

FEM 構造解析を正しく行うための基礎知識および解析結果検証方法の習得

○立花健二^{A)}、長谷川達郎^{A)}、後藤伸太郎^{A)}、磯谷俊史^{A)}、小林和宏^{B)}、山口隆正^{B)}
大西崇文^{B)}、叶哲生^{B)}、工藤哲也^{B)}、野田匠利^{B)}、西村良太^{B)}

A) 工学系技術支援室 装置開発技術系

B) 教育・研究技術支援室 装置開発技術系

概要

パソコンの性能向上と3DCAD普及に伴い、FEM構造解析を利用した装置設計を行う機会が増えている。同時に、解析結果を過信した結果、設計ミスによる重大事故発生も懸念されている。FEM構造解析を正しく行うためにはFEM構造解析に関する基礎知識が必須であり、解析結果の妥当性検討などの幅広い知識が必要である。また、近年のFEM構造解析ソフトは、ワンパッケージ化し、ブラックボックス化が進んでいる。このような背景から、今回の研修では、主に以下の3点に取り組んだ。

①FEM構造解析に関する外部の専門家による講習の受講、②解析結果の妥当性検証方法に関する各種実験実習、③FEM構造解析に関する資格（日本機械学会認定 計算力学技術者試験（固体2級））の取得。

1 FEM 構造解析技術の必要性

研修メンバーへのアンケートを行った結果、機器設計にFEM構造解析を利用している者と利用経験のない者がいることがわかった。そこで、FEM構造解析の必要性と活用事例に関連した内容の講義を実施した。また、FEM構造解析が活用されているJAXA宇宙科学研究所を見学した。

1.1 大学の教育研究におけるFEM解析の必要性

大学で研究開発を行う場合のFEM構造解析の必要性を知るため、宇宙物理学および素粒子物理学を研究している研究者による講義を実施した。宇宙物理学の中で、特に衛星搭載機器の設計では重量の制限や打ち上げ後の修理が不可能なことから、FEMによる設計の最適化や検証が重要であると分かった。素粒子物理学においても設計の制約条件を解決するため活用されていることが示された。活発な議論を通じて、FEM構造解析に関する更なる技術・知識向上が必要であると再確認された。

1.2 JAXA宇宙科学研究所 人工衛星振動試験見学

FEM解析を積極的に活用している分野として宇宙科学がある。人工衛星に観測機器を搭載する場合は、打ち上げ後の修理ができないため、打ち上げ前に過酷な試験が行われ、設計の妥当性検討のためにFEM構造解析が活用されている。

我々は、これまで多くの科学衛星を開発・運用してきたJAXA宇宙科学研究所（神奈川県相模原市）を見学した。開発中の小型SAR（合成開口レーダー）衛星の概要およびFEM解析と振動試験に関する説明



図1 宇宙研の研究者・技術者も参加しFEMに関する取り組みや課題が報告された

の後、FEM 構造解析結果の妥当性評価に関する我々の取り組みと課題について活発に議論した（図1）。立ち上げ中の機械工作室を見学し、最新設備に関する説明を受けた（図2）。



図2 立ち上げ中の機械工作室の見学



図3 M-V(ミューファイブ) ロケットと参加者

その後、実際の振動試験を見学した（振動試験の様子は、非公開のため写真など撮影できなかった）。振動試験は、実際の衛星を模擬したB B M（breadboard model）に多数の加速度センサーを取り付けて行われた。衛星のモデルに正弦波振動を加えて共振周波数などを調べるのであるが、複雑な構造の衛星であるため、加速度センサーの取付けにも経験が必要である。FEM 構造解析結果の妥当性を評価する事は、想像以上に難しいことが分かった。

2 FEM 解析の原理の学習

2.1 外部講習の受講

計算力学技術者試験（固体2級）受験資格の取得及び有限要素法ソフトウェアによるシミュレーションの理論的背景の習得をすべく、外部講習として、サイバネットシステム株式会社主催の FEM 原理実習（平成28年8月25日）を受講した（メンバーから選ばれた1名が受講）。

主な内容としては、固体力学の有限要素法の基礎理論（線形問題）を基に、有限要素法解析ソフトウェア ANSYS APDL を用いて、比較的単純な平面（二次元）形状の各種構造解析問題の数値解析実験を行い、材料力学による理論解との比較及びその誤差の原因、解析結果精度及び信頼性向上のための理論上の工夫点の紹介、可視化された解析結果を理解・評価する上での注意点等であった。

特に、材料力学による理論解通りの結果を得ることが難しい曲げ問題の一例として、単純な片持ちはり形状モデルの曲げ問題（図4）について、要素の種類・分割方法・形状・パターン・要素物性等各種条件を変化させた場合の数値計算実験を実施し、その結果の評価を行った。その中で、物性（ポアソン比）や要素の種類によっては、過剰に硬いもしくは軟らかい変形挙動を示し、解の精度が大きく悪化する現象が生じること、その原因と回避方法それぞれの理論的背景についての説明があった。

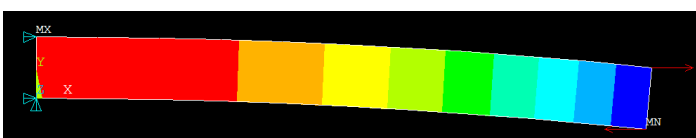


図4 数値解析実験のイメージ
（片持ちはり形状モデルの曲げ問題）



図5 講習内容報告会の様子

出張後、講習内容を研鑽プログラムメンバーに展開し、活発な議論が行われた（図5）。

本講習の受講とメンバーへの展開により、解析ソフトウェアを単に使うだけでなく、その理論的背景についても理解し、解析結果を正しく解釈するための実践的な技術を修得することが出来た。今後は、計算機の性能が解析対象に対して十分でない場合や解析対象の計算負荷の低減と解析結果の妥当性を両立する必要がある問題等に、今回習得した知見を活かしていく。

2.2 手動メッシングとコマンド入力による FEM 解析の実習（パスタブリッジ実験）

現在の FEM 構造解析ソフトでは、解析作業は半自動化されている。3DCADデータを与えると自動メッシングが実行され、離散化された数学モデルに変換される。最近のソフトでは、解析作業がブラックボックス化されていると言える。そこで、コマンド入力形式で解析を行う ANSYS APDL を使用し、メッシングや要素の選択を手動で行い、解析処理の流れを学習した。

実際の設計・解析業務に近い操作を行うため、パスタブリッジコンテストと称する実験実習を行った。決められた設計条件（レギュレーション）に従い、各自が軽量で剛性の高い構造のトラス橋を設計した。トラス橋の設計図を元に、FEM 構造解析を行うためのメッシュデータや境界条件を入力するためのコマンドをテキストエディタで記述し、ANSYS APDL に入力し解析を行った（図6）。

その後、食用のパスタとエポキシ接着剤を用いてトラス橋の模型を製作し、トラス橋の剛性を万能試験機で荷重を加えて測定するとともに、FEM 構造解析の結果と比較する実習を行った（図7, 8, 9）。

- ① トラス構造の決定
(方眼紙に記入)
- ② 節点座標の決定
(節点番号)
- ③ 要素の決定
(要素番号の割付)
- ④ 材料モデルの決定
- ⑤ 境界条件の設定

```
Uchikawa.yasufumi@ip... 文庫
[コマンド] [メニュー] [ツール] [表示] [ヘルプ]
[編集]
FINISH
/CLEAR,START
[ファイル名など]
/FILENAME,IP004
/PLOT,TRUSS
[プロットセッパモードに入る]
/PREP7
[節点データの入力]
N,1,0,0,0
N,2,0,025,0,00,0
N,3,0,050,0,00,0
N,4,0,14,0,037,0
N,5,0,2,0,00,0
N,6,0,26,0,00,0
N,7,0,37,0,00,0
N,8,0,34,0,0,0
N,9,0,20,0,0,0
N,10,0,25,0,0,0
N,11,0,17,0,0,0
N,12,0,13,0,0,0
N,13,0,09,0,0,0
N,14,0,08,0,07,0,05,0
N,15,0,14,0,0,0,05,0
N,16,0,17,0,0,0,05,0
N,17,0,2,0,0,0,045,0
N,18,0,20,0,0,0,045,0
N,19,0,0,0,0,0,0
N,20,0,0,0,0,0,0,00
N,102,0,0,0,0,0,0,0,00
N,103,0,0,0,0,0,0,0,00
N,104,0,14,0,0,0,0,00
N,105,0,2,0,0,0,0,00
N,106,0,20,0,0,0,0,00
N,107,0,17,0,0,0,0,00
N,108,0,34,0,0,0,0,00
N,109,0,25,0,0,0,0,00
N,110,0,20,0,0,0,0,00
```

