

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 6 月 13 日現在

機関番号：24403

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2013～2016

課題番号：25420194

研究課題名（和文）大規模機器配管系の確率論に基づく耐震設計技術の構築に関する研究

研究課題名（英文）Study on seismic design method of large-scale machines and pipings based on the probabilistic theory

研究代表者

新谷 篤彦（SHINTANI, Atsuhiko）

大阪府立大学・工学（系）研究科（研究院）・准教授

研究者番号：90295725

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,500,000円

研究成果の概要（和文）：大規模機器配管系が地震を受けるときのモデル化及び地震応答解析を行い，巨大地震動に対する確率的な耐震設計法についての基礎的な検討を行った．まず複数の地震波を受けるときの応答，ガタ支持の時の応答について調べた．さらに，応答計算の精度を落とさない，構造物の低次元化についても検討した．地震時のリスク評価指標を提案し，被害を減らすための支持方法について検討した

研究成果の概要（英文）：Modeling and seismic response analysis of large-scale machines and pipings subjected to seismic input was performed. The seismic design method of machines and pipings for the huge earthquake input is investigated on the basis of probability theory. First, response of pipings subjected to several seismic inputs and response of pipings supported by gap support were calculated. Furthermore, the reduced order model with high accuracy of response was also introduced. The evaluation index for the risk assessment are proposed and the supporting methods to reduce the seismic damage were investigated.

研究分野：機械力学・制御

キーワード：機械力学・制御 耐震 確率論 減災 地震

1. 研究開始当初の背景

日本では近年、阪神大震災や東日本大震災のような大きな地震が発生している。特に、化学プラントや原子力発電所のような重要な大規模な施設がそのような地震を受けると大きな被害が予想される。これまでは、確定論に基づき既存の地震データを用いた場合の応答を計算し、応答が許容範囲以内かどうかを確かめることで設計がなされてきた。しかし、このような確定論に基づいた設計ではこれから起こりうる未知の巨大地震に対応するのは難しい。また、必要以上に頑強な構造物を作るのはコストがかかりすぎて現実的ではない。近年、原子力発電所等の設計においては今後発生しうる未知の巨大地震動に対して確率的な耐震設計を用いることが必要とされている。しかしながら地震波や構造物のパラメータの不確実性をもとにした確率的な入出力関係に基づく耐震設計はあまりなされていない。

一方、研究代表者は、昔から不規則外乱を受ける構造物の安定化制御を行い、確率的な制御の問題に対して理論的に取り組んできている。また、研究代表者と、免震、耐震技術に実績がある研究分担者が協力し、大規模配管系、大型自立円筒構造物、高速走行体などの確定論に基づく耐震設計、安全化技術について成果をあげてきた。これらの流れを受け、研究代表者、分担者は弾塑性サポート支持配管系のような小規模構造物系の確率的耐震設計について研究をはじめ、業績を上げつつある。

このことから本研究においては大規模機器配管系に注目し、今後発生しうる未知の巨大地震動に対してこれらの動的な信頼性に基づいた確率的な耐震設計技術の構築について検討を行う。

2. 研究の目的

阪神大震災や東日本大震災などの大きな地震が多発している日本では、化学プラントや原子力発電所のような重要な大規模な施設がそのような地震を受けると大きな被害が予想される。このことから本申請においては大規模機器配管系に注目し、今後発生しうる未知の巨大地震動に対して、確率的な耐震設計技術の構築について検討を行う。特に本研究では

- (i) 多点入力地震に対する検討、
 - (ii) 大規模構造物における構造パラメータのばらつきに関する検討、
 - (iii) 耐震設計におけるガタ支持の影響の検討、
 - (iv) リスク評価の指標の提案、
 - (v) 大規模構造物の耐震設計における低次元化の検討、
- に的を絞って研究を進める。

3. 研究の方法

本研究は4か年で行った。

[平成25年度]

(i) 多点入力地震に対する検討:

大規模機器配管系ではその規模の大きさから、地盤等の影響もあり各支持位置において入力地震波が異なると考えられる。そのためまず非線形支持構造を考慮した機器配管系およびそれを支える地盤のモデル化を行う。模擬地震波を作成し、地震応答解析を行う。支持点を順次増やしていき、多点支持大規模配管系の地震応答を解析する。

(ii) 大規模構造物における構造パラメータのばらつきに関する検討:

