

科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 2 年 6 月 8 日現在

機関番号：13801

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2017～2019

課題番号：17K06856

研究課題名(和文)冷間鍛造部品の供用時強度評価シミュレーションの高精度化

研究課題名(英文)Improvement of accuracy of in-service strength evaluation simulation of cold forged parts

研究代表者

早川 邦夫 (Hayakawa, Kunio)

静岡大学・創造科学技術大学院・教授

研究者番号：80283399

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,600,000円

研究成果の概要(和文)：冷間鍛造部品の強度評価をより高精度に実施するための研究を実施した。初めに、加工中の負荷履歴の影響を高精度に表現するための弾塑性構成式とそのパラメータ同定のための実験法について研究した。それを、ステンレスボルトの加工工程とその後の強度予測に適用した。提案した手法により強度予測精度が大幅に改善されることを示した。

次に、多くの冷間鍛造用材料が、圧延や引き抜きなどの予成形を経た後に加工に供される現状に鑑み、引張り、圧縮ならびにせん断試験を組み合わせて、予成形前の材料特性を評価する手法について提案した。その結果、予成形・鍛造工程とその後の強度評価を行った解析結果は、実験結果により近いことが確認できた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

冷間鍛造の後、熱処理を経ないプロセスは、省エネルギー、低コストの観点から今後の需要の拡大が予想される。しかし、従来の部品強度予測手法では、加工工程中の負荷履歴の強度に及ぼす影響を正しく評価されていなかった。本研究は、その課題を克服する手法を明らかにしたもので、冷間鍛造部品の工程設計および強度評価のための新たな指針となる。

また、冷間鍛造に用いられる材料が既に予成形を受けていることは、周知の事実であるが、従来はそのことを無視して材料パラメータを決めていた。本研究では、その影響を明らかにしており、今後決定される材料パラメータについて合理的な意味づけを与えることができる。

研究成果の概要(英文)：A study was conducted to more accurately evaluate the strength of cold forged parts. First, an elasto-plastic constitutive equation for expressing the effect of load history during machining with high accuracy and an experimental method for identifying its parameters were studied. It was applied to the stainless bolt machining process and subsequent strength prediction. It was found that the proposed method significantly improves the strength prediction accuracy.

Next, a method for evaluating material properties before preforming was proposed by combining tensile, compression and shear tests, in view of the current situation that many cold forging materials are subjected to processing after preforming such as rolling and drawing. As a result, it was confirmed by analysis that the strength after the preforming-forging process was closer to that by experiments.

研究分野：塑性加工学

キーワード：冷間鍛造 塑性力学

様式 C-19、F-19-1、Z-19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

冷間鍛造部品において、加工後熱処理を行わないで用いられる部品では、加工工程に受けた応力やひずみの履歴が供用時の強度に大きく影響する。加工履歴の中でも特に大きな影響を持つのが、材料のバウシinger効果である。バウシinger効果の塑性加工に与える影響として有名なものは、板材成形において離型後に形状が弾性回復することである。特に高強度の材料では、その程度は大きく、バウシinger効果の測定とそのモデル化が精力的に研究された。

いっぽう、鍛造においては、バウシinger効果による弾性回復の影響はほとんどない。また、数値解析においては、板材成形に比べて計算負荷が大きく、煩雑なバウシinger効果の影響を考慮する解析を避けるため、単純な等方硬化モデルによる解析が専ら用いられてきた。しかし、冒頭に述べたように、冷間鍛造においては、加工後の熱処理をしないで用いられる部品においては、その加工履歴を、バウシinger効果を適切に表現できるモデルで予測しない限り、信頼できる部品の強度予測はできない。

2. 研究の目的

本研究では、

- 1) バウシinger効果を考慮した多段鍛造工程解析および部品の強度予測に対する影響
- 2) 鍛造材料に対するバウシinger効果を明らかにする実験方法の開発を行った。主な対象部品をステンレス製非調質ボルトとして研究を遂行した。

3. 研究の方法

1) バウシinger効果を考慮した多段鍛造工程解析および部品の強度予測

鍛造工程の解析では、高精度複合硬化モデルを要求するユーザーが少ないため、鍛造加工用ソフトウェアにこのような複雑なモデルは組み込まれていない。そのため、研究代表者らにより、高精度複合硬化モデルである YU モデルをユーザーサブルーチンとして組み込んだ。

2) 鍛造用材料の移動硬化モデル塑性構成モデルのパラメーター同定のための実験

冷間鍛造に用いられる鉄鋼、ステンレス鋼やチタン合金等のバウシinger効果を含む材料特性の取得が、高精度な解析に必要不可欠であるため、鍛造材料の力学的特性評価に不可欠な引張り試験、圧縮試験に加え、大ひずみ域繰返し負荷試験法の開発と試験を行い、対象材料の材料パラメーター取得を行った。

4. 研究成果

1) バウシinger効果を考慮した多段鍛造工程解析および部品の強度予測

ステンレスボルトの鍛造工程について、移動硬化モデル (YU モデル) を用いて全ての工程を解析した。工程の強度に及ぼす影響を調べるため、2種類の工程を準備した。図1は、鍛造工程を示す。

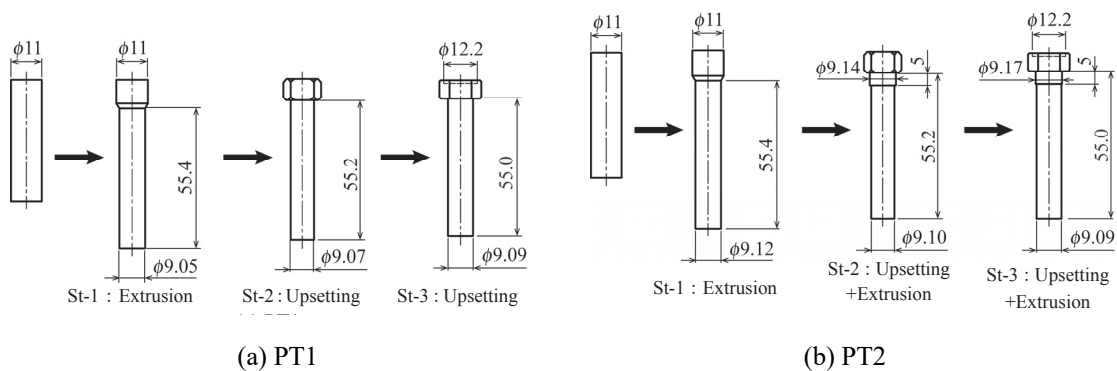


図1 ステンレスボルトの鍛造工程

解析には、YUモデルを大ひずみ域まで適用できるよう改良を施し、商用シミュレーションソフトウェアにサブルーチンとして組み込んだ。また、従来の方法との比較のため、一般的な等方硬化 (IH) モデルによる解析も実施した。すなわち、図1の2つの工程と2種類の弾塑性モデルからなる4つの組合せ (PT1+YU, PT1+IH, PT2+YU, PT2+IH) について解析を実施した。

図2は、鍛造工程後、その履歴を引き継ぎボルトの軸部の引張強度を予測した結果と実験との比較を示す。等方硬化モデルによる予測は、すべて危険側の予測となる。これは、実際にはバウシinger効果が生じて加工硬化の発展が抑制されるが、等方硬化モデルではバウシinger効果を見逃すため、累積塑性ひずみによる加工硬化のみが予測されてしまうためである。いっぽう、バウシinger効果を考慮した YU モデルでは、加工時の応力反転による降伏応力の減少が予測され、その結果実験により近い結果を得ることができる。また、工程の違い、すなわち負荷履歴の違いにもより敏感であった。

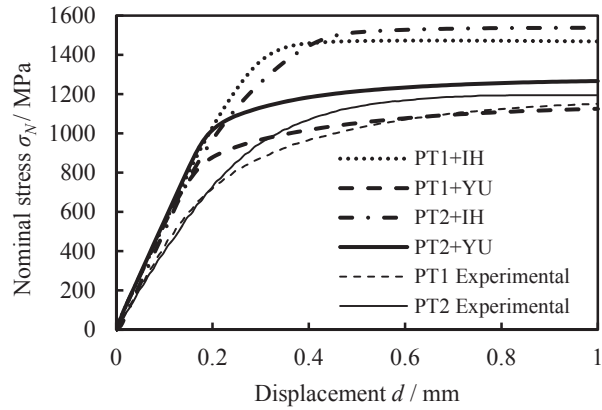
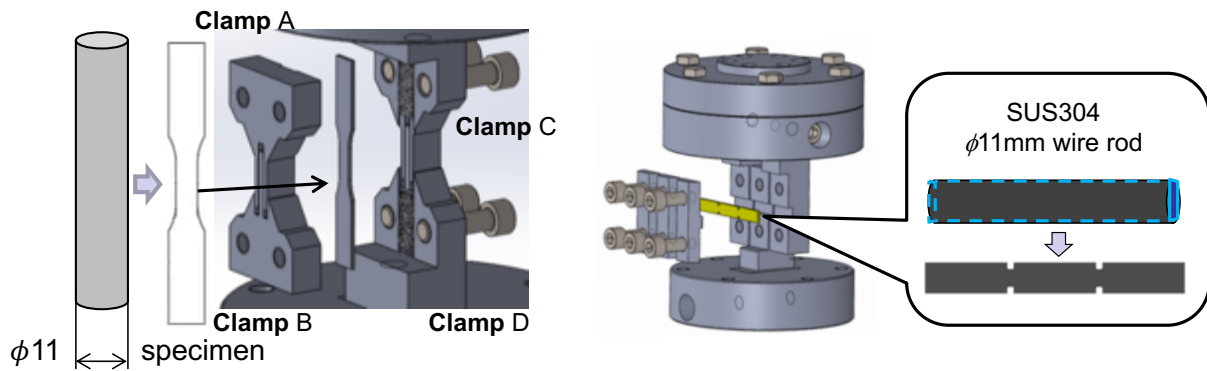


図2 ステンレスボルトの軸部強度予測結果と実験との比較

2) 鍛造用材料の移動硬化モデル塑性構成モデルのパラメーター同定のための実験

バウシingerモデルを表現できる弾塑性モデルのパラメーター同定には、引張り-圧縮試験が必要であるが、鍛造のように大きなひずみ域での挙動を表現するには限界がある。そこで、鍛造材料の試験が可能となるような繰返し単純せん断試験法を開発した。

図3は、開発した引張り-圧縮試験法、および単純せん断試験法を示す。いずれも直径11mm程度の引抜き線材から試験片を採取して実験を行うことができる。



(a) 引張-圧縮試験

(b) 単純せん断試験

図3 引抜き線材用繰返し応力反転試験法

図4は、単軸引張試験と単純せん断試験の結果を示す。降伏点は単軸引張試験の方が高く、その差は35MPaであった。また塑性域での応力の値は単軸引張試験の方が単純せん断試験よりも常に高い値をとり両者は一致しなかった。その差は、相当ひずみ0.1のとき約165MPa程度であった。

試験法によって応力値に差がでた原因は、供試材であるSUS304線材が製造の際に施される引抜き加工によって引張方向に加工硬化したことによるものと考えられる。

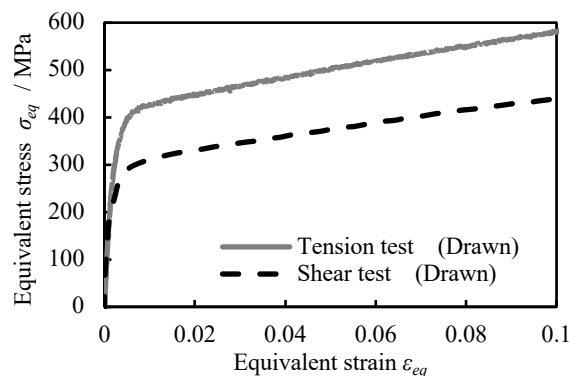
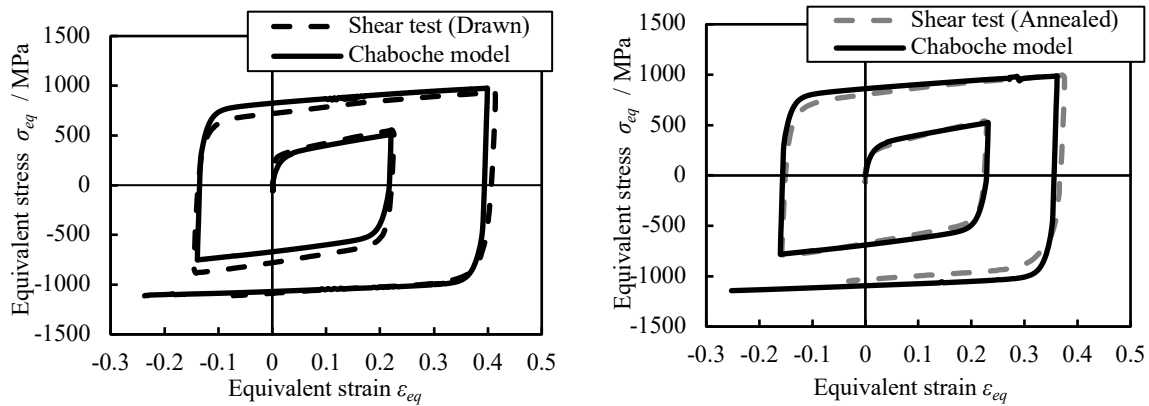


図4 引張りならびにせん断試験結果

図5は、焼鈍を行った材料と引抜き材の繰返しせん断試験の結果を示す。図中には Chaboche モデル（複合硬化モデル）を用いた解析結果も示す。どちらも同一の材料パラメータにより解析を行った。せん断試験においては、予加工を受けた材料の方が、若干応力レベルが高いものの、両者はほとんど変わらない変形挙動を示すことがわかる。このことは、繰返し単純せん断試験法は、供試材の引抜き加工の影響を受けないことを示している。従って、軸方向に予加工を受けた素材でもせん断方向にはその影響は大きく現れないことがわかる。



(a) 引抜き材による繰返しせん断試験

(b) 焼鈍材による繰返しせん断試験

図5 繰返しせん断試験

その理由を、図6の模式図を使って説明することができる。これは、せん断-軸応力空間での移動硬化を表現するミーゼス型降伏曲線を示す。初期降伏曲線は焼き鈍し材を、後続降伏曲線は引き抜き材にたとえられる。軸方向に負荷を受けると、初期降伏曲線は軸方向に中心が移動しながら拡大する。後続降伏曲線nと初期降伏曲線の差についてみると、せん断方向の差は軸応力方向のそれより小さいことがわかる。ステンレスは加工硬化が大きく、そのほとんどが移動硬化によるものであるから、後続降伏面の拡大は図6に比べてさらに小さく、その結果、初期降伏曲線と後続降伏曲線はほとんど一致すると考えられる。

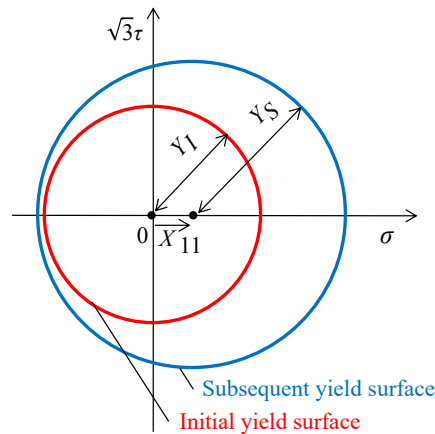


図6 ミーゼス降伏曲線と軸方向応力（引張りおよび圧縮）とせん断応力の関係の模式図

以上の考察により、引き抜き材でもせん断試験により得られた移動硬化材料モデルのパラメータは初期材料のそれと一致すると考えられる。そのことを確認するため、予加工（引抜き加工）シミュレーションをまず初めに行い、その加工履歴を受け継いで単軸引張試験シミュレーションを行った。その結果を図7に示す。せん断加工により求めた初期状態と見なせる状態の材料パラメータを用いて、予加工-引張り負荷シミュレーションを実施することにより、引抜き材の引張り試験結果により近い結果が得られることがわかる。この結果は、弾塑性体の移動硬化モデルの特性から考えて自明であるが、一般の冷間鍛造加工に用いられる材料に対して適用し、合理的考察通りの挙動を得ることができたことに大きな意味がある。すなわち、現状では、多くの鍛造材料は加工前に何らかの前処理（予加工）を受けている。そのような材料に対して材料試験を実施し、そこからシミュレーション用の材料パラメータを得ることで、加工プロセスシミュレーションを行うことが一般的であるが、とくにバウシンガー効果を考慮する上で問題があることが明らかになったことは、本研究の大きな成果と言える。

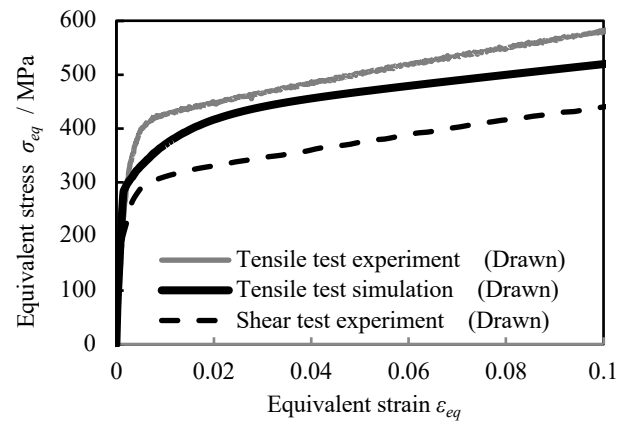


図7 せん断，単軸引張りの応力-ひずみ曲線と予加工-単軸引張りシミュレーション結果

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計8件（うち査読付論文 8件/うち国際共著 2件/うちオープンアクセス 5件）

