

山形鋼筋かい端接合部に対する乾式補強に関する実験 その 3 実験結果と補強設計

2. 構造-10. 鉄骨構造-s. ブレース

正会員 ○ 梶間夏美*1

// 吉敷祥一*2

// 薩川恵一*3

山形鋼 筋かい端接合部 耐震補強
高力ボルト 乾式補強 最大耐力

1. はじめに

前報(その2)に引き続き、本報(その3)では追加実験の結果を含めた検討を行う。さらに、実験結果に基づいた、並列付加材による乾式補強設計(仕様)を示す。

2. 実験結果と考察

2.1 荷重-変形関係と破断状況

実験より得られた接合部の荷重-変形関係を図1に、破壊形式を図2に示し、これら実験結果を表1にまとめる。また、前報(その1)¹⁾の実験結果(I期)も追加実験(II、III期)とともに図1にプロットする。図1中、第一既存ボルト孔欠損部における有効断面破断を●、第一連結ボルト孔欠損部における有効断面破断を○、既存材のはしめけ破断を□にて示す。また、試験対象でない上側の接合部の溶接部分周辺から破断した場合は、その時点を×にて示している。なお、高力ボルトのすべりが発生した部分を図から削除し、初期すべり発生点を△で示している。また、図中の灰色線は無補強の試験体であり、既存ボルトの本数ごとに比較する。

【75-3 シリーズ (既存ボルト 3 本)】

途中で載荷を中断した試験体(I75-3-90、I75-3L(-30))を除いた既存ボルト3本の75-3シリーズでは、無補強は第一既存ボルト孔周辺に亀裂が発生して有効断面破断に至っている(図2(a))。一方、補強を施すと第一既存ボルト孔周辺に亀裂が発生して破断に至る場合(図2(a))と、第一連結ボルト孔周辺に亀裂が発生して破断に至る場合(図2(b))とがあった。

最大耐力については補強を施すことによって程度の大小はあるものの、いずれも無補強に比べて上昇した。それぞれ無補強からの耐力上昇は、19~33%である。また、連結ボルトをより前方に配置させた試験体ほど耐力上昇が大きい。さらに、破壊状況も第一連結ボルト孔周辺から亀裂が生じるものが見られ、既存ボルト孔と無関係に破壊面が決まっていると推察されるものが多くなっている。

