

製品の開発プロセスでは、企画構想を経て要求性能を満足する材料の選定を行い、基本設計から詳細設計に至るが、最終段階では性能確認のために実験的あるいは解析的に性能を評価し安全・安心な製品を提供することが求められている。

実物の限界性能を把握するには、想定される外力を繰り返し与え、設計寿命を満たすかどうかを確認する。加えて過大な外力の入力に対して、き裂の発生の有無や破損変形部位の特定を行い、安全性を確認する。その際、実物を模した外力だけでなく、適応される環境下で実験することも重要である。

一方、実物の評価をシミュレーションのみで行う場合、精度の高い解析を行うためには、より実態に近い条件設定を行う必要がある。その際、簡易的な実験などを行って解析の妥当性を確認することが望ましい。

本稿では、各種試験評価のうち、評価にもちいる各種試験装置、計測技術や実体品の多軸による再現試験の事例を紹介する。



技術本部
機械・構造センター
構造技術部

あかお ちひろ
赤尾 知洋



技術本部
機械・構造センター
構造技術部

おざき けい
尾崎 渓

D-2 実体品の多軸による再現試験

実体品の再現試験は顧客仕様に応じて、負荷条件、破壊判定条件等、各種機械構造物の実体品にかかる負荷状態はさまざまであり、単一方向の負荷に限らず複数の方向から複合した負荷状態となるケースが存在する。そのため、負荷条件に合わせた試験を行うために最適な装置・治具の設計製作、計測方法について検討する必要がある。

2.1 治具設計・製作

実体品が受ける外力を負荷するため、治具を設計・製作し台上および試験装置に取り付けを行う。設計製作にあたっては、実体品に合わせた負荷条件を再現できることと同時に試験を行うのに十分な強度を確保することが必要である。提供された実体品のモデルを基に、試験条件に合わせ、試験装置と台上に取り付けられるように、形状、加工方法、組付方法などを検討し、強度面では事前に解析を行い治具の安全性・健全性の確認を行うことが必要である(第3図)。

2.2 計測技術

設計製作された実体品の性能評価やシミュレーションの妥当性確認のため、実体品そのものに想定される荷重を与えた時の変形量や発生ひずみを取得し、変形挙動や応力状態を把握するとともに、き裂発生位置や破壊部位の特定を行う必要がある。

試験体の挙動を把握するために、変位計をもちいて変位量を測定する。実体品においては、形状が複雑で多方向に変形することがあるため、対象物の形状や材質、予測される変形量などに合わせて、容量や精度、計測方法を検討し接触式又は非接触式など、最適な機器の選定を行う(第4図)。

各部位の応力状態を判断する方法として、ひずみゲージ法は広く知られている。対象部材の評価したい材料表面にひずみゲージを貼り付けることで、該当箇所のひずみ量を精度よく測定することができる。しかし、この方法は応力分布を点情報として捉えるものである。面情報として分布を把握する方法として、デジタル画像相関法などがある。ひずみゲージの計測と併用することで、より広範囲の応力状態を把握することができる(第5図)。

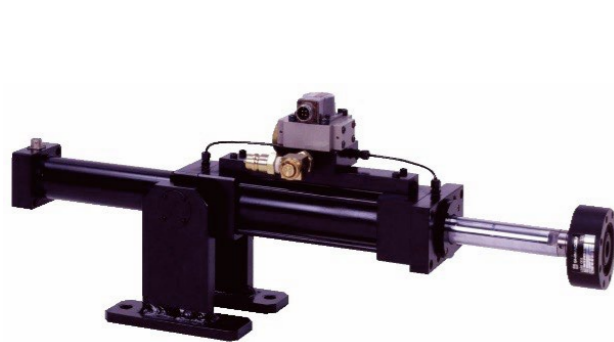
D-1 試験装置および試験設備

当社では、可搬型の電気油圧サーボアクチュエータを多数保有している。電気油圧サーボアクチュエータは、シリンダーを電気油圧サーボによる制御で往復動作できる装置であり、荷重容量ごとに装置を選定し、2kN-2MNまで対応することができる。制御方法も一方向動作をはじめ、正弦波や三角波、台形波などの一定振幅加振のほか、プログラムを行うことで実働波の再現や複数台での同期制御も可能である。(第1図)

