

機関番号：57501  
 研究種目：若手研究（B）  
 研究期間：2009～2010  
 課題番号：21760366  
 研究課題名（和文） 傾斜機能材料から成る構造要素の動的構造評価と土木構造物への適用に関する研究  
 研究課題名（英文） Dynamic analysis of functionally graded structural elements and applicability to civil structures  
 研究代表者  
 名木野 晴暢 (NAGINO HARUNOBU)  
 大分工業高等専門学校・都市システム工学科・助教  
 研究者番号：10455181

研究成果の概要（和文）：複合材料である傾斜機能材料から成る構造要素の土木構造物への適用性を明らかにすることを目的として、まず、傾斜機能材料から成る三次元弾性体の曲げ問題と自由振動問題を高精度で解析できる構造解析法を開発した。次に、これを用いて、傾斜機能弾性体の曲げ変形特性と自由振動特性を明らかにし、さらに、均質弾性体の曲げ変形特性と自由振動特性とを比較することで傾斜機能材料から成る構造要素の動的な構造評価を行った。

研究成果の概要（英文）：The purpose of the research is to clarify the applicability of functionally graded structural elements to the civil structures. Firstly, highly accurate structural analysis method for Bending and free vibration problems of functionally graded elastic bodies was developed. Next, three-dimensional bending and vibration problems of functionally graded elastic bodies were analyzed, and bending and free vibration characteristics of functionally graded elastic bodies were clarified.

交付決定額

（金額単位：円）

|         | 直接経費      | 間接経費    | 合計        |
|---------|-----------|---------|-----------|
| 2009 年度 | 1,000,000 | 300,000 | 1,300,000 |
| 2010 年度 | 800,000   | 240,000 | 1,040,000 |
| 総計      | 1,800,000 | 540,000 | 2,340,000 |

研究分野：構造工学，構造動力学，応用力学，計算力学

科研費の分科・細目：構造工学・地震工学・維持管理工学

キーワード：傾斜機能材料，平板構造，三次元弾性論，曲げ変形特性，自由振動特性，ひずみエネルギー特性，解析解，B-spline Ritz 法

#### 1. 研究開始当初の背景

島国である我が国は、依然として厳しい財政状況下で、社会基盤施設を整備しなければならない。地震と台風の影響を大きく受ける我が国では、過酷な条件下で、社会基盤施設のより一層の安全な構造設計を要求されることになる。

構造技術の進歩にともない、社会基盤施設は大型化・長大化の傾向にあるため、構造物の軽量化が重要視されている。このような背景から、小さい比重、大きな剛性を有する積層材料の積極的利用が、社会基盤施設の重量の低減、設計精度の向上、コスト縮減や長寿命化に寄与されるものと期待されている。し

かしながら、積層材料には、界面、が存在するため、層間剥離や界面での亀裂破壊などの問題が生じてくる。このような問題を解決するために、傾斜機能材料という新しい概念の材料が我が国で開発された。傾斜機能材料は、材料組織の体積分率などを変化・制御させることにより、一方の表面から他方の表面に向かって連続的に縦弾性係数、ポアソン比、密度などが変化するものであり、積層材料の問題点であった、界面、が存在しないという利点がある。しかし、傾斜機能材料は比較的新しい材料であるため、傾斜機能材料から成る構造要素の曲げ変形特性や自由振動特性を正確に把握することが、傾斜機能材料の土木

構造物への適用性を評価する上で必要不可欠となっている。

## 2. 研究の目的

大型化・長大化する構造物の実務設計においては、重量の低減と設計精度の向上が急務である。したがって、傾斜機能材料から成る構造要素の土木構造物への適用性を検討するためには、傾斜機能材料から成る構造要素の曲げ変形特性や自由振動特性を正確に把握することが必要不可欠である。

本研究では、複合材料である傾斜機能材料から成る構造要素の土木構造物への適用性を明らかにすることを目的としている。まず、構造要素を三次元弾性体としてモデル化し、傾斜機能材料から成る弾性体の曲げ問題と自由振動問題を高精度で解析できる構造解析法を開発する。次に、開発した構造解析法を用いて、傾斜機能材料から成る弾性体の三次元曲げ変形解析及び三次元自由振動解析を行い、その曲げ変形特性や自由振動特性を解明する。さらに、従来の土木材料である鋼やコンクリートのような均質材料から成る構造要素の曲げ変形特性や自由振動特性と比較することで、傾斜機能材料から成る平板構造要素の土木構造物への適用性について明らかにする。

## 3. 研究の方法

本研究では、三次元弾性論に基づいて、面外荷重を受ける傾斜機能弾性体の曲げ変形問題 (図-1) と傾斜機能弾性体の自由振動問題 (図-1 から面外荷重を取り除いたモデル) を解析する必要がある。ここで、 $a, b, h$  はそれぞれ弾性体の長さ、幅、高さ、 $E_b$  と  $E_t$  は、それぞれ弾性体の下面及び上面の縦弾性係数であり、 $u, v, w$  は、それぞれ、 $x, y, z$  方向の変位である。また、 $q(x, y)$  は弾性体上面に作用する面外荷重である。

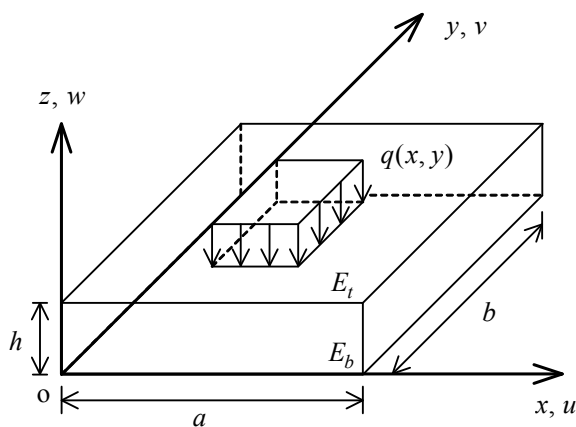


図-1 解析モデル

また、材料の不均質性は板厚方向にのみ依存するものとし、本研究では、縦弾性係数  $E(z)$  を次式のように仮定した。

$$E(z) = E_b \exp\{p(z/h)\}, \quad p = \ln(E_t/E_b) \quad (1)$$

ここで、 $p$  は縦弾性係数比  $E_t/E_b$  に依存する材料の不均質性を表す指標である。なお、ポアソン比  $\nu$  は一定であると仮定する。式 (1) で仮定した縦弾性係数は、図-2 のようになる。

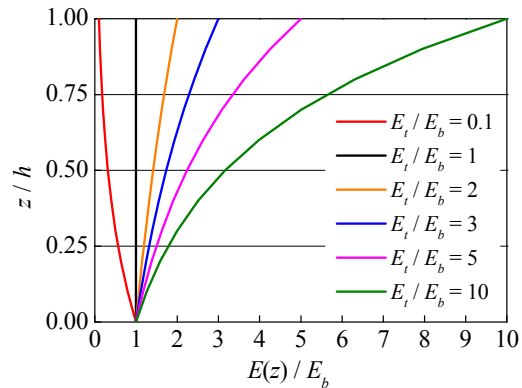
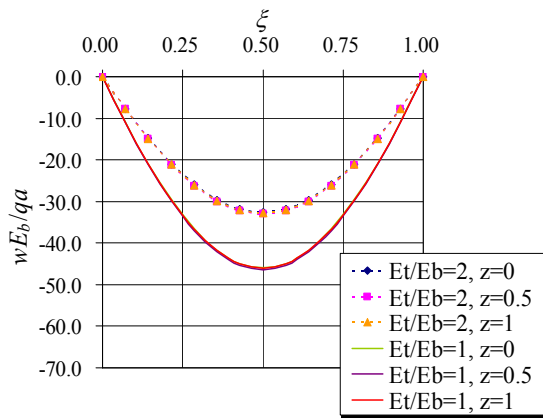


図-2 板厚方向の縦弾性係数の分布

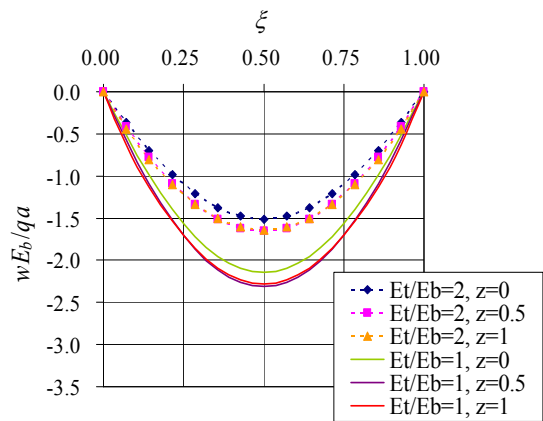
研究の方法としては、まず、面外荷重を受ける傾斜機能弾性体の曲げ変形特性を把握するために、板厚方向に閉じた形式の解析解を導出した。この解析解によれば、傾斜機能弾性体の正確な曲げ変形特性を把握することができ、また、解析解は、数値解析法による数値解を評価する上でも活用できる。しかし、解析解は支持条件に制約を受けるという問題点が生じ、実用的ではない面もある。そこで、研究代表者が提案している誰もが容易に取り扱うことができ、効率良く、効果的に構造解析が実施でき、加えて高い解析精度を得ることが期待できる B-spline Ritz 法を用いて、面外荷重を受ける傾斜機能弾性体の三次元曲げ変形問題及び傾斜機能弾性体の自由振動問題を定式化し、構造解析プログラムを開発した。開発した構造解析プログラムの妥当性を検証するために、先に導出した解析解並びに実務設計や学術研究で不動の地位にある汎用有限要素解析コード Abaqus 6.10 を用いて、任意の支持条件を有する傾斜機能弾性体の曲げ変形問題における変位や応力及び自由振動問題における固有円振動数について、精度比較を行った。その結果、本解析法によれば、弾性体の厚さ、支持条件や縦弾性係数比に係わらず、有限要素法よりも少ない未知数で、高い解析精度が得られることを確認した。

## 4. 研究成果

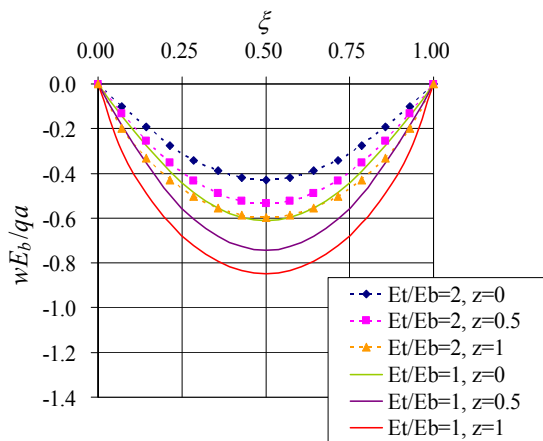
本研究で得られた成果を纏めれば、以下の通りである。



(a)  $h/a = 0.1$



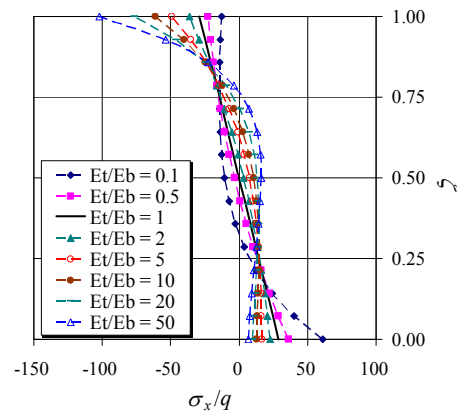
(b)  $h/a = 0.3$



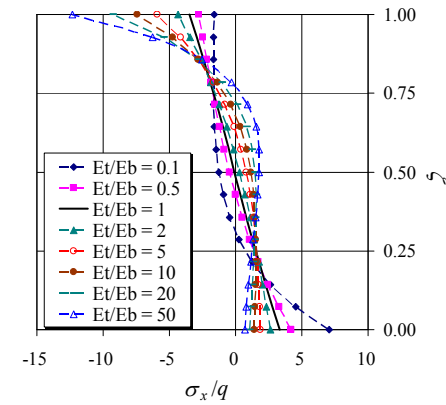
(c)  $h/a = 0.5$

図-3 全面等分布荷重を受ける傾斜機能弾性体の軸方向面外変位分布： $E_t/E_b = 2$

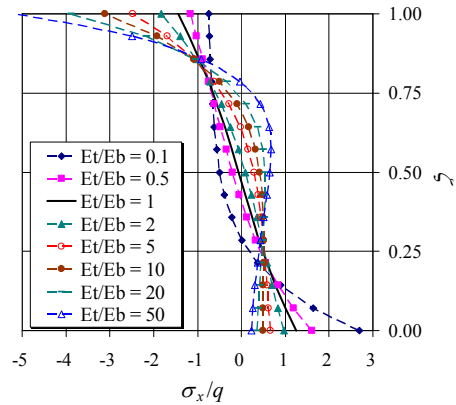
- (1) 傾斜機能弾性体は、縦弾性係数比を二倍にするだけで、均質弾性体よりも面外変位を四割程度減少させられる。(図-3)



