

平成30年6月14日現在

機関番号：37111

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2015～2017

課題番号：15K06314

研究課題名(和文) 環境負荷の低減と高耐震性を目指した鋼・コンクリート混合構造骨組の柱梁接合部の開発

研究課題名(英文) Developing of structural desing of beam-to-column connections of steel and concrete composite frames aimed for reduction of the environmental load and the high quake resistance

研究代表者

堺 純一 (Sakai, Junichi)

福岡大学・工学部・教授

研究者番号：30215587

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,800,000円

研究成果の概要(和文)： 著者らは、十字形鉄骨とコンクリートで構成された八角形断面の鋼・コンクリート合成柱材(SC柱材)が優れた耐震性能を発揮することを既に明らかにしている。本研究の目的は、このSC柱の耐震性能を活かしながら、高耐震性と省人化・省力化を実現できるSC柱と鉄骨梁で構成された柱梁接合部の設計法を開発することである。

本研究では、柱梁接合部の部分モデル試験体および十字形骨組の載荷実験を行い、これらの実験結果を分析することにより、優れた耐震性能を保持できる柱梁接合部のディテールの設計法を提案した。本接合部のディテールは施工性にも優れており、本研究目的を達成している。

研究成果の概要(英文)： Authors have already clarified that steel and concrete composite column of an octagonal section shows superior earthquake proofing performance. A purpose of this study is developing the design method of beam-to-column connection of SC columns and steelbeam which can realize labor saving while making use of the earthquake-resistant performance of this SC columns.

Authors suggested the design method of the detail of beam-to-column connections that could maintain superior earthquake proofing performance by testing the loading of the partial model examination body of the beam-to-column connections and the cross framework in this study, and analyzing these laboratory findings. The detail of this connction is superior in construction characteristics and achieves this study purpose.

研究分野：建築構造

キーワード：耐震性能 載荷実験 鋼コンクリート合成構造 柱梁接合部 SC柱 鉄骨梁

1. 研究開始当初の背景

地震国である我が国においては、優れた耐震性能を維持しながら建築物の建設に伴う環境負荷を低減させることを目的として、消費エネルギーの低減及び省人化・省力化された構造部材および骨組を開発することが望まれている。優れた耐震性能を保持する構造として鉄骨鉄筋コンクリート構造（以下SRC構造と略す）が挙げられるが、鉄骨の加工工事に加え、鉄筋の配筋、コンクリート打設のための型枠工事などが必要であり、鋼構造や鉄筋コンクリート（RC）構造に比べ工事作業量が多くなるなど解決すべき課題がある。

筆者らは、SRC構造の特徴である高耐震性能のさらなる向上と建設工事における省力化・省人化を目指した鋼・コンクリート合成柱（SC柱）を用いた構造システムを開発することを目的として、図1に示すような、十字鉄骨を用いた八角形断面の鋼コンクリート合成柱材（SC柱材）の耐震性能について調べてきた（例えば引用文献）。実験の結果、本SC柱材はSRC柱材と同等以上の優れた構造性能を保持していることを明らかとしてきた。本SC柱材は、十字鉄骨を用いることで、鉄骨に囲まれたコンクリートが横拘束されるため高い拘束効果が期待できる。図2に一例として、

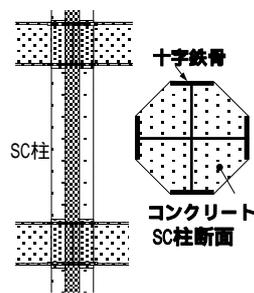


図1 SC柱断面

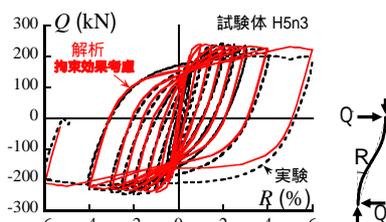


図2 実験結果と解析の比較

一定軸力（断面圧縮耐力の30%の圧縮軸力）と繰り返し水平力を載荷したときの柱材の実験挙動と弾塑性解析の比較を示す。鉄骨によるコンクリートの拘束効果を適切に考慮した弾塑性解析により、実験結果を精度良く評価できることを明らかとしている。