図6 解析の流れとコマンド（テキスト）



図7 パスタブリッジの製作

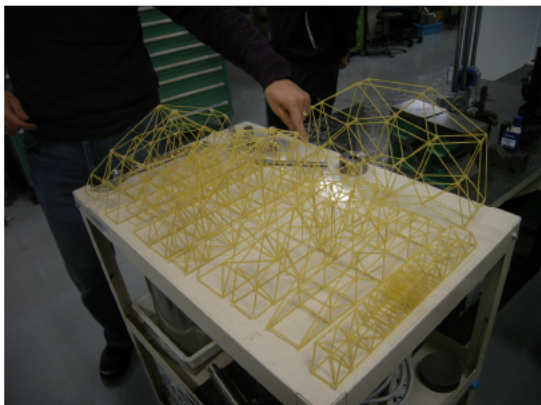


図8 メンバーが製作したパスタブリッジ

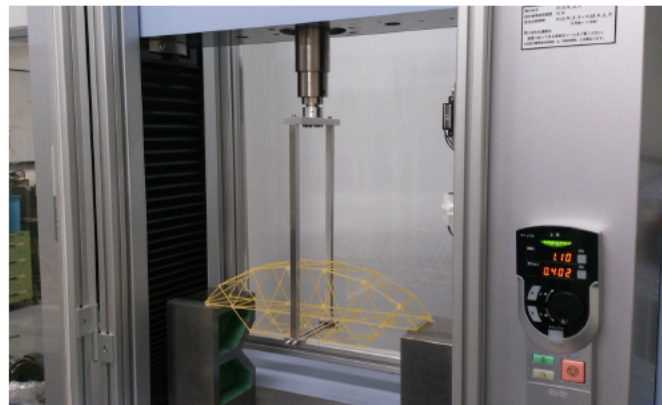


図9 パスタブリッジ荷重試験（専用の荷重ジグを使用）

メンバー11人分のパスタブリッジについて、FEM解析で得られた剛性と実測値を比較した結果、解析値と実測値が近かったものでも約30%の差があった。この原因として、パスタのヤング率の不揃い、製作精度の問題が考えられた。

3 FEM 構造解析結果の妥当性検討方法に関する実験

FEM 解析結果の妥当性検討の方法には様々な方法があるが、主に机上での計算により検討する方法と実機や模型について歪や応力を測定する方法がある。今回は実験により検討する方法を実習した。

3.1 ひずみゲージの取扱い実習とひずみ測定実験

(1)外部講習受講と学内でのひずみ測定方法準備

ひずみゲージの製造大手である(株)共和電業が行うひずみゲージ・測定器の講習(ひずみゲージ基礎講習会)を受講した(図10に講習修了証を示した)。そこで学んだひずみ測定に関する原理や測定注意点などの説明会をメンバーへ行った。学内でひずみ測定が行えるよう、測定部材形状を決め、接着剤でゲージを取付け、教材用アンプで測定できるよう調整を行った。これらによりメンバーのひずみ測定に関する知識が向上した。

(2)引張試験によるひずみ測定の実施

ひずみゲージの使用方法を学ぶため、試験片にひずみゲージを貼り付け引っ張り試験を行いひずみ測定する実習を行った。試験片はA5052材で製作し、応力集中をみるため中央にくびれがある形状となっている(図11)。実習ではメンバーを4つの班に分け、それぞれの班で1つの試験片を準備した。ゲージは試験片の2箇所に瞬間接着剤を用いて貼り付けた。このときゲージを測定する部分に正しい向きで貼ることを目指した。ゲージを貼った試験片を引張試験機で1000Nの力で引っ張り、出力されるひずみの値を測定した。その結果、荷重に対するひずみを検出していることを確認し、ひずみ測定の方法を習得した。

(3)FEM 解析とひずみ測定結果の比較

引張試験に用いた試験片をSolidWorksを用いて描き、シミュレーション機能を使用して引張試験におけるひずみの分布を解析した(図12)。試験部中央のくびれ付近のひずみの分布について、くびれの幅方向の中心付近はその周りに比べてひずみが小さいことが分かった。引っ張り試験片を4個用意して試験した結果、くびれ付近と一様部のひずみの値が1つの試験片のみほぼ同じ値になった。試験片4個をよく観察した結果、上記の試験片は正しい位置に正確にひずみゲージが貼られていたが、他の試験片は僅かにずれていたことが分かった。今回使用したひずみゲージアンプは教育用の製品であるため実際のひずみの値とのずれはあるはずであるが、解析値と比較してひずみの値を概ね正しく計測できていた。ひずみゲージによるひずみ計測を一通り経験して、ゲージを正しい位置に貼り付けることの重要性を感じたとともに、計測値の感度・精度が高くとても便利な計測方法であると感じた。



図10 外部講習修了証

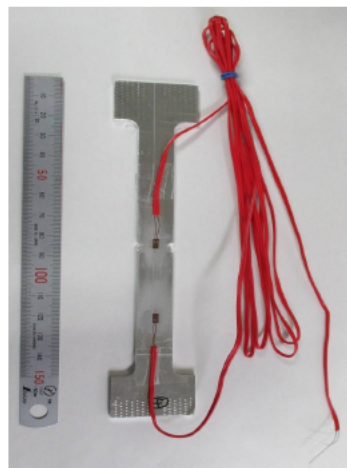


図11 引張試験用試験片

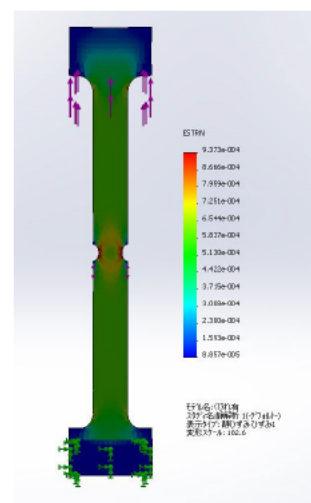


図12 ひずみ解析結果 (SolidWorks)

3.2 応力塗料によるひずみ測定

応力塗料とは、物体表面の応力解析に用いられる特殊なもろい塗料のことをいい、脆性塗料、ひずみ塗料とも呼ばれる。応力塗料を試験体の表面に塗布し、乾燥・硬化させてから負荷試験を行うと、一定以上のひずみが生じた箇所の塗膜には亀裂が現れる。亀裂の間隔とひずみの大きさには相関があるので、亀裂の状態からひずみを推定し、応力を解析することができる。直接肉眼で試験体全体の応力分布を把握でき、高応力箇所を発見しやすいという利点がある。

本実験では、応力塗料 STRESSMARK II (テック技販) を使用した。まず、単純な長方形の試験片を用いて引張試験を行ったところ、 $800\mu\text{ST}$ (μST : マイクロストレインの略、亀裂が入り始めるひずみの大きさのカタログ値) では亀裂が観察されなかったが、 $1000\mu\text{ST}$ で亀裂が入り始め、 $1200\mu\text{ST}$ でより狭い間隔の亀裂が試験片全体に生じた。続いて、他の形状の試験片について引張試験を行い、観察された亀裂と FEM 解析結果を比較した (図 1 3)。亀裂の生じた場所は、FEM 解析での予想と概ね一致しており、応力集中部位では亀裂の間隔がより狭くなっているのが確認された。