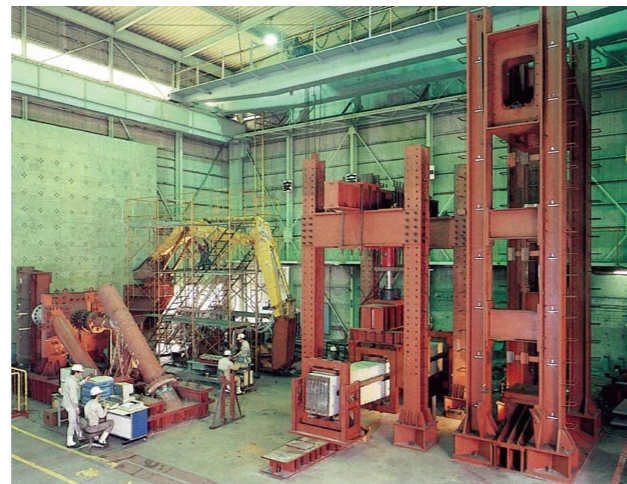
本装置は、一般的な疲労試験機とは異なり、実体品の再現試験など台上試験に対して力を発揮する。台上に試験体を設置し、治具を介して装置を組み付けることで、実態を模擬した試験を行うこ

とが可能である。(第2図) 実体品が受ける外力は一方に限りならず、前後、左右、上下、回転など多方向から力を受ける。このため、再現試験も同様に複数方向からの負荷を行い実体品の応力状態を模擬する必要がある。当社では、電気油圧サーボアクチュエータ(島津製作所製JFシリーズほか)をもちいて、実体品が実環境で受ける外力を模擬した再現試験を実施しているのでその一部を紹介する。

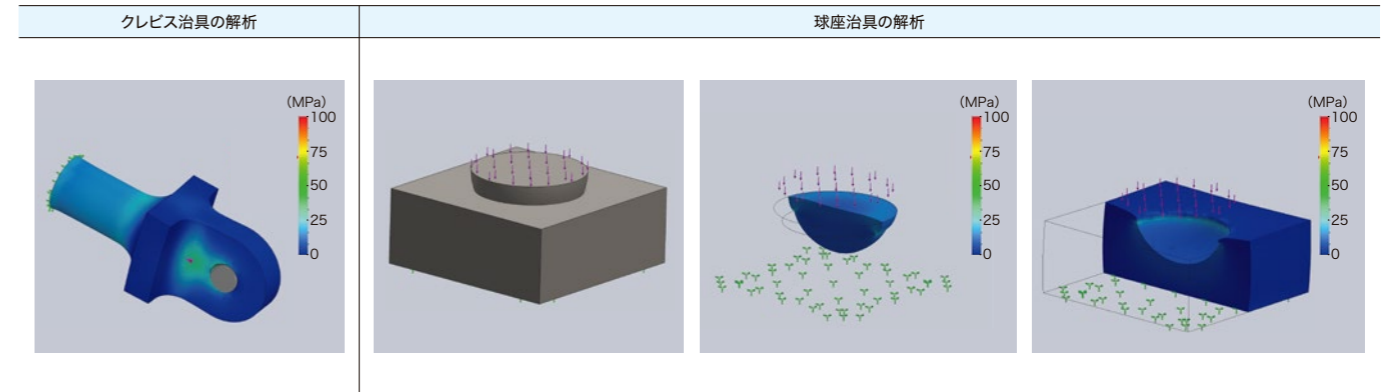
第1図 電気油圧サーボアクチュエータ
(島津製作所製JFシリーズ)



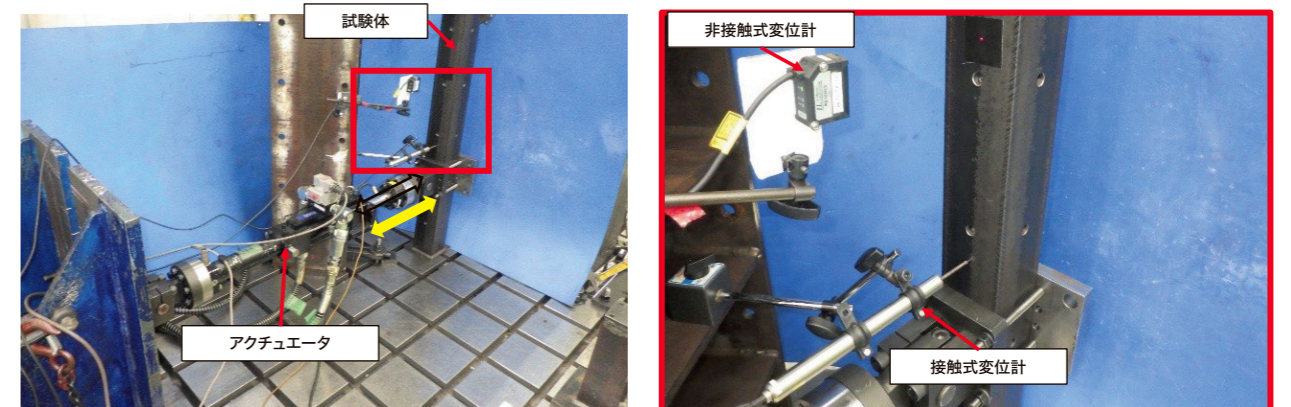
第2図 治具の一例



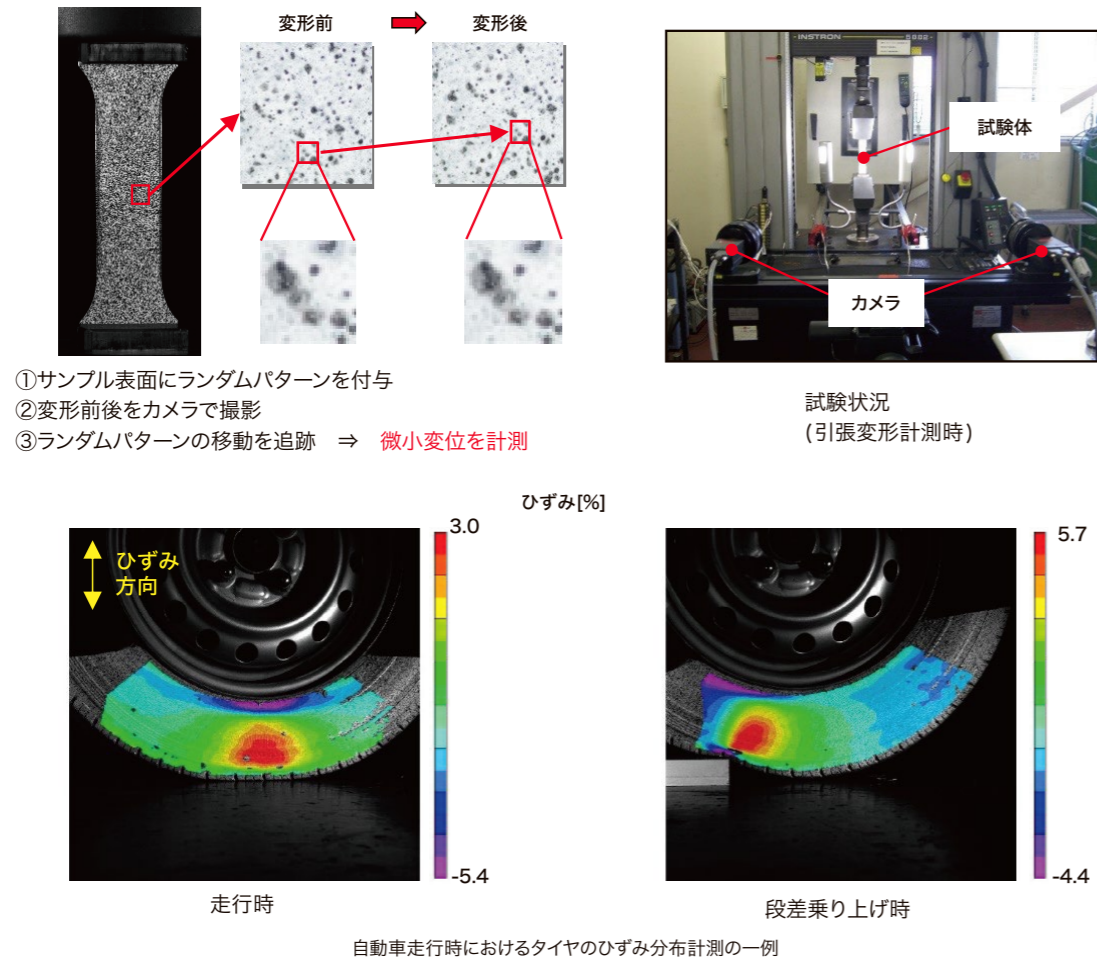
第3図 治具の事前解析を行った一例



第4図 計測機器一例：変位計



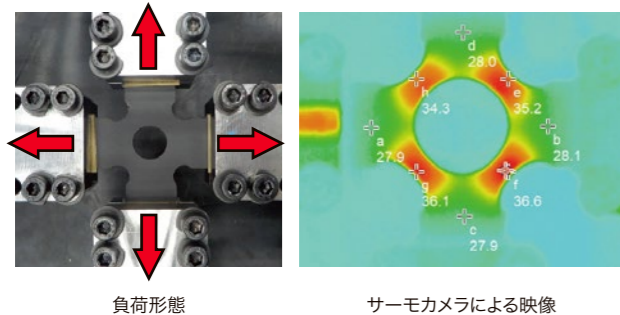
第5図 デジタル画像相関法の一例



試験状況 (引張変形計測時)

また、塑性変形時や繰り返し負荷による発熱など、温度分布を把握するために熱電対やサーモカメラによる計測も可能である(第6図)。材料表面のき裂発生の有無や、き裂進展の把握には浸透探傷検査を実施し、必要に応じて断面観察を行い内部のき裂や損傷の形態から損傷原因の推定を行うほか、内部のき裂発生の検知などにはアコースティックエミッション法や超音波探傷法なども有効である(第7図、第8図)。

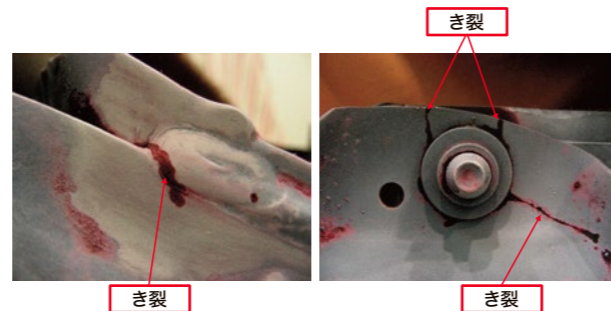
第6図 サーモカメラによる温度測定の一例



第7図 き裂・欠陥検出のための非破壊試験方法の種類と適用¹⁾

試験方法	対象欠陥位置	おもな適用分野	適用が困難なもの
超音波探傷試験	内部	圧延材(ラミネーション)、鍛造材・溶接部(割れ)	鑄鉄、オーステナイト鋼
浸透探傷試験	表面開口	金属・非金属共通	多孔質材料
アコースティックエミッション	(割れの発生、成長)	圧力容器の耐圧試験時、その他溶接割れなど	すでに存在している欠陥

第8図 車両部品の浸透探傷試験実施例



2.3 再現試験の実例

2.3.1 大型構造物の3軸実働波試験

大型溶接構造物の長期運用に対する安全性を確認するため、溶接構造物の構成部品に実荷重相当の負荷を再現した実働波試験を実施する。構造物が受ける荷重を繰り返し負荷することで、構造物の耐久性確認を行う試験の例を紹介する(第9図)。

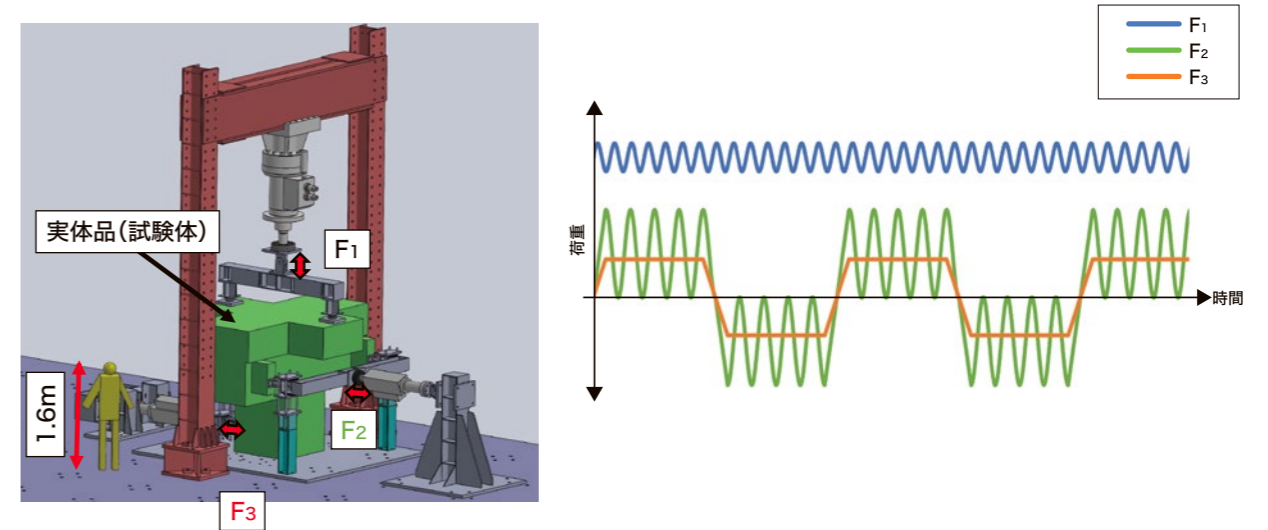
耐久試験中は、破壊する挙動やき裂の進展を確認するため、ひずみゲージ法によるひずみ分布をリアルタイムで観測し、定期的な浸透探傷試験を行うことで、き裂の有無や進展度合いを確認する。耐久試験後は、実際の実働負荷状態の1.5倍の静的負荷を実施し、設計基準とした耐久性確認後の残存強度の確認や破壊試験まで行い、実体品の限界強度・破壊モードを観測する。耐久試験時にき裂が発生した場合は、き裂箇所を断面観察することで、き裂や損傷形態から損傷原因の推定を行う。

2.3.2 低温～高温環境下での試験

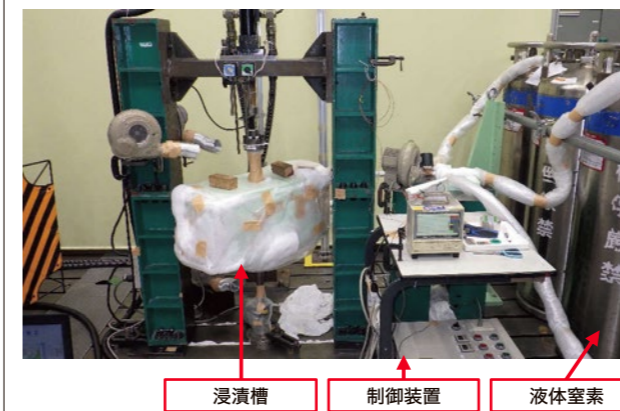
実体品において、運用環境が必ずしも常温とは限らない。宇宙空間～寒冷地などの極低温～低温の環境～エンジン内部など燃焼部での高温環境など、さまざまな環境下で運用されている。こうした温度環境を模擬するためテストピースレベルでは恒温槽、加熱炉などをもちいて温度環境を模擬できるものの、実体品では汎用の環境槽をもちいることは試験体サイズや試験方法に制限が多く適用が難しい。

そこで、当社では実体品に合わせて恒温槽を設計製作し、独自の制御システムにより液体窒素の噴霧や浸漬、電気炉や熱風発生器、ヒーターによる温度制御により、実際の温度環境を模擬した環境下での実体品の評価試験を行っている。実体品のサイズによるが、 -196°C (液体窒素浸漬)、 -60°C ～ 150°C での実施が可能である(第10図、第11図)。

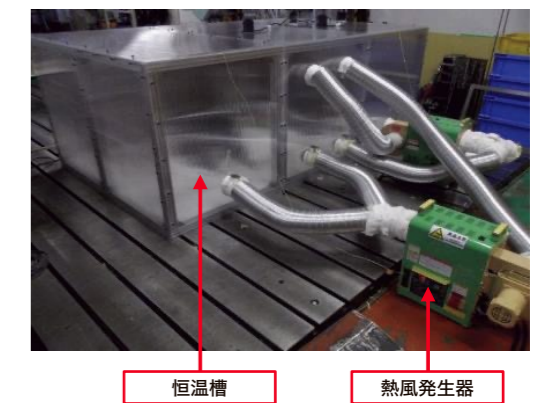
第9図 大型構造物の3軸実働波試験装置例



第10図 部材評価用液体窒素浸漬槽例 (400mm×200mm×300mm× 196°C)



第11図 車両用恒温槽例 (1500mm×2250mm×750mm×約 80°C)



D-3 さらなる多軸制御(5軸)の試み

一般的な実体構造物は複雑な荷重条件で運用されている。航空宇宙、輸送機、社会インフラなどのさまざまな業界で実際の挙動/環境を模擬した強度試験をおこなうために、当社では電気油圧サーボアクチュエータ(島津製作所製JFシリーズ)および制御装置をもちいて複雑な荷重条件を模擬した試験を実施している。軸数の増加に伴い、試験機の設計や制御が難しくなるが当社では、保有している島津製作所製油圧サーボアクチュエータおよび付随する専用の制御ソフトにより最大4軸までの疲労試験に対応してきた。一方でより複雑な実態を再現するため、さらなる多軸化が求められている。

そこで、より実態に近い多軸応力状態を再現し、強度評価を行うため、5軸以上での多軸制御を試みたので事例を紹介する。

装置は、島津製作所製電気油圧サーボアクチュエータとMTS社製のFlex Test200及びAero pro制御ソフトウェアで構成した。通常、電気油圧サーボアクチュエータと制御装置等のシステム構成は同一メーカーで統一されることが一般的であるが、Flex Test200は5軸以上の制御が可能な装置であり、これと当社保有の電気油圧サーボアクチュエータを組み合わせ活用すべく検討を始めた。他社製品の組合せについては、制御ケーブルの接続をはじめとした信号伝達系から細部を見直す必要があり、今回初めての試みとなった。

まず、MTS社製制御装置の制御信号を島津製作所電気油圧

サーボアクチュエータに伝達するため、接続ケーブルを自作し制御信号の確認を行った。

次に制御装置内の制御パラメータを島津製作所仕様に調整し、何度も予備テストを繰り返し、最適な設定パラメータと停止アラーム信号の検証把握を行い装置制御することに成功した。

続いて、対象の試験体(H形鋼150×150)に対して引張、圧縮、ねじり、曲げおよびそれらを組み合わせた入力を再現するため、第12図に示すような5本の電気油圧サーボアクチュエータACT①～⑤をもちいて試験装置を組上げ、制御の検証を行った。負荷の制御は、ACT①～④を試験体に対して平行に設置し荷重治具を介して、引張、圧縮、曲げのモードを負荷し、平行に設置したACT⑤をもちいてねじりのモードを与える構成とした。制御の検証として、荷重値および変位値の動作波形の確認、参考として試験体にひずみゲージを貼付し、挙動の確認を行った。荷重は第12図に示すように試験体軸方向に対してACT①、ACT②は引張方向、ACT③、ACT④は圧縮方向に負荷することにより試験体に曲げモードの荷重を付与しつつ、ACT⑤を水平方向から負荷することでねじりモードの荷重を与えた。

