

令和 4 年 5 月 19 日現在

機関番号：33302

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2019～2021

課題番号：19K04845

研究課題名(和文) サンドイッチパネルの面板と心材間の破壊じん性評価試験の理論解析法の確立

研究課題名(英文) Development of theoretical analysis method for debonding fracture toughness evaluation test between face sheet and core of sandwich panel

研究代表者

吉田 啓史郎 (Yoshida, Keishiro)

金沢工業大学・工学部・教授

研究者番号：50345089

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 1,800,000円

研究成果の概要(和文)：サンドイッチパネルの面板と心材間の耐はがれ強さ(破壊じん性)を実験的に評価する方法としてサンドイッチ SCB 試験が近年注目されている。しかし、荷重や変位等の実験で計測されるデータを用いて耐はがれ強さを求める方法(実験データ整理法)が確立しているとは言い難い。本研究では、実験データ整理法の検討に活用するため、サンドイッチSCB試験を対象とする簡易な理論解析法を新たに考案した。面板および心材の材料定数や寸法(板厚)、はく離き裂長さなどの解析パラメータを広い範囲で変化させても、理論解析による結果が詳細な数値解析による結果と良く一致し、本研究で提案する理論解析法の妥当性を確認した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

軽量化が要求される航空機の主要な構造部材としてサンドイッチパネルを適用する研究が進められている。サンドイッチパネルを実用に供する際、面板/心材間の耐はがれ強さを正確に評価する必要がある。この耐はがれ強さを実験的に評価する方法が提案されているが、実験で計測されたデータから耐はがれ強さを正確に求めるには、多大な労力を要する数値解析を実施する必要がある。本研究では、物理現象を高い精度で模擬できる簡易な理論解析法を新たに考案し、それに基づく簡便な実験データ整理法を提案した。本研究成果は、軽量構造部材としてのサンドイッチパネルの実用化促進に大いに貢献できると考えられる。

研究成果の概要(英文)：The sandwich single cantilever beam (SCB) test has attracted attention as the best candidate for evaluating the strength of debonding (debonding fracture toughness) between face sheet and core of the sandwich panel. However, the data reduction method, which calculates the strength of face/core debonding from the measured quantities such as applied loads and displacements, has not been established yet. In this study, a new simple theoretical analysis method for the sandwich SCB test was developed in order to utilize it for studying experimental data reduction methods. It was confirmed that the results of the proposed theoretical analysis method are in good agreement with the results of detailed numerical analysis even if the analysis parameters such as the material constants of the face sheet and core, dimensions (thickness) of the face sheet and core, and the crack length were changed over a wide range. The validity of the analysis method developed in this study was fully confirmed.

研究分野：航空宇宙構造力学

キーワード：サンドイッチ 面板 心材 耐はがれ強さ 破壊じん性 SCB試験 理論解析 データ整理法

## 1. 研究開始当初の背景

航空機のような軽量性が要求される構造物の主要構造部材にサンドイッチパネルを適用する研究が進められている。なかでも、部材内部への水分侵入を防ぐため、心材として硬質プラスチックの発泡材を用い、これを 2 枚の炭素繊維強化プラスチック面板で挟みこんだサンドイッチパネル(図 1)が注目されている(文献 )。サンドイッチパネルとは高強度、高剛性の薄い部材の間に比較的強度や剛性の小さい軽量材料をはさみこんだ(サンドイッチした)構造部材であり、軽量でありながら特に曲げ強度、曲げ剛性に優れる特長をもっている。しかし、その優れた特性は面板/心材間の接合の健全性に大きく依存するため、サンドイッチパネルを実用に供する際、面板/心材間の耐はがれ強さ(破壊じん性)を正確に評価しておく必要がある。サンドイッチパネルの面板/心材間の破壊じん性については、開口モードでの破壊じん性が小さくはがれやすいことが報告されており、開口モードでの破壊じん性を評価する試験法がいくつか提案されてきた。近年ではサンドイッチ Single Cantilever Beam (SCB) 試験(図 2)が標準試験法の有力な候補として注目されている(文献 )。しかし、この試験法でははがれ強さを正確に評価するには、計測された荷重や変位などの実験データを用いて数値解析(有限要素解析)を実施する必要があり、実験データの整理に多大な労力を要している。

