

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成 25 年 5 月 30 日現在

機関番号：33302

研究種目：基盤研究（C）

研究期間：2010 ～ 2012

課題番号：22560487

研究課題名（和文） 近代木橋の経年による構造性能の実態把握に基づく
残存強度評価法の開発

研究課題名（英文） DEVELOPMENT OF RESIDUAL STRENGTH EVALUATE METHOD BASED ON
ACTUAL CONDITION GRASP OF STRUCTURAL PERFORMANCE BY YEARS
PAST FOR MODREN TIMBER BRIDGES

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

研究成果の概要（和文）：経年による近代木橋の構造剛性に関して，建設後 10 年程では低下が見られないが，建設後 20 年以上で約 40% 急激に構造剛性が低下する。すなわち残存強度が約 60% に減少することを定量的に明らかにした。さらに，近代木橋の残存強度の評価に基づく耐用年数の推定を検討した結果から，確率論的に耐用年数を推定できる予防保全システムの開発が可能である知見を得た。

研究成果の概要（英文）：On the structural rigidity of modern timber bridges by many years past, the rigid reduction of the modern timber bridge past in about ten years will not be seen after a build about the structural rigidity. However, structural rigidity will fall to a suddenly about 40% after a construction in 20 years or more. In other words, it became clear that the residual strength decreased quantitatively to about 60%. Furthermore, from the result of estimation of the durable years based on valuation of the residual strength of modern timber bridges, It is acquired the finding that can develop maintenance-prevention system which can presume the durable years probabilistically.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2010年度	1,400,000	420,000	1,820,000
2011年度	1,300,000	390,000	1,690,000
2012年度	700,000	210,000	910,000
年度			
年度			
総計	3,400,000	1,020,000	4,420,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：土木工学・構造工学・地震工学・維持管理工学

キーワード：木橋、経年、構造性能、残存強度、維持管理

1. 研究開始当初の背景

近代木橋は，わが国では 27 年程前から建設が始まり，約 1000 橋以上の近代木橋が架設されている。そのほとんどは木歩道橋であるが，本格的な A 設計活荷重による木道路橋も約 40 橋が架設されている。しかし，近代木橋の保全に関して重要な項目である経年

による残存強度の定量的な評価法はほとんど検討されていないのが現状である。

わが国の近代木橋は欧米諸国の歴史に比べて非常に浅く，維持管理や保全法を学術的に論議する基盤がほとんど無かった。さらに，木橋は気象環境の要素に大きく影響される。しかし，保全技術が進んでいる欧米諸国の管

理方法と基準をそのままわが国の近代木橋に適用することは、わが国と欧米諸国の気象環境が大きく異なりことから困難である。このことから、近代木橋の保全に対して、わが国独自の経年による構造性能の実態把握に基づく残存強度評価法の開発が緊急な社会的課題となっている。

2. 研究の目的

本研究は、データ収集してきた 976 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。そして、構造用大断面集成材を用いた近代木橋（以下に近代木橋あるいた木橋と言う）の保全法の開発を目指すために、建設時の構造性能に関する初期値が計測されている実橋での実験や健全度調査および劣化木材の実験室実験などによって、経年による近代木橋の構造性能の定量的な実態評価を総合的に検討する。その結果に基づき、集成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残存強度評価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 976 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) 常盤橋（福岡県）、三日月橋（大分県）、矢ヶ崎橋（長野県）、神の森大橋（愛媛県）、砂田切橋（埼玉県）、あいあい橋（埼玉県）、錦帯橋（山口県）、梅の香橋（北海道）、愛逢橋（佐賀県）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。

(3) 研究代表者による完成直後の木橋の実験で得られている構造特性に関する初期値が経年による変化の実態を把握するため、再度、「こおろぎ橋」、「元気橋」、「かじか橋」の実験や健全度調査を実施した。そして、経年による近代木橋の木材の腐朽や劣化等の実態把握および構造性能の変化による構造剛性の低下率を定量的に検討した。

