高精度かつ短時間整定の位置決めを可能とする 3D 造形軸継手形状の開発

Development of 3D-manufactured coupling achieves high-precision and short-time settling positioning

研究代表者　豊田工業高等専門学校　准教授　田中淑晴
Toshiharu Tanaka

Rigidity and damping characteristics of a shaft coupling that connects a servo motor and a lead screw of a general precision positioning device affect the positioning accuracy. Moreover, the mechanical elements such as the shaft coupling and linear motion rolling guideway have natural frequencies, and it is necessary to consider the resonance phenomenon of apparatus and each mechanical element. Therefore, this study focuses on the characteristics of the shaft coupling. The purpose of this study is to investigate effects of the change in coupling’s shape on the rigidity and damping ability through experiments and analysis. This paper reports that evaluated results of the rigidity and damping ability in the longitudinal and torsional directions, and resonance frequency.

要旨

一般的な精密位置決め装置のサーボモータとボールねじを接続し動力伝達する軸継手の剛性や減衰能が装置の位置決め精度に影響を及ぼす．さらに，軸継手や転がり案内などの位置決め装置を構成する機械要素は固有振動数を有し，位置決め時には共振現象に留意する必要がある．そのため，精密な位置決めを達成するためには，各機械要素の機械的特性が重要となる．そこで，本研究では軸継手に着目し，その形状の変化が剛性および減衰能に及ぼす影響について実験と解析を通じて具体的に調べることを目的とする．本報では，長手およびねじり方向の剛性と減衰能，ハンマリング試験による共振周波数について評価を行った結果について報告する．

1．　まえがき

機械要素の軸継手は，サーボモータのロータ軸とボールねじなどの送りねじとを接続し動力を伝達する．この機構は，ほとんどの工作機械であるマシニングセンタなどの位置決め装置に採用される．回転系で表現される軸継手やボールねじのねじり剛性や減衰能が装置の位置決め精度に影響を及ぼすため，高精度な位置決めを達成するためには，それらの特性を明らかにする必要がある．従来までの研究では，フレキシブルカップリングのねじり剛性[1]，軸継手とボールねじによる送り駆動系がねじり振動モードに及ぼす影響[2]，ボールねじのねじり振動が NC 工作機械のサーボ系の安定性に及ぼす影響[3]などがある．これらの報告からも，ボールねじや軸継手などの回転系の運動特性が位置決め装置の特性に影響を及ぼすことは明白である．そのため，装置の位置決め精度向上のため，剛性と減衰性を適切に両立させることが求められる．

一方で，機械要素を製作する際において材料の使用量を減少させることは，コスト面だけでなく近年の環境問題などの観点からも重要な課題となっている．軸継手においても，その機械的特性の単純な剛性の大小の検討だけでなく，比剛性の検討など効率よく性能を向上させることが求められる．

本研究では，従来からの製造方法では製作することが非常に困難である中空を有する軸継手構造を提案する．中空を有する構造を提案する理由は，ハニカム構造と呼ばれる六角形はエネルギー吸収構造として着目されており，曲げや圧縮に対する強さについての検討[4][5]がなされ，剛性と減衰能の両立および材料の使用量の低減の観点より有益であると考えたためである．本報では，長手方向およびねじり方向についての測定実験と，Finite Element Method を用いた解析結果について報告する．さらに，中空を有する構造とすることによって，剛性と減衰性を任意な変化を可能とできれば，他の要素との共振周波数が一致してしまう場合などに，減衰能を維持しつつ，剛性を変化させることで共振周波数を変化させることができる．

２．中空軸継手の構造

提案する中空を有する継手構造を図１に示す．軸継手の外径は50mm，軸径14mmであり，長さは71mmで全て同一である．穴の形状については，同図(a)ハニカム形状である六角形，同図(b)弾性ヒンジとして剛性について検討[6]されている四角形，同図(c)丸穴とする．また，各形状の穴間の壁肉厚は最薄部で1mmである．いずれの穴も円周方向に沿って穴が貫通しており，個数は28個である．基本構造における六角形の外接円直径は5mm，四角形の一辺長さは4.03mm，丸穴の直径は4.55mmとする．これらの寸法は，軸継手の製作に用いられる体積を同一とするためである．これらのような中空の構造は，放電加工機やマシニングセンタなどの工作機械では製作できず，近年技術発展が目覚ましい3Dプリンタによって製作することができる．また，これらの形状の比較対象として，(d)中実，(e)外くびれ，(f)内くびれを追加する．外くびれ形と内くびれ形は，(a)～(c)の形状とほぼ同一の体積となるように切欠き半径を決定する．解析には，Autodesk社inventor®の機能を用いた．材質はPLA樹脂，積層ピッチは0.15mmであり，長手方向に積層させて製作する．解析を行うにあたり，PLA樹脂の強度に関連するパラメータは，充填密度や積層の方向などの要因によって大きく変化する．例えば，縦弾性係数については文献[7]～[11]によって1.27～4.65GPaとされており，その値は幅広く，また全ての強度パラメータが示されていない．そのため，積層する方向が同じである文献[7]から縦弾性係数は2.904GPa，ポアソン比は0.335，降伏強さは55.68MPaを採用し，同文献に示されていない極限強さは他文献[8]～[11]を参考にて降伏強さの約1.4倍とする．

３．実験方法と実験結果

３．１　長手方向の静剛性試験

長手方向の静剛性を評価するため圧縮試験を実施した．圧縮試験の条件は，負荷速度0.5KN/sec.，サンプリング周期1msとして，25kNから除荷したときのデータを用いて評価する．圧縮試験と解析による結果を図２に示す．プロットが実験結果，実線が解析結果である．全体を見渡すと，実験結果と解析結果がよく一致していることが分かる．実験結果を見

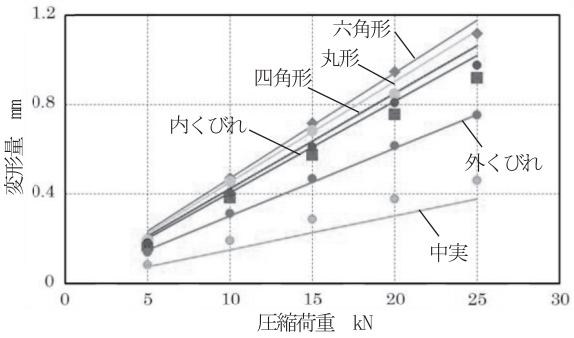


図２　圧縮試験結果

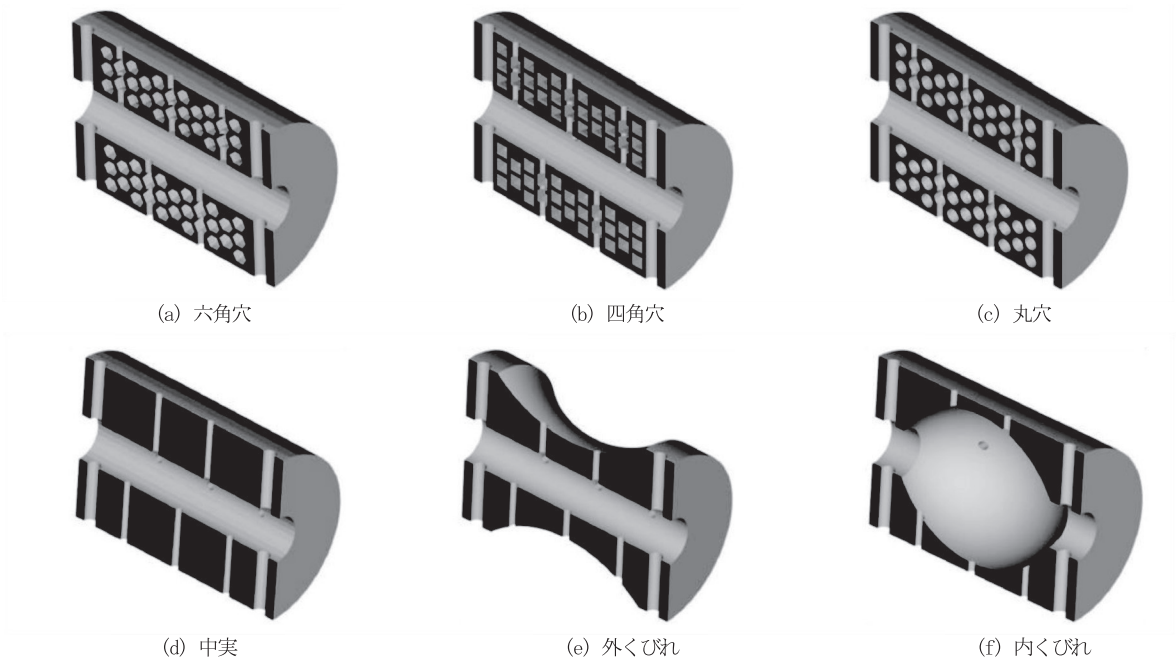


図１　軸継手構造の断面図

ると，中空構造では圧縮剛性の大きい順に四角穴，丸穴，六角形となった．解析結果は，実験結果とほぼ同じ傾向となったが，四角穴と内くびれの順序に違いがあった．この原因として，軸継手を積層して製作する際，四角穴の空洞部の天井部がわずかに歪み，剛性が大きくなったためと考えられる．これは，熱溶解積層方式3Dプリンタによって製作されたとき生じる事象であり，サポート材を入れることによって解決できる．ただし，サポート材による強度把握を別途必要とするため，今回の製作ではサポート材を用いないこととした．実験結果と解析結果の比較において，最も乖離した割合が大きいものは中実形状の負荷荷重15kN時であり，解析結果に対して約21%の差が生じた．比較結果全体では，解析結果に対して平均8.2%程度の差が生じた．

