

**科学研究費助成事業 研究成果報告書**

平成 28 年 10 月 14 日現在

機関番号：33302

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2013～2015

課題番号：25420492

研究課題名(和文)近代木橋の経年による残存強度の実態把握に基づく耐用年数の推定法開発

研究課題名(英文)Development of estimated method of durable years based on actual condition of residual intensity for modern timber bridges by many years past

研究代表者

本田 秀行 (HONDA, Hideyuki)

金沢工業大学・環境・建築学部・教授

研究者番号：00110990

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,900,000円

研究成果の概要(和文)：わが国における近代木橋の歴史は約30年で、維持管理法は整備されつつあるが、耐用年数の研究は国内外ともほとんど検討されていない。本研究は近代木橋に対する耐用年数の計算式を開発した。そして、72近代木橋を対象に耐用年数に影響を与えている要因の分析、数量化理論第Ⅰ類による耐用年数の要因分析と推定式の開発を行い、今後の近代木橋に対する予防保全や新規計画時の具体的な耐用年数の推定式とその活用法を開発した。

研究成果の概要(英文)：The history of modern timber bridge used glulam is about 30 years in Japan, and maintenance method of the bridges is being improved. However, the actual condition is that the investigation on durable years for modern timber bridges is hardly done also in foreign countries in addition to the timber bridge research subcommittee in JSCE. In this study, the calculation of durable years, the estimation and the factor analysis by qualification theory class I are performed with the data of 72 modern timber bridges, and then the estimated equation of durable years for modern timber bridges is investigated. Furthermore, the applied method of the estimated equation is also indicated in this study.

研究分野：土木工学

キーワード：近代木橋 経年変化 残存強度 耐用年数

### 1. 研究開始当初の背景

わが国における近代木橋の歴史は約 30 年で、木材の腐朽による劣化等によって撤去された近代木橋が出現するなど、保全法を構築する必要性が指摘されている。この間、各研究機関等で維持管理法は検討されつつあるが、耐用年数の研究は国内外ともほとんど検討されていない現状である。

近代木橋の耐用年数が具体的に計算される場合、①既設の近代木橋に対しては供用された年数と推定の耐用年数とを考慮して今後の維持管理や修繕工事等の計画が可能になること、②新規に計画する近代木橋の耐用年数を予測することができ、さらに計画条件の変更を考慮することによって耐用年数を増加する方策も可能であることなど、近代木橋の保全と普及に貢献することが大きい。

### 2. 研究の目的

木橋の耐用年数が推定できれば、既設木橋では修繕工事の時期や維持管理の情報提示、新設の木橋では樹種や構造形式等の変更によって耐用年数の向上を図る設計と将来の保全法に貢献ができる。

そこで、本研究は先ず応募者がデータを収集してきた 991 木橋に対する架設実績と点検や修繕工事実績の要因分析を行う。次いで、大断面集成材を用いた近代木橋（以下に近代木橋あるいは木橋と言う）の完工時の構造性能に関する初期値が応募者によって測定されている実橋での再実験や健全度調査および劣化木材の室内実験などから、近代木橋の経年による残存強度の実態を定量的に把握する。その結果に基づき、木材の経年による強度や剛性低下など気象環境の負荷によって木材の物性値の変動が大きいわが国独自の近代木橋の耐用年数推定法の開発を目的としている。

### 3. 研究の方法

(1) 近代木橋の架設実績と点検や保守工事に関して収集した 991 橋のデータを要因分析し、完成から補修工事までの年数やその理由などの実態を定量的に把握した。

(2) 錦帯橋(山口県)、逢愛橋(佐賀県)、宇治橋(三重県)、鼎小橋(愛知県)、常盤橋(福岡県)、あいあい橋(埼玉県)、かじか橋(石川県)、こおろぎ橋(石川県)に対する目視検査や健全度調査から、経年による木材の腐朽や劣化箇所の分類および腐朽部の劣化が橋全体の構造剛性に及ぼす影響を検討した。さらに、実橋の振動実験で得た基本固有振動数から、経年による構造剛性の低下率を逆解析の手法で検討した。

(3) 近代木橋の耐用年数に関係する要因とそれをさらに再分割した項目の抽出、および各項目に対する点数化を 16 近代木橋の実態評価から検討した。さらに、各項目の点数化に対して 32 近代木橋を対象に妥当性を検討した。その結果に基づいて耐用年数の計算式を検討した。

(4) 架設実績データに基づいた 72 近代木橋を対象に耐用年数の計算式を用いて具体的に計算を行なった。計算された耐用年数(計算値)に影響を与えている要因の分析も行なった。

(5) 数量化理論第 I 類を用いて耐用年数の要因分析を行なった。さらに、耐用年数の推定式の開発を検討した。

(6) 耐用年数の推定式の開発に基づき、今後の近代木橋に対する予防保全や新規計画時の具体的な耐用年数の推定式とその活用法を検討した。

### 4. 研究成果

(1) 図-1 は、架設実績と点検や保守工事に関して収集した 991 木橋のデータを示している。991 橋の内、集成材を用いた近代木橋は 237 橋である。

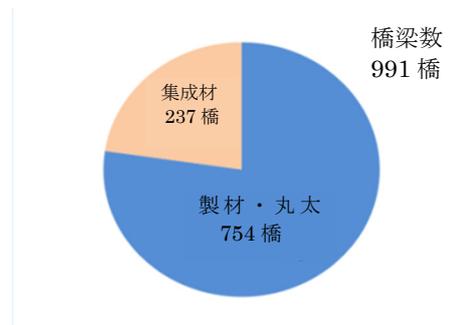


図-1 木橋の割合

(2) 佐賀県で建設後 17 年間供用されている「逢愛橋(ボールジョイント型木製トラス歩道橋)」に対して健全度調査と振動試験の実験を行ない、経年による健全度評価と構造

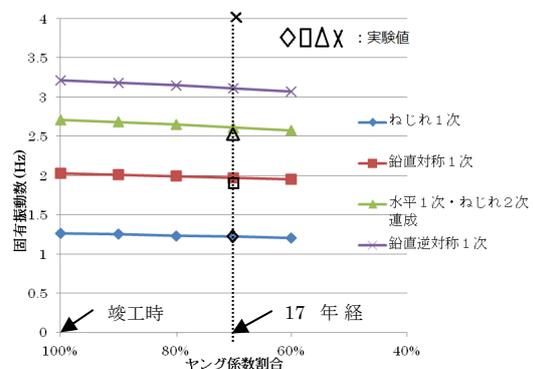


図-2 経年によるヤング係数の低減率

性能を検討した。健全度の関しては顕著な腐朽による劣化の部材は見られなかった。また、振動使用性に関しては特に使用性に問題が生じることはないと判断された。構造的な性能に関しては、図-2 に示すように 17 年の経過によって、強度の尺度となる木材のヤング係数が約 30% 低下していることが確認された。

(3) 埼玉県で建設後 18 年間供用されている「あいあい橋（ボールジョイント型木製トラス歩道橋）」に対して健全度調査と振動試験の実験を行ない、経年による健全度評価と構造的な性能を検討した。健全度の関しては顕著な腐朽による劣化の部材は見られなかった。また、振動使用性に関しては特に使用性に問題が生じることはないと判断された。構造的な性能に関しては、図-3 に示すように 18 年の経過によって、強度の尺度となる木材のヤング係数が約 32% 低下していることが確認された。

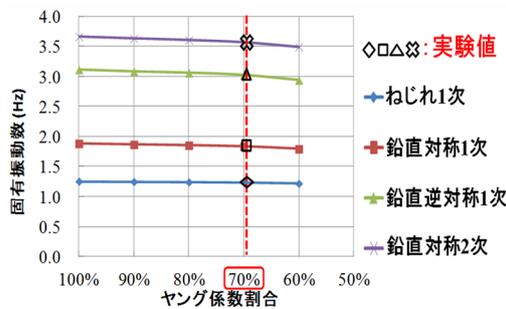


図-3 経年によるヤング係数の低減率

(4) 近代木橋に対する耐用年数  $T$  を算出する。  
 ①使用材料  $P$ 、周辺環境  $E$ 、構造形式  $S$ 、防腐防止（構造） $D$ 、防腐防止（施工） $C$ 、保全行為  $M$  の 6 要因を抽出した。さらに、要因を細分化した項目を数値化し、それらの値を評価式に代入して指標値  $Y$  を計算する。その後、指標値  $Y$  を耐用年数の計算式に代入することにより、耐用年数を計算することができる。なお、木橋の実態を考慮して、耐用年数の上限を 50 年とする。評価式を式(1)、耐用年数の計算式を式(2)に示す。保全行為の回数  $N$  があると式 (1) の評価値は+で加算されるために耐用年数が大きくなる算定である。