ところで、炭素繊維強化プラスチックなどの複合材料積層板の層間の破壊じん性を評価する実験法は既に標準化されている(日本工業規格 JIS -K7086 や米国材料試験協会 ASTM -D5528 で規格化されている)が、その標準化には理論解析解の存在が大きな役割を果たしている。特に、試験片のコンプライアンスを積層板層間き裂長さの関数として表した理論解析解の存在が、実験データ整理法(実験で直接計測する荷重や変位などから層間破壊じん性値を算出する方法)の制定に大きな役割を果たしている。したがって、サンドイッチパネルの面板/心材間の破壊じん性評価試験を対象に、物理現象を高い精度で模擬できる理論解析法を考案できれば、それに基づき新たに簡便な実験データ整理法を確立できる可能性があり、実験データ整理手順の省力化に貢献できると考えられる。

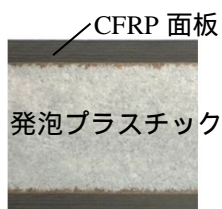


図 1 サンドイッチパネル

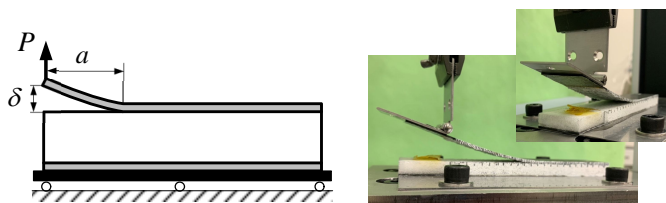


図 2 サンドイッチ SCB 試験

## 2. 研究の目的

サンドイッチパネルの面板/心材間の破壊じん性評価試験を対象とする理論解析法として、面板を材料力学で取り扱うはり(梁)、心材を弾性バネでモデル化した「弾性床上のはりモデル」(図 3)による解析法が提案されている(文献 )。しかし、これらの解析法では解析者がバネ特性を入力パラメータとして設定する必要があり、その設定法がいくつか提案されているがどれも根拠が不明確であり、面板や心材の材料特性や寸法(厚み)によっては試験片の挙動を精度良く模擬できない設定法となっている。

ところで土木工学分野では、土壌上に設置する橋脚の問題を「弾性床上のはり」の問題として捉え、その理論解析法として Vlasov 法(文献 )が提案されている。Vlasov 法の場合も、弾性床を弾性バネで置き換えた解析モデルと等価となるが、はりおよび弾性床の弾性特性(材料定数)および寸法とはりの負荷条件を与えれば、そのバネ特性は弾性論のエネルギー原理(変分原理)に基づき導出され、解析者が入力パラメータとして設定する必要が無い。なお、本研究の研究代表者らによる準備研究(文献 )によれば、この解析法をサンドイッチ破壊じん性評価試験の解析に適用できる可能性が十分ある。そこで本研究では、Vlasov 法をサンドイッチ破壊じん性評価試験の解析に適用した新たな理論解析法の確立を目指す。従来の理論解析法および有限要素解析による結果と比較し、その妥当性と有用性を確認する。また、理論解析により得られる解に基づき簡便な実験データの整理法を提案する。

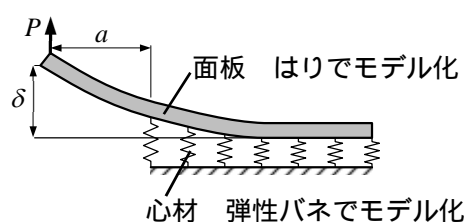


図 3 弾性床上のはりモデル

## 3. 研究の方法

本研究では、サンドイッチパネルの面板/心材間の開口モード破壊じん性を評価する試験法としてサンドイッチ SCB 試験(図 2)に注目し、その理論解析法の確立を目指して次のことを実施する。

- (1) 心材が等方性材料から成るサンドイッチ SCB 試験を対象に、面板をはり、心材を弾性床でモデル化した「弾性床上のはりモデル」に Vlasov 法を適用した新たな理論解析法を構築しその妥当性を確認する。

