

平成 22 年 4 月 7 日現在

研究種目：若手研究（B）
 研究期間：2007年度～2009年度
 課題番号：19760149
 研究課題名（和文）柔軟マルチボディダイナミクスによるタイヤ／路面接触力学に関する研究
 研究課題名（英文）Tire/Road Contact Dynamics using Flexible Multibody Dynamics
 研究代表者 杉山 博之
 （東京理科大学・工学部・講師）
 研究者番号：80436576

研究成果の概要（和文）：本研究では，短波長の路面凹凸によって励起されるタイヤベルトの動的変形を考慮した非線形タイヤモデルを開発した．提案したタイヤモデルの有効性を検証するためにタイヤ試験装置を開発し，タイヤの振動特性および突起乗り越し時の動的特性において実験結果と計算結果に良い一致が見られることを示した．以上から，従来厳密に取り扱うことが難しい，タイヤの接触力学特性と振動特性の動的連成を厳密に考慮した評価が可能となることを示し，マルチボディダイナミクスシミュレーションによる自動車の乗心地，耐久性評価において有効な手法であることを示した．

研究成果の概要（英文）：In this investigation, a nonlinear elastic ring tire model is developed. The elastic deformation of the tire belt is modeled using the finite element absolute nodal coordinate formulation which allows for describing large rotational motion and the nonlinear inertia effects; the curved structure of the tire belt; and moving boundary resulting from the tread and road interaction. Using a concept of elastic ring tire models, the sidewall flexibility of a tire is modeled using circumferential and radial springs and dampers defined between the belt and rim, while the tangential tire force is modeled using friction elements defined at contact nodes defined within the curved belt elements. Furthermore, a tire testing machine is developed and used for validating the proposed tire model. Good agreements are demonstrated in the modal characteristics of tires and the bump clearance characteristics obtained using the experiments and the numerical model. It is demonstrated that the proposed tire model can properly account for the dynamic coupling of contact forces and structural vibrations of tires in ride comfort and durability analyses.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合 計
19 年度	1,400,000	0	1,400,000
20 年度	1,300,000	390,000	1,690,000
21 年度	500,000	150,000	650,000
年度			
年度			
総 計	3,200,000	540,000	3,740,000

研究分野：マルチボディダイナミクス

科研費の分科・細目：機械工学・機械力学・制御

キーワード：マルチボディダイナミクス，タイヤ，接触力学，非線形有限要素法

1. 研究開始当初の背景

近年，ITS (Intelligent Transportation System) 技術の進展に伴う自動車の知能化やインテリジェントタイヤなどに見られる，走行中のタイヤをタイヤ力センサーとして利用して自動車の効率的な駆動，制動，旋回を実現する次世代自動車技術の開発が活発に行われている．タイヤは車両と路面をつなぐ唯一の境界要素であるため，タイヤから直接路面状態または発生するタイヤ力を計測できることは，より高度な車両運動制御を実現する上で極めて重要である．また，タイヤの動力学特性とタイヤ力発生メカニズムの関係を明らかにすることによってタイヤによる路面状態推定技術を実現することも可能となる．しかしながら，タイヤ自体の非線形性の取り扱いの困難さから，従来は定常モデルなど比較的簡略化されたタイヤモデルを用いて評価がなされることが多かった．タイヤの非線形性には転動するタイヤの大回転運動と弾性変形に起因した幾何学的非線形性とゴムの粘弾性特性，路面との粘着／すべり特性に起因した材料非線形性がある．つまり，タイヤは路面との接触を介してこれらの非線形性が複雑に連成することによりタイヤ力を発生している．そのため，このような非線形性の強いシステムをモデル化する場合，着目する現象の周波数帯域に応じて異なるタイヤモデルを使い分けていることが実情である．例えば，数 Hz の定常的な車両操安性の問題では，タイヤのトレッドゴムと路面の接触現象のみに着目したタイヤ力モデルが用いられ，約 80Hz 程度までの過渡的な応答を取り扱う場合には，剛体リングとトレッド接触モデルを組み合わせたタイヤモデルが用いられている．これらのモデルでは，モデル自由度の急激な増大を招くタイヤベルトの弾性変形(振動)は考慮されていない．つまり，従来のタイヤモデルでは，モデルの適用周波数が低いため，走行する路面凹凸は長波長のものに限られていた．そして，タイヤのベルト変形に起因した高周波の弾性振動モードが励起される短波長の路面凹凸に対してもトレッドゴムとの接触を厳密に考慮し，それによって励起される振動(波動)がタイヤの弾性ベルトに伝達される一連の動力学現象を厳密にモデル化することができない．しかしながら，タイヤの振動特性と接触力特性の関係が定量的に明らかになれば，ばね上へ伝達される振動成分からタイヤの接触状態を推定するなどの従来にはない新しいインテリジェントタイヤの概念を創造する理論的枠組みの構築にもつながり，タ

イヤの動力学現象の解明だけでなく，それを利用した新しい車両運動制御技術の開発が可能となる．一方，それらを実現するためには，種々の路面性状に対して転動中のタイヤに発生する力および振動を厳密に評価可能な非線形タイヤモデルの開発が必要である．

2. 研究の目的

本研究では，短波長の路面不整によって励起されるタイヤ振動の影響を厳密に考慮した非線形タイヤモデルをマルチボディダイナミクス解析の観点から定式化し，その有効性を示す．さらに，タイヤ試験装置を設計，製作し，タイヤモデルの動的特性に関する妥当性検証を行う．

3. 研究の方法

(1) 非線形弾性リングタイヤモデルの開発

本研究にて提案するタイヤモデルでは，図 1 に示すように，弾性ベルトを連続的な曲がり梁によってモデル化し，それが剛体としてモデル化されたリムに半径および周方向にばねおよびダンパーにて結合されている．これらのばねおよびダンパーにより，タイヤのサイドウォール剛性をモデル化する．また，タイヤと路面間の動的接触をモデル化するために，図 1 (a) に示すように，接触ノードを要素内に配置し，路面との接触の有無および接触した場合にはその点における法線接触力および接線力(前後力)を定義する．

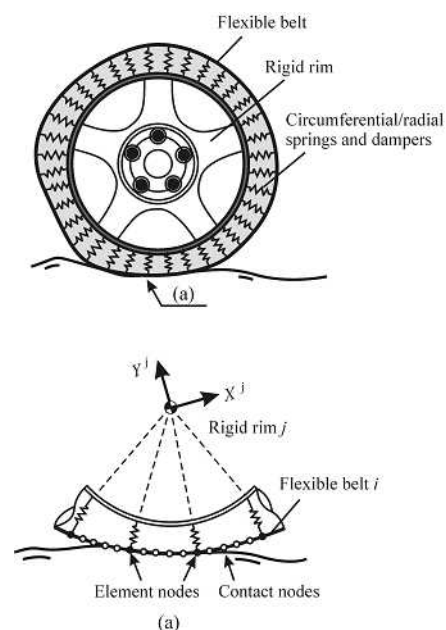


Fig. 1 In-plane flexible tire model

タイヤは路面との接触により変形し、さらに、転動時には遠心およびコリオリの非線形慣性力が発生する．そのため、本研究では以下の条件を満足する弾性ベルトのモデル化が必要である．

接地時のベルトの変形（大たわみ効果）を考慮可能

タイヤ大回転運動時のジャイロ効果を考慮可能

路面との動的接触をモデル化可能（移動境界のモデル化）

自由度の増大による計算性を損なうことなく見通しの良い解を得ること

タイヤの路面との移動境界問題を取り扱うには、境界条件固定を仮定したモード法による自由度の低減ができないため、Floating frame of reference formulation による既存の柔軟マルチボディダイナミクス の枠組みではなく、非線形有限要素法によるモデル化が適当と考えられる．その際、タイヤの弾性ベルトをモデル化する有限要素は以下の条件を満足する必要がある．

ベルトの初期曲率の影響を考慮した曲がり梁であること

接触域におけるベルトの大たわみに起因した非線形弾性力が考慮されていること

大回転運動に伴うジャイロ効果が考慮されていること

自由度の増大を招かないために要素精度および収束性に優れていること

これらの条件を満足した弾性体のモデル化として、柔軟マルチボディダイナミクス解析手法の一つとして著者らが開発を行った Absolute nodal coordinate formulation (ANCF) による曲がり梁要素がある．本手法では、既存の梁および板 / シェル等の構造要素にて複雑な動的連成項を生じさせる 3 次元回転座標を用いず、基準配置にて定義される変位勾配をその節点座標として定義することにより、要素内の任意点における剛体回転および弾性変形を表し、その大回転運動と弾性変形の複雑な連成を導くことなく運動方程式を導くことができることに特徴がある．その結

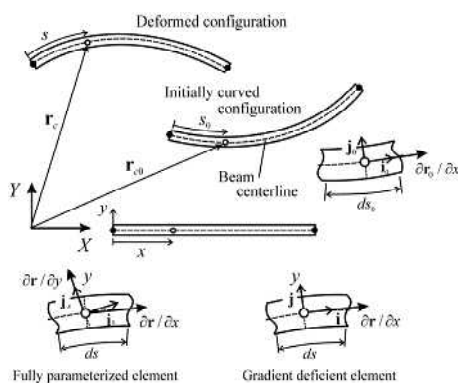


Fig. 2 ANCF curved beam element

果、これらの節点座標に関する一般化質量行列が時間に関して一定となり、拘束系の非線形動力学問題を取り扱う上で問題となる非線形慣性力項の取扱いが容易となる．そこで、本モデルの 2 次元曲がり梁要素をタイヤの弾性ベルトに適用することにより、タイヤの接触力学特性とタイヤの振動特性の動的な連成を厳密に考慮した解析が可能となる．

一方、ANCF に基づく大変形曲がり梁要素を使用しているため、転動時の弾性ベルトのせん断および断面変形を厳密に考慮可能である一方、本研究で対象とする短波長の路面凹凸に対して、これらの変形に起因した高次振動成分が励起され、多くの計算時間を要しモデルの改良が必要であることが計算を進める上で分かってきた．そこで、図 2 に示すような断面保持を仮定した非線形曲がり梁要素を ANCF に基づいて新たに開発し (Gradient deficient 曲がり梁要素)、本要素に基づく非線形弾性リングタイヤモデルを構築した．

(2) タイヤ試験装置の開発

本研究で開発したタイヤ試験機の全体図を図 3 に示す．本試験機では直径 508mm のドラムを定格出力 5.5kw のサーボモーターにより駆動することにより、ドラムと接触したカート用タイヤ(直径 254mm)を転動させる．ドラムの最大回転数は 500rpm であり、その時のタイヤ速度は約 45km/h である．また、タイヤの押し付け荷重は車軸が支持されているフレームがボールねじにより並進できる機構になっており、その送り量により押し付け荷重を設定することが可能である．本装置では、タイヤが回転しても車軸は回転しないようハブ構造となっており、車軸の 2 方向の曲げひずみから転動中のタイヤ力を計測している．タイヤとドラムの回転速を計測するために、回転体の周方向に反射マーク貼付し、オプトファイバーセンサーによって周波数を計測する．得られた周波数を F/V コンバータで電圧変換することにより、ドラム軸およびタイヤ軸の回転数を計測する．タイヤ力、

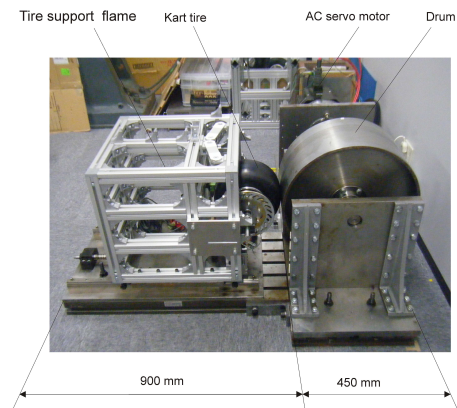


Fig. 3 Tire testing machine

タイヤ回転速に加え、車軸に伝達されるタイヤ振動を加速度計によって計測し、タイヤの変形量はレーザー変位計によって計測する。

4. 研究成果

カート用タイヤに対して打撃および加振試験を実施し、種々の境界条件に対するタイヤの固有振動特性を計測した。図4および図5にタイヤモデルおよび実験により求めた非接地および接地状態のタイヤの固有振動数および固有振動モードを示す。計算結果と実験結果に良い一致が見られ、基本的な振動特性を正しくモデル化できていることが分かった。また図6に示すように、突起乗り越し時の上下力およびタイヤの半径方向加速度に実験結果と計算結果に良い一致が見られ、提案手法の有効性が確認できた。

また図7に示すように、試験機のドラム上に種々の波長および振幅を有する石敷の短波長路面凹凸を模擬し、路面凹凸がタイヤの振動励起に及ぼす影響について検討を行った。タイヤに直接内蔵した無線式の加速度計の出力結果から、タイヤの粘弾性特性に起因したひずみ振幅および周波数依存性により、タイヤの卓越周波数が路面凹凸によって変

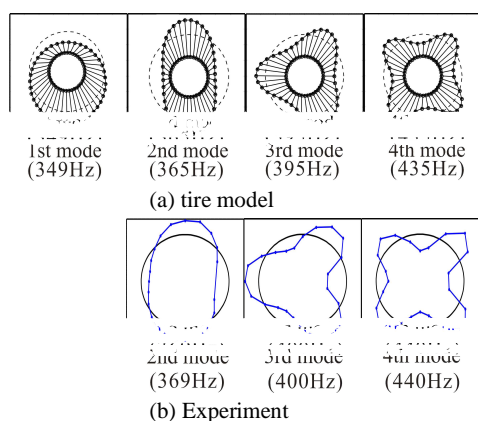


Fig. 4 Modal characteristics (unloaded)

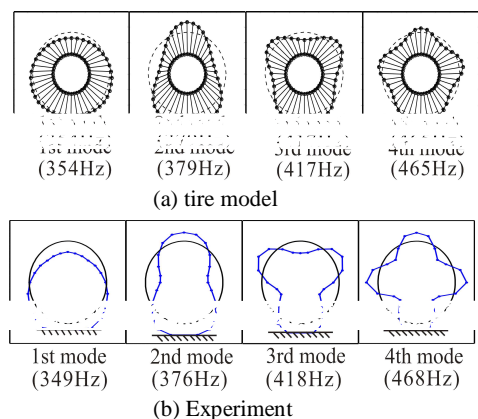


Fig. 5 Modal characteristics (loaded)

化していくことを示した。

本研究において、柔軟マルチボディダイナミクスにおける動的非線形有限要素手法（ANCF）をタイヤと路面間の接触力学問題へ拡張した新たな非線形タイヤモデルを開発したことにより、従来は単独に研究がなされてきたタイヤの接触力学特性とタイヤの振動特性を柔軟マルチボディダイナミクスなる1つの枠組みの中でその非線形連成を厳密に考慮した評価が可能となった。特に、短波長路面凹凸によって励起するタイヤベルトの変形に起因した振動を正しく考慮可能であるため、マルチボディダイナミクスシミュレーションによる自動車の乗心地、耐久性評価など、自動車の運動解析技術における新手法として新規性を有する。なお、提案したタイヤモデルに関する本研究成果はIMechE Journal of Multi-Body Dynamicsに論文として掲載され、2009年のPE Publishing Best Paper Awardを受賞し、国外においても評価された。一方、タイヤ試験装置の開発により、種々の路面凹凸に対するタイヤの振動特性およびタイヤの粘弾性特性に起因したひずみ振幅依存性および周波数依存性が実験的にも観察され、これら動的粘弾性挙動の厳密なモデル化手法の開発が今後望まれると考えられる。

5. 主な発表論文等

（研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線）

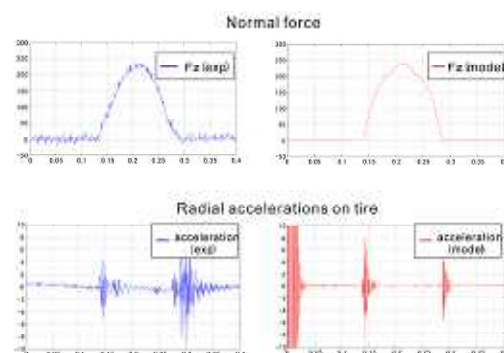


Fig. 6 Experimental validations

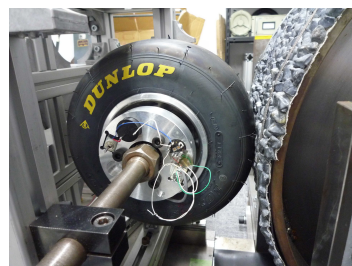


Fig. 7 Tire rolling on uneven road surface

〔雑誌論文〕(計2件)

1. Sugiyama, H., Koyama, H. and Yamashita, H. , Gradient Deficient Curved Beam Element Using the Absolute Nodal Coordinate Formulation, *ASME Journal of Computational and Nonlinear Dynamics*, 査読有 ,vol.5, 2010, pp. 041001- 1-8.
2. Sugiyama, H. and Suda, Y., Nonlinear Elastic Ring Tire Model Using the Absolute Nodal Coordinate Formulation, *IMechE Journal of Multi-Body Dynamics*, 査読有, vol. 223, 2009, pp. 211-219.

〔学会発表〕(計5件)

1. Sugiyama, H., Koyama, H. and Yamashita, H., Performance of Curved Beam Elements Using the Absolute Nodal Coordinate formulation, Proceedings of ASME International Design Engineering Technical Conferences and Computer and Information in Engineering Conference (ASME DETC2009- 86312), 2009 September 1, San Diego, CA, United States.
2. 杉山博之, 小山博央, 山下拓希, 2009年8月4日, Gradient Deficient要素による大変形曲がり梁の定式化, 日本機械学会 機械力学・計測制御部門講演会, 北海道.
3. Sugiyama, H. and Suda, Y., 2007 September 7, Modeling Nonlinear Flexible Tire Belt in the Study of In-Plane Tire Dynamics, Proceedings of ASME International Design Engineering Technical Conferences and Computer and Information in Engineering Conference (ASME DETC2007-34911), Las Vegas, NV, United States.
4. 杉山博之, 須田義大, 2007年9月26日, Absolute Nodal Coordinate Formulationを用いた弾性タイヤモデルの開発, 日本機械学会 機械力学・計測制御部門講演会, 広島.
5. 原祐太郎, 六角屋健太, 杉山博之, ANCF法による弾性タイヤモデルの構築と実験検証, 日本機械学会 機械力学・計測制御部門講演会, 京都, 2010年発表予定.

6. 研究組織

(1)研究代表者 杉山 博之

(東京理科大学・工学部・講師)

研究者番号：80436576

(2)研究分担者

()

研究者番号：

(3)連携研究者

()

研究者番号：