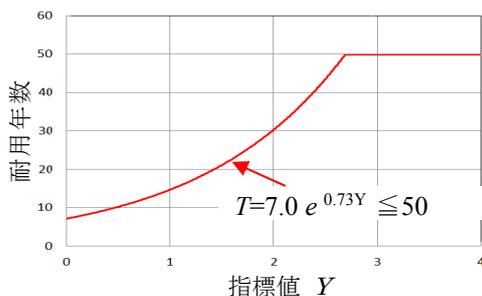


図-4 指標値  $Y$  と耐用年数  $T$  の関係

$$Y = P \times E \times S \times D \times C + M \quad (1)$$

$$T = 7.0 e^{0.73 Y} \leq 50 \quad (\text{年}) \quad (2)$$

指標値  $Y$  と耐用年数  $T$  の関係を図-4 に示す。 $P$ 、 $E$ 、 $S$ 、 $D$ 、 $C$ 、 $M$  それぞれの要因の算定式を表-1 に示す。

表-1 各要因と算定式

使用材料 $P$	$P = P_1 + P_2 \times P_3$
周辺環境 $E$	$E = E_1 \times E_2$
構造形式 $S$	$S = S_1 \times S_2 \times S_3 \times S_4$
防腐防止(構造) $D$	$D = d$
防腐防止(施工) $C$	$C = c$
保全行為 $M$	$M = \sum(N \times m)$

表-2 周辺環境  $E$  と点数

地域区分 1	$R_T \leq 0.74$
地域区分 2	$0.74 < R_T \leq 1.00$
地域区分 3	$1.00 < R_T \leq 1.16$
地域区分 4	$1.16 < R_T \leq 1.25$
地域区分 5	$1.25 < R_T$
$R_T = T_L / T_A$ ここに $T_L$ : 架橋地点の年平均気温, $T_A$ : 全国年平均気温	

表-3 使用材料  $P$  と点数

点数	料固有の耐朽性: $P_1$
1.5	ヒノキ, ホンコ, ケヤキ, ヒバ, クリ
1.0	スギ, ハ, イマツ, カラマツ, クスギ
0.9	モミ, アカマツ, クロマツ
0.8	トマツ, エゾマツ, クスノキ
点数	材料固有の防腐剤の浸透性: $P_2$
1.1	ヒバ
1.0	スギ, ハ, イマツ, モミ, アカマツ, クロマツ
0.9	ヒノキ, ケヤキ, カラマツ, エゾマツ, トマツ
0.8	クリ, ホンコ, シク, クスギ, クスノキ
点数	防腐処理の方法: $P_3$
1.0	注入処理と表面処理
0.6	注入処理
0.3	表面処理
0.0	防腐処理なし

表-4 周辺環境  $E_1$  と点数

点数	地域別腐朽菌の生育条件: $E_1$
1.2	地域区分 1
1.1	地域区分 2
1.0	地域区分 3
0.9	地域区分 4
0.8	地域区分 5
点数	架設位置の局所的環境条件: $E_2$
1.0	一般環境
0.7	湿潤環境

②表-2 は周辺環境  $E$  に関する各項目の定義を、表-3 に使用材料に関する各項目の数値を一例として示す。特に、地域別腐朽菌の育成

条件  $E_1$  の地域区分に関しては、表-4 に示すように架設地点と全国の年平均温度との比率で区別されている。

なお、架橋位置の局所的環境条件  $E_2$  に対しては、本研究で対象橋梁とした 72 橋の中に湿潤環境にあるような橋梁はなかったため、すべて一般状況として計算を行っている。

以上に示した各要因およびその各項目の抽出と点数化は、12 近代木橋を対象に腐朽等による劣化状況や撤去までの供用年数など実態を検討した結果として定めている。さらに、それらの点数化は 36 近代木橋を対象に妥当性を検証した結果に基づいている。

