

令和元年6月15日現在

機関番号：17501

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2016～2018

課題番号：16K18042

研究課題名（和文）熱弾性を伴うホットジャダーに対する接触自励振動からのアプローチ

研究課題名（英文）Approach to Automotive Disc Brake Hot Judder due to Thermal Elasticity from the Viewpoint of Self-Excited Vibration

研究代表者

中江 貴志（NAKAE, TAKASHI）

大分大学・理工学部・准教授

研究者番号：80579730

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,000,000円

研究成果の概要（和文）：近年、ディスクブレーキにおいて、高速域で制動を行う際に、Hot Judderと呼ばれる、ディスクの熱変形が引き起こす新たな振動問題が多発している。このHot Judderを摩擦による伴う自励振動系として捉え、熱伝導を考慮した摩擦振動モデルを構築し、その基礎的な発生メカニズムについて調査した。その結果、ディスクとパッド間の接触力の変動が、ディスク表面の膨張量の変動となって、さらに接触力の変動を助長し、Hot Judderが発生することがわかった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

従来の摩擦自励振動系には見られない、熱に起因する変形形状のフィードバックによる時間遅れ系の自励振動を解明することができた。これは、摩擦に関連した新たな自励振動分野の確立への第一歩となる。これからの日本の自動車業界の技術の信頼性、安全性、快適性をさらに高めるものと確信している。また、この技術は自動車業界のみならず、鉄道、航空・宇宙産業など広い分野で有用性がある。

研究成果の概要（英文）：In high-speed areas of highways and roads with steep descents, the heat in car disc brakes sometimes causes a vibration problem. The generation mechanism of hot judder caused by thermal deformation in disc brakes was clarified. Fluctuation of the contact force between the disc and pad due to vibration of the brake system causes fluctuation of the disc surface temperature, and fluctuation of the temperature causes larger fluctuation of the contact force in one rotation of the disc with time delay. It is concluded that hot spots and hot judder are excited by self-excited vibration with time delay.

研究分野：機械力学

キーワード：自励振動 ディスクブレーキ 熱変形 時間遅れ パターン形成 ジャダー 摩擦振動 安定性

様式 C-19、F-19-1、Z-19、CK-19（共通）

1. 研究開始当初の背景

日本経済の要である自動車業界にとって、経済成長著しい中国やインド、ブラジルなど新興国における技術力の進歩は脅威となっている。国際競争力を保つために、環境・エネルギー、安全など、より革新的な技術が求められており、その競争が年々激化している。自動車業界では車内の快適性や静粛性による競争力の確保が叫ばれており、高機能性への迫りから複雑な摩擦振動が多発している。特に、ディスクブレーキにおいては、高速域での制動性、安全性が求められているが、発生する振動問題は依然、必須の課題となっている。

近年、これまで解明を行ってきた単純な摩擦振動のカテゴリーとしてあてはめることができない現象が発生し、大きな技術課題となっている。自動車用ディスクブレーキで発生する Hot Judder 現象は、熱によってローターに Hot spot と呼ばれる、温度のパターンが点在することによって発生する。Hot Judder は熱と振動の複数年野にわたる現象であるため、現在の自動車業界では、対策はもとより、原因すら解明されていない。また、ローターの熱膨張により、き裂が発生する事例もあり、安全性においても解決が急務となっている。

2. 研究の目的

本研究では Hot Judder を摩擦による熱変形を伴う自励振動系として捉え、熱伝導を考慮した低自由度の摩擦振動モデルを構築し、その基礎的な発生メカニズムを解明し、その防止対策を確立することを目的としている。これは、摩擦自励振動の発生メカニズムの新たな分類の確立へ向けた先駆けとなる研究であり、高温環境下で使用される機械製品に汎用できる製品技術の開発を目的としている。

3. 研究の方法

(1) ディスクローター表面および平均温度の計算

①ローターの温度計算モデル

Hot Judder の発生要因となる、ローターの発熱による膨張量および収縮量の関係を調べるためにローター上のある 1 点に対する温度計算モデルを考案した。温度計算モデルを図 1(a) に示す。このモデルは図 1(b) に示すように、ローターの厚み方向 z に n 分割したモデルであり、 n 分割したそれぞれの点に対して時刻 t での i 番目の温度 T_i^t を求める。

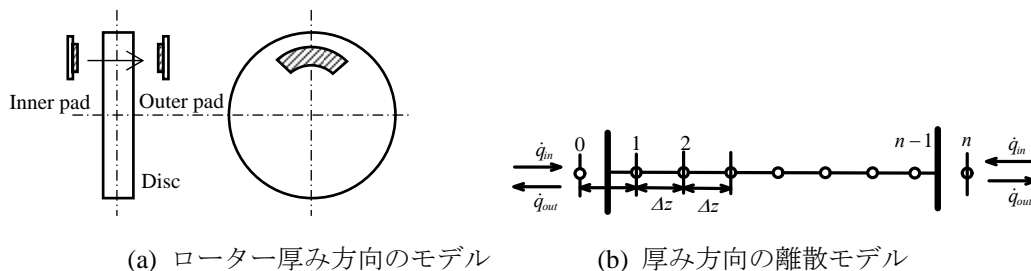


図 1 温度計算モデル

②ローター表面および平均温度の計算

加熱部におけるパッド通過時の摩擦による熱流量および冷却部におけるパッド通過後、再度パッドを通過し始める直前までに損失する熱流量をフーリエの熱伝導の法則を用いて表す。さらに、一次元非定常熱伝導方程式を用いて、ローターの厚さ方向の温度分布の計算を行う。

③ローターの膨張率と収縮率

ローターの平均温度と温度上昇に伴うローターの厚み変動の関係を調べ、パッドの摩擦熱による膨張率 α と空冷による収縮率 β の関係を調べる。

(2) ローター熱膨張を考慮した振動解析

Hot Judder を熱に起因する時間遅れを伴う自励振動系として自動車用ディスクブレーキを図 2 に示す 3 自由度系振動モデルとし、基礎的メカニズムの解明を行う。そこで、(1)③で求めた膨張率 α と収縮率 β を運動方程式および熱膨張量にフィードバックさせることで発熱を考慮した振動解析モデルの構築を行う。さらに、ローター表面のインナー側とアウター側の膨張量をそれぞれ、 $u_i(t)$ 、 $u_o(t)$ とし、ローターの 1 回転後（回転周期 T 秒後）に強制変位 $u_i(t-T)$ 、 $u_o(t-T)$ として接触力にフィードバックさせることで、膨張を伴う時間遅れ系としてモデル化を行う。

上記の解析モデルに対する運動方程式から特性方程式を求め、この系の安定性を調べる。さらに、シミュレーション解析では、RKG 法を用いて数値積分を行う。

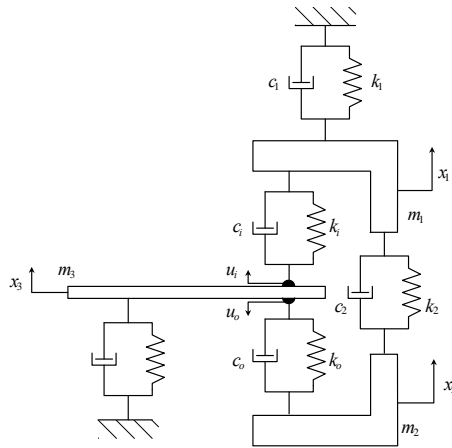


図2 3自由度系振動解析モデル

4. 研究成果

(1) ディスクローター表面および平均温度の計算

図3はローターのインナー側表面温度を示している。ローター表面温度は、一回転中でパッドを通過中に温度が上昇、パッド通過後に冷却部で温度が低下し、それらを繰り返している。図4および図5は、それぞれローター平均温度およびローターの厚みを示す。

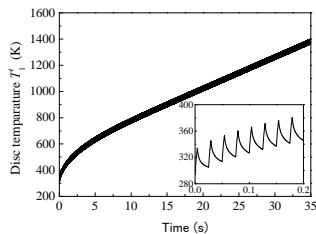


図3 表面温度

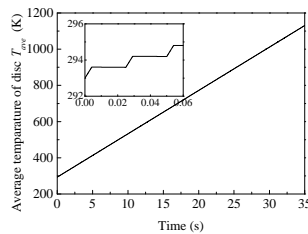


図4 平均温度

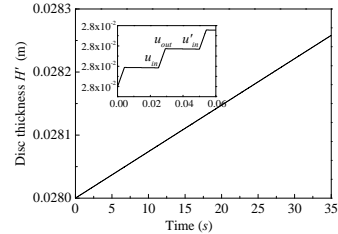


図5 熱膨張によるローター厚み

(2) ローター熱膨張を考慮した振動解析

①安定性解析結果

図6に示す安定性解析結果は各 Hot spot 数における、回転数(横軸)に対する特性根の実部の大きさに回転数 ω を乗じた実部の大きさ(縦軸)を示している。実部の値が正の部分では不安定振動、つまり、Hot Judderが発生することを示しており、負の部分では安定である。また、各 Hot spot 数に応じて不安定($\sigma\omega > 0$)になる回転数の範囲が異なっている。さらに、Hot Judderの発生振動数は、ローター回転数と Hot spot 数の積で表され、この振動数はブレーキシステムの固有振動数に近いことがわかった。これは時間遅れを有する自励振動系の特徴である。

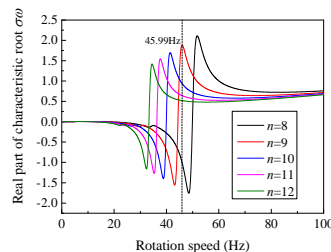


図6 特性根実部 $\sigma\omega$ とローター回転数との関係

②数値シミュレーション結果

図6中のローターの回転数が 45.99 Hz、Hot spot の発生個数が 9 個でのシミュレーション解析を行った。図7はキャリバの変位 x_1 の振動波形を示している。図8は図7の 9~10s 間の振動波形に対する周波数分析結果を示し、Hot Judderの発生振動数の確認を行った。図8から周波数のピーク 414 Hz を確認でき、シミュレーション解析結果からも Hot Judder の発生振動数はブレーキシステムの固有振動数である 400 Hz 付近で発生することが分かった。

図9の横軸はローター一回転周期分の時間を示し、縦軸はインナー側の膨張量 u_i およびアウ

ター側の膨張量 u_o を示している。図 10 は、図 3 および図 4 より常温からの温度上昇量とローターの膨張量の関係を調べ、一回転周期分の温度分布を算出したものである。ただし、単位は K とする。

図 9 から 9 個の Hot spot が成長していることが確認できる。また、ローターの膨張量が時間の経過に伴いインナー側とアウトター側で互いに逆位相で膨張していく過程が確認できた。図 10 から、Hot spot が 9 個発生していることが確認でき、ローターのインナー側とアウトター側において、膨張量が大きい部分で高温になり、10 s 間で最高温度が 600 K 以上、上昇していることが確認できた。以上の結果から、接触力の変動により生じるローターの膨張量の変動が、さらに接触力の変動を助長し、それらが成長することによって Hot Judder が発生することがわかった。さらに、ローターの膨張量が大きいところで Hot spot が発生していることがわかった。

これまでの関連の研究では、発生した熱によりローターとパッドが熱膨張し、構造における変形によってさらに接触力の不均一さを生み、やがて座屈を引き起こす、熱弾性による静的不安定として扱った研究例はあるが、本研究で提案したようなブレーキで発生する摩擦による熱弾性を伴う自励振動についてその発生原因の解明を行った研究例はない。

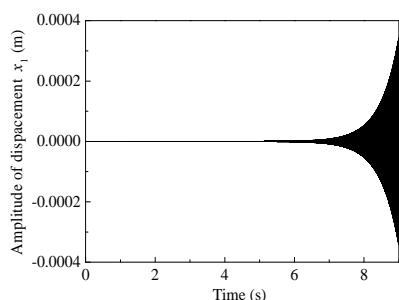


図 7 インナーキャリパの時間波形 x_1

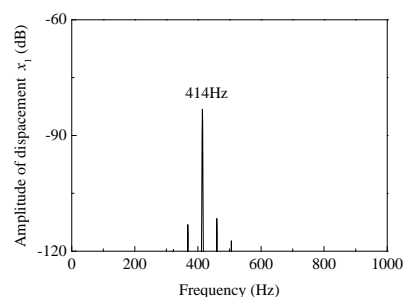


図 8 図 7 に対する周波数分析結果

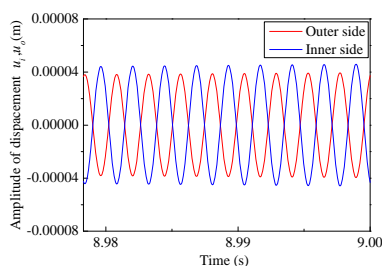


図 9 ローター膨張量に対する振動波形

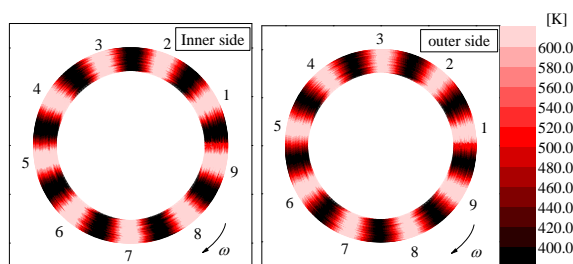


図 10 ローター表面温度分布

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 1 件)

① Kohei Takahashi, Takashi Nakae, Takahiro Ryu, Basic research on hot judder of car disc brakes from the viewpoint of self-excited vibration with time delay, Proceedings of 24th international congress on sound and vibration, Vol.1, 2017, No.712, pp.1-8 査読有

[学会発表] (計 7 件)

① Takashi Nakae, Takahiro Ryu, Hiroki Goto, Daisuke Sato, Effect of adding mass to rotor on in-plane squeal in automotive disc brake, 14th international conference on vibration engineering and technology of machinery, 2018.

② 中江貴志, 劉 孝宏, 潮谷泰平, 中園達也, 自励振動理論に基づいたディスクブレーキの Hot Judder に関する基礎的研究, 自動車技術会秋季大会, 2018.

③ 中江貴志, ディスクロータ付加質量によるブレーキ面内鳴きへの影響, 第 18 回摩擦振動を中心とした談話会, 2017.

④ 後藤裕樹, 劉 孝宏, 中江貴志, ロータ質量付加によるディスクブレーキの面内鳴きへの影響, Dynamics and Design Conference, 2017.

⑤ 中江貴志, 熱変形を伴うホットジャダーに対する自励振動理論からの基礎的アプローチ, 第 3 回次世代自動車工学シンポジウム, 2016.

⑥ 久米光貴, 劉 孝宏, 中江貴志, 岩本光生, 自動車用ディスクブレーキの Hot Judder に関する基礎的研究, Dynamics and Design Conference, 2016.

⑦ 久米光貴, 中江貴志, 劉 孝宏, 岩本光生, 時間遅れを伴う自動車用ディスクブレーキの Hot Judder に関する基礎的研究, 第 25 回交通・物流部門大会, 2016.

〔図書〕（計 0 件）

〔産業財産権〕

○出願状況（計 0 件）

名称：
発明者：
権利者：
種類：
番号：
出願年：
国内外の別：

○取得状況（計 0 件）

名称：
発明者：
権利者：
種類：
番号：
取得年：
国内外の別：

〔その他〕

ホームページ等

6. 研究組織

(1) 研究分担者

研究分担者氏名：

ローマ字氏名：

所属研究機関名：

部局名：

職名：

研究者番号（8桁）：

(2) 研究協力者

研究協力者氏名：劉 孝宏

ローマ字氏名：(Takahiro Ryu)