2. 研究の目的

本SC柱材は、主筋およびせん断補強筋の配筋作業を必要とせず、さらに、コンクリート打設用の型枠も簡素化できるため、建設施工の面で省人化・省力化が進められる特徴もある。

このような優れた耐震性能を保持する構造部材を実用化する上で、部材の性能を十分に発揮させる柱梁接合部ディテールを検討しておく必要がある。そこで、本研究では、このSC柱材と鉄骨梁で構成された混合構造骨組を対象として、部材間の応力伝達がスムーズに行える柱梁接合部のディテールについて調べる。柱鉄骨フランジ幅を梁鉄骨フランジ以上にしておけば、従来の梁鉄骨と柱鉄骨の溶接接合法で行えるが、SC柱の断面設計の自由度を考えると、柱の鉄骨フランジ幅が梁幅より小さくなることも考えられる。このような場合の梁鉄骨端部の接合法を検討し、製作が簡単で応力伝達がスムーズにできる接合部ディテールの提案を行うことを本研究の目的としている。

3. 研究の方法

このSC柱と鉄骨梁で構成された柱梁接合部および骨組の設計法を提案するために、接合部のディテールの検討を行うとともに、柱梁接合部の終局せん断耐力の評価法および骨組の設計法を検討した。

(1) ディテールの違いが柱梁接合部の応力伝達能力に及ぼす影響

SRC構造の鉄骨の柱梁接合部では、H形鋼梁フランジの応力を柱に確実に伝えるために、一般に内スチフナを柱に溶接するが、こ

の内スチフナが鉄骨製作を複雑化すると共にコンクリートの充填性に影響する要因となっている。筆者らはこの八角形断面のSC柱と鉄骨梁の接合部を考える上で、確実な応力伝達と施工性の簡略化を考慮し、図3に示す外ダイアフラムとバンドプレートで構成される接合部を考案した。特に、SC柱の鉄骨フランジよりも梁鉄骨フランジ幅が広がることもあり、梁の応力を柱に伝えるためには外ダイアフラム形式の接合部とすることが力学的に合理的であると考えた。さらに、適切な外ダイアフラム幅があれば、内スチフナは不要であろうと考えている。そこで、図4に示すように、外ダイアフラムの幅とバンドプレートの有無、さらに内スチフナの有無

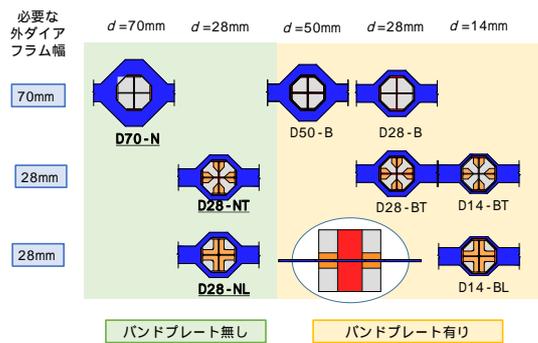
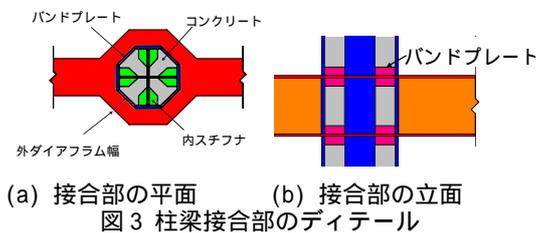


図4 引張試験の実験変数

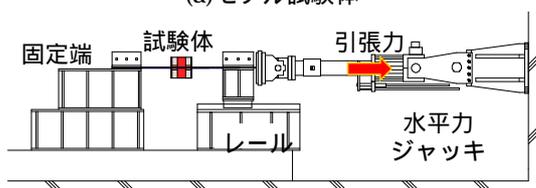
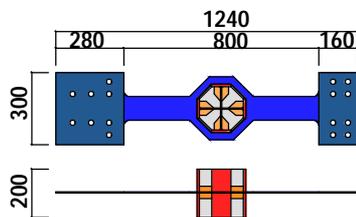