３．２　ねじり方向の静剛性試験

ねじり剛性を測定するための試験機を図３に示す．軸継手の方端を固定軸に取付け，軸継手の回転を防止する．他端には可動軸を取付け，ねじり荷重を付与するため，軸の中心から100㎜の位置にロードセルを取付けて力を与え，ねじりモーメントを軸継手に作用させる．そのときのねじり角をロータリエンコーダにて計測する．ロータリエンコーダはデジタル分解能0.0018°であり，微小な回転角を計測するために十分である．軸継手ごとに３回ずつ計測する．測定結果の一例を図４に示す．ねじりモーメントを3N･mまで印加すると徐々にねじり角が大きくなり，除荷すると弾性力によってねじり角が小さくなる．この除荷時の挙動から剛性を評価する．また，ねじり角とねじりモーメントが単純な線形関係にないことから減衰能を有すること，および除荷後に0.1°程度のねじり角が生じていることから，微小すべりに似た現象が生じていることが分かる．全ての軸継手においても，値の大小はあるものの同様の傾向が確認できた．

ねじり試験による実験結果と解析結果を図５に示す．プロットが実験結果（左軸），実線が解析結果（右軸）である．中空構造軸継手のねじり剛性の大きい順に，四角穴，丸穴，六角穴となり，実験結果と解析結果ともに同じ傾向となった．しかし，実験結果と解析結果のねじり角の値は，10倍以上の違いが生じた．この原因として，解析に用いた横弾性係数の値の違いが考えられる．解析では，ソフトウェアの仕様上の制限から等方均質弾性体と仮定している．そのため，縦弾性係数，横弾性係数，ポアソン比ともに一定である．各定数の応力依存性の考慮など解析手法について引き続き検討が必要である．その他にも，拘束条件が完全には一致していないことや固定部における微小すべり，積層樹脂の接合状態の影響なども考えられる．

３．３　比圧縮剛性と比ねじり剛性

比圧縮剛性を単位質量あたりの圧縮に対する剛性，比ねじり剛性を単位質量あたりのねじりに対する剛性と定義し，まとめた結果を図６に示す．この結果から，比圧縮剛性および比ねじり剛性ともに，ほぼ同様の値であることから中空の穴形状の違いによる影響が小さいことが分かる．また，圧縮に対する剛

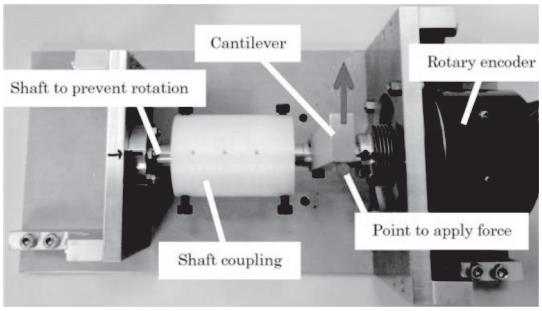


図３　ねじり剛性測定試験機

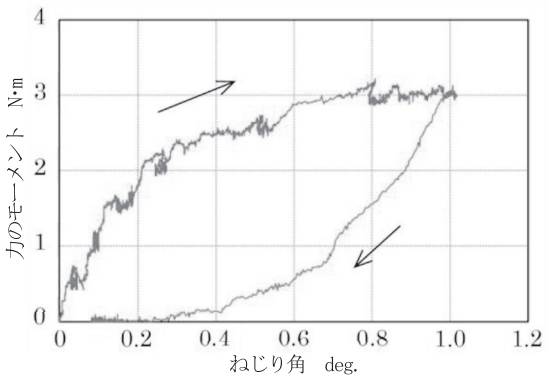


図４　ねじり剛性試験結果の例

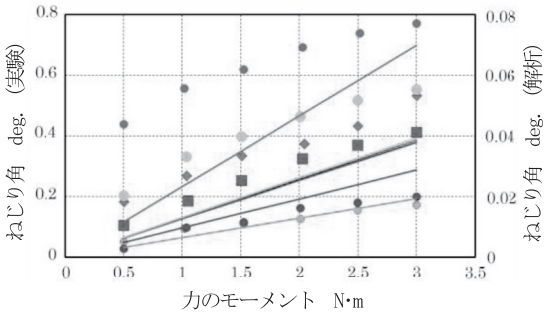


図５　ねじり角の実験と解析結果の比較

性については中実，ねじりに対する剛性については内くびれの形状が，素材量に対して最も効率が良いことが分かる．特に，ねじりに対する剛性については，軸心近傍に材料が無く，軸心から離れる外径部近傍に材料があることにより，素材量に対する効率が高くなる．比圧縮剛性は実験結果と解析結果がおおむね一致し，比ねじり剛性の比較結果が乖離するのは，横弾性係数の値の違いに因るものである．

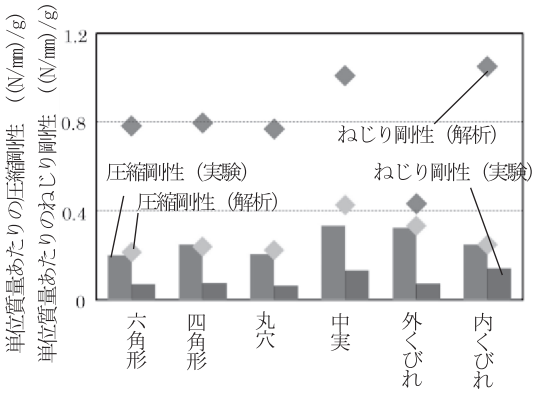


図６　単位質量あたりの各剛性の比較

３．４　動的特性（金属）

前節までは静的な特性について述べた．本節では動的な特性について述べる．動的解析を行うためにsolidworks©の解析機能を使用する．

３．４．１　固有振動数の解析

穴形状の変化がねじりの固有振動数に及ぼす影響を調査するため，図７のように解析モデルを作成し拘束条件を設定する．解析モデルの外形は実験で用いた軸継手と同じとし，拘束条件は片端を完全固定とし，軸を通すための中央円筒部をヒンジ固定とする．また，穴形状の代表長さの定義を図８に示す．各形状の代表長さは，丸穴が直径，四角形は一辺の長さ，四角形は外接円直径とする．この代表長さの変化，すなわち断面積が軸継手の慣性モーメント，ねじりばね定数，固有振動数に及ぼす影響について解析した結果を，図９，１０，１１にそれぞれ示す．

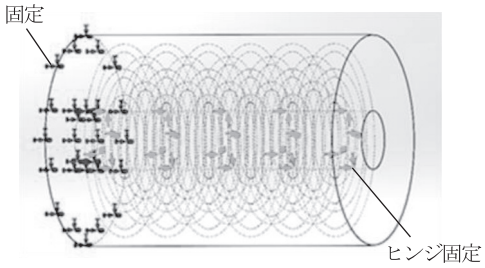


図７　解析モデルと拘束条件（固有振動数）

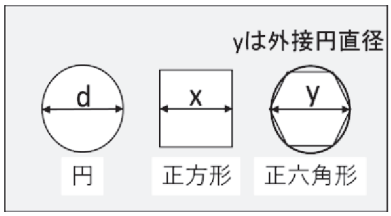


図８　穴形状の代表長さの定義

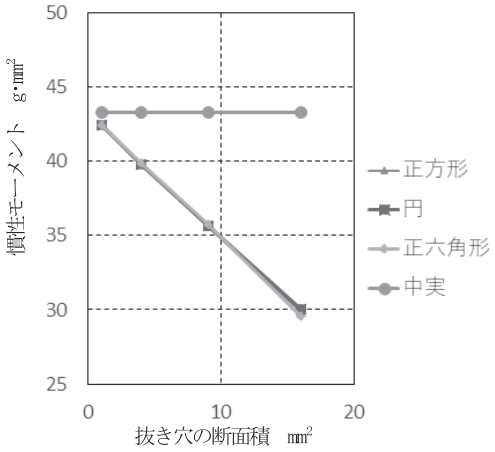


図９　穴の断面積に対する慣性モーメントへの影響

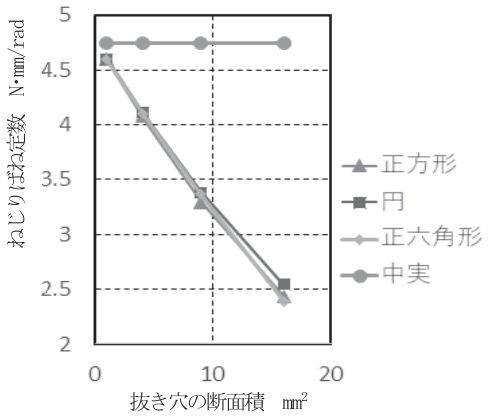


図10　穴の断面積に対するねじりばね定数への影響

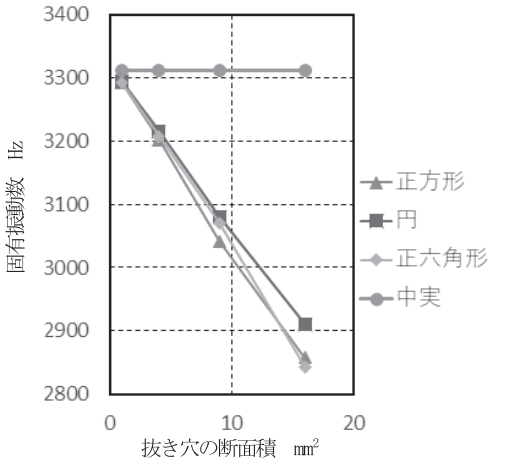


図11　穴の断面積に対する固有振動数への影響

図９の穴の断面積に対する慣性モーメントへの影響では，抜き穴の断面積が大きくなるにつれて，慣性モーメントが小さくなることが分かる．その一方で，抜き穴の形状による違いはほとんど見られない．これは，抜き穴の面積がほぼ同一であるためである．

