

平成 30 年 6 月 25 日現在

機関番号：12608

研究種目：若手研究(A)

研究期間：2014～2016

課題番号：26709001

研究課題名(和文) 固液連成界面における波動伝播現象の解明

研究課題名(英文) Investigation on wave propagation across solid-fluid interface with fluid-structure interaction

研究代表者

因幡 和晃 (Inaba, Kazuaki)

東京工業大学・環境・社会理工学院・准教授

研究者番号：00408725

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 19,000,000円

研究成果の概要(和文)：流体から固体または固体から流体へと波動が伝播する連成現象の学理を確立することを目的として、固体表面状態の影響や流体の種類を変えて固液連成界面における波動伝播現象の研究を行った。固体から液体に関しては、波動を円管内の水に入射させて高速ビデオカメラで可視化するとともに、固体表面の濡れ性により管内で生成するキャビテーション気泡の挙動が異なることを発見した。また、液体から固体に関しては、固体壁近傍で水中火花放電により発生した気泡崩壊時の衝撃力を逆解析的に推定し、さらに、ポンプの補修材料として期待される高分子材料について引張力を負荷しながら壊食試験を行い、破壊・損傷のメカニズムについて考察した。

研究成果の概要(英文)：In order to establish the theory of coupled phenomena where a wave propagates from a fluid to a solid or from a solid to a fluid, we have studied on the wave propagation phenomenon at the solid-liquid coupled interface by changing the solid surface conditions and the fluid. For solid to liquid case, we visualized the wave propagation in the water filled pipe and found that the generation of cavitation bubbles varies due to the wettability of the solid surface. For liquid to solid case, the impact force by bubble collapses in the water near the solid wall was inversely analyzed. Furthermore, we conducted cavitation-erosion tests with tensile loads on polymers expected as pump repair materials, and discussed the mechanism of failure and fracture.

研究分野：機械工学、材料力学、流体力学、計算工学

キーワード：波動伝播 流体構造連成 水撃 キャビテーション

1. 研究開始当初の背景

2011年3月11日の東日本大震災に起因した福島第一原子力発電所の事故により、今後数十年間にわたり汚染水を含めた大量の放射性廃棄物の処理が必要となった。放射性廃棄物は、主として水と硝酸を用いて処理が施されるが、放射線が水が分解されると可燃性の酸水素混合気が発生して水素爆発が生じる恐れがある。2001年11月に浜岡原子力発電所一号機で発生した水素爆発による配管破断事故は、放射線による分解で生成した可燃性酸水素混合気が着火し爆燃・爆轟にいたったことが原因であると報告されている。管路の終端部に水が溜まっていたため、水素爆発による衝撃で水撃波動が伝播して被害が拡大した可能性も考えられる。

研究代表者(因幡)は、配管内で爆発事故が発生した最悪の事態を想定し、水撃波面における流体構造連成現象の解明や被害低減のための研究(若手(B)「水撃の流体-構造連成におけるバンドギャップ効果の検証」)を行ってきた。固液界面の連成現象は、主として流体の圧力で管(構造)が膨らみ、管が膨らむことで管内の圧力が減少する相互作用で説明できる。一連の研究を通じて、水撃波面の力学を考察する際に、波面上流と下流の遠方における力のつり合いを考えて一次元的に取り扱う理論の限界を指摘してきた。第一に、管内の爆発的圧力上昇により、管が膨らむ際に慣性が無視できず水撃波面背後で管ひずみや圧力が一次元解に対して振動して二次元軸対称構造となることを明らかにしている(原著論文4)。さらに管内に水と音響インピーダンス(密度と音速の積)が近いポリカーボネート粒子が存在する場合でも強い反射が起こり、金属粒子が存在する場合と同程度の管ひずみ(被害)が発生することを明らかにした。古典的な一次元理論では水撃波動の強い反射は説明できない。以上のように、固液連成界面での波動伝播現象を解明することで、極限事故における被害を正確に予測し、新しい波動制御や被害低減を可能にする革新的な技術が求められてきた。

2. 研究の目的

上記の背景を踏まえ、固液連成界面に垂直な方向の波動伝播現象と、平行な方向の波動伝播現象の研究を行い、それらを融合して複雑な波動伝播挙動を解明し、マルチフィジックスを考慮した物理モデルや境界条件を提案することで、被害予測や被害低減、波動制御につながる革新的な技術の創出を目指し、以下の2点について研究を行った。

