

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 5 月 18 日現在

機関番号：14301

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2013～2014

課題番号：25630233

研究課題名(和文) 構造縮約と入力縮約の両機能を兼備した変位と加速度の高精度予測縮約モデルの提案

研究課題名(英文) Reduced Model of Building Structures with High Prediction Accuracy of Displacement and Acceleration Having both Structural and Input Reduction Functions

研究代表者

竹脇 出 (TAKEWAKI, IZURU)

京都大学・工学(系)研究科(研究院)・教授

研究者番号：20155055

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,000,000円

研究成果の概要(和文)：従来の自由度縮約モデルには、多自由度系を1質点に縮約する方法や、モーダル解析の概念に基づく低次の少数モードの重ね合せなどがある。従来の方法では変位の予測精度は保証されるものの、加速度では高次モードの影響が大きいため、その高精度予測モデルは存在しない。

本研究では、構造縮約に加えて入力縮約の概念を新たに導入し、それらの両機能を兼備した変位と加速度の高精度予測縮約モデルを提案した。2011.3.11の東北地方太平洋沖地震における高層建物内での家具・機器類の挙動および居住者の安心感醸成のための加速度評価の必要性が急激に高まっており、本縮約モデルの開発により大幅な応答評価労力の軽減が可能となる。

研究成果の概要(英文)：An efficient time-history response analysis method is proposed which uses a reduced model and can evaluate the response (not only displacement but also acceleration) of an original model with high accuracy. The advantageous feature of this method is to transform the time-history force at each degree-of-freedom of the original model into a reduced one. This method consists of two steps. First, the structural model reduction is performed. Then, inertia forces in the reduced model under ground motion input are processed in the frequency domain to reduce the difference between the transfer function of the original model and that of the reduced model.

研究分野：工学・建築構造学

キーワード：構造解析 縮約モデル 非線形要素 振動数領域 入力縮約

1. 研究開始当初の背景

構造物の動的な挙動を記述する運動方程式は、「構造モデル」と「入力モデル」から構成されている。これまで、一般的な多自由度系の応答を簡易的に評価する際には、構造モデルの縮約が行われ、入力モデルの変換や縮約が行われることはなかった。唯一、モーダルアナリシスの一環として一般化外力が定義されることもあるが、これは変位や加速度の等価性を保証するものではない。また、1次モード振動成分についてのベースシヤアや転倒モーメントの等価性から等価質量や等価高さなどを定義する方法も常用されているが、これも変位や加速度の等価性を保証するものではない。

2. 研究の目的

- (1) 免震構造や制振構造では、免震装置や制振装置の特性の不確定性を考慮した応答（性能）評価が重要となる。特に、変位だけでなく加速度までも高精度に評価する必要がある。本提案手法は、このような特性のばらつき解析において大きな威力を発揮する。入力モデルの変換の際にテイラー展開（1次で十分）による高速評価法を採用し、大規模計算の効率化を図る。
- (2) 本提案手法は非線形ダンパーを含む解析にも有効であることを示す。非線形ダンパーを扱う際の入力モデルの変換では線形ダンパーを用いた変換でも極めて高い精度が保証されることを明らかにする。最終的には、線形モデルでの効率化と非線形モデルでの効率化を比較し、非線形モデルでは効率化と精度保持の両者の関係について明らかにする。

< 本研究の学術的な特色及び予想される結果と意義 >

これまで「構造モデル」の縮約に限定されていた縮約操作を、変位だけでなく加速度の精度保証に言及して「入力モデル」の変換・縮約にまで拡張する点が学術上の大きな特色である。このような考え方は日本の国内外で存在せず、世界的な視野で見ても極めて独創性の高いものである。

構造パラメータや入力地震動特性などの不確定性解析を行う際には、それらの多数の組合せに対する時刻歴応答解析等を実施する必要がある。本研究で提案する手法では、ばらつき特性の中央値を採用したノミナルモデルに対して一度「入力モデル」の変換・縮約を行なっておけば、その他のばらつき特性の多数の組合せに対する「入力モデル」の変換・縮約がテイラー展開（1次で十分）により高速で評価可能となるという特徴がある。これは、ばらつき特性の多数の組合せモデルに対する計算負荷を劇的に減少させることを可能とする。また、上記のように、非線形ダンパーを扱う際の入力モデルの変換では対応する線形ダンパーを用いた変換で

も極めて高い精度が保証されることを数値的・理論的に明らかにする。

< 斬新なアイデアおよびチャレンジ性 >

構造物の動的な挙動を記述する運動方程式は、「構造モデル」と「入力モデル」から構成されている（図1）。これまで、一般的な多自由度系の応答を簡易的に評価する際には、構造モデルの縮約が行われ、入力モデルの変換や縮約が行われることはなかった。

これに対して本研究では、構造縮約に加えて入力縮約の概念を新たに導入することにより、設定した応答（例えば代表的な点での変位や加速度）の等価性条件より入力縮約を行う方法を提案する。このような入力縮約の概念はこれまでに、本研究代表者らによる変位等価性に基づく方法しか提案されておらず（日本建築学会構造系論文集 2010, 2011 および国際専門誌論文 2011）、今回の加速度の等価性までも考慮したものは世界的に皆無である。

本研究では、多自由度モデルの時刻歴応答解析の計算負荷の低減と、変位だけでなく加速度まで含めた応答の高精度予測のために、少自由度モデルへの「構造モデル縮約」と「入力地震動効果の変換」を組み合わせた新しい地震時応答評価法の提案を行う。すなわち、簡易化と（変位・加速度の）精度保持の両方を同時に解決するには、「構造モデル縮約」と「荷重変換」（振動数領域）の両方が必要であることを明らかにしている点が斬新なアイデア・チャレンジ性を含んでいる。図2に提案手法による変換荷重と既往および無調整荷重との比較を示す。

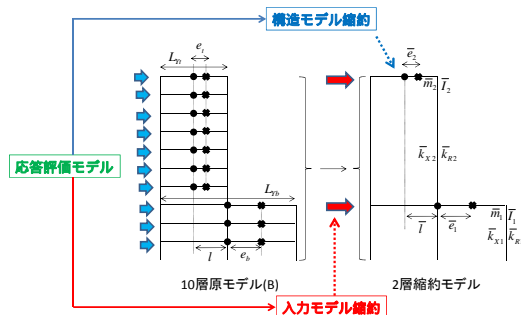


図1 構造モデル縮約と入力モデル縮約

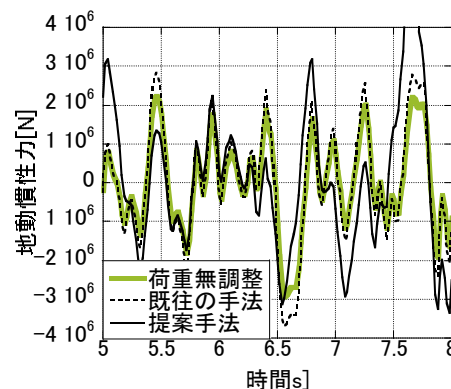


図2 変換荷重

<卓越した成果>

加速度応答では高次モードの影響が大きいため、1質点などの少数節点による縮約モデルや低次モードの重ね合せなどにおいて、その高精度予測モデルおよびそれを用いた方法は存在しない。本研究では、1質点などの少数節点縮約モデルに対して振動数領域での定式化を導入し、変位・速度・加速度の等価性条件に基づき入力モデルの変換や縮約を振動数領域で行う。このため、加速度や速度が極めて高精度で予測可能となる。振動数領域での定式化のため、(1)計算負荷の問題、(2)非線形モデルへの適用の問題等が存在するが、それぞれ、(1)変動パラメータに対するテイラー展開(1次で十分)による入力変換での大幅な計算効率化、(2)線形モデルを用いた入力モデルの変換と時間領域での非線形解析を結合した斬新な解析法の提案により解決している。

