

科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 4 年 6 月 15 日現在

機関番号：82645

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2018～2021

課題番号：18K04570

研究課題名（和文）衝撃応答スペクトラムの事前予測および調整を可能とする衝撃試験法の開発

研究課題名（英文）Development of prediction and adjustment method of shock response spectrums for pyroshock tests of spacecraft equipments

研究代表者

柳瀬 恵一（Yanagase, Keiichi）

国立研究開発法人宇宙航空研究開発機構・研究開発部門・主任研究開発員

研究者番号：00770736

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,300,000円

研究成果の概要（和文）：宇宙機搭載機器の衝撃試験では試験レベル（衝撃応答スペクトラム）の予測と調整が困難であることから、機器設計や試験コストの低減のために改善が必要である。そこで、試験現場で簡易に用いることが可能な予測手法と、既存の試験機に安価で汎用的に採用できる試験レベルの調整手法の実現を目的として研究を行った。

提案した部分構造合成法を用いた予測手法は、一般的な試験公差と同等の範囲で精度良く事前に試験レベルを予測することが可能であることが示された。また、被試験体と試験機との間に「調整構造体」を挿入する調整手法についても、公差と同等の範囲で試験レベルを調整することが可能であることが示され、目標を達成した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究結果は、定常振動現象で用いられる部分構造合成法で過渡振動現象の予測が可能であるという結果となった。これは衝撃試験自体は定常振動的な環境の試験であると示す結果であり、学術的な新規性がある。また、簡易予測と調整を併せて提案し、現場適用がすぐに可能であるという本成果は工学的意義が高く、衝撃試験の期間短縮や試験品質の向上がただちに図られる。ひいては、宇宙機開発における耐衝撃設計コストの低減や開発品の信頼性向上に貢献すると考えられる。

研究成果の概要（英文）：Since it is difficult to predict and adjust the test level (shock response spectrum) in shock tests of spacecraft components, improvements are needed to reduce the cost and risk of spacecraft development. Therefore, we conducted research to establish a prediction method that can be used easily at the test site with high accuracy, and a test level adjustment method that can be adopted inexpensively and universally for existing testing machine. The proposed prediction method using the substructure synthesis method and the method of adjusting the test level by inserting a "adjustment structure" between the specimen and the testing machine were shown to be effective in the test tolerances commonly used in spacecraft components shock tests. This method improves the test quality of shock tests and contributes to the cost reduction and reliability improvement of spacecraft development.

研究分野：航空宇宙工学

キーワード：振動 衝撃 環境試験 衝撃応答スペクトラム 部分構造合成法

1. 研究開始当初の背景

ロケットの各部分離、宇宙機の太陽電池パドル、アンテナ等の展開では分離デバイス本体が発生する衝撃や、保持部構造体のひずみエネルギーが瞬時に解放されることによる大きな衝撃が発生する。そのため、宇宙機搭載機器は衝撃耐性をシステム組込前に確認する必要がある。搭載機器単体の衝撃試験は、試験コスト削減等ため機械的インパクト式試験法(図1)などの実環境を代替的な手法で模擬する方法が用いられるが、これらの手法では、衝撃源および衝撃を伝搬させる構造のいずれもが実際の宇宙機とは異なり、衝撃応答を試験条件に合わせることが困難である。そのため、現状はオーバーテストを甘んじて受け入れている状況(図2)であり、オーバーテストを見越した内蔵部品に対する過大な試験の実施や、経験的判断による事前検証のスキップ(上位アセンブリでの一発勝負)に繋がり、過剰設計や手戻りの温床となり、潜在的なコスト増を招いている。そこで、衝撃試験品質の向上によって宇宙機開発コストの削減と信頼性向上に資するべく、衝撃試験法の研究・開発に取り組むこととした。