(a)  $h/a = 0.1$



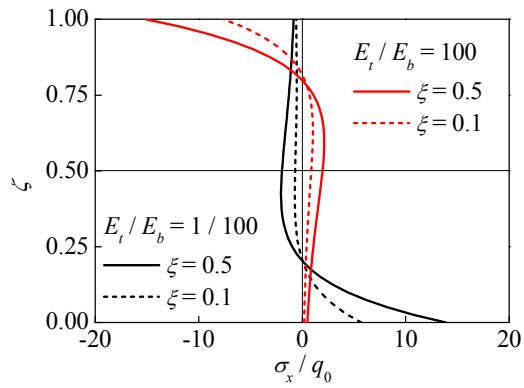
(b)  $h/a = 0.3$



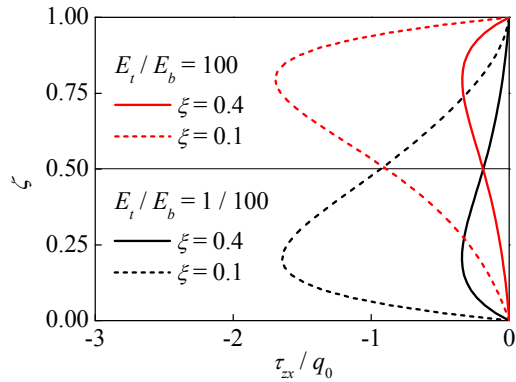
(c)  $h/a = 0.5$

図-4 全面等分布荷重を受ける傾斜機能弾性体の板厚方向の応力分布

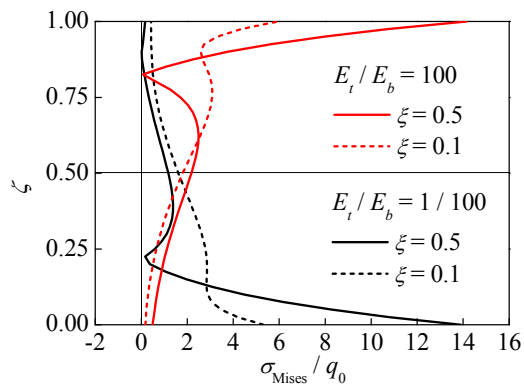
- (2) 傾斜機能弾性体の板厚方向の応力分布は均質弾性体と異なり、弾性体内部で一様分布を成し、弾性体下面での引張応力を低減できる。(図-4)