3. 研究の方法

- (1)少数節点縮約モデルに対して振動数領域での定式化を導入し、変位・速度・加速度の等価性条件に基づき入力モデルの変換や縮約を振動数領域で行う。振動数領域での定式化のため、(1)多くの変動パラメータに対する計算負荷の問題、(2)非線形モデルへの適用の問題等が存在するが、それぞれ、(1)変動パラメータに対するテイラー展開(図3参照)による入力変換での大幅な計算効率化と、(2)線形モデルを用いた入力モデルの変換と時間領域での非線形解析を結合した斬新な解析法の構築によりこれらの困難点を克服する。
- (2)非線形モデルに対しても本手法が高精度の性能を有する理論的根拠を解明する。さらに、非線形要素を含む原モデルに対する時刻歴応答解析結果との比較により、本提案手法が計算効率化と精度保持の両者の要求をバランスよく満足することを明らかにする。
- (3)免震構造や制振構造では、免震装置や制振装置の特性の不確定性(ばらつき)を考慮した応答(性能)評価が重要となる。特に、変位だけでなく加速度までも高精度に評価する必要がある。本提案手法は、このような特性ばらつき解析において大きな威力を発揮する。
- (4)図4(a)に示すように、変動パラメータに対して評価関数が単調に変動するような場合を区間解析の分野では Inclusion monotonic と呼ぶ。それに対して図4(b)のように、変動パラメータに対して評価関数が非単調になる場合を Inclusion non-monotonic と呼ぶ。後者に対して本研究代表者らが国際専門誌 Engineering Structures (2011)において開発した Fixed Reference-Point 法 (FRP 法:評価点を固定)や Updated Reference-Point 法 (URP 法:評価点を応答評価とともに更新)をさらに発展させ、提

案する縮約モデルに対して適用可能な方法とする。図5には、骨組剛性、支持部材剛性、ダンパー減衰係数の変動を考慮した種々の手法による区間解析結果の一例を示す。

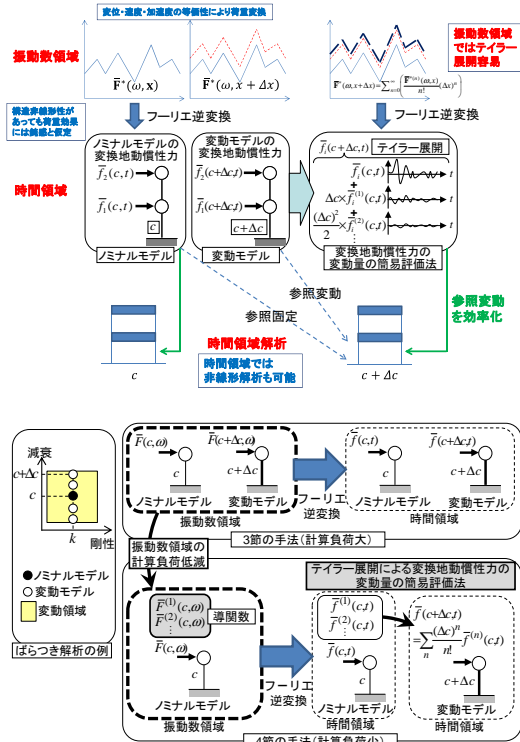
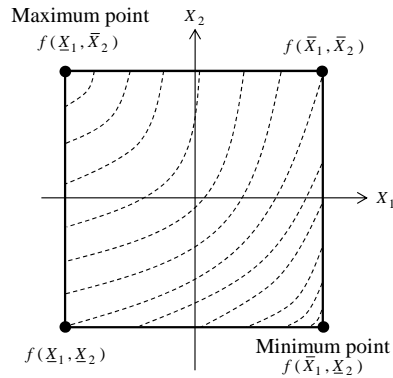
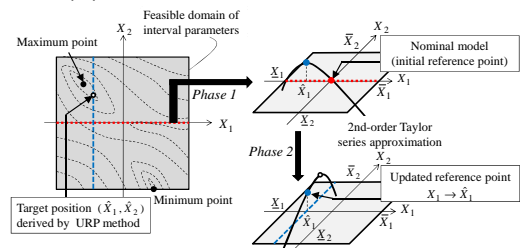


図3 構造パラメータ変動モデルや非線形要素を含むモデルに対する提案手法の概念図



(a) 単調な目的関数(端点が解)



(b) 非単調目的関数に対するURP法(端点以外も解)

図4 目的関数の上下限値を与える不確定パラメータの組み合わせ

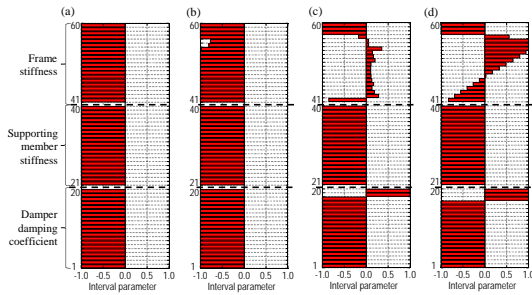


図5 骨組剛性、支持部材剛性、ダンパー減衰係数の変動を考慮した種々の手法による区間解析結果: (a) 既往 (Chen et al. 2002), (b) 上記 FRP method, (c) 上記 URP method, (d) 基準解 (逐次2次計画)

(5) 本提案手法は解析的な意味において非線形モデルには直接適用できない。そこで、応答曲面法を有効に用いてURP法における感度を効率的かつ高信頼度のもとに評価する方法を展開する。

< 提案手法の適用例 >

図6の線形オイルダンパーを各層に設置した20層3スパン骨組を20層せん断モデルに縮約する。Ai分布に基づく水平力載荷時の層の荷重変形関係より20層せん断モデルへ縮約する。

図7, 10は、「参照モデル」と「解析モデル」が対応したノミナルモデルの結果である。荷重調整がなくても変位の精度は高いが、加速度は荷重の調整により精度が向上し、提案手法の0次近似のみで原モデルと縮約モデルの時刻歴応答及び最大応答がほぼ一致することが分かる。

図8, 9, 11は変動モデルの結果である。変位も加速度も荷重調整を行わないと精度が低いことが分かる。図8, 11より減衰が大きい場合は、提案手法で1次項まで考慮すれば原モデルと縮約モデルの時刻歴応答及び最大応答がほぼ一致することが分かる。一方、図9より減衰が小さい場合は、10次まで考慮すれば原モデルと縮約モデルの応答がほぼ一致することがわかる。

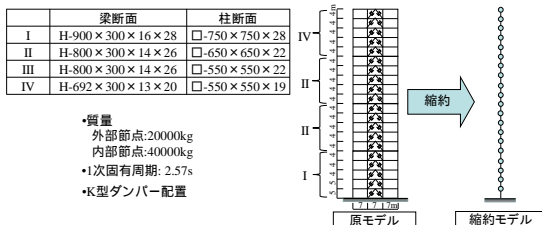


図6 線形オイルダンパー付き20層3スパン骨組とその20層せん断モデルへの縮約

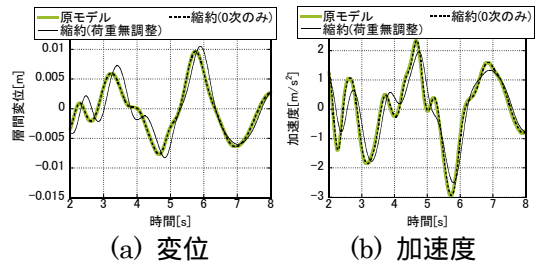


図7 頂部時刻歴応答 (ノミナルモデル, 付加減衰定数7.8%, El Centro)

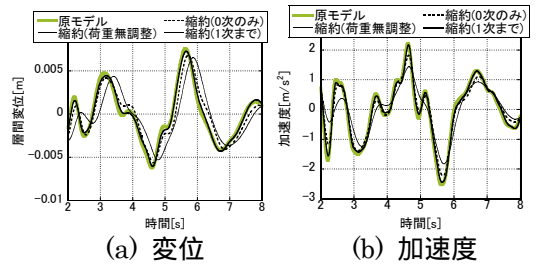


図8 頂部時刻歴応答 (変動モデル, 付加減衰定数15.6%, El Centro)

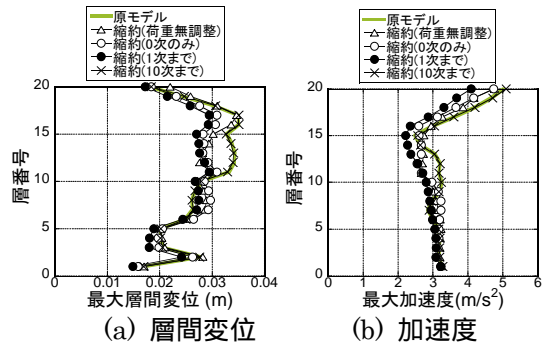


図9 最大応答 (変動モデル, ダンパーなし, El Centro)

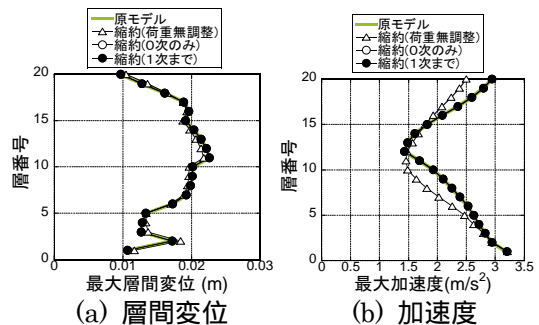


図10 最大応答 (ノミナルモデル, 付加減衰定数7.8%, El Centro)

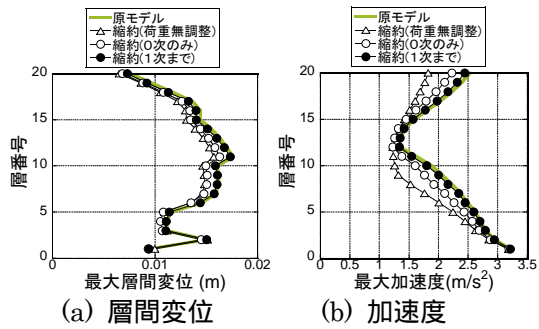


図 11 最大応答 (変動モデル, 付加減衰定数 15.6%, El Centro)

非線形応答を示す構造物モデルとして、大質量比 TMD を有する高層免震建物を模擬した実験モデルを振動台上に設置し、提案手法の精度検証を行った。図 12 に実験モデルの模式図を、図 13 にその写真を示す。図 14 は振動台の振動数に対する免震層変位・加速度・TMD ストロークの応答倍率に関するシミュレーションと実験結果の比較を示す。本システムでは、TMD マスの移動に関して転がり支承を使用し、また免震層の水平移動にも転がり支承を使用している。この転がり支承の摩擦などによる非線形性が全体挙動に少なからぬ影響を及ぼすと考えられる。図 14 から、免震層変位・加速度・TMD ストロークともに、シミュレーション結果は実験結果を概ね良好な精度でシミュレートできていると判断される。

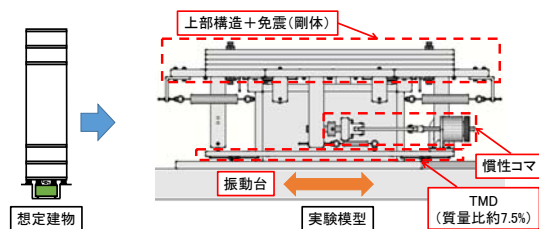


図 12 大質量比 TMD を有する高層免震建物を模擬した振動台実験用モデル



図 13 大質量比 TMD を有する高層免震建物を模擬した振動台実験用モデル (写真)

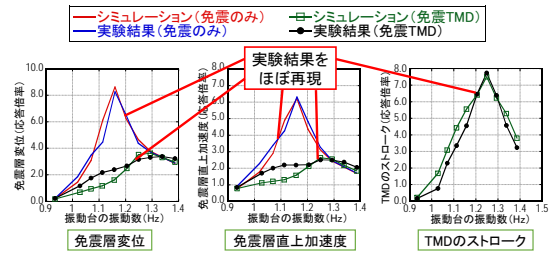


図 14 振動台の振動数に対する免震層変位・加速度・TMD ストロークの応答倍率 (シミュレーションと実験結果の比較)

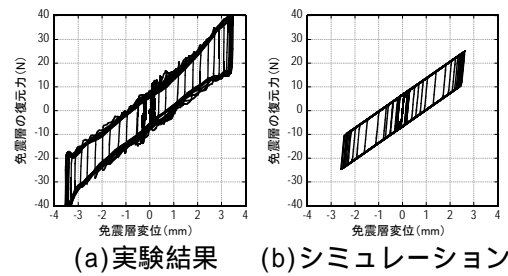


図 15 振動台最大変位 25mm の 7.5% の振動台変位振幅 (1.875mm) でのスイープ加振実験結果 (免震単独) とシミュレーション (0-50s)

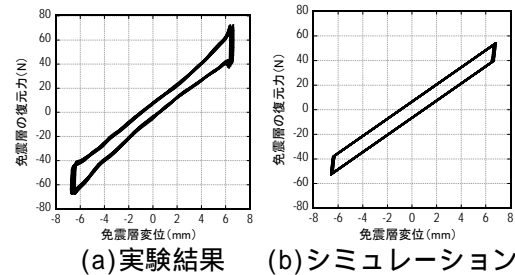


図 16 振動台最大変位 25mm の 7.5% の振動台変位振幅 (1.875mm) でのスイープ加振実験結果 (免震単独) とシミュレーション (600-620s)

図 15, 16 は、免震単独システムにおける、振動台最大変位 25mm の 7.5% の振動台変位振幅 (1.875mm) での 0~50s および 600-620s におけるスイープ加振実験結果とシミュレーションの比較を表す。ループの縦軸の差が摩擦力を表している。時間により転がり支承の摩擦などの影響の差があることなどに起因して若干の差が見られるものの、シミュレーション結果は実験結果をほぼ再現できていると判断される。

このシミュレーション結果に対して提案縮約法を適用し、その精度・妥当性を検討することは今後の検討課題である。

4. 研究成果

多自由度原モデルの時刻歴応答解析における計算負荷の低減のために少自由度の縮約モデルを用い、さらに精度向上のために縮約モデルに作用させる時刻歴外力を調整する手法を提案した。具体的な研究成果は以下の通りである。

- (1)地震動入力時の運動方程式右辺の地動加速度による慣性力を各自由度に作用する外力とみなし、「地動慣性力」と呼ぶ。原モデルと縮約モデルの応答の等価性条件を満足するように、縮約モデルに作用させる地動慣性力を変換し、得られた「変換地動慣性力」を時刻歴外力として縮約モデルに作用させ時刻歴応答解析を行う方法を展開した。
- (2)提案手法は振動数領域における変位応答の等価性条件に基づき振動数領域の変換地動慣性力を生成し、その逆フーリエ変換により時間領域の変換地動慣性力を生成する。この操作は原モデルと縮約モデルの伝達特性の差を地動慣性力に反映させることに相当する。振動数領域の定式化により、変換地動慣性力を用いれば、原モデルにおいて縮約モデルと対応する自由度の変位、速度、加速度の等価性が理論的に保証されることを示した。提案した手法は、せん断モデルだけでなく骨組モデルなどの任意のモデルや、任意の自由度縮約法に対して適用可能な汎用的な手法である。
- (3)本手法をダンパー最適配置法における感度計算の繰り返しや、免制振装置の物理特性の変動を考慮したばらつき解析に利用する場合を想定し、構造モデルの剛性や減衰の変動による変換地動慣性力の変動を、テイラー展開を用いて少ない計算負荷で求める手法を提案した。数値例題を通じて本手法の妥当性を示した。
- (4)本提案手法は振動数領域の応答の等価性を用いるため、理論的に応答の等価性が保証されるのは線形モデルに対してのみである。しかしながら、本提案手法は時刻歴荷重を生成するため、非線形ダンパーの最適配置などの多数回の時刻歴応答解析を伴う問題においても近似的に利用することができる。非線形のリリース機構付きオイルダンパーを設置したモデルに対して本手法を適用し、縮約モデルを用いて原モデルの対応自由度の時刻歴応答を精度良く評価できることを数値例題を通じて明らかにした。
- (5)非線形応答を示す構造物モデル（大質量比 TMD を有する高層免震建物）を振動台上に設置し、提案手法の精度検証を行った。
- (6)上記のような非線形特性が存在する場合に対する提案手法の精度については今後の検討課題といえる。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計1件)

吉富信太, 辻 聖晃, 竹脇 出, 伝達特性の差の補償機能を有する自由度縮約モデルを用いた時刻歴応答評価法, 日本建築学会構造系論文集, 2014年8月, 第79巻, 第702号, pp1117-1126. (査読有)

[投稿中]

T.Hashimoto, K.Fujita, M.Tsuji and I.Takewaki, Innovative base-isolated building with large mass-ratio TMD at basement, *International Journal of Future Cities and Environment*, Springer (査読有).

6. 研究組織

(1)研究代表者

竹脇 出 (TAKEWAKI IZURU)

京都大学・大学院工学研究科・教授

研究者番号: 20155055

(2)研究分担者

藤田 皓平 (FUJITA KOHEI)

京都大学・大学院工学研究科・助教

研究者番号: 40648713