

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 5 月 24 日現在

機関番号：24403

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2012～2015

課題番号：24560108

研究課題名(和文) 期待を裏切らない木質製品設計のための不均質異方性湿熱応力理論に関する基礎的研究

研究課題名(英文) A fundamental study on the nonhomogeneous and anisotropic hygrothermoelasticity assuring the design procedures of wooden products

研究代表者

石原 正行 (Ishihara, Masayuki)

大阪府立大学・工学(系)研究科(研究院)・准教授

研究者番号：60283339

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,200,000円

研究成果の概要(和文)：材料定数の含水率依存性を考慮した木質材料の湿熱応力問題の基礎理論を構築することが目的とした。まず、水分が木材実質相では溶解水として、空孔相では蒸気として存在するものとし、さらに、溶解水と蒸気の拡散係数が異なるとして、水分の吸着・溶解を考慮した拡散方程式を構築した。帯板・円筒における1次元定常・非定常湿熱弾性場を理論解析し、数値計算を実施することにより帯板・円筒の温度・溶解水・蒸気・応力の分布を明らかにした。その結果、提案した拡散方程式が、温度・湿度間の非線形な連成関係を記述できること、水分の吸着・溶解を考慮しない場合には発生しなかった応力が誘起されることが明らかになった。

研究成果の概要(英文)：The construction of the fundamental hygrothermoelastic theory considering the dependence of material properties on the hygrothermal environment was sought. At first, the hygrothermal diffusion equations considering the absorption and dissolution of moisture by assuming that moisture exists as dissolved and gaseous forms in the substantial solid parts and voids, respectively. Theoretical analyses of one-dimensional steady or transient hygrothermoelastic field in a strip or cylinder were performed. Then, numerical calculations revealed the distributions of the field quantities such as temperature, dissolved moisture content, vapor concentration, and stresses. As a result, it was found that the proposed diffusion equations are able to describe the nonlinear relation between temperature and moisture content and that the stresses are developed anew by considering the absorption and dissolution of moisture.

研究分野：固体力学

キーワード：連続体力学

1. 研究開始当初の背景

(1) 今日、地球温暖化を阻止するための対策が取られ、温室効果ガスであるCO₂(二酸化炭素)の削減が各国に課せられているなか、木材が注目を集めている。木材は生育過程においてCO₂を吸収・固定する。それゆえ、木質材料の利用を促進することは、木質材料の流通量が増加し、さらなる植林が促進され、固定化されるCO₂が増加するという点で、大気中のCO₂削減に貢献する。これらのことから、木質材料に関する研究は地球温暖化阻止・循環型社会実現にあたって重要なものと位置づけられ、植林・伐採・素材処理・製品成型・リサイクルの観点からの研究が国内外で精力的に行われている。そのなかでも本研究は、素材処理・製品成型時に不可欠となる力学的設計手法に注目したものである。

(2) 木質材料の利用促進のためには、製品を安心して使えるようにするために合理的な力学的設計手法の確立が不可欠である。木質材料は成型前に乾燥処理が施されるが、処理後も材料内には水分が残っており、さらに、製品として使用中にも環境中の水分を吸収する。材料内の水分分布は使用環境の湿度・温度により絶えず変動する。水分分布の変動により、材料内では局所的膨張・収縮による応力が発生する。製品の品質を保証するにはこの応力を把握すること、すなわち力学的設計が必要であり、この設計は湿熱応力問題として捉えられてきた。その際、従来では簡便に取り扱うために、問題解析に必要な材料定数は含水率に依存しないと仮定されてきた。そのため設計予測に違い、製品の不良変形・割れが発生してきて、木質材料を用いた製品の信頼を損ねてきた。実際には、膨張係数・拡散係数(水分・熱)・弾性係数などの材料定数が含水率に依存して変動することが実験的に明らかにされている。