図１０の穴の断面積に対するねじりばね定数への影響についても，断面積が大きくなるにつれて，ねじりばね定数が小さくなる．抜き穴の形状による違いについては，円形のものが四角形や六角形のものと比較して，若干ねじりばね剛性が大きくなる．これは，四角形や六角形にある角部がないため，応力集中が生じないため，力のモーメントに対してねじり角が小さくなったと推測される．

図１１の穴の断面積に対する固有振動数への影響では，穴の断面積が大きくなるにつれて固有振動数が小さくなる．これは，図１０のねじりばね剛性の結果である断面積が大きくなるにつれて小さくなることに因る．形状の違いも図１０と同様の傾向を示した．

３．４．２　減衰比の解析

穴形状の変化がねじりの減衰比に及ぼす影響を調査するため，図１２のように解析モデルを作成し拘束条件を設定する．モーダル時刻歴解析を用いて，ねじり方向に速度を与えた際の変位の変化を調査する．拘束条件は，軸の片端面を固定し，軸を通す円筒部をヒンジ固定とする．もう一方の端面に初期速度 5rad/s を与える．

図１３に解析結果を示す．抜き穴の無い中実が最も減衰比が小さいことが分かる．それに対し，抜き穴を設け，その断面積が大きくなるにつれて減衰比が大きくなる．これは，抜き穴を設けることによって，ねじりばね剛性が変化することにも関連して軸継手内部がねじれやすくなり，エネルギーを消費するためと考えられる．

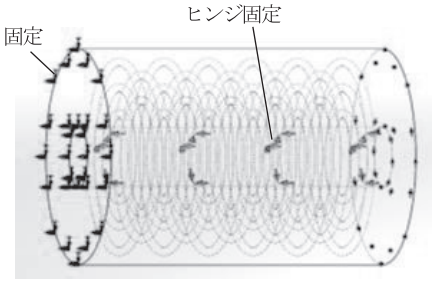


図 12　解析モデルと拘束条件（減衰比）

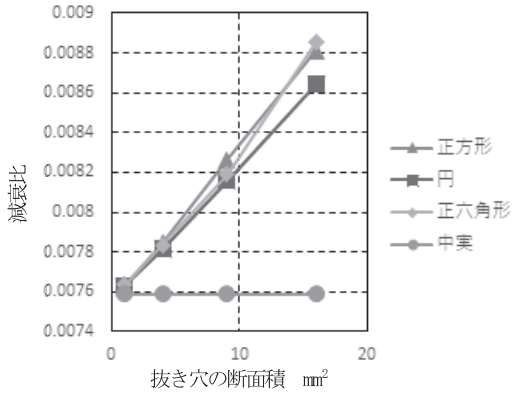


図 13　穴の断面積に対する減衰比への影響

３．４．３　位置決め装置の特性測定実験

実際の位置決め装置に軸継手を組み込み，軸継手の抜き穴の形状変化が，装置の特性に及ぼす影響を調査するための実験装置を図１４に示す．実験装置は，サーボモータとボールねじを本研究課題の軸継手にて連結し，ナット，ステージ，直動転がり案内から構成される．実際の位置決めを想定し，ナット部にインパルスハンマーによる打撃加振力を与え，サーボモータへ伝播される振動を測定する．軸継手ごとに３回実験を実施する．

打撃加振によってサーボモータへ伝播される振動のスペクトラムを取得し，その結果からピーク周波数についてまとめた結果を図１５に示す．最もスペクトラムが大きい周波数を基準として，その前後のスペクトラムが増大する周波数をプロットする．軸継手の抜き穴の形状が装置としての共振周波数の変化に及ぼす影響は小さいことが分かる．一方で，共振周波数前後のスペクトラムのピークを示す周波数には，抜き穴の形状ごとに差が生じることが分かった．精密な位置決めを目指す際，抑制すべき振動の周波数成分が異なることを示す．

