

令和 3 年 6 月 22 日現在

機関番号：13401

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2018～2020

課題番号：18K04321

研究課題名(和文)境界面発現の超音波散乱波に着目したプレテンション型PC構造の内部イメージング

研究課題名(英文)Ultrasonