熱処理による影響因子を取り入れたドライブシャフト強度解析精度の向上

Improving of Drive Shaft Strength Analysis Accuracy by Incorporating the Effects of Heat Treatment

舟橋和諒　K. FUNAHASHI　市川和之　K. ICHIKAWA

Drive shafts are used to transmit the driving force in automobiles. The required shaft strength is ensured by applying heat treatment to the internal parts. This paper presents a method to improve the accuracy of strength predictions for drive shafts by incorporating the effects of heat treatment on the distributions of hardness, strain, and residual stress into strength analysis. By comparing strain amounts between analysis and actual measurements, it was confirmed that this novel method can predict the actual measurements better than conventional methods, and therefore improve the accuracy of strength predictions.

Key Words: drive shaft, CVJ, CAE, strength, heat treatment

1．はじめに

ドライブシャフトは，パワーユニット（エンジンや電動モータなどの動力源）から発生した駆動トルクをタイヤへ伝達する部品であり，入力軸と出力軸が交差した状態でも回転を等速に伝達できる（**図1**）．電動車では駆動ユニットの配置がエンジン車と異なっており，ドライブシャフトは高角度，高負荷での使用が想定されている．この使用環境では塑性変形や破損の原因となる高応力が発生しやすくなる．そのため，開発効率を向上させるには，設計開発の初期段階から高精度な強度予測および解析が求められる．その際には，弾性域だけでなく，低サイクル疲労強度に影響を及ぼす塑性域までを対象とする必要がある．

当社では，熱処理工程が部品の強度に与える影響を定量化し，従来よりも実態に即した高精度な強度解析手法を確立した．これにより，試作回数の低減と設計の信頼性向上を実現した．本報では開発した解析手法と検証結果を紹介する．

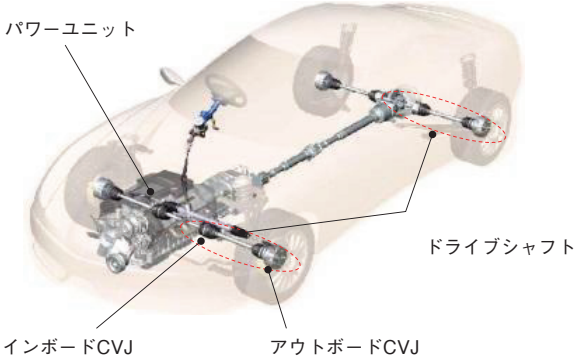

図1　ドライブシャフトの位置
Positions of drive shafts

2．ドライブシャフトの構成

ドライブシャフトは，ディファレンシャル側とタイヤ側のCVJ（Constant Velocity Joint）および中間シャフトで構成されている（**図2**）．高トルク時の耐性を高めるため，各部品には熱処理を施し，内部は素材本来の硬度を保ちつつ，表面部を高硬度にすることで強度とじん性の両立を図っている．

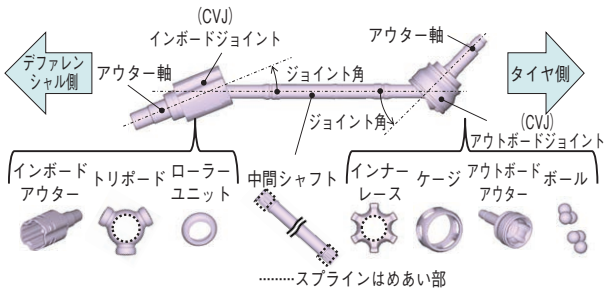

図2　ドライブシャフトの構成
Structure of a drive shaft

3. 熱処理を考慮した強度解析

高精度な強度解析を行うには熱処理による硬度，ひずみ，残留応力などの変化を考慮する必要がある．本章では強度に影響する因子と，それらの因子を強度解析に反映する手法を述べる．

3.1 熱処理による強度に影響する因子

3.1.1 硬度分布

金属材料の硬度と引張強度の関係を**図3**に示す．一般的に硬度が高いほど引張強度が増し，それに伴い，降伏応力も上昇する[1]．一方，じん性は硬度が高くなると低下し，両者は背反の関係にある．**図4**に示すように硬度は表面から内部にかけて徐々に低下する．また，図中の①，②のように部位ごとに硬度分布が異なることも確認されており，強度は部品の硬度分布と密接に関係していると考えられる．

