様　式　Ｃ－１９、Ｆ－１９－１、Ｚ－１９　（共通）

科学研究費助成事業　　研究成果報告書

令和　元 年　 ６ 月　 ５ 日現在

機関番号：１２１０２
研究種目：基盤研究(C)（一般）
研究期間：2016～2018
課題番号：１６Ｋ０５９６６

研究課題名（和文）ＣＦＲＰ積層板における負のポアソン比の発現とその検証ならびに応用に関する研究

研究課題名（英文）Research on occurrence of negative Poisson's ratios of CFRP laminates and its verification and application

研究代表者
松田　哲也（Matsuda, Tetsuya）

筑波大学・システム情報系・准教授

研究者番号：９０３４５９２６

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費）　　3,600,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では，非弾性領域におけるCFRP（炭素繊維強化プラスチック）積層板の負のポアソン比を高精度3次元ディジタル計測により直接的に測定し，負のポアソン比の発現・増大が起こることを実証した．得られた実験結果を研究代表者らが開発した均質化解析手法による結果と比較し，手法の妥当性を示した．さらに，負のポアソン比を再現可能な非弾性マクロ構成モデルを作成し，それを汎用有限要素解析ソフトウェアへ組み込むことで，応用例を検討した．

研究成果の学術的意義や社会的意義
本研究成果は，CFRP積層板が負のポアソン比を呈するとともに，その絶対値が非弾性変形の進行とともに増大していくという特異な現象を示すことを世界で初めて実測したものであり，当該分野にインパクトを与える学術的意義の高い成果と言える．また本研究成果では，この特異な現象を，一般に用いられている汎用有限要素解析ソフトウェアにより簡便に解析できる手法を開発することにも成功しているから，その応用開発や複合材構造設計の高度化につながる社会的意義のある成果と言える．

研究成果の概要（英文）：In this study, we have succeeded in demonstrating occurrence and increase of negative Poisson’s ratios of CFRP laminates in inelastic regions, using a direct measurement technique based on high-accuracy 3-dimensional digital scanning. Comparing the measurement results with the computational results of the homogenization analysis method developed by us, we have confirmed the validity of our analysis method. Moreover, we have developed an inelastic macroscopic constitutive model which can reproduce the negative Poisson’s ratios, and implemented it in commercial finite element analysis software. Using it, we have considered applications of the negative Poisson’s ratios of CFRP laminates.

研究分野：材料力学，計算力学

キーワード：ポアソン比　CFRP　複合材料　非弾性　マルチスケール

様　式　C－１９、F－１９－１、Z－１９、CK－１９（共通）

１．研究開始当初の背景

(1) 材料の基本特性であるポアソン比は，縦ひずみと横ひずみの比であるから通常正の値をとるが，CFRP（炭素繊維強化プラスチック）積層板は，その積層構成によっては負のポアソン比を発現することが解析的に示されている．この特異な性質は“auxeticity”とも呼ばれ，力学的に非常に興味深いだけでなく，材料設計に新たな機軸を与え得るものとして世界的に注目されている．

(2) 上記発見は後続研究を促し，炭素繊維以外を用いた場合の解析も行われるなどしてきたが，これまでの研究には，次のような問題点があった．
・弾性問題の場合に限られており，樹脂母材の非弾性特性が全く考慮されていない．
・CFRP 積層板を構成する各ラミナをそれぞれ均質な一様体と考え，古典積層理論に基づき解析しているため，本来繊維と樹脂からなるラミナのミクロ構造を陽に考慮できておらず，負のポアソン比の微視的な発現メカニズムを明らかにできていない．
・現実に負のポアソン比が生じるかについて，実験的に明らかにされていない．
　以上のように，CFRP 積層板の負のポアソン比に関しては，未解明な部分が多く残されている．

２．研究の目的

(1) 非弾性領域における CFRP 積層板の負のポアソン比を高精度 3 次元ディジタル計測により直接的に測定し，負のポアソン比の発現・増大が起こることを世界で初めて実証する．

(2) 得られた実験結果を研究代表者らの開発手法による解析結果と比較し，手法の妥当性を検証する．

(3) 実験および解析結果に基づき，負のポアソン比を再現可能な非弾性マクロ構成モデルを作成し，それを汎用有限要素解析ソフトウェアへ組み込むとともに，その応用例を検討する．

(4) 以上から，複合材料のポアソン比に関する先駆的な成果を上げ，複合材料分野および固体力学分野にインパクトを与えるとともに，複合材構造の高精度設計に資する．

３．研究の方法

(1) 非弾性領域における CFRP 積層板の積層方向ポアソン比の測定手法を確立する．このため，アングルプライ CFRP 積層板の引張試験を実施しつつ，高精度 3 次元ディジタルスキャナにより試験片形状を取得することで板厚変化を計測し，それに基づき積層方向ポアソン比を算出する．

(2) 上記で確立した手法に基づき，様々な積層構成の CFRP 積層板の積層方向ポアソン比を計測するとともに，そのマルチスケール解析を研究代表者らの開発手法に基づき実施し，負のポアソン比の発現メカニズムについて検証する．

(3) 負のポアソン比を再現可能な非弾性マクロ構成モデルを構築し，汎用有限要素解析ソフトウェア LS-DYNA にユーザーサブルーチンを用いて導入するとともに，それを用いて負のポアソン比の応用例（引張負荷を受ける CFRP 継手等）についてモデリング・解析する．

４．研究成果

(1) ポアソン比の計測精度が十分となるよう，通常より厚い板厚 12mm の CFRP（炭素繊維/エポキシ）[±30] アングルプライ積層板を用意し，厚板試験片を切り出した．この際，エッジ効果の影響を避けるため，試験片幅を 40mm と幅広にし，長さも 250mm と長めにした．つづいて，高精度 3 次元ディジタル画像計測装置を導入するとともに，上記試験片の一定ひずみ速度による引張試験を室温にて実施し，引張負荷を受ける試験片の変形を 3 次元的に計測した（図 1）．計測結果から試験片の板厚変化を割り出し（図 2），それを用いて積層方向ポアソン比を算出した．

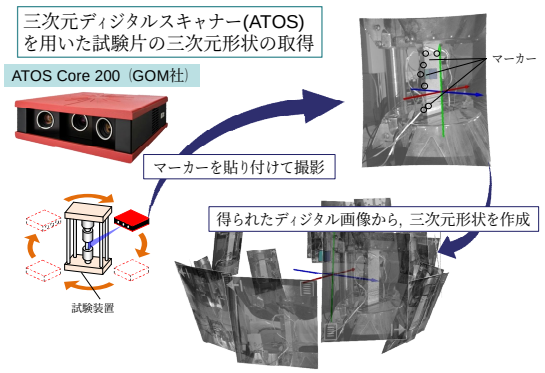

図１　3 次元ディジタル画像計測

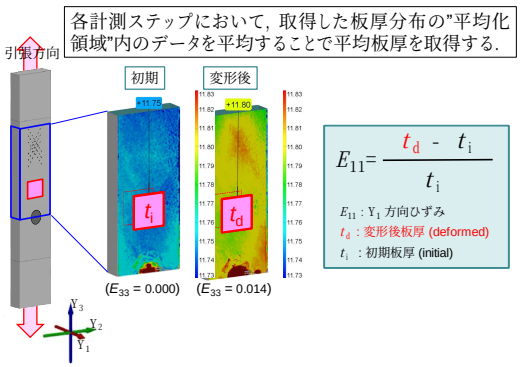

図２　積層方向ひずみの算出

その結果，[±30] アングルプライ CFRP 積層板の積層方向ポアソン比が負となること，およびその値（絶対値）が積層板の非弾性変形に伴い顕著に増大することを初めて実証した（図 3）.

(2) 上記で確立した計測手法に基づき，[±22.5]，[±45]，および[±60] アングルプライ CFRP 積層板の積層方向ポアソン比，ならびに積層板の変形に伴う積層方向ポアソン比の変化を計測した．その結果，[±22.5] においては，[±30] と同様に積層方向ポアソン比が負となること，および非弾性変形に伴う絶対値の増大がさらに顕著となることを示した（図 3）．これに対して，[±45] においては 0 付近の小さな値となり，[±60] においては 0.4 程度の正の値となること，およびそれらの値は積層板の非弾性変形が進行してもほとんど変化しないことを明らかにした（図 3）．これらの結果より，積層方向ポアソン比の顕著な積層構成依存性を実測することに成功した．

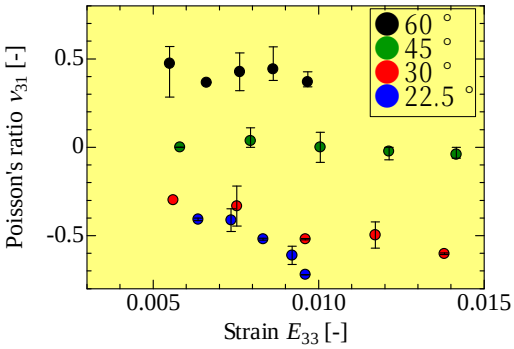

図 3　積層方向ポアソン比の計測結果

(3) つづいて，実験により測定した CFRP 積層板の積層方向ポアソン比およびその変化を，研究代表者が開発した均質化法に基づくマルチスケール解析手法に基づき解析した（図 4）．これにあたっては，試験片の断面観察結果および積層構成の情報に基づき積層板のミクロ構造をモデリングするとともに，引張試験より同定した炭素繊維およびエポキシの材料定数を使用した．得られた解析結果は，アングルプライ CFRP 積層板が負のポアソン比を発現し，それが積層板の非弾性変形の進行に伴い増大するという実験における観測結果を定量的に良く再現し，解析手法の妥当性が検証された（図 5）.

