

(12) 特許協力条約に基づいて公開された国際出願

(19) 世界知的所有権機関
国際事務局(43) 国際公開日
2010年8月12日(12.08.2010)

(10) 国際公開番号

WO 2010/090294 A1

- (51) 国際特許分類: *G01N 3/00* (2006.01) *G01N 3/08* (2006.01)
- (21) 国際出願番号: PCT/JP2010/051732
- (22) 国際出願日: 2010年2月2日(02.02.2010)
- (25) 国際出願の言語: 日本語
- (26) 国際公開の言語: 日本語
- (30) 優先権データ:
特願 2009-026591 2009年2月6日(06.02.2009) JP
- (71) 出願人(米国を除く全ての指定国について): 株式会社ブリヂストン(BRIDGESTONE CORPORATION) [JP/JP]; 〒1048340 東京都中央区京橋1丁目10番1号 Tokyo (JP).
- (72) 発明者; および
- (75) 発明者/出願人(米国についてのみ): 浜谷 悟司 (HAMATANI, Satoshi) [JP/JP]; 〒1878531 東京都小平市小川東町3-1-1 株式会社ブリヂストン 技術センター内 Tokyo (JP). 芥川 恵造 (AKUTAGAWA, Keizo) [JP/JP]; 〒1878531 東京都小平市小川東町3-1-1 株式会社ブリヂストン 技術センター内 Tokyo (JP).
- (74) 代理人: 杉村 憲司 (SUGIMURA, Kenji); 〒1000013 東京都千代田区霞が関三丁目2番1号 霞が関コモンゲート西館36階 Tokyo (JP).
- (81) 指定国(表示のない限り、全ての種類の国内保護が可能): AE, AG, AL, AM, AO, AT, AU, AZ, BA, BB, BG, BH, BR, BW, BY, BZ, CA, CH, CL, CN, CO, CR, CU, CZ, DE, DK, DM, DO, DZ, EC, EE, EG, ES, FI, GB, GD, GE, GH, GM, GT, HN, HR, HU, ID, IL, IN, IS, KE, KG, KM, KN, KP, KR, KZ, LA, LC, LK, LR, LS, LT, LU, LY, MA, MD, ME, MG, MK, MN, MW, MX, MY, MZ, NA, NG, NI, NO, NZ, OM, PE, PG, PH, PL, PT, RO, RS, RU, SC, SD, SE, SG, SK, SL, SM, ST, SV, SY, TH, TJ, TM, TN, TR, TT, TZ, UA, UG, US, UZ, VC, VN, ZA, ZM, ZW.
- (84) 指定国(表示のない限り、全ての種類の広域保護が可能): ARIPO (BW, GH, GM, KE, LS, MW, MZ, NA, SD, SL, SZ, TZ, UG, ZM, ZW), ユーラシア (AM, AZ, BY, KG, KZ, MD, RU, TJ, TM), ヨーロッパ (AT, BE, BG, CH, CY, CZ, DE, DK, EE, ES, FI, FR, GB, GR, HR, HU, IE, IS, IT, LT, LU, LV, MC, MK, MT, NL, NO, PL, PT, RO, SE, SI, SK, SM, TR), OAPI (BF, BJ, CF, CG, CI, CM, GA, GN, GQ, GW, ML, MR, NE, SN, TD, TG).

添付公開書類:

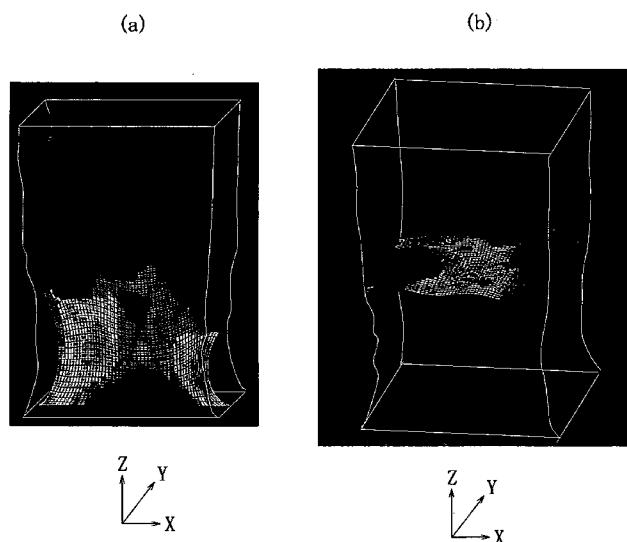
— 国際調査報告(条約第21条(3))

[続葉有]

(54) Title: DEVICE AND METHOD FOR PREDICTING DEFORMATION BEHAVIOR OF RUBBER MATERIALS

(54) 発明の名称: ゴム材料の変形挙動予測装置及びゴム材料の変形挙動予測方法

FIG. 11



(57) Abstract: Disclosed is a method for predicting the deformation behavior of rubber materials, which makes it possible to analyze the viscoelastic behavior of rubber materials with good accuracy even at the microscopic level. More specifically, disclosed is a method for predicting the deformation behavior of rubber materials wherein a plurality of slice images depicting the cross-sectional profile of a rubber material in which a filler has been mixed into a rubber are acquired, the aforementioned slice images are converted to respective binary images to discriminate between the rubber parts and filler parts that are mixed together in the aforementioned rubber material, and a three-dimensional model is generated. The method for predicting deformation behavior of rubber materials is characterized in that structural parameters, in which the relationships between stress, deformation, and time are specified according to the stress relaxation measured at various deformations, are assigned to the rubber parts constituting the aforementioned three-dimensional model, and the deformation behavior of the rubber material is analyzed.

(57) 要約:

[続葉有]



本発明は、ゴム材料の粘弾性挙動の解析をミクロレベルであっても精度良く行うことが可能なゴム材料の変形挙動予測方法に関し、より詳細には、ゴムに充填剤を配合したゴム材料の断面形状を表す複数のスライス画像を取得し、前記ゴム材料に配合したゴム部分と充填剤部分とを判別するために前記スライス画像をそれぞれ2値化画像に変換し、3次元モデルを生成するゴム材料の変形挙動予測方法において、前記3次元モデルを構成するゴム部分に、各歪みで測定される応力緩和によって応力と歪みと時間との関係を定めた構成条件を付与し、ゴム材料の変形挙動を解析することを特徴とするゴム材料の変形挙動予測方法に関するものである。

明細書

発明の名称：

ゴム材料の変形挙動予測装置及びゴム材料の変形挙動予測方法

技術分野

[0001] 本発明は、ゴムにカーボンブラックやシリカ等の充填剤を配合したゴム材料の変形挙動予測装置及び該ゴム材料の変形挙動予測方法に関し、特には、ゴム材料の粘弾性挙動の解析をミクロレベルであっても精度良く行うことが可能な変形挙動予測方法に関するものである。

背景技術

[0002] 従来からゴムにカーボンブラックやシリカ等の充填剤を配合すると補強効果があることが知られており、ゴムに充填剤を配合したゴム材料が自動車用タイヤ等のゴム製品に適用されている。このようなゴム材料では力が加わった際の変形挙動等を実験によって測定し、その測定結果を評価することで、充填剤の配合量の設計等が行われていた。

[0003] また、有限要素法（FEM）等の数値解析手法や計算機環境の発達により、ゴム材料の充填剤部分及びゴム部分の3次元モデルを作成して変形挙動等を解析する方法が各種提案されている。しかしながら、実際のゴム材料を構成する充填剤部分の構造は、複数の充填剤が連なった複雑なネットワーク構造を形成していることや、ゴム材料内で偏った充填剤分布を示すことが明らかになっている。このため、ゴム材料に力が加えられた際にゴム材料内で起くる歪み挙動は非常に複雑であり、ゴム材料の変形挙動を精密に解析できないという問題があった。

[0004] 最近では、ゴム材料の変形挙動を精密に解析できると共に、その解析時間を短縮することができる手法として、実際のゴム材料における充填剤の配置を3次元透過型電子顕微鏡（3D-TEM）により撮影し、得られたデータを計算機トモグラフィー法（CT法）により3次元基本モデルに再構成し、有限要素法（FEM）によりゴム材料の変形挙動を予測する方法等が行われ

ている（例えば、特開2006－200937号公報（特許文献1）参照）。しかしながら、多くの場合、ゴム材料の静的な変形挙動の解析に止まり、エネルギーロスに関するあるヒステリシスループや動的粘弾性挙動等の解析はほとんど行われていない。

[0005] ところで、エネルギーロスの計算としては、ゴム材料への荷重の負荷過程と除荷過程とで異なる値を用いた構成方程式を組み込むことによりヒステリシスループをシミュレーションする手法等が行われている。しかしながら、荷重の負荷過程と除荷過程とでは、ゴム材料中の架橋点密度が異なるような仮定がなされており、実際のゴム材料の粘弾性挙動を精度良く解析することは困難であった。

先行技術文献

特許文献

[0006] 特許文献1：特開2006－200937号公報

発明の概要

発明が解決しようとする課題

[0007] そこで、本発明の目的は、上記従来技術の問題を解決し、ゴム材料の粘弾性挙動の解析をミクロレベルであっても精度良く行うことが可能なゴム材料の変形挙動予測方法を提供することにある。また、本発明の他の目的は、上記方法に用いることが可能なゴム材料の変形挙動予測装置を提供することにある。

課題を解決するための手段

[0008] 本発明者らは、上記目的を達成するために銳意検討した結果、ゴム材料を構成するゴムと充填剤との2値化画像を用いて3次元モデルを生成するゴム材料の変形挙動予測方法において、該3次元モデルを構成するゴム部分に、各歪みで測定される応力緩和によって応力と歪みと時間との関係を定めた構成条件を付与することで、ゴム材料の粘弾性挙動の解析をミクロレベルであっても精度良く行えることを見出し、本発明を完成させるに至った。

- [0009] 即ち、本発明のゴム材料の変形挙動予測方法は、
ゴムに充填剤を配合したゴム材料の断面形状を表す複数のスライス画像を
取得し、前記ゴム材料に配合したゴム部分と充填剤部分とを判別するために
前記スライス画像をそれぞれ2値化画像に変換し、3次元モデルを生成する
ゴム材料の変形挙動予測方法において、
前記3次元モデルを構成するゴム部分に、各歪みで測定される応力緩和に
よって応力と歪みと時間との関係を定めた構成条件を付与し、ゴム材料の変
形挙動を解析することを特徴とする。
- [0010] 本発明のゴム材料の変形挙動予測方法の好適例においては、前記3次元モ
デルが、分子動力学法に基づき、ゴム部分と充填剤部分と該充填剤に吸着し
たゴム層部分とに3層化されている。
- [0011] 本発明のゴム材料の変形挙動予測方法は、上記3層化された3次元モデル
に、3層化された値に基づいてゴム部分、充填剤部分及びゴム層部分におけ
る歪みと応力との関係を定めた構成条件を付与し、ゴム材料の変形挙動を解
析するのが好ましい。
- [0012] 本発明のゴム材料の変形挙動予測方法は、分子動力学法からゴム層部分の
厚さ情報及び温度情報を求めて、該温度情報に基づき測定される応力緩和に
よって応力と歪みと時間との関係を定めた構成条件を、上記3層化された3
次元モデルを構成するゴム層部分に付与し、ゴム材料の変形挙動を解析する
のが好ましい。
- [0013] 本発明のゴム材料の変形挙動予測方法の他の好適例においては、前記構成
条件が付与された3次元モデルに有限要素法を用いて、ゴム材料の変形挙動
を解析する。
- [0014] また、本発明のゴム材料の変形挙動予測装置は、
ゴムに充填剤を配合したゴム材料の断面形状を表す複数のスライス画像を
取得する手段と、
前記ゴム材料に配合したゴム部分と充填剤部分とを判別するために前記ス
ライス画像をそれぞれ2値化画像に変換する手段と、

前記 2 値化画像を積層して前記ゴム材料の 3 次元モデルを生成する手段と

、
前記 3 次元モデルを構成するゴム部分に、各歪みで測定される応力緩和によって応力と歪みと時間との関係を定めた構成条件を付与する手段と、

前記構成条件が付与された 3 次元モデルを用いてゴム材料の変形挙動を解析する手段と、

前記ゴム材料の変形挙動の解析結果を提示する手段とを具えることを特徴とする。

[0015] 本発明のゴム材料の変形挙動予測装置の好適例においては、更に、前記 2 値化画像に対して充填剤に吸着したゴム層部分を定めることにより 3 層化画像に変換し、該 3 層化画像を積層して前記ゴム材料の 3 次元モデルを生成する手段を具える。

[0016] 本発明のゴム材料の変形挙動予測装置は、更に、上記 3 層化画像を積層して生成された 3 次元モデルに対して分子動力学法に基づき定めた構成条件を付与し、該構成条件が付与された 3 次元モデルを用いてゴム材料の変形挙動を解析する手段を具えるのが好ましい。

[0017] ここで、前記分子動力学法に基づき定めた構成条件としては、3 層化された値に基づいてゴム部分、充填剤部分及びゴム層部分における歪みと応力との関係を定めた構成条件、及び分子動力学法からゴム層部分の厚さ情報及び温度情報を求めて、該温度情報に基づき測定される応力緩和によって応力と歪みと時間との関係を定めた構成条件が好適に挙げられる。

[0018] 本発明のゴム材料の変形挙動予測装置の他の好適例においては、前記ゴム材料の変形挙動を解析する手段が、前記構成条件が付与された 3 次元モデルに有限要素法を用いて行われる。

[0019] 本発明のゴム材料の変形挙動予測装置の他の好適例においては、前記ゴム材料の変形挙動の解析結果を提示する手段が、該解析結果により、歪み分布又は応力分布を算出し、歪み分布領域又は応力分布領域を区別し、各領域の位置を特定して行われる。

発明の効果

[0020] 本発明によれば、ゴム材料を構成するゴムと充填剤との2値化画像を用いて3次元モデルを生成するゴム材料の変形挙動予測方法において、該3次元モデルを構成するゴム部分に、各歪みで測定される応力緩和によって応力と歪みと時間との関係を定めた構成条件を付与することで、ゴム材料の粘弾性挙動がミクロレベルで精度良く解析され、ゴム材料の変形挙動を正確に解析することができる。

図面の簡単な説明

[0021] [図1]本発明の変形挙動予測装置の一例となるゴム材料変形挙動予測システムの構成を示す図である。

[図2]図1に示すゴム材料変形挙動予測システムを構成するコンピュータの電気系要部構成の説明図である。

[図3]スライス画像を2値化した2値化画像を示す図である。

[図4]2値化画像を3値化した3層化画像を示す図である。

[図5]応力緩和の実測値に基づく応力と歪みと時間との関係を示す図である。

[図6]ゴム材料のヒステリシスループの一例を示す図である。

[図7] $\tan \delta$ の歪み分散シミュレーションの一例を示す図である。

[図8]分子動力学法により求めた充填剤と重合体とからなる系の模式図である。

[図9]充填剤表面からの距離と拡散係数との関係を示す図である。

[図10]ゴムの拡散係数と温度との関係を示す図である。

[図11]ゴム材料の変形挙動の解析結果を示す断面画像図である。

[図12]FEM計算により算出された $\tan \delta$ の歪み分散シミュレーションを示す図である。

発明を実施するための形態

[0022] 以下に、図を参照しながら、本発明の変形挙動予測方法及び変形挙動予測装置を詳細に説明する。図1は、本発明の変形挙動予測装置の一例となるゴム材料変形挙動予測システムの構成を示す図であり、図2は、図1に示すゴ

ム材料変形挙動予測システムを構成するコンピュータの電気系要部構成の説明図である。

- [0023] 図1に示す変形挙動予測装置1は、CTスキャナ（コンピュータ・トモグラフィ・スキャナ）2と、コンピュータ3とから構成されている。CTスキャナ2とコンピュータ3とはケーブル4により接続されている。
- [0024] CTスキャナ2は、透過型電子顕微鏡（TEM）と試料台とを内蔵している。CTスキャナ2は、試料台に載置された解析対象ゴム材料を透過型電子顕微鏡により撮影し、その撮影により得られたデータを計算機トモグラフィ一法（CT法）により3次元基本モデルに再構成する。また、CTスキャナ2は、再構成した当該3次元基本モデルを所定平面により所定間隔でスライスした複数のスライス画像データを生成する。なお、本発明においては、図示しないが、集束イオンビーム（FIB）によってゴム材料の表面を加工（例えば、エッチング処理）し、該表面を走査型電子顕微鏡（SEM）により観測することで、複数のスライス画像を取得することもでき、この場合、CTスキャナ2に代えて、集束イオンビームを照射可能な走査型電子顕微鏡システムを具えることになる。
- [0025] コンピュータ3は、解析を行う際の各種条件を入力するためのキーボード5と、予め記憶された処理プログラムに従ってゴム材料の変形挙動を解析するコンピュータ本体6と、コンピュータ本体6の演算結果等を表示するディスプレイ7とから構成されている。コンピュータ3は、CTスキャナ2により生成されたスライス画像データを用いてゴム材料の変形挙動等の解析を実施する。また、コンピュータ本体6には、記録媒体としてのフレキシブルディスク（以下、FDという）8が挿抜可能なフレキシブルディスクドライブユニット（以下、FDUという）9を具えている。
- [0026] また、コンピュータ3は、図2に示す通り、装置全体の動作を司るCPU（中央処理装置）10と、コンピュータ3を制御する制御プログラムを含む各種プログラムや各種パラメータ等が予め記憶されたROM11と、各種データを一時的に記憶するRAM12と、ケーブル4に接続されたコネクタ1

3に接続され、コネクタ13を介してCTスキャナ2からスライス画像データを取得する外部I/O制御部14と、取得したスライス画像データを記憶するHDD（ハードディスクドライブ）15と、FDU9に装着されたFD8とのデータの入出力を行うフレキシブルディスクI/F部16と、ディスプレイ7への各種情報の表示を制御するディスプレイドライバ17と、キーボード5へのキー操作を検出する操作入力検出部18とを具えている。

- [0027] CPU10、RAM12、ROM11、HDD15、外部I/O制御部14、フレキシブルディスクI/F部16、ディスプレイドライバ17、及び操作入力検出部18は、システムバスBUSを介して相互に接続されている。従って、CPU10は、RAM12、ROM11、HDD15へのアクセス、フレキシブルディスクI/F部16を介してのFDU9に装着されたFD8へのアクセス、外部I/O制御部14を介したデータの送受信の制御、ディスプレイドライバ17を介したディスプレイ7への各種情報の表示、を各々行うことができる。また、CPU10は、キーボード5に対するキー操作を常時把握できる。
- [0028] なお、各種処理プログラム及びデータ等は、FDU9を用いてFD8に対して読み書き可能である。従って、各種処理プログラム及びデータ等を予めFD8に記録しておく、FDU9を介してFD8に記録された各処理プログラムを実行してもよい。また、FD8に記録された各処理プログラムをHDD15へ格納（インストール）して実行するようにしてもよい。また、記録媒体としては、記録テープ、CD-ROMやDVD等の光ディスクや、MD、MO等の光磁気ディスクがあり、これらを用いるときには、上記FDU9に代えてまたはさらに対応する読み書き装置を用いればよい。
- [0029] また、図1に示すゴム材料変形挙動予測システムの構成は一例であり、公知の構成を必要に応じて適宜変更することができる。
- [0030] 以下に、本発明のゴム材料の変形挙動予測方法について詳細に説明する。本発明のゴム材料の変形挙動予測装置は、ゴムに充填剤を配合したゴム材料の断面形状を表す複数のスライス画像を取得し、前記ゴム材料に配合したゴ

ム部分と充填剤部分とを判別するために前記スライス画像をそれぞれ2値化画像に変換し、3次元モデルを生成するゴム材料の変形挙動予測方法において、前記3次元モデルを構成するゴム部分に、各歪みで測定される応力緩和によって応力と歪みと時間との関係を定めた構成条件を付与し、ゴム材料の変形挙動を解析することを特徴とする。このように、実際に測定された応力緩和から求めた実測値を構成条件に適用することによって、ゴム材料の粘弾性挙動がミクロレベルで精度良く解析され、ゴム材料の変形挙動を正確に解析することができる。

- [0031] まず、本発明の変形挙動予測方法においては、ゴム材料の内部構造を把握するため、ゴムに充填剤を配合したゴム材料の断面形状を表す複数のスライス画像を取得する。図1に示すゴム材料変形挙動予測システムにおいては、ユーザによって解析対象のゴム材料に対して金コロイドでマーキングが行われ、CTスキャナ2に設けられた試料台に載置され、CTスキャナ2に対して処理開始の操作が行われるとスライス画像の撮影が実行される。なお、CTスキャナ2は、透過型電子線トモグラフィー法(Transmission Electron Microtomography、TEMトモ)を用いたコンピュータ構成を含む計測装置として構成されている。CTスキャナ2は、透過型電子顕微鏡とゴム材料が載置された試料台とを所定の角度範囲(例えば、-60度から+60度の範囲)で所定角度(例えば、2度間隔)ずつ相対的に回転移動させながらスキャンすることによりゴム材料の連続傾斜画像を撮影することができる。そして、CTスキャナ2は、撮影した複数枚(例えば、61枚)の傾斜画像の画像データを用い、各画像間の回転軸を求め、計算機トモグラフィー法により3次元基本モデルに再構成する。そして、CTスキャナ2は、再構成した3次元基本モデルを各面に平行な所定間隔(例えば、4nm間隔)でスライスしたスライス画像を生成する。
- [0032] なお、ゴム材料は、ゴムに充填剤を配合してなるが、該ゴム及び充填剤としては、ゴム業界で通常使用されるものを適宜選択することができる。また、ゴム材料の形状は、特に限定されるものではないが、CTスキャナ2によ

るスライス画像の取得が容易である形状が好ましく、具体的には、立方体や直方体等の六面体が挙げられる。

- [0033] 次に、本発明の変形挙動予測方法においては、ゴム材料に配合したゴム部分と充填剤部分とを判別するため、上記工程により取得したゴム材料の断面形状を表す複数のスライス画像をそれぞれ2値化画像に変換する。上記スライス画像では、ゴム材料を構成するゴム部分と充填剤部分とで物質的に透過率が異なるため、一般に充填剤部分が濃く（濃度値が大きく）、ゴム部分が薄く（濃度値が小さく）示される。よって、スライス画像の各画素の濃度に基づいてスライス画像のゴム部分と充填剤部分とを判別することができる。このスライス画像のゴム部分と充填剤部分とを判別することができる濃度値は、予め実験等により定めることができる。
- [0034] 図1に示すゴム材料変形挙動予測システムにおいては、実験等により予め定められているスライス画像のゴム部分と充填剤部分とを判別する濃度値をしきい値 h として設定し、スライス画像の各画素の濃度値をしきい値 h と比較して各画素を2値化した2値化画像の2値化画像データを生成する。図3は、スライス画像を2値化した2値化画像を示す図である。
- [0035] なお、2値化画像への変換処理では、ゴム材料内の充填剤部分をより的確に抽出するため、スライス画像の各画素の濃度値をしきい値 h と比較して、濃度値がしきい値 h 以上である画素が上下左右で所定個数（例えば、5個以上）連続している部分の各画素を黒とし、その他の画素を白とした2値化画像の2値化画像データを生成する。また、色分けされた2値化画像データに対して、黒の部分の画素の値を「1」、白の部分の画素の値を「0」とした2値化画像データにフォーマット変換することもできる。
- [0036] ここで、本発明の変形挙動予測方法においては、上記2値化画像に対して、充填剤に吸着したゴム層部分を定めることにより3層化画像に変換することが好ましい。このように、3次元モデルをゴム部分と充填剤部分と該充填剤に吸着したゴム層部分とに3層化することによって、ゴム材料の変形挙動を予測する上で該ゴム層部分を考慮することが可能となり、ゴム材料の変形

挙動を精度良く解析することができる。なお、後述するように3層化画像に変換することで、ゴム材料の3次元モデルを、分子動力学法に基づき3層化することが可能となる。図1に示すゴム材料変形挙動予測システムにおいては、上記のようにフォーマット変換された2値化画像データに対して、画素の値が「0」で且つ隣接する画素の値が「1」である画素の値を「2」とすることにより、3層化画像にフォーマット変換する。即ち、充填剤に吸着したゴム層部分の画素の値を「2」としている。図4は、2値化画像を3値化した3層化画像を示す図であり、充填剤部分を黒、ゴム部分を白、充填剤に吸着したゴム層部分を灰色で示す。なお、このようなゴム層部分を定める手法は一例にすぎず、画素サイズに応じてゴム層部分を適宜定めることができる。例えば、ゴム層部分を充填剤部分の画素に隣接するゴム部分の画素に限るのでなく、その他のゴム部分もゴム層部分に含めることでゴム層部分に厚みを持たせたり、ゴム層部分内を更に多値化することで、より精密な変形挙動の解析を行うことができる。

[0037] 次に、本発明の変形挙動予測方法においては、2値化画像を積層してゴム材料の3次元モデルを生成する。図1に示すゴム材料変形挙動予測システムにおいては、フォーマット変換された2値化画像を、対応するスライス画像の取得位置等の条件に合わせて積層し、ゴム材料の3次元構造を構築し、2値化画像における各画素を格子単位とした3次元モデルを生成することができる。即ち、このような3次元モデルにおいては、フォーマット変換された2値化画像において画素の値が「0」の部分がゴム部分、画素の値が「1」の部分が充填剤部分として示される。また、上記したようにフォーマット変換された3層化画像を積層してゴム材料の3次元構造を構築し、3層化画像における各画素を格子単位とした3次元モデルを生成することもできる。この場合、フォーマット変換された3層化画像において画素の値が「0」の部分がゴム部分、画素の値が「1」の部分が充填剤部分、画素の値が「2」の部分が充填剤に吸着したゴム層部分として示される。なお、生成されたゴム材料の3次元モデルについては、2値化画像又は3層化画像の間で同一値の

画素を同一の格子領域として統合することが可能な画像処理を行うことで、ゴム材料の計算上の立体像を生成し、該立体像をディスプレイに提示することもできる。

- [0038] そして、本発明の変形挙動予測方法においては、上記3次元モデルを構成するゴム部分に、各歪みで測定される応力緩和によって応力と歪みと時間との関係を定めた構成条件を付与する必要がある。一般に、ゴム材料の変形挙動を予測する際には、3次元モデルを構成する各成分に対し適当な構成条件をそれぞれ付与することによって行われるが、本発明の変形挙動予測方法においては、ゴム材料の粘弾性挙動を精度良く解析するため、3次元モデルを構成するゴム部分に対し、実際に測定された応力緩和から求めた実測値を用いた構成条件を付与する。これによって、ゴム材料のヒステリシスループや動的粘弾性挙動をミクロレベルで精密に解析でき、ゴム材料の変形挙動を正確に解析することが可能となる。
- [0039] 以下に、ゴム材料のゴム部分に付与する構成条件の決定方法の一例を説明する。まず、ゴム単体（純ゴムとも称する）における各歪みでの応力緩和を測定し、この測定結果に基づいた応力と歪みと時間との関係を求める。図5は、応力緩和の実測値に基づく応力と歪みと時間との関係を示す図であって、x軸が歪みを示し、y軸が応力を示し、z軸が時間を示す。次いで、ゴムに充填剤を配合したゴム材料への荷重の負荷過程と除荷過程とからなるサイクルにおいて、各時間に対応した応力と歪みとの関係をゴム部分の構成方程式として組み込み、これを構成条件として3次元モデルのゴム部分の格子領域に付与する。なお、ゴム部分の構成方程式は、応力と歪みとの関係を定めた構成条件である限り特に限定されるものではないが、例えば、特開2006-200937号公報に記載されるとおり、一般化ムーニー・リブニン（MOONEY-RIVLIN）方程式、一般化オグデン（OGDEN）方程式、下記式(1)：

$$G = P \cdot \frac{\exp(\beta \cdot k) \cdot \cosh(2\beta \cdot I_1) - 1}{\exp(\beta \cdot k) \cdot \cosh(2\beta \cdot I_1) + 1} + Q \cdot \frac{T}{\Delta T} \cdot \frac{\partial S}{\partial I_1} \quad \dots \quad (1)$$

[式中、Gはヤング率を表し、Sはゴム変形時のエントロピー変化を表し、P及びQは弾性率と関係する係数を表し、I₁は歪の不变量を表し、Tは絶対温度を表す。βは1/(kΔT)に等しく、kはボルツマン定数、ΔTはゴムのガラス転移温度からの差分を表す。] 等が挙げられる。ここで、例えば、ゴム材料の充填剤に対しても下記に示す構成条件を付与することにより、ゴム材料のヒステリシスループ等を算出することができる。図6は、ゴム材料のヒステリシスループの一例を示す図であって、歪みが12%になるまで負荷をかけた際のゴム材料のヒステリシスループを示す。かかるヒステリシスループからエネルギーの指標であるtan δが求められるので、上記の計算を各歪みで行うことにより、tan δの歪み分散シミュレーションが可能となる。図7は、tan δの歪み分散シミュレーションの一例を示す図である。

[0040] なお、3次元モデルの充填剤部分の構成条件としては、充填剤の歪みと応力の関係を示す構成条件が予め求まっている場合、該構成条件を3次元モデルの充填剤部分の格子領域に付与することが好ましく、また、予め実験等により充填剤の硬さを測定して求めた実測値や充填剤の結晶部とアモルファス部の比率から計算した推定値を構成条件として用いてもよい。また、一般的にゴム材料に配合される充填剤は、ゴムと比較して硬く、ゴムよりもヤング率（弾性率）が大きいため、3次元モデルの充填剤部分の構成条件として、ゴム部分に付与した構成条件から導かれるヤング率を所定倍（例えば、1000倍）したヤング率を付与してもよい。

[0041] ところで、ゴム材料にゴムと充填剤とが含まれる場合、充填剤の周囲に存在する重合体は、充填剤に吸着され、重合体単体から得られる力学的特性とは異なる特性を有していることが知られている。従って、ゴム材料の変形挙動に対する予測精度を更に向上させるには、充填剤の周囲に存在するゴム部分、即ち、充填剤に吸着したゴム層部分に対して、ゴム単体から求められる材料定数とは異なる定数を与えることが好ましい。そこで、本発明の変形挙動予測方法においては、上記したように3層化画像を積層して生成された3次元モデルに対し、分子動力学法に基づき定めた構成条件を付与することが

好みしい。このようにして、かかる3次元モデルは、分子動力学法に基づき、ゴム部分と充填剤部分と該充填剤に吸着したゴム層部分とに3層化されることになる。

[0042] 以下に、ゴム材料の充填剤に吸着したゴム層部分に対して付与する構成条件の決定方法の一例を説明する。まず、分子動力学法に基づき、充填剤表面とゴム（重合体）とからなる系を構築する。図8は、分子動力学法により求めた充填剤と重合体とからなる系の模式図である。次いで、系内のゴムの平均二乗変位を算出し、その結果を基に拡散係数を求める。図9は、充填剤表面からの距離と拡散係数との関係を示す図であって、y軸が拡散係数を示し、x軸が充填剤表面からの距離を示す。なお、x軸は図8に対応しており、x軸の両端は充填剤表面の位置を表し、x軸の目盛りは片側の充填剤表面からの距離を表す。図9から、充填剤に吸着したゴム層部分は、充填剤からの拘束により、ゴム部分に比べて拡散係数が小さいことが分かる。また、かかる計算と平行して、重合体単体の平均二乗変位の温度に対する変化率を算出し、重合体の拡散係数の温度依存性を求める。図10は、ゴムの拡散係数と温度との関係を示す図であって、y軸が拡散係数を示し、x軸が温度を示す。図10から、ゴムの拡散係数は温度の上昇と共に増大し、特にガラス転移点付近（-50°C付近）から急激に増大することが分かる。即ち、拡散係数の小さいゴム層部分においては、ゴムが低温状態にあることを意味する。このことは、一般に言われている充填剤周辺に存在する重合体相がガラス状態にあるとする説を裏付けるものである。これらの結果から明らかなように、従来、ゴム部分に付与していた温度不变の構成条件を、温度可変の構成条件に変更することで、充填剤からの距離に応じた物性変更入力が可能となり、実際のゴム材料の変形挙動をミクロレベルで精度良く解析することができる。

[0043] なお、3次元モデルのゴム層部分には、歪みと応力との関係を定めた構成条件を付与することが好ましく、上記のように、分子動力学法から求められる厚さ情報と温度情報を求めて、該温度情報に基づき測定される応力緩和によって応力と歪みと時間との関係を定めた構成条件を付与することが更に好

ましい。具体的には、3次元モデルのゴム層部分に相当する格子領域に、ゴム層部分の拡散係数に対応する温度での応力緩和から求めた応力と歪みと時間との関係、即ち、各時間に対応した応力と歪みとの関係を構成条件として付与する。なお、歪みと応力との関係を定めた構成条件としては、特開2006-200937号公報に記載されるとおり、一般化ムーニー・リブニン(MOONEY-RIVLIN)方程式、一般化オグデン(OGDEN)方程式、特開2005-345413号公報に開示の上記式(I)等が挙げられる。

[0044] 次に、本発明の変形挙動予測方法においては、上記構成条件が付与された3次元モデルを用いてゴム材料の変形挙動を解析する。図1に示すゴム材料変形挙動予測システムにおいては、ユーザによりキーボード15を介して解析対象とする3次元モデルと解析条件とがコンピュータ12に指定され、ゴム材料の変形挙動の解析処理が実行される。なお、解析条件として、3次元モデルを変化させる方向と、その方向へ3次元モデルを伸張、圧縮又はせん断変化させたときの変化率を指定することができる。また、解析処理では、解析条件として指定された方向へ3次元モデルを伸張、圧縮又はせん断した場合の3次元モデルの歪み、内部応力分布、3次元モデル全体で応力値を解析して、その解析結果をディスプレイ7に表示することができる。上記構成条件が付与された3次元モデルは、実際のゴム材料の構造に近いモデルであるため、有限要素法(FEM)を用いてゴム材料の変形挙動を解析した場合、ゴム材料の内部の弾性率及び応力分布を精密に解析することができる。

[0045] 以下に、本発明のゴム材料の変形挙動予測装置について詳細に説明する。本発明のゴム材料の変形挙動予測装置は、上述の変形挙動予測方法を行うための装置であって、図1に示すゴム材料変形挙動予測システムが含まれる。詳細には、本発明の変形挙動予測装置は、ゴムに充填剤を配合したゴム材料の断面形状を表す複数のスライス画像を取得する手段と、上記ゴム材料に配合したゴム部分と充填剤部分とを判別するために上記スライス画像をそれぞれ2値化画像に変換する手段と、上記2値化画像を積層して上記ゴム材料の

3次元モデルを生成する手段と、上記3次元モデルを構成するゴム部分に、各歪みで測定される応力緩和によって応力と歪みと時間との関係を定めた構成条件を付与する手段と、上記構成条件が付与された3次元モデルを用いてゴム材料の変形挙動を解析する手段と、上記ゴム材料の変形挙動の解析結果を提示する手段とを具えることを特徴とする。

[0046] 本発明の変形挙動予測装置においては、更に、上記2層化画像に対して充填剤に吸着したゴム層部分を定めることにより3層化画像に変換し、該3層化画像を積層して上記ゴム材料の3次元モデルを生成する手段を具えることが好ましい。また、本発明のゴム材料の変形挙動予測装置は、上記3層化画像を積層して生成された3次元モデルに対して分子動力学法に基づき定めた構成条件を付与し、該構成条件が付与された3次元モデルを用いてゴム材料の変形挙動を解析する手段を具えることが更に好ましい。

[0047] ここで、上記分子動力学法に基づき定めた構成条件としては、3層化された値に基づいてゴム部分、充填剤部分及びゴム層部分における歪みと応力との関係を定めた構成条件、及び分子動力学法からゴム層部分の厚さ情報及び温度情報を求めて、該温度情報に基づき測定される応力緩和によって応力と歪みと時間との関係を定めた構成条件が好適に挙げられる。

[0048] 本発明の変形挙動予測装置においては、ゴム材料の変形挙動を解析する手段が、上記構成条件が付与された3次元モデルに有限要素法を用いて行われることが好ましい。また、上記ゴム材料の変形挙動の解析結果を提示する手段が、該解析結果により、歪み分布又は応力分布を算出し、歪み分布領域又は応力分布領域を区別し、各領域の位置を特定して行われることが好ましい。

実施例

[0049] 以下に、実施例を挙げて本発明を更に詳しく説明するが、本発明は下記の実施例に何ら限定されるものではない。

[0050] 図1に示すゴム材料変形挙動予測システムにおいて、ゴム100質量部に対してカーボンブラック30質量部を配合してなるゴム材料を3次元透過型電子顕

微鏡で撮影し、該ゴム材料の3次元モデルを生成した。まず、3次元モデルを計算機トモグラフィー法によってゴム部分と充填剤部分とゴム層部分とに区別し、それぞれの構成部分の格子領域に対して構成条件を付与した。ゴム部分には、純ゴムの各歪みで測定される応力緩和を求めて、各時間における応力と歪みとの関係を構成方程式として付与した。充填剤部分には、予め実験等により充填剤の硬さを測定して求めた実測値又は充填剤の結晶部とアモルファス部の比率から計算した推定値を用いた。ゴム層部分には、分子動力学法から計算された平均二乗変位と温度との関係からゴム層部分の拡散係数に対する温度での応力緩和を求めて、各時間における応力と歪みとの関係を構成方程式として付与した。また、構成条件が付与された3次元モデルに対し、FEM計算を行った。結果を図11～12に示す。

- [0051] 図11は、ゴム材料の変形挙動の解析結果を示す断面画像図である。なお、図11は、3次元モデルデータを用いて3次元モデル全体をz方向へ15%伸張させた場合の歪み状態及び応力分布の解析結果である。応力分布は応力値が高い部分ほど濃い濃度で示されている。
- [0052] 図12は、FEM計算により算出された $\tan\delta$ の歪み分散シミュレーションを示す図である。なお、図12中には、ゴム部分と充填剤部分とゴム層部分とからなる3層化3次元モデルの他、ゴム部分と充填剤部分とからなる2層化3次元モデルを示す。これにより、3層化3次元モデルは、2層化3次元モデルと異なる変形挙動を示すことが分かる。
- [0053] 以上の結果から、ゴム材料の粘弾性挙動がミクロレベルで精度良く解析され、ゴム材料の変形挙動を正確に解析できることが分かる。

符号の説明

- [0054]
- 1 ゴム材料変形挙動予測システム
 - 3 コンピュータ
 - 4 ケーブル
 - 5 キーボード
 - 6 コンピュータ本体

7 ディスプレイ

8 FD

9 FDU

13 コネクタ

請求の範囲

- [請求項1] ゴムに充填剤を配合したゴム材料の断面形状を表す複数のスライス画像を取得し、前記ゴム材料に配合したゴム部分と充填剤部分とを判別するために前記スライス画像をそれぞれ2値化画像に変換し、3次元モデルを生成するゴム材料の变形挙動予測方法において、
前記3次元モデルを構成するゴム部分に、各歪みで測定される応力緩和によって応力と歪みと時間との関係を定めた構成条件を付与し、ゴム材料の变形挙動を解析することを特徴とするゴム材料の变形挙動予測方法。
- [請求項2] 前記3次元モデルが、分子動力学法に基づき、ゴム部分と充填剤部分と該充填剤に吸着したゴム層部分とに3層化されていることを特徴とする請求項1に記載のゴム材料の变形挙動予測方法。
- [請求項3] 前記3次元モデルに、3層化された値に基づいてゴム部分、充填剤部分及びゴム層部分における歪みと応力との関係を定めた構成条件を付与し、ゴム材料の变形挙動を解析することを特徴とする請求項2に記載のゴム材料の变形挙動予測方法。
- [請求項4] 分子動力学法からゴム層部分の厚さ情報及び温度情報を求めて、該温度情報に基づき測定される応力緩和によって応力と歪みと時間との関係を定めた構成条件を、前記3次元モデルを構成するゴム層部分に付与し、ゴム材料の变形挙動を解析することを特徴とする請求項2に記載のゴム材料の变形挙動予測方法。
- [請求項5] 前記構成条件が付与された3次元モデルに有限要素法を用いて、ゴム材料の变形挙動を解析することを特徴とする請求項1～4のいずれかに記載のゴム材料の变形挙動予測方法。
- [請求項6] ゴムに充填剤を配合したゴム材料の断面形状を表す複数のスライス画像を取得する手段と、
前記ゴム材料に配合したゴム部分と充填剤部分とを判別するために前記スライス画像をそれぞれ2値化画像に変換する手段と、

前記2値化画像を積層して前記ゴム材料の3次元モデルを生成する手段と、

前記3次元モデルを構成するゴム部分に、各歪みで測定される応力緩和によって応力と歪みと時間との関係を定めた構成条件を付与する手段と、

前記構成条件が付与された3次元モデルを用いてゴム材料の変形挙動を解析する手段と、

前記ゴム材料の変形挙動の解析結果を提示する手段と
を具えることを特徴とするゴム材料の変形挙動予測装置。

[請求項7] 更に、前記2値化画像に対して充填剤に吸着したゴム層部分を定めることにより3層化画像に変換し、該3層化画像を積層して前記ゴム材料の3次元モデルを生成する手段を具えることを特徴とする請求項6に記載のゴム材料の変形挙動予測装置。

[請求項8] 更に、前記3次元モデルに対して分子動力学法に基づき定めた構成条件を付与し、該構成条件が付与された3次元モデルを用いてゴム材料の変形挙動を解析する手段を具えることを特徴とする請求項7に記載のゴム材料の変形挙動予測装置。

[請求項9] 前記分子動力学法に基づき定めた構成条件が、3層化された値に基づいてゴム部分、充填剤部分及びゴム層部分における歪みと応力との関係を定めた構成条件であることを特徴とする請求項8に記載のゴム材料の変形挙動予測装置。

[請求項10] 前記分子動力学法に基づき定めた構成条件が、分子動力学法からゴム層部分の厚さ情報及び温度情報を求めて、該温度情報に基づき測定される応力緩和によって応力と歪みと時間との関係を定めた構成条件であることを特徴とする請求項8に記載のゴム材料の変形挙動予測装置。

[請求項11] 前記ゴム材料の変形挙動を解析する手段が、前記構成条件が付与された3次元モデルに有限要素法を用いて行われることを特徴とする請

求項 6～10 のいずれかに記載のゴム材料の変形挙動予測装置。

[請求項12] 前記ゴム材料の変形挙動の解析結果を提示する手段が、該解析結果により、歪み分布又は応力分布を算出し、歪み分布領域又は応力分布領域を区別し、各領域の位置を特定して行われることを特徴とする請求項 6 に記載のゴム材料の変形挙動予測装置。

1 / 8

FIG. 1

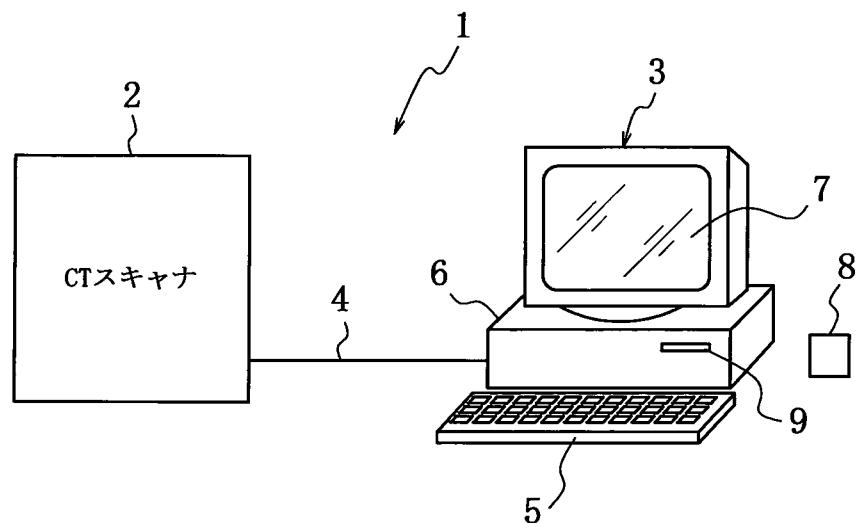
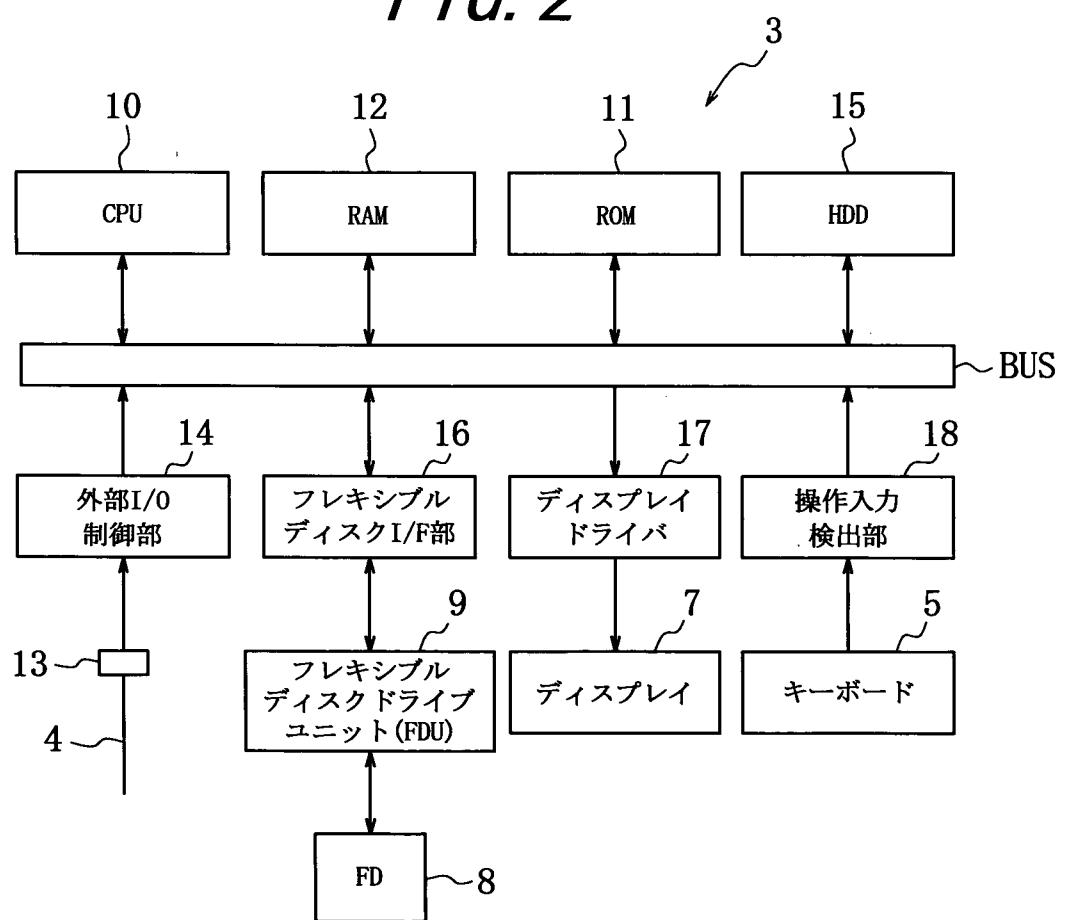
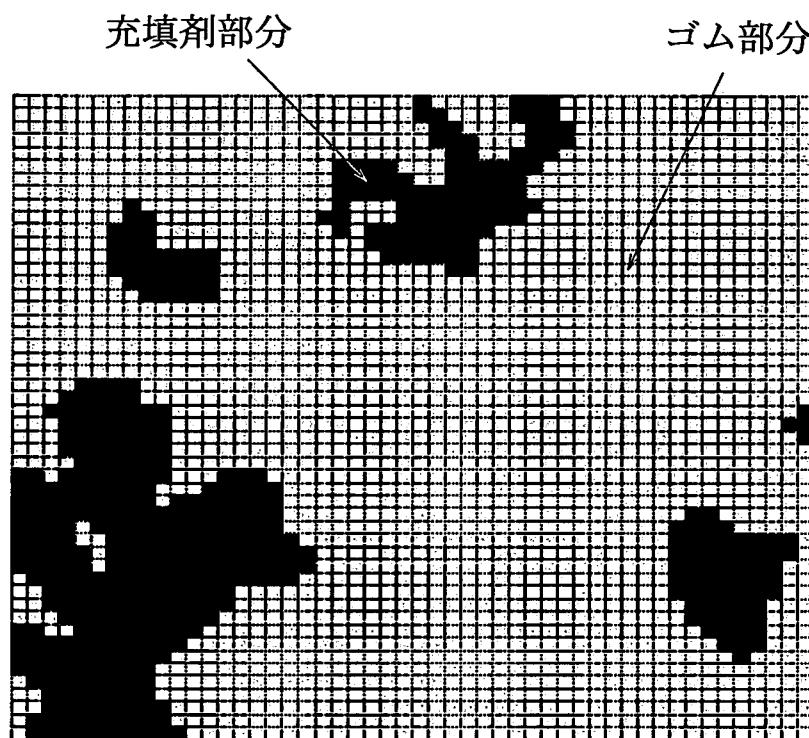
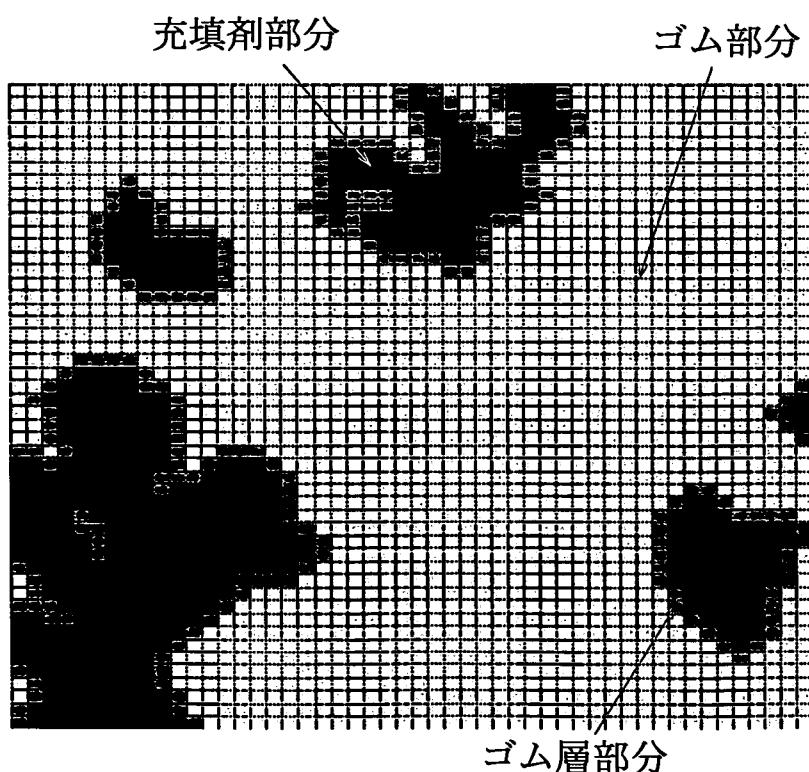


FIG. 2

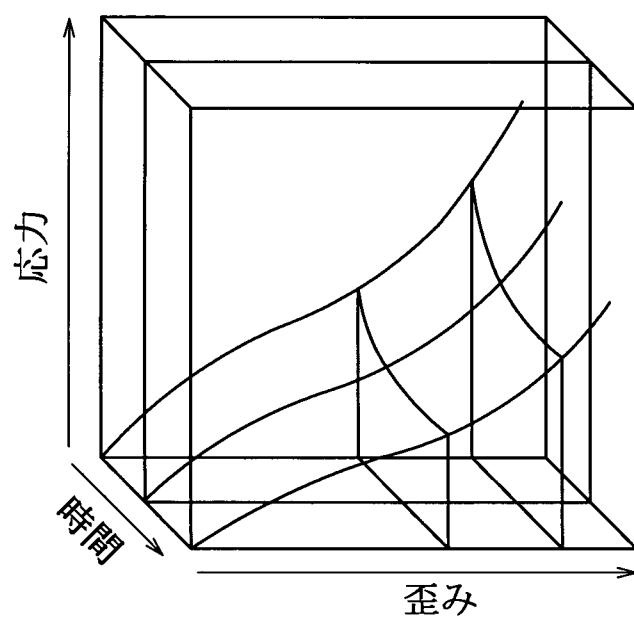


2 / 8

FIG. 3*FIG. 4*

3 / 8

FIG. 5



4 / 8

FIG. 6

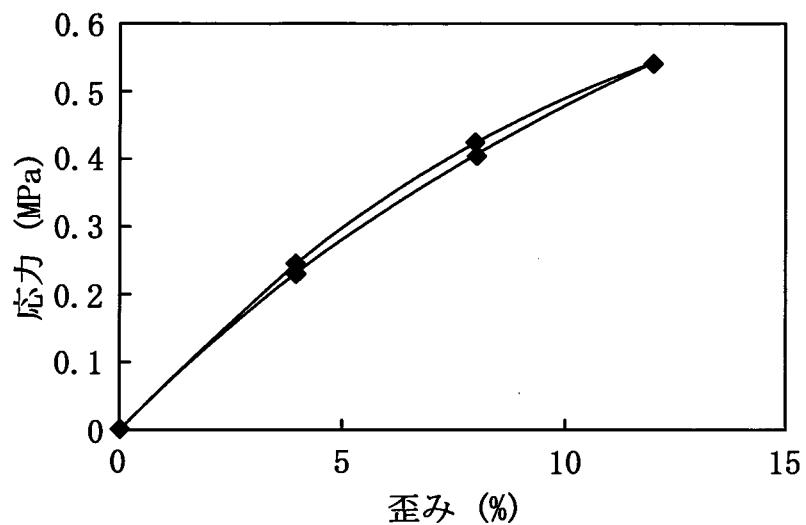
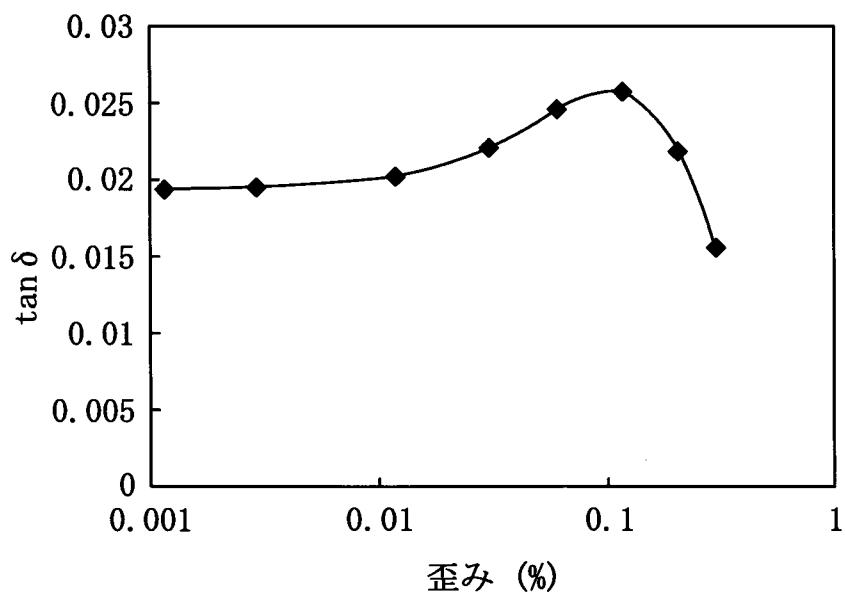
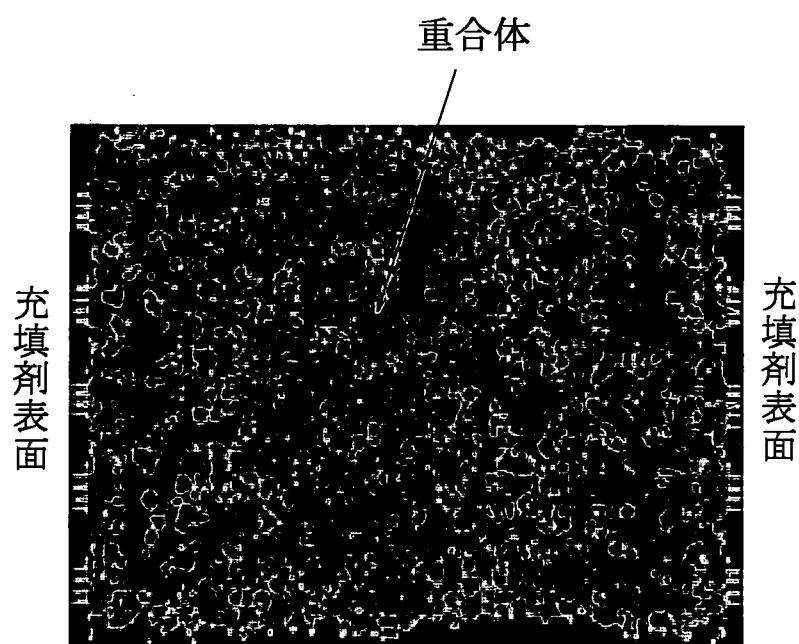


FIG. 7



5 / 8

FIG. 8



6 / 8

FIG. 9

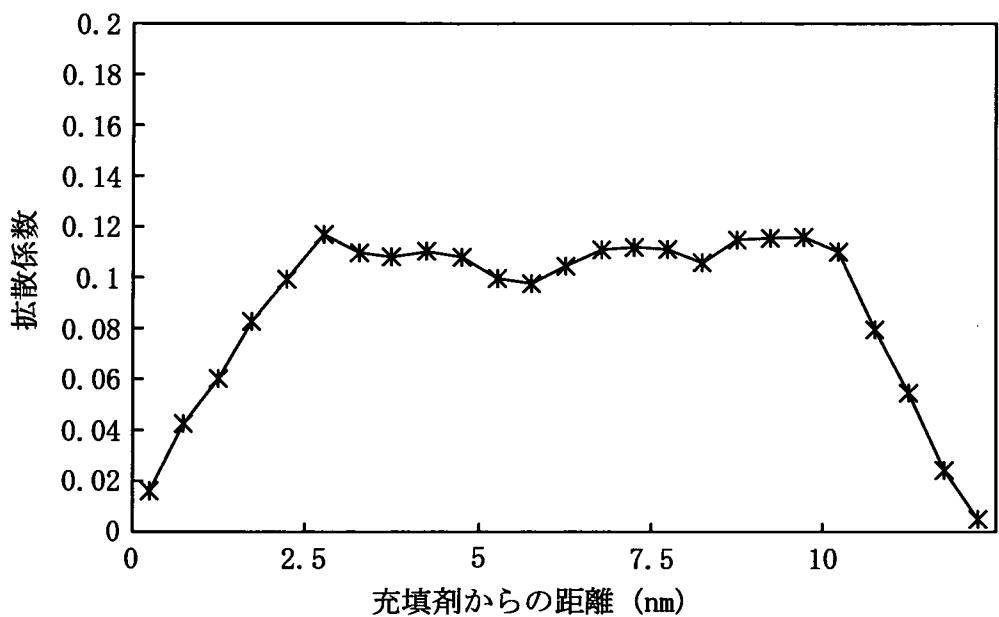
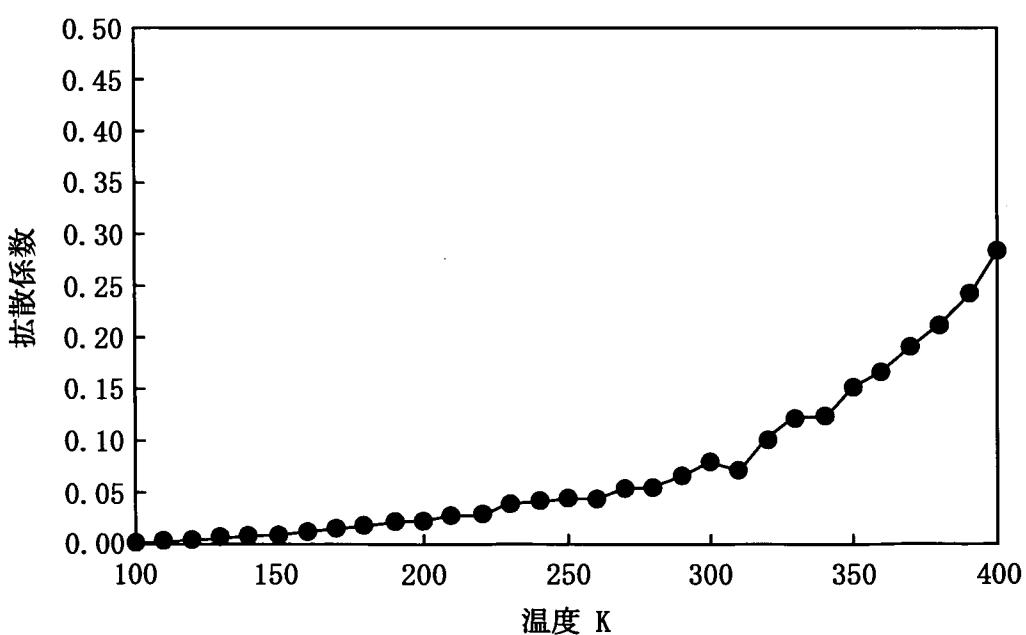


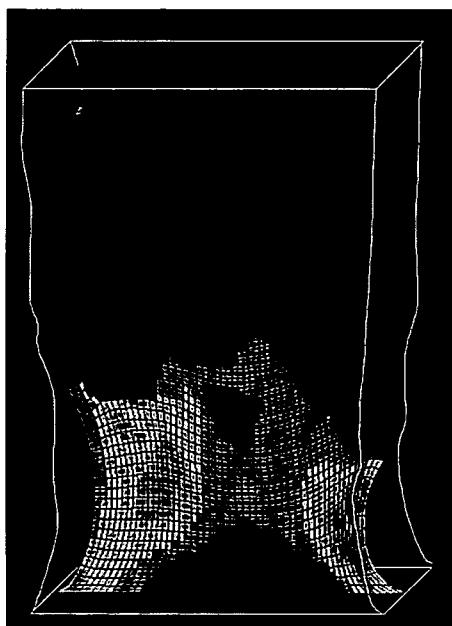
FIG. 10



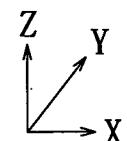
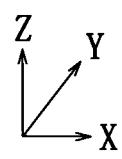
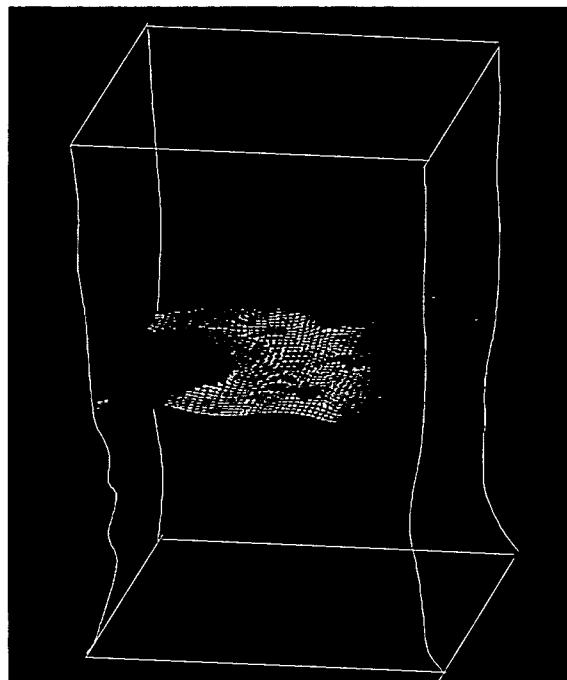
7 / 8

FIG. 11

(a)

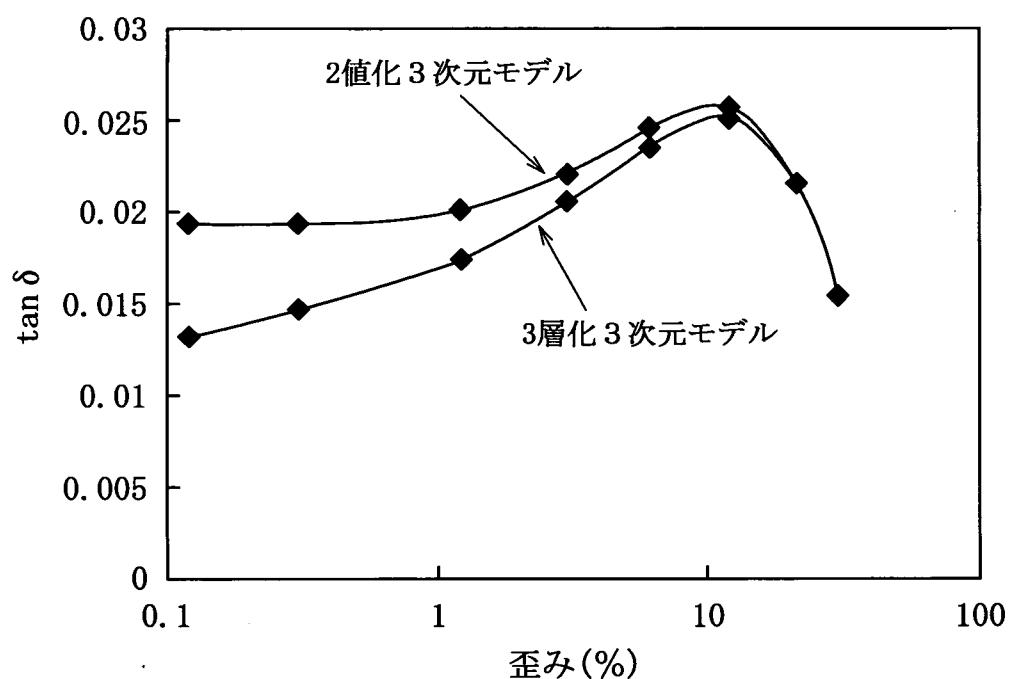


(b)



8 / 8

FIG. 12



INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.

PCT/JP2010/051732

A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER
G01N3/00(2006.01)i, *G01N3/08*(2006.01)i

According to International Patent Classification (IPC) or to both national classification and IPC

B. FIELDS SEARCHED

 Minimum documentation searched (classification system followed by classification symbols)
G01N3/00, G01N3/08

Documentation searched other than minimum documentation to the extent that such documents are included in the fields searched

Jitsuyo Shinan Koho	1922-1996	Jitsuyo Shinan Toroku Koho	1996-2010
Kokai Jitsuyo Shinan Koho	1971-2010	Toroku Jitsuyo Shinan Koho	1994-2010

 Electronic data base consulted during the international search (name of data base and, where practicable, search terms used)
 JSTPlus (JDreamII)

C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
Y	JP 2008-122154 A (Sumitomo Rubber Industries, Ltd.), 29 May 2008 (29.05.2008), entire text; all drawings (Family: none)	1-12
Y	JP 2006-200938 A (Bridgestone Corp.), 03 August 2006 (03.08.2006), entire text; all drawings (Family: none)	1-12
A	JP 2008-213724 A (The Yokohama Rubber Co., Ltd.), 18 September 2008 (18.09.2008), entire text; all drawings (Family: none)	1, 4-7, 11, 12

 Further documents are listed in the continuation of Box C.

 See patent family annex.

* Special categories of cited documents:

"A" document defining the general state of the art which is not considered to be of particular relevance

"E" earlier application or patent but published on or after the international filing date

"L" document which may throw doubts on priority claim(s) or which is cited to establish the publication date of another citation or other special reason (as specified)

"O" document referring to an oral disclosure, use, exhibition or other means

"P" document published prior to the international filing date but later than the priority date claimed

"T" later document published after the international filing date or priority date and not in conflict with the application but cited to understand the principle or theory underlying the invention

"X" document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered novel or cannot be considered to involve an inventive step when the document is taken alone

"Y" document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered to involve an inventive step when the document is combined with one or more other such documents, such combination being obvious to a person skilled in the art

"&" document member of the same patent family

 Date of the actual completion of the international search
 26 April, 2010 (26.04.10)

 Date of mailing of the international search report
 11 May, 2010 (11.05.10)

 Name and mailing address of the ISA/
 Japanese Patent Office

Authorized officer

Facsimile No.

Telephone No.

INTERNATIONAL SEARCH REPORTInternational application No.
PCT/JP2010/051732

C (Continuation). DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
A	JP 2007-272416 A (Bridgestone Corp.), 18 October 2007 (18.10.2007), entire text; all drawings (Family: none)	2-4, 8-10
A	JP 2006-193560 A (Sumitomo Rubber Industries, Ltd.), 27 July 2006 (27.07.2006), entire text; all drawings (Family: none)	1-12
A	JP 2007-107968 A (Sumitomo Rubber Industries, Ltd.), 26 April 2007 (26.04.2007), entire text; all drawings (Family: none)	1-12

A. 発明の属する分野の分類（国際特許分類（I P C））

Int.Cl. G01N3/00(2006.01)i, G01N3/08(2006.01)i

B. 調査を行った分野

調査を行った最小限資料（国際特許分類（I P C））

Int.Cl. G01N3/00, G01N3/08

最小限資料以外の資料で調査を行った分野に含まれるもの

日本国実用新案公報	1 9 2 2 - 1 9 9 6 年
日本国公開実用新案公報	1 9 7 1 - 2 0 1 0 年
日本国実用新案登録公報	1 9 9 6 - 2 0 1 0 年
日本国登録実用新案公報	1 9 9 4 - 2 0 1 0 年

国際調査で使用した電子データベース（データベースの名称、調査に使用した用語）

JSTPlus (JDreamII)

C. 関連すると認められる文献

引用文献の カテゴリー*	引用文献名 及び一部の箇所が関連するときは、その関連する箇所の表示	関連する 請求項の番号
Y	JP 2008-122154 A (住友ゴム工業株式会社) 2008.05.29, 全文, 全図 (ファミリーなし)	1 - 1 2
Y	JP 2006-200938 A (株式会社ブリヂストン) 2006.08.03, 全文, 全図 (ファミリーなし)	1 - 1 2
A	JP 2008-213724 A (横浜ゴム株式会社) 2008.09.18, 全文, 全図 (ファミリーなし)	1, 4 - 7, 1 1, 1 2

 C 欄の続きにも文献が列挙されている。 パテントファミリーに関する別紙を参照。

* 引用文献のカテゴリー

- 「A」特に関連のある文献ではなく、一般的技術水準を示すもの
 「E」国際出願日前の出願または特許であるが、国際出願日以後に公表されたもの
 「L」優先権主張に疑義を提起する文献又は他の文献の発行日若しくは他の特別な理由を確立するために引用する文献（理由を付す）
 「O」口頭による開示、使用、展示等に言及する文献
 「P」国際出願日前で、かつ優先権の主張の基礎となる出願

の日の後に公表された文献

- 「T」国際出願日又は優先日後に公表された文献であって出願と矛盾するものではなく、発明の原理又は理論の理解のために引用するもの
 「X」特に関連のある文献であって、当該文献のみで発明の新規性又は進歩性がないと考えられるもの
 「Y」特に関連のある文献であって、当該文献と他の1以上の文献との、当業者にとって自明である組合せによって進歩性がないと考えられるもの
 「&」同一パテントファミリー文献

国際調査を完了した日

2 6 . 0 4 . 2 0 1 0

国際調査報告の発送日

1 1 . 0 5 . 2 0 1 0

国際調査機関の名称及びあて先

日本国特許庁 (I S A / J P)

郵便番号 1 0 0 - 8 9 1 5

東京都千代田区霞が関三丁目4番3号

特許庁審査官（権限のある職員）

高橋 亨

2 J 4 0 7 6

電話番号 0 3 - 3 5 8 1 - 1 1 0 1 内線 3 2 5 2

C (続き) . 関連すると認められる文献		
引用文献の カテゴリー*	引用文献名 及び一部の箇所が関連するときは、その関連する箇所の表示	関連する 請求項の番号
A	JP 2007-272416 A (株式会社ブリヂストン) 2007.10.18, 全文, 全図 (ファミリーなし)	2 - 4, 8 - 1 0
A	JP 2006-193560 A (住友ゴム工業株式会社) 2006.07.27, 全文, 全図 (ファミリーなし)	1 - 1 2
A	JP 2007-107968 A (住友ゴム工業株式会社) 2007.04.26, 全文, 全図 (ファミリーなし)	1 - 1 2