

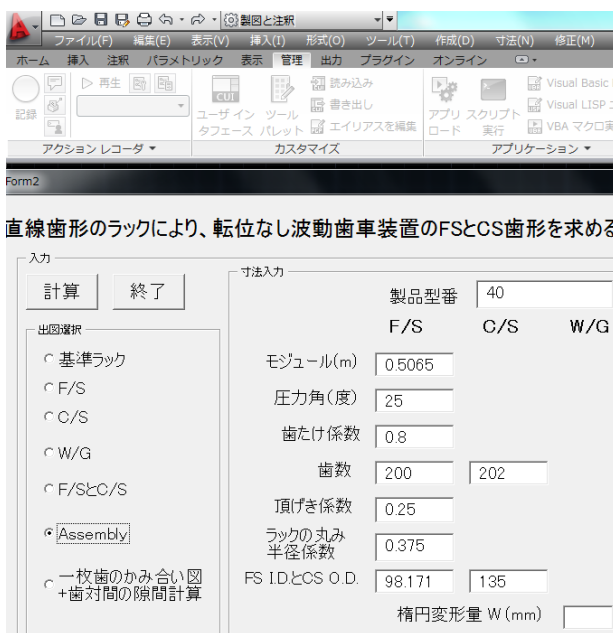
## 波動歯車装置の設計及び強度解析のための有限要素法

### 1. 概要

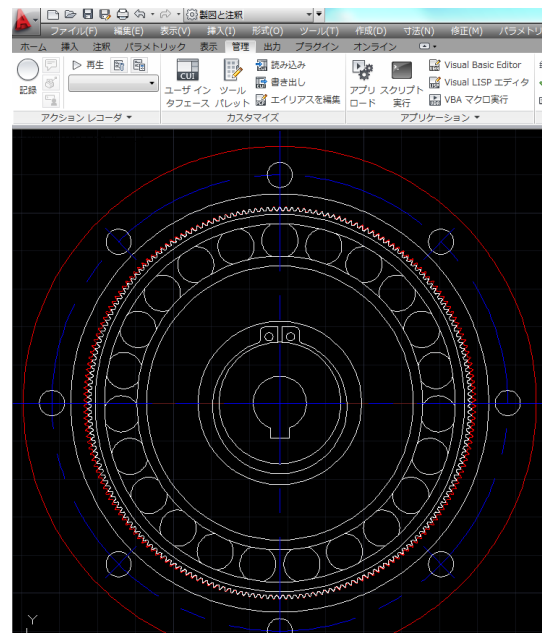
波動歯車装置は大減速比、小型・軽量という特徴を持つので、産業ロボットを始め、様々な分野に幅広く用いられている。しかし、この装置に極薄肉平歯車が使われ、またこの極薄肉平歯車の弾性変形により歯のかみあい運動を実現させているので、この減速機の歯のかみあい運動が非常に複雑になり、これでこの減速機の設計や強度解析問題も非常に難しくなる。筆者は1986年から波動歯車装置の設計と強度解析に関する研究を始めた。長い時間をかけて開発してきた専用有限要素法及びソフトにより、波動歯車装置の接触解析を可能にしたので、その結果をここで簡単に紹介する。この研究の詳細については参考文献<sup>(1-2)</sup>をご参照ください。

### 2. 研究対象とする深溝玉軸受

図1に開発した波動歯車装置の設計計算ソフトの入・出力画面を示している。このソフトはAutoCADに組み込まれているので、AutoCADの一機能として利用できる。図1(a)に示すようにF/S、C/SとW/Gの諸元を「入力」に入力し、「計算」コマンドを押せば、右側の図1(b)に示すように波動歯車装置は即座に設計される。このソフトに多くの歯形（例えば、インボリュート曲線、修整インボリュート曲線など）はオプションよして用意されているので、波動歯車装置を設計する際には、選択しながら設計することができる。