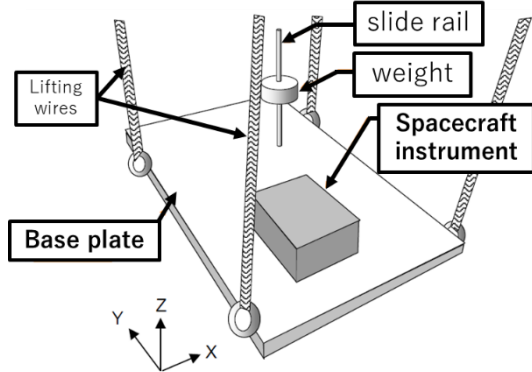


図1 機械的インパクト試験法の例

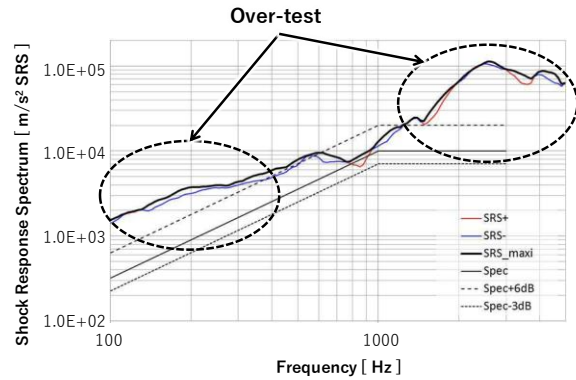


図2 オーバーテストの例

2. 研究の目的

現状広く用いられている試験法では、衝撃応答スペクトラム(SRS)の「予測」と「調整」のどちらもが不完全であり、宇宙機試験の中では比較的低コストで行われる「手間をかけたくない」試験である衝撃試験では、高コストな試験器を新規に導入することにはハードルがある。以上から、本研究では、既存の試験装置に安価で汎用的に適用可能な衝撃応答スペクトラムの調整手法と、試験現場で適用可能な簡易予測手法の検討を行うことを目的とした。

3. 研究の方法

- (1) 衝撃応答スペクトラムの調整コンセプトを提案した。この手法は、既存の衝撃試験機と被試験体の間に振動特性が変更可能な「調整構造」を挿入する方法である(図3)。既存の試験機に対して後付けで安価に導入が可能である。
- (2) 部分構造合成法のうち実験と解析結果とのどちらの結果も取り込むことが容易な伝達関数合成法を用いた衝撃応答スペクトラムの予測手法を検討し、計算手法を提案した(図4)。また、小型衛星のようにすでに構造数学モデルがある供試体に対する事前予測手法として、縮小インピーダンス法を改良した手法も提案した。
- (3) 手法の簡便さを向上させるため、合成計算時に用いる必要な成分を検討した。伝達関数合成法では並進3成分、回転3成分の6成分を合成することで正確な応答を見積もることが出来るが、実用上、各分系の6成分の応答を取得することは煩雑であり、実施困難な場合が多い。そこで、衝撃印可方向のみで十分な予測精度が得られるか検討した。