(4) 木製歩道橋の模型橋を製作し、腐朽部における振動波形の特性評価に関する動的実験を実施した。そして、振動波形の特性から腐朽部の断面欠損率すなわち残存強度を定量的に把握できる可能性の手法を検討した。

(5) 経年による近代木橋の構造剛性の低下率に基づく残存強度の評価法を開発すると共に、

残存強度と耐用年数との関係も論じた。

4. 研究成果

(1) 図 1 は、976 橋の中で補修工事に関する 69 橋のデータを要因分析した結果に基づき、木橋が完成してから補修工事を行うまでの年数を表している。補修工事の橋梁数は 1 年から 10 年に集中しており、木橋建設から 10 年以内に高い確率で補修工事が行われる実態が認められる。完工後 20 年以上に補修工事も多く行われている。これは、建設後 20 年程で木橋の主要部材の劣化によって残存強度の低下や安全性に問題が生じたための補修工事であ

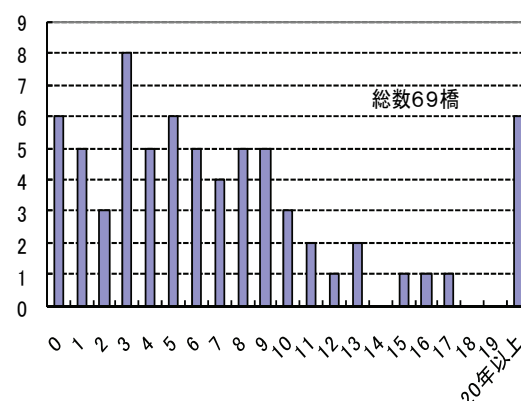


図 1 建設年から補修工事の年数

ると思われる。建設後 10 年程での補修工事は、残存強度の低下を定性的に示唆しているが、主要部材の劣化による抜本的な補修工事ではなく、床板、地覆、高欄など主に 2 次的な部材の補修工事が多い事が指摘される。

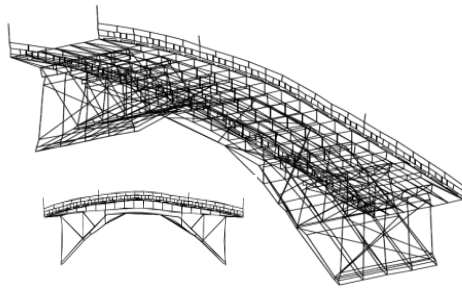
(2) 石川県で建設後 20 年間供用されている「こおろぎ橋（木製方杖車道橋）」の健全度調査と振動試験の実験実験を行なった。その結

表 1 実験と解析による本橋の振動特性

振動次数	振動モード	固有振動数 (Hz)			減衰定数
		実験値	解析値		
			20 年経過	完成直後	
1 次	水平 1 次	13.31	13.31	17.63	0.005
2 次	鉛直 1 次	13.84	13.85	17.93	0.045
3 次	鉛直 2 次	16.19	14.75	19.19	0.027
4 次	ねじれ 1 次	19.08	18.79	24.04	0.003

果を表 1 に示す。また、実験値との比較を検討するために「こおろぎ橋」の 3 次元構造解析モデルを作成して固有値解析を行い、先ず完成直後の固有振動数と振動モードを求めた。なお、完成直後の振動特性は実験値がなく不明であるため、この固有値解析に用いたヒノキ材のヤング係数は一般的な 10 kN/mm²、ポア

ゾン比は 0.4 である。その解析で得た振動モード例を図 2 に示す。



鉛直 1 次振動モード：17.93 Hz

図 2 解析の振動モード例

表 2 建設直後と 20 年経過による各部材のヤング係数の低減率推定

部材	完成直後のヒノキ材のヤング係数 E_x (kN/mm ²)	20 年経過後の推定ヤング係数 E_x (kN/mm ²)	完成直後との差 E_x (kN/mm ²)	ヤング係数の低減率 (%)
床版	10.00	5.38	-4.60	46
高欄		6.60	-3.40	34
類杖		6.00	-4.00	40
支柱		6.00	-4.00	40
その他		6.00	-4.00	40