上述した評価式に対する各項目の点数を基に、耐用年数予測式を用いて耐用年数（以下に計算値と言う）を算出した。計算の結果、72 橋の耐用年数の最大値は 50 年、最小値は 15 年、平均値は 33 年となった。

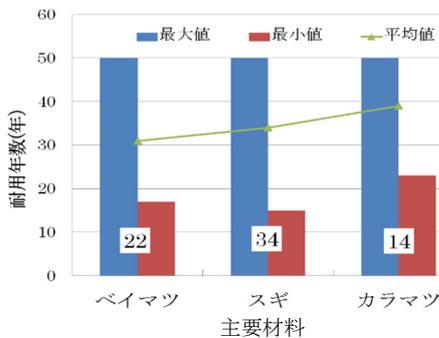


図-5 主要材料と耐用年数

耐用年数に影響が大きいと考えられる各要因と耐用年数の関係を比較した。一例として、図-5 は主要材料と耐用年数の関係を示している。図中の数値は対象の橋梁数である。ベイマツやスギに対してカラマツの平均値が大きいのは、橋梁数の相違に起因している。逆に、スギ集成材を用いた近代木橋が多く建設されていることを考慮すると、スギの平均値が大きいのは近代木橋の建設に良好な結果を示している。

③本研究では数量化理論第 I 因が及ぼす影響度を検討した。数量化理論第 I 類の計算では、外的基準を耐用年数とし、使用材料に関する  $P_1$ 、 $P_2$ 、周辺環境に関する  $E_1$ 、屋根の有無に関する  $S_1$ 、橋梁形式に関する  $S_2$ 、上部工形式に関する  $S_3$ 、床板形式に関する  $S_4$  の 7 つをアイテムと設定した。

72 近代木橋に対する耐用年数の要因分析を行った結果を表-5 に示す。計算結果より、耐用年数に対して最も影響度の高い要因は屋根の有無  $S_1$  であった。屋根ありの 카테고리数量がなしの数量に比べて顕著に大きく、木橋の実態を反映した結果と言える。次いで材

表-5 数量化理論第 I 類の計算結果

アイテム	カテゴリー	カテゴリ数量	範囲
使用材料 $P_1$	ヒノキ, ホノコシ, カヤキ, ヒバ, クリ	17.85 $P_{11}$	18.36 (2)
	スギ, ベイマツ, カラマツ, クスギ	-0.51 $P_{12}$	
$P_2$	ヒバ	-3.89 $P_{21}$	4.79 (7)
	スギ, ベイマツ, モミ, アカマツ, クロマツ	0.90 $P_{22}$	
	ヒノキ, カヤキ, カラマツ, エゾマツ, トドマツ	-3.09 $P_{23}$	
周辺環境 $E_1$	地域区分 1	3.70 $E_{11}$	16.59 (3)
	地域区分 2	-1.47 $E_{12}$	
	地域区分 3	-3.37 $E_{13}$	
	地域区分 4	-9.09 $E_{14}$	
	地域区分 5	-12.89 $E_{15}$	
屋根有無 $S_1$	屋根あり	22.52 $S_{11}$	23.84 (1)
	屋根なし	-1.32 $S_{12}$	
橋梁形式 $S_2$	上路橋	3.30 $S_{21}$	8.95 (6)
	中路橋	-5.65 $S_{22}$	
	下路橋	-5.12 $S_{23}$	
上部工形式 $S_3$	桁橋	3.12 $S_{31}$	9.65 (5)
	アーチ橋, ラーメン橋	0.92 $S_{32}$	
	床版橋	2.84 $S_{33}$	
	トラス橋	-6.53 $S_{34}$	
床板形式 $S_4$	鋼床版, コンクリート床版	11.21 $S_{41}$	16.42 (4)
	木床版(舗装あり)	10.26 $S_{42}$	
	木床版(敷板)	-5.21 $S_{43}$	

料固有の耐久性  $P_1$  であった。一方、最も影響度の低い要因は材料固有の防腐材浸透性  $P_2$  である。なお、耐用年数の推定精度を示す重相関係数は  $R=0.98$  の顕著に強い相関が得られ、高い推定精度を示している。また、定数項は 34.82 である。