図5 部分モデル試験体の荷重実験

をパラメータにとり、柱梁接合部ディテールの違いが梁フランジとSC柱との間の応力伝達能力に及ぼす影響を調べるために接合部部分モデルの引張試験を行った。

試験体は実験変数をもとに、図4に示すように8体とした。試験体および加力装置を図5(a)と(b)に示している。実験を行った結果得られた荷重変形関係を図6に示す。この図は内スチフナの有無の影響を示したものである。内スチフナを設けず外スチフナとバンドプレートで構成されたディテールの試験体D28-Bと内スチフナを設けたディテールの試験体D28-NTの両試験体は、梁フランジの降伏強度をかなり上回るとともに塑性変形能力もあり、梁鉄骨フランジの破断で最大耐力が決まり、柱梁接合部のディテールの違いの影響は見られなかった。つまり、適切な外ダイアフラムの幅とバンドプレートが付けば、内スチフナは不要であることがわかる。

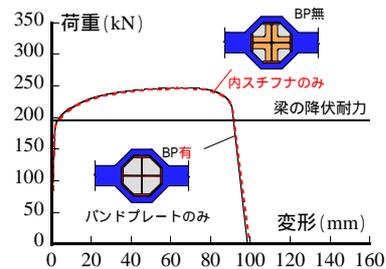


図6 荷重 変形関係

(2) 外ダイアフラムの必要幅の設計式

(1)で述べた実験結果から、外ダイアフラムを適切に設けておけば、内ダイアフラムは必要ないことがわかった。図6に示した実験結果を分析し、外ダイアフラム、バンドプレート、さらに柱鉄骨ウェブのそれぞれの応力負担を検討し、梁フランジの引張強度を發揮させるための外ダイアフラムの必要幅 d_n の設計式として下式を提案した。

$$d_n = \frac{B_f \cdot B_f \cdot t_f \cdot \sigma_y - \sqrt{2} \cdot h \cdot t_f \cdot t_{Bd} \cdot \sigma_y - C_w \cdot T_y}{\sqrt{2} \cdot t_f \cdot \sigma_y} \quad \dots (1)$$

$${}_{C_w}T_y = 2 \cdot 0.7 \cdot {}_{C_w}S \cdot {}_{C_w}l \cdot {}_{C_w}\sigma_y / \sqrt{3} \cdot \dots (2)$$

ここで、 ${}_{B_f}B$, ${}_{B_f}t$, ${}_{B_f}\sigma_y$: それぞれ梁鉄骨フランジの幅、板厚と降伏応力度、 ${}_{B_d}h$, ${}_{B_d}t$, ${}_{B_d}\sigma_y$: それぞれバンドプレートの幅、板厚と降伏応力度、 ${}_{C_w}T_y$: 梁鉄骨フランジから柱鉄骨ウェブに直接伝わる力、 ${}_{D}t$, ${}_{D}\sigma_y$: それぞれ外ダイアフラムの板厚と降伏応力度、 ${}_{C_w}S$, ${}_{C_w}l$, ${}_{C_w}\sigma_y$: それぞれ柱ウェブの溶接サイズ、溶接長さ、降伏応力度である。

ここで、 ${}_{C_w}T_y$ を算定する上で、梁フランジの応力の一部が柱ウェブに上下 45 度方向に力が伝達されると考え ${}_{C_w}l$ を柱鉄骨ウェブせいの半分の長さとしている。

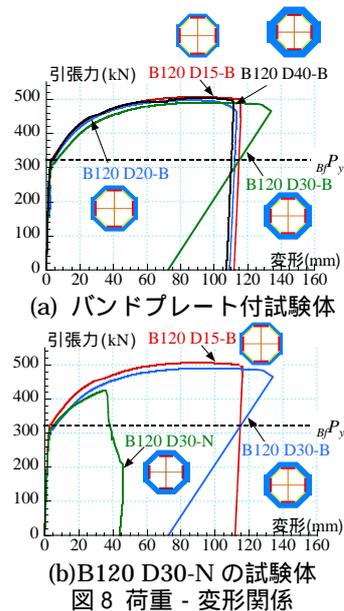
本設計式の妥当性を検証するために、図 7 に示す実験変数を設定し、接合部の部分引張実験を行った。載荷装置は図 5 に示す装置を用いた。

	BP	ダイアフラム幅 D				
		15mm	20mm	30mm	40mm	
梁幅 100mm	有					必要最小幅 $d_n=0$ mm
梁厚 6mm	無					必要最小幅 $d_n=27.8$ mm
梁幅 120mm	有					必要最小幅 $d_n=22.9$ mm
梁厚 9mm	無					必要最小幅 $d_n=56.3$ mm

図 7 外ダイアフラムの必要幅を検討するための引張試験体のパラメータ

引張試験の実験結果を図 8 に示す。同図(a)は、梁フランジ幅が 120mm で、バンドプレートを付けた接合部ディテールの試験体 4 体の荷重-変形関係で、(1),(2)式で算定した外ダイアフラムの必要幅は 22.9mm である。この図より、必要幅 ${}_D d_n$ 以上の幅を持たせておけば、梁フランジを破断させることができ、梁フランジの強度を柱に伝達できることがわかる。さらに、必要幅 ${}_D d_n$ 以下の幅でも梁の強度を発揮させることがわかる。これは、外ダイアフラムとバンドプレートの溶接部の

強度を無視しているためであり、(1),(2)式で求めた必要幅 ${}_D d_n$ の設計式は安全側の評価となることがわかった。同図(b)はバンドプレートの有無が挙動に及ぼす影響を調べたものである。試験体 B120 D30-N はバンドプレートを付けていない試験体で外ダイアフラムの必要幅 ${}_D d_n$ が 56.3mm に対して、幅を 30mm とした試験体であるが、この試験体は外ダイアフラムが破断して、梁の終局強度を柱に伝達させることができていない。



(3) 柱梁接合部の終局せん断耐力の評価法

前項で示した外ダイアフラムの必要幅を満足させるディテールとした柱梁接合部の終局せん断耐力と骨組の設計法を検討するために、十字形骨組の試験体(図 9 参照)を製作して、地震時応力に対応する様に、柱に一定軸力を載荷し一定に保持した状態で梁端に正負交番の繰返し力を載荷する実験を行った。載荷装置を図 10 に示す。

実験変数は、表 1 に示すように、バンドプレートの有無と骨組の破壊形式とした。骨組の破壊形式は、梁の曲げ破壊先行型と柱梁接合部のせん断破壊先行型および梁と接合部を同時に破壊させる 3 つの破壊形式を選んだ。

表 1 十字骨組の試験体条件

試験体	柱 (mm)	梁 (mm)	ダイヤフラム 幅D(mm)	BP	破壊形式
D15-B-B	CH-200×80×6 ×9	H-200×100× 4.5×6	15($d_n=0$)	有	梁先行型
D15-B-N			15($d_n=0$)	無	
D25-P-B	CH-200×80× 4.5×9	H-200×120× 4.5×9	25($d_n=25.93$)	有	パネル先 行型
D60-P-N			60($d_n=49.5$)	無	
D15-S-B	CH- 200×80×6×9	H- 200×100×6×9	15($d_n=0$)	有	同時破壊 型

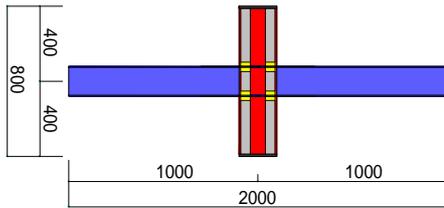


図 9 十字形骨組試験体の概略

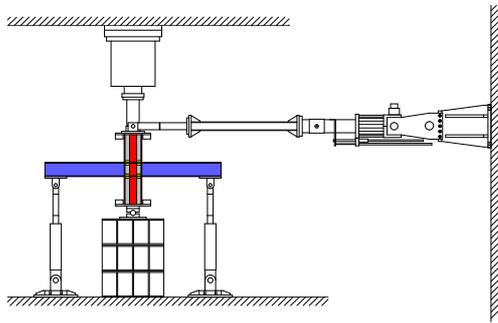


図 10 十字形試験体の載荷実験

試験体の載荷実験の結果、得られた荷重 - 変形関係を図 11 に示す。図中、梁端で梁断面の全塑性モーメントを発揮するときの計算耐力 P_u と柱梁接合部の終局せん断耐力 jP_{u1} と jP_{u2} を示している。それぞれ柱梁接合部の終局せん断耐力を発揮するときの梁端荷重を示し、SRC 規準^{引用文献} に準じ終局せん断耐力を下式で算定した。 jP_{u1} と jP_{u2} はコンクリートの有効体積の取り方を変え、それぞれ(a)八角形断面の断面積を取る場合と、(b)鉄骨フランジで囲まれた断面積を取る場合に対応している(図 12 参照)。