構造物が大規模になると、同じ配管等においても位置において材料強度や形状などのばらつきの影響が大きいと考えられる。そのため、これらの不均一性が耐震設計にどのような影響を与えるか検討を行う。

[平成26年度]

(iii) 耐震設計におけるガタ支持の影響の検討:

大規模な機器配管系の支持においては、熱膨張による変形などを考慮して余裕のある支持がなされており、そのため配管と支持部間で摩擦振動や、ガタ振動の発生が予想される。これらの振動が系全体の耐震設計にどのような影響を与えるか検討する。

[平成27, 28年度]

(iv) リスク評価の指標の提案:

大規模機器配管系においては各機器配管の健全性、支持構造体の健全性、支持構造体の稼働率などを考慮した評価指標が必要となる。これらを複合的に評価できる指標を提案し、その効果を検討する。

(v) 大規模構造物の耐震設計における低次元化の検討:

大規模構造物の地震応答計算をもとに、主要なモードを抽出し、地震応答における重要度を調べる。また、低次元モデルを作成し、もとの次元のモデルと応答の比較検討を行い、精度、近似度について検討を行う。

4. 研究成果

(1) 配管系のモデル化

1 字型配管

複数の地震波を受ける場合の配管系のモデルを図1, 2に示す。単純片持ち梁配管を

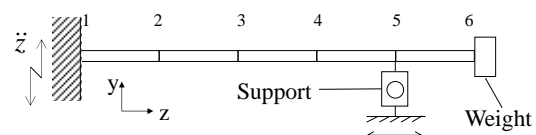


図1 | 字型配管モデル (単一入力モデル)

対象とする。この自由端側に弁をモデル化した重錘が接合されているとする。1次モード、2次モードを表すために6節点でモデル化する

る．このうちサポート取付位置は Node 2～6 とし，1 つのサポートを用いるものとする．有限要素法を用いて配管系の運動方程式を導出する．

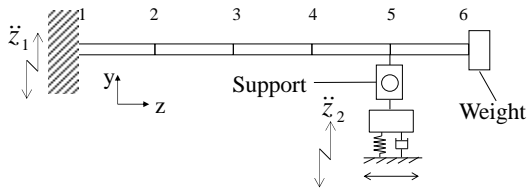


図 2 I 字型配管モデル (2 点入力モデル)

L 字型配管

ガタ支持を行う場合のモデルを図 3 に示す．3 次元の配管を対象とする．配管は L 字型とし，I 字型同様自由端側に弁をモデル化した重錘が接合されている場合を考える．ここでは 2 つのサポートで支持するものとする．配管系を 10 要素で分割し，有限要素法で運動方程式を導出する．

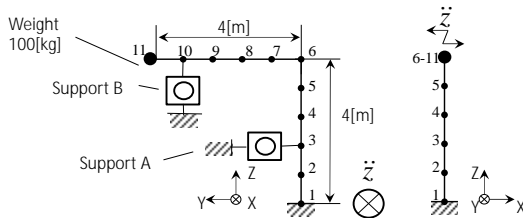


図 3 L 字型配管モデル

弾塑性サポート

本研究では弾塑性サポートとして揺動型の鉛ダンパ(LED)を考える．この LED の特徴は，構造やメンテナンスが容易であることと，エネルギー吸収効果が安定していることである．この弾塑性サポートの解析モデルは図 4 に示すようなバイリニアモデルとする．

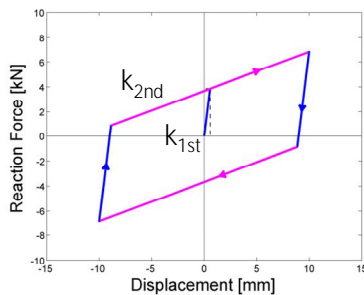


図 4 バイリニアモデルのヒステリシス

地盤のモデル化

大規模構造物で場所によって受ける地震入力が異なる．ここではサポートの下に模擬地盤を考えることにより地震入力の違いを考慮する．模擬地盤は図 2 の下部に示す 1 自由度変位励振系で考える．

入力波

入力波としては狭帯域ホワイトノイズを複数用いる．周波数領域は 0-10[Hz]とし，この間でスペクトル強度は 0.10 で一定とした．

(2) 評価指標

配管系の動的信頼性

配管系の構造健全性を配管に生じる応力の許容応力を上限値とする動的信頼性 (J_{piping}) で評価する．ここで動的信頼性は生じる応力が上限値である許容応力を超えない確率と定義する．許容応力は圧力配管用炭素鋼配管 STPG370 の耐力 215[MPa]を用いる．