- (2) 機能傾斜材を心材に用いたサンドイッチパネルへの適用を想定して、心材の弾性率が板厚方向に変化する場合も取り扱うことができるように理論解析法を拡張する。
  - (3) 心材がハニカムパネルで構成されている場合を想定して、心材が直交異方性材料から成る場合も取り扱うことができるように理論解析法を拡張する。
  - (4) 理論解析解に基づき実験データの整理法を提案する
- 得られた研究成果を国内・国外の学会で研究発表を行い、また申請者が所属する大学のホームページ上で研究成果を公表し、そこでの議論を踏まえて研究成果を報告書や学术论文としてまとめ公表する。

#### 4. 研究成果

(1)

心材が均質等方性材料から成るサンドイッチ SCB 試験の理論解析法として、「弾性床上のはりモデル」に注目し、これに Vlasov 法を適用した新たな理論解析法を構築した(文献 )。現在航空機構造への適用が検討されている発泡プラスチックを心材に用いたサンドイッチパネルを想定し、はりモデル(Beam model)による理論解析を実施し、その妥当性を数値解析(有限要素解析, FEA)と比較して確認した。図4に非き裂部の上面板/心材界面のたわみの解析結果を示す。また、図5にき裂長さを変化させたときのエネルギー解放率(ただし単位荷重  $P = 1 \text{ N/mm}$  下のエネルギー解放率)の解析結果を示す。本研究で構築した理論解析(Beam model)の結果が数値解析(FEA)の結果と良く一致することが分かる。

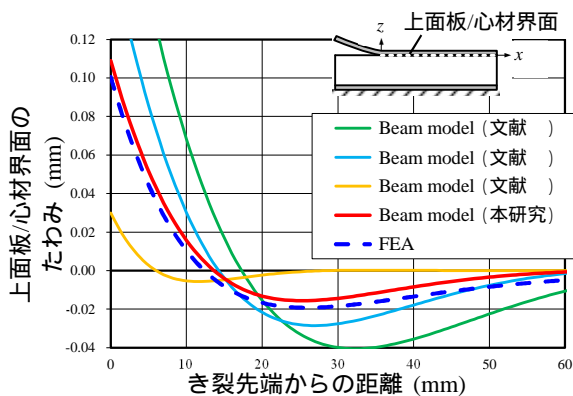


図4 き裂先端近傍の上面板/心材界面のたわみ

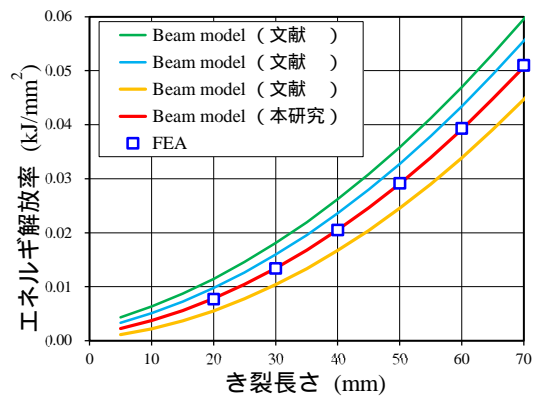


図5 エネルギー解放率 vs. き裂長さ

本研究で提案する理論解析では、上面板をはり、心材をはりを支える弾性床としてモデル化する。その際、心材の非き裂部(図6参照)を考慮に入れて解析するのが合理的な方法のように考えられる。しかし非き裂部を考慮に入れて解析すると数値解析による結果に比べて変形が小さい結果が得られてしまう。本研究の理論解析では心材の変形について図6の  $x$  軸方向の変位がゼロである( $u = 0$ である)仮定を用いており、その仮定に加えて心材の非き裂部も考慮に入れると過剰な拘束となることが原因と考えられた。そこで、非き裂部を考慮に入れない(無視した)解析を実施すると、図7に示すように数値解析による結果と非常に良く一致する結果が得られることが判明した。従って、本研究で構築した理論解析法を用いる場合、比較的簡易な解析方法でかつ精度の良い解を得る方法として、心材の非き裂部を無視することを提案した(文献 )。