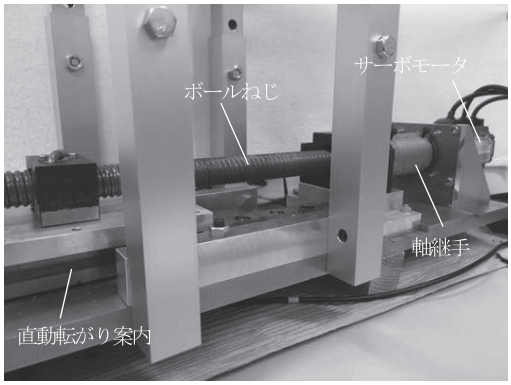


図 14　加振実験装置

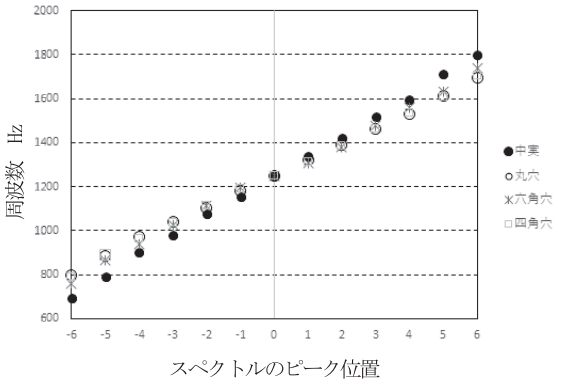


図 15　加振実験によるスペクトラムピーク値の周波数

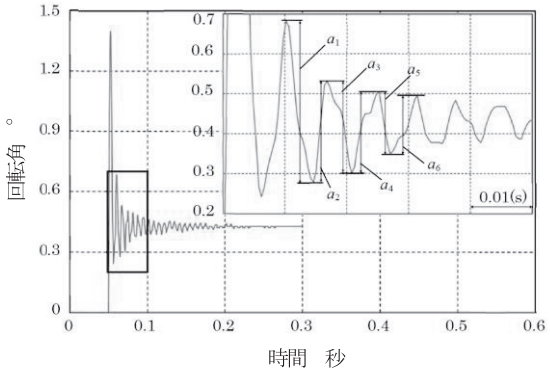


図 16　加振実験による測定結果例

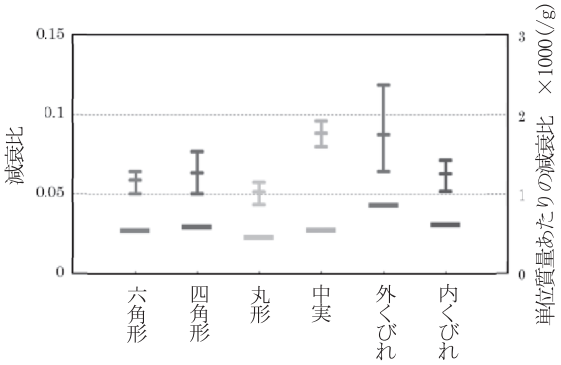


図 17　減衰比と単位質量あたりの減衰比

３．５　動的特性（樹脂）

軸継手の動的特性であるねじり減衰を測定するため，図３の装置において回転力を与える印加部にインパルスハンマーによる打撃力を与え，ロータリエンコーダにて回転角を測定する．打撃を与えた際の軸継手の回転角の振動波形から対数減衰率を求め減衰比を求める．打撃力にばらつきが生じるため，各軸継手で５回ずつ測定する．測定結果の一例を図１６に示す．インパルスハンマーによる打撃によって生じた大きな回転角のアンダーシュート後の最初の最大角度を基準として，3 周期分の合計 6 個の振動全振幅を評価対象とする．得られた実験波形から式(1)にて対数減衰率，式(2)にて減衰比を求める．

$$\Lambda = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}\left[2\log_e \frac{a_i}{a_{i+1}}\right] \qquad (1)$$

$$\zeta = \sqrt{\frac{\Lambda^2}{\Lambda^2 + 4\pi^2}} \qquad (2)$$

ここで実験回数から n=5, a は振動の全振幅とする．算出された減衰比をまとめたものを図１７に示す．図中のエラーバーにおいて，上側バーは最大値，中間バーは平均値，下側バーは最小値を示す．また，各平均値を用いて算出した単位質量あたりの減衰比も示す．抜き穴の形状が異なる軸継手において，減衰はおおよそ 0.05～0.1 となっている．これは，金属の軸継手の解析結果では，減衰比は 0.01 以下であることから，樹脂製軸継手は材料の性質から減衰比が大きくなる．減衰比の平均値は穴形状の違いに因る大きな変化は無いが，不偏標準偏差は六角形と丸穴がほぼ同じに対して四角形が大きくなった．この原因は，四角形は振動を受ける面が直交の 2 方向のみであり，打撃力の斜め方向の振動に対して剛性が小さくなり，打撃方向の変化が大きな影響を及ぼしたと考えられる．単位質量あたりの減衰比については，静的特性時の中実の優位性は見られず，ねじりに対する減衰に対して中空と同程度となった．

次に，図１６のような打撃試験によるねじり角の振動波形から共振周波数を算出した結果を図１８に示す．解析の結果については，ソフト上で慣性モーメントとねじりばね剛性を求めた．共振周波数の解析では，横弾性係数がばね剛性に影響を及ぼす．解析結果と実験結果の全ての比較結果において，横弾性係数が 10 倍程度の違いが見られた．そのため，図５の実験結果を最小二乗法による近似直線を求め，その傾きからねじりばね定数を計算し，ねじり剛性を補正した解析結果を合わせて示す．解析結果については，横弾性係数を補正することによって，打撃試験による実験結果から推定される共振周波数と，よく一致することが分かる．ねじり剛性の比較結果