1. 著者名 Narita S., Hayakawa K., Uemori T., Kubota Y.	4. 巻 278
2. 論文標題 Evaluation of strength of stainless steel bolt without heat treatment considering Bauschinger effect during manufacturing process	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Journal of Materials Processing Technology	6. 最初と最後の頁 116481 ~ 116481
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2019.116481	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 Takahashi Ippei, Hayakawa Kunio, Kubota Yoshihiro, Ishibashi Itaru, Nakamura Tamotsu	4. 巻 61
2. 論文標題 Effect of Production Rate on Lubrication Performance of Environmentally-Friendly Lubricant in Combined Forward-Can and Backward-Can Cold Extrusion Test of Aluminum Alloy	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 MATERIALS TRANSACTIONS	6. 最初と最後の頁 289 ~ 294
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.2320/matertrans.MT-ML2019013	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 Subrahmanyam Adabala, Lingam Rakesh, Hayakawa Kunio, Tanaka Shigekazu, Reddy N. Venkata	4. 巻 61
2. 論文標題 Experimental and Numerical Investigation of Residual Stresses in Incremental Forming	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 MATERIALS TRANSACTIONS	6. 最初と最後の頁 228 ~ 233
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.2320/matertrans.MT-ML2019011	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 該当する
1. 著者名 Groche P., Kramer P., Bay N., Christiansen P., Dubar L., Hayakawa K., Hu C., Kitamura K., Moreau P.	4. 巻 67
2. 論文標題 Friction coefficients in cold forging: A global perspective	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 CIRP Annals	6. 最初と最後の頁 261 ~ 264
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1016/j.cirp.2018.04.106	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 該当する

1. 著者名 Fujii T., Hayakawa K., Harada T., Narita S.	4. 巻 15
2. 論文標題 Cyclic simple shear test of material for cold forging	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Procedia Manufacturing	6. 最初と最後の頁 1785 ~ 1791
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.promfg.2018.07.243	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 Hayakawa K., Nakamura T.	4. 巻 767
2. 論文標題 Effect of Workpiece Surface Topography on Friction in Cold Forging Using Environmentally-Friendly Lubricant	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Key Engineering Materials	6. 最初と最後の頁 157 ~ 162
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.4028/www.scientific.net/KEM.767.157	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 S. Narita, K. Hayakawa, Y. Kubota, T. Harada, T. Uemori	4. 巻 207
2. 論文標題 Effect of Hardening Rule for Spring Back Behavior of Forging	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Procedia Engineering	6. 最初と最後の頁 167-172
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.proeng.2017.10.756	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 Uemori Takeshi, Naka Tetsuo, Tada Naoya, Yoshimura Hidenori, Katahira Takashi, Yoshida Fusahito	4. 巻 207
2. 論文標題 Theoretical predictions of fracture and springback for high tensile strength steel sheets under stretch bending	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Procedia Engineering	6. 最初と最後の頁 1594 ~ 1598
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.proeng.2017.10.1054	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7件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 藤井 達也, 早川 邦夫, 原田 崇史, 成田 忍, 久保田 義弘
2. 発表標題 引抜き冷間鍛造材の予加工が材料挙動に及ぼす影響
3. 学会等名 2019年度塑性加工春季講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 中本浩聖, 上森武, 多田直哉, 坂本惇司, 早川邦夫
2. 発表標題 590MPa級DP鋼の繰返し引張 - 圧縮試験とその構成モデル
3. 学会等名 日本鉄鋼協会第178回秋 季講演大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 柴井宏治, 上森武, 多田直哉, 坂本惇司
2. 発表標題 ステンレス薄板のSD効果に関する実験的検討
3. 学会等名 日本鉄鋼協会第179回春季講演大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 上森武・多田直哉・坂本惇司・中本浩聖・早川邦夫
2. 発表標題 高張力鋼板の面内繰返し応力 - ひずみ応答に与えるひずみ速度の影響
3. 学会等名 日本鉄鋼協会第177回春季講演大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 藤井達也・早川邦夫・原田崇史・成田忍
2. 発表標題 数値解析のための冷間鍛造材料に対する繰返し単純せん断試験
3. 学会等名 第69回塑性加工連合講演会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 原田崇史, 早川邦夫, 久保田義弘, 和久田顕人
2. 発表標題 冷間鍛造用ステンレス線材の繰返し反転負荷挙動の調査
3. 学会等名 平成29年度日本塑性加工学会春季講演会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 成田忍, 原田崇史, 早川邦夫, 久保田義弘
2. 発表標題 冷間前方押しにおける径方向のスプリングバックの測定とその有限要素解析
3. 学会等名 第68回塑性加工連合講演会
4. 発表年 2017年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔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	上森 武 (Uemori Takeshi) (70335701)	岡山大学・自然科学研究科・准教授 (15301)	