$$jM_u = V_e \cdot jF_s \cdot j\delta + V_s \cdot \frac{w\sigma_y}{\sqrt{3}} + c_s t_f \cdot c_s b^2 \cdot f \sigma_y \dots (3)$$

$$jF_s = \min(0.12 c \sigma_B, 1.8 + 3.6 c \sigma_B / 100) \dots (4)$$

ここで、 V_e と V_s は柱梁接合部パネルのコン

クリートと鉄骨の有効体積である。 V_e は図 12 に示すように 2 種類の体積を計算した。 jF_s はコンクリートのせん断強度、 $j\delta$ は接合部パネルの形状による係数で、十字形骨組なので 3 としている。 $w\sigma_y$ 、 $f\sigma_y$ は柱の強軸鉄骨のウェブおよび弱軸鉄骨のフランジの降伏応力度である。 $c_s t_f$ 、 $c_s b$ は弱軸鉄骨フランジの板厚と幅である。

図 11 より、以下のことがわかる。同図(a)と(b)より、バンドプレートの有無で柱梁接合部の強度が変わり、バンドプレートを取り付けることにより柱梁接合部のコンクリートの拘束効果が期待でき、実験耐力は終局せん断耐力 jP_{u1} で安全側に評価できる。バンドプレートがなければ、 jP_{u2} で評価すべきである。同図(c),(d)より、上記の終局せん断耐力よりも梁の曲げ耐力を低くしておけば、梁で曲げ破壊させることができる。

なお、接合部にバンドプレートを付けることで柱梁接合部の挙動が安定し、紡錘形の履歴性状を示す。

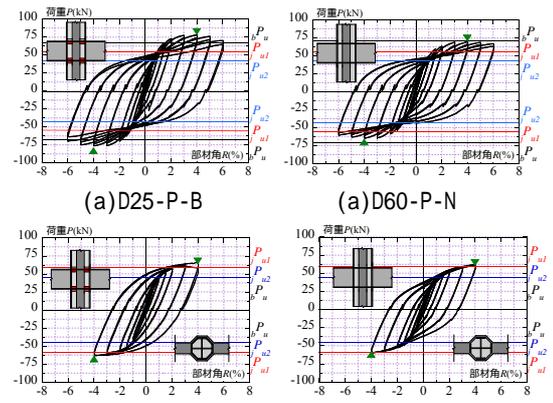
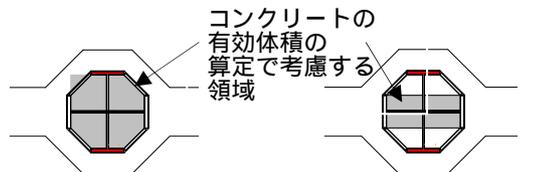


図 11 骨組の荷重 - 変形関係



(a)八角形断面 (b)鉄骨で囲まれた部分のみ
図 12 柱梁接合部のコンクリートの有効面積の取り方

4. 研究成果
本研究では、八角形断面の SC 柱と鉄骨梁

の柱梁接合部の合理的な設計法について検討し、以下のことが明らかとなった。

- (1) SC 柱と鉄骨フランジの接合部のディテールを検討した結果、内スチフナは必要なく、外ダイアフラムを(1)、(2)式に示す必要幅設定しておけば、梁フランジの終局強度を柱に伝えることができる。また、応力伝達上、バンドプレートは有効である。
- (2) 柱梁接合部の終局せん断耐力は(3)式で安全側に評価できる。ただし、バンドプレートの効果は大きく、接合部のコンクリートの有効体積を考える上で図 12 の(a)に示す領域を取ることができる。

以上のことから、図 1 に示す八角形断面の SC 柱の優れた耐震性能を発揮させるとともに施工的にも合理的な柱梁接合部の設計法を示した。本研究の目的であった高耐震化および省人化・省力化を目指した構造システムの提案ができたものと考えている。なお、柱梁接合部に内スチフナは必要ないが、梁のせん断力を柱のコンクリートに伝えるために、柱鉄骨に機械的ずれ止めを設けることが必要であろう。

<引用文献>

倉富 洋, 堺 純一, 田中照久, 川原健輔: 八角形断面を有する鋼・コンクリート合成柱材の弾塑性変形状に関する解析的研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.36, No.2, pp.1039~1044, 2014.7.