(4) 実測したアングルプライ CFRP 積層板の負のポアソン比を含むマクロ挙動を表現可能な非弾性マクロ構成モデルを構築するとともに，得られた構成モデルを汎用有限要素解析ソフトウェア LS-DYNA にユーザーサブルーチンを用いて組み込むことに成功した．さらに，上記ソフトウェアを用いて，ボルト止め CFRP 継手の変形解析を実施し，その有用性を検証した．

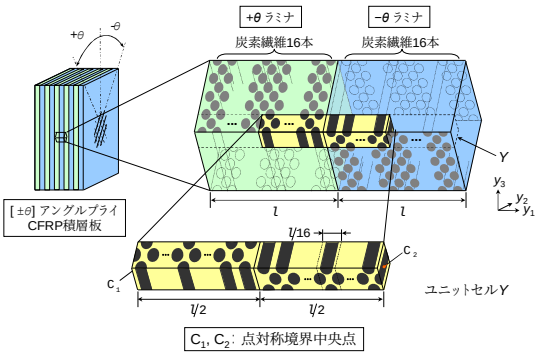

図 4　均質化法に基づくマルチスケール解析

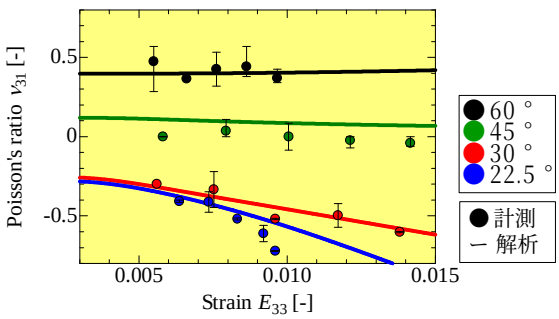

図 5　解析結果と計測結果の比較

5．主な発表論文等

〔雑誌論文〕（計　9　件）

① R. Oikawa, G. Kubo, T. Matsuda, K. Goto, N. Ohno, M. Arai, Measurement of Negative Poisson's Ratio of CFRP Laminates Using 3D Digital Scanning Method, Key Engineering Materials, Vol. 794 (2019), pp. 182-187, 査読有.

② H. Nagaoka, T. Matsuda, T. Ogaki, Development of a Decoupled Multiscale Analysis Method for Woven Composites, Key Engineering Materials, Vol. 794 (2019), pp. 89-96, 査読有.

③ K. Goto, M. Arai, T. Matsuda, G. Kubo, Elasto-Viscoplastic Analysis for Negative Through-the-Thickness Poisson's Ratio of Woven Laminate Composites Based on Homogenization Theory, International Journal of Mechanical Sciences, Vol. 146-147, (2018), pp. 455-461, 査読有.

④ G. Kubo, T. Matsuda, Y. Sato, A Novel Basic Cell Modeling Method for Elastic-Viscoplastic Homogenization Analysis of Plain-Woven Laminates with Nesting, International Journal of Mechanical Sciences, Vol. 146-147, (2018), pp. 497-506, 査読有.

〔学会発表〕（計　35　件）

① G. Kubo, T. Matsuda, A Basic Cell Modeling Method for Homogenization Analysis of Plain-Woven Composites with Nesting, 13th World Congress on Computational Mechanics and 2nd PanAmerican Congress on Computational Mechanics, (2018).

② 及川陸斗，松田哲也，後藤圭太，大野信忠，宮下進太郎，川崎雄介，久保凱，佐藤仁彦，荒井政大，ディジタルイメージを用いた手法に基づく CFRP 積層板の積層方向ポアソン比の計測，日本複合材料学会第 42 回複合材料シンポジウム，(2017).

③ 及川陸斗，松田哲也，後藤圭太，大野信忠，宮下進太郎，川崎雄介，久保凱，佐藤仁彦，荒井政大，ディジタルイメージを用いた手法による CFRP 積層板の負のポアソン比の測定，日本機械学会第 25 回茨城講演会，(2017).

④ T. Ogaki, T. Matsuda, Decoupled Multiscale Structural Analysis of Woven laminates Based on a Homogenized Elastic-Viscoplastic Macroscopic Constitutive Model, 3rd Joint Turkey-Japan Workshop on Polymeric Composite Materials, (2017).

⑤ 松田哲也，後藤圭太，大野信忠，宮下進太郎，川崎雄介，久保凱，佐藤仁彦，荒井政大，ディジタルイメージを用いた CFRP 積層板の負のポアソン比の測定，日本機械学会 M&M2016 材料力学カンファレンス，(2016).

〔図書〕（計　0　件）

〔産業財産権〕

○出願状況（計　0　件）

○取得状況（計　0　件）

〔その他〕

ホームページ等

http://www.kz.tsukuba.ac.jp/~matsuda/

６．研究組織

※科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。