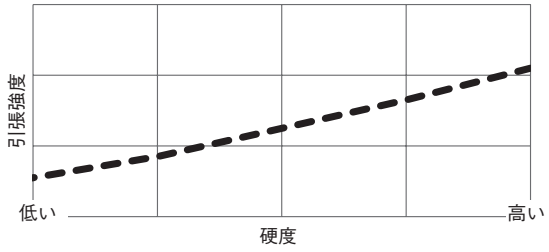

図3 硬度と引張強度の関係
Relationship between hardness and tensile strength

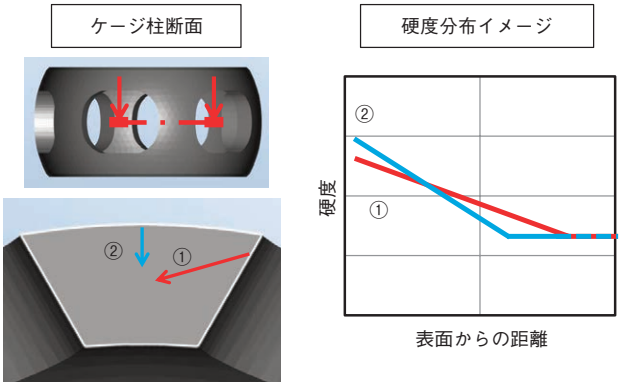

図4 硬度分布
Hardness distribution

3.1.2 ひずみ

熱応力や相変態による体積変化で生じる熱処理ひずみは，各部品の真円度や平行度などの部品精度を変化させ，製品機能や寿命に影響を及ぼす．熱処理ひずみの一例として，**図2**に示したドライブシャフトの構成部品であるトリポードのスプライン部をあげる．熱処理後は120度周期の回転対称で変形が大きくなる傾向があり，この変形パターンを本報では「三角形変形」とよぶ．三角形変形のイメージ，トリポードのスプライン部における応力変化を**図5**に示す．理想は真円形であるが，実際には製品形状の影響で三角形状に変形する．そのため，スプライン部の接触荷重は均等に分布せず，3箇所の位相で応力が増加し，疲労寿命が低下する．

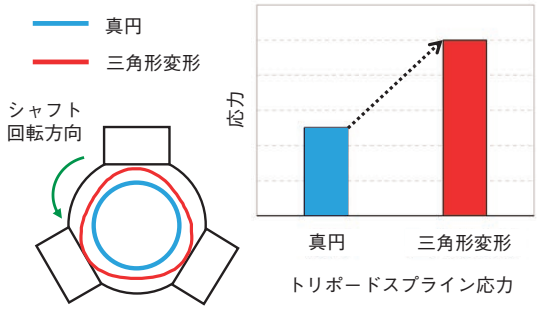

図5 スプライン部に発生する応力
Stress distribution in a spline

3.1.3 残留応力

熱処理ひずみと同様，熱処理時に発生する熱応力や相変態により，表面から内部にかけて応力分布が形成され，熱処理後も応力が残存する．この残留応力が引張応力の場合，製品の疲労寿命が低下する[2]ため，設計時に残留応力を考慮する必要がある．

3.2 解析手法構築の課題と対策

本節では硬度，ひずみ，残留応力を継承した強度解析モデルの構築について課題と対策を述べる．

3.2.1 硬度，ひずみ，残留応力の分布データ

前述のとおり，硬度，ひずみ，残留応力は部品の表面から内部にかけて特定の分布を示す．したがって，強度解析の精度を向上させるには，解析モデルにこれらの分布を反映させる必要がある．しかし，部品全体の硬度，ひずみ，残留応力を実機で内部まで測定するのは困難である．そこで，製造工程における熱処理状態を解析し，部品表面から内部までの分布データを得ることとした．これらの解析で得た結果は**3.2.2項**で述べる手法を用いて強度解析へ継承する．

