

## 科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成24年 4月 1日現在

機関番号：24403

研究種目：若手研究（B）

研究期間：2009～2011

課題番号：21760098

研究課題名（和文） 人と木材を大切に作るチップソーの開発のための基礎的研究

研究課題名（英文） Fundamental Research for Development of  
Human- and Earth-Friendly Circular Saw

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

研究成果の概要（和文）：圧電積層チップソーの振動特性および制振方法を解明した。面内応力・固有振動数・振動モードを、切削加工による回転・摩擦熱および、アクチュエータへの電圧印加を想定して理論解析した。さらに数値計算を実行し、電圧印加条件が固有振動数に及ぼす影響を検討し、摩擦熱がチップソーの不安定性に与える影響、複数同心円領域への電圧印加の諸パラメータが固有振動数に与える影響を明らかにするとともに、危険固有振動数を最大化する最適化問題を解析した。

研究成果の概要（英文）：The dynamic characteristics of and the control methods for a composite circular saw were investigated. The in-plane stresses, natural frequencies, and modes of the composite saw were analyzed theoretically, considering the rotation and frictional heat due to cutting, and the electric voltage applied to the actuator. Numerical calculations for the results were performed to investigate the effects of parameters of the voltage on the natural frequencies. As a result, the effects of cutting heat on the stability of the saw were found qualitatively and quantitatively, as well as the effects of parameters for voltage application to multiple annular domains on the natural frequencies. Furthermore, the optimization problem that maximizes the critical natural frequency with respect to the parameters were solved.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2009年度	2,200,000円	660,000円	2,860,000円
2010年度	700,000円	210,000円	910,000円
2011年度	500,000円	150,000円	650,000円
年度			
年度			
総計	3,400,000円	1,020,000円	4,420,000円

研究分野：工学

科研費の分科・細目：機械工学，生産工学・加工学

キーワード：チップソー，腰入れ，熱負荷，曲げ理論，モード解析

## 1. 研究開始当初の背景

(1) 地球温暖化阻止のため CO<sub>2</sub> 排出削減が各国に課せられている状況において、木材が注目を集めている。木材は光合成によって CO<sub>2</sub> を吸収・固定して成長した後、木質材料として製品化され、寿命を終えると水と CO<sub>2</sub> に分解され、その CO<sub>2</sub> は再び木材に吸収・固定されることから、木材は循環性を有する。木材の利用を促進することは、流通量が増加し、植林が促進され、固定化される CO<sub>2</sub> が増加するので、大気中の CO<sub>2</sub> 削減に貢献する。よって木材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である。本研究では製品成型時の切削加工に注目した。

(2) 切削加工には、チップソー（丸のこ）が使用されるが、共振により加工精度が低下し被削材を無駄にすることがある。これを避けるため、従来は腰入れ（塑性変形付与処理）がチップソーに施されるが、これは熟練工の経験に基づいて行われる。木材利用促進を目指し付加価値を高めるためには複雑な加工が必要となるが、複雑な加工条件を全て想定した腰入れは不可能である。

(3) そこで発想転換し、本事業者が構造・圧電複合材料の変形制御に取り組んできたことにヒントを得て、チップソーにセンサ・アクチュエータを組み込み、加工時の振動をフィードバック制御する新奇なチップソーを着想した。すなわち、チップソー、圧電センサ・アクチュエータ、電極層からなる積層構造がフランジ・ブラシを介してコントローラと接続されたシステムを着想した。

## 2. 研究の目的

本研究では、前記システム開発の第一段階として、チップソー、円形薄型圧電センサ・アクチュエータからなる圧電積層チップソーの振動特性および制振方法を解明することを目標とした。チップソーが切削抵抗・摩擦熱を受ける場合の、変形モード・固有振動数・センサ出力電圧・電圧印加による制振効果を解明し、センサ出力に対応してアクチュエータ出力電圧を決定する制御則を解明することにより、制振機能を有するチップソーの設計指針を得るのが目標である。

## 3. 研究の方法

以下の手順で研究を進めた。

(1) 板の曲げ理論を用いて、鋼製チップソーの面内応力・固有振動数・振動モードを、使用による回転・摩擦熱を想定して理論解析した。解析結果に対して数値計算を実行し、回転・摩擦熱が面内応力・固有振動数に与える影響、すなわち安定性に与える影響を明らかにした。

(2) 積層板理論を用いて、鋼製チップソー表面に圧電センサ・アクチュエータを積層した圧電積層チップソーの面内応力・固有振動数・振動モードを、アクチュエータへの電圧印加を想定して理論解析した。解析結果に対して数値計算を実行し、印加電圧の分布形状が面内応力・固有振動数に与える影響を解明した。特に、複数同心円状領域への電圧印加パラメータ（分布数・分布強度・分布位置・分布幅）が固有振動数に与える影響を定量的に評価した。

(3) 遺伝的アルゴリズムを用いて、分布数・分布強度・分布位置・分布幅を設計変数とし危険固有振動数を最大化する最適化問題を解析し、「ふれ」を最も効果的に低減するための電圧印加法を見出した。