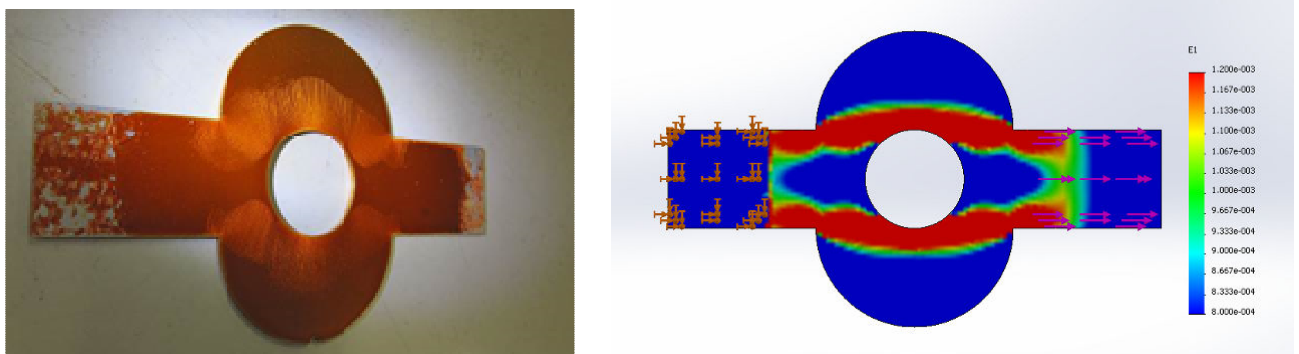


図 1 3 FEM 解析結果と応力塗料を用いた歪可視化の比較 (右: FEM 解析結果、左: 応力塗料実験結果)

3.3 光弾性実験

(1) 原理

光弾性実験法は高分子材料の模型実験により、光弾性効果を利用して応力分布を検出するものである。平面応力状態では応力分布の満足すべき条件を検討していくと、結局は材料定数に無関係となる。したがって、負荷条件と模型の形状寸法が相似であれば複雑な構造体に対しても、光弾性実験による結果は、そのまま応力解析に適用することができる。

(2) 模型の作製方法、型材種類、樹脂種類、など

本実習では比較的単純な構造の梁曲げモデル (図 1 4) と応力集中部の観察に最適なハット型モデル (図 1 5) の二種類について実験を行なった。

模型の作製方法は、アクリル板材 (PMMA) をマスタモデルとして作製して、これをもとにシリコンレジン (Wave: OM143) で型取りしたシリコン型に光弾性実験に最適なエポキシ樹脂 (Genus: GM-9050) を流し込み成形した。

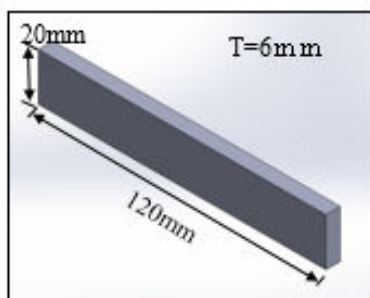


図 1 4 曲げモデル

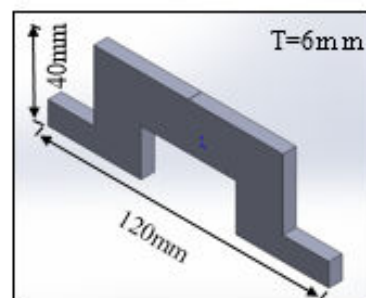


図 1 5 ハット型モデル

(3) 実験装置

光弾性実験で曲げ試験を行うための装置を図16に示す。エポキシ樹脂モデルに適切な荷重を与えたとき、光源（ノートパソコンの液晶画面を使用）からの直線偏光によってモデル内部の粗密の差により透過する光が縞干渉を起こす。このときの光を、偏光板を通し、前面のカメラによって撮影を行う。