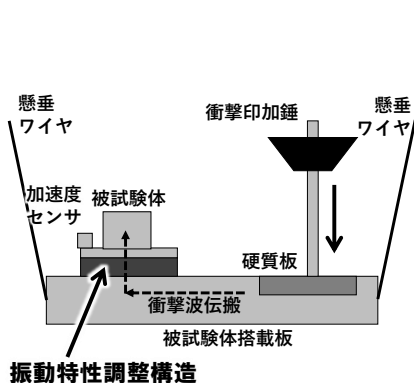


図3 試験レベル調整コンセプト

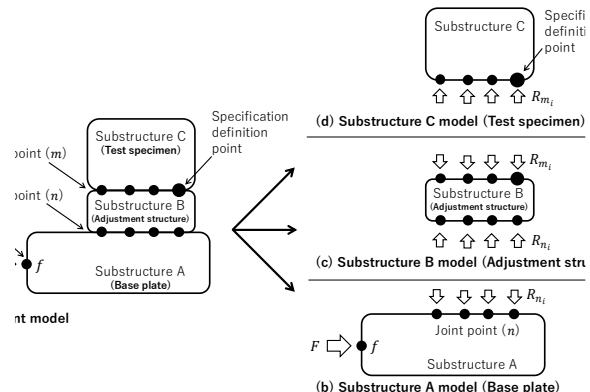


図4 事前予測計算モデル

- (4) 一般的な機械的インパクト式衝撃試験機に汎用的に搭載可能な調整機構を提案した。本調整機構は平板 2 枚でスペーサを挟む構造であり、スペーサの位置と材質によって振動特性を変化させることが出来る。スペーサの位置の組合せは非常に多くあるが、振動特性を大きく変化させるパターンはある程度絞られる (図 5)。
- (5) 宇宙航空研究開発機構 (JAXA) 筑波宇宙センターの落錘式衝撃試験機 (図 6) を用いて、実際の宇宙機コンポーネント構造モデルを対象に、開発試験時の衝撃試験条件を満足できる衝撃応答スペクトラムの予測と調整が可能であるか、数値解析モデルと実際の試験で有効性を検証した。

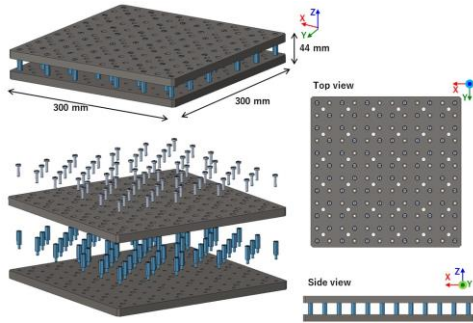


図 5 調整構造体

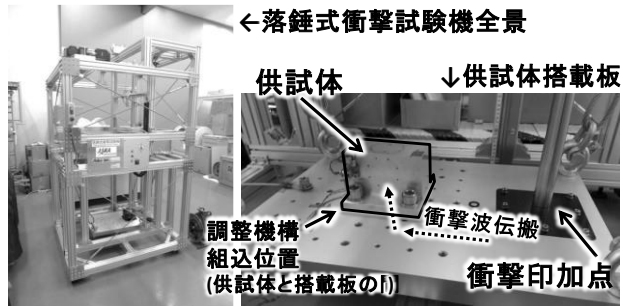


図 6 JAXA 落錘式衝撃試験機

4. 研究成果

- (1) 合成計算で使用する成分検討では、伝達関数合成法を用いて被試験体搭載時に試験機上で発生する SRS を事前に予測する場合に、実用上どのような成分について合成を行うべきか構造数値モデルを用いて検討した。平板のような曲げ振動が顕著なモデルでは並進成分のみの合成では予測精度の向上が困難な場合があることが分かった。一方、実際の衝撃試験機を想定したモデルにおいては、試験機搭載板は平板であり、そこに箱型コンポーネントを設置するというコンフィギュレーションであり、衝撃規定点近傍では並進成分が支配的となるため、衝撃を印加する並進方向のみでも十分な予測ができることが判明した。これは実際の衝撃試験でも同様と考えられる。試験で衝撃規定点の SRS を予測する場合、衝撃印加方向のみの伝達関数を取得し、合成することによって、利便性と精度を両立させた予測が可能であることが示された (図 7, 図 8)。

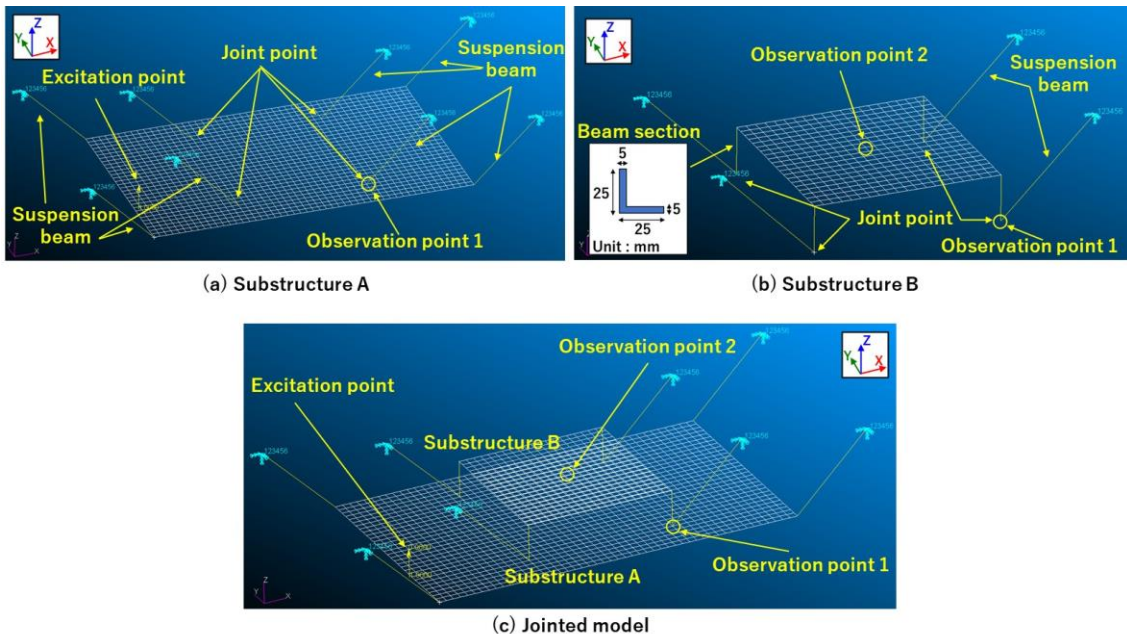


図 7 合成成分検討に用いたモデル(衝撃試験機想定)

衝撃試験機のベースプレートと試験供試体を想定した構造数学モデルを用いて成分検討を行った

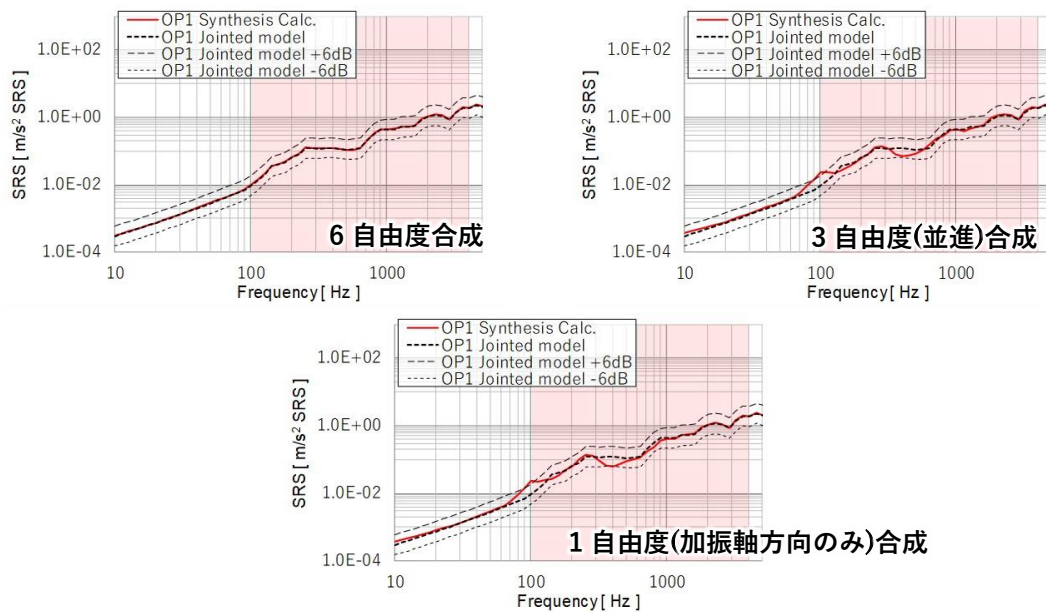


図8 JAXA 落錘式衝撃試験機

加振軸方向のみの成分で予測計算においても6自由合成の試験公差(±6dB)内となる

- (2) 伝達関数合成法による予測手法と提案する調整構造を用いて、JAXA 筑波宇宙センターの落錘式衝撃試験機において、実際の宇宙機コンポーネント構造モデルを対象に、開発試験時の衝撃試験条件を満足できる衝撃応答スペクトラムの予測と調整が可能であるか検証した。調整構造のスペーサパターンを適切に選び、衝撃印可力を調整することで、オーバーテストを回避する衝撃応答スペクトラムの調整が可能であり、また、事前に試験を行うことなく一般的な試験公差(NASAの衝撃試験規格が定める±6 dB)と同程度の精度で予測が可能なが示された(図9, 図10)。