【75-2 シリーズ (既存ボルト 2 本)】

既存ボルト2本のII期では、はしあき距離を40mmとす

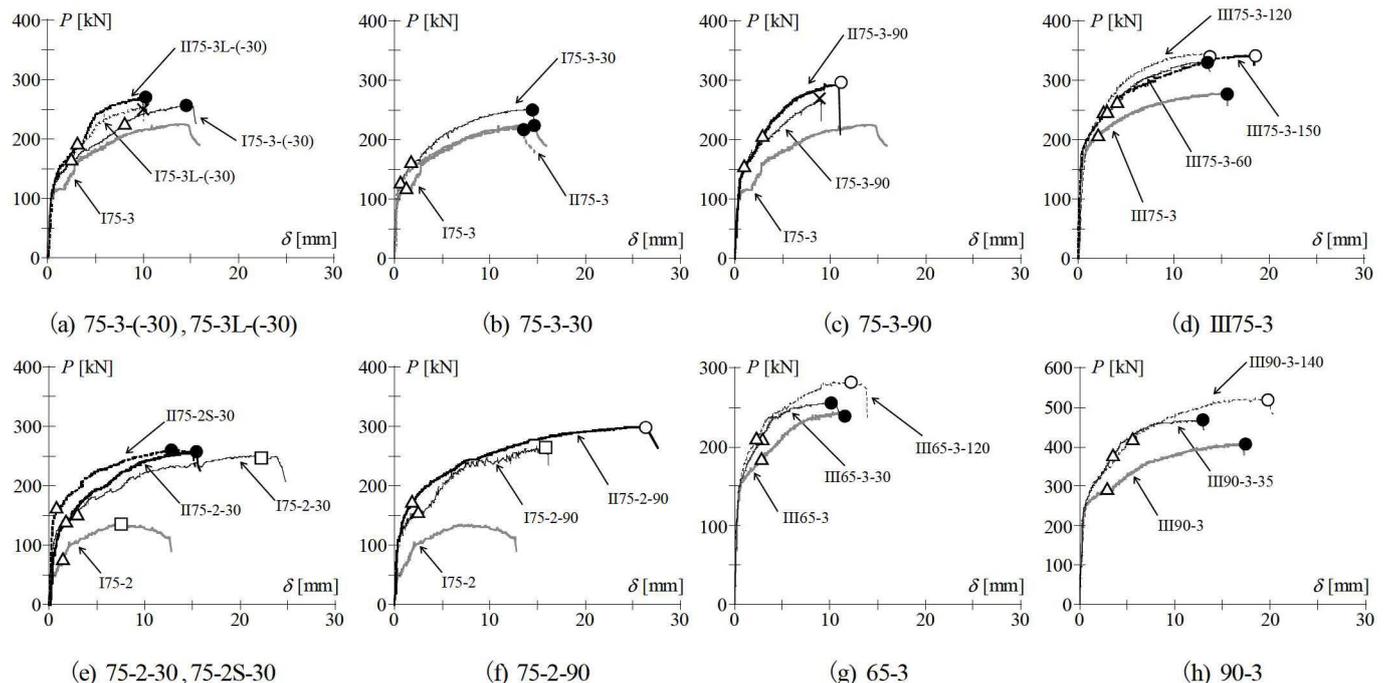
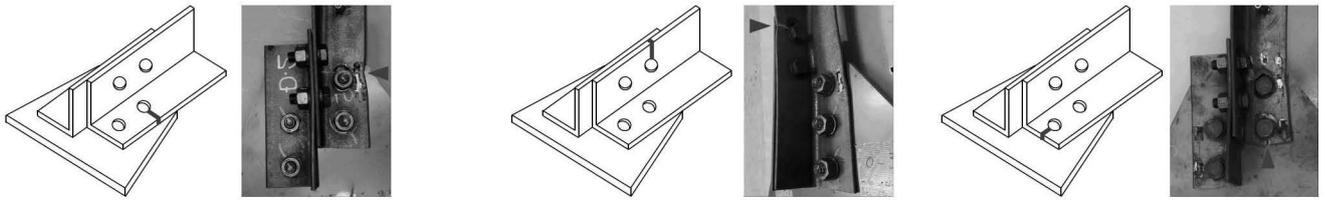


図1 接合部の荷重-変形関係



(a) 既存ボルト孔欠損部の有効断面破断 (b) 連結ボルト孔欠損部の有効断面破断 (c) 既存材のはしぬけ破断

図 2 破壊形式

ることにより、すべて有効断面破断に至った。ただし、第一連結ボルト孔周辺に亀裂が発生した II75-2-90 を除けば、いずれも第一既存ボルト孔周辺に亀裂が発生して破断に至っている。

最大耐力については、既存ボルト 3 本と同様にいずれの補強でも耐力上昇が確認された。無補強からの耐力上昇は、89～122% である。なかには無補強の 2 倍近くまで耐力が上昇しているものもあるが、最終的な最大耐力は II 期の 75-3 シリーズと同程度であった。

【65-3、90-3 シリーズ (既存ボルト 3 本)】

65-3、90-3 といった断面の異なるシリーズについても、第一既存ボルト孔周辺に亀裂が発生して破断に至る場合(図 2(a))と、第一連結ボルト孔周辺に亀裂が発生して破断に至る場合(図 2(b))があった。

最大耐力については、L75x6 と同様に補強を施すことによる耐力上昇が確認できた。無補強からの耐力上昇は、65-3 シリーズでは 5～16% 程度、90-3 シリーズでは 15～29% 程度であった。

2.2 補強後の突出脚有効率

ここでは、補強による耐力上昇の効果を、突出脚有効率を用いて比較する。実験より得られた突出脚有効率を図 3 に示す。図中の実験結果は破断位置によってプロットの種類を変え、第一既存ボルト孔欠損部における有効断面破断を●、第一連結ボルト孔欠損部における有効断面破断を○、はしぬけ破断を□、载荷を途中で中断したものを×で表している。実験値の突出脚有効率 γ_{exp} は、最大耐力 P_u を次式を用いて変換することで得られる。

$$\gamma_{exp} = \frac{P_u \cdot 10^3}{\sigma_u \cdot t \cdot d} - \left(1 - \frac{\phi}{d} - \frac{t}{d}\right) \quad \dots (5)$$