3.2.2　データマッピング技術

熱処理解析と強度解析は目的が異なるため，解析モデル（メッシュ）が異なる．したがって，熱処理解析で得られた分布データを強度解析に反映させるには，データの対応関係を定義し，適切に変換するデータマッピング技術が必要となる．熱処理解析時のメッシュと強度解析時のメッシュを**図6**に示す．全体図中の赤い長方形は断面図の取得位置を示している．表面および断面の分布は熱処理解析メッシュと強度解析メッシュで近似している．これはデータマッピング技術により，熱処理解析メッシュとは異なる強度解析メッシュに対し，表面から内部に至るまでの熱処理解析結果が要素ごとに適切に変換されているためである．

このデータマッピング技術により，熱処理解析で得られた硬度，ひずみ，残留応力を異なるモデルである強度解析へ継承できるようになった．

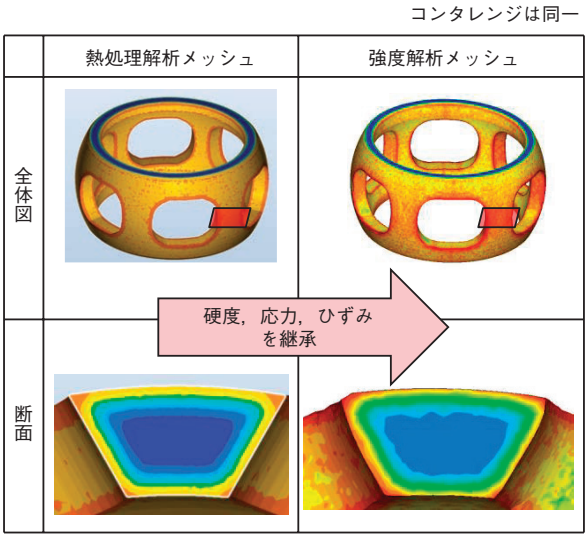

図6　データマッピング技術の概要
Overview of data mapping technology

3.2.3　硬度別の応力－ひずみ曲線図

塑性域を含む強度解析を行うには，応力－ひずみ曲線図が必要となる．前述のとおり，硬度が異なると引張強度も異なるため，異なる硬度の鋼材で引張試験を実施し，各硬度に対応する応力－ひずみ曲線図を取得した．