④表-5 に示した各アイテム（要因）別にカテゴリー（項目）の影響度を見ると、使用材料  $P_1$  ではヒノキ類の項目がスギ類の項目よりカテゴリー数量が顕著に大きく、樹種固有の強度の影響が見られる。使用材料  $P_2$  では大きな変動はないが、樹種に対する防腐材の浸透性が良いスギ類の項目は他の項目より若干数値が大きくなっている。周辺環境  $E_1$  では表-2 に示した架設地点での気温比率が大きいほど負のカテゴリー数量が大きくなっており、北海道から沖縄県まで腐朽菌の育成条件を明確に反映している結果である。屋根の有無  $S_1$  では、上述したとおり屋根ありの木橋は屋根なしより顕著に高い耐用年数が期待できる実態を反映している。橋梁形式  $S_2$  に関して中路と下路橋は同程度の負の数量であるが、上路橋は正

の数量になっている。すなわち、上路橋は床版が橋梁の屋根に相当する構造であることから耐久性が高く、高い耐用年数が期待できる実態を示している。上部工形式  $S_3$  に関しては大きな変動はないが、耐用年数に対して桁橋が若干有利で、トラス橋はあまり期待ができない傾向にある。床版形式  $S_4$  に関しては、鋼床版・コンクリート床版および木床版（舗装あり）の数量が顕著に大きい。これは、雨水対策がこれらの床版で期待できることから、耐用年数が増加する実態を反映している。

⑤数量化理論第 I 類では、要因分析と共にカテゴリ数量を基に耐用年数の推定式を作成することができる。その推定式を次式(3)に示し、求めた耐用年数を推定値と言う。

$$T = 17.85P_{11} - 0.51P_{12} - 3.89P_{21} + 0.90P_{22} - 3.09P_{23} + 3.70E_{11} - 1.47E_{12} - 3.37E_{13} - 9.09E_{14} - 12.89E_{15} + 22.52S_{11} - 1.32S_{12} + 3.30S_{21} - 5.65S_{22} - 5.12S_{23} + 3.12S_{31} + 0.92S_{32} + 2.84S_{33} - 6.53S_{34} + 11.21S_{41} + 10.26S_{42} - 5.21S_{43} + 34.82 \quad (\text{年}) \quad (3)$$

ここに、 $P_{ij}$ 、 $E_{ij}$ 、 $S_{ij}$ はカテゴリ変数と言う。式(3)に示す耐用年数推定式の適用法は、表-5を基にして、例えば屋根  $S_1$  のアイテムに対して屋根ありの場合は  $S_{12}=0.0$  を代入する。すなわち、各アイテムのどれかのカテゴリに該当する場合は 1.0 を、該当しない場合は 0.0 の数値を代入する。従って、アイテムの各

表-6 歩道橋の架設条件

使用材料	周辺環境	屋根有無	橋梁形式	上部工形式	床版形式
カラマツ	地域区分2	なし	上路橋	桁橋	木床版(敷板)

カテゴリに対して 2 つ以上のカテゴリが該当することはない。

⑥上記の式(3)を用いれば、新たな近代木橋の計画段階における耐用年数の推定を簡単に行うこともでき、また樹種等の設計条件を工夫することによって、さらにより高い耐用年数を得る検討も可能である。

一例として、表-6に示すような近代木歩道橋の架設を計画した場合、式(3)は以下の式(4)になる。

$$T = -0.51 - 3.09 - 1.47 - 1.32 + 3.30 + 3.12 - 5.21 + 34.82 = 29.6 \quad (4)$$

この架設計画の場合、耐用年数は 29.6 年と推定される。しかし、この耐用年数では鋼橋やコンクリート系橋梁と同水準で架設計画が進まない可能性がある。そこで、使用材料をカラマツからスギに変更して他の架設条件を同

一にした場合、式(4)と同様な推定をすると推定式は式(5)になり、耐用年数は 33.6 年となる。すなわち、表-5に示した負の値が大きいカテゴリ数量を計画から出来るだけ除外して、耐用年数を高くする方法である。

$$T = -0.51 + 0.90 - 1.47 - 1.32 + 3.30 + 3.12 - 5.21 + 34.82 = 33.6 \quad (\text{年}) \quad (5)$$

以上のように、式(3)を適用すれば新規に計画する近代木橋の耐用年数を推定することができる。さらに、計画条件の変更を考慮することによって耐用年数を増加する方策も可能である。

⑦本研究の遂行によって、近代木橋に対する耐用年数の計算値と推定値を算出する方式を開発することができた。また、近代木橋の耐久性に関係する重要な要因は、耐用年数の推定に大きく影響を及ぼすことが統計学的手法でも明らかになった。

耐用年数を推定する式(3)を適用すれば、既設の近代木橋に対しては供用された年数と推定の耐用年数とを考慮して、今後の維持管理や修繕工事等の計画が可能となる。あるいは、新規に計画する近代木橋の耐用年数を予測することができ、さらに計画条件の変更を考慮することによって耐用年数を増加する方策も可能である。

本研究での成果として開発した近代木橋の耐用年数に対する推定式が近代木橋の保全と普及に資する事を願いたい。

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 8 件)

- ① 篠原己観郎、本田秀行、千田知弘、性能照査型設計法に適した木材のせん断破壊標準試験法に関する FEM 解析、第 14 回木材利用研究論文報告集 14、査読有り、2015、45-50.
- ② 本田秀行、篠原己観郎、17 年経過したボールジョイント型木製トラス歩道橋の健全度評価、第 14 回木材利用研究論文報告集 14、査読有り、2015、51-56.
- ③ 篠原己観郎、本田秀行、荒木昇吾、近代木橋に対する耐用年数の推定法、構造工学論文集、Vol.61A、査読有り、2015、578-584.
- ④ Honda H., Dynamic performance of timber truss pedestrian bridge used steel ball joint, Report of the IABSE Symposium, 査読有り、2014、1-10(CD-ROM).
- ⑤ Honda H. and Nakada Y., Structural performance of half through arch timber highway bridge, Proc. of the WCTE2014,

査読有り, 2014, 1-8(CD-ROM).

- ⑥ 本田秀行、近代木橋に対する耐用年数の推定と適用法、第 13 回木材利用研究論文報告集 13、査読有り, 2014、34-39.
- ⑦ 篠原己観郎、本田秀行、千田知弘、FEM 解析による木材のせん断破壊標準試験法に関する基礎的研究、第 13 回木材利用研究論文報告集 13、査読有り、2014、48-53.
- ⑧ 本田秀行、25 年経過した上路式アーチ木製車道橋の健全度と構造性能、第 12 回木材利用研究論文報告集 12、査読有り、2013、51-57.

[学会発表] (計 5 件)

- ① 本田秀行、篠原己観郎、17 年経過したボールジョイント型木製トラス歩道橋の健全度調査、土木学会第 70 回年次学術講演会講演概要集、2015 年 9 月 18 日、岡山大学 (岡山県・岡山市) .
- ② 篠原己観郎、本田秀行、千田知弘、性能照査型設計法に適した木材のせん断破壊標準試験法に関する FEM 解析、土木学会第 70 回年次学術講演会講演概要集、2015 年 9 月 18 日、岡山大学 (岡山県・岡山市) .
- ③ 篠原己観郎、本田秀行、千田知弘、FEM 解析による土木分野に適した木材のせん断破壊標準試験法に対する基礎的研究、土木学会第 69 回年次学術講演会講演概要集、2014 年 9 月 11 日、大阪大学 (大阪府・吹田市) .
- ④ 本田秀行、近代木橋に対する耐用年数の要因分析と推定、土木学会第 69 回年次学術講演会講演概要集、2014 年 9 月 11 日、大阪大学 (大阪府・吹田市) .
- ⑤ 本田秀行、25 年経過したアテ集成材上路式アーチ車道橋の健全度調査、土木学会第 68 回年次学術講演会講演概要集、2013 年 9 月 5 日、日本大学 (千葉県・習志野市) .

[図書] (計 0 件)

[産業財産権]

○出願状況 (計 0 件)

名称：  
発明者：  
権利者：  
種類：  
番号：

出願年月日：  
国内外の別：

○取得状況 (計 0 件)

名称：  
発明者：  
権利者：  
種類：  
番号：  
取得年月日：  
国内外の別：

[その他]

ホームページ等

本研究課題に関するホームページ等その他に該当なし。

6. 研究組織

(1) 研究代表者

本田秀行 (HONDA Hideyuki)

金沢工業大学・環境・建築学部・教授

研究者番号：00110990

(2) 研究分担者

( )

研究者番号：

(3) 連携研究者

( )

研究者番号：