

報 文 4

高振動減衰性ロボットハンドの開発

中央技術研究所 化学研究所 先端材料グループ たけむら しんいち
竹村 振一



1. はじめに

炭素繊維強化プラスチック、CFRP (Carbon Fiber Reinforced Plastics) は、CF (Carbon Fiber) とエポキシなどのマトリックス樹脂を組み合わせた複合材料である。異質で異形の材料を組み合わせる、すなわち、直径7 μ m ~ 10 μ mの高い強度と弾性率を有するCFと、軽量のプラスチックを複合することにより、それぞれ単体では成し得なかった機械的特性を得ることが可能となった。

構造材料の機械的特性を評価、比較する場合、比強度、比弾性率を用いることが多い。それぞれ強度、弾性率を密度で除した数値であり、値が大きいほど、軽量、高強度で、剛性が高い、すなわち荷重の負荷に対して、変形しにくいことを意味する。一般に金属材料では、比強度4 $\times 10^6$ cm、比弾性率4 $\times 10^8$ cmを超えることは難しいと言われてきたが、CFRPでは、CFの高性能化により、比強度20 $\times 10^6$ cm、比弾性率25 $\times 10^8$ cmに達するグレードも開発されている。このように優れた機械的特性を有するCFRPは、軽量化と高強度・高剛性化の両立を可能にすることから、航空・宇宙およびスポーツ・レジャー分野を中心として用途を拡大してきたが、近年、その適用範囲は産業分野においても拡大している。

CFは、出発原料によって大きく二種類に分けられる。ひとつは、ポリアクリロニトリル (PAN: Polyacrylonitrile) を原料として、これを紡糸、焼成することにより製造されるPAN系CFである。高強度であることを特長として、航空機用構造部材などに使用されている。もうひとつは、コールタールピッチ、石油ピッチから製造されるピッチ系CFである。強度の点では、PAN系CFと比べてやや劣るものの、高い弾性率が得られることから、機械部品など高い剛性が求められる産業分野での用途を広げてきた。

当社は、日本グラフィートファイバー株式会社 (※新日鉄マテリアルズ株式会社と当社の合弁会社) の高弾性ピッチ系CFを活用しながら、産業分野への展開とその用途の拡大を目指して、印刷転写機用ロール、産業ロボット用ハンドの開発を行ってきた。特に、早くから液晶ディスプレイ (LCD: Liquid Crystal Display) 基板搬送ロボットに着目し、ガラス基板の大型化に対応しながら、現在では長さ3mを超える長尺ロボットハンドを販売している。

このようなハンド大型化の流れのなかで、ガラス基板搬送時に発生する振動が収束しにくいという課題が持ち上がっている。すなわち、搬送動作中のハンドが停止したとき、振動が収束するまで、次の動作に移ることができないため、タクトタイム (工程作業時間) を短縮することが難しい状況にあると考えられている。そこで本稿では、まずLCD基板搬送ロボットハンドの機械的特性について述べ、さらに高性能化のひとつとして、基板搬送時に発生する振動を短時間で収束させる、いわゆる高振動減衰特性を付与したロボットハンドの構造および特長について報告する。

2. LCD基板搬送ロボット用CFRPハンドについて

2.1 LCD基板搬送ロボットの概要

LCDの製造工程では、厚さ0.5mm ~ 1mmのガラス基板に対して、成膜、レジスト塗布、露光、アニールなど多くの処理が施される。各処理装置間においてガラス基板を高速、高精度で搬送するために、基板搬送ロボットが使用されている。

図1は、ガラス基板の寸法と生産量の推移である。当社では、1998年頃から、このLCD基板搬送ロボットに着目し、ハンドのCFRP化を進めてきた。当時の基板は、第3世代 (G3) と呼ばれるものであった。ガラス基板寸法は600mm \times 700mm、質量800g程度であり、アルミニウム製ハンドでも使用に耐えうるものだった。その後、液晶テレビの急激な大型化とともに、ガラス基板の大型化も進み、2006年頃からは第8世代 (G8、寸法2200mm \times 2500mm、質量10kg)、さらには第10世代 (G10、2900mm \times 3100mm、15kg) となり、質量も増加してきた。これらの大型ガラス基板の製造工程では、長さ3m ~ 4mの長尺ロボットハンドが使用されている。

図2は、LCD基板搬送ロボットの模式図である。ロボットハンドユニットは、基板が積載されるフォーク部と、それらが取り付けられるフレーム部より構成される。フレームが、ロボット側に取り付けられ、アームを介してハンドユニット全体が高速移動することにより、ガラス基板を搬送する。長尺ロボットハンドは、片持ち梁状というたわみ易い条件で保持されるうえ、薄く、割れやすい大面積のガラス基板を搬送するために、搬送時のたわみが小さい、す

なわち高い曲げ剛性を有することが求められる。このことから、LCD 基板搬送ハンドには、高弾性ピッチ系 CF が欠かせないものとなっている。

またハンドの長尺化にともない、搬送時に発生する振動が収束しにくくなっているため、その振動減衰特性を向上させることは、タクトタイムの短縮に対して有効であると考えられる。後述する通り、高弾性ピッチ系 CFRP は、それ自体が高い振動減衰特性を有するが、特に LCD 基板搬送ロボット用途では、その振動減衰性能をさらに高めることは重要なことである。

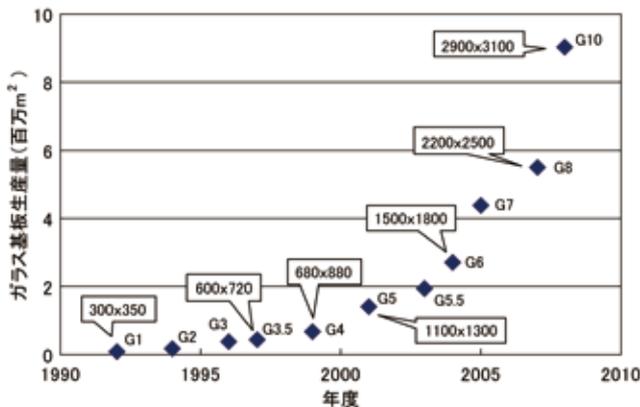


図1 ガラス基板の寸法と生産量の推移
(四角内はガラス基板寸法、単位 mm)

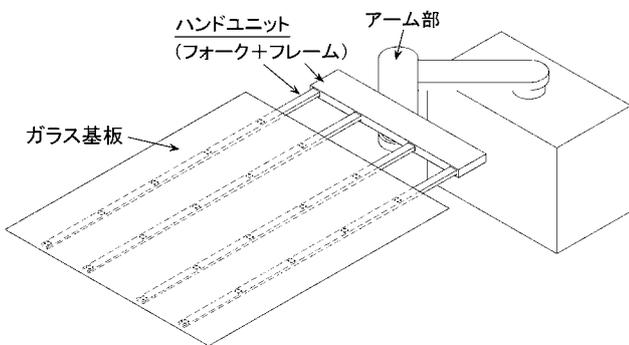


図2 LCD 基板搬送ロボット

2.2 当社高弾性ピッチ系 CFRP ロボットハンドの特長

(1) 材料および製造方法

表 1 に、当社 CFRP ハンドに使用している高弾性ピッチ系 CFRP、グラノック XN-80 (日本グラファイトファイバー株式会社、繊維引張弾性率: 780GPa) の機械物性と、PAN 系 CFRP および代表的な金属材料との比較例を示す。PAN 系 CF としてパイロフィル TR30S (三菱レイヨン株式会社、同: 235GPa)、また構造用炭素鋼として S45C、アルミニウム合金として A5052-H34 の機械物性と比較する。当社ロボットハンドでは、高い曲げ剛性を得るために、主としてグラノック XN-80 を使用し、ハンドに適した機械的特性が得られるよう、剛性設計を行っている。

XN-80 の比強度は $8.2 \times 10^6 \text{cm}$ であり、高強度 PAN 系 CFRP と比べて低いものの、金属材料に対して約 1 オーダー高い値を有する。また、その比弾性率は $25.5 \times 10^8 \text{cm}$ であり、TR30S の 3 倍以上であることから、特に高剛性が要求される用途に適していると言える。

CFRP ハンドの材料として、CF に未硬化のエポキシをマトリックス樹脂として含浸させた、厚さ 0.1mm ~ 0.3mm の薄いシート状のプリプレグが使用される (図 3)。ロボットハンドの設計厚さになるように、プリプレグ枚数を調整して、これらを積層し、120℃ ~ 180℃ で加熱硬化することにより、CFRP 成形体が得られる。

CFRP ハンドの成形には、オートクレーブ (加熱・加圧硬化炉) を使用する。プリプレグ積層体を真空バッグ内にセットし、炉内で 0.5MPa ~ 0.7MPa の圧力を加えることで、マトリックス樹脂、プリプレグシート間に含まれた空気を除去する成形法であり、航空機用部材などの高性能 CFRP の製造に使用されている。図 4 に示す通り、CFRP のなかに、空隙などの欠陥がみられない優れた方法である。

表 1 高弾性ピッチ系 CF と他の材料との機械物性の比較

| | 高弾性 ピッチ系CFRP | 高強度 PAN系CFRP | 炭素鋼 | アルミニウム |
|------------------------------|-----------------|-----------------|------|-----------|
| CF または 金属名称 | グラノック XN-80 | パイロフィル TR30S | S45C | A5052-H34 |
| 強度 MPa | 1450 | 2150 | 569 | 260 |
| 弾性率 GPa | 450 | 120 | 205 | 71 |
| 密度 g/cm ³ | 1.8 | 1.6 | 7.8 | 2.7 |
| 比強度 $\times 10^6 \text{cm}$ | 8.2 | 13.7 | 0.74 | 0.98 |
| 比弾性率 $\times 10^8 \text{cm}$ | 25.5 | 7.7 | 2.7 | 2.7 |

※ 1: CFRP の強度および弾性率は、CF 体積含有率 (Vf) 60% の場合の値である。

※ 2: 金属の強度は、代表的な数値である。



図3 CF プリプレグ

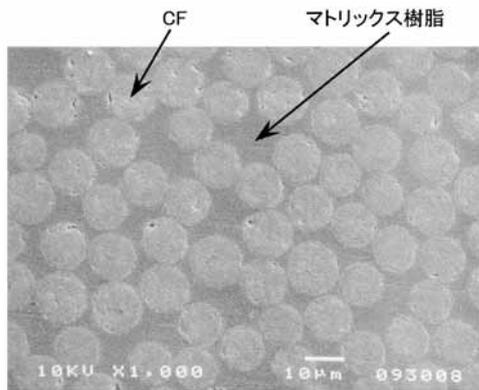


図4 CFRP断面のSEM像

(2) CFRP ロボットハンドの積層構造

CFRPは、CFの配向方向と、これと直交する方向において、強度および弾性率が異なる異方性材料であることから、ロボットハンドに要求される機械的特性を十分満足するように、最適なCFの配向方向を選定する積層設計を行う必要がある。図5は、CFRPハンドの積層構成の代表例である。現在、大型ガラス基板搬送用の長尺CFRPハンドは、中空パイプ構造を採っている。CFがハンドの長手方向に配向したストレート層には、高弾性ピッチ系CFを使用して高い曲げ剛性を発現させ、これと直角方向のCF配向を有する強化層に、高強度のPAN系CFを配置することで強度を確保し、ハンドの縦割れなどの不具合を防止している。さらに最外層として、CF織物プリプレグを巻きつけることにより、ハンド外観を編み目状の、いわゆるカーボンクロス表面とするとともに、機械加工時のバリの発生を防止する構造となっている。

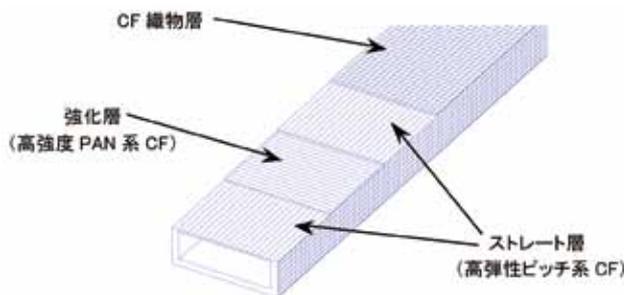


図5 CFRPハンドの積層構造

3. 高弾性ピッチ系CFRPの曲げ振動減衰特性

3.1 CFRP板の曲げ振動減衰特性

(1) 試験片および試験方法

まず板状の試験片を用いて、高弾性ピッチ系CFRPの振動減衰特性を、PAN系CFRP、およびアルミニウム材と比較する。ピッチ系CFとしてグラノックXN-80を、またPAN系CFとしてパイロフィルTR30Sを使用した。試験片は、CFの配向方向がその長手方向と同一である一方

向材とし、厚さ2mmとなるようにCFプリプレグの積層枚数を調整した。マトリックス樹脂は、130℃硬化タイプのエポキシ樹脂である。CFRP成形板から、幅10mm、長さ250mmの試験片を切り出し、曲げ振動減衰特性を評価した。また、厚さ2mmのアルミニウム材(A5052)から試験片を作製、振動特性を評価し、CFRP材と比較した。

図6に、曲げ振動減衰特性の評価方法を示す。制振銅板の振動減衰特性試験方法(JIS G 0602)に準拠した。試験片の片側50mmの範囲を治具により固定して、垂直に保持する。先端側から160mmの箇所にひずみゲージを接着し、振動中のひずみをデジタルストレージオシロスコープにより測定することで、減衰自由振動波形を得た。

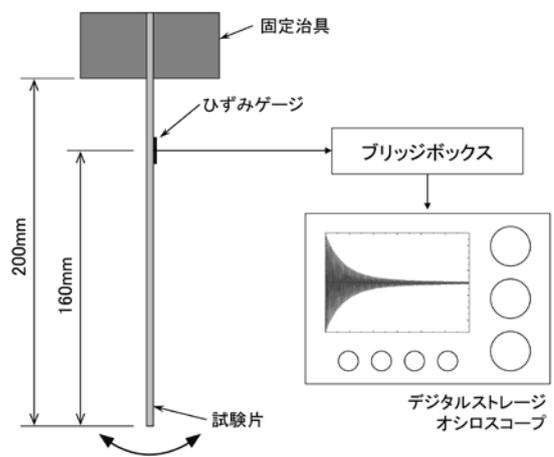


図6 CFRP板の曲げ振動減衰特性評価方法

(2) 高弾性ピッチ系CFRP板の曲げ振動減衰特性

表2は、各種試験片の曲げ振動減衰特性の評価結果である。また図7～図9に、それぞれピッチ系XN-80、PAN系TR30Sおよびアルミニウム試験片の減衰自由振動波形を示す。

表2 CFRPおよびアルミ試験片の曲げ振動減衰特性

| | ピッチ系CFRP XN-80 | PAN系CFRP TR30S | アルミニウム A5052 |
|-----------------|-------------------|-------------------|-----------------|
| 振動収束所要時間 | | | |
| 400µε⇒200µε sec | 0.27 | 0.54 | 0.95 |
| 400µε⇒100µε sec | 0.59 | 1.17 | 2.04 |
| 対数減衰率 | | | |
| 曲げひずみ100µε時点 - | 0.0183 | 0.0141 | 0.0157 |
| 曲げひずみ200µε時点 - | 0.0211 | 0.0179 | 0.0172 |
| 曲げひずみ300µε時点 - | 0.0223 | 0.0198 | 0.0181 |
| 曲げ振動周波数 Hz | 113 | 68.6 | 38.8 |

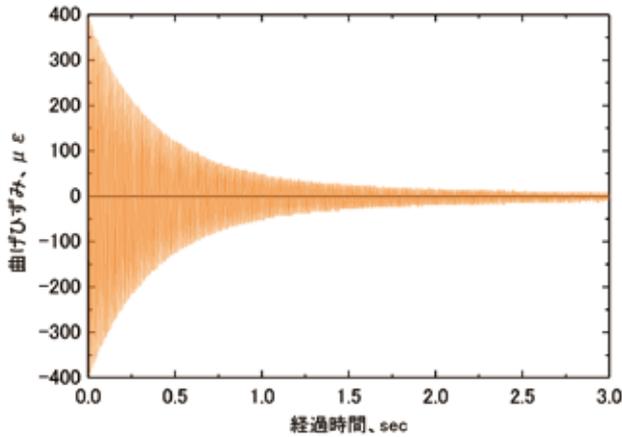


図7 XN-80の減衰自由振動波形

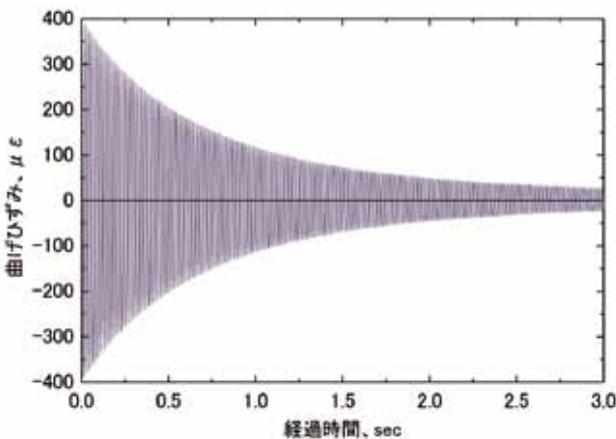


図8 TR30Sの減衰自由振動波形

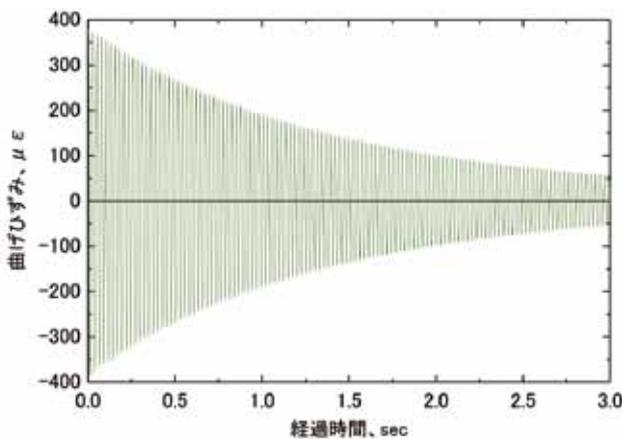


図9 アルミニウムの減衰自由振動波形

振動減衰特性を比較するため、曲げひずみが $400\mu\epsilon$ から $200\mu\epsilon$ および $100\mu\epsilon$ へ収束するまでに要する時間を検討する。また振動減衰特性の良否を表す指標のひとつとして、対数減衰率に着目する。対数減衰率 λ は、減衰自由振動波形の隣り合う極大値の比の自然対数として、

$$\lambda = \ln \frac{A_n}{A_{n+1}} \dots \dots \dots (1)$$

により定義される。ここで、 A_n および A_{n+1} は、それぞれ減衰自由振動波形における n 回目および $n+1$ 回目の振幅の極大値である。対数減衰率は、1周期毎の振動減衰性能を表す尺度であり、その値が大きいほど、素材自体が高い振動減衰特性を有することを意味する。

最初に、経過時間に対する振動の収束挙動について検討する。表2および図7～図9に示す通り、曲げひずみ $400\mu\epsilon$ から $200\mu\epsilon$ への振動収束、および $400\mu\epsilon$ から $100\mu\epsilon$ への振動収束のいずれの場合においても、XN-80試験片の振動収束所要時間は、TR30Sの約1/2、アルミニウムの1/3～1/4であり、優れた振動減衰特性を有することがわかる。

ここで、各種材料の対数減衰率を比較する。図10は、減衰自由振動波形から計算した対数減衰率と曲げひずみの関係である。一般に、対数減衰率は曲げひずみ依存性を持ち、曲げひずみが大きいほど、その値が大きくなる傾向を示す。XN-80試験片の対数減衰率は、曲げひずみ $70\mu\epsilon \sim 300\mu\epsilon$ の範囲全域に渡って、TR30S試験片と比べて13%～30%、またアルミニウム試験片に対しては、17%～23%高い値を有するという結果が得られた。

さらに、振動減衰特性に影響を及ぼすもうひとつの因子である振動周波数に着目する。XN-80試験片の曲げ振動周波数は113Hzであり、TR30Sと比べて65%、さらにアルミニウム試験片に対しては、191%高い値である。

優れた振動減衰特性を得るためには、素材自体が高い振動減衰性能を有すること、および振動周波数が高いことの両者を併せ持つことが必要である。上述のように、高弾性ピッチ系CF、XN-80は高い対数減衰率を有することに加えて、振動周波数も高い値であることにより、アルミニウムは当然のことながら、PAN系CFと比べても優れた振動減衰特性を示すと考えることができる。

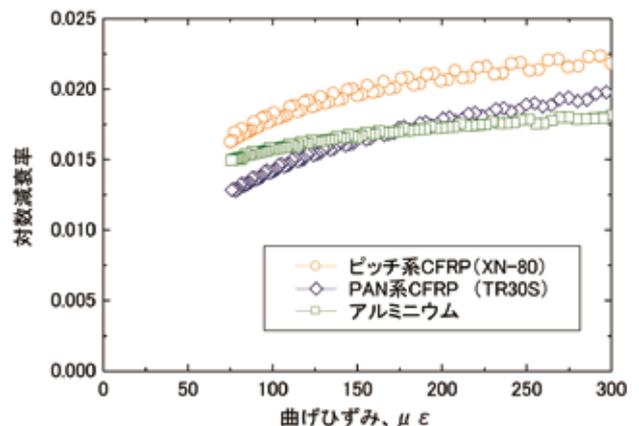


図10 各種材料の対数減衰率

3.2 中実板状CFRPロボットハンド試験体の曲げ振動減衰特性

(1) ロボットハンド試験体および試験方法

前述のCFRP試験片による振動減衰特性評価より、高弾性ピッチ系CFRPは、PAN系と比べて高い振動減衰特性を有するという結果が得られた。そこで次に、ロボットハンドをモデルとして、ピッチ系CF、あるいはPAN系CFを使用したハンド試験体を製作し、曲げ振動減衰特

性を比較する。ピッチ系 CF として XN-80 を、PAN 系 CF として TR30S を使用し、幅 80mm、厚さ 12mm、長さ 1150mm の中実板状のハンド試験体を成形した。このハンド試験体の大きさは、第 4 世代 (G4) 用 LCD 基板搬送ハンドに相当する。

曲げ振動減衰特性は、実際の使用条件と同一である片持ち梁式で評価した。全長 1150mm の板状試験体の固定側 150mm の範囲を架台上に水平に固定し、長さ 1000mm の片持ち梁状に保持した。先端に 1.0kg の錘を吊り下げて初期たわみを与えた後、糸を切断することにより自由振動させ、振動中におけるハンド試験体先端部のたわみをレーザー変位計により測定し、減衰自由振動波形を得た。

(2) 高弾性ピッチ系 CFRP ロボットハンドの振動減衰特性

図 11 および図 12 に、それぞれ XN-80 および TR30S ハンド試験体の減衰自由振動波形を示す。試験開始時のたわみは、1.0kg の錘を吊り下げたときの先端部のたわみであり、ハンド試験体の曲げ剛性の指標となる。すなわち、この値が小さいほど、高い曲げ剛性を有することを意味する。TR30S 試験体の初期たわみ 2.4mm に対して、XN-80 試験体で生じているたわみは、1mm 以下である。このように、ロボットハンドに高弾性ピッチ系 CF を使用することにより、ガラス基板積載時に発生するたわみを抑制することが可能となる。

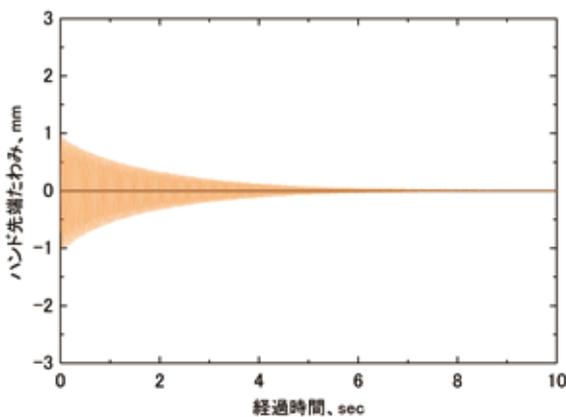


図 11 XN-80 ハンドの減衰自由振動波形

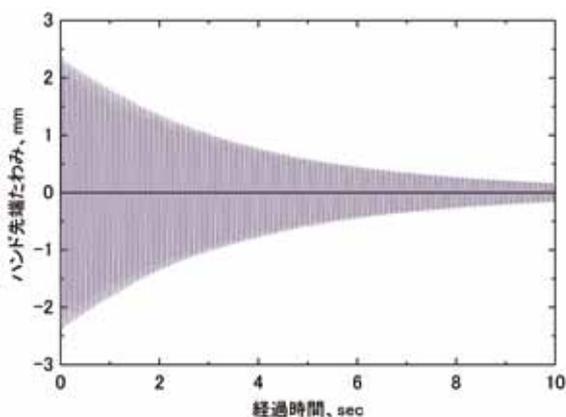


図 12 TR30S ハンドの減衰自由振動波形

また振動の収束挙動に着目すると、TR30S 試験体では、10 秒経過後においても振幅 $\pm 0.2\text{mm}$ の小さな振動が残留しているが、XN-80 試験体の場合は、約 3 秒経過時点で、振幅が約 $\pm 0.2\text{mm}$ へ収束し、7 秒～8 秒経過後には振動が完全に収束している。

以上の通り、高弾性ピッチ系 CFRP ハンドは、高剛性かつ高振動減衰性を有しているが、ハンドの長尺化が進んでいることを鑑みて、次章では、その振動減衰特性をさらに向上させることを試みる。

4. 高弾性ピッチ系 CFRP ロボットハンドの振動減衰特性向上に関する検討

4.1 振動減衰特性向上の手法

高弾性ピッチ系 CFRP ハンドは、そのもの自体でも高い振動減衰性を有するが、大型 LCD 搬送用の長尺ロボットハンドとして使用する場合には、その振動減衰特性をさらに向上させることが重要である。

CFRP の振動減衰特性を高める手法として、プリプレグ層間に、柔軟性を持つ制振シートを挿入する構造が挙げられる。CFRP に振動が与えられた場合、制振層が振動エネルギーを吸収することにより、振動を迅速に減衰させることが可能となる。しかしながら、CFRP の内部に柔らかい素材を挟み込む構造は、ハンドの曲げ剛性の低下を招く恐れがあることから、適切な制振材料を選定することが重要となる。これまで制振シートとして、熱可塑性材料を使用することが多かったが、当社では、SBR (スチレンブタジエンゴム) に着目し、振動減衰特性の向上と曲げ剛性の維持を両立させることを検討した。

4.2 フォークの高振動減衰特性化

まず、ロボットハンドユニットを構成するフォークとフレームのうち、ガラス基板が積載されるフォーク部に着目し、その振動減衰特性向上について検討する。

制振層を有するフォーク試験体、CFRP+SBR 試験体は、以下の手順により成形した。まず全長 3200mm の矩形断面を有する芯金を用意した。CF 配向方向がフォークの長手方向と同一であるストレート層には高弾性ピッチ系 CF、XN-80 プリプレグを、これと直角方向の CF 配向を有する強化層には高強度 PAN 系 CF、TR30S プリプレグを使用し、CFRP フォークとして最適な機械的特性が得られるよう両者を組み合わせながら、芯金の周りに積層した。制振シートとして SBR を使用し、CF プリプレグの間に挟み込む構造とした。最後に CF 織物プリプレグを最外層として巻き付けた。

以上の積層工程の後、CF プリプレグ積層体を真空バッグ内にセットし、オートクレーブを用いて 130℃ で加熱硬化した。脱芯後、CFRP と SBR シートが互いに接着された中空パイプ構造の CFRP+SBR フォーク試験体を得た。試験体の寸法は、幅 80mm × 高さ 30mm × 全長

3200mm、肉厚 3mm である。また、曲げ振動減衰特性に与える SBR シートの効果を検討するため、SBR シートを組み合わせず、CF プリプレグのみを用いた All_CFRP フォーク試験体を成形、評価した。

CFRP フォーク試験体の曲げ振動減衰特性は、前述の片持ち梁式で評価した。全長 3200mm のフォークの固定側 200mm の範囲を架台上に水平に固定し、長さ 3000mm の片持ち梁状に保持した。先端に 2.5kg の錘を吊り下げて初期たわみを与えた後、糸を切断することにより自由振動させ、フォーク先端部のたわみを測定することで、減衰自由振動波形を測定した。