エネルギー吸収量の最大化

構造物の制振の観点から弾塑性サポートができるだけ地震入力エネルギーを吸収することが望ましい．そこで弾塑性サポートの吸収エネルギー量を E_{ab} とし，地震入力エネルギー E_{in} をなるべく吸収するように評価指標を $J_{\text{energy}} = \bar{E}_{ab} / \bar{E}_{in}$ で定める．ただし \bar{E}_{ab} , \bar{E}_{in} はそれぞれ E_{ab} , E_{in} のサンプル平均である．

弾塑性サポートの健全性

弾塑性サポートとして鉛ダンパを扱う場合，鉛の塑性変形により，振動エネルギーを熱エネルギーに変えて吸収するが，鉛の温度が過度に上昇すると，抗力低下などの機能低下を引き起こし，サポートの健全性低下につながる．許容吸収エネルギー E_{al} に対する累積吸収エネルギーの動的信頼性を J_{support} とし，弾塑性サポートの健全性の評価指標とする．

サポート間の吸収エネルギーのバランス化

複数の弾塑性サポートを制振対象に設置する場合，弾塑性サポートをなるべく同じ程度働かせ，特定の弾塑性サポートへの負荷の集中を防ぐことがより健全性の高い設計につながる．そこで 2 つのサポート A, B それぞれに対して J_{energy} を求める．その差から評価指標を $J_{\text{balance}} = |J_{\text{energyA}} - J_{\text{energyB}}|$ で定める．この評価指標のみ小さいことが望ましい指標となっている．

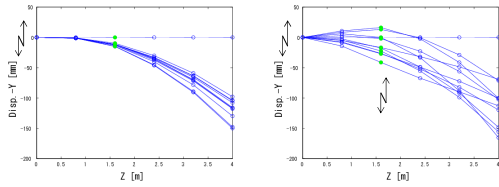
複合評価指標

上記の評価指標を組み合わせた指標を考える．

(3) 複数の地震入力を受ける片持ち梁配管系の振動応答

単一入力と 2 点入力時の応答の違い

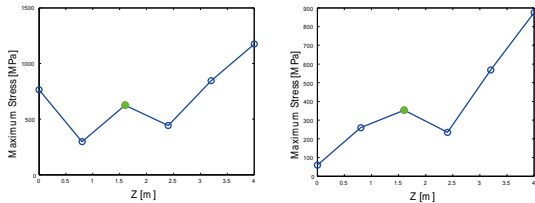
最初に，図 1, 2 に示される I 字型配管系について，単一入力と 2 点入力の場合の応答を調べた．結果の一例を図 5 に示す．単一入力の場合と 2 点入力の場合では応答が異なり，複数の地震入力を考えることは重要であることがわかる．



(a) 単一入力 (b) 2点入力
図5 単一入力と2点入力時の応答の違い

地盤条件の違い

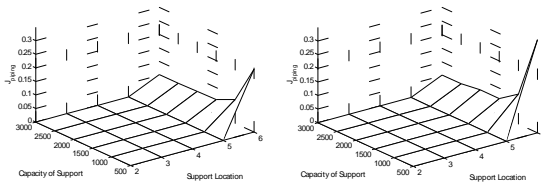
次に2点入力時の模擬地盤の剛性の影響について検討した。地盤の剛性を基準値の0.5倍(軟弱な地盤を想定), 1倍, 1.5倍(強固な地盤を想定)としたときの配管系の応答を調べた。応力分布の一例を図6に示す。軟弱な地盤の場合は配管系の応力や変位, 吸収エネルギーが大きくなり, 軟弱な地盤上で構造物を設置しないほうがよいと確認できた。



(a) 軟弱な地盤 (b) 強固な地盤
図6 地盤の違いによる応力分布の違い

パラメータのばらつきによる信頼性の変化

配管系の動的信頼性 J_{piping} , エネルギー吸収量の最大化 J_{energy} , 弾塑性サポートの健全性 $J_{support}$ をもとに 弾塑性サポートの第1剛性, 第2剛性, 配管のヤング率などの影響について検討した。弾塑性サポートの第1剛性, 第2剛性を小さくしたほうが配管系の動的信頼性は高くなった。これはエネルギー吸収量が