3.2.4　解析手法のまとめ

本手法の概要を**図7**に示す．製造工程である熱処理による硬度，ひずみ，応力分布を継承した強度解析手法を構築した．

4. 解析値と実測値の比較

開発した解析手法の精度を検証するため，熱処理後のケージの硬度分布と強度について実測値と解析値を比較した．

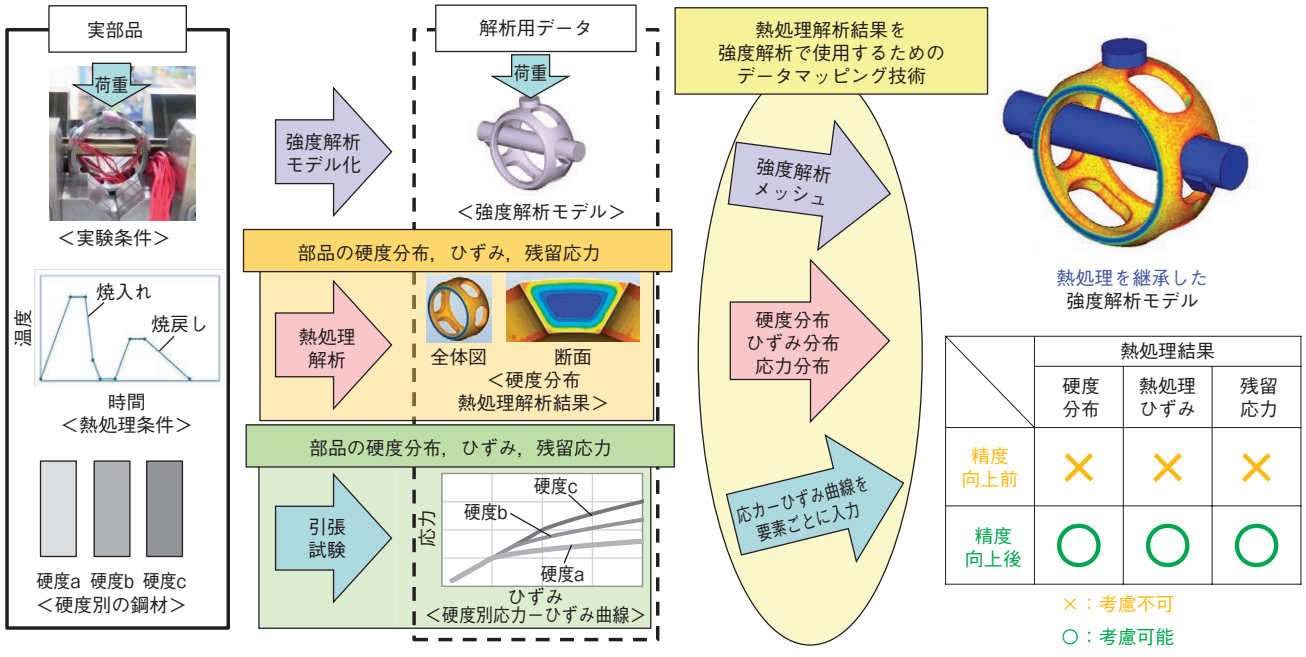

図7　解析手法の構築
Processes of developing the analytical method

4.1　熱処理解析

硬度分布の結果を**図8**に示す．表面からの距離に対する硬度の変化を確認したところ，実測値と解析値はよく一致した．

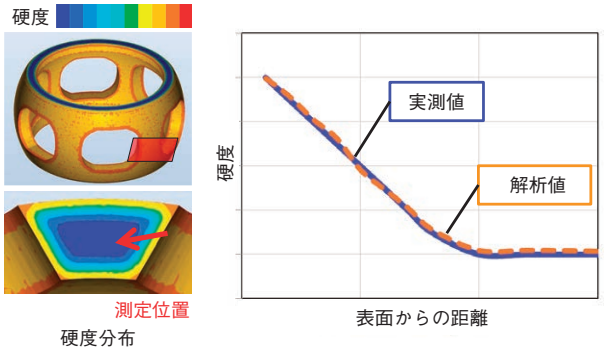

図8　熱処理解析の結果
Results of heat treatment analysis

4.2　強度解析

つぎに，実験で生じたクラックの位置と解析での応力最大位置および方向を比較した．実験設備と解析モデルを**図9**に示す．実験と解析ともにケージの柱に荷重負荷をかけた．なお，強度解析モデルのケージは，熱処理解析による硬度分布のデータ（**4.1 節**）を継承している．

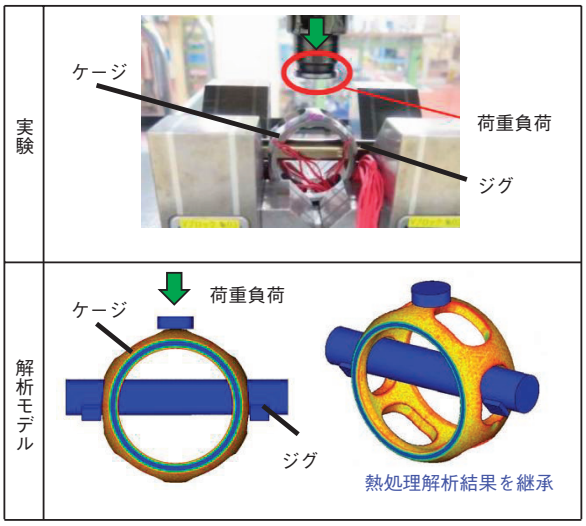

図9　実験設備と解析モデル
Comparison of experimental facility and analysis model

解析で得られた第1主応力分布と方向を**図10**に，実験で得られた部品のクラック位置と方向を**図11**に示す．第1主応力ベクトルは，クラック方向と直交するため，解析と実験の両方においてケージの柱にアキシアル方向の引張応力が発生しており，クラック位置と方向が一致していることも確認できた．