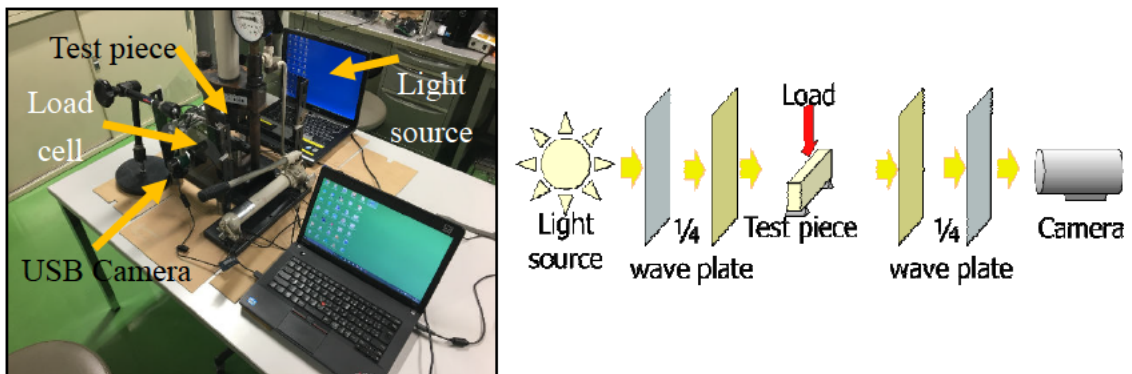


図16 実験装置概要

(4) FEM との比較

図17に干渉縞の画像を示す。黒線の次数が観察できるが、この結果とFEMとの結果（図18）を比較すると、ほぼ似たような応力分布となるといえる。

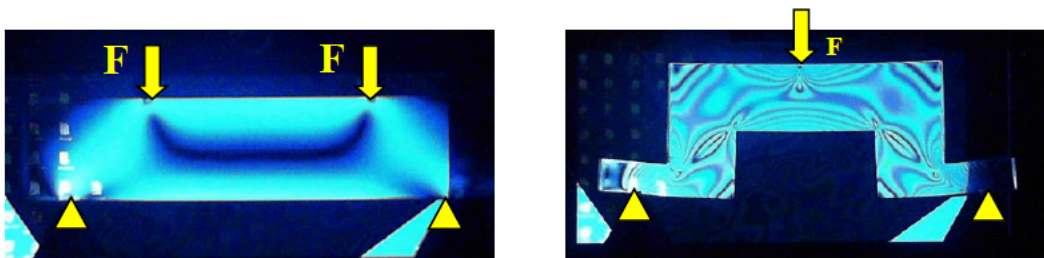


図17 干渉縞画像

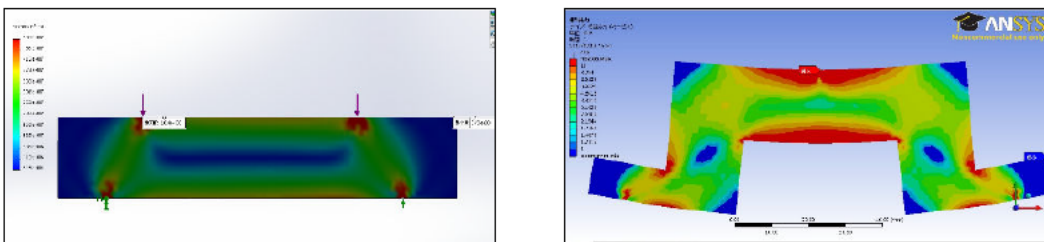


図18 FEM解析結果

3.4 ねじ破断実験

FEM構造解析を実際の機器設計に応用する場合、ねじ締結のモデル化が問題になる。ねじに関する知識を向上するため、破断実験を実施した。実験対象は、実験機器で使用頻度が高いM3, M4のステンレス製ボルトに加えて、アルミニウム製M4ボルトも加えた。ステンレス製・アルミ製のめねじ試験片と専用ジグを設計製作し、引張試験機に取り付け、ボルトが破断するまでの荷重と変位を計測した（図19）。興味のあるパラメーターは、めねじ加工時の下穴径やねじ深さである。各条件につき3回引張試験を実施した。M3, M4それぞれの試験結果を図20, 21, 22に示した。規格品のボルトを使用した結果、ロットの違いによると思われるばらつきが多少あるものの



図19 破断試験風景

M3、M4ともに各条件で同様の値を示した。M3 ステンレスボルトの実験では下穴径を変えたもの、初期締結力をかけたもの（3条件）の比較を行った（図20）。M4 ステンレスボルトの実験では、1本だけであるがダイスでねじ切り加工したボルトの引張試験を行い、転造ネジと切削ネジの違いを見ることができた（図21）。M4 アルミニウムボルトについては、変形（くびれ）がなく、破断時の衝撃が大きかった（図22）。試験ジグと破断したボルトの例を図23に示した。