も踏まえると，横弾性係数の値の設定が正確な解析を行うために重要となる．解析結果と実験結果から得られた中実の共振周波数は約 180Hz であることに対して，抜き穴のある中空形状の共振周波数は，解析結果では約 100～120Hz，実験結果では約 140～160Hz となった．抜き穴を施した軸継手は，ほぼ同じ体積にも関わらずねじり剛性と慣性モーメントが変化したことによって，共振周波数も変化した．これらの結果から，軸継手の共振周波数が他の機械要素の共振周波数と一致する場合などに，軸継手の構造を変化させることによって減衰性を維持しつつ，ねじり剛性または共振周波数を変化させることができることが示唆された．

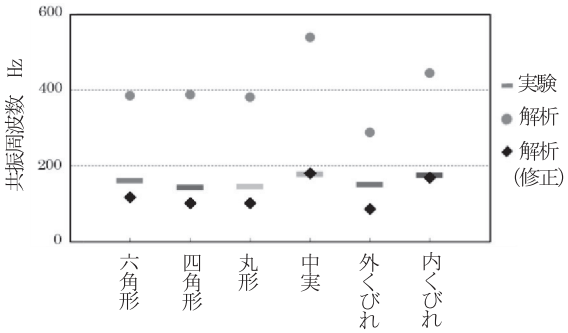


図 18　実験と解析による固有振動数の比較

4．あとがき

高精度かつ短時間整定の位置決めを目的とし，六角形や四角形などの中空構造を有する軸継手を製造し，その基本的な特性について，長手方向およびねじり方向についての測定実験と，Finite Element Method を用いた解析結果について検討を行った．その結果，次のことが明らかとなった．

金属軸継手においては，

1) 解析結果から，抜き穴の断面積を同じとした場合には，穴形状の違いによる慣性モーメントへの影響はほとんどない．一方で，ねじりばね剛性と共振周波数については，抜き穴形状が四角形と六角形ではほとんど違いが見られないが，丸穴形状では異なる結果となった．
2) 減衰性の解析においては，中実形状の軸継手より抜き穴を設けた軸継手の方が，減衰能が高くなることが分かった．抜き穴形状の違いでは，丸穴形状より，四角形や六角形の形状の方が減衰能が高くなった．

樹脂継手については，

3) 長手方向の圧縮剛性は，解析結果と実験結果がおおむね一致した．
4) ねじり剛性については，解析において横弾性係数の設定が困難であり，解析結果と実験結果に乖離が見られた．これは，製造方法による異方性特有の課題である．その一方で，打撃試験の結果から求められる横弾性係数を用いて補正することによって，共振周波数が解析結果と実験結果とで，よく一致することが分かった．
5) 単位質量あたりの減衰性については，剛性などで優れた中実形状の軸継手の優位性は認められず，抜き穴の形状の大きさや個数を変更できる中空構造の軸継手の方が，減衰性の調整が可能である．
6) 抜き穴を有する軸継手形状とすることで，外形寸法が変化することなく，剛性，減衰性および共振周波数を調整できる可能性を示した．

本研究を遂行するにあたり，助成頂いた公益財団法人マツダ財団に対し，御礼申し上げます．

発表論文

[1] 田中淑晴，大石利樹，清水利弘，小谷明，大岩孝彰，中空構造軸継手の提案と基礎的機械特性の評価，設計工学，Vol. 57, No. 1 (2022/1) pp. 29-38.

[2] 大石利樹，田中淑晴，清水利弘，小谷明，軸継手の抜き穴形状の違いによる剛性の変化，SICE 中部支部シンポジウム&若手研究発表会 2020，(2020/11) PA-5.

[3] 大石利樹，田中淑晴，清水利弘，大山伸幸，朝比奈充輝，蓮見侑士，小谷明，軸継手構造の変化がねじれ剛性と振動特性に及ぼす影響，日本設計工学会東海支部令和 2 年度研究発表講演会講演論文集，(2021/3) pp. 90-92.

[4] 太田一輝，田中淑晴，清水利弘，小谷明，中空構造軸継手のねじり振動に関する理論解析，SICE 中部支部シンポジウム&若手研究発表会 2021，(2021/11) PB-8.

口頭発表、受賞等

[1] 大石利樹，田中淑晴，清水利弘，小谷明，軸継手の抜き穴形状の違いによる剛性の変化，SICE 中部支部シンポジウム&若手研究発表会 2020，(2020/11) PA-5.

[2] 大石利樹，田中淑晴，清水利弘，大山伸幸，朝比奈充輝，蓮見侑士，小谷明，軸継手構造の変化がねじれ剛性と振動特性に及ぼす影響，日本設計工学会東海支部令和 2 年度研究発表講演会

講演論文集，(2021/3)pp.90-92.

[3] 太田一輝，田中淑晴，清水利弘，小谷明，中空構造軸継手のねじり振動に関する理論解析，SICE 中部支部シンポジウム&若手研究発表会 2021，(2021/11)PB-8.