(3) 木質材料は耐朽性を高めるため低含水率となるように乾燥処理されるが、このような低含水率域でその材料定数の変動が顕著になり、力学的設計においてそれらの点を考慮することは大変重要である。また、木質材料が不均質性・異方性を伴うことへの考慮も不可欠である。一方、本研究担当者は、湿熱応力問題に取り組むとともに、熱弾塑性解析を通して材料非線形問題に、傾斜機能材料・生体材料リモデリングに関する研究を通して不均質体の問題に取り組んできた。また、圧電複合平板に関する研究を通して異方性体の問題、さらには、ひずみ場・温度場・電場といった複数の場が連成する問題に取り組んできた。これらの取り組み経験にヒントを得て、木質材料を用いた製品の合理的な設計手法の確立を目指して、材料定数の含水率依存性を考慮した不均質異方性体の湿熱応力問題の基礎理論の構築を着想した。

2. 研究の目的

木質材料を用いた製品の合理的な設計手法の確立を目指して、材料定数の含水率依存性を考慮した不均質異方性体の湿熱応力問題の基礎理論を構築することが本研究の目的である。具体的には、水分の木質材料への吸着・溶解機構を考慮した拡散現象、生育環境による木質材料の不均質性を解明し、続いて、ひずみ場・湿度場・温度場の連成を考慮した構成方程式を提案し、材料定数の含水率依存性・不均質性が木質材料の力学的挙動に与える影響を検討する。この目的を達成すると、木質製品の設計予測精度向上、信頼性向上、利用促進につながり、究極的には、木質材料の流通量増加と温室効果ガス吸収能により、地球温暖化阻止・循環型社会実現に貢献することになる。

3. 研究の方法

(1) 膨張係数・拡散係数(水分・熱)・弾性係数などの材料定数の含水率依存性を説明するために、水分の吸着・溶解を考慮した拡散方程式を構築する。以降の研究計画において含水量の材料内分布が必要となるので、この段階では、種々の吸着・溶解の理論モデルを仮定することにより、一定蒸気圧・温度下での含水量分布を求める。

(2) 木質材料は生育環境中に力学的刺激を受け、材料定数が不均質となる。以降の研究計画においてこの不均質性を考慮することが必要となるので、この段階では、荷重・湿度・温度という力学的刺激による木質材料のリモデリング現象(形態再構築)を解明し、伐採後に素材として得られる木質材料の材料定数分布を決定する。

(3) 材料定数の含水率依存性を考慮した不均質異方性体の湿熱応力問題を解析するために必要な構成方程式を提案する。局所的な含水率に対応する材料定数を決定することが必要なので、局所的な含水率・材料定数関係の理論モデルを仮定することで、ひずみ場・湿度場・温度場の連成と異方性を考慮した局所的構成方程式を提案する。

(4) 木質素材を想定した簡単かつ本質的な理論モデルを用いて、材料定数の含水率依存性・不均質性が木質素材の力学的挙動に与える定性的・定量的影響を検討する。(3)で得られた構成方程式を用いて、単純形状モデルが時間変動する蒸気圧・気温下に置かれた場合の、含水率・温度・ひずみ・応力・変位の空間的分布および時間変動を明らかにする。この結果を、材料定数が含水率に依存せずかつ均質な場合の結果と比較して、材料定数の含水率依存性・不均質性が力学的挙動に与える影響を定性的・定量的に検討する。

(5) 実際の木質材料を用いた製品を想定した3次元モデルに対して、材料定数の含水率依存性・不均質性が製品の力学的挙動に与える定性的・定量的影響を数値シミュレーションにより検討する。(3)で得られた構成方程式を用いて、各製品事例に即したモデルが時間変動する蒸気圧・気温下に置かれた場合の含水率・温度・ひずみ・応力・変位の空間的分布および時間変動を数値シミュレーションにより明らかにする。

4. 研究成果

本研究は、木質材料を用いた製品の合理的な設計手法の確立を目指して、材料定数の含水率依存性を考慮した不均質異方性体の湿熱応力問題の基礎理論を構築することを目的とし、以下の主要な成果を得た。

(1) 蒸気濃度・溶解水含水率・温度の非線形関係：

木質材料中では水分が木材実質相では溶解水として、空孔相では蒸気として存在するものとして、両者の化学ポテンシャルの平衡を考慮することにより、蒸気濃度(C)・溶解水含水率(M)・温度(T)の間に成立する関係を定式化し、数値シミュレーションを実施した。一例を図1(無次元表示)に示す。図1において三者の間に著しい非線形関係が見いだせる。