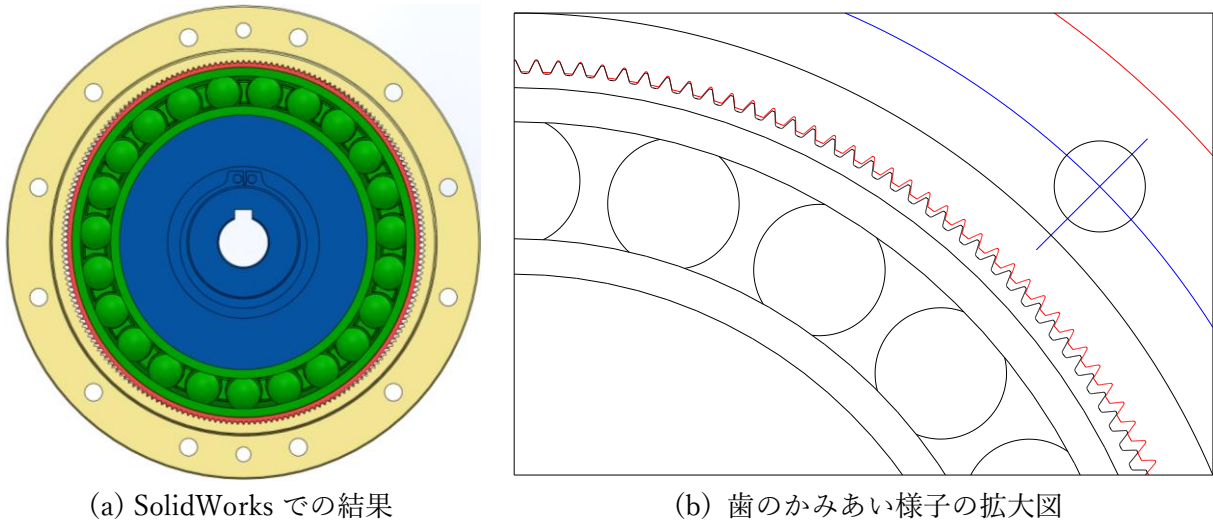
(a) 設計計算ソフト



(b) 計算結果

図1 波動歯車装置の設計計算ソフトの開発

図2(a)に SolidWorks で作成した三次元波動歯車装置の開口部断面図を示す。図2(b)は図1(b)の部分拡大図である。

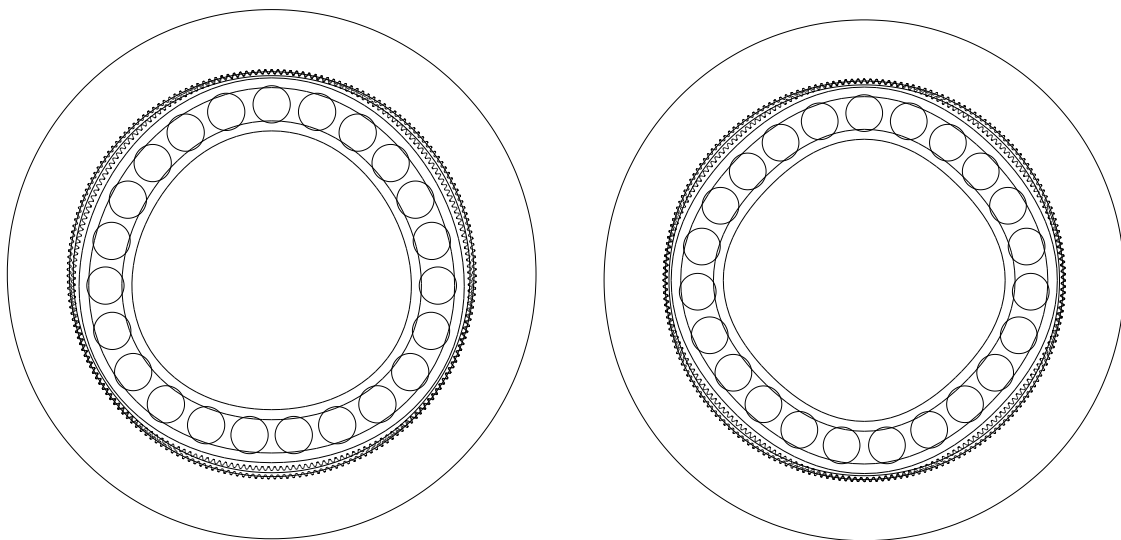


(a) SolidWorks での結果

(b) 歯のかみあい様子の拡大図

図2 SolidWorks で作成した波動歯車装置及び歯のかみあい拡大図

多ローブ波動歯車装置を設計するために設計計算ソフトも開発した。図3(a)は開発したソフトで設計した三ローブ波動歯車装置であり、図4(a)は開発したソフトで設計した四ローブ波動歯車装置である。通常の波動歯車装置の W/G が楕円であるので、長軸は二箇所があり、この波動歯車装置は二ローブ波動歯車装置となる。三ローブと四ローブ波動歯車装置の W/G が図3と図4に示すように三角形と四角形のような形をしていて、長軸はそれぞれ三箇所と四箇所にあるので、これらの装置をそれぞれ三ローブと四ローブ波動歯車装置と呼ぶ。



(a) 三ローブ波動歯車装置

(b) 四ローブ波動歯車装置

図3 多ローブ (Lobe) 波動歯車装置の設計

### 3. 波動歯車装置の接触強度の三次元有限要素法

次に筆者が開発した専用三次元有限要素法ソフトで解析した波動歯車装置の強度計算結果を紹介する。シルクハット型波動歯車装置を用いて強度解析を行った。図4にFEM解析用要素分割モデルを示す。

図5に長軸付近の(-23° ~ +38°)範囲で各歯の最大歯面面圧の分布図を示している。図6に長軸付近の(-23° ~ +38°)範囲で各歯の最大歯元曲げ応力の分布図を示している。図7にダイアフラムと胴体の交差円に沿う応力分布を示す。シルクハット型波動歯車装置の場合には、応力危険場所はダイアフラム部と胴体部の交差円の辺りにあるが、この危険箇所を無くすために、筆者はアフラム部と胴体部を一つの円弧で設計した<sup>(3)</sup>。これでF/Sの構造破損がなくなった。