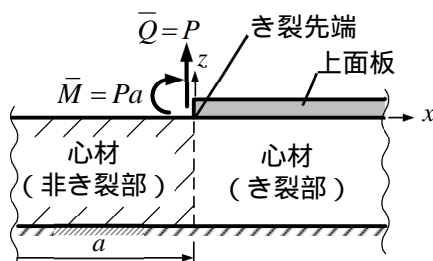


図6 弾性床上のはりモデル

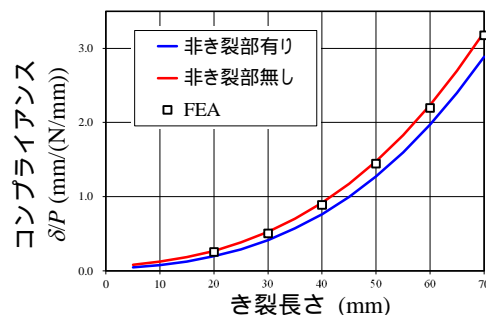


図7 コンプライアンス vs. き裂長さ

(2)

機能傾斜材を心材に用いたサンドイッチパネルへの適用を想定して、心材の弾性率が板厚方向に変化する場合も取り扱うことができるように理論解析法を拡張した(文献 )。特に心材の弾性率が板厚方向に指数関数(あるいは複数の指数関数の組合せ)に従い変化する場合に求解が容易となることを見出した。種々の不均質心材の場合について理論解析を実施し数値解析によ

る結果と比較して妥当性を確認した。一例として、図 8 に示すように心材の弾性率が 50 MPa - 500 MPa の範囲で中央面に対して対称に板厚方向に変化する 2 つの場合について、き裂長さを変化させた時のエネルギー解放率の解析結果を図 9 に示す。なお、図 9 には心材のヤング率が一様に  $E_c = 50$  MPa である場合と  $E_c = 500$  MPa である場合（均質心材の場合）の結果も併せて示している。不均質心材の場合も理論解析（Beam model）の結果が数値解析（FEA）の結果と良く一致することが分かる。なお、本研究で構築した理論解析法では、弾性床のバネ定数が弾性論の変分原理から自動的に定まるため、心材の弾性率が板厚方向に変化する場合にも解析者が入力パラメータとしてのバネ定数を選定する必要が無い。これも本研究で構築した理論解析法が従来の解析法と比べて優れている点である。

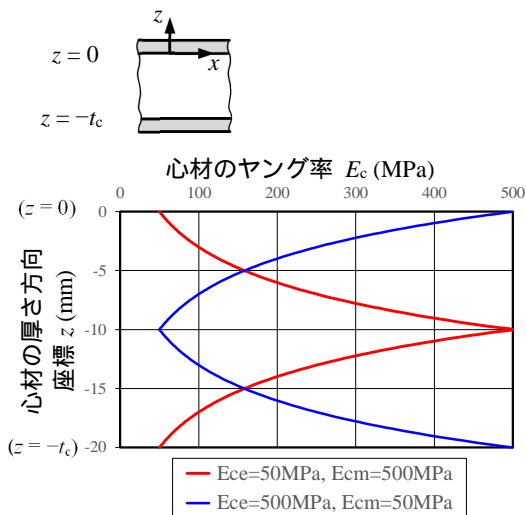


図 8 板厚方向に変化する心材のヤング率

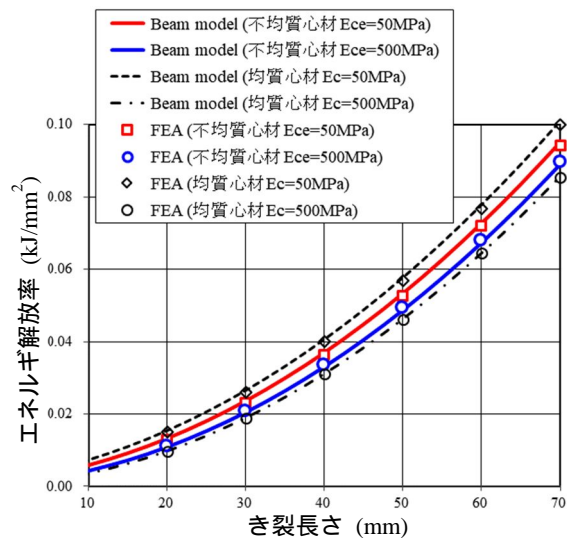


図 9 エネルギー解放率 vs. き裂長さ

( 3 )

