. 209-210.
	国内学術集会	本田尚, 山口篤志, 山際謙太, 佐々木哲也(2018) クレーン用ワイヤロープの疲労寿命に影響

		する因子と疲労 寿命評価法の検討. 資源・素材2018, 大会プログラム・要旨集, p. 112.
	国内規格などの発行協力	平成30年3月1日施行 クレーン又は移動式クレーンの過負荷防止装置構造規格の一部改正(つり上げ荷重3トン未満の移動式クレーン等の過負荷防止装置について) (平成30年2月26日基発0226第1号) .
	国内規格などの発行協力	平成30年3月1日施行 移動式クレーン構造規格の一部改正(限界状態設計法の追加) (平成30年2月26日基発0226第1号) .
	国内規格などの発行協力	日本機械学会基準JSME S 018-2018 部分安全係数法を用いた機械製品の信頼性評価に関する指針 制定.
平成31年度 (2019年)		
	原著論文	酒井信介,岩崎篤,佐々木哲也,宮崎信弥,石崎陽一,戒田拓洋 (2019) 局部減肉信頼性管理のための部分安全係数表の作成.圧力技術,Vol.57,No.2,pp.66-72.
	原著論文	山口篤志, 岡部康平, 池田博康 (2019) 有限要素解析を利用した人工前腕骨の曲げ強度評価の検討. 労働安全衛生研究,Vol.12, No.2, pp. 87-93.
	国際学術集会	Kenta Yamagiwa(2020), Development of Artificial Intelligence (AI) for fractography, 19th International Workshop on the Holistic Structural Integrity Process.
	総説他	山際謙太 (2019) 平成30年台風21号におけるクレーン等に発生した被害の概要.クレーン,Vol.57, No.661, pp.16-19.
	総説他	山際謙太 (2019) ワイヤロープ委員会委員長に就任して.クレーン, Vol.57, No.665, p.1.
	総説他	山際謙太 (2019) 金属も疲労する 予測できる疲労、できない疲労.安全と健康, Vol.20, No. 11, pp.1063-1067.
	特別講演, パネルディスカッションなど	山口篤志(2019)外面減肉に対する供用適性評価の適用. 第10回3DFFS技術フォーラム, 第10回3DFFS技術フォーラム資料.
	特別講演, パネルディスカッションなど	山際謙太(2019) フラクトグラフィデータベース終了報告. フラクトグラフィ部門委員会, 特別講演.
	国内学術集会	山口篤志 (2019) 外面減肉を有する T 継手配管への供用適性評価の適用. 安全工学シンポジウム2019, 講演予稿集, 講演番号1059, p1-4.
	国内学術集会	大口浩平, 山口篤志, 山際謙太, 佐々木哲也, 辻裕一(2019) デジタル画像相関法における変位測定に対する最適な校正枚数の検討. 計測自動制御学会システム情報部門学術講演会2019, 講演論文集, CD-ROM.
	国内学術集会	大口浩平, 山口篤志, 山際謙太, 佐々木哲也, 辻裕一(2019) デジタル画像相関法による溶接継手の疲労 発生寿命の推定. 第52回安全工学研究発表会, pp115-118.
	国内学術集会	山口篤志, 本田尚(2019) FE解析による局所的な減肉を有する配管の破裂圧力評価. 計測自動制御学会システム情報部門学術講演会2019, 講演論文集, CD-ROM.
	国内学術集会	山口篤志(2019) 有孔板の疲労強度に及ぼす split sleeve cold expansion の効果. 第52回安全工学研究発表会, pp.113-114.