ＦＥＭによるフレッチング解析

FEM Simulation of Fretting Corrosion

山川耕志郎　K. YAMAKAWA　梶原一寿　K. KAJIHARA

The wear on contact surfaces, called fretting corrosion, frequently occurs when connected machine elements are used under fluctuating load conditions. Fretting corrosion often causes abnormal vibration or reduction in fatigue strength, thus requiring close study at the initial design stage. This paper presents the FEM simulation method of fretting corrosion in consideration of its generating mechanism. The simulation results of a wheel bearing were identical to the appearance of the actual fretting corrosion generated after a rolling bending fatigue test.

***Key Words**: FEM, fretting, contact pressure, bearing*

1．はじめに

軸受を実機に組み込む際，まず検討する項目にはめあいがある．内輪と軸，外輪とハウジング各々のはめあいをどう設定するかは，その軸受の使用条件を考慮して決められる．特に荷重条件が大きく変動する場合は注意を要する．

それぞれの接触面において，繰返し荷重による相対すべりが発生すると，その面に摩耗現象が生じる．一般にフレッチングコロージョンと呼ばれている現象である[1)]．

相対運動を拘束された機械部品にフレッチングが発生すると，あそびが生じ機械の異常振動や異音，疲労強度の低下から破損するといったこともある[2)]．製品設計する際には十分注意しなければならない．

しかし，フレッチングを机上検討する有効な方法が今のところ存在しないため，台上試験等で確認するしかなかった．

ここでは，フレッチングをその発生メカニズムをもとに，ＦＥＭ解析でシミュレートする方法について述べる．次いで，適用例として，ハブユニット軸受のフランジ面に発生するフレッチングをシミュレートした例について紹介する．

2．フレッチングとは

2.1　フレッチング発生メカニズム

結合された機械要素，構造物の接合面は，静的な状態ではすべり現象は発生しない．ところが変動荷重が加わると，構成部品の剛性差により，弾性変形から相対すべりが生じる場合がある．すべりが発生するところでは，それが繰返されると摩耗粉が生成される．そこで発生した摩耗粉が酸化され，硬い摩耗粉となり，さらに摩耗が進行する．こういった現象がフレッチングコロージョン（フレッチング摩耗）と呼ばれている．ここではフレッチングコロージョンを単にフレッチングとしている．

2.2　フレッチング事例と問題点

ここで紹介する事例は，特に問題として取り上げられたものではないが，フレッチング現象が発生しやすいものを選んだ．

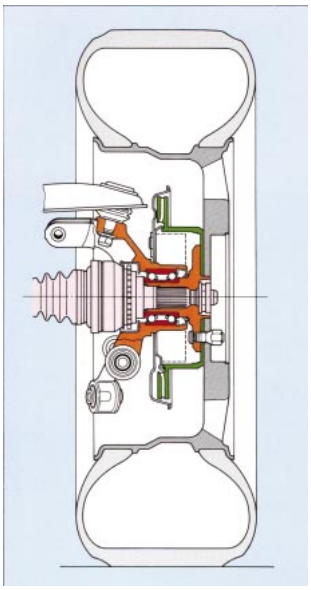

図1　ＦＦ車フロントホイール用軸受（ＤＡＣ）の構造
Structure of 1st generation wheel bearing (DAC)

図１に代表的なＦＦ車フロントホイール用軸受（ＤＡＣ）の構造を示す．この軸受には，実車走行時，車重によるラジアル荷重や，旋回によるアキシアル荷重が作用する．特に旋回の横加速度が大きい場合，タイヤ接地点で作用するアキシアル荷重も大きくなり，軸受には大きなモーメント荷重がかかる．この状態で回転輪の内輪はめあい面には大きな変動荷重が作用し，フレッチングが発生しやすい状況になる．

実車条件をシミュレートした台上試験で評価した代表例を**図２**に示す．内輪とシャフトの両方にフレッチングの発生が認められる．

(a)シャフト

(b)軸受

図２　台上試験機によるフレッチング状況
Fretting appearance in result of simulation test

また，近年では，ホイール用軸受としていろいろな利点からユニット化されたハブユニット軸受が採用されることが多い．**図３**に代表的なホイール用ハブユニット軸受の構造を示す．

