

スーパーコンピュータによるタイヤ構造解析

Tire Structure Analysis by Supercomputer

中島幸雄* Yukio Nakajima

タイヤは内部の空気の圧力をゴムと補強材とで保持する複合材であり、独特の断面形状をしているため解析的にひずみ、応力の分布状態を求めることが難しい。そのため、数値解析による構造解析手法である有限要素法が広く用いられている。有限要素法のモデル化では、タイヤのどのような性能を予測するかに応じて異なってくる。特に応用例の多い軸対称モデルおよびスーパーコンピュータの導入後によく用いられるようになった三次元モデルについての解析例を示すとともに、実際の製品開発に有限要素法がどのように用いられているかをRCOT(走行時最適形状)、TCOT(張力最適形状)開発を例にとって説明した。今後、技術のブレークスルーそして製品開発期間の短縮、質の向上のために有限要素法を中核としたCAEシステムの構築が必要である。

1 緒言

タイヤは数多くの自動車部品の中で、一つの部品で多くの役割を果たさねばならない数少ない部品である。タイヤの基本機能には、

- (1) 荷重を支える。
- (2) 地面に車の制動力や駆動力を伝える。
- (3) 車の方向を維持、変化させる。
- (4) 衝撃を緩和する。

があるが、それ以外に燃費性、摩耗性が経済面から重要となっている¹⁾²⁾。従来のタイヤ技術では、一つの機能を向上させることはそれほど困難なことではない。しかし、通常一つの性能を向上させた場合、多くの他性能が低下してしまうのは避けられず、例えばタイヤの路面グリップ力を増すために、ソフトなコンパウンドを用いると摩耗しやすくなってしまう。

近年、タイヤに対する要求性能が多様化しており、タイヤ性能の二律背反性をいかにタイムリーに解決していくかが研究のポイントになっている。そのために、コンピュータによる予測技術を活用して、ニーズに対して迅速に対応できるCAEシステムの構築が重要視されてきている。

本稿は、CAE要素技術の中で最もよく使われている有限要素法が、スーパーコンピュータ上でタイヤの構造解析にどのように応用されているかについて述べる。

2 有限要素法のタイヤへの応用

2.1 タイヤの有限要素法解析時の難問

1960年代初めから米国航空業界で精力的に研究されてきた有限要素法のタイヤへの応用は、同年代の後半からであり、有限要素法研究の歴史の比較的早い時期からタイヤ解析の手法として使われている。なぜならば、タイヤは図1に示すように内部の空気の圧力を、ゴムと補強材(スチール、ナイロンコードなど)とで保持する複合材であり、独特の断面形状をしているため解析的にひずみ、応力の分布状態を知るのが難しいからである。そのため、数値解析による構造解析手法である有限要素法がいち早くタイヤへ応用され始めた。

タイヤを精度よく解析することは、製品の耐久性や信頼性

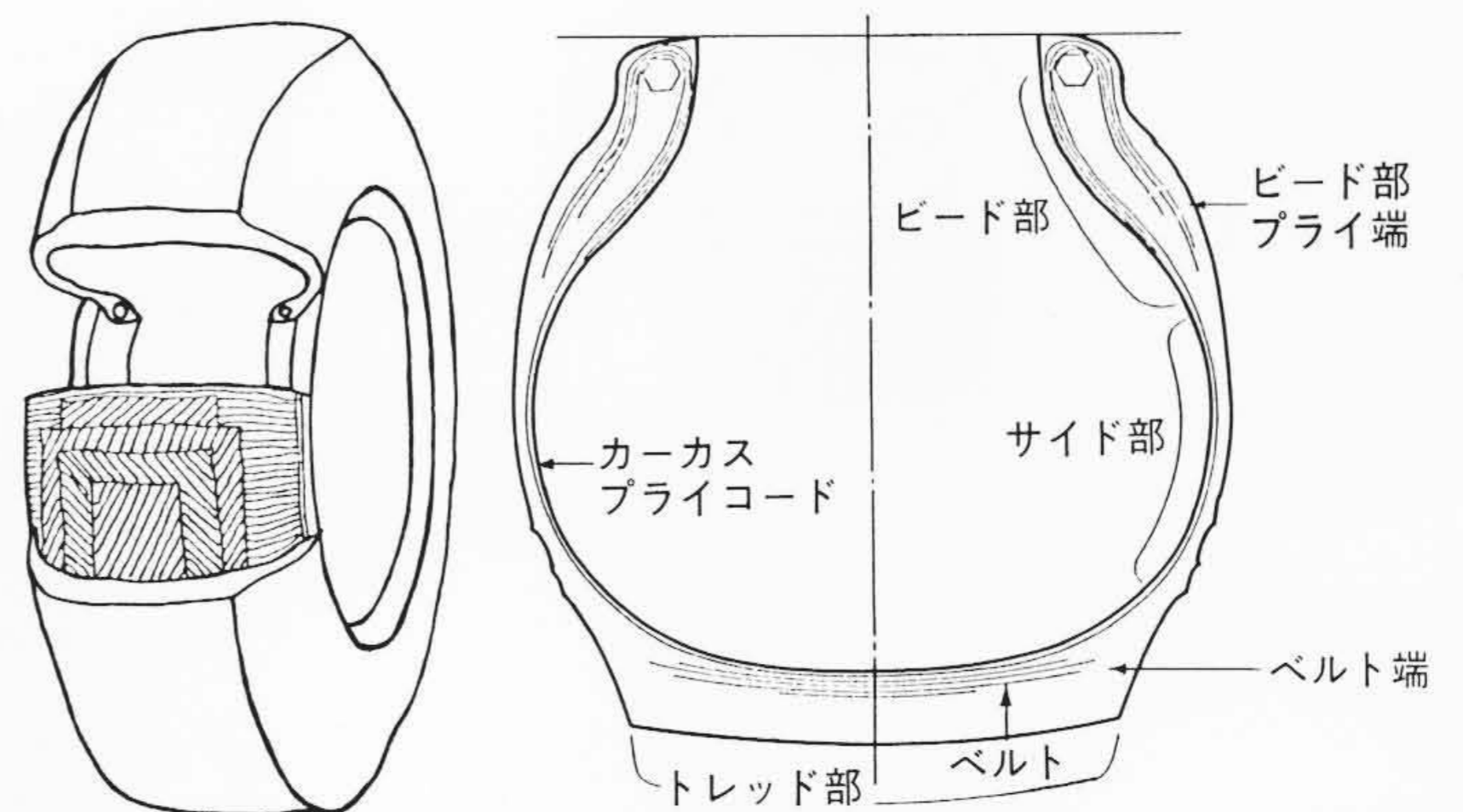


図1 タイヤの構造 内部の空気圧力をゴムと補強材とで保持する複合材で、独特の断面形状をしている。

* 株式会社ブリヂストン タイヤ研究部 工学博士

の向上に必要不可欠であり、そのためには図2で示したタイヤの非線形性と独特の性質を取り扱わねばならない³⁾。

- (1) 数十パーセントを超える大ひずみや大変形がかかり、ひずみの非線形項まで考慮する必要がある。
- (2) 路面と接触した状態で使われるので、接触問題を取り扱う必要がある。
- (3) ゴムは変形時に体積を一定に保ったまま変形する非圧縮性を持っているので、体積を制約条件として考慮する必要がある。

ある。

- (4) 補強材のヤング率は引張りと圧縮とで異なるバイモジュラス特性を持っている。
- (5) 図1のベルトと呼ばれる部分は、複合積層構造をなし異方性を取り扱う必要がある。
- (6) タイヤは一種の圧力容器であり、内部の空気は面に垂直に加わるので変形に伴って圧力の方向が変わるFollower Forceとして取り扱う必要がある。

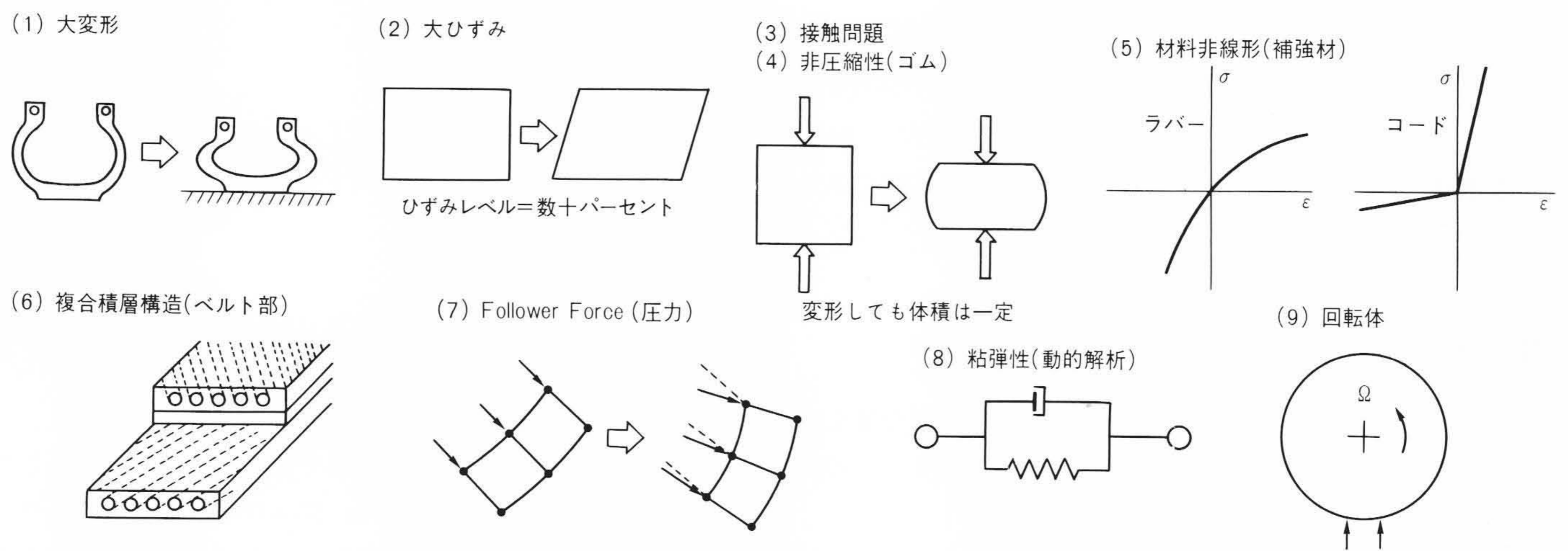


図2 タイヤの有限要素法解析時の難問 それぞれ難しい課題を同時に取り扱わなければならないことが、タイヤの有限要素法解析をいっそう難しいものになっている。

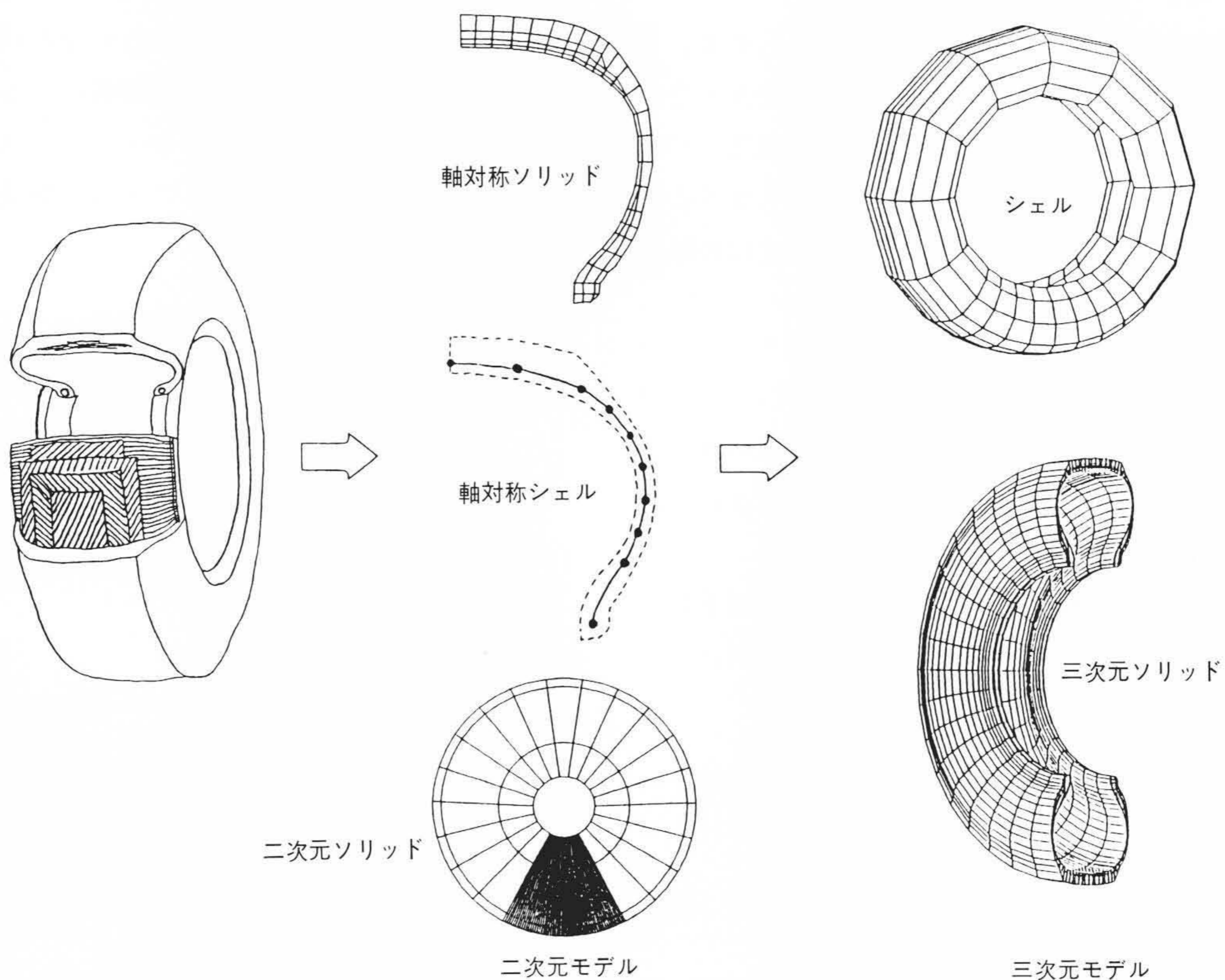


図3 タイヤのモデル化の方法 このうち軸対称、三次元ソリッド要素を用いたモデル化がよく用いられる。

(7) 動的解析時には、粘弾性特性および回転していることを考慮しなければならない。

上記の事項は、現在に至るまで有限要素法の研究テーマの中心となっているほど難しい課題であり、これらを同時に取り扱わなければならないことが、タイヤの有限要素法解析をいっそう難しいものにしていく。

2.2 タイヤのモデル化の方法

解析対象をモデル化する方法は、予測する物理量、精度、計算時間などによって異なってくる。タイヤでは、**図3**に示すモデルがよく用いられる。その中でも、モデル化の簡便さ、計算時間の短さのため、タイヤを軸対称体としてモデル化することが多かった。しかし、タイヤ業界でもスーパーコンピュータを手軽に使える環境が整いつつあるので、より精度よく解析するためにタイヤを三次元物体としてモデル化することが増えつつある。

2.3 解析例1(軸対称モデルによる解析)

トラック、バス用のタイヤの解析例を**図4**に示す。軸対称モデルでタイヤの接地解析をするには、通常軸対称解析と異なり回転軸回りの角度に関する自由度も考慮した特殊な定式化が必要になる⁵⁾。同図の左側はコーナリングしているときのタイヤの変形を示し、ホイールの影響も考慮するためにタイヤとホイールとを同時にモデル化した。同図の右側は固有値解析から得られた固有モードである。 n は周方向の波数、 m

はタイヤ断面方向の波数を意味する。タイヤの固有値とそのモードは、車側の固有値とそのモードとのマッチングによって振動乗り心地に影響を与える重要な物理量である。

2.4 解析例2(二次元モデルによる解析)

タイヤの挙動を概念的にとらえるために、二次元モデルが使われることがある。タイヤが凹路面を通過するときのようすを**図5**に示す。特に、動的問題で重要となるゴム材料の粘弾性特性を考慮し、さらにタイヤが回転しながら路面と接触していることを取り扱えるように、回転接触ロジックを市販プログラムADINAに組み込んだ^{6),7)}。この解析から、タイヤが路面の凹凸からどのような入力を受け、それをどのように車に伝達するかという特性ができ、乗り心地のよいタイヤの設計手法を開発できた。次に、同じ二次元モデルを用いてタイヤが高速で走行するときに発生するスタンディングウェーブについての計算例を**図6**に示す。スタンディングウェーブとは、ある速度を超えると急激に波の振幅が増大し、タイヤが破壊されてしまう現象で、特に超高速用のタイヤでは留意して設計されている。同図から速度200 km/hで走行しているタイヤの後ろ側からスタンディングウェーブが発生していることがわかる。計算でも、タイヤの後ろ側から波が発生してタイヤ全体に伝搬しているようすが予測されている。また、波の発生するタイヤの後ろ側の路面との接地圧が高くなっている。

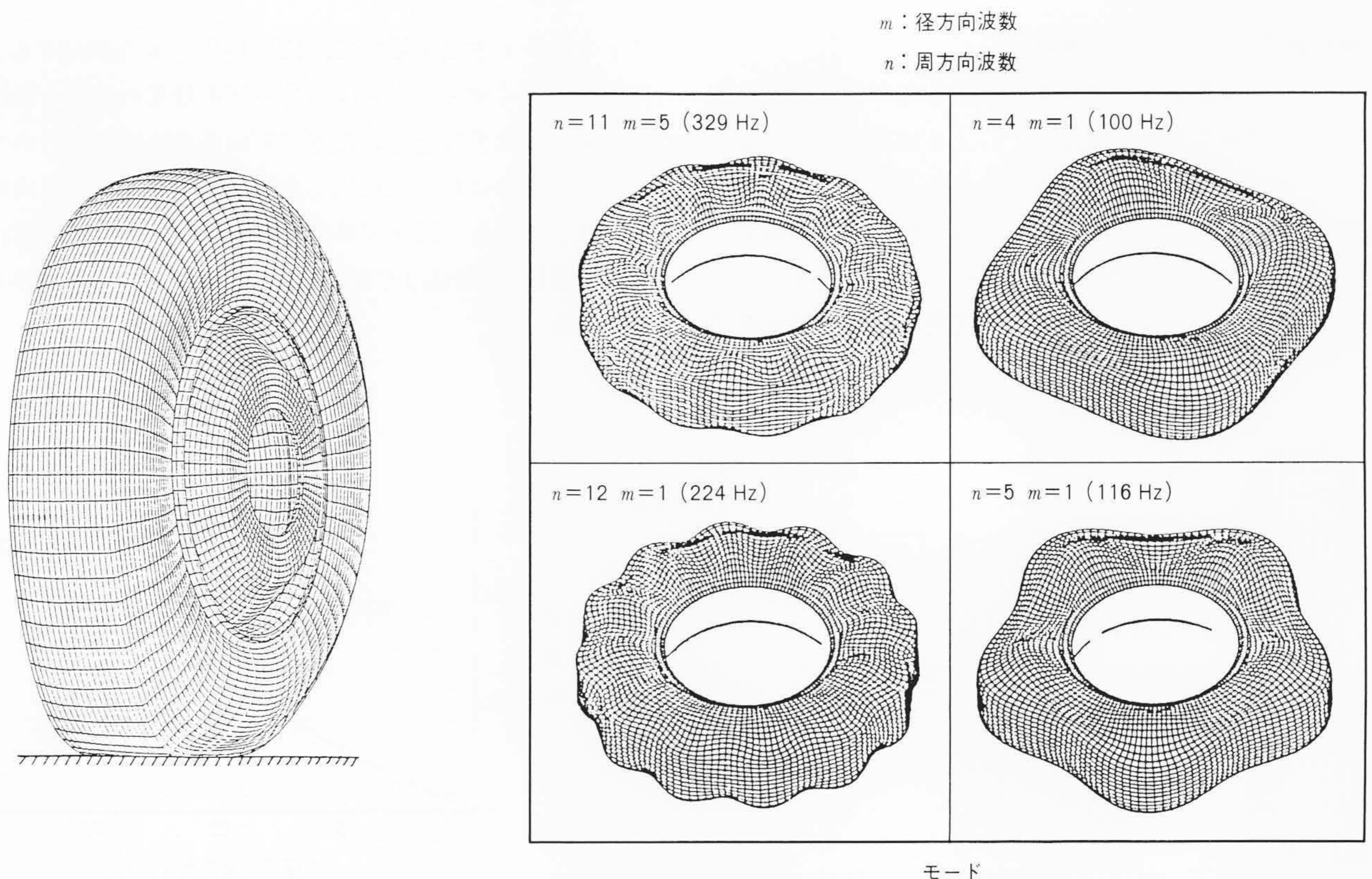


図4 軸対称モデルによる解析例(10.00R 2.0) 左図がコーナリング時のタイヤの変形で、右図が振動モードである。

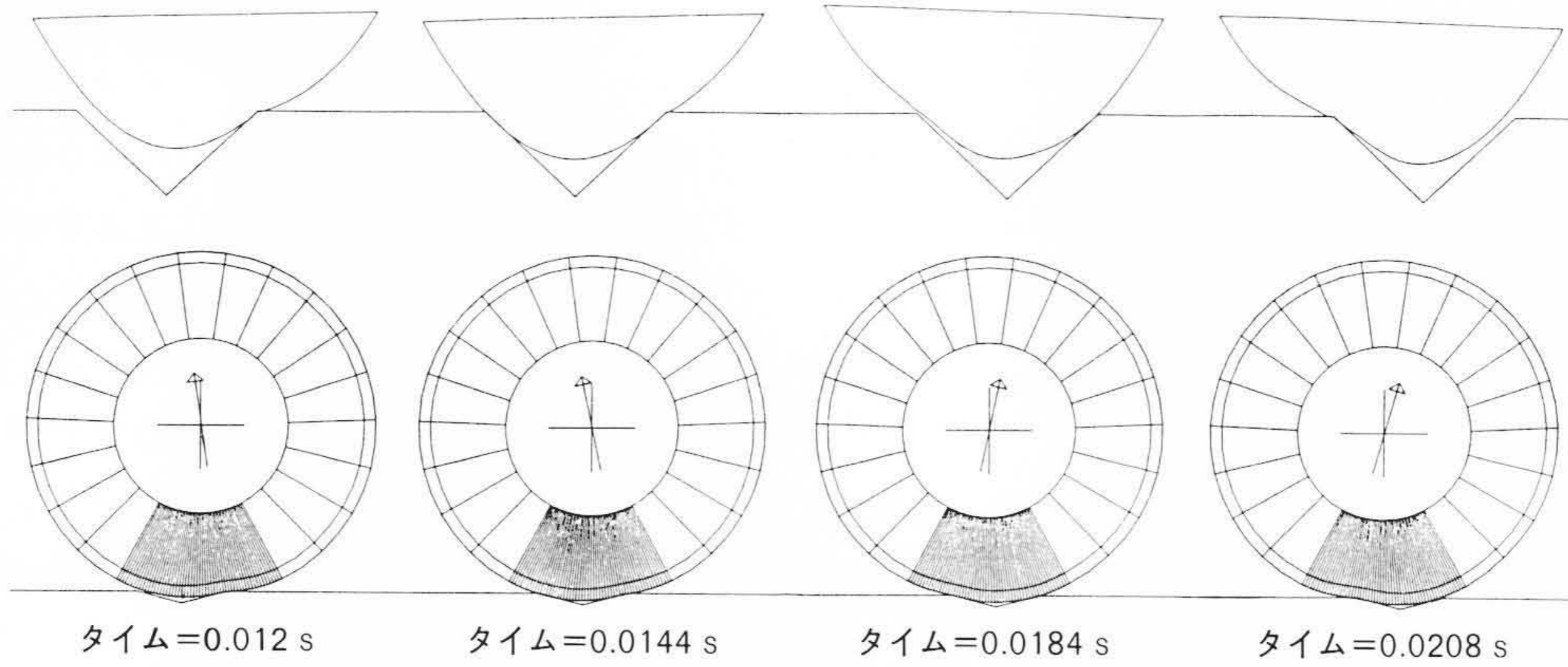


図5 二次元モデルによる動的接触解析 30 km/hの速度で回転しているタイヤが凹路面を通過するとき、タイヤが左側の斜面に衝突した反動で一度浮き上がりながら乗り越えていく(上側の図は上下方向だけ10倍拡大)。

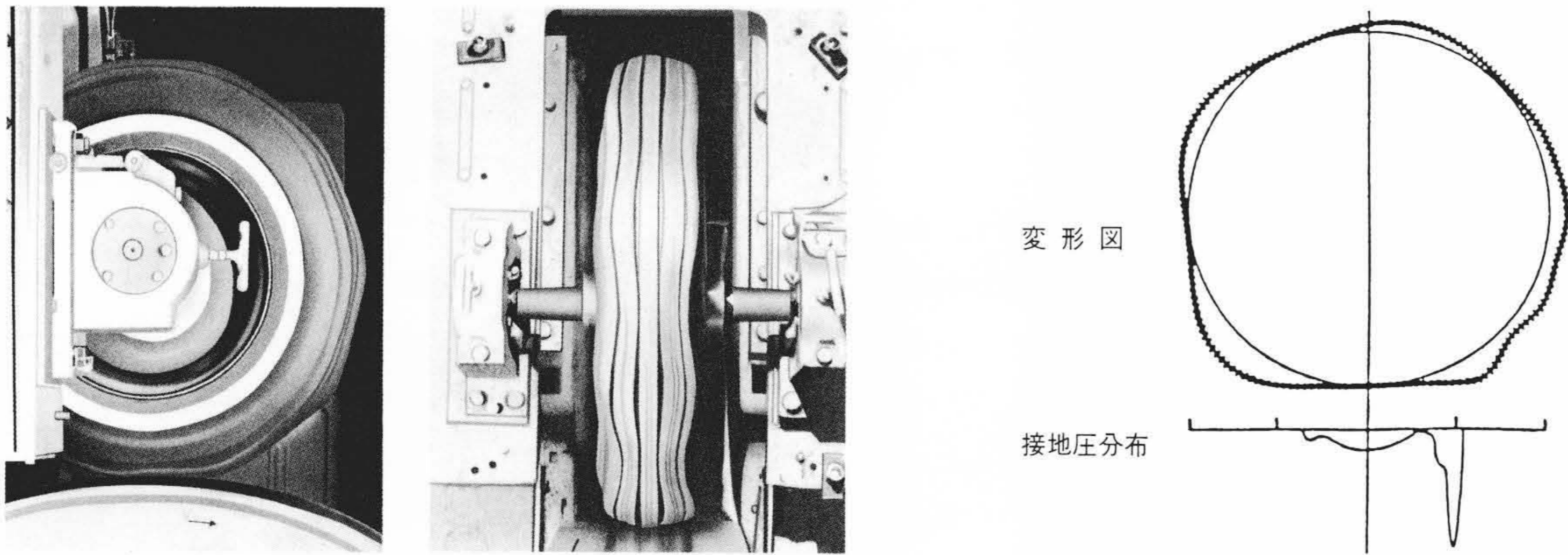


図6 スタンディングウエーブの予測 タイヤの後ろ側から波が発生して全周に広がっていく(変形図は変位を5倍して表示)。

2.5 解析例3 (三次元モデル解析)

三次元モデルは膨大な計算時間を要するものの、軸対称や二次元モデルで見られる簡略化などによる精度の低下がないので、スーパーコンピュータ向けのモデルと言える。タイヤが地面に接地しているときの変形とばね特性を図7に示す。計算時間を短くするためにタイヤの半分だけをモデル化し、さらに変形の大きい地面付近の要素だけを非線形に扱うサブ

ストラクチャ手法を用いて、CPU時間を60%削減することができた。タイヤの変形とばね特性予測結果の実験との比較では、軸対称モデルを用いた線形有限要素法は実験とのずれを生じているのに対し、三次元非線形有限要素法では実験とよく一致している。三次元非線形有限要素法の計算時間は線形有限要素法の100倍ほどを要するものの、予測精度は非常に改善される。

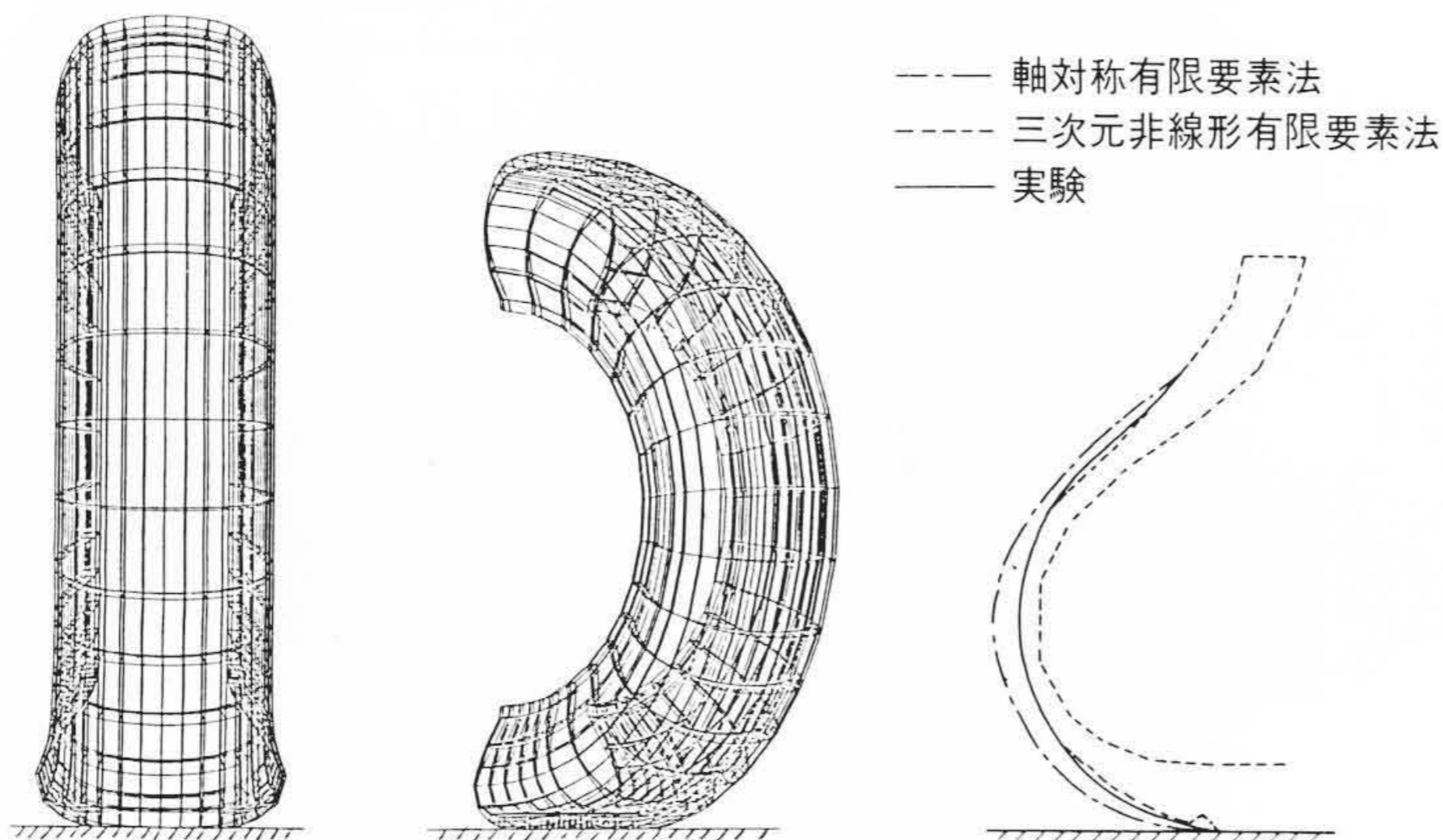
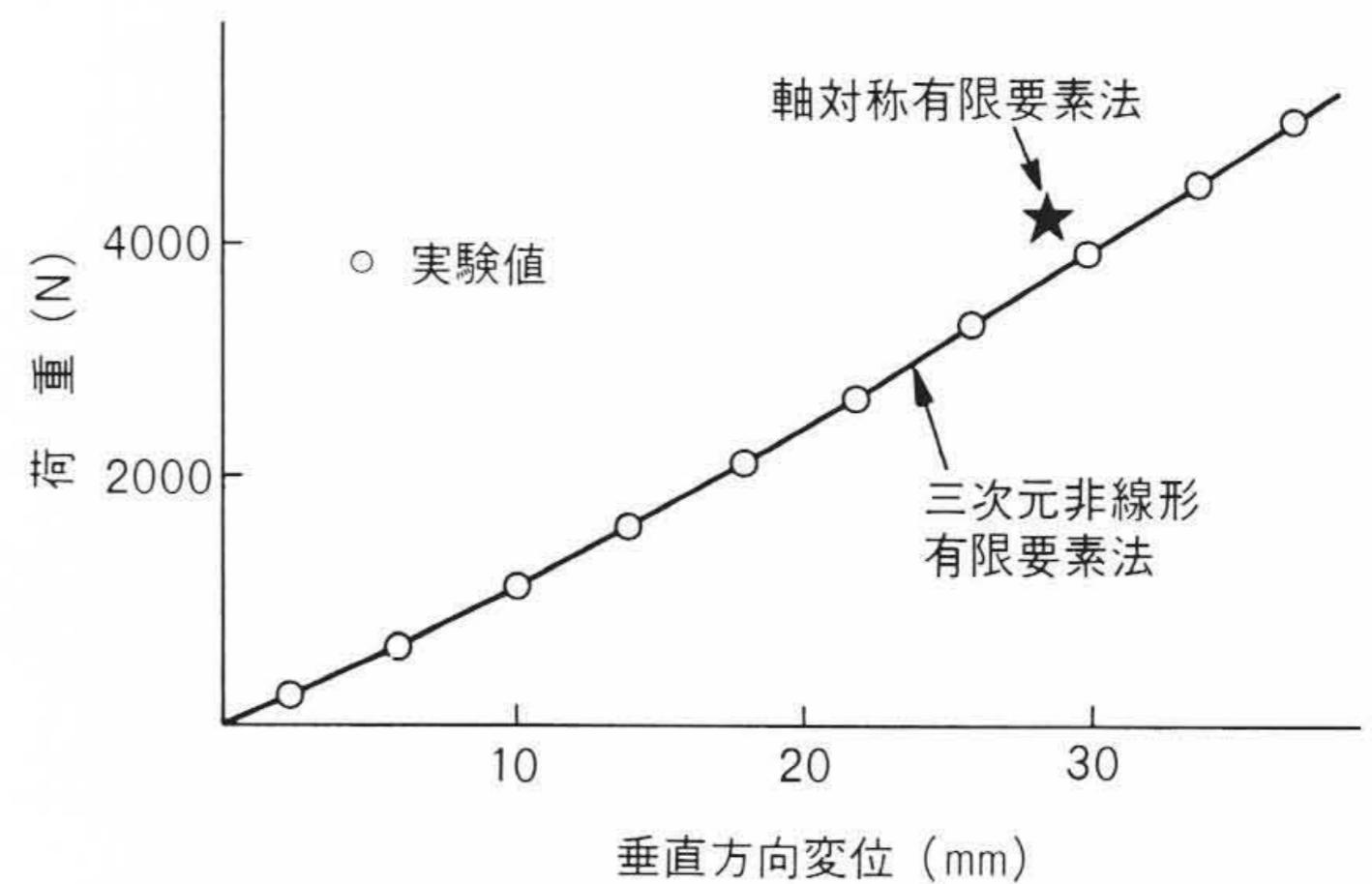


図7 三次元モデルによる接触解析 三次元非線形有限要素法は、軸対称モデルによる線形有限要素法から精度よく予測できる。



3 タイヤ新形状理論RCOT, TCOT開発での有限要素法の応用^{8),9)}

タイヤの形状の設計理論については、かなり以前からいわゆる自然形状理論として、コードによって補強された薄膜環状体に内圧をかけたときの平衡形状が数学的に解かれており、広くタイヤの断面形状を与える基礎式として用いられてきた。形状の検討にはモールドの新設や膨大な費用と時間が必要であり、可能性も低いと考えられていたので検討が遅れていた。原点に帰って考えてみると、自然形状に対する素朴な疑問が生じてきた。内圧をかけたときの平衡形状が走行時最適性能を発揮するのはなぜか。タイヤは路面に接地しながら回転してこそ本来の機能を発揮するのであるから、形状設計理論は走行状態をベースに展開すべきではないか。このような考えから生まれたのが乗用車用タイヤの形状設計理論RCOT(走行時最適形状)であり、それをトラック、バス用タイヤに発展拡張したのがTCOT(張力最適形状)である。

従来の平衡形状は基礎式から一つの形状が定まるのに対し、それから外れた非平衡形状では無数に形状が考えられる。無数の形状から最適の形状を見つけるために、タイヤの補強材の張力分布に着目し、社内で長年かけて開発した有限要素法プログラムを活用した。

図8に示した有限要素法による張力分布は、従来形状ではカーカス張力が均一な分布をしているのに対し、RCOT,

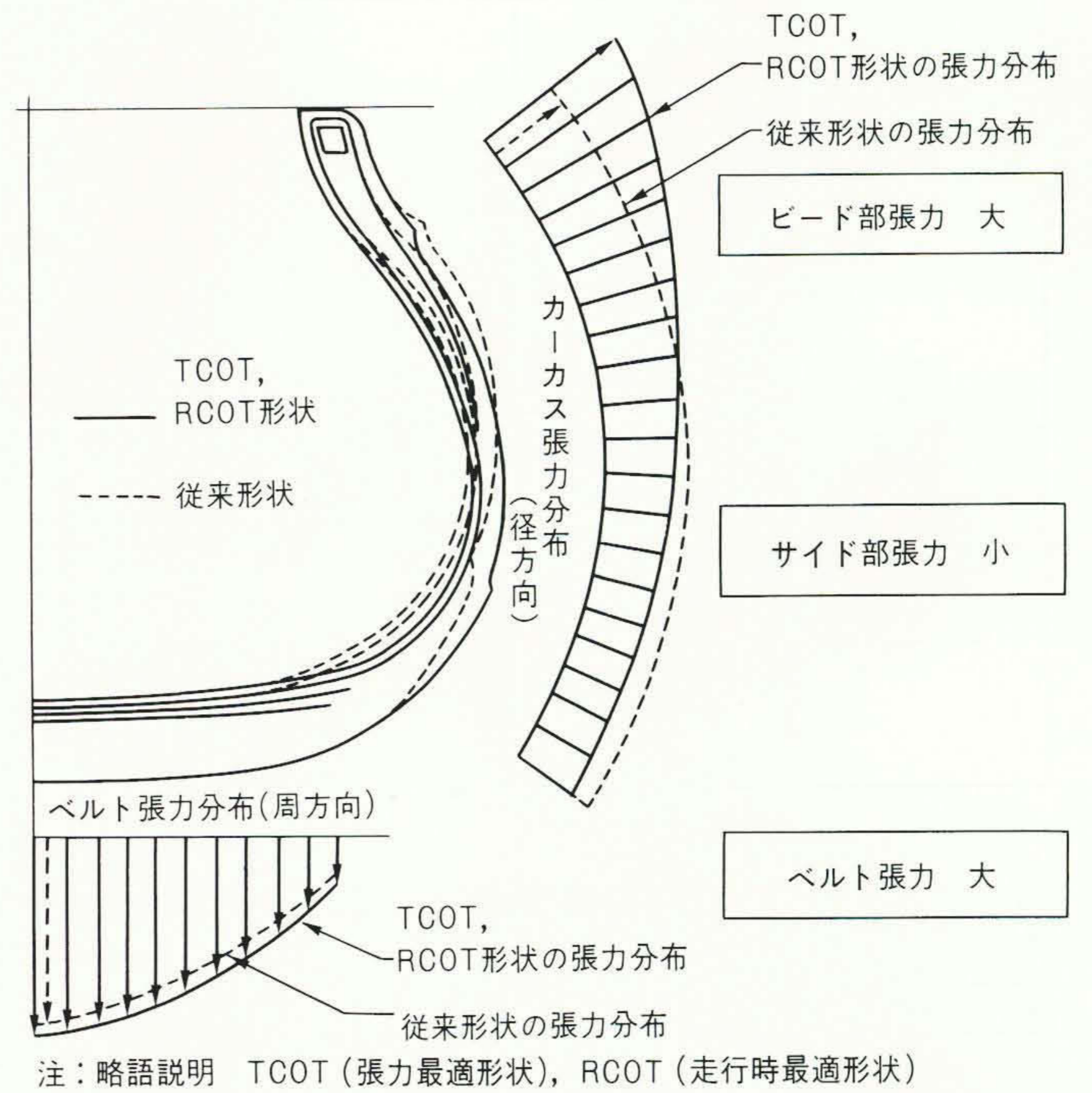


図8 RCOT, TCOT形状の特長 RCOT, TCOT形状ではビード部, ベルト張力が大きく, サイド張力が小さい。

TCOT形状ではビード部張力が大きく, サイド部張力が小さい不均一分布をしている。またRCOT, TCOT形状ではベルト張力も従来形状より大きい。ベルト張力が大きいために乗

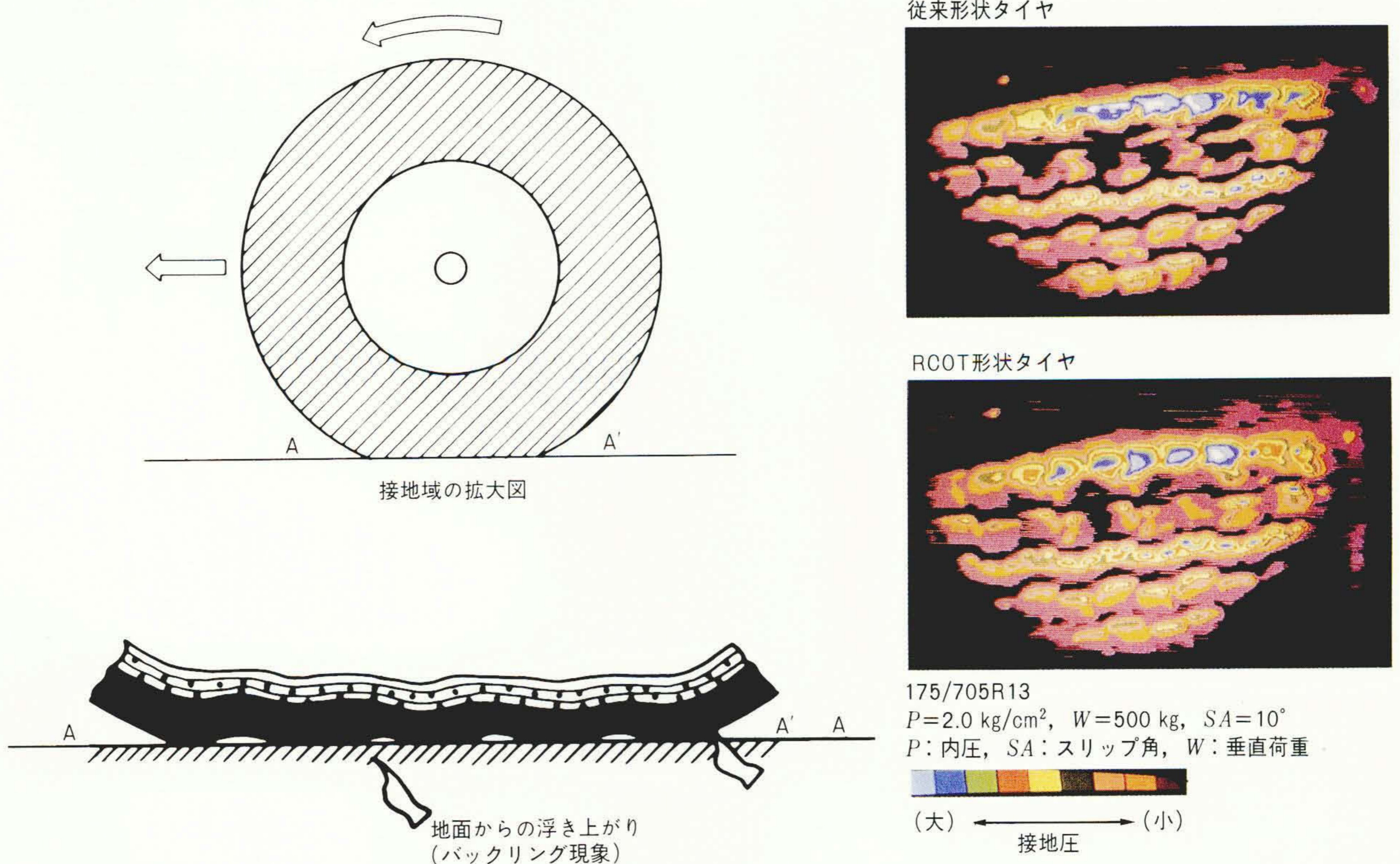


図9 コーナリング時のバックリングの発生 右側の黒い部分が浮き上がっている。RCOT形状は従来形状よりバックリングしにくい。

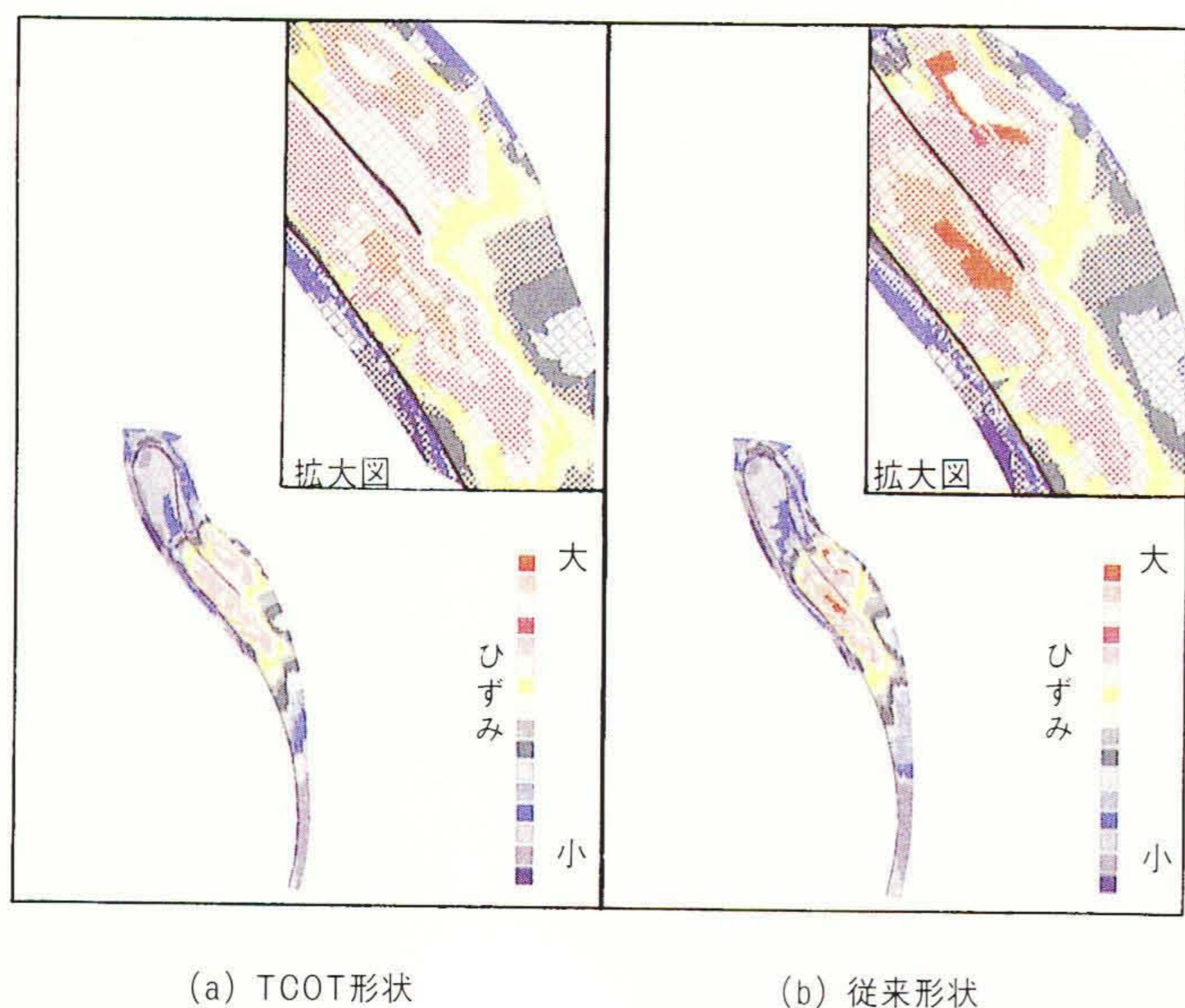


図10 転動時でのビード部プライ端ひずみ比較 TCOT形状はビード部の張力が大きく剛性が増すので、転動時のビード部変形が抑制され耐久性が向上する。

用車用RCOT形状では、コーナリングするとき発生する図9に示したバックリングと呼ばれるタイヤの一部が路面から浮き上がる現象を起こしにくい。同図の右側はバックリングの発生状況を示し、黒い部分が接地面から浮き上がる傾向にあることを示している。RCOT形状はバックリングを抑制するために、路面とタイヤのグリップが良くなり操縦安定性、ブレーキ性能など多くの性能が同時に改良できた。次に、トラック、バス用TCOT形状と従来形状の転動中のビード部のひずみ分布を図10に示す。TCOT形状はビード張力が大きく剛性が増し、ビード部の変形が抑制されプライ端ひずみが小さくなり耐久性能が40%向上した。

4 結 言

スーパーコンピュータによるタイヤ構造解析は、技術のブレークスルーのために、そして製品開発期間の短縮、質の向上のために有限要素法を中心として重要性が増しつつある。

今後、有限要素法以外の要素技術と有機的に結合したCAEシステムへ発展させると同時に、プリ・ポストプロセッサなどを充実してユーザーフレンドリーな環境を作り上げていこうと考えている。

参考文献

- 1) 服部：タイヤの話，大成社(1986)
- 2) 酒井：タイヤ工学(入門から応用まで)，グランプリ出版(1987)
- 3) N. Yoshimura：The Application of Finite Element Method to Tire Design, Rubber World, June(1985)
- 4) A. K. Noor, et al.：Advances and Trends in the Development of Computational Models for Tires, Computers & Structures, Vol.20, pp.517(1985)
- 5) O. C. Zienkiewicz：The Finite Element Method (3rd edition) McGraw Hill(1977)
- 6) Y. Nakajima, et al.：Numerical Simulation of Tire Sliding Events Involving Impacts with Hole and Bumps, Tire Science and Technology, Vol.14(1986)
- 7) Y. Nakajima, et al.：Finite Element Analysis of Steady and Transiently Moving/Rolling Nonlinear Viscoelastic Structure-III Impact Contact Simulations, Computers & Structures Vol.27, pp.274(1987)
- 8) K. Yamagishi, et al.：A Study on the Contour of the Radial Tire - Rolling Contour Optimization Theory (RCOT), - Tire Science and Technology, Vol.15, pp.3(1987)
- 9) H. Ogawa, et al.：A Study on the Truck and Bus Radial Tire-Tension Control Optimization Theory (TCOT), - Tire Science and Technology, to be appeared