心材が直交異方性材料から成る場合も取り扱うことができるように理論解析法を拡張した(文献)。そして心材が Nomex 八ニカム（直交異方性材料）から成る場合の解析を実施した。また心材が等方性材料（ただし Nomex 八ニカムの板厚方向ヤング率  $E_z$  とポアソン比  $\nu_{zx}$  を有する等方性材料）から成る場合の解析も実施し両者を比較した。図 10 に非き裂部の面板 / 心材界面のたわみの解析結果を示す。等方性心材と直交異方性心材ではき裂先端近傍のたわみに明瞭な違いが生じ、特にき裂近傍では理論解析（Beam model）の結果が数値解析（FEA）の結果と良く一致することが分かる。また、図 11 に、き裂長さを変化させたときのエネルギー解放率の解析結果を示す。この場合は等方性心材と直交異方性心材では極端に大きな差は無いが、それでも両者に 10% 程度の差が生じ、本研究で構築した理論解析法がその違いをとらえていることが分かる。上記解析例の他にも種々の検討を加え、心材が直交異方性材料から成る場合にも本研究で構築した理論解析法が適用できることを確認した(文献)。

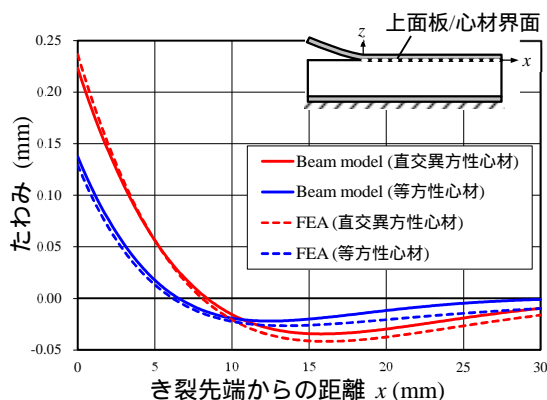


図 10 き裂先端近傍の面板/心材界面のたわみ

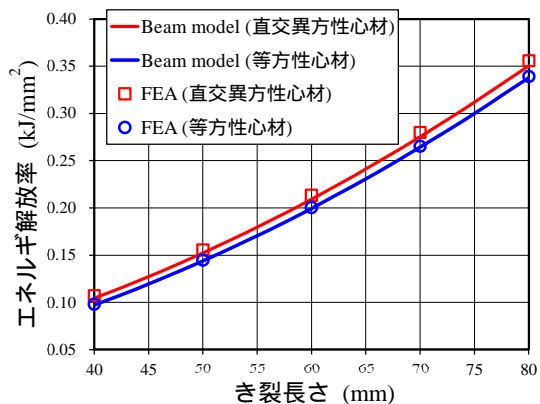


図 11 エネルギー解放率 vs. き裂長さ

( 4 )

発泡プラスチック（等方性材料）を心材に用いたサンドイッチ SCB 試験を対象とする理論解析に基づき次のような実験データ整理法を提案した。サンドイッチ SCB 試験での面板 / 心材間の耐はがれ強さ（破壊じん性）は、はく離き裂進展時の荷重  $P_c$  と、き裂長さ  $a$  の関数である

コンプライアンス  $C (= \delta/P)$  の微係数  $dC/da$  より求めることができる。  $P_c$  は比較的容易に計測できる。  $dC/da$  については次のように評価する。理論解析解に基づきコンプライアンス  $C$  は次式のように表される。

$$C = \frac{4}{E_f} \left( \frac{a}{t_f} + \frac{\Delta}{t_f} \right)^3 \quad \text{式(1)}$$

$$\frac{\Delta}{t_f} = \frac{\sqrt{3 \frac{F_c}{E_f} \frac{t_f}{t_c} f_w + \left( 3 \frac{G_c}{E_f} \frac{t_c}{t_f} f_\theta \right)}}{\sqrt{3 \frac{F_c}{E_f} \frac{t_f}{t_c} f_w + 2 \left( 3 \frac{G_c}{E_f} \frac{t_c}{t_f} f_\theta \right)}} \quad \text{式(2)}$$