図8に薄肉玉軸受のボール表面の荷重及び接触面圧の結果を示している。この結果で軸受のフレーキングが発生するかどうかを判断できるようになる。

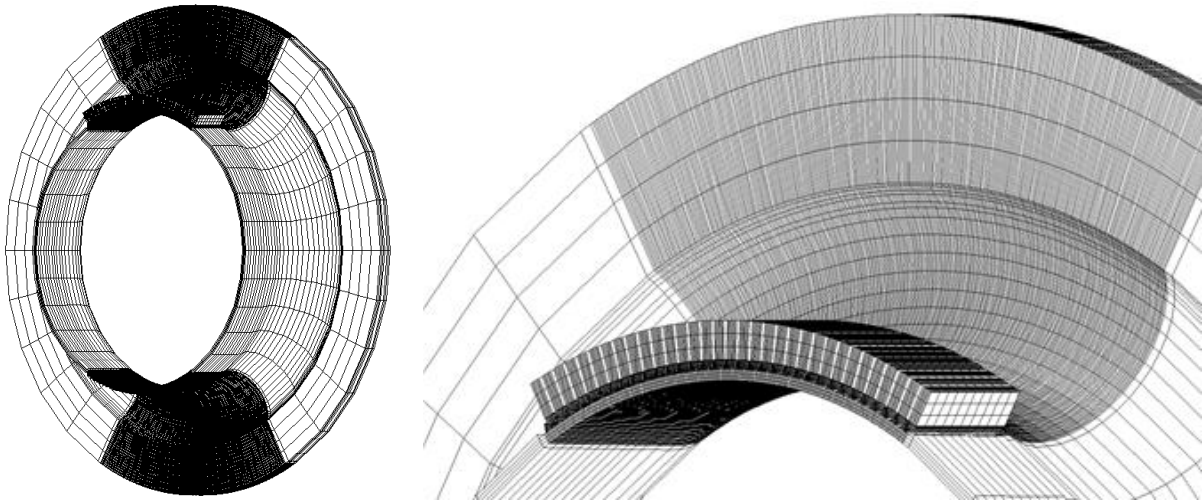


図4 シルクハット型波動歯車装置

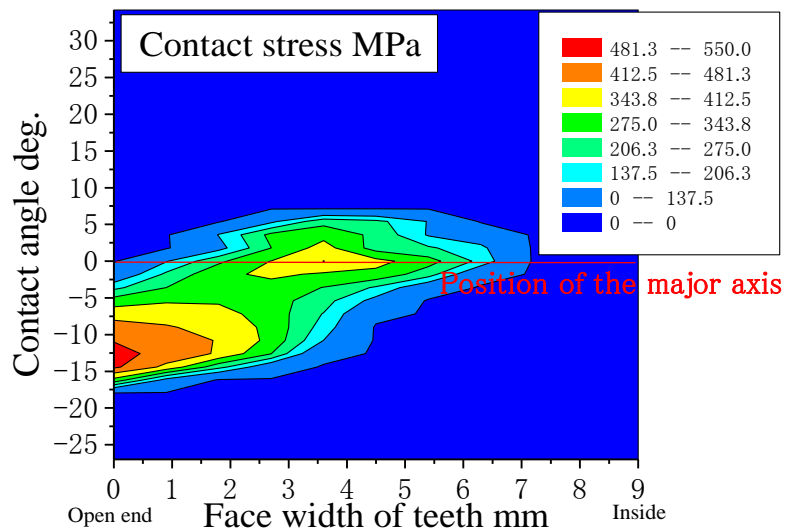


図5 歯面面圧分布の等高線図

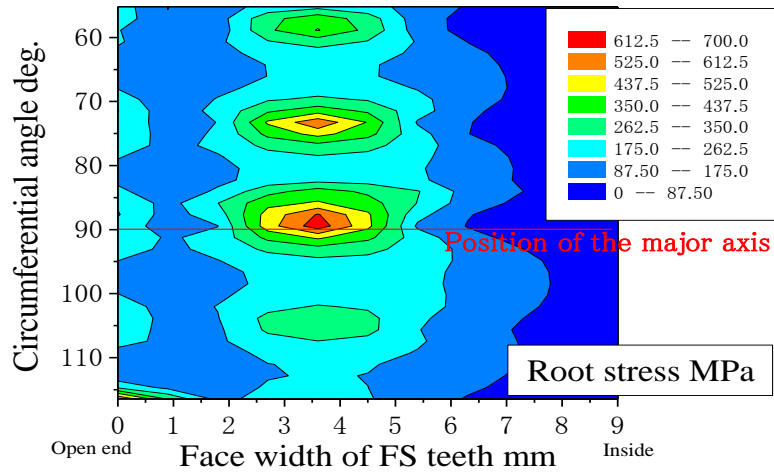


図6 歯元曲げ応力分布の等高線図