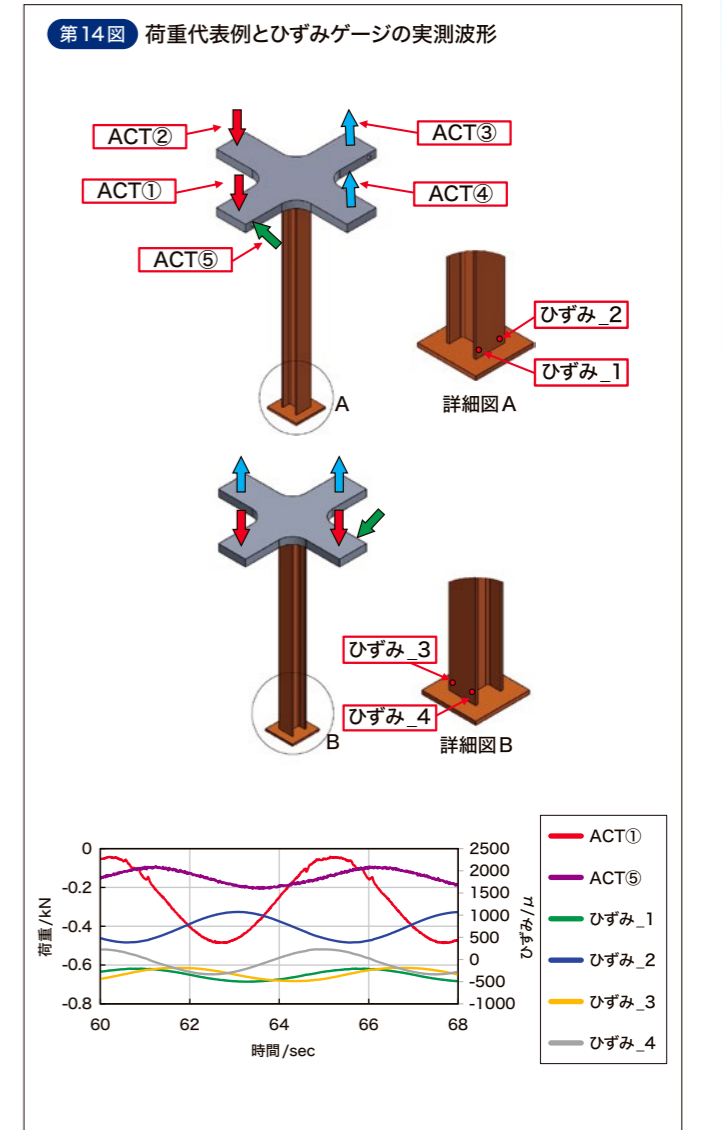
第13図は正弦波で5軸ともに荷重のピークが同期することを狙い、周波数0.2Hzの制御信号で加振した波形である。同軸のACT①～④は各軸でのピークはおおむね同期しているが、水平方向のACT⑤は設定どおりに同期しておらず、目標値の波形(破線)と比較すると位相のずれが見られる。このように、すべての軸で設定どおりの荷重パターンを実現することも簡単ではないのが、多軸化の難しさの一つである。

設定どおりの荷重パターンを実現するためには、原因の解析が必要だが本件では、歪ゲージの測定結果を合わせて解析できた。第14図に、ACT①とACT⑤、試験体根元側に貼付したひずみゲージの実測波形を示す。これを見るとACT①の荷重ピークに対してひずみ波形のピークはそれぞれ一致していない。これらの位相とピーク値を事前に想定していた計算値と比較することで、ねじりの負荷と想定以上の倒れこむような負荷が同時にかかっていたことがわかった。すなわち、倒れて戻る変形が事前の想定以上に大きかったために、ACT⑤の応答を遅らせ、位相が遅れる原因だった。同時に、制御パラメータの許容範囲を広く設定していたために、位相遅れを許容して加振が行われてしまったことが同期しなかったもう一つの要因と考えられる。

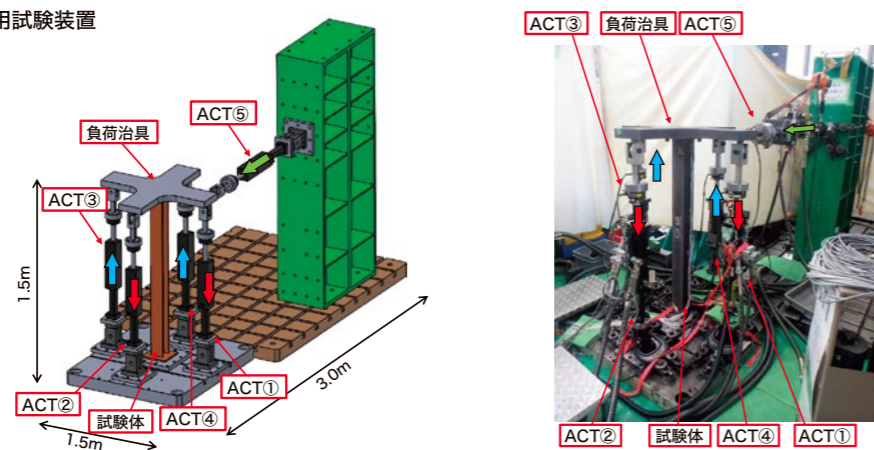
以上の解析から本件では、対面にねじり方向のアクチュエータを加えて倒れこみを押さえるように工夫すること、さらに制御パラメータの最適化を進めることで、位相遅れの問題は改善ができる。このように5軸以上の多軸試験では、変形モードの複雑さが増すため、軸間の干渉などを考慮した試験装置の設計や制御パラメータの設定が重要になる。

今回は正弦波による加振例を示したが、当試験システムでは第15図に示すように三角波、台形波、実働波などの加振も可能である。各軸間の位相制御機能やリアルタイムでの荷重監視および制御機能を有し、設定値到達まで各アクチュエータの同期調整(保持や速度調整)を行うことで過荷重または荷重不足を防止する機能(Null Pacing機能)なども有している。

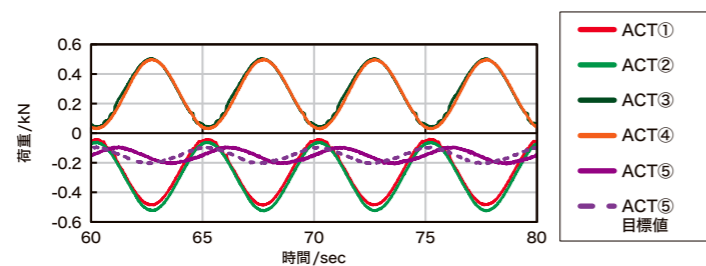
今後は上記のように、多軸試験における軸間の干渉などの要因を考慮した治具や装置の設計、制御技術の向上に努め、より精度の高い試験技術を提供できるように推進していく。



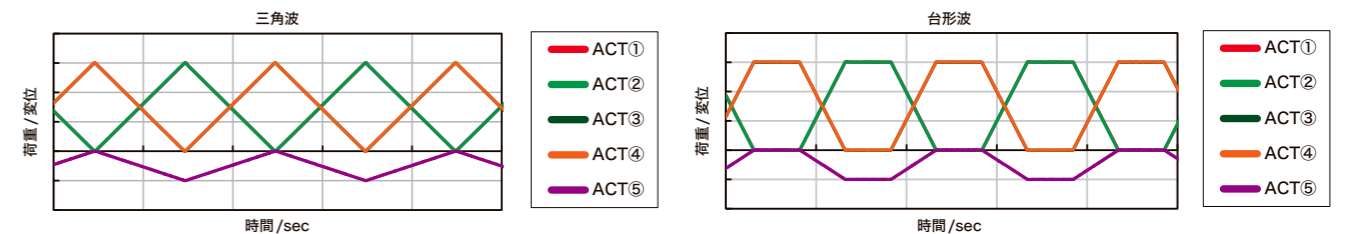
第12図 図制御検証用試験装置



第13図 正弦波による加振波形



第15図 制御波形の例



本稿では当社尼崎事業所で保有している設備機器や大型構造物の3軸実働波試験の一例、多軸試験への取り組みを紹介した。当社内では材料試験～CAE解析～実体品の強度評価まで、お客さまの製品開発の段階から課題解決を幅広くサポート支援することが可能である。引き続きお客さまのニーズに応えるべく高度な試験技術を提供できるように努めていきたい。

参考文献 *1) 機械工学便覧B02、(2006)、P.243