(a) k_{2nd} 1.2倍 (b) k_{2nd} 0.8倍
図7 配管系の信頼性における k_{2nd} の影響

増加したため信頼性が高くなったといえる。また, 第1剛性と第2剛性では第2剛性のほうが信頼性に与える影響が大きいことがわかった(図7参照)。さらにヤング率を大きくすると配管変位が小さくなり, 発生する応力も小さくなり, 配管の信頼性が大きくなったと考えられる。

最適化計算(複合評価指標)

ここでは配管系の動的信頼性 J_{piping} , エネル

ギー吸収量の最大化 J_{energy} , 弾塑性サポートの健全性 $J_{support}$ をもとに配管の動的信頼性が最重要と考え,

$$J_1 = J_{piping} + J_{energy} + J_{support}$$

$$J_2 = 2 \times J_{piping} + J_{energy} + J_{support}$$

$$J_3 = 10 \times J_{piping} + J_{energy} + J_{support}$$

の3つの複合評価指標を検討した。表1に複合評価指標による最適化の結果を示す。単一の指標だけではそれのみを満足する最適支持位置を見つけることはできたが, 3つの指標を同時に考慮した支持位置を考えることはできなかった。しかしこの複合評価指標を用いると, 複数の指標を考慮した支持位置を考えることができた。

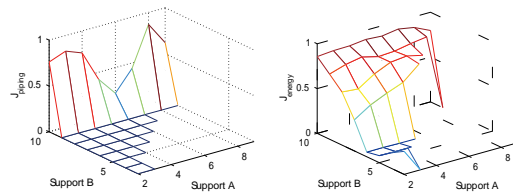
表1 複合評価指標を用いた時の最適化の結果

Item	J_1 Value	J_2 Value	J_3 Value
Supporting location	Node 3	Node 6	Node 6
Capacity of supports F_y [N]	2000	500	500
Reliability of the piping J_{piping}	0	0.27	0.27
Reliability of absorbed energy J_{energy}	0.84	0.57	0.57
Reliability of the support $J_{support}$	1	1	1

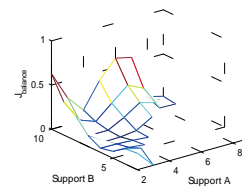
(4) ガタを考慮したL字型配管系の振動応答

ガタが無いときの評価指標の分布

ここではガタ支持を考慮した図3に示されるようなL字型配管系の最適支持位置の検討を行った。まずガタが無い場合の評価指標の分布を図8に示す。



(a) J_{piping} (b) J_{energy}



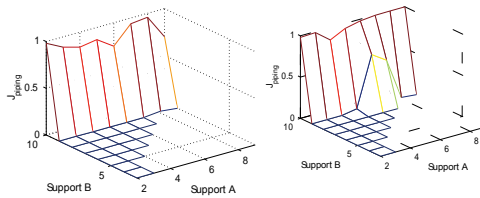
(c) $J_{balance}$

図8 L字型配管系の評価指標の分布

ここでは配管系の動的信頼性 J_{piping} , エネルギー吸収量の最大化 J_{energy} , サポート間の吸収エネルギーのバランス化 $J_{balance}$ を評価指標として用いる。配管系の動的信頼性はサポートB(自由端側のサポート)をNode10に取り付けると信頼性が高くなる。エネルギー吸収量の最大化では2つのサポートが重錘に近い場所を支えたときに吸収割合が大きくなる。バランス化では2つのサポートが互いに近い場所にあるとき均一化がはかれる。

ガタの影響

サポート A, B にガタを与えたときの応答を調べた。ここではサポート A の容量を 100 [N], B の容量を 500 [N] に固定する。サポート A のみにガタを与え, A のガタを 0, 5 [mm] としたときの配管の健全性を図 9 に示す。この場合, ガタがあるほうが信頼性は向上することが分かった。



(a) ガタ 0 [mm] (b) ガタ 5 [mm]
図 9 配管の信頼性におけるサポート A のガタの影響

一方サポート B はガタが無いほうが信頼性は向上することが分かった。その結果サポート A にはガタがあるほうがサポート B には無いほうがよいといえる。

最適化計算(複合評価指標)