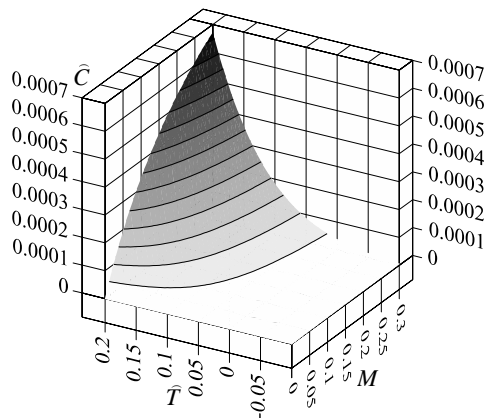


図1: 蒸気濃度・溶解水含水率・温度の関係

(2) 湿熱拡散非線形方程式の導出：

熱・水分の収支を基礎として、水分の溶解熱、温度変化による平衡状態の変化を考慮し、さらに溶解水と蒸気の拡散係数が異なるとして、水分の吸着・溶解を考慮した拡散方程式を以下のように導出した。

$$\left. \begin{aligned} D_T(M, T) \nabla^2 T + N_T(M, T) \\ = \frac{\partial T}{\partial t} - v_M(M, T) \frac{\partial M}{\partial t}, \\ D_M(M, T) \nabla^2 M + N_M(M, T) \\ = \frac{\partial M}{\partial t} + \lambda_T(M, T) \frac{\partial T}{\partial t} \end{aligned} \right\} \quad (a)$$

式(a)は、温度拡散係数 $D_T(M, T)$ ・溶解水拡散係数 $D_M(M, T)$ および湿熱連成係数 $v_M(M, T)$, $\lambda_T(M, T)$ が環境(M, T)に依存していること、および、湿熱拡散に非線形項 $N_T(M, T)$, $N_M(M, T)$ が含まれることを表す。これらの諸量に対してシミュレーションを実施したところ、温度・溶解水含水率の増加に伴って温度拡散係数は増加し、温度の増加・溶解水含水率の減少に伴って溶解水拡散係数が増加することが分かった。

(3) 1次元湿熱弾性場の解析：

(1), (2)の結果に基づき、帯板(図2)・円筒における1次元定常・非定常湿熱場分布を理論解析し、数値計算を実施することにより、片面で乾燥・常温状態、他面で飽和湿潤・高温状態にある帯板・円筒の温度・溶解水・蒸気の分布を定量的に明らかにした。その結果、飽和湿潤・高温状態側から供給された湿分が、蒸気から溶解水に変化しつつ乾燥・常温状態側に拡散する傾向が明らかになった(図3)。

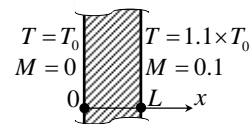


図2: 帯板解析モデル

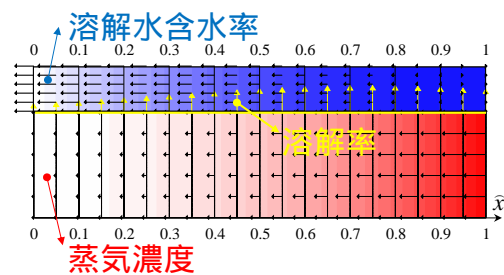


図3: 湿熱場の構造

さらに、帯板・円筒における1次元定常・非定常湿熱応力を定量的に明らかにした。従前の線形理論に基づく解析では、帯板に力学的拘束がない場合は帯板の長手方向に応力が発生しないことが分かっているが、本研究のように水分の吸着・溶解を考慮した解析を実施すると、式(a)の非線形項の影響により応力が誘起されることが明らかになった。また、円筒の曲率が大きくなるほど非線形項の影響をより強く受けることが分かった。

(4) 2, 3次元湿熱弾性場の解析:

図2の帯板が局所的な湿熱負荷を受けたときの2次元湿熱場を理論解析し,数値計算を実施することにより,温度・溶解水含水率の板厚方向分布傾向が1次元の場合と質的に異なることを明らかにした.さらに,半無限体に対する3次元弾性場についても取り扱った.