## 4. 研究成果

### (1) 理論解析：

図1のような中空複合円板を圧電積層チップソーの解析モデルとした。回転角速度を  $\omega_r$ 、摩擦熱による温度上昇を  $T_0 f_T(r)$ 、圧電アクチュエータへの電圧印加により発生した面内ひずみを  $\varepsilon_1 f_1(r)$ 、 $\varepsilon_2 f_2(r)$  とした。

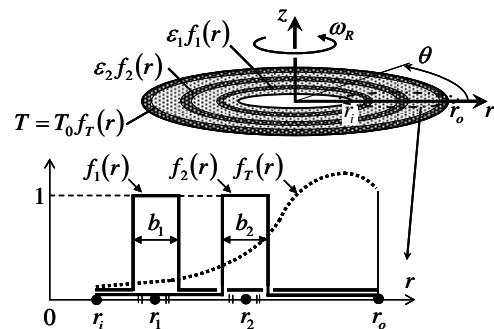


図1: 解析モデル

積層板理論を用いることにより、積層チップソーの挙動を記述する基礎方程式を導出し、半径方向・円周方向応力  $\hat{N}_r$ 、 $\hat{N}_{\theta}$ 、および、円周方向  $n$  次・半径方向  $m$  次の固有振動数  $\hat{\omega}_{nm}$  を求めた。詳細は5章に挙げた〔雑誌論文〕①に記述されている。

以下の数値計算においては、モデル中の各

パラメータ  $x$  に対応する無次元値を  $\hat{x}$  と表す。また、積層チップソーの無次元内径を 0.3、積層構造の等価ポアソン比を 0.25、回転角速度を  $\hat{\omega}_R = 3$  とした。温度分布は最外周部に無次元幅 0.05 で一様に作用しているとし、特に断りのない場合は  $\hat{T}_0 = 100$  とした。

(2) 摩擦熱・電圧印加による効果：

図 2 に摩擦熱の大きさによる固有振動数低下を明らかにした。図 2 より、摩擦熱が大きくなると高次固有振動数が低下していること、すなわち、摩擦熱によって共振の危険性が増加していることが分かる。

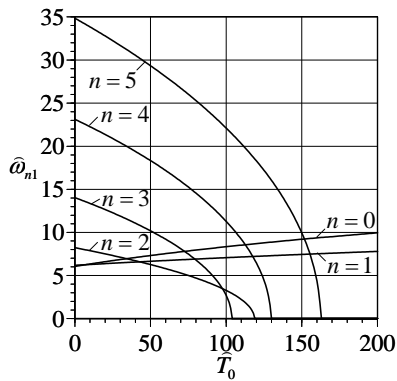


図 2: 摩擦熱による固有振動数の低下 ( $\hat{\varepsilon}_1 = \hat{\varepsilon}_2 = 0$ )

図 3, 4 でアクチュエータへの電圧印加による固有振動数変化を明らかにした。共振を避けるためには、危険固有振動数（固有振動数が最小となるモードの固有振動数）をなるべく大きくすることが好ましい。図 3, 4 より、危険固有振動数を大きくするためには電圧印加強度・位置ともに設定レンジの中で適切な値を選択する必要があることが明らかになった。

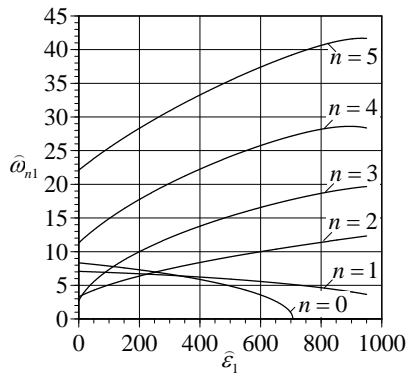


図 3: 電圧印加強度による固有振動数変化 ( $\hat{r}_1 = 0.555, \hat{b}_1 = 0.05, \hat{\varepsilon}_2 = 0$ )

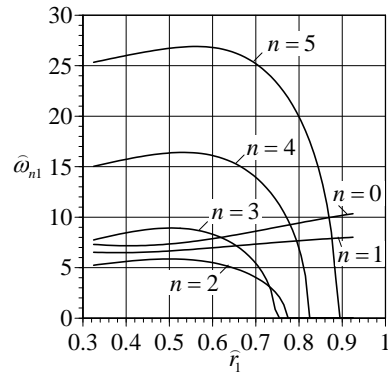


図 4: 電圧印加位置による固有振動数変化 ( $\hat{\varepsilon}_1 = 150, \hat{b}_1 = 0.05, \hat{\varepsilon}_2 = 0$ )

さらに図 5 で、電圧印加強度・位置による危険固有振動数の変化を明らかにし、危険固有振動数を最大にする強度・位置の組合せを明らかにした。

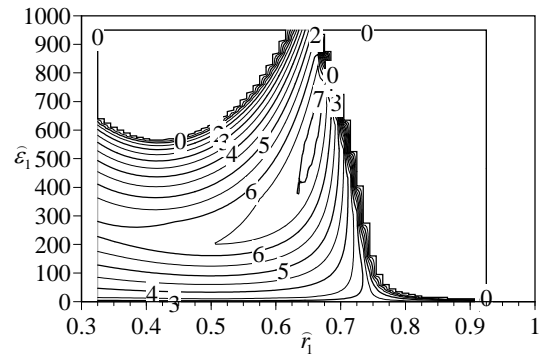


図 5: 電圧印加強度・位置による臨界固有振動数変化 ( $\hat{b}_1 = 0.05, \hat{\varepsilon}_2 = 0$ )