ここでは配管系の動的信頼性 J_{piping} , エネルギー吸収量の最大化 J_{energy} , サポート間の吸収エネルギーのバランス化 $J_{balance}$ をもとに配管の動的信頼性が最重要と考え,

$$J_1 = J_{piping} + J_{energy}$$

$$J_2 = J_{piping} + J_{energy} - J_{support}$$

$$J_3 = 3 \times J_{piping} + J_{energy} - J_{support}$$

の 3 つの複合評価資料を検討した。これにより, (3) と同様に, 設計者が配管の重要度などに応じた耐震設計ができるといえる。

(5) 大規模構造物の耐震設計における低次元化の影響

モデル化と応答評価

このまま配管系で低次元化を検討するのは難しかったため, ここでは別の大規模系として高速走行する連結車両を考え, 連結走行体が地震を受けるときの耐震設計についてモデルの低次元化をはかった。1 車両は 1 車体, 2 台車, 4 輪軸からなる計 21 自由度のモデルであり, n 車両連結であれば車両全体で $21n$ 自由度を持つことになる。

ここでは地震時の危険性の判定(安定判別)として転覆危険率によって評価する。 n 車両のうち一つでも転覆危険率が 1 以上となれば転倒と判断する。

スパース推定理論

いろいろな条件のもと, 安定判別を行うとモデルの次数が大きいため数値計算にかかるコストが大きくなる。そこで地震応答や走行安全性に与える影響の大きい振動モードを選び出しモード解析を用いたモデルの低

次元化を行う。低次元モデルに必要なモードの選択を自動的に行うために, ここではスパース推定の理論を用いる。車両の地震応答に対する各モードの寄与の大きさの指標となる係数ベクトル $\{a\}$ を導入し, Tibshirani の Lasso とよばれる方法により, $\{a\}$ の推定値を求める。 $\{a\}$ の推定値において 0 と推定された要素に対応するモードを取り除くことで低次元化モデルを作成する。

低次元モデルと元のモデルとの比較

3 車両モデルが曲率半径 $R = 2500$ [m] の曲線軌道を走行速度 $V = 255$ [km/h] で走行している場合を考える。調整パラメータ λ は 1×10^{-5} , 5×10^{-5} とし, 入力地震波には新潟県中越地震(観測地点: 長岡支所)を用いる。この場合全 63 モードのうち 43 モードによる低次元モデルを作成することができた。低次元モデルおよびすべてのモードを考慮したモデルを用いて各部の時刻歴応答を調べると概ね応答は似通っている。

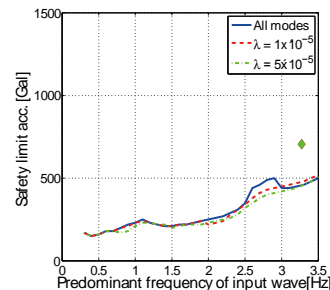


図 10 低次元モデルとすべてのモードを考慮したモデルの走行安全限界線図の比較(3 車両の場合)

図 10 は上述の方法による低次元モデルおよびすべてのモードを考慮したモデルを用いて走行安定限界線図を作成したものである。低次元モデルでは全モードを考慮したものに比べ車両の安全限界に小さなずれが見られるが, 車両の安全性を検討するうえではあまり大きな問題にならないと考えられる。また, この条件では低次元モデルでは, すべてのモードを考慮したモデルと比べて解析時間を短くできた。そのため精度を保ちつつ計算コストを削減できる可能性があるといえる。この手法は, 大規模配管系に適用しても, 同様の成果が得られるものと考えられる。

(6) 結言

弾塑性サポートで支持された大規模配管系の解析モデル化を行った。この系に狭帯域ホワイトノイズを入力し, 応答を調べることにより, 配管系の動的信頼性などの評価指標を基に複数の地震入力の影響やガタの影響などを検討した。また大規模構造物の低次元モデルの作成の基礎についても検討を行い, 確率的な耐震設計法について基礎的な検討を行った。

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)

[雑誌論文](計2件)

A. Shintani, K. Tsujita, T. Ito and C. Nakagawa: Basic study on dynamic reliability of machinery and piping system supported by elasto-plastic supports, Mechanical Engineering Journal, JSME, 掲載決定. 査読有.

