

## 1 研究課題名

機械事故鑑定のための有限要素法を用いた数値解析技術実用化の研究

## 2 研究担当者

主担当者氏名 安野 拓也 法科学第二部機械研究室  
他研究員 4名

## 3 研究期間

平成26年4月～平成29年3月（3年計画）

## 4 研究予算

平成26年度 31,226千円

平成27年度 29,645千円

平成28年度 8,205千円

## 5 研究の目的

東日本大震災のコスモ石油千葉製油所のガスタンク爆発・炎上事故や建設用クレーンの倒壊、化学プラントにおける破壊事故、ジェットコースターのアクスルボルトの破断事故など、大規模あるいは複雑な機械構造物・機械部品の事故が多発している。これらの鑑定を正確に行うためには再現実験が望ましいが、期間と費用の観点から不可能な場合が多い。これらの代替技術として、大規模あるいは複雑な機械構造物・機械部品などのものづくりで必須のアイテムとなっている有限要素法を用いた構造解析技術の適用が考えられ、再現実験に代替し得る手段として、この有限要素法による数値解析技術を鑑定に導入するための研究を進めることが必要となる。そこで、複雑な機械事故における鑑定の高度化と効率化を目的として、有限要素法を用いた数値解析技術の鑑定への適用を目標に研究を行った。

## 6 成果

### (1) 当初予定していた成果

疲労き裂進展試験のためにCT試験片により開口変位計を用いてき裂進展量を計測する実験を行った。実験に供した試料は、引張強度レベルが2.1GPa級の超高張力鋼であり、0～6.5kNの片振りの引張荷重を周波数10Hzで負荷した。その結果、き裂発生からの繰り返し数が11,210回、き裂進展量が22mmで急速破壊した。また、二次元汎用有限要素解析ソフト「ANSYS」を用いて、CT試験片の静的応力解析を行った。解析は、線形-弾性-等方性解析とし、四辺形8節点・節点間距離0.5mmで要素分割し、拘束条件及び荷重負荷形態などの境界条件を変化させて解析を行った。その結果、CT試験片の上

部ピン穴の内径節点を全自由度拘束、下部ピン穴の下側半円の外周ラインに0~6.5kNの繰り返し引張荷重を負荷する境界条件において、疲労き裂進展試験と同様な挙動を示すことが明らかとなった。さらに、これらの二次元の解析結果と同様の境界条件を用いて、三次元での疲労き裂進展解析を行った。解析は、疲労パリス則を用い、疲労き裂進展試験の結果から得られたき裂進展曲線からパリス則の定数を求め、初期き裂2mm、初期き裂前縁にチューブ状の六面体要素を設定し、き裂の前縁が0.5mm進展する毎に有限要素解析を行うプログラムで解析を行った。その結果、繰り返し数が10,267回、き裂進展量が19mmで計算が終了となり、繰り返し数-き裂進展量の関係から実験結果に近い解析結果が得られた。

次に、さらに解析の精度を高めるために疲労寿命解析のパラメーターとして必要となる疲労(S-N)曲線を取得し、得られた種々のパラメーターを使用して三次元の疲労寿命解析と疲労き裂進展解析を行った。最初に丸棒試験片による疲労試験を行った。実験に使用した試料は、前述のように引張強度レベルが2.1GPa級の超高張力鋼であり、片振りの引張荷重(応力比=0)を周波数10Hzで負荷した。疲労試験の結果として、応力振幅500~800MPaでS-N曲線が得られ、疲労強度は570MPaであり、繰り返し数は10<sup>7</sup>回以下で破断することが判明した。これらの実験により得られた結果を使用して、疲労解析ソルバー「FINAS/Fatigue」を用いて、CT試験片の疲労き裂発生までの疲労寿命解析を行った。解析は、実験によるS-N曲線のデータからマイナー則を用い、先に述べた境界条件で行った。解析の結果、発生応力と累積疲れ係数の最大値及び疲労寿命の最小値は、いずれもCT試験片の切欠き先端部であり、疲労寿命は1,735回であった。さらに、三次元き裂進展解析ソルバー「FINAS/CRACK」を用いて、CT試験片の疲労き裂進展解析を行った。解析条件は、疲労寿命解析により疲労寿命が最小値となる節点、つまり疲労き裂が発生する節点に初期き裂となる六面体要素を設定し、き裂前縁が0.5mm進展する毎に有限要素解析を行うプログラムで解析を行った。その結果として、繰り返し数が11,126回、き裂進展量が20.7mmで計算が終了となり、繰り返し数-き裂進展量の関係から実験結果と解析結果がほぼ一致することが明らかとなった。

CT試験片による繰り返し数-き裂進展量において、実験結果と有限要素法による解析結果がほぼ一致することが判明したため、疲労解析のパラメーターが取得された超高張力鋼について、実際に発生したジェットコースターのアクスルボルト破断事故を模擬した試験体による疲労試験と有限要素法による疲労破壊解析を行った。実験は、ネジ穴付きL型治具を作製し、直径6mmのボルトを締結させた試験体により疲労試験を行った。実験に供した試料は、先に述べた超高張力鋼のL型治具とボルトであり、ボルト頭部上面の全長6mmに渡って下向きの荷重600Nを周波数5Hzで繰り返し負荷した。疲労試験の結果として、繰り返し数が36,334回でL型治具とボルトの締結部のネジ谷底において破断した。走査型電子顕微鏡による破面観察の結果から疲労き裂長さは約2.5mmであった。次に「FINAS/Fatigue」によりボルトの疲労き裂発生までの疲労寿

命解析を行った。解析は、実際の疲労試験において油圧チャックにより噛み込んだL型治具の下側を全自由度拘束、ボルト頭部上面全体に下向きの等分布荷重として600Nを繰り返し負荷する境界条件で行った。解析の結果、累積疲れ係数の最大値及び疲労寿命の最小値は、L型治具とボルトの締結部のネジ谷底であり疲労寿命は360回となった。さらに「FINAS/CRACK」を用いてボルトの疲労き裂進展解析を行った。解析条件は、疲労寿命解析により疲労寿命が最小値となるL型治具とボルトの締結部のネジ谷底に相当する位置に0.5mmの初期き裂となる六面体要素を設定し、き裂前縁が0.1mm進展する毎に有限要素解析を行うプログラムで解析した。解析の結果、繰り返し数が36,215回、き裂進展量が3.28mmで計算が終了となり、破断までの繰り返し数が実験結果と解析結果ではほぼ一致することが判明した。

以上の結果より、特性の条件下の金属疲労破壊において、対象となる金属材料の疲労解析パラメーターなどの材料データが高い信頼性で取得されていれば、有限要素法により高精度な疲労破壊解析が可能であると考えられる。

## (2) 当初予定していなかったが副次的に（あるいは発展的に）得られた成果

本研究により導入された有限要素解析システムは、プリ・ポストプロセッサ(FEMAP)、非線形構造解析システム(FINAS/STAR)、疲労解析ソルバー(FINAS/Fatigue)、き裂進展解析ソルバー(FINAS/CRACK)で構成された疲労破壊解析用のものであった。しかし、プリ・ポストプロセッサと非線形構造解析システムは、塑性加工における変形解析や数値流体解析にも適用可能であり、撃ち殻薬きょうの変形解析や飛翔弾丸の表面状態の計測結果からの数値解析においても使用され、それぞれのテーマにて国内外の学会で発表を行った。

## (3) 当初想定していたが得られなかった成果

当初は、解析で必要となるパラメーターを実験により正確に取得し、対象物のモデリングや解析における境界条件等を最適化すれば疲労破壊に至るき裂進展量も実験結果と解析結果ではほぼ一致するものと考えていたが、き裂進展中に急速破壊が発生する破壊靱性値がソフトウェアに導入されていないために一致しなかった。さらに、当初は正負の繰り返し負荷(応力比=-1)での実験と解析を想定していたが、ソフトウェアが片振り(応力比=0)のみの対応であったために限定された負荷条件での実験と解析となってしまった。

## 7 成果の発表

### (1) 学会における口頭発表 (Oral presentation at the academic meeting and conference)

- 1) 有限要素法による超高張力鋼の疲労き裂進展解析, 安野拓也, 石井将人, 仁戸部勤, 新井裕之, 飯塚正美, 日本法科学技術学会第21回学術集会, 要旨集, 138(2015)