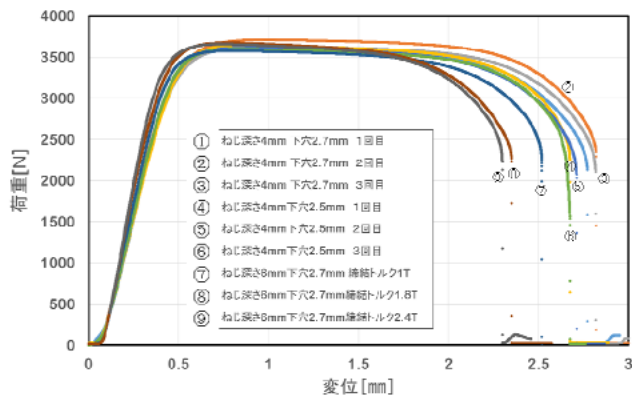


図20 M3 ボルトの破断試験結果

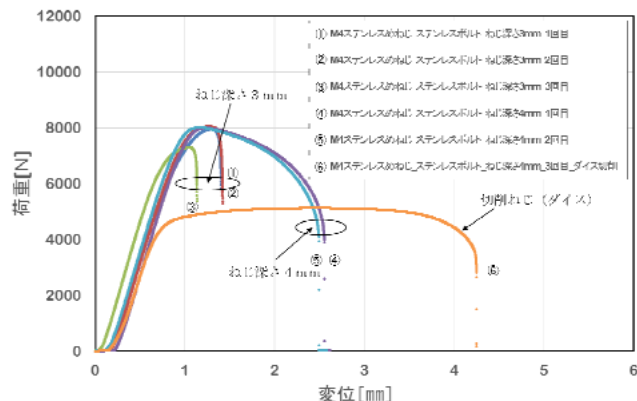


図21 M4 ボルトの破断試験結果（ステンレス）

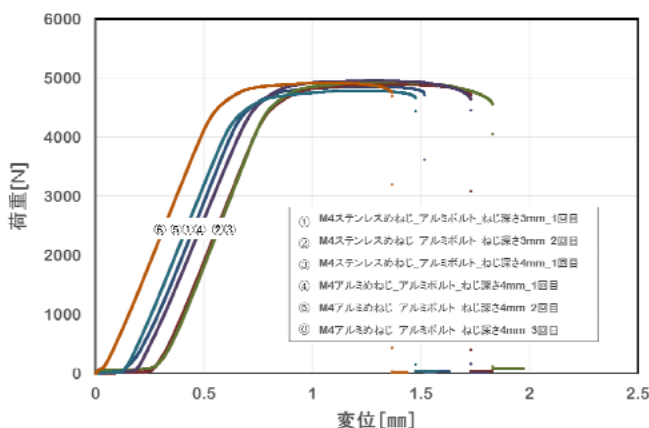


図22 M4 アルミニウムボルトの破断試験結果

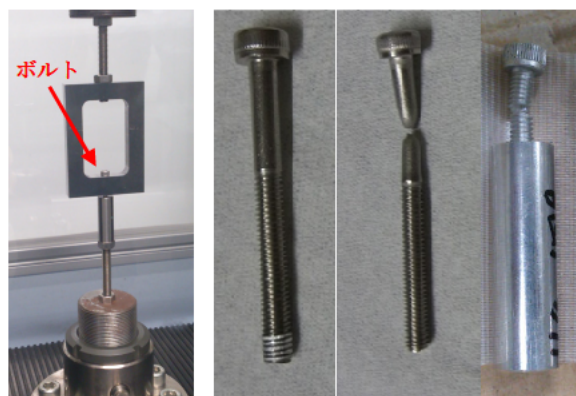


図23 試験ジグ（左）と破断したねじ・ボルト（右）（左からステンレスボルト（めねじ破損）、ステンレスボルト（円筒部破損）、アルミニウムボルト）

JIS規格（JIS B 1176）では、M24以下のステンレス六角穴付きボルトについて、強度区分をA2-70（A4-70）と規定している。ここでの”70”はオーステナイト系ステンレス鋼製（2種）で引張強さ700 [N/mm²]であることを示している。