(1) 配管内における水撃波動伝播

(液体から固体への波動伝播) :

水撃波の実験的研究では、数10mから100m程度の長い管を用いて、水撃波が管端で反射を繰り返す挙動を観測することが一般的であった。そこで、1mの短い管を用いて、

管内の水にピストンを衝突させて水撃波が一回伝播する際の水中圧力や管ひずみを測定して、水撃波面の詳細な機構を明らかにするとともに、これまで離散的に実験で計測していた管壁のたわみ波や管内の圧力波動を高速度カメラで可視化することで、固体から液体への波動伝播現象を明らかにする。

(2) 固体表面近傍での気泡崩壊現象

(液体から固体への波動伝播) :

気泡が崩壊する際につぶれて中心にマイクロ・ジェットが発生する。壁面近くで気泡が崩壊すると、壁面に向かって120m/sものマイクロ・ジェットが発生することが実験で観察されている。このとき、材料の降伏応力に匹敵する圧力が作用し、壁面に壊食が生じる。本研究では、水中のアーク放電を利用して壁面近傍で気泡一個を生成・崩壊させて、ジェットを可視化するとともに、固体壁に作用するマイクロ・スケール衝撃力を複数個のAEセンサを効率的に配置して音響信号から逆解析的に推定する。さらに、ポンプなどの流体機械で補修材料として用いられる高分子材料の寿命評価についても行うことで、液体から固体への波動伝播現象を明らかにする。

3. 研究の方法

(1) 配管内における水撃波動伝播挙動

全長1mの管に水を充てんして鉛直方向に設置して、図1のように管の上端に水面に接するように固体円柱を挿入し、重力によりおもりを落下させて固体バツファに衝突させて、バツファから管内の水に波動を伝播させて可視化実験を行う。バツファの材質や表面粗さ、濡れ性を変えて波動伝播実験を行い、可視化結果と数値解析結果とを比較して境界条件を検証するとともに波動伝播の遷移課程を考慮した物理モデルの提案と検証を行う。

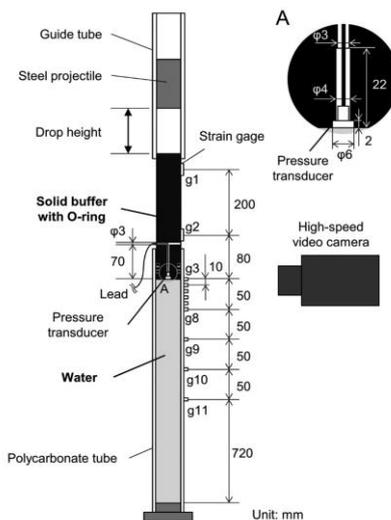


図1 連成界面に垂直な波動の伝播実験

(2) 固体表面近傍での気泡崩壊現象

水中アーク放電により固体壁近傍で気泡

を生成・崩壊させて衝撃力を測定する実験・計測システムを構築し、既知の衝撃力を作用させて AE センサで水響計測を行い伝達関数を特定し、逆解析により伝達関数を用いて未知の衝撃力を推定する。高速度カメラにより流体ジェットの挙動を明らかにして衝撃力の作用メカニズムを考察する。

ポンプ内部の補修材として、ガラス繊維強化プラスチック (GFRP) などが用いられることがある。GFRP の母材は、エポキシ樹脂であることから、ポンプの補修材として期待されるエポキシ樹脂に着目し、ポンプの内圧が上昇することで、ケーシングが膨張し、それに伴い補修材にも引張負荷が作用することが予想されることから、引張負荷を作用させた磁歪式キャビテーション壊食試験を実施し、高分子材料の耐キャビテーション性能を評価するとともに、試験片の裏側から壊食およびき裂進展の様子を観察した。

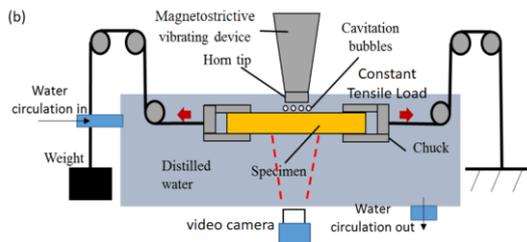


図2 磁歪式引張キャビテーション試験

4. 研究成果

(1) 配管内における水撃波動伝播挙動

図3、図4にアルミバッファとポリカーボネートバッファを用いた場合に、固体から水を充てんした管に応力波が入射し、水撃波として伝播する挙動を示す。図3では、管の周方向ひずみの履歴を示しており、水撃波動の伝播に伴い、ひずみが立ち上がり、その後振動する様子を確認できる。アルミとポリカーボネートを用いることで、ポリカーボネートの方が圧力振幅が大きくなっている様子や、振動の周期が長くなる様子が確認できる。

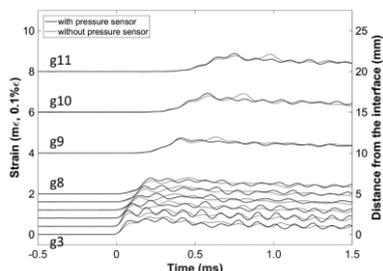


図3 アルミバッファを用いた場合の水撃波伝播挙動 (周方向ひずみ履歴)

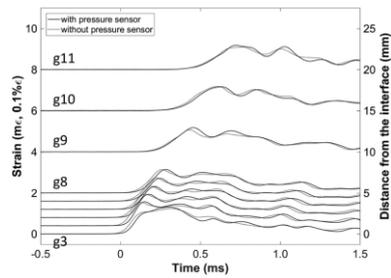


図4 ポリカーボネートバッファを用いた場合の水撃波伝播挙動 (周方向ひずみ履歴)

図5に、高速度カメラで撮影した衝突後のおもりとバッファの境界位置の履歴を示す。また、図5には固体中を伝播していると考えられる応力波の軌跡を示している。アルミ中を伝播する応力波の伝播速度はポリカーボネートよりも速いため、アルミバッファの方がより多く応力波が伝播し、その結果として、水中に入射する波動の振動周期が短くなり、図3で観察されたポリカーボネートよりも周期の短い振動が観察されている。アルミバッファとポリカーボネートバッファの運動量、水撃波としての流体の運動量等を考慮した物理モデルを構築し、バッファ底面で測定した圧力値を予測することに成功した。

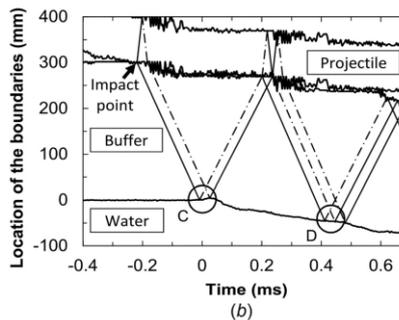
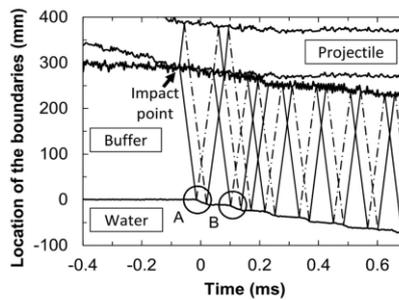


図5 おもりとバッファの運動 (a) アルミバッファ、(b) ポリカーボネートバッファ

固体中を伝播する応力波は、自由端で引張波として反射し、水に入射する。このため、その傾向が特に顕著なアルミバッファの底面近傍で、図6に示すように引張波の入射によるキャビテーション気泡の生成が観察された。

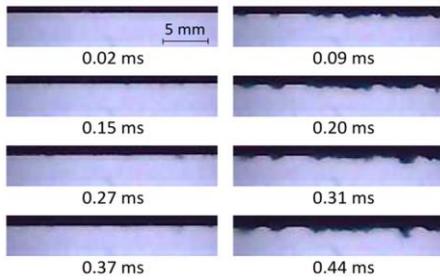


図6 アルミバッファ近傍で観察されたキャビテーション気泡

アルミバッファの底面に、プラズマ処理をすることで濡れ性を向上させたアルミテープを貼り付けて同様の実験を行ったところ、図7に示すようにバッファ底面の近傍で観察されていたキャビテーション気泡の生成が大きく抑制されることが確認され、固液連成界面の表面性状を変化させることで、波動伝播の制御に加え、キャビテーション気泡生成についても制御できる可能性が示唆された。