また、鋼構造接合部設計指針²⁾のボルト本数で規定される突出脚有効率を破線で示す。補強後の突出脚有効率は x が大きくなるにつれて上昇し、特に III75-3-120、III75-3-150、III90-3-140 は突出脚有効率が 1.0 を超えるような大きな補強効果を得られている。また、第一連結ボルト孔周辺に亀裂が発生して有効断面破断に至った試験体の突出脚有効率は、すべて 5 本ボルト相当となっている。

2.3 補強後の有効断面破断耐力の評価式

前報(その 2)の 3.3 節にて想定した有効断面における破断耐力と実験結果を比較し、耐力評価式を検討する。ただし、材料強度の影響を考慮し、耐力は突出脚有効率に変換して検討する。前報(その 2)の(3)式と実験における

表 1 実験結果一覧

試験体	x [mm]	cal P_u [kN]			exp P_u [kN]	γ_{exp} [-]	破壊形式
		筋かい有効断面	はしぬけ	ボルト破断			
I75-3		234	238	272	225	0.44	(a)
I75-3(-30)	-30	267	396	454	257	0.60	
I75-3L(-30)*	-30	267			260	0.61	中断
I75-3-30	30	267			251	0.57	
I75-3-90*	90	302			267	0.65	中断
I75-2		194	158	182	135	0.07	
I75-2-30	30	267	317	363	252	0.57	
I75-2-90	90	302			271	0.67	
II75-3		234	238	272	220	0.41	(a)
II75-3L(-30)	-30	267	396	454	268	0.65	
II75-3-90	90	302			293	0.78	(b)
II75-2		194			211	182	
II75-2-30	30	267	422	363	255	0.59	
II75-2S-30	30	267			260	0.61	(a)
II75-2-90	90	302	299	0.81	(b)		
III75-2		194	211	182		221	0.39
III75-3		234	317	272	279	0.67	
III75-3-60	60	286	528	454	332	0.93	(a)
III75-3-120	120	302			345	0.99	
III75-3-150	150	302			342	0.98	(b)
III65-3		176	288	272	243	0.67	
III65-3-30	30	220	480	454	255	0.73	
III65-3-120	120	254	282		0.88	(b)	
III90-3		297	420		423		406
III90-3-35	35	371	700	705	467	0.90	(a)
III90-3-140	140	423			522	1.09	

* は途中で载荷を中断した試験体

最大耐力との比較を図 4 に示す。図中の実験結果に対する表現は図 3 と同様である。

65-3 シリーズ(図 4(b))と 90-3 シリーズ(図 4(c))では実験結果と(3)式はよく対応しているが、試験体数の多い 75-3、75-2 シリーズ(図 4(a))では(3)式を下回る実験結果が、特に $x=90\text{mm}$ 以下の試験体で多く見られる。これは有効断面 B のような既存ボルトと連結ボルト孔が連成している有効断面は、不可避な無効部分が発生するためであると考えられる。そこで、有効断面 B については、不可避な無効長さとして $0.2d$ を考慮し、補強後の有効断面破断耐力の評価式として、次式を提案する。

$$P_u = \min\{A P_u, B P_u - 0.2 \cdot d \cdot t \cdot \sigma_u\} \quad \dots (6)$$

(6) 式による計算結果を破線にて図 4 中に示す。有効断面破断に至った試験体については、(6) 式によって実験結果の下限値をおおよそ捉えており、補強後の有効断面破断耐力の評価方法として有用であると言える。また、第一連結ボルトが後方 30mm の位置に配置されていても、本評価式との対応は良好である。

次いで、保有耐力接合の条件を満たすのに必要な突出脚有効率を図中に示し、保有耐力接合の条件を満たすのに必要な距離 x を検討する。ここで保有耐力接合の条件を満たすのに必要な突出脚有効率は、保有耐力接合の条

件式を突出脚有効率について整理することで得られる³⁾。

$$\gamma \geq (\alpha \cdot YR_F - 1) \cdot (2 - \frac{t}{d}) + (1 - \frac{\phi}{d}) \dots (7)$$

ここで、 YR_F : 鋼材の基準強度の降伏比
 α : 接合部係数(1.2)

本実験結果により得られた突出脚有効率をみると、試験体II75-2-90、II75-3-90、III75-3-120、III75-3-150、III65-3-120、III90-3-140については、基準強度の降伏比に基づいた保有耐力接合の条件を満足している。これらの試験体は、すべて第一連結ボルト孔周辺に亀裂が発生して破断に至った試験体である。したがって、保有耐力接合の条件を満たすためには、第一連結ボルト孔欠損部における有効断面破断に至るような距離 x より前方から補強材を取り付ける必要があると言える。なお、有効断面破断以外の破壊形式(はしめけ破断等)は防止されていることが前提である。

2.4 ひずみ分布

次いで、ボルト孔周辺のひずみについてみる。既存ボルト孔と連結ボルト孔周辺のひずみ分布を図5に示す。また、両者のボルト孔周辺における最大ひずみ ϵ_{max} と最大荷重 P_{max} を x との関係として図6に示す。

図5中のひずみ分布は、荷重レベルによってプロットを変化させ、弾性時($P=50kN$)のひずみを○、接合部の降伏耐

力に達した時のひずみを●、最大耐力に達した時のひずみを●とする。なお、ひずみ分布は、荷重レベルごとに最も大きいひずみ ϵ_{max} によって無次元化して示している。

ひずみ分布をみると、弾性時の既存ボルト孔周辺では、いずれも直線分布を描く。一方、降伏耐力時と最大耐力時の既存ボルト孔周辺をみると、第一ボルト孔周辺にひずみが集中している。補強材をより前方から取り付けたIII75-3-120とIII75-3-150では、最大耐力時に第一連結ボルト孔周辺にひずみが集中していることが分かる。また、結果的にはこれらの試験体では第一連結ボルト孔周辺に亀裂が発生して有効断面破断に至っている。

次いで、図6中では破壊形式ごとにプロットを変えており、第一既存ボルト孔欠損による有効断面破断を●、第一連結ボルト孔欠損による有効断面破断を○として示す。ここでは、最大耐力に達した時のひずみを ϵ_{max} とし、最大耐力に達した時の無補強のひずみ ϵ_{max0} と比較する。

$\epsilon_{max} / \epsilon_{max0} - x$ 関係をみると、 x が大きくなるに伴って第一既存ボルト孔周辺のひずみが低減していることが分かる。これに対して、第一連結ボルト孔周辺のひずみは増加している。また、図4における破壊モードの変化点(図6(a)中の縦破線)である $x=120$ 程度では既存・連結の第一ボルト孔周辺のひずみはほぼ同等であり、評価式の妥当性も