さらに、20 年経過による現時点での実験値と整合性のある振動特性を求めため固有値解析を用いてヒノキ部材のヤング係数等を逆解析した。その結果を表 2 に示す。20 年の経過による振動特性は 20 年経過の欄に記述している。鉛直曲げ逆対称 1 次モード以外の振動特性値は、良く実験値に近い値になっている。このことから、橋梁の固有振動数から建設直後と 20 年経過による各部材のヤング係数の低減率 (%) を推定した。その結果から、各部材ともヤング係数は 20 年の経過によって約 34~46 (%) 低減していることが認められる。

(3) 富山県で建設後 9 年間供用されている「元気橋 (下路式アーチ木歩道橋)」の健全度調査と振動試験の実験を行なった。超音波伝播速度の測定例を図 3 に示す。アーチリブや下弦材では劣化や腐朽による亀裂が見られた。そのため、アーチリブは伝搬速度が遅くなり全体的に腐朽度が多少高くなっている傾向はあるが、構造全体の剛性低下の可能性は少ないものと思われる。

表 3 は、9 年前 (2002 年) の建設直後に実施した実験と本実験 (2011 年) での振動特性値を示している。基本的な固有振動数とそれ

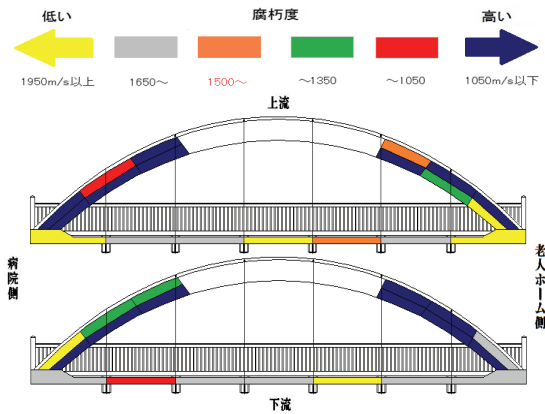


図 3 アーチリブ・下弦材の測定例

表 3 固有振動数と減衰定数

振動モード	9 年前 (2002)		本実験 (2011)	
	固有振動数 (Hz)	減衰定数	固有振動数 (Hz)	減衰定数
アーチ 1 次	2.63	0.0950	2.68	0.0262
鉛直 1 次	6.64	0.0054	6.93	0.0041
ねじれ 1 次	6.96	0.0162	7.71	0.0108
鉛直 2 次	10.35	0.0011	9.08	0.0010

に対応する減衰定数の値は、経年による顕著な相違は認められない。これには次の 2 点が考えられる。第 1 点は、9 年前の実験は雨天状況で行われており雨水によって木材の含水率が高まり木橋全体の重量が重くなってのために、結果として固有振動数の値が小さく測定されたと思われる。本実験では 10 日間ほど晴天後に実験が行われおり、木橋全体の重量が軽くなっているために固有振動数が高く測定されたと考えられる。このように、木橋の物性値は気象環境に左右され、その影響に起因するものと考えられる。第 2 点は、本橋の主要部材に顕著な木材の劣化が認められなかったことから、図 1 でも記述したように、雨水対策の耐久性設計が行われていれば、完工後 10 年程度で構造全体の剛性低下の可能性は少なく建設当初の剛性をほぼ保有しているために、経年による振動特性に顕著な相違が見られなかったものと考えられる。この傾向は、図 1 で指摘した知見に符号する。

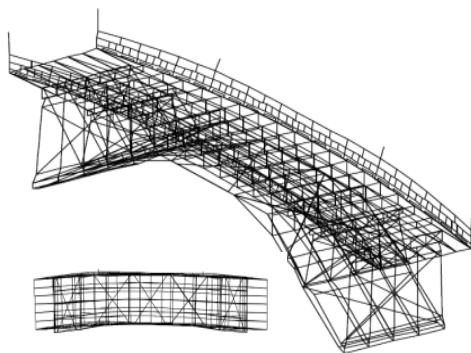
(4) 石川県民の森に架設されている「かじか橋 (上路式アーチ木車道橋)」は、建設年が 1987 年で同形式の近代木橋としてわが国で第 1 号橋である。本橋は 2005 年に床板・地覆・高覧の一部に補修工事を行っているが、建設から 25 年ほど経過しており、アーチリブやその他の部材等の腐朽および構造全体の劣化が進んでいる可能性がある。本橋に対して