ここで  $t_c, t_f$  は心材, 面板の厚さであり,  $E_f$  は面板のヤング率,  $G_c, E_c, \nu_c$  はそれぞれ心材のせん断弾性係数, ヤング率, ポアソン比であり,  $F_c$  は  $F_c = E_c/(1-\nu_c^2)$  で定義される量である。また,  $f_w, f_\theta$  は無次元量 (詳細割愛) である。そこで図 12 に示すように, 実験データとして得られたコンプライアンス  $C$  の立方根  $C^{1/3}$  を, 面板の厚さで無次元化したき裂長さ  $(a/t_f)$  に対してプロットし, プロット点が直線に乗ることを確認し, その直線の傾きと切片を求めれば, き裂長さ  $a$  の関数としてのコンプライアンス  $C$  が定まり,  $dC/da$  が評価可能となる。なお, 式(1), 式(2)より次の点に注意する必要がある。

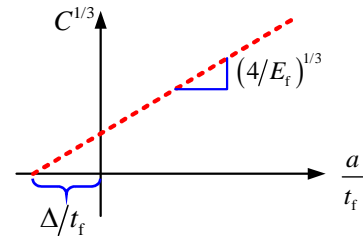


図 12 実験データ整理法

- 直線の「傾き」は  $(4/E_f)^{1/3}$  となり材料定数  $E_f$  のみに依る。
- 一方, 直線の  $(a/t_f)$  軸切片  $\Delta/t_f$  は, 材料定数の比  $F_c/E_f, G_c/E_f$  や厚みの比  $t_c/t_f$  に依存する。なお上記 b) に関して, 実用化が検討されているサンドイッチパネルの材料定数や板厚を用いて解析すると,  $\Delta/a = 1/3$  ( $\Delta$  がき裂長さの  $1/3$ ) 程度まで  $\Delta$  が大きくなる場合があることが分かった。

#### < 引用文献 >

- Y. Hirose, H. Fukagawa, K. Kosugi, M. Imuta, and H. Kikukawa, "Application of a New CFRP Sandwich Panel to the Aircraft Nose Structure", Proc. 10th US-Japan Conference on Composite Material, 2002, 969-977.
- J.G. Ratcliffe and J.R. Reeder, "Sizing a Single Cantilever Beam Specimen for Characterizing Facesheet-Core Debonding in Sandwich Structure", Journal of Composite Materials, Vol.45, No. 25, 2011, 2669-2684.
- X. Li and L.A. Carlsson, "Elastic Foundation Analysis of Tilted Sandwich Debond (TSD) Specimen", Journal of Sandwich Structures & Materials, Vol.2, No.1, 2000, 3-32.
- F. Avilés and L.A. Carlsson, "Analysis of the Sandwich DCB Specimen for Debond Characterization", Engineering Fracture Mechanics, Vol.75, No.2, 2008, 153-168.
- A. Quispitupa, C. Berggreen, and L.A. Carlsson, "On the Analysis of a Mixed Mode Bending Sandwich Specimen for Debond Fracture Characterization", Engineering Fracture Mechanics, Vol.76, No.4, 2009, 594-613.
- V.Z. Vlasov and U.N. Leont'ev, "Beams, Plates and Shells on Elastic Foundations", translated from the Russian by A. Barouch and T. Plez, Israel Program for Scientific Translation Ltd., Jerusalem, 1966.
- C.G. Vallabhan and Y.G. Das, "Modified Vlasov Model for Beams on Elastic Foundations", Journal of Geotechnical Engineering, Vol.117, No.6, 1991, 956-966.
- K. Yoshida and T. Aoki, "Beam on Elastic Foundation Analysis of Sandwich SCB Specimen for Debond Fracture Characterization", Composite Structures, Vol.195, 2018, 83-92.
- K. Takaryu and K. Yoshida, "On a Beam on Elastic Foundation Analysis Model for Sandwich SCB Test Specimen", Proc. 22nd International Conference on Composite Materials, No.5215-3, 2019.
- K. Yoshida, K. Takaryu, and Y. Hirose, "Effect of Including Cracked Core in a Beam on Elastic Foundation Analysis Model for Sandwich Single Cantilever Beam Test Specimen", Materials System, Vol.37, 2020, 9-14.
- K. Yoshida and T. Aoki, "Analysis of Sandwich Single Cantilever Beam Test Specimen with Graded Core", Advanced Composite Materials, Vol.31, No.1, 2022, 1-25.
- K. Yoshida, R. Oda, and Y. Hirose, "Beam on Elastic Foundation Analysis Model for Sandwich Single Cantilever Beam Test Specimen with Orthotropic Core", Materials System, Vol.39, 2022, 25-31.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計3件（うち査読付論文 3件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 2件）