図 13 および図 14 に、それぞれ CFRP+SBR および All_CFRP フォーク試験体の減衰自由振動波形を示す。振動減衰特性を比較するため、フォーク先端の初期たわみ 15mm が 5mm へ収束するまでに要する時間を比較する。SBR 制振シートを持たない All_CFRP フォークの場合、振動収束に約 7 秒を要しているのに対して、CFRP+SBR フォークでは、その所要時間が約 2 秒へ短縮している。

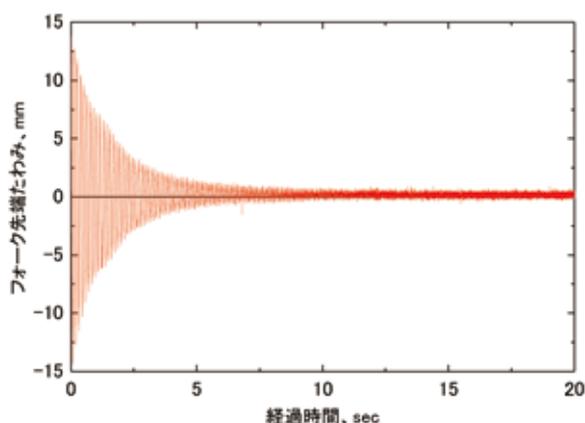


図 13 CFRP+SBR フォークの減衰自由振動波形

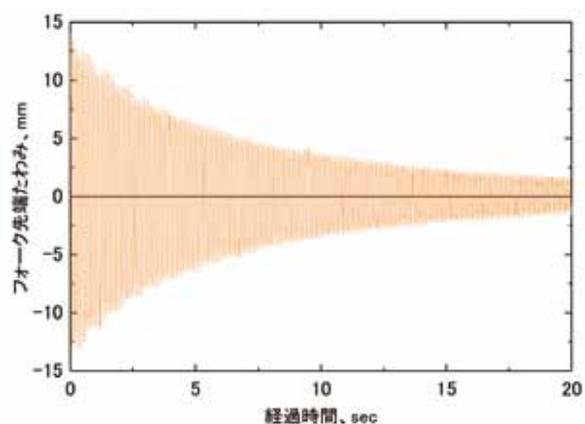


図 14 All_CFRP フォークの減衰自由振動波形

図 15 は、フォーク試験体の減衰自由振動波形から計算した対数減衰率である。All_CFRP フォークの対数減衰率は、0.01 ~ 0.03 の範囲であり、CFRP 試験片の曲げ振動

特性評価により測定された XN-80 の対数減衰率(図 10)と同等の値を示した。これに対して、CFRP+SBR フォークの対数減衰率は 0.05 ~ 0.09 の範囲へ向上しており、CFRP 層間に SBR 制振シートを挿入する制振構造により、フォークの振動減衰特性が大きく向上されるという結果を得た。

ここで振動開始時のたわみ、すなわちフォークの曲げ剛性に着目すると、両フォーク試験体いずれも約 15mm であり、SBR 制振シートを挿入した場合でも、曲げ剛性は変化していない。以上のことから、制振層として SBR シートを使用することにより、曲げ剛性を維持しながら、振動減衰特性を高めることが可能であることが示された。

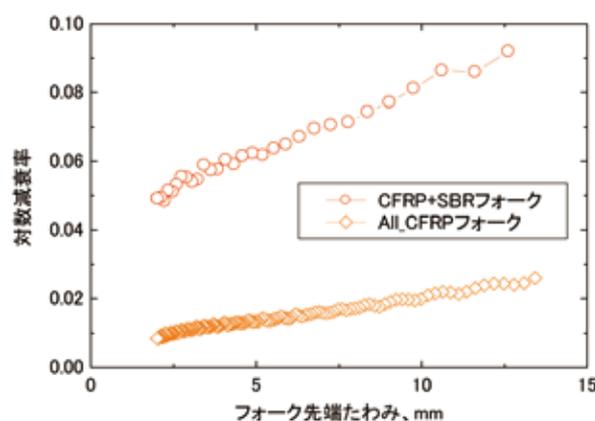


図 15 CFRP フォークの対数減衰率の比較

4.3 ハンドユニットの高振動減衰特性化

次に、フォーク部に加えてフレーム部にも制振シートを組み合わせることで、ハンドユニット全体に制振構造を付与することを検討する。

フレーム試験体には、XN-80 プリプレグおよび TR30S プリプレグを組み合わせて使用した。制振層である SBR シートは、フォーク試験体の場合と同様に、CF プリプレグの間に挟みこむ構造とした。SBR 制振シートを有する CFRP + SBR フレーム、および SBR 制振シートを持たない All_CFRP フレームの二種類のフレーム試験体を成形した。フレーム試験体の寸法は、幅 300mm × 高さ 100mm × 全長 2000mm、肉厚 5mm である。