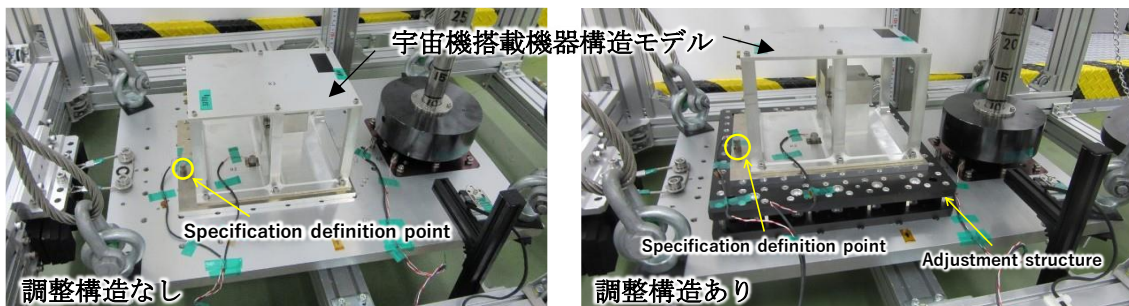


図9 衝撃試験機に調整構造適用した状況

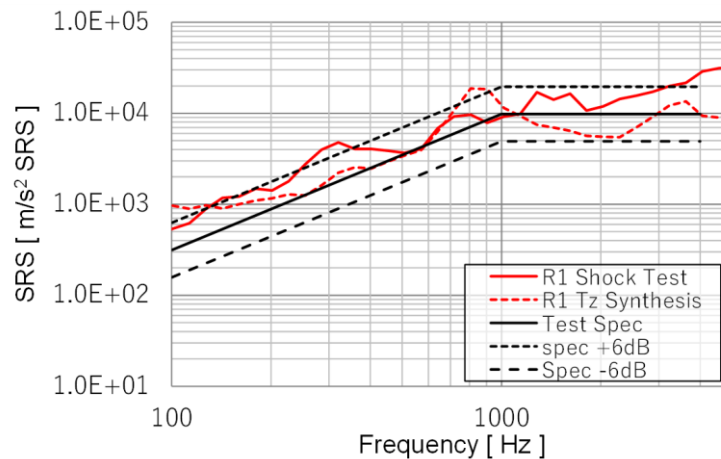


図10 調整後試験レベルの予測結果(赤破線)と実測値(赤実線)

試験公差(上下の黒破線)内に試験レベルが収まっており、かつ予測値と実測値が一致している

- (3) 縮小インピーダンス法を改良した簡易予測手法について、衝撃試験機を模擬した簡易モデルにおいて、構造数学モデルを用いた検証を行った。提案した近似計算法は各分系の支配的な振動成分を抽出し、抽出した振動成分のみを利用して衝撃応答スペクトルを求める方法である。提案した近似計算法の有用性を落錘式衝撃試験装置の簡易モデルを対象に検証した結果、提案する近似計算法は衝撃応答スペクトルを±6 dBの試験公差範囲内で予測することができ、従来の縮小インピーダンス法の計算負荷を低減させつつ衝撃応答スペクトルの概略を簡易的に予測するのに有用な方法であることを示した(図11)。

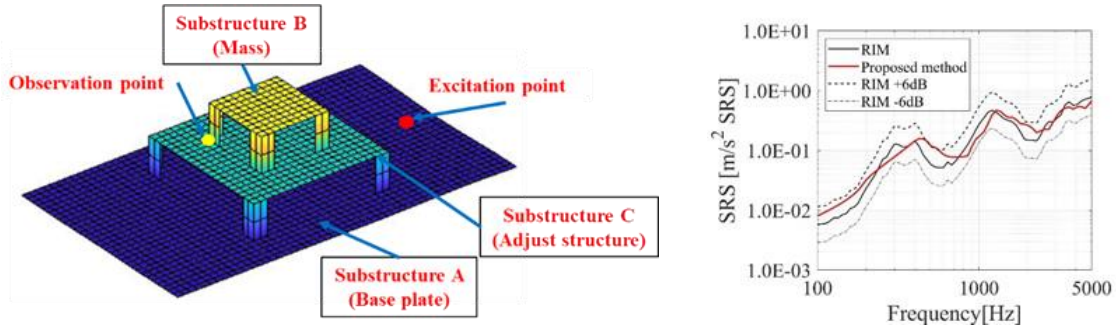


図11 縮小インピーダンス改良手法の検証に用いた構造数学モデル(左)と予測結果(右)の比較
 グラフ上下の黒破線(目標値±6dB 公差)内に予測結果(赤)が収まっており有効性が確認できた

以上の成果を実試験に適用する場合のフローを図12に示す。被試験体側(試験希望者)は、試験を行う前に、被試験体単体の伝達特性を試験実施者に提示することで、試験実施者は事前にレベル予測と調整が可能になる。そのため、従来のダミーマスをを用いた不確実性の高いレベル出し作業が軽減されると共に、試験時のオーバーテストが緩和され、試験の信頼性やスケジュールの不確実性が大きく改善される。

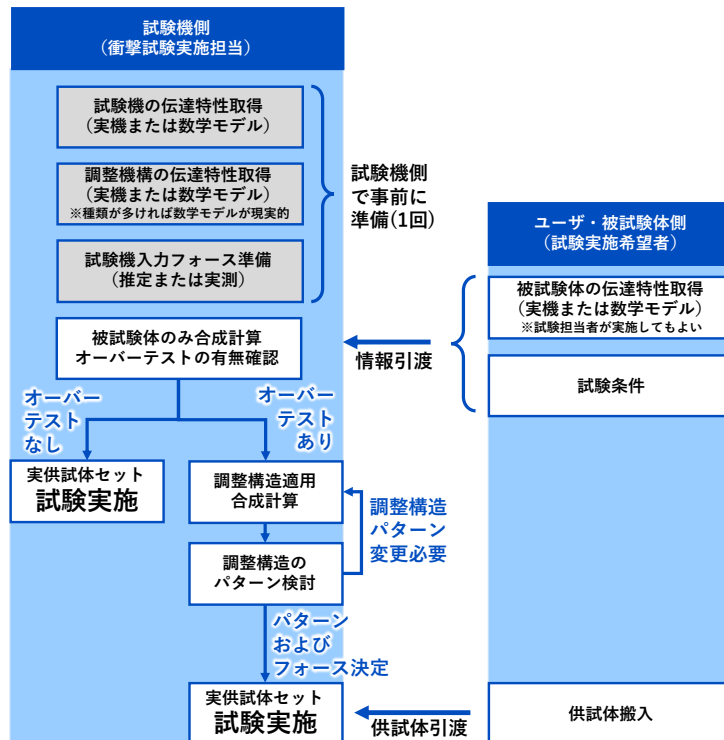


図12 本手法を実試験に適用する場合のフロー図

供試体を手元にない状態でもレベル確認ができるようになり、被試験体側のリスクが低減する

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計5件（うち査読付論文 4件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 YANAGASE Keiichi、FUKUDA Tatsuki、IWASA Takashi、OBATA Yoshihiro	4. 巻 18
2. 論文標題 Study on the Tuning Method of Shock Test Condition for Spacecraft Instruments	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 TRANSACTIONS OF THE JAPAN SOCIETY FOR AERONAUTICAL AND SPACE SCIENCES, AEROSPACE TECHNOLOGY JAPAN	6. 最初と最後の頁 77～83
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.2322/tastj.18.77	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 YANAGASE Keiichi、FUKUDA Tatsuki、IWASA Takashi	4. 巻 87
2. 論文標題 Method for selecting axes for prediction of shock response spectrum using transfer function synthesis	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Transactions of the JSME (in Japanese)	6. 最初と最後の頁 20-00341
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1299/transjsme.20-00341	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 YANAGASE Keiichi、FUKUDA Tatsuki、IWASA Takashi	4. 巻 87
2. 論文標題 Prediction and adjustment method for shock response spectrum in mechanical impact type shock test for spacecraft instrument	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Transactions of the JSME (in Japanese)	6. 最初と最後の頁 20-00354
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1299/transjsme.20-00354	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 FUKUDA Tatsuki、YANAGASE Keiichi、IWASA Takashi	4. 巻 87
2. 論文標題 Approximate computing of shock response spectrum using reduced impedance method	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Transactions of the JSME (in Japanese)	6. 最初と最後の頁 21-00036
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1299/transjsme.21-00036	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 柳瀬 恵一	4. 巻 1
2. 論文標題 衝撃応答スペクトラムの事前予測および調整を可能とする宇宙機搭載機器用衝撃試験法の開発	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 鳥取大学大学院工学研究科機械宇宙工学専攻博士学位論文	6. 最初と最後の頁 1
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
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10件 (うち招待講演 1件 / うち国際学会 3件)

1. 発表者名 Keiichi Yanagase, Tatsuki Fukuda, Takashi Iwasa and Yoshihiro Obata
2. 発表標題 Prediction and Adjustment Method of the Shock Response Spectrum for Spacecraft Instruments Shock Test
3. 学会等名 The 16th European Conference on Spacecraft Structures, Materials and Environmental Testing (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 柳瀬 恵一, 福田達輝, 岸本拓也, 岩佐貴史, 小畑良洋
2. 発表標題 宇宙機搭載機器の衝撃試験における衝撃応答スペクトラムの予測及び調整手法
3. 学会等名 日本航空宇宙学会, 第64回宇宙科学技術連合講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 福田達輝, 柳瀬 恵一, 岩佐貴史
2. 発表標題 縮小インピーダンス合成法の縮退計算を用いたSRS 簡易 推定法の提案
3. 学会等名 日本実験力学学会, 分科会合同ワークショップ2020
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 柳瀬 恵一
2. 発表標題 宇宙分野における衝撃試験とその技術課題
3. 学会等名 日本機械学会・第29回スペース・エンジニアリング・コンファレンス(招待講演)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 K. Yanagase, T. Fukuda, T. Iwasa, Y. Obata
2. 発表標題 Study on the Tuning Method of Shock Test Condition for Spacecraft Instruments
3. 学会等名 32nd International symposium on Space Technology and Science (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 柳瀬 恵一, 福田達輝, 岸本拓也, 岩佐貴史, 小畑良洋
2. 発表標題 衝撃試験における衝撃応答スペクトラム調整の試み
3. 学会等名 第9回 構造物の安全性・信頼性に関する国内シンポジウム
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 福田達輝, 柳瀬 恵一, 岩佐貴史
2. 発表標題 落錐式衝撃試験で生じるSRSの簡易推定に向けた質点モデルの検討
3. 学会等名 第63回 宇宙科学技術連合講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 柳瀬 恵一, 福田 達輝, 岸本 拓也, 岩佐 貴史, 小畑 良洋
2. 発表標題 宇宙機コンポーネント衝撃試験における衝撃応答スペクトラムの事前予測手法の検討
3. 学会等名 第28回スペース・エンジニアリング・コンファレンス
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Keiichi Yanagase, Tatsuki Fukuda, Takashi Iwasa, Yoshio Obata
2. 発表標題 STUDY OF PREDICTION AND ADJUSTMENT OF SHOCK RESPONSE SPECTRUM USING SUBSTRUCTURE SYNTHESIS APPROACH
3. 学会等名 32nd Aerospace Testing Seminar (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 柳瀬 恵一, 福田 達輝, 岩佐 貴史
2. 発表標題 伝達関数合成法による宇宙機搭載機器衝撃試験レベルの事前予測
3. 学会等名 日本機械学会 2021年度年次大会
4. 発表年 2021年

〔図書〕 計0件

〔出願〕 計1件

産業財産権の名称 衝撃試験装置および衝撃試験方法	発明者 柳瀬恵一, 岩佐貴史	権利者 同左
産業財産権の種類、番号 特許、特願2019-145676	出願年 2019年	国内・外国の別 国内

〔取得〕 計0件

〔その他〕

-

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
研究 分 担 者	岩佐 貴史 (Iwasa Takashi) (90450717)	鳥取大学・工学研究科・准教授 (15101)	

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