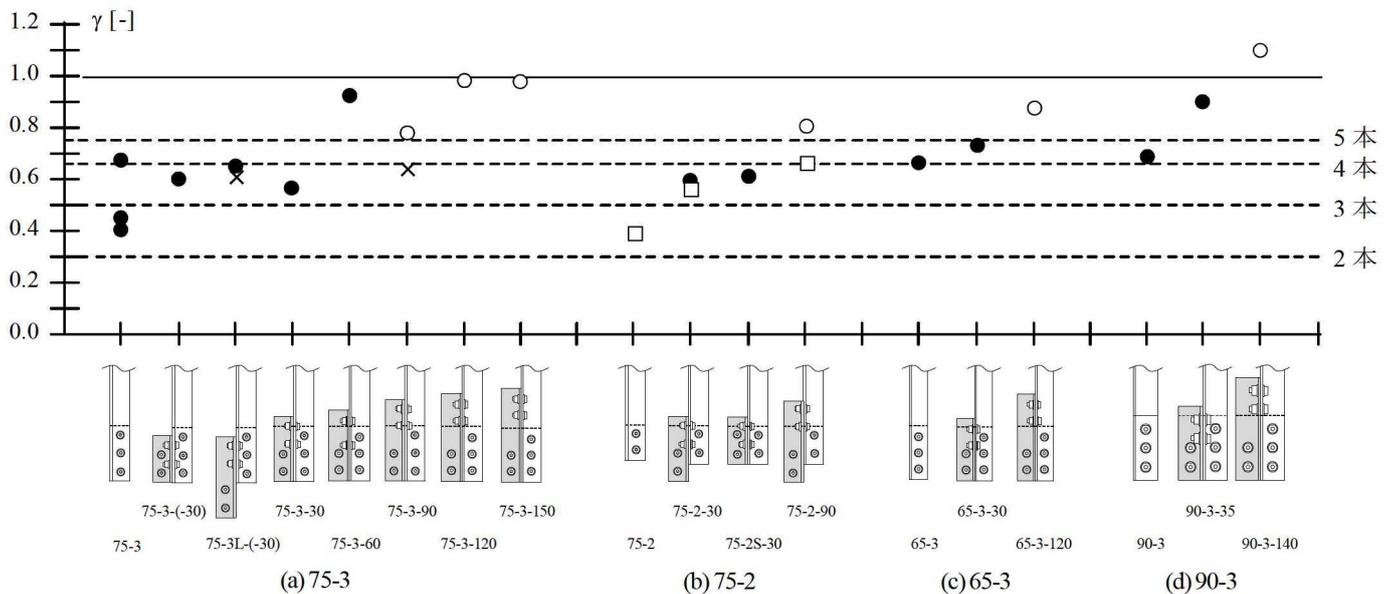


図3 突出脚有効率

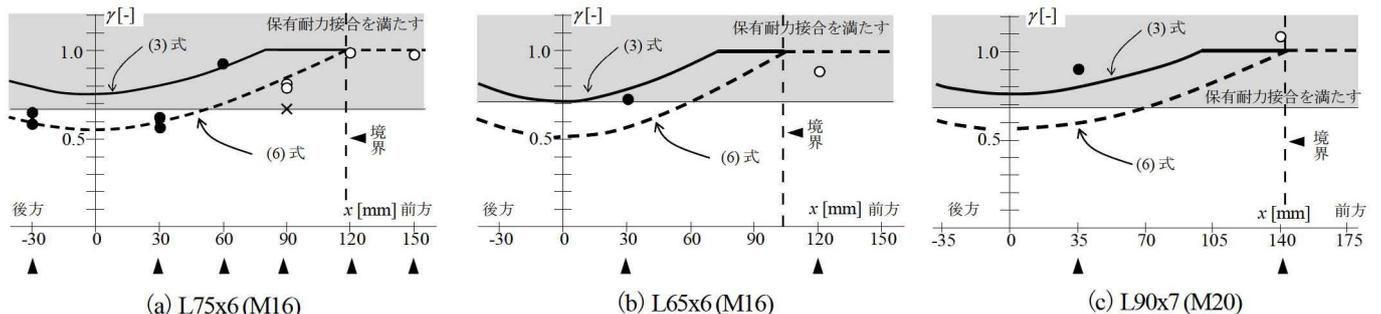


図4 突出脚有効率と破壊モードに基づく評価式との比較

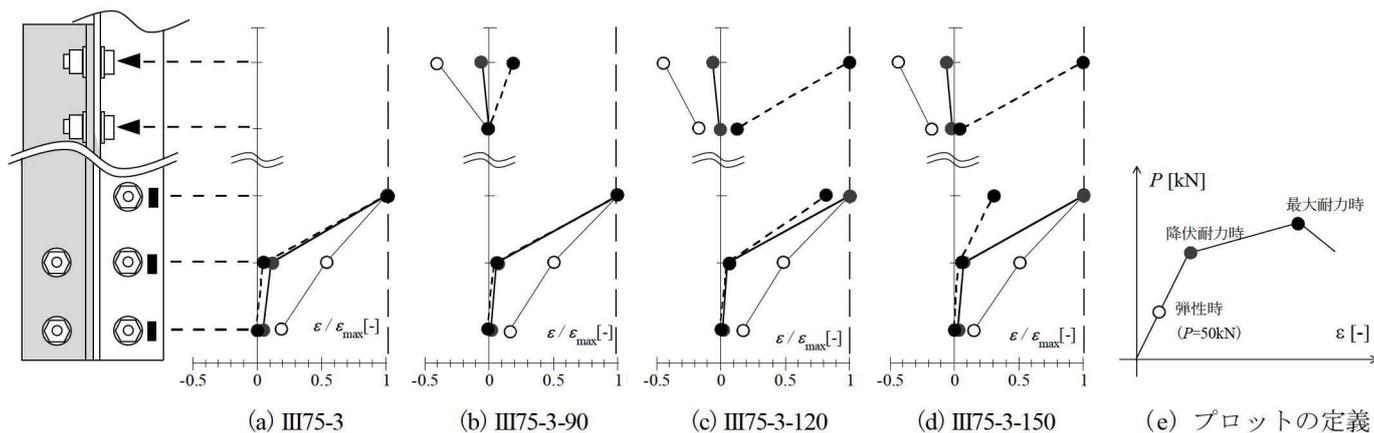


図5 異なる荷重レベルにおける既存ボルト孔と連結ボルト孔周辺のひずみ分布

確認できる。また、第一既存ボルト孔周辺のひずみが低減した分、第一連結ボルト孔周辺のひずみは増加している。このことから、第一連結ボルトが新たな応力伝達経路となって、第一既存ボルトの応力負担を低減していることが分かる。

さらに、 $\epsilon_{\max} / \sigma_{\max}$ - x 関係と P_{\max} / σ_{\max} - x 関係を比較してみると、図6(a)の第一既存ボルト孔周辺のひずみが低減するに伴って、連結ボルトが伝達する応力も大きくなるため、図6(b)では耐力上昇といった補強効果が大きくなっている。

3. 並列付加材による乾式補強設計法

最後に、並列付加材による乾式補強設計法について示す。前節までに得られた実験結果より、保有耐力接合の条件を満足する乾式補強設計を下記に示す。

- (1) 既存ボルトは、2本あるいは3本を対象とする。
- (2) 連結ボルトと既存ボルトと補強ボルトの本数は、それぞれ2本以上とする。
- (3) 既存ボルト孔と無関係に連結ボルト孔欠損による有効断面破断に至らしめるため、(1)式と(2)式に不可避な無効突出脚を考慮した評価式の交点となる距離 x より前方に第一連結ボルトを配置する。
- (4) 以上の仕様により、有効断面破断耐力は、第一連結ボルト孔欠損のみを考慮して求められる。

4. まとめ

本研究では山形鋼筋かいに対して乾式の補強方法を提案し、補強効果を載荷実験により確認した。本実験で得られた結果を以下にまとめる。

- [1] 補強材を連結ボルトを介して既存材に取り付けることにより、いずれの試験体においても耐力上昇(補強効果)が得られた。
- [2] 連結ボルトを第一既存ボルトより前方に配置するほど、補強後に大きな耐力上昇が得られた。
- [3] 第一既存ボルトと第一連結ボルトの距離 x によって決まる有効断面破断耐力を導き、実験結果に基づく不可避な無効突出脚部を考慮した耐力評価式((6)式)を提案した。

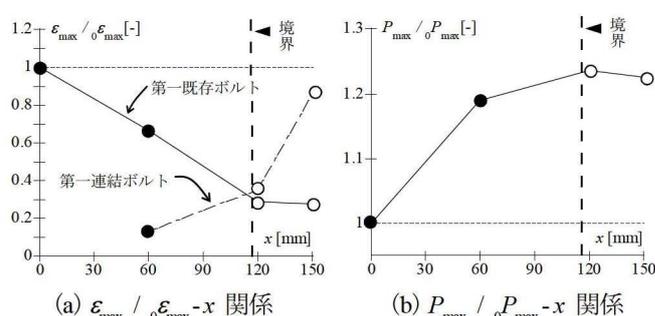


図6 ひずみ低減率と最大耐力増加率の相対関係

[4][3]で提案した有効断面破断耐力の評価式より、およそ実験結果における最大耐力を評価できることが分かった。また、ボルト孔周辺のひずみ分布に基づき、評価式に基づく破壊モードの変化を説明できることを示した。

[5] 保有耐力接合の条件を満たすためには、(6)式において破断耐力が第一連結ボルト孔欠損による有効断面(図2(b))で決まればよい。また、実験に基づく補強設計法として、各部の仕様を整理した。

謝辞

本研究は日本鋼構造協会 平成28年度 鋼構造研究助成事業による成果です。ここに記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 梶間夏美ほか：山形鋼筋かい端接合部に対する乾式補強に関する実験，関東支部研究報告集，2017.3
- 2) 日本建築学会：鋼構造接合部設計指針，2012
- 3) 吉敷祥一，河野由佳：山形鋼高力ボルト接合部に対する隅肉溶接の付加による補強，日本建築学会構造系論文集，第719号，pp.111-121，2016.1

*1 東京工業大学大学院 修士課程

*2 東京工業大学 未来産業技術研究所 准教授・博士(工学)

*3 愛知工業大学 教授・博士(工学)