図 16 は、ハンドユニット試験体である。フレームは、中央部が架台に固定され、これに 4 本のフォークが片持ち梁状に取り付けられた構造を有する。中央寄りのフォーク 2 本に合計 2.5kg の錘を吊り下げ、糸を同時に切断することにより、自由振動を発生させた。ハンドユニットの場合、フレームが振れることで、中央寄りのフォークと比べて、外側フォークのほう大きいたわみ、また振動時の振幅も大きくなる傾向を示す。そこで、振動減衰の挙動を捉えやすい外側フォークの先端たわみを測定することにより、減衰自由振動波形を得た。

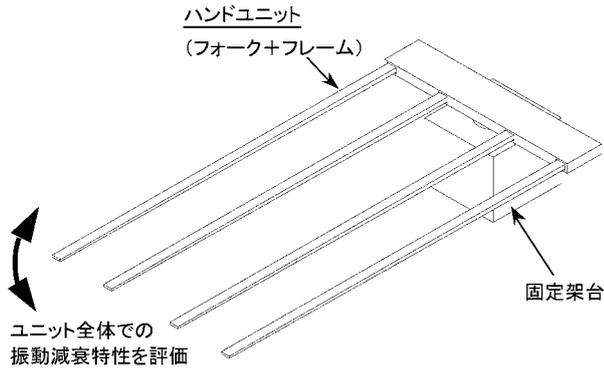


図16 ハンドユニット試験体の振動減衰特性評価方法

図17は、フォーク、フレームともにSBR制振シートを付与したCFRP+SBRハンドユニット、図18は、フォーク、フレームいずれにもSBR制振シートを使用していないAll_CFRPハンドユニットの減衰自由振動波形である。CFRP+SBRハンドユニットは、All_CFRPハンドユニットと比べて、優れた振動減衰特性を有しているとともに、フォーク単体の場合と比べても、より短時間で振動が収束している。すなわち、図13のCFRP+SBRフォーク試験体単体の場合、20秒経過後も微小な振動が続いているのに対して、フレームにも制振構造を付与した場合には、20秒経過時点での振幅が小さい。これは、ハンドユニットの振動が、フォークおよびフレームの混合モードになっており、フレームのねじり振動減衰特性を高めることが、フォーク先端における振動の収束挙動を改善するうえで、効果を発揮していることに因ると考えることができる。

以上の通り、フォークだけでなく、フレームに対しても制振構造を与えることは、LCD基板搬送用ロボットハンドユニットとしての振動減衰特性を向上させるうえで有効な手法であるという知見が得られた。

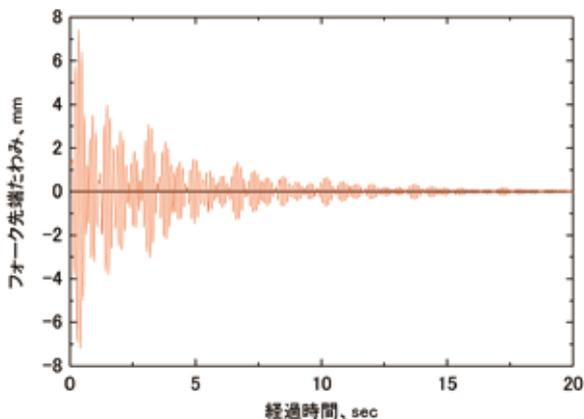


図17 CFRP+SBRハンドユニットの減衰自由振動波形

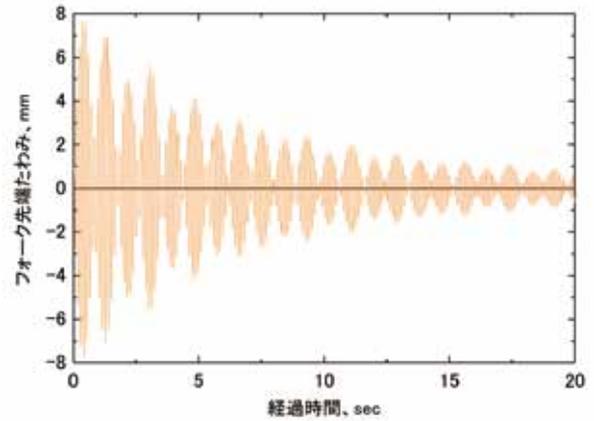


図18 All_CFRPハンドユニットの減衰自由振動波形

5. まとめ

LCD基板搬送ロボットに用いられるCFRPハンドの高性能化を目的として、振動減衰特性を高めたロボットハンドを開発した。高弾性ピッチ系CFRPに対して、制振材としてSBRシートを組み合わせることにより、高い剛性と優れた振動減衰特性を両立することを可能とし、現在、ロボットメーカーへの提案を進めている。今後も、需要家からの情報とニーズを収集することにより、現行商品の高性能化によるシェア拡大を図るとともに、高弾性ピッチ系CFRPの新たな用途開発を進めていきたいと考える。