新谷篤彦, 永見 唯, 伊藤智博, 中川智皓: 確率統計的観点に基づいた弾塑性サポート支持配管系の地震応答解析と最適化に関する基礎検討, 日本機械学会論文集 C 編, Vol.79, No.801, pp.1256-1266, 2013, DOI: <http://dx.doi.org/10.1299/kikaic.79.1256>, 査読有.

[学会発表](計9件)

新谷篤彦, 伊藤智博, 中川智皓: 不規則入力を受ける弾塑性サポート支持配管系の最適化に関する統計的検討, 日本機械学会関西支部第92期定時総会講演会講演論文集, No.174-1, pp.61-62, 大阪大学吹田キャンパス(大阪府吹田市), 2017年3月13-14日.

杉森映太, 新谷篤彦, 伊藤智博, 中川智皓: 連結した高速走行体の地震応答挙動およびモデルの低次元化に関する基礎検討, 日本機械学会2015年度年次大会講演論文集(DVD-ROM), No.15-1, G1000402, 5 pages, 北海道大学工学部(北海道札幌市), 2015年9月13-16日.

A. Shintani, K. Tsujita, T. Ito and C. Nakagawa: Basic Study on Dynamic Reliability of Machinery and Piping System Supported by Elasto-plastic Supports with Gaps, Proc. of the ASME 2015 Pressure Vessels and Piping Division Conference, CD-ROM Proceedings, No.PVP2015-45419, 8 pages, Boston, USA, July, 19-23, 2015.

辻田啓志, 新谷篤彦, 伊藤智博, 中川智皓: 弾塑性サポート支持配管系の信頼性におけるガタの影響に関する基礎検討, 日本機械学会関西支部第90期定時総会講演会講演論文集, No.154-1, p.271, 京都大学桂キャンパス(京都府京都市), 2015年3月16-17日.

辻田啓志, 新谷篤彦, 伊藤智博, 中川智皓: ガタを考慮した弾塑性サポート支持配管系の動的信頼性に関する基礎検討, 日本機械学会2014年度年次大会講演論文集(DVD-ROM), No.14-1, G1010601, 5 pages, 東京電機大学千住キャンパス(東京都足立区),

2014年9月7-10日.

K. Tsujita, A. Shintani, T. Ito and C. Nakagawa: Basic Study on Vibrational Behavior of Piping Systems Supported by Elasto-plastic Damper with Gap Support, Proc. of the ASME 2014 Pressure Vessels and Piping Division Conference, CD-ROM Proceedings, No.PVP2014-28283, 6 pages, Anaheim, USA, July, 20-24, 2014.

辻田啓志, 新谷篤彦, 伊藤智博, 中川智皓: ガタを考慮した弾塑性サポート支持配管系の地震時挙動に関する基礎検討, 日本機械学会関西支部第89期定時総会講演会講演論文集, No.144-1, p.6-16, 大阪府立大学中百舌鳥キャンパス(大阪府堺市), 2014年3月18-19日.

辻田啓志, 新谷篤彦, 伊藤智博, 中川智皓: 複数地震入力を受ける機器配管系の動的信頼性に関する統計的な検討, 日本機械学会2013年度年次大会講演論文集(DVD-ROM), No.13-1, G101072, 5 pages, 岡山大学津島キャンパス(岡山県岡山市), 2013年9月8-11日.

A. Shintani, K. Tsujita, T. Ito and C. Nakagawa: Basic Study on Vibrational Behavior of System Supporting Large-scale Structures Subjected to Multiple Random Inputs using Probabilistic Vibration Theory, Proc. of the ASME 2013 Pressure Vessels and Piping Division Conference, CD-ROM Proceedings, No.PVP2013-97560, 8 pages, Paris, France, July 14-18, 2013.

[その他]

市民への講演など

新谷篤彦: 動的信頼性に基づいた機器・配管系の耐震設計法, 大阪府立大学第105回テクノラボツアー「ものづくりイノベーション研究所 Part 4」, 2017年3月3日.

新谷篤彦: 機械力学における研究開発とシミュレーション, 大阪府立大学第103回テクノラボツアー「機械工学を支えるシミュレーション技術」, 2016年11月22日.

6. 研究組織

(1) 研究代表者

新谷 篤彦 (SHINTANI, Atsuhiko)
大阪府立大学・工学研究科・准教授
研究者番号: 90295725

(2) 研究分担者

伊藤 智博 (ITO, Tomohiro)
大阪府立大学・工学研究科・教授
研究者番号: 60347507