

補剛材の本数を変えたせん断パネルの繰り返し载荷実験 その2 解析による検討

2. 構造—10. 鉄骨構造—t. 耐震壁

せん断パネル せん断座屈 補剛材
繰り返し载荷実験 耐震補強 枠材

正会員 ○ 岩崎 桃子^{*1} 正会員 吉敷 祥一^{*2}
" 小西 克尚^{*3} " 藁和 健太郎^{*4}
" 薩川 恵一^{*5}

1. はじめに

耐震性能の不足するRC建物は、耐震補強時には地震時応答の低減や強度付与のために枠付きブレースを用いることが多い。この補強方法では開口を自由に設けることができないという問題があるため、近年、間柱型のせん断パネルを使用した耐震補強の適用も望まれている。せん断パネルは、せん断座屈を抑制するため、一般にはH形鋼フランジ(外枠材)で囲まれたパネル部に格子状のスティフナを配した部材が用いられる¹⁾など。これに対して外枠材として鋼板を部材面内に強軸となるように貼り付け、縦方向のみに捩れ剛性の高い管状の補剛材を用いたせん断パネルが提案されている^{2),3)}。これは板要素のせん断座屈に対して捩れ剛性の付与が有効であること⁴⁾を利用したものである。また、部材レベルにおいては幅厚比とパネルの挙動との関係^{2)~4)}や、管状補剛材を使用することでより優れた履歴挙動が得られること³⁾を明らかにしている。しかしながら、それらを構成する外枠材と補剛材の組合せがパネル部の力学挙動に及ぼす影響は必ずしも明らかではない。

本研究では、せん断パネルにおける外枠材と補剛材の組合せによる影響を把握するため、まず外枠材を一定として補剛材の本数のみを変化させて繰り返し载荷実験を行う⁵⁾。その後、FEM解析により外枠材と補剛材の組合せを変化させてパネル部に必要な捩れ剛性を検討する。

2. 実験計画

2.1 セットアップ

まず、せん断パネルにおける補剛材の本数の影響を確認するために補剛材の本数を変えたせん断パネルの実験を行った。実験で用いたセットアップを図1に示す。実験の詳細は既報⁵⁾で示しているため、本報では概要を示す。

2.2 試験体の緒元

パラメータを図2に示す。本実験のパラメータは、パネル部に取り付ける補剛材の本数とし、補剛材なし、1本、2本、3本の計4体を用意した。補剛材間隔のパネル部の幅厚比 b_1/t_p は、補剛材なし(90.0)、1本(38.8)、2本(21.7)、3本(18.1)となり、補剛材なし以外は種別FAとなる。

曲げ変形とせん断変形を考慮したせん断パネルの弾性剛性 k は、次式で表せる。ここで、ヤング係数を E 、せん

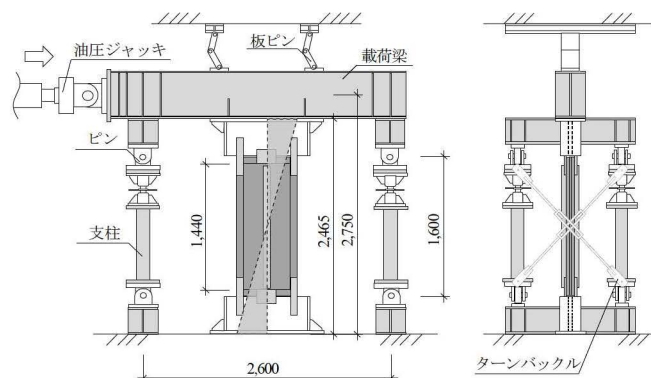
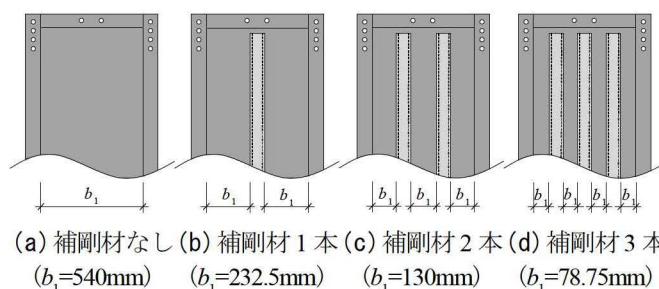


図1 セットアップ



(a) 補剛材なし (b) 補剛材1本 (c) 補剛材2本 (d) 補剛材3本
($b_1=540\text{mm}$) ($b_1=232.5\text{mm}$) ($b_1=130\text{mm}$) ($b_1=78.75\text{mm}$)

図2 パラメーター

断パネルと縦枠材を考慮した断面二次モーメントを I 、横枠材中心間の高さを h 、せん断弾性係数を G 、パネル部の断面積を A_p とする。

$$k = \left(\frac{h^2}{12EI} + \frac{1}{GA_p} \right)^{-1} \quad \dots (1)$$

また、降伏せん断耐力 Q_y は、次式で表せる。

$$Q_y = \frac{F}{\sqrt{3}} A_p \quad \dots (2)$$

3. 荷重—変形関係

実験より得られた履歴挙動を考察する。せん断変形角 $\pm 3.0\%$ の2サイクルまでの荷重—変形角関係を図3の上側に示す。図の左から補剛材なし、1本、2本、3本の結果であり、縦軸は油圧ジャッキのピン部分に挿入したロードセルにより計測したせん断力 Q 、横軸はせん断変形角 γ である。また、破線は材料試験結果を基に(2)式より算出した降伏耐力 Q_y である。

いずれの試験体も $\pm 0.1\%$ まではほぼ弾性挙動を示し、 $+0.3\%$ サイクル時にせん断降伏に併う非線形化が確認で

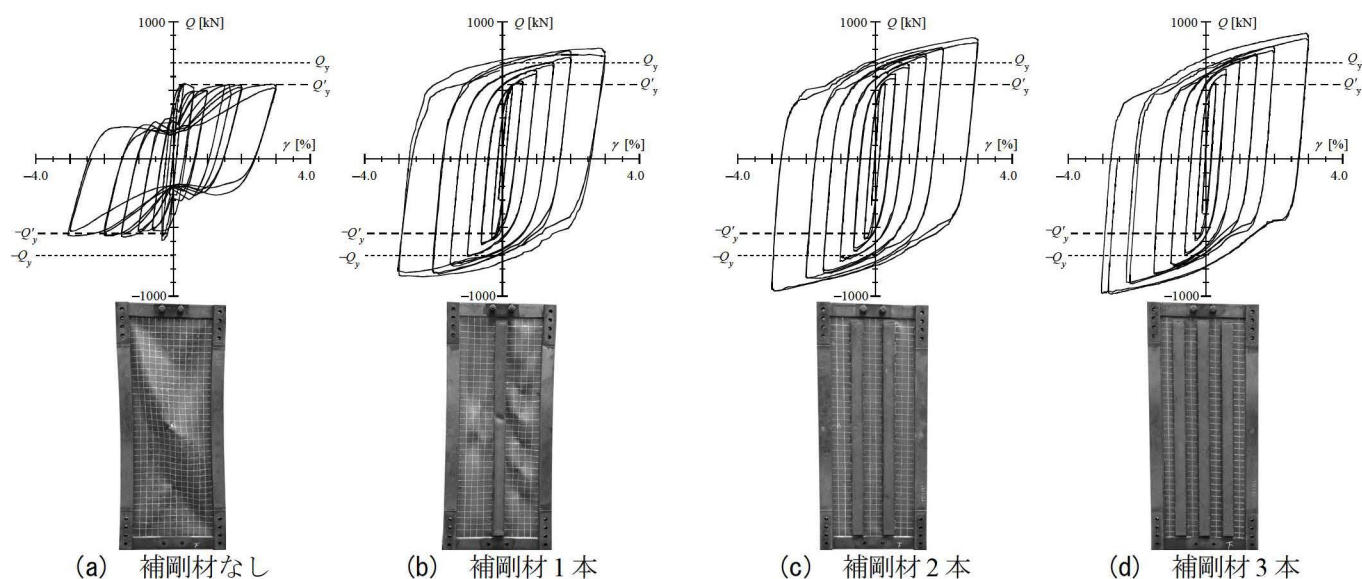


図3 荷重－変形角関係とせん断パネルの損傷状況

きた。その後、補剛材なしは、 $+0.3\%$ サイクル時にせん断座屈が見られ、最大耐力に至り緩やかに耐力が低下した。その後の繰り返し変形に対しては、張力場の形成に伴う耐力上昇は見られるが、サイクル毎の最大耐力は低下した。また、荷重の正負が入れ替わる付近で、せん断パネルの座屈変形の向きが変わるため、グラフにも大きな耐力低下が見られた。

これに対し、補剛材を取り付けた試験体では、 $\pm 1.5\%$ まで安定した履歴曲線を示し、 $\pm 1.5\%$ 時に降伏せん断耐力 Q_y に到達している。せん断耐力への到達が遅いのは、縦枠材を兼ねるパネル部も耐力に算入していたためであると考えられる。ここで全幅有効とした降伏せん断耐力は $Q_y = 703[\text{kN}]$ であり、既往の実験に基づき、降伏せん断耐力 Q_y の 70% を設計用降伏せん断耐力 ($547[\text{kN}]$) としている。一方、縦枠材を兼ねるパネル部を除いた降伏せん断耐力は $Q_y = 543[\text{kN}]$ となり、設計用降伏せん断耐力 $0.7Q_y$ と近い値となっている。したがって、実際には $0.7Q_y$ 、すなわち縦枠材を除いた Q_y の時点でせん断降伏に至っているものと考えられる。

補剛材の本数について比較すると、本数が多い方が耐力はわずかに高いが、履歴挙動の差は小さいことが分かる。したがって、補剛材は履歴挙動の安定化によるエネルギー吸収に効果的であり、 $\pm 3.0\%$ までは履歴挙動にほとんど違いがないと言える。

荷重後のせん断パネルの損傷状況を図3の下側に示す。補剛材なしの場合、パネル部が大きく面外に変形し、 $\pm 3.0\%$ 終了時にはパネル中央に亀裂が生じた。一方、補剛材を設置した試験体では、 $\pm 3.0\%$ サイクルまで面外変形が抑えられ、補剛材の効果が確認できた。特に補剛材1本では中央の補剛材を境に左右で面外変形が分断されて生じていた。ただし、補剛材1本は最終的に補剛材を含めてせん断座屈に至っている。

本研究では、せん断パネルの繰り返し変形性能として $\pm 3.0\%$ の1サイクル目までせん断座屈を生じずに耐力を保つことを目標とする。補剛材1本は $\pm 3.0\%$ の2サイクル目に最大耐力の 80% を下回ったために荷重を終了した。これに対して、補剛材2本は10サイクル目までせん断座屈を生じずに耐力を保つことができた。また、補剛材3本はジャッキの最大容量に達したため $\pm 3.0\%$ の2サイクル目に荷重を終了したが、せん断座屈や耐力低下がみられなかったため、その後も履歴は安定できたものと推測される。したがって、履歴挙動とパネルの損傷状況を考慮すると、補剛材は1本以上必要であると言える。

4. 縦枠材と補剛材に必要な捩れ剛性

4.1 解析概要

本章では、有限要素法解析プログラム ABAQUS6.14 を用いて弾塑性解析を行い、まず実験結果の再現を試みた上で、捩れ剛性が力学挙動に与える影響について検討する。解析モデルを解析モデルを図4に示す。図(a)は解析で使用した境界条件であり、図(b), (c)は補剛材なしと1本の座屈固有値解析の結果である。解析モデルは、3次元のソリッドモデルとし、要素タイプは6面体の8節点とした。メッシュは、パネル部の長辺方向を80分割、短辺方向を35分割、厚さ方向を2分割とした。パネル部、縦枠材、横枠材、補剛材は一体とし、縦枠材と横枠材の上部と下部をそれぞれパネル中央で拘束した。鋼材の材料特性は、引張試験結果を体積一定の仮定の下で真応力－対数ひずみ関係に置換して用いる。荷重は上部3点を剛体要素で連結し、中央の代表接点に水平方向に強制変位を与える。弾塑性解析で用いる初期不整合は、図4(b), (c)に示すような座屈モードをパネル板厚の 1.0% として与えている。