解析と実験のひずみを比較したところ，熱処理解析データを継承した強度解析と実験結果は，弾性域から塑性域まで一致した（**図12**）．以上から，熱処理解析データの継承によって強度解析の精度が向上することが示された．

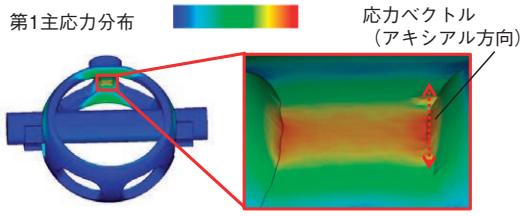

図10　第1主応力分布
Principal stress distribution

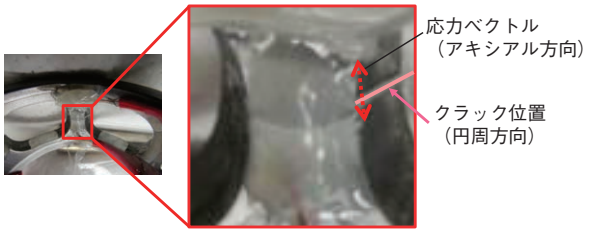

図11　実験クラック位置と方向
Location and orientation of an experimental crack

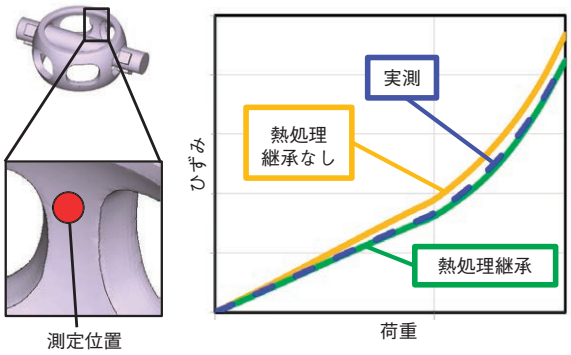

図12　ひずみの比較
Comparison of strain

5. 前工程の継承

実験で使用したトリポード部品において三角形変形が発生していた．これは，**3.1.2 項**で示したとおり，トリポードのスプライン部の熱処理ひずみが疲労強度に影響するためである．そこで，前工程の継承が熱処理解析に与える影響について検討した．

5.1 前工程を継承しない熱処理解析

前工程を継承せずにトリポードに熱処理解析を実施した場合，解析結果のスプライン B．B．R（Between Ball Radius）は円形となり，三角形変形が再現できなかった（**図13**）．硬度分布の解析結果は実測値と一致しており，熱処理解析パラメーターは妥当と考えられる．したがって，熱処理の前工程である鍛造工程や穴あけブローチ工程で変形したと考えられる．

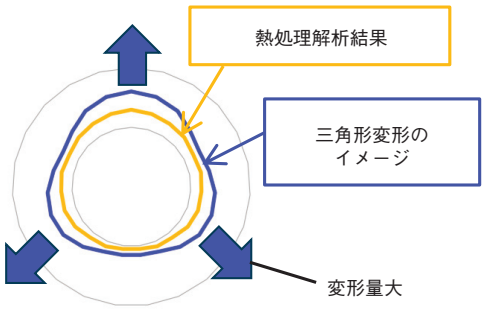

図13 スプライン B．B．R
Deformation of a spline caused by heat treatment

5.2 前工程を継承した熱処理解析

鍛造工程，穴あけブローチの解析を行い，前工程の残留応力を継承して熱処理解析を行った．その結果，**図14** に示すとおり，実機で確認された三角形変形が再現できており，本手法の有効性が示された．

トリポードは，円柱状のビレットから鍛造，打ち抜き，切削など，塑性加工を含む複数の加工工程を経て製造される．これらの加工に起因する残留応力は，加熱で解放されることが知られている．本解析結果においても熱処理工程時の加熱により残留応力が解放される．ただし，一部は熱処理後にも残存することが確認できた．以上より，前工程の解析結果を継承し，解析精度を向上できた．