- 2) 有限要素法による2.1GPa級マルエージ鋼の疲労き裂進展解析, 安野拓也, 石井将人, 仁戸部勤, 新井裕之, 飯塚正美, 日本鉄鋼協会「強度と破壊フォーラム」, 47(2016)
  - 3) 有限要素法による超高張力鋼の疲労解析, 石井将人, 安野拓也, 仁戸部勤, 新井裕之, 飯塚正美, 日本機械学会2016年度年次大会, 論文集, S0400304(2016)
  - 4) アルミナ焼結体の機械的特性と微細構造解析, 安野拓也, 石井将人, 仁戸部勤, 新井裕之, 飯塚正美, 日本機械学会2016年度年次大会, 論文集, S0420104(2016)
  - 5) 有限要素法による2.1GPa級マルエージ鋼の疲労破壊解析, 安野拓也, 石井将人, 仁戸部勤, 新井裕之, 飯塚正美, 日本法科学技術学会第22回学術集会, 要旨集, 115(2016)
  - 6) 有限要素法による超高張力鋼の疲労き裂進展解析, 安野拓也, 石井将人, 仁戸部勤, 新井裕之, 飯塚正美, 日本機械学会第24回機械材料・材料加工技術講演会, 423(2016)
  - 7) 有限要素法によるハイテンボルトの疲労解析, 安野拓也, 石井将人, 新井裕之, 飯塚正美, 日本法科学技術学会第23回学術集会, 要旨集, 96(2017)
- (2) 当初想定していなかったが副次的に（あるいは発展的に）得られた成果による口頭発表
- 1) Pressure/Temperature Measurement of a Free-Flight Object by PSP/TSP, Masato Ishii, Yuki Yamada, Takeshi Miyazaki and Hirotaka Sakaue, AIAA Flight Mechanics Conference(AIAA AVIATION 2014), AIAA Paper 2014-2542(2014)
  - 2) Surface Pressure/Temperature Measurement of Free-Flight Object by Motion-Capturing PSP/TSP, Masato Ishii, Yuki Yamada, Hideki Goya, Takeshi Miyazaki and Hirotaka Sakaue, International Symposium on Space Technology and Science(ISTS 30<sup>th</sup> 2015), Proceedings of 30<sup>th</sup> ISTS 2015-E59(2015)
  - 3) Image Processing Method of Motion-Capturing PSP/TSP for the Measurement of a Free-Flight Object, Masato Ishii, Hideki Goya, Takeshi Miyazaki and Hirotaka Sakaue, 68<sup>th</sup> Annual Meeting of the APS Division of Fluid Dynamics, Bulletin of the American Physical Society, vol.60, 21(2015)
  - 4) Pressure/Temperature Distribution on the Surface of a Free-Flight Object Measured by PSP/TSP, Masato Ishii, Hideki Goya, Takeshi Miyazaki and Hirotaka Sakaue, 54<sup>th</sup> AIAA Aerospace Science Meeting(AIAA Scitech2016), AIAA Paper 2016-2020(2016)
  - 5) Deformation Analysis Based on three-Dimensional Finite Element Method for Firing Pin Impression Shape, T.Nitobe, T.Yasuno and S.Kaneko, 47<sup>th</sup> Annual

Association of Firearm and Tool Mark Examiners Training Seminar  
(AFTE2016)

- 6) 3Dプリンタ造形物の引張強度に対する造形方向の影響, 新井裕之, 安野拓也, 仁戸部勤, 石井将人, 日本法科学技術学会第22回学術集会, 要旨集, 112(2016)
- 7) 有限要素法による打ち殻薬きょう痕跡の変形解析, 仁戸部勤, 安野拓也, 新井裕之, 石井将人, 日本機械学会第24回機械材料・材料加工技術講演会, 201(2016)
- 8) 3Dプリンタ樹脂造形物の強度に及ぼす造形方向と経時変化の影響, 新井裕之, 安野拓也, 仁戸部勤, 石井将人, 第49回安全工学研究発表会, 167-168(2016)
- 9) Surface State Measurement of a Free-Flight Object by Motion-Capturing Method, Masato Ishii, Hiroshi Isokawa, Takeshi Miyazaki and Hiroataka Sakaue, 55<sup>th</sup> AIAA Aerospace Sciences Meeting(AIAA Scitech2017), AIAA Paper 2017-0943(2017)