4.2 実験結果とFEM解析の比較

4.2.1 荷重－変形関係

実験と解析における荷重－変形関係を図5に示す。ここ

で全幅有効とした降伏せん断耐力は $Q_y=703$ [kN], 縦枠材を兼ねるパネル部を除いた降伏せん断耐力は $Q_y'=543$ [kN], 縦枠材と補剛材を兼ねるパネル部を除いた降伏せん断耐力は $Q_y''=467$ [kN] であり, それらの計算値を図中の破線にて示している. 実験と解析を比較すると, 補剛材なし, 1本とも降伏後の二次剛性に差が見られるものの, 弾性剛性は等しく, 特に補剛材1本は降伏せん断耐力も等しいことが分かる. 降伏後の二次剛性の差については, 繰り返し履歴曲線から抽象した骨格曲線と単純載荷との違いによる影響が考えられる. 一方, 降伏せん断耐力に着目すると, 全幅有効とした降伏せん断耐力 Q_y は実験値や解析値よりも高く, 縦枠材を兼ねるパネル部を除いた降伏せん断耐力 Q_y' の方が近い値を示している. したがって, 降伏せん断耐力 Q_y を算出する際のパネル部の断面積 A_p は, 縦枠材を兼ねるパネル部を除いて算出する必要があると考えられる.

4.2.2 解析モデルの考察

補剛材なしと1本のせん断変形角4.0%におけるパネル部の変形状態とミーゼス応力分布とせん断パネルの損傷状況の比較を図6に示す. 図の左側には枠材と補剛材を除いたパネル部だけの弾塑性解析結果を示し, 右側には実験より得られたせん断パネルの損傷状況を示す. 補剛材なしと1本を比較すると, 補剛材があることで面外変形が抑えられていることが分かる. また, 解析結果と損傷状況は同様の変形を示しており, パネル部だけの結果をみても縦枠材と補剛材と重なる部分は降伏耐力に達していないことが分かる. したがって, 応力分布からも降伏せん断耐力 Q_y を算出する際のパネル部の断面積 A_p は, 縦枠材と補剛材を兼ねるパネル部を除いて算出する必要があると考えられる.

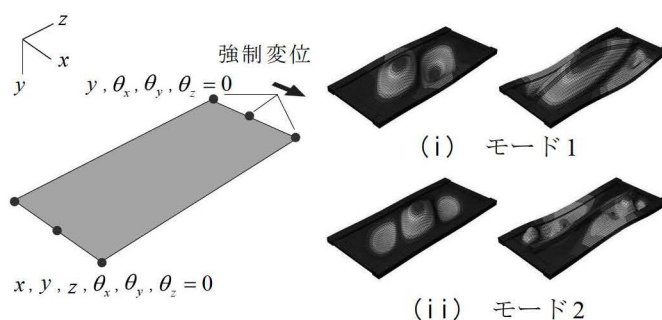
4.3 辺長比と振り定数の影響

4.3.1 解析パラメーターと評価方法

最後に, 実験結果との対応が確認された解析モデルを用い, 幅厚比 b_1/t (38.33) は一定として辺長比 b_1/a が異なる3種類の解析モデルを作成し, 縦枠材と補剛材に最低限必要な振り定数 J を求める. 縦枠材と補剛材は板材とし, パラメーターは辺長比0.16, 0.24, 0.32の3種類と縦枠材と補剛材の厚さ t とする. 辺長比0.16は実験で使用したモデルと同様である. 板材の幅を B , 厚さを t とすると縦枠材と補剛材の振り定数 J は次式で表せる.

$$J = \frac{1}{3} B t^3 \quad \dots (3)$$

解析の評価基準を図7に示す. 実験では, せん断パネルの繰り返し変形性能として $\pm 3.0\%$ の1サイクル目までせん断座屈を生じずに耐力を保つことを目標とした. したがって, 解析より得られる荷重-変形関係が, せん断変形角 $\pm 3.0\%$ の1サイクル目とほぼ等しい片振幅6.0%まで耐力低下を生じず, かつ降伏せん断耐力 Q_y 以上であるこ



(a) 境界条件 (b) 補剛材なし (c) 補剛材1本

図4 解析モデルと座屈固有値解析結果

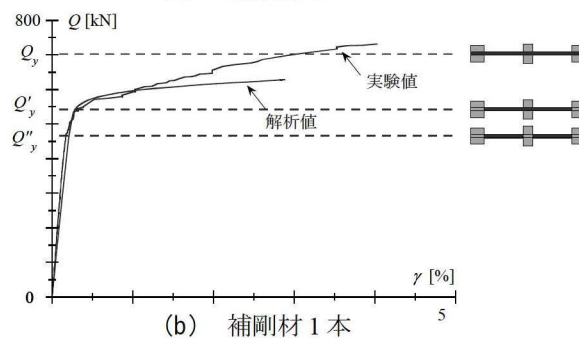
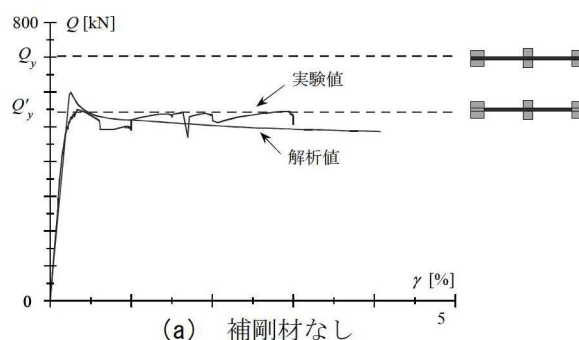


図5 実験値と解析値の比較

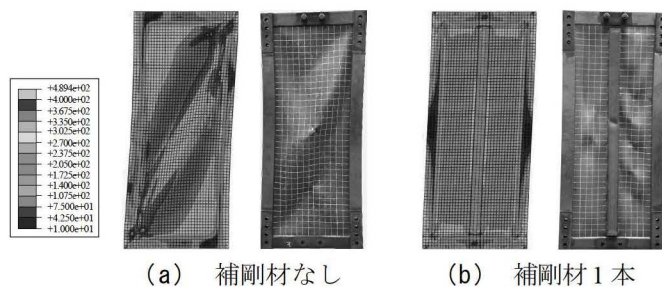


図6 弾塑性解析結果とパネルの損傷状況

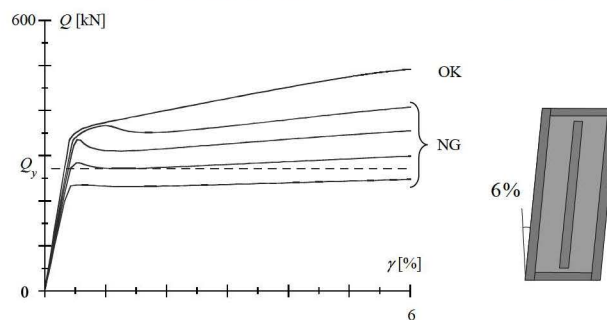


図7 解析の評価基準

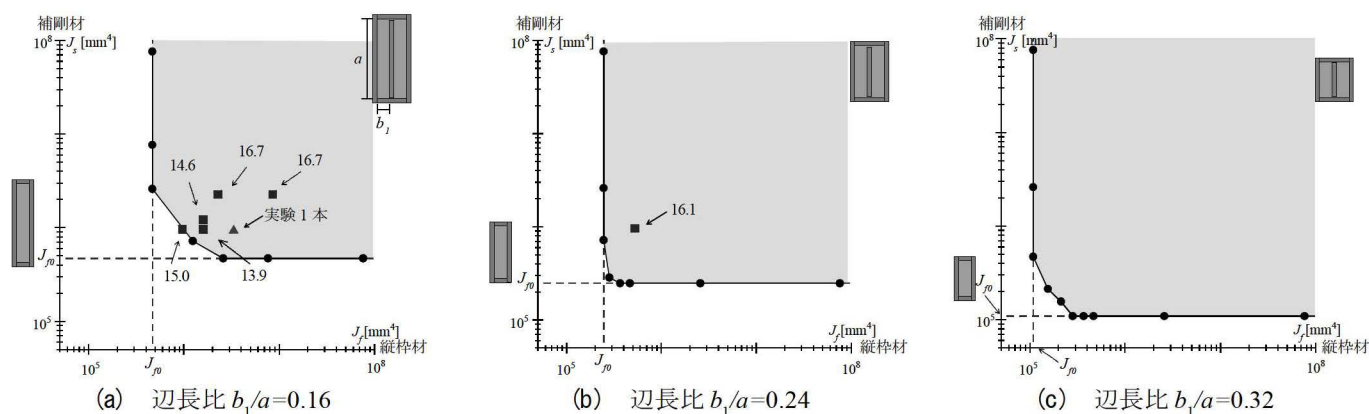


図8 補剛材と縦枠材に必要な振り定数(幅厚比 $b_1/t=38.33$)