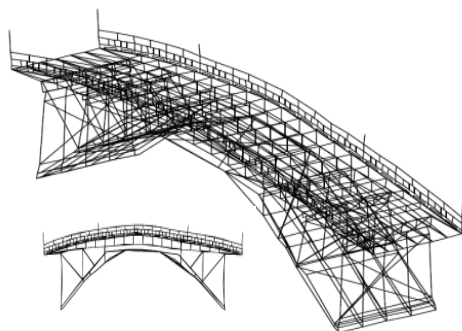
図4 目視試験による腐朽個所の一例

表4 経年による振動モードと固有振動数(実験値)

振動次数	振動モード	固有振動数 (Hz)		
		実験年 (2001)	実験年 (2004)	実験年 (2012)
		架設後 14年経過	架設後 17年経過	架設後 25年経過
1	水平1次	---	5.17	3.13
2	鉛直1次	11.62	11.62	9.47
3	鉛直2次	15.82	15.82	15.82
4	鉛直3次	---	19.14	18.95



水平1次振動モード



鉛直1次振動モード

図5 解析の振動モード例

は2001年と2004年の過去に2度の健全度調査を実施しているが、再度、経年による本橋の健全度を総合的に把握する目的から健全度調査と動の実験を2012年に実施した。

図4は目視検査による腐朽個所の一例を示している。床版は雨水にさらされていることもあり、ひび割れや変色が目立った。腐朽菌の一種である白色腐朽菌がアーチリブの多数に見られ、腐朽菌の生育しやすい環境になっていることがわかる。また、変色箇所も見られ腐朽が進行していることが確認された。

経年による本橋の固有振動数の実験値を表4に示す。振動モードは水平1次、鉛直1次、鉛直2次、鉛直3次の4つであり、経年によって振動モードの変化は見られなかった。経年による固有振動数の変化に顕著な傾向が認められる。2001年と2004年の実験では固有振動数に変化が見られなかったが、2012年には1次、2次、4次の固有振動数が減少している。特に、水平1次の3.13(Hz)が約40%の減少率で、水平の曲げ剛性が低下していることが考えられる。また、鉛直1次の9.47(Hz)も15%の減少率である。図5に解析で得た基本的な振動モードを示す。

この原因としては、5本のアーチリブの端部支承部が腐朽等による劣化損傷によって水平剛性が低下していると考えられる。それは、アーチリブの端部支承部の剛性低下は2次の鉛直逆対称モードより3次の鉛直対称モードの影響が少ないことから、鉛直1次の固有振動数に変化が見られないことでも確認できる。また、全体的に水平剛性より鉛直曲げ剛性が低下していない要因としては、上路式アーチ橋として床版が屋根構造となっていることも一助と考えられる。

以上の経年によって構造剛性の減少に起因する固有振動数の低下の結果を踏まえ、アテ集成材の強度が経年によってどの程度減少するのかを逆解析した。建設直後の実験値がないので、アテ集成材のヤング係数の標準値を完成直後の100%とした場合、経年14年と17年で約20%の減少、25年経過で約40%のヤング係数の減少が解析的に認められた。

表5に経年による各振動モードに対応する減衰定数を示す。上述した場合と同様、建設後17年頃までは減衰定数の値に変化が見られないが、建設後25年での実験値で大きく値が減少している。特に、水平1次と鉛直1次振動モードで減衰定数の減少率は大きい。その原因は、アーチリブの端部支承部が腐朽等による劣化損傷によって水平剛性が低下していると考えられる。

表 5 経年によるK橋の振動モードと減衰定数 (実験値)