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)

[雑誌論文](計15件)

Ishihara, M., Ootao, Y., Kameo, Y.: An Electroelastic Problem of Green Materials Subjected to Surface Friction. International Journal of Civil and Structural Engineering 2 (2015) pp. 49-52. (査読有り)

Ishihara, M., Ootao, Y., Kameo, Y.: Hygrothermal Field Considering Nonlinear Coupling Between Heat and Binary Moisture Diffusion in Porous Media. Journal of Thermal Stresses 37 (2014) pp. 1173-1200. (査読有り)

Ootao, Y., Ishihara, M.: Transient Thermoelastic Analysis for a Multilayered Hollow Cylinder with Piecewise Power Law due to Asymmetric Surface Heating. Acta Mechanica 225 (2014) pp. 2903-2922. (査読有り)

Kameo, Y., Adachi, T., Interstitial fluid flow in canaliculi as a mechanical stimulus for cancellous bone remodeling: In silico validation. Biomech & Model Mechanobio 13 (2014) pp. 851-860. (査読有り)

Noda, N., Ootao, Y., Tanigawa, Y.: Transient thermoelastic analysis for a functionally graded circular disk with piecewise power law. Journal of Theoretical and Applied Mechanics 50 (2012) pp. 831-839. (査読有り)

[学会発表](計39件)

Ogasawara, K., Ishihara, M., Ootao, Y.: Nonlinear Coupling Between Heat and Moisture Diffusion in Two-dimensional Porous Media in a Transient State. The First Pacific Rim Thermal Engineering Conference. 2016.3.16. Hawaii's Big Island(USA).

Ishihara, M., Ogasawara, K., Ootao, Y., Kameo, Y.: Effects of Diffusivities of Binary Moisture on Hygrothermal Field in a Porous Medium Considering Nonlinear Coupling Between Heat and Moisture. The

First Pacific Rim Thermal Engineering Conference. 2016.3.16. Hawaii's Big Island(USA).

Kameo, Y., Ootao, Y., Ishihara, M.: Theoretical Investigation of the Effects of Bone Lamellar Structure on the Interstitial Fluid Flow in Poroelastic Trabeculae. The 8th Asian-Pacific Conference on Biomechanics. 2015.9.18. 北海道大学 (北海道札幌市).

Ishihara, M., Ootao, Y., Kameo, Y.: Transient hygrothermal field in one-dimensional porous media considering nonlinear coupling between heat and moisture diffusion. International Symposium on Wood Science and Technology 2015. 2015.03.17. 船堀タワーホール (東京都江戸川区).

Yamashita, S., Ishihara, M., Ootao, Y., Kameo, Y.: Stresses due to nonlinear coupling hygrothermal field in one dimensional porous media in a steady state. ACMFMS 2014. 2014.10.12. 奈良県新公会堂 (奈良県奈良市).

Kameo, Y., Ootao, Y., Ishihara, M.: Poroelastic Analysis of Interstitial Fluid Flow in Trabecular Bone with Lamellar Structure under Cyclic Loading. ACMFMS 2014. 2014.10.12. 奈良県新公会堂 (奈良県奈良市).

Ishihara, M., Ootao, Y., Kameo, Y.: Nonlinear Coupling Between Heat and Moisture Diffusion in One-dimensional Porous Media in a Steady State. The Tenth International Congress on Thermal Stresses 2013. 2013.6.2. Nanjing (China).

Ootao, Y., Ishihara, M.: Transient Thermoelastic Analysis for a Multilayered Hollow Cylinder with Piecewise Power Law Nonhomogeneity due to Asymmetric Surface Heating. ACMFMS 2012. 2012.12.6. New Delhi (India).

[図書](計4件)

Ishihara, M.: Encyclopedia of Thermal Stresses (Editor: R. B. Hetnarski). Springer. pp. 1173-1183. (2013).

Ishihara, M., Noda, N.: Encyclopedia of Thermal Stresses (Editor: R. B. Hetnarski). Springer. pp. 3452-3464. (2013).

6. 研究組織

(1)研究代表者

石原 正行 (ISHIHARA MASAYUKI)
大阪府立大学・工学研究科・准教授
研究者番号: 60283339

(2)研究分担者

大多尾 義弘 (OOTA O YOSHIHIRO)
大阪府立大学・工学研究科・教授
研究者番号：10275274

亀尾 佳貴 (KAMEO YOSHITAKA)
京都大学・再生医科学研究所・助教
研究者番号：60611431