ステンレス製のM3ねじについては、有効断面積を5.03 [mm²]とすると最大荷重は3521 [N]となる。実験結果では最大荷重3600 [N]程度であり、計算と一致している。M4ねじについて、有効断面積を8.78 [mm²]とすると、最大荷重は6146 [N]となる。実験の結果、転造ねじについては最大荷重8000 [N]程度であった。丸棒からダイスを用いて切削加工したねじは、4500 [N]程度で塑性変形が始まり、大きな伸びを示した後で破断している。

M4 アルミニウムねじについては、JIS B 1176（製品仕様および引用規格）によると、材質区分（JIS B 1057）としてAL1（A5052相当）の場合の破断荷重が2370 [N]、またAL2（A5056相当）の場合は2720 [N]と規定されている。これは、A5052などの引張り強さから求めたものである。実験では4800 [N]程度が最大荷重であり、規格より大きな強度を示している。原因として、転造加工時の加工硬化により引張強度が向上したものと考えられる。

本来はJIS（B1051）に記載の試験方法（くさび引張試験）に準拠するところであるが、今回は特

別に荷重印加ジグを製作し実験した。M3、M4 ボルトについて、規定値以上の最大強度を持つ事を確認し、頭部と円頭部の付け根の部分で破断が発生していない事も確認できた。

4 資格取得

FEM 構造解析に関連した資格として、計算力学技術者試験（日本機械学会）がある。受験費用を研修経費から支出する事は出来なかったが、研修メンバーから特に優秀な1名が計算力学技術者試験（固体2級）取得に挑戦した。また、優秀な2名が必要な講習を受講し、計算力学技術者（固体初級）に認定されている。

5 解析結果報告書フォーマットの標準化について

我々が FEM 構造解析を行う場合、機械設計の参考として解析する場合と業務依頼として FEM 構造解析を行う場合がある。研究者から依頼された解析業務の場合は、解析依頼者に説明するための報告書が必要である。報告書の作成には、標準的内容を決めたフォーマットがあると有用である。そこで、解析報告書の書きかたについて一般的な解析手順などを示した『日本計算工学会標準』を参考にして、大学の技術支援における FEM 解析の標準的解析手順と結果報告書の形式を定めた。

特に、工学シミュレーションの品質を確保することを目的として、最低限必要な事項があらかじめ示されており、初心者でも分かり易い解析結果報告書フォーマットとなっている。

6 まとめ

以下に研修により得られた成果について述べる。

6.1 JAXA 宇宙科学研究所見学

FEM 構造解析が特別なものでなくツールの一つとして活用されていることを実感した。FEM 構造解析の課題などに関する活発な議論ができたことから、研修を通して我々のレベルが向上していると実感できた。

6.2 FEM 構造解析の基礎知識習得について

外部の専門家による講義内容を学んだことで、計算の流れを理解した。パスタブリッジ実験を通して、手動メッシングやコマンド入力による計算実行を体験した。ブラックボックスであった FEM 構造解析ソフトの一連の動作を理解できた。

6.3 解析結果の妥当性評価手法について

ひずみゲージの取扱い実習により、ひずみゲージの選定方法や貼り付け手順、注意点を理解できた。応力塗料の取扱い実習では、塗布時の温度条件の厳しさ、ひび割れの間隔をひずみに換算することの困難さが分かった。光弾性実験においては、光弾性モデルの製作の困難さや実験機器の準備の大変さが分かった。

6.4 その他

従来型のコマンド入力型の解析ソフトは、解析条件設定が非常に細かく専門家向きである反面、設定を間違えると現実と大きく異なる解析結果となることが分かった。その点、自動的にメッシングや要素選択がなされる FEM ソフトの方が、間違いが少ないと思われた。

参考文献

- [1] 『日本計算力学学会標準 工学シミュレーションの標準手順』 一般社団法人 日本計算力学学会
- [2] 『日本計算力学学会標準 学会標準（HQCO01&002）事例集』 一般社団法人 日本計算力学学会
- [3] 『JISハンドブック 2005 ねじI』 日本規格協会
- [4] 『JISハンドブック 2005 ねじII』 日本規格協会