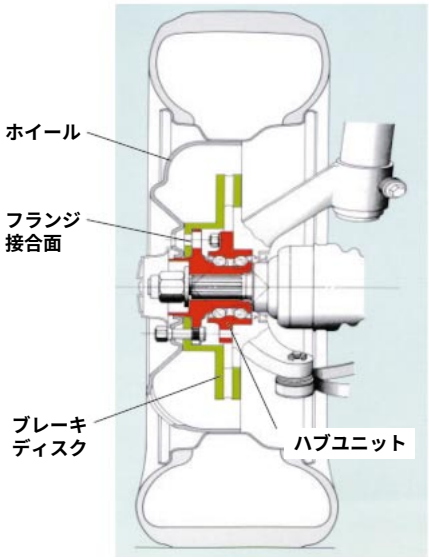

図３　ホイール用ハブユニット軸受の構造
Structure of 3rd generation hub unit bearing for wheel

このハブユニットにはブレーキディスク，ホイールが結合されている．その接合面（フランジ）は厳しい耐久試験の後に，程度の差はあるがほとんどの場合フレッチングが発生する．

たとえば，実車旋回走行を考えた回転曲げ耐久試験がある．これは，**図４**に示すように，タイヤ接地点（図中の荷重負荷位置）にかかる荷重を，ラジアル荷重，アキシアル荷重として負荷し，軸受にモーメント荷重として作用させる試験である．

この試験では，フランジの接合面には大きな変動荷重がかかり，フレッチングが発生しやすい状況になる．

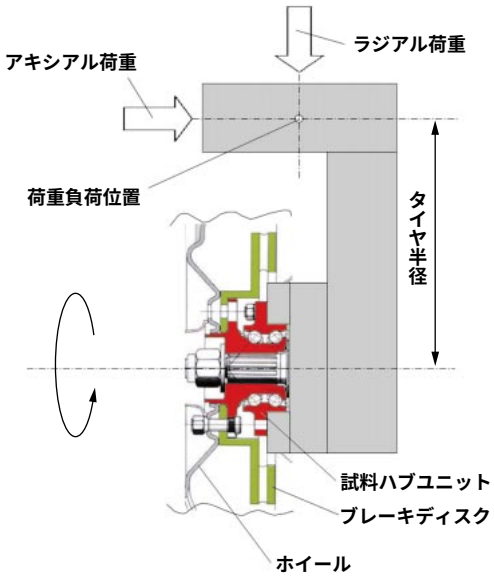

図４　回転曲げ耐久試験
Schematic diagram of rotating bending fatigue test

図５に回転曲げ試験後の代表的なフレッチング発生状況を示す．フランジ面のかなりの領域にフレッチングの発生が認められる．

図５　試験後のフレッチング発生状況
Fretting appearance after test

3．ＦＥＭ解析

ここでは，先に述べたフレッチング発生メカニズムに基づき，ホイール用ハブユニット軸受のフランジ面に発生するフレッチングをシミュレートした例について紹介する．

3.1　シミュレーションの考え方

フレッチングは，相対すべりの繰り返しによる摩耗粉の発生と，酸化による摩耗粉の硬化によって進行する．摩耗粉が酸化するためには，隙間の発生が必要である．したがって，フレッチングは，運転中に接触したり離れたりする箇所に発生し，接触したままの箇所，接触しない箇所には発生しにくいと考えられる．

ここで，運転中に接触したり離れたりする領域をフレッチング作用領域と定義する．また，フレッチング作用領域内の接触面圧分布をフレッチング接触面圧と呼ぶことにする．

3.2　ＦＥＭモデル

ハブユニットのフランジ面とブレーキディスクの間に働くフレッチング接触面圧分布を計算するためには，次に示す計算を行えばよい．すなわち，①フランジ面とブレーキディスクの間に働く接触面圧分布を各荷重条件に対して求める．②得られた接触面圧分布の中で，荷重方向や大きさが変わったときに接触状態が変わらない部分を削除する．

フランジ面の接触面圧分布は，接触解析機能の充実した汎用ＦＥＭコードを用いて計算した．接触面圧が変わる部分の抽出は表計算ソフトで処理した．

要素分割例を**図6**に示す．計算モデルは，ハブユニット軸受，ブレーキディスク，ホイール，ハブボルト，ナット等で構成した．ハブユニット軸受は内輪と軸のみをモデル化した．ホイールとブレーキディスクについては，計算コストを考慮し，接触部周辺のみをモデル化した．ハブユニット，ブレーキディスクとホイールはハブボルト・ナットで締結した．拘束条件は，ホイール端面のみを完全拘束とした．

荷重は，転動体荷重に変換して，各節点に集中荷重として与えた．また，ホイールが１回転する際の荷重変化をシミュレートするために，**図7**に示すように，ラジアル荷重の方向は20通り（18°刻み）変化させた．

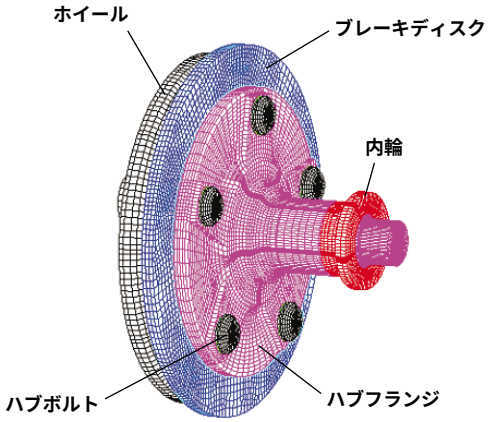

図6　要素分割例
FEM mesh distributions

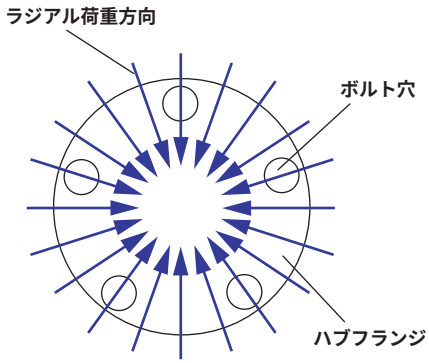

図7　ラジアル荷重の方向
Directions of radial load

3.3　ＦＥＭ解析結果と実際のフレッチング状況

ＦＥＭ解析で求めたフレッチング接触面圧分布を**図8**に示す．また，同じ荷重条件で回転曲げ試験を行った際のフレッチング状況を**図9**に示す．

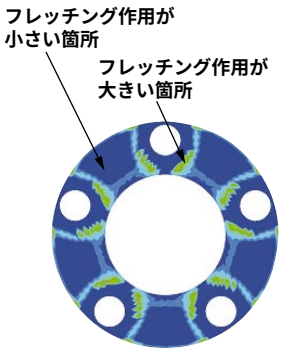

図8　ＦＥＭ解析結果
FEM analysis result

図9　実際のフレッチング状況
Actual fretting appearance

実際のフレッチング状況と比較すると，ボルト近傍や，ボルトから十分遠いフランジ中央部でフレッチングが発生していないことなどから，ＦＥＭ解析で求めたフレッチング接触面圧分布は実際のフレッチング状況をよく再現できていると考えられる．

シミュレーション結果を設計検討で活用するためには，フレッチングの度合いを定量的に評価できるようなパラメータを抽出する必要がある．

フレッチングの発生メカニズムから考えると，パラメータの一つとして，ホイールが１回転する際の摩擦力による仕事量をフレッチング作用領域内で積分したものが考えられる．この仕事量は，フレッチングに関係する機械的な作用の度合いを示すものである．この仕事量と異常振動・異音等の関係をあらかじめ調べておけば，設計段階での机上予測が期待できる．

ただし，フレッチングは時間とともに進行する現象であり，この方法ではフレッチングの進行状況まではシミュレートすることはできないことに注意する必要がある．

４．おわりに

発生メカニズムに基づいたフレッチングシミュレーションの方法を紹介した．この方法をハブユニット軸受に適用した結果，実際のフレッチング状況とよく一致した．

また，ここで紹介したフレッチング解析手法は，ハブユニット軸受に限らず，結合された機械要素や構造物が変動荷重下で使用される場合に一般的に適用できると考えられる．

この方法を設計段階で活用すれば，フレッチングによって誘発される異常振動や異音の事前検討が可能であると思われる．

最近は開発コスト削減，開発期間短縮といったことからＣＡＥが開発に活用される場面が増えている．この事例もそういった取組みの一つであり，今までの現物による実験を減らすことができるような技術開発をさらに進めていきたい．

参考文献

１）佐藤準一：機械の研究，vol. 34，no. 1(1982) 71.
２）西岡邦夫，平川腎爾：機械の研究，vol. 22，no. 11(1970)1493.

筆　者

山川耕志郎*　K. YAMAKAWA
梶原一寿*　K. KAJIHARA

*　軸受事業本部　解析技術部