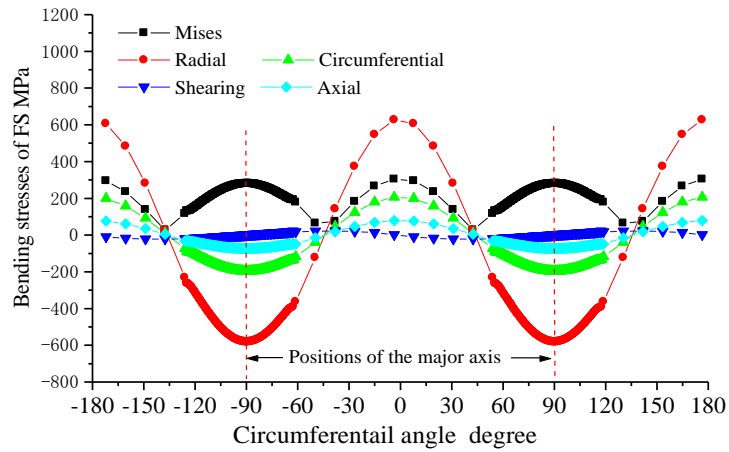


図7 ダイアフラムとボース部の交差円に沿う応力分布

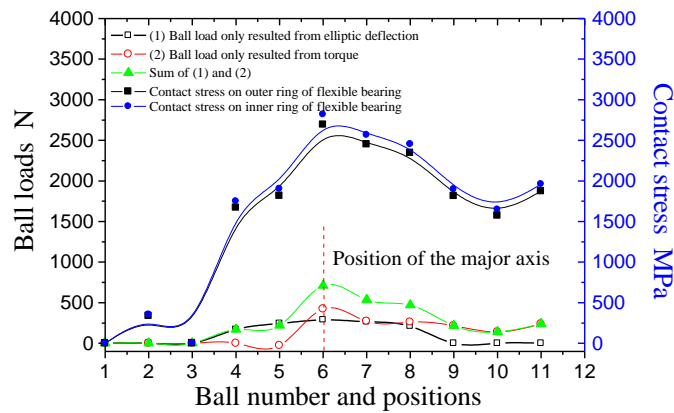


図8 薄肉軸受ボール上の荷重と面圧分布

#### 4. 解析結果の実験的な検証

カップ型波動歯車装置を用いて、FEM 解析結果の妥当性を実験的に検証した。図9に FEM 接触解析用要素分割モデルを示す。図10に開口部の断面拡大図を示している。図11に示すようにダイアフラムとボースの交差円付近にひずみゲージを張り付けて、図12に示す実験装置を用いて負荷状態で波動歯車装置を回転させる時に、三方向ひずみゲージでダイアフラムのひずみ波形を測定した。測定結果を図13に示している。また FEM による解析結果を図14に示している。図14と図13を比較すると、解析結果は実験結果とよく一致していることが分かった。

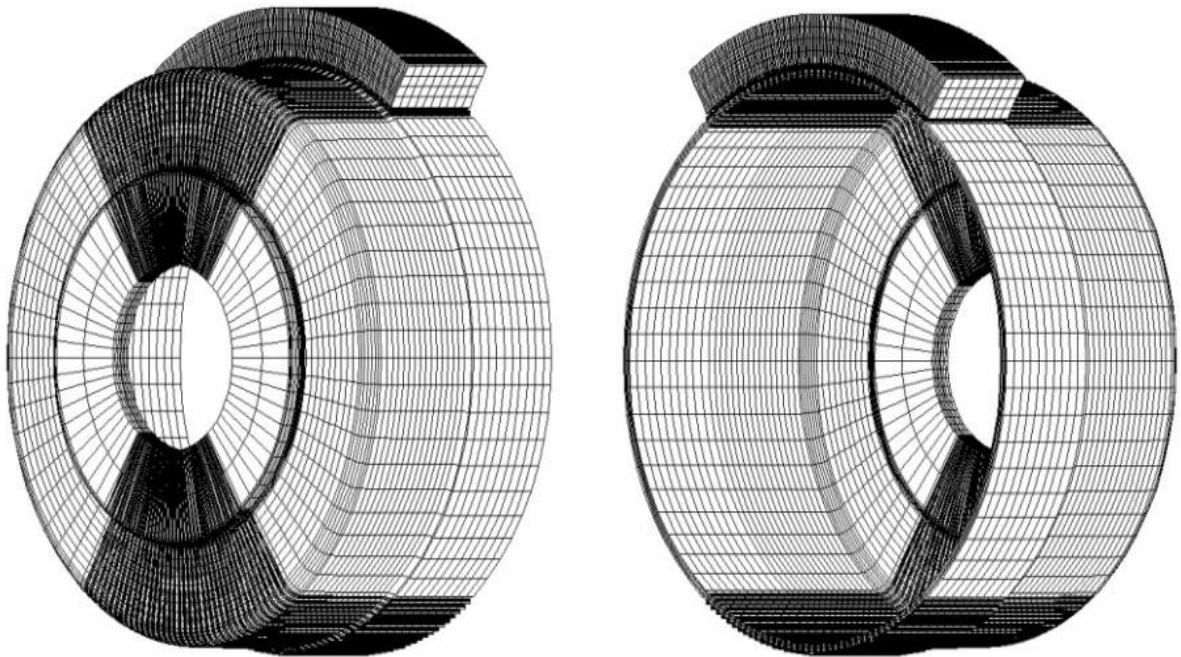
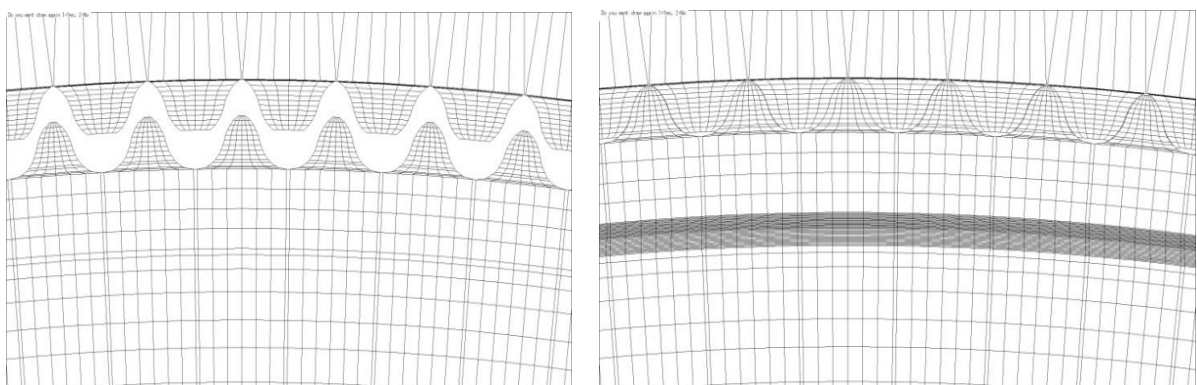