日本建築学会: 鉄骨鉄筋コンクリート構造計算規準・同解説, 2014.1.

5. 主な発表論文等

[雑誌論文](計7件)

倉富 洋, 堺 純一, 田中照久, 淵上大貴: 鋼・コンクリート合成柱材と鉄骨梁で構成された骨組の弾塑性変形状に関する実験的研究, 日本コンクリート工学年次論文報告集, Vol.40, 印刷中, 2018.7. 査読有.

淵上大貴, 倉富 洋, 田中照久, 堺 純一: 鋼・コンクリート合成柱と鉄骨梁で構成された柱梁接合部の弾塑性変形状に関する研究, 日本建築学会構造工学論文集, Vol.64B, pp.419-425, 2018.3. 査読有.

倉富 洋, 堺 純一, 田中照久, 淵上大貴: 八角形断面を有する鋼・コンクリート合成柱材の弾塑性変形状に関する研究, 第12回複合・合成構造の活用に関するシンポジウム講演集, 第12巻, pp.(25)-1-8, 2017.11. 査読無.

淵上大貴, 倉富 洋, 田中照久, 堺 純一: 鋼・コンクリート合成柱材と鉄骨梁で構成された柱梁接合部の弾塑性変形状に関する実験的研究, 第12回複合・合成構造の活用に関するシンポジウム講演集, 第12巻, pp.(48)-1-8, 2017.11. 査読無.

淵上大貴, 倉富 洋, 田中照久, 堺 純一: 八角形断面からなる SC 柱と鉄骨梁で構成

された混合構造骨組の弾塑性変形状に関する実験的研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.39, No.2, pp.1063-1068, 2017.7, 査読有.

倉富 洋, 堺 純一, 田中照久, 淵上大貴: バンドプレートに着目した鋼・コンクリート合成柱材と鉄骨梁で構成された柱梁接合部の構造性能に関する研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.39, No.2, pp.1057-1062, 2017.7, 査読有.

倉富 洋, 堺 純一, 田中照久, 河野公晴: 十字鉄骨とコンクリートで構成された合成柱材と鉄骨梁フランジ間の応力伝達に関する実験的研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.38/No.2, pp.1183-1188, 2016.7, 査読有.

[学会発表](計6件)

淵上大貴, 倉富 洋, 田中照久, 堺 純一: 鋼・コンクリート合成柱と鉄骨梁で構成された混合構造骨組の崩壊性状に関する実験的研究, 日本建築学会研究報告九州支部, 第57号・1構造系, pp.677-680, 2018.3.

倉富 洋, 堺 純一, 田中照久, 淵上大貴: 八角形断面からなる SC 柱と鉄骨梁で構成された混合構造骨組の弾塑性変形状に関する実験的研究 その3 バンドプレートの有無が接合部の応力伝達に及ぼす影響について, その4 バンドプレートの有無が骨組の弾塑性変形状に及ぼす影響について, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 構造, pp.1379-1382, 2017.8.

淵上大貴, 倉富 洋, 田中照久, 堺 純一: 鋼・コンクリート合成柱と鉄骨梁で構成された柱梁接合部ディテールの開発, 日本建築学会研究報告九州支部, 第55号・1構造系, pp.537-540, 2017.3.

堺 純一, 淵上大貴, 倉富 洋, 田中照久: 八角形断面からなる SC 柱と鉄骨梁で構成された混合構造骨組の弾塑性変形状に関する実験的研究(その1) SC 柱と梁鉄骨フランジの応力伝達, (その2) 十字形骨組の弾塑性変形状, 日本建築学会大会学術講演梗概集, C-1, pp.1145-1148, 2016.8月.

6. 研究組織

(1)研究代表者

堺 純一 (SAKAI JUNICHI)
福岡大学・工学部・教授
研究者番号: 30215587

(2)研究分担者

田中 照久 (TANAKA TERUHI SA)
福岡大学・工学部・助教
研究者番号: 90588667

(3)連携研究者

倉富 洋 (KURATOMI YO)
福岡大学・工学部・助教
研究者番号: 50709623