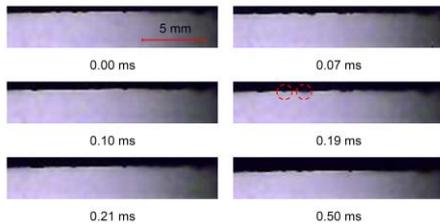


図7 プラズマ処理したアルミテープを貼ったバッファ底面近傍におけるキャビテーション気泡の抑制

(2) 固体表面近傍での気泡崩壊現象

図8に示すように固体表面で気泡が崩壊すると、流体ジェットが生成されて、壁に衝突し、衝撃力が作用する。このとき AE センサーにより逆解析を用いて推定した衝撃力の時間履歴は図9のようになり、およそ 42 N が壁に作用していると推定された。

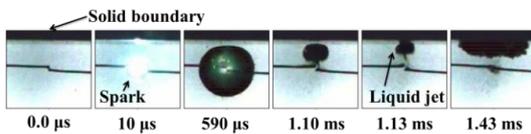


図8 固体表面近傍における気泡崩壊

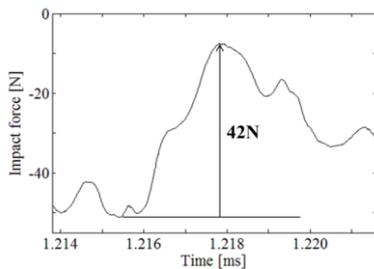


図9 気泡崩壊時に逆解析により推定された衝撃力の時間履歴

感圧紙や純アルミに残されたピット径から、42 N の衝撃力が直径 1 mm 程度の領域に作用していることを確認し、平均圧力を計算した結果、115 MPa となり、純アルミの降伏応力よりもやや低い圧力が作用しているが、感圧紙で確認された領域は、10 から 50 MPa で変色するものであり、実際には、局所的に降伏応力よりも高い圧力が狭い領域に作用していたものと考えられる。また、気泡崩壊時だけでなく、気泡生成時に生じる衝撃波も衝撃力として作用しており、上記と同様の方法で推定した結果、23 N 程度の衝撃力が作用していることを確認した。

キャビテーションのみをエポキシ樹脂に作用させた場合には、72 時間経過してもわずかに壊食が生じるのに対し、引張応力を 1.31 MPa とエポキシの材料強度 40-50 MPa に対して十分小さい応力を作用させながらキャビテーション壊食試験を行うと、わずか 7.5 時間で試験片は破断した。このとき、まずき裂が壊食表面で発生し、その後、き裂は深さ方向へと伝播し貫通し、その後幅方向へと伝播して破断にいたる様子が観察された。



図10 引張応力 1.31 MPa を作用させた際のキャビテーション壊食過程

様々な引張応力を作用させてキャビテーション壊食試験を行った結果を図11に示す。図11には、き裂生成までの時間、き裂が試験片裏面に貫通するまでの時間、試験片の破断時間が示されている。き裂が生成するまでの時間 T1 と生成後、貫通するまでの時間 T2 を求め、図12に示す。図12において、0.12 MPa と 0.24 MPa を作用させた場合において、それぞれ 42 時間、32 時間経過してもき裂が確認されなかったことから本試験片の疲労限度は 0.24 MPa よりも大きいと考えられる。また、図12において、き裂が生成してから裏面まで伝播する時間 T1 に対して、き裂が幅方向へ伝播する時間 T2 が長いこと、これらの時間がべき乗則で表されることが示された。

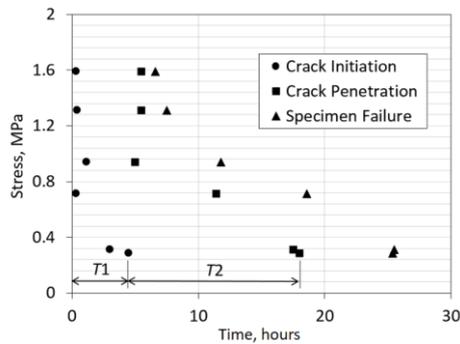


図 11 引張応力の変化によるき裂生成、き裂貫通、試験片破断にいたる時間の変化

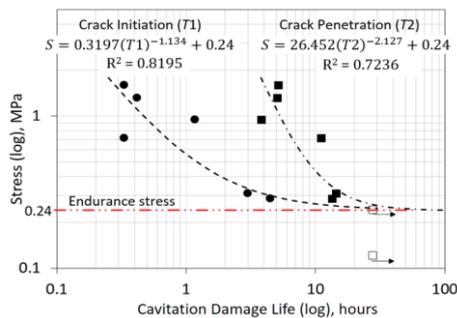


図 12 引張応力と試験片寿命の関係

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 4 件)

- ① Masaharu HIBI, Farid Triawan, Kazuaki Inaba, Kosuke Takahashi, Kikuo Kishimoto, Keisuke Hayabusa, Hiroaki Nakamoto, Cavitation damage of epoxy resin subjected to uniaxial tensile loading, Mechanical Engineering Journal, JSME, 査読有, Vol. 5, No. 1, p. 17-00151, 2018
https://www.jstage.jst.go.jp/article/mej/5/1/5_17-00151/_article
- ② Tomohisa Kojima, Kazuaki Inaba, Kosuke Takahashi, Farid Triawan, Kikuo Kishimoto, Dynamics of Wave Propagation Across Solid-Fluid Movable Interface in Fluid-Structure Interaction, Journal of Pressure Vessel Technology, 査読有, Vol. 139, 3, 031308 pp.1-9, 2017, pp.1-9
<http://pressurevesseltech.asmedigitcollection.asme.org/article.aspx?articleid=2592756>
- ③ 高橋航圭, 新井大輔, 因幡和晃, 岸本喜久雄, 中本浩章, 早房敬祐. 機械・構造物補修用コーティング材料の耐キャビテーション評価, ターボ機械, 査読有, Vol. 42, No. 12, 2014, pp. 767-776
https://www.jstage.jst.go.jp/article/tsj/42/12/42_767/_article/-char/ja
- ④ Hiroyuki Ushifusa, Kazuaki Inaba,

Kosuke Takahashi, Kikuo Kishimoto. Supercritical CO2 generator using bubble collapse by water hammer, The Journal of Supercritical Fluids, Elsevier, 査読有, Volume 94, 2014, pp. 174-181

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0896844614001879>

〔学会発表〕(計 23 件)

- ① Inci Akcam, Kazuaki Inaba, Farid Triawan, Kikuo Kishimoto. Solid Boundary Effect on the Jetting Behavior of a Cavitation Bubble, Asian Conference on Experimental Mechanics (ACEM) 2017, 2017
- ② Ming Ji, Kazuaki Inaba, Theoretical Analysis of Free Vibrations Based On a New High Order Shell Theory For Cylindrical Shells Conveying Fluid, ASME 2017 Pressure Vessels & Piping Conference, 2017
- ③ 小島 朋久, Farid Triawan, 因幡和晃, 岸本 喜久雄, 固液連成界面における波動伝播の2次元軸対称解析, 日本機械学会 M&M2017 材料力学カンファレンス, 2017
- ④ 川村 誉志也, Farid TRIAWAN, 因幡和晃, 岸本 喜久雄, 中本 浩章, 早房 敬祐. キャビテーション衝撃力と引張負荷が同時に作用する場合におけるエポキシ樹脂のき裂進展メカニズムの解明, 日本機械学会 M&M2017 材料力学カンファレンス, 2017
- ⑤ Ming Ji, Kazuaki Inaba, Farid Triawan, Kikuo Kishimoto, Theoretical Analysis on Transient Response of Circular Plate Coupled with Fluid, The 5th Joint-Symposium on Mechanics of advanced Materials and Structure, 2017
- ⑥ Tomohisa Kojima, Kazuaki Inaba, Farid Triawan, Kikuo Kishimoto. Numerical Study on Wave Propagation across Solid-fluid Interface with Fluid Structure Interaction, The 8th Japan-Taiwan Workshop on Mechanical and Aerospace Engineering, 2016
- ⑦ Kazuaki Inaba, Masaharu Hibi, Farid Triawan, Kosuke Takahashi, Kikuo Kishimoto, Keisuke Hayabusa, Hiroaki Nakamoto, Experimental Study on the Damage Behavior of Epoxy Resin under Cavitation and Constant Tensile Load, the 10th International Conference on Fracture and Strength of Solids, 2016
- ⑧ Daisuke Yamaguchi, Kazuaki Inaba, Fluid-Structure Interaction in the Nozzle of Collunarium Container, ASME 2016 Pressure Vessels & Piping

- Conference, 2016
- ⑨ Tomohisa Kojima, Kazuaki Inaba, Kosuke Takahashi, Wave Propagation Across the Interface of Fluid-Structure Interaction With Various Surface Conditions of Solid Medium, ASME 2016 Pressure Vessels & Piping Conference, 2016
- ⑩ Farid Triawan, Kazuaki Inaba, Kikuo Kishimoto. Measurement of Cavitation Intensity for Fluid Machinery Application, The 8th Japan-Taiwan Workshop on Mechanical Engineering and Aerospace, 2016
- ⑪ Akcam Kubra Inci, 因幡 和晃, Triawan Farid, 高橋 航圭, 岸本 喜久雄, 水面に接した平板近傍における気泡崩壊時のジェットパターン, キャビテーションに関するシンポジウム (第 18 回), 2016
- ⑫ Inci Akcam, Kazuaki Inaba, Kosuke Takahashi, Kikuo Kishimoto, Growth and Collapse of a Single Bubble near a Plate by Spark Discharge in Water, The 9th International Symposium on Cavitation (CAV2015), 2015
- ⑬ Masaharu Hibi, Kazuaki Inaba, Kosuke Takahashi, Kikuo Kishimoto, Keisuke Hayabusa, Effect of Tensile Stress on Cavitation Erosion and Damage of Polymer, The 9th International Symposium on Cavitation, 2015
- ⑭ Tomohisa Kojima, Kazuaki Inaba, Kosuke Takahashi, Wave Propagation Across Solid-Fluid Interface With Fluid-Structure Interaction, ASME 2015 Pressure Vessels & Piping Conference, 2015
- ⑮ Tomohisa Kojima, Kazuaki Inaba, Kosuke Takahashi, Kikuo Kishimoto. Mechanics of Fluid-Structure Interaction associated with Wave Propagation across Solid-Fluid Interface, 2015 Joint-Symposium on Mechanics of Advanced Materials & Structures (JSMAMS2015), 2015
- ⑯ Tomohisa Kojima, Kazuaki Inaba, Kosuke Takahashi, Kikuo Kishimoto, Effect of wave propagation across solid-fluid interface on fluid-structure interaction, 2015 Beihang Univ.-Tokyo Tech Joint Workshop on Nano/Micro-Engineering, 2015
- ⑰ Tomohisa Kojima, Kazuaki Inaba, Kosuke Takahashi, Kikuo Kishimoto, Wave Propagation across Solid-Fluid Interface with Fluid-Structure Interaction, UK-Japan Symposium 2015 on Materials Under Extreme Conditions: Effects of Temperature, High Strain Rate and Irradiation, 2015
- ⑱ 小島朋久, 因幡和晃, 高橋航圭, 岸本喜久雄, 固液連成界面における固体材料の表面状態が波動伝播へ及ぼす影響, 日本機械学会 M&M2015 材料力学カンファレンス, 2015
- ⑲ 石井智弥, 因幡和晃, 高橋航圭, 岸本喜久雄. 逆解析を利用した気泡崩壊時のマイクロ・スケール衝撃力測定, 日本機械学会 M&M2015 材料力学カンファレンス, 2015
- ⑳ 山口大介, 増子拓也, 因幡和晃, 高橋航圭, 岸本喜久雄. 水撃波伝播と管壁の連成振動メカニズムの実験的研究, 日本機械学会 M&M2015 材料力学カンファレンス, 2015
- 21 Kengo Takeda, Kazuaki Inaba, Kosuke Takahashi. Wave propagation of water hammer in compound tube, 2014 ASME Pressure Vessels & Piping Conference, 2014
- 22 小田健太郎, 大島修造, 因幡和晃, 高橋航圭. 動脈瘤を含む脳動脈分岐部まわりの応力の評価, 計算力学講演会, 2014
- 23 日比正治, 因幡和晃, 高橋航圭, 岸本喜久雄, 早房敬祐. 高分子材料のキャビテーション壊食における引張応力の影響, キャビテーションに関するシンポジウム(第17回), 2014

[その他]

ホームページ等

<http://www.mech.titech.ac.jp/~koubutsu/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

因幡 和晃 (INABA, Kazuaki)

東京工業大学・環境・社会理工学院・准教授

研究者番号：00408725

(4) 研究協力者

岸本 喜久雄 (KISHIMOTO, Kikuo)

高橋 航圭 (TAKAHASHI, Kosuke)