図9 カップ型波動歯車装置の接触解析用 FEM 要素分割モデル



(a) W/G を挿入する前

(b) W/G を挿入した後

図10 断面1と断面2の定義



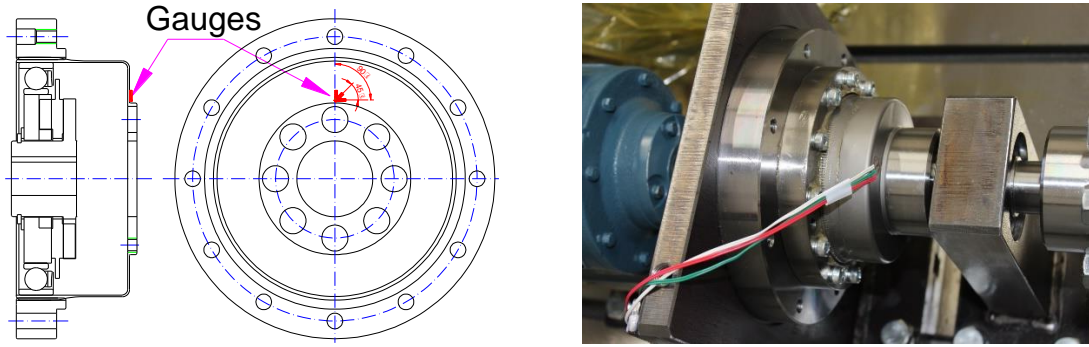


図1.1 ひずみゲージの貼り付け場所

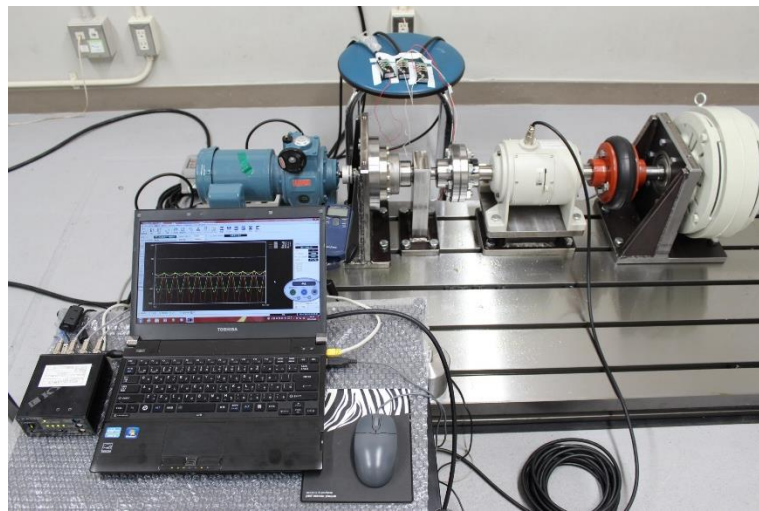


図1.2 動ひずみを測定するために開発した実験装置

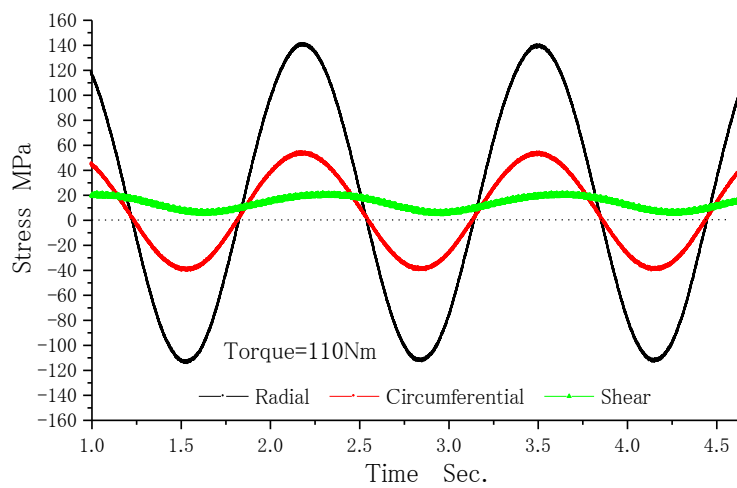


図1.3 測定結果

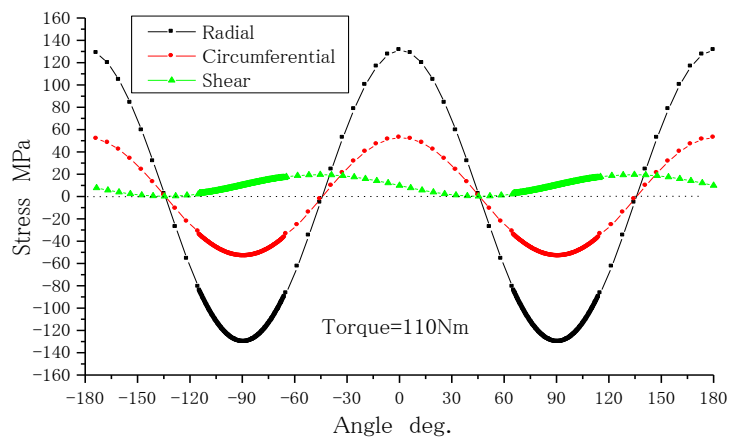


図1 4 FEM 専用ソフトによる解析結果

参考文献：

- (1) S. Li and Y. Shen, "Fatigue failure patterns and strength design methods of a harmonic drive device", **The 11<sup>th</sup> World Congress in Mechanism and Machine Science**. Vol.2, pp.805-810, 2004
- (2) S. Li, "Diaphragm stress analysis and fatigue strength evaluation of the flex-spline, a very thin-walled spur gear used in the strain wave gearing", **Mechanism and Machine Theory**, Elsevier Press, Volume 104, 2016, pp.1-16
- (3) 李 樹庭, シルクハット型新波動歯車装置, 特許庁, 特開 2007-16838 (2007,1,25)