6. おわりに

本報では，各製造工程で生じる硬度，ひずみ，残留応力の継承によって強度解析の精度を向上し，以下の成果を得た．

1）硬度分布の継承により，弾性域のみでなく塑性域までのひずみを正確に予測
2）ひずみの継承により，ひずみに起因とする応力を含め，部品に発生する応力を正確に予測
3）残留応力の継承により，疲労強度に影響する平均応力を正確に予測

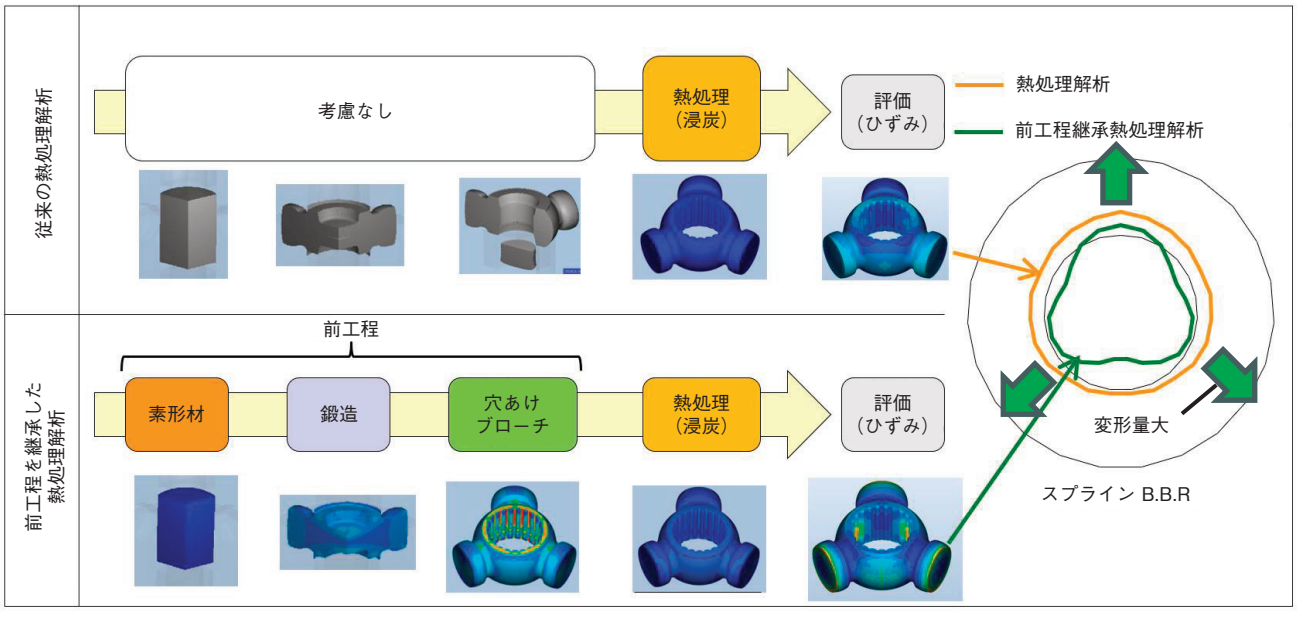

図14 前工程を継承した解析
Analysis with and without consideration of preceding processes

4）前工程を継承した熱処理解析により，従来は予測困難であった製造工程が起因となるひずみを予測

本手法により，従来の解析モデルでは考慮できなかった各製造工程に起因するばらつきや応力の影響を，定量的に評価することが可能となった．これにより，必要な強度を確保しながら小型・軽量の製品を生産できるようになる．今後も新たな顧客ニーズに応えながら製品開発に取り組んでいく．

参考文献

1）長谷川典彦，新井淳一，田中道七：静強度パラメータ間の相関関係，材料，Vol. 39，No. 442 (1990) 859-863.
2）中村　孝：金属疲労の基礎知識，鋳造工学，Vol. 79，No. 2 (2007) 58-69.

筆　者

舟橋和諒*　K. FUNAHASHI
市川和之**　K. ICHIKAWA

*　自動車事業本部　駆動実験解析部
**　自動車事業本部　駆動実験解析部　博士（工学）