(3) 最適電圧印加条件の探索：

チップソーが 2 つの円環領域で電圧印加された場合を考え、危険固有振動数を最大化するための電圧印加条件を明らかにした。印加幅を  $\hat{b}_1 = \hat{b}_2 = 0.05$ 、印加位置・強さを設計変数とし、それぞれの探索範囲を 0.325~0.975、0~1000 とした。印加条件探索においては遺伝的アルゴリズムを用い、個体数 50、エリート数 2、交叉確率 0.7、突然変異確率 0.05、各設計変数の遺伝子長を 10 ビットとした。探索過程を図 6 に示す。図 6 において、 $i$  は世代数、 $F_{\max}^i$  は臨界固有振動数の（個体に関する）最大値である。このとき、最適パラメータは  $(\hat{\varepsilon}_1, \hat{r}_1, \hat{\varepsilon}_2, \hat{r}_2) \cong (514.2, 0.7393, 416.4, 0.5531)$  であることが明らかになった。

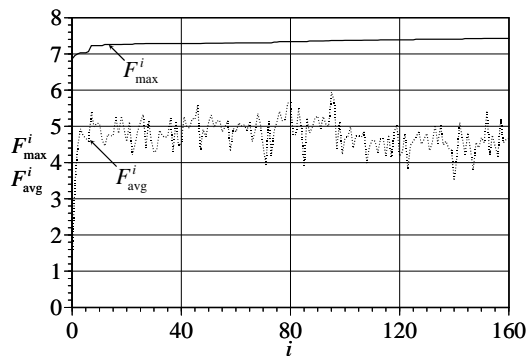


図 6: 遺伝的アルゴリズムによる  
最適電圧印加条件の探索

## 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 4 件)

- ① Ishihara, M., Ootao, Y., Noda, N.: Analysis of Dynamic Characteristics of a Rotating, Themally Loaded Circular Saw Subjected to Tensioning over a Double Annular Domain. Journal of Solid Mechanics and Materials Engineering 4 (2010) pp. 1155-1166. (査読有り)
- ② Ishihara, M., Noda, N., Ootao, Y.: Analysis of Dynamic Characteristics of Rotating Circular Saw Subjected to Thermal Loading and Tensioning. Journal of Thermal Stresses 33 (2010) pp. 501-517. (査読有り)
- ③ Ishihara, M., Watanabe, Y., Noda, N.: Non-Linear Dynamic Deformation of a Piezothermoelastic Laminate. In: Irschik, H., Krommer, M., Watanabe, K., Furukawa, T. (eds.) Mechanics and Model-Based Control of Smart Materials and Structures, pp. 85-94. Wien: Springer-Verlag 2010. (査読有り)
- ④ Watanabe, Y., Ishihara, M., Noda, N.: Nonlinear Transient Behavior of a Piezothermoelastic Laminated Beam Subjected to Mechanical, Thermal and Electrical Load. Journal of Solid Mechanics and Materials Engineering 3 (2009) pp. 758-769. (査読有り)

[学会発表] (計 6 件)

- ① 西野俊章., 大多尾義弘., 石原正行.: 熱負荷を受ける回転中空圧電複合円板の固有振動数に与える複数の電位分布の影響. 関西支部第 87 期定時総会講演会. 2012. 3. 17. 関西大学.
- ② Ishihara, M., Ootao, Y., Noda, N.:

Analysis of dynamic characteristics of a rotating, themally loaded circular saw subjected to tensioning over a multiple annular domain. Ninth International Congress on Thermal Stresses 2011. 2011/6/9. Budapest University of Technology and Economics and Hungarian Academy of Sciences.

- ③ Ishihara, M., Ootao, Y., Noda, N.: Control of dynamic characteristics of a rotating circular saw by axi-symmetric tensioning. JSMAMS2010. 2010/8/12. Harbin Institute of Technology.
- ④ Ishihara, M., Ootao, Y., Noda, N.: Analysis of Dynamic Characteristics of Circular Saw Subjected to Thermal Loading and Tensioning. MESO 2010. 2010/6/22. National Taiwan University of Science and Technology.
- ⑤ Ishihara, M., Ootao, Y., Noda, N.: Control of Dynamic Characteristics of a Circular Saw by Axi-Symmetric Tensioning. Asian Pacific Conference for Materials and Mechanics 2009. 2009/11/14. Pacifico Yokohama.
- ⑥ 石原正行., 野田直剛., 大多尾義弘.: 熱負荷と腰入れ処理をうけた丸のこの固有振動数解析. M&M2009 材料力学カンファレンス. 2009/7/24. 札幌.

## 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