参考文献

（1） Zhao, B., Zhao, Y., Feng, J. and Peng, X. : Numerical and experimental investigation of the torsional stiffness of flexible disc couplings, Int' l J. of Mechanical Sci., 114 (2016), 207.

（2） 長尾淳志，佐藤隆太，白瀬敬一，遠藤征司，佐々木太一：カップリング及びボールねじが送り駆動系のねじり振動モードに及ぼす影響，2017 年度精密工学会秋季大会学術講演会講演論文集，(2017)，425.

（3） 藤田純，羽山定治，濱村実，垣野義昭，松原厚，大脇悟史：NC 工作機械のボールねじのねじり振動がサーボ系の安定性に及ぼす影響，精密工学会誌，65，8 (1999)，1190.

（4） 楳田努，三村耕司：エネルギー吸収部材としてのハニカム構造の圧潰挙動に影響する因子の検討，日本機械学会 2019 年度年次大会講演論文集，(2019)，F04102.

（5） 中植樹，梅津浩一，日下正広，木村真晃：ハニカム構造を模擬した薄肉多角形管からなるクラッシュボックスに関する研究，日本機械学会 M&M2019 材料力学カンファレンス講演論文集，(2019)，U00078.

（6） 大岩孝彰，杉本敏彦：弾性ヒンジの形状最適化に関する研究，精密工学会誌，63，10 (1997)，1454.

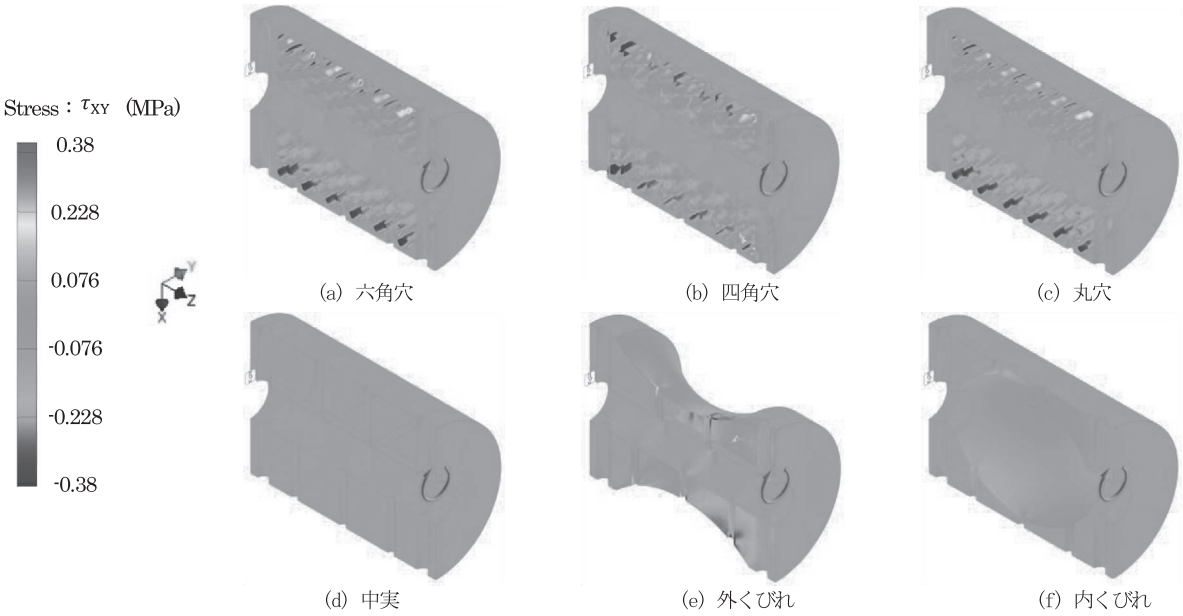
（7） Dai, S., Deng, Z. C., Yu, Y. J., Zhang, K., Wang, S. H. and Ye, J. : Orthotropic elastic behaviors and yield strength of fused deposition modeling materials, Polymer Testing, 87 (2020), 106520.

（8） Song, Y., Li, Y., Song, W., Yee, K., Lee, K.-Y. and Tagarielli, V.L. :Measurement of the mechanical response of unidirectional 3D-printed PLA, Materials and Design, 123 (2017), 154.

（9） Vendland, L. E., Volkov-Muzylev, V. V., Demidov, A. N. and Borisov, Y. A. : Room temperature testing of PLA plastics, J. Phys.: Conf. Ser., 1359 (2019), 012107.

（10） Farah, S., Anderson, D. G. and Langer, R. : Physical and mechanical properties of PLA, and their functions in widespread applications - A comprehensive review, Advanced Drug Delivery Reviews, 107 (2016), 367.

（11） Johnston, R. and Kazanci, Z. : Analysis of additively manufactured (3D printed) dual-material auxetic structures under compression, Additive Manufacturing, 38 (2021), 101783.



付録図 A　ねじりモーメント付与時のコンター図