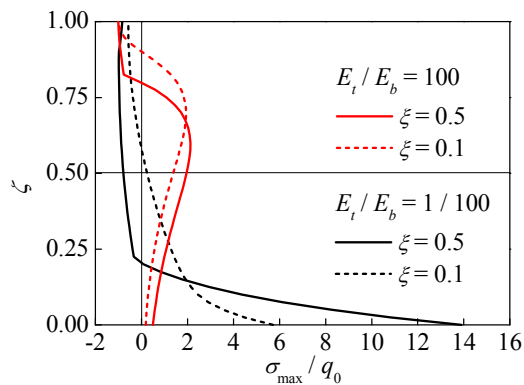
(a) 軸応力



(b) 面外せん断応力

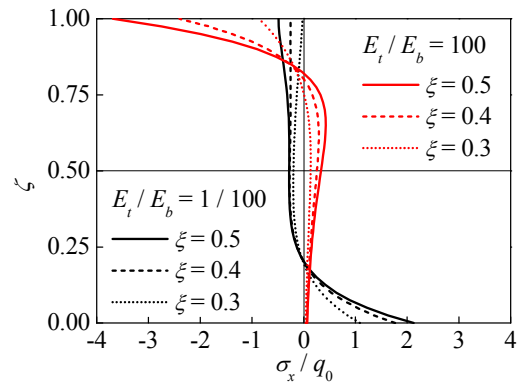


(c) 相当応力

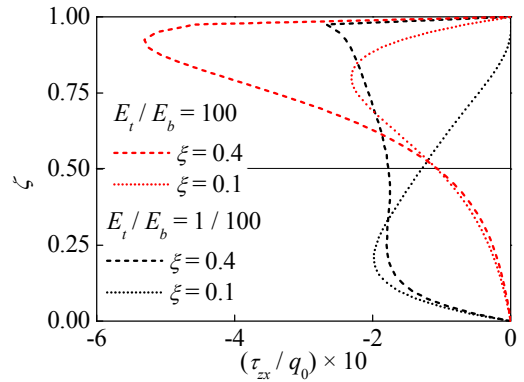


(d) 最大主応力

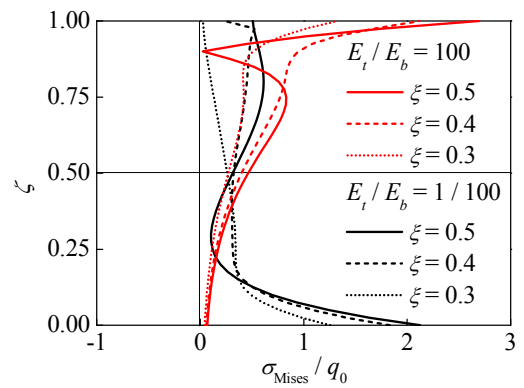
図-5 全面等分布荷重を受ける傾斜機能平板の板厚方向応力分布 :  $h/a = 0.3$



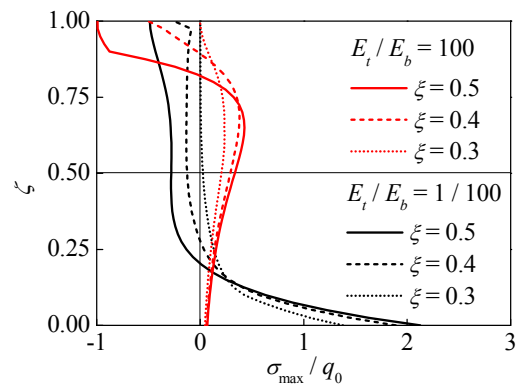
(a) 軸応力



(b) 面外せん断応力



(c) 相当応力



(d) 最大主応力

図-6 部分等分布荷重を受ける傾斜機能平板の板厚方向応力分布 :  $h/a = 0.3$

(3) 傾斜機能弾性体では、面外荷重を受ける弾性体上面に高い弾性係数を配すことにより、最大主応力 $\sigma_{\max}$ を低減することができるため、高い材料強度を得ることが可能となる。(図-5と図-6)

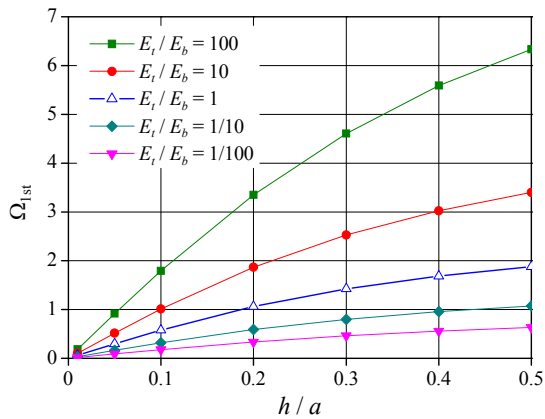
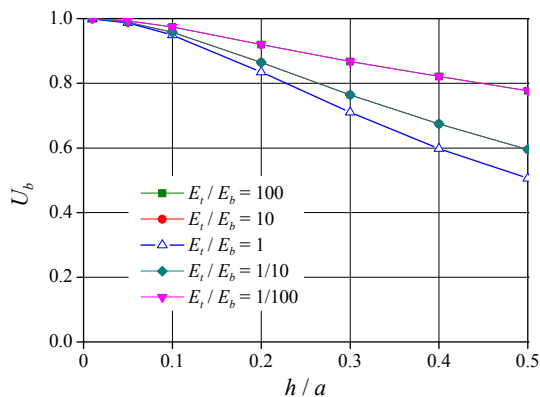
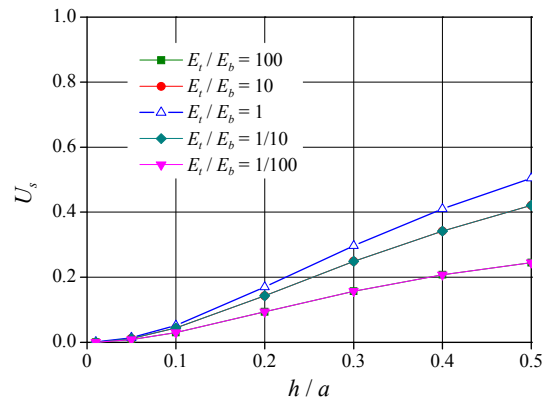


図-7 傾斜機能弾性体の基本曲げ振動に関する無次元化された固有円振動数

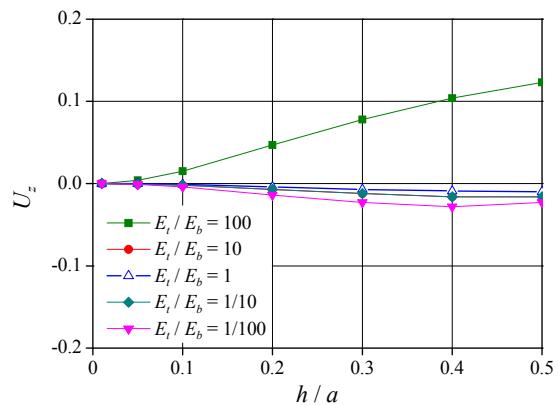
(4) 傾斜機能弾性体の基本曲げ振動では、弾性体上面に高い縦弾性係数を配すことで、均質弾性体よりも固有振動数を増大することができる。他方、弾性体下面に高い縦弾性係数を配すと、均質弾性体よりも固有振動数が低下する。(図-7)



(a) 曲げひずみエネルギー



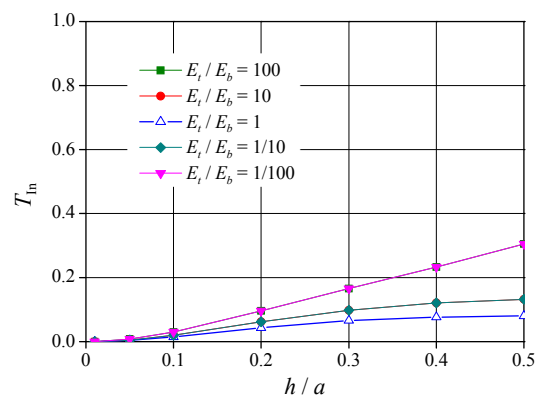
(b) 面外せん断ひずみエネルギー



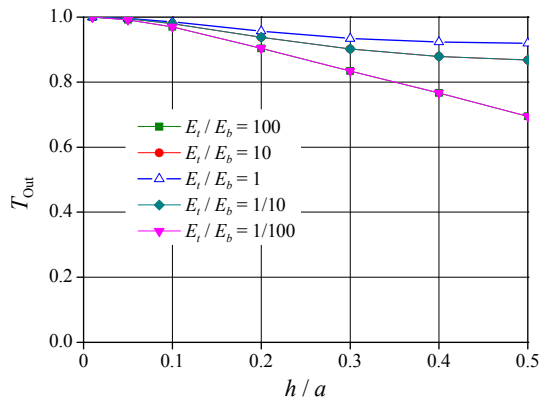
(c) 面外伸縮ひずみエネルギー

図-8 傾斜機能弾性体の基本曲げ振動に関する各ひずみエネルギー成分

(5) 傾斜機能弾性体は、均質弾性体よりも基本曲げ振動における面外せん断変形の影響を小さくすることができる。(図-8)



(d) 面内運動エネルギー



(e) 面外運動エネルギー

図-9 傾斜機能弾性体の基本曲げ振動に関する各運動エネルギー成分

(6) 傾斜機能弾性体は、均質弾性体よりも面内変位の影響が現れてくる。(図-9)

#### 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)

[学会発表] (計 3 件)

- (1) Kyohei Takeo, Harunobu Nagino, Masahiro Higuchi, Tadaharu Adachi: Three-dimensional stress analysis of functionally graded plates under transverse loads, The Proceedings of the 2nd Asian Conference on Mechanics of Functional Materials and Structures, pp.271-274, Nanjing China, October 2010.
- (2) 竹尾恭平, 名木野晴暢, 樋口理宏, 足立忠晴: 面外荷重を受ける周面単純支持された傾斜機能弾性体の解析解の導出. 土木学会西部支部, CD-ROM 論文集 I-078, pp.155-156, 崇城大学, 平成 22 年 3 月, 2010.
- (3) 鳥越枝奈, 竹尾恭平, 名木野晴暢, 樋口理宏, 足立忠晴: B-spline Ritz 法による面外荷重を受ける傾斜機能平板の 3 次元応力解析. 土木学会西部支部, CD-ROM 論文集 I-080, pp.159-160, 崇城大学, 平成 22 年 3 月, 2010.

#### 6. 研究組織

##### (1) 研究代表者

名木野 晴暢 (NAGINO HARUNOBU)

大分工業高等専門学校・都市システム工学科・助教

研究者番号: 10455181