とを目標とし、それを満たす振り定数を検討する。

4.3.2 解析結果と考察

解析より得られた結果を考察する。辺長比 b_1/a (0.16, 0.24, 0.32) の3種類と縦枠材と補剛材の振り定数を変化させて解析を行った結果を図8に示す。左から辺長比0.16, 0.24, 0.32であり、縦軸は補剛材の振り定数 J_s 、横軸は縦枠材の振り定数 J_v である。また、各モデルのパネルの幅を半分としたときに縦枠材に必要な振り定数を基準振り定数 J_{f0} とし、破線で示す。赤色の三角は本実験で用いた振り定数を示し、青色の四角は以前行われた実験³⁾などで用いた振り定数を示している。これらのプロットは異なる幅厚比を持つため、図中に数値を示している。なお、プロットした実験結果は、全て目標とした変形性能を満足している。

縦枠材と補剛材に基準振り定数 J_{f0} を与えて解析したところ、補剛材は縦枠材と同様の振り定数では目標とする変形性能を満足しないということが分かった。図(a)では補剛材は縦枠材のおおよそ5倍の振り定数が必要であった。また、縦枠材と補剛材は少なくとも基準振り定数 J_{f0} 以上は必要であることが分かる。よって、黄色で示す範囲内であれば縦枠材と補剛材の振り定数を自由に調整できると考えられる。

これらの結果を用いて実験との比較を行う。四角の実験値は幅厚比は異なるが、図(a), (b)共に解析結果を満足しており、解析結果が妥当性であることが分かる。また、図(b), (c)は図(a)を基準として辺長比が1.5倍, 2.0倍となり、破線で示す基準振り定数は約1/2倍, 約1/4倍となっている。つまり、高さが半分になれば必要となる基準振り定数は $1/2^2$ 倍となっていることから基準振り定数は次式で表せる。ここで基準振り定数を J_{f0} 、横枠材を除いたパネルの高さを a とする。

$$J_{f0} = 0.24a^2 \quad \dots (4)$$

このように、横枠材を除いたパネルの高さ a を用いて簡易的に基準振り定数 J_{f0} を算出できることが分かる。

5. まとめ

本研究では、せん断パネルにおける外枠材と補剛材の組合せによる影響を把握するため、FEM解析による検討

を行った。以下に得られた結果をまとめ。

- [1] 耐震パネルとして用いる場合は補剛材1本で十分変形性能を確保できる。しかし、ダンパーとして用いる場合に大変形時の繰返し変形に対してもせん断座屈を生じずに耐力を保つためには、補剛材は2本以上必要である。
- [2] 弾塑性解析の結果より、降伏せん断耐力 Q_y は枠材、あるいは枠材と補剛材を除いたパネル断面より算出する必要があることが分かった。
- [3] 縦枠材と補剛材の振り定数を変化させて解析を行い、目標変形性能の確保に必要な振り定数の範囲を示した。また、基準振り定数 J_{f0} は横枠材を除いたパネルの高さ a を用いて簡易的な式で表せることを示した。

参考文献

- 1) 田中清ほか：低降伏点鋼を用いた制振パネルダンパーの静的履歴減衰性能に関する研究，日本建築学会構造系論文集，pp.159-166，1998.7
- 2) 五十嵐規矩夫ほか：補剛材付きせん断パネルダンパーの繰返し履歴挙動と変形性能(その1～3)，日本建築学会大会学術講演梗概集，pp.1021-1026，2010.9
- 3) 五十嵐規矩夫ほか：管状補剛材付きせん断パネルダンパーの繰返し載荷挙動(その1～2)，日本建築学会学術講演梗概集，pp.1027-1030，2010.9
- 4) 鈴木敏郎ほか：平面内にせん断力を受ける管状体平板の力学性状(I～III)，日本建築学会学術講演梗概集，pp.943-948，2008.9
- 5) 岩崎桃子，吉敷祥一ほか：補剛材の本数を変えたせん断パネルの繰返し載荷実験，関東支部研究報告集，pp.489-492，2017.3

*1 東京工業大学大学院 修士課程

*2 東京工業大学 准教授・博士(工学)

*3 新日鉄住金エンジニアリング 博士(工学)

*4 新日鉄住金エンジニアリング

*5 愛知工業大学 教授・博士(工学)