1. 著者名 Keishiro YOSHIDA, Ryoga ODA and Yasuo HIROSE	4. 巻 39
2. 論文標題 Beam on Elastic Foundation Analysis Model for Sandwich Single Cantilever Beam Test Specimen with Orthotropic Core	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Materials System	6. 最初と最後の頁 25-31
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.34401/materialssystem.39.0_25	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

1. 著者名 Keishiro YOSHIDA and Takahira AOKI	4. 巻 31
2. 論文標題 Analysis of Sandwich Single Cantilever Beam Test Specimen with Graded Core	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Advanced Composite Materials	6. 最初と最後の頁 1-25
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1080/09243046.2021.1907037	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Keishiro Yoshida, Kazuya Takaryu, Yasuo Hirose	4. 巻 37
2. 論文標題 Effect of including cracked core in a beam on elastic foundation analysis model for sandwich single cantilever beam test specimen	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Materials System	6. 最初と最後の頁 9-14
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.34401/materialssystem.37.0_9	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

〔学会発表〕 計8件（うち招待講演 0件/うち国際学会 1件）

1. 発表者名 吉田啓史郎, 小田峻雅
2. 発表標題 幾何学的非線形性を考慮したサンドイッチSCB試験の解析
3. 学会等名 第13回日本複合材料会議（日本複合材料学会, 日本材料学会主催）
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 吉田啓史郎 小田峻雅
2. 発表標題 弾性床上的はりモデルによる直交異方性コアサンドイッチSCB試験の解析
3. 学会等名 第46回複合材料シンポジウム（日本複合材料学会主催）
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 吉田啓史郎, 高龍和也, 小田峻雅
2. 発表標題 弾性床上的はりモデルのサンドイッチSCB試験の解析への適用限界の検討
3. 学会等名 第63回構造強度に関する講演会（日本航空宇宙学会主催）
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 吉田啓史郎, 高龍和也
2. 発表標題 不均質コアを有するサンドイッチSCB試験片の解析
3. 学会等名 第62回構造強度に関する講演会（日本航空宇宙学会主催）
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 高龍和也, 吉田啓史郎
2. 発表標題 厚さ方向にコアの材料定数が変化するサンドイッチSCB試験片の解析
3. 学会等名 第58回飛行機シンポジウム（日本航空宇宙学会主催）
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Kazuya Takaryu, Keishiro Yoshida
2. 発表標題 On a beam on elastic foundation analysis model for sandwich SCB test specimen
3. 学会等名 22nd International Conference on Composite Materials (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 高龍和也, 吉田啓史郎
2. 発表標題 厚さ方向にコアの材料定数が変化するサンドイッチはりの破壊じん性試験の解析
3. 学会等名 日本機械学会北陸信越支部第57期講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 吉田啓史郎, 高龍和也
2. 発表標題 コアの弾性率が板厚方向に変化するサンドイッチSCB試験片の解析
3. 学会等名 第11回日本複合材料会議 (日本材料学会, 日本複合材料学会主催)
4. 発表年 2020年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

<p>吉田啓史郎研究室 / 研究室ガイド / KIT金沢工業大学  <a href="https://kitnet.jp/laboratories/lab00226/index.html?_ga=2.2742704.1433454770.1651805461-1500434221.1588312613">https://kitnet.jp/laboratories/lab00226/index.html?_ga=2.2742704.1433454770.1651805461-1500434221.1588312613</a></p>
---



6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
--	---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------