振動次数	振動モード	減衰定数		
		実験年 (2001)	実験年 (2004)	実験年 (2012)
		架設後 14年経過	架設後 17年経過	架設後 25年経過
1	水平 1次	---	0.011	0.005
2	鉛直 1次	0.024	0.024	0.009
3	鉛直 2次	0.018	0.018	0.011
4	鉛直 3次	---	0.011	0.010

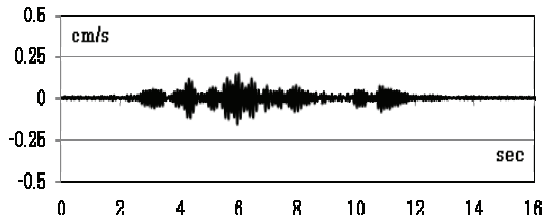


図 6 速度波形例(腐朽度 0%)

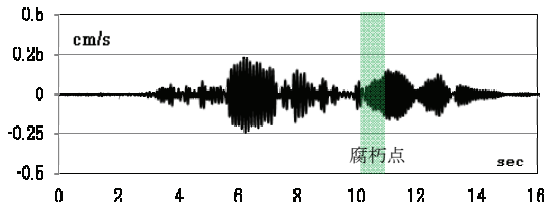


図 7 速度波形例(腐朽度 60%)

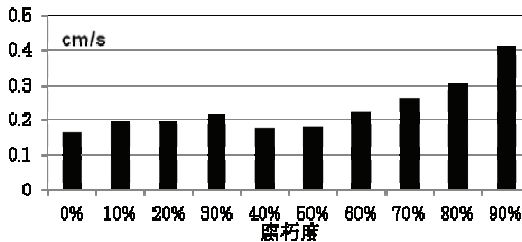


図 8 腐朽度と速度波形の最大値との関係

さらに、減衰定数と支間長との関係を概算的に算定する式 $h=0.12/\sqrt{L}$ (L : 支間長 m) を用いて概算した場合、本橋の支間長は 22.16m であるので、 $h=0.025$ となる。従って、水平 1 次振動では約 50%減少、また鉛直 1 次振動では約 65%の減少が確認された。このことは、本来有している近代木橋の減衰性能が経年によって顕著に減少しているといえる。従って、歩行者あるいは車両によって励起された振動エネルギーを減衰する性能が小さくなり、将来的には経年による振動使用性の問題や保有する残存強度を含む保全法の検討も重要な事項になってくる。

(5) 木材が腐朽や劣化によって強度を有しない断面欠損を生じた場合は、その断面の残存

強度は低下する。断面欠損率によって振動波形に顕著な相違が確認されれば、残存強度低下率の定性的な把握が可能であると共に、現地調査の計測で健全度に対する一つの評価法になり得る。そこで、木製の試験橋を作製して木材の腐朽と応答振動波形との関係、およびそれらの特性を実験的に検討した。

図 6 に腐朽度 0% (健全材) の振動波形の挙動を示す。図 7 は腐朽度 60%、すなわち残存強度が 40%の振動波形例である。図 8 は、各腐朽度と速度波形の最大値との関係を示している。腐朽度が 60%を超えると速度波形、最大値、固有振動数、速度の実効値、たわみ振動成分などに相違が生じることが見出された。しかしながら、腐朽度が 60%以上、すなわち残存強度が 40%以下の場合には安全性の面から橋の撤去や抜本的な補修工事が行われることが多い。このことから、上述は一つの成果であるが、30~50%程度の残存強度の精度の高い検出方法をさらに検討する必要があると思われる。

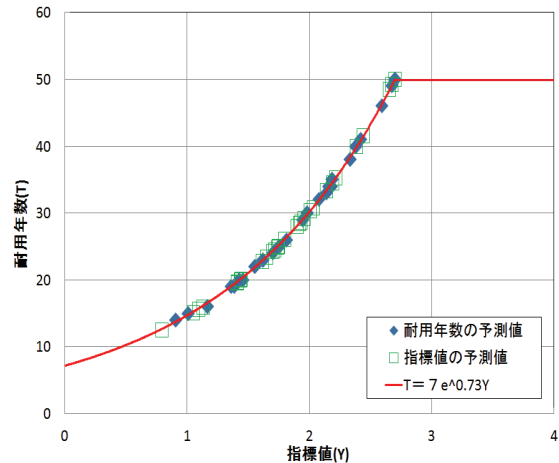


図 9 近代木橋に対する耐用年数の推定

(6) 図 9 は、収集データ 976 木橋の中で、56 近代木橋に対する耐用年数の推定を試算した結果を示している。耐用年数を算出する場合、本研究の目的である残存強度の評価法を取り入れた使用材料、周辺環境、構造形式、設計計画、施工管理、維持管理の 6 項目を点数化して指標値を求めた後、耐用年数を推定している。なお、耐用年数の上限を 50 年とする。近代木橋が供用中のある時点での残存強度は、その後供用可能な耐用年数に直結するものではないが、精度の高い残存強度の評価法の確立によって確率論的手法に基づく耐用年数推定の可能性が見出された。これは、新たに計画する近代木橋に対して発注者に適切な情報の提示、および既設の近代木橋に対して今

後の残存強度や耐用年数に関する情報提示に基づく予防保全などに顕著な効果がある。上述の内容は一つの研究成果であるが、更なる検討事項も残されている。今後の課題とする。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計9件)

- ① Honda H., Strength decrease of wood materials in Kintaikyou Bridge used 48 years, Proc. of the 18th Congress of IABSE 2012, 査読有, 2012, 1-8(CD-R).
- ② 本田秀行, 近代木橋の耐用年数に対する要因分析と推定, 木材利用研究論文報告集11, 査読有, 2012, 23-29.
- ③ Honda H., Vibration serviceability of bongossi wood pedestrian bridge, 査読有, 2012, 1-8(CD-R).
- ④ Honda H., Structural performance of hybrid timber girder highway bridge, Report of the 35th IABSE Symposium 2011, 2011, 1-8(CD-R).
- ⑤ 本田秀行, 糠山尚希, 興津光, 20年経過した木製方杖車道橋の健全性と木材の強度低下, 木材利用研究論文報告集10, 査読有, 2011, 108-115.
- ⑥ 興津光, 本田秀行, 歩行者の歩行によるボールジョイント型木製トラス歩道橋の動的応答解析による振動使用性評価, 木材利用研究論文報告集10, 査読有, 2011, 11-18.
- ⑦ Honda H., Structural performance of large timber post truss highway bridge, Report of the IABSE Symposium 2010, 2010, 査読有, 1-8(CD-R).
- ⑧ 興津光, 本田秀行, 原田敏行, ボールジョイント型木製トラス歩道橋の構造モデル化と振動特性, 木材利用研究論文報告集9, 査読有, 2010, 128-135.
- ⑨ 糠山尚希, 本田秀行, 集成材を用いた近代木橋の構造性能に関する実態把握, 木材利用研究論文報告集9, 査読有, 2010, 146-157.

[学会発表] (計5件)

- ① 本田秀行, 集成材を用いた近代木橋の耐用年数に対する要因分析と推定, 土木学会第67回年次学術講演会, 2012年9月7日, 名古屋大学(愛知県).
- ② 本田秀行, 糠山尚希, 興津光, 20年経過した木製方杖車道橋の健全性と強度低減率の推定, 土木学会第66回年次学術講演会, 2011年9月8日, 愛媛大学(愛媛県).
- ③ 興津光, 本田秀行, ボールジョイント型木

製トラス歩道橋の振動軽減策, 土木学会第63回年次学術講演会, 2011年9月8日, 愛媛大学(愛媛県).

- ④ 興津光, 本田秀行, 原田敏行, ボールジョイント型木製トラス歩道橋の構造特性, 土木学会第65回年次学術講演会, 2010年9月3日, 北海道大学(北海道).
- ⑤ 本田秀行, 糠山尚希, 近代木橋の剛性と構造性能, 土木学会第65回年次学術講演会, 2010年9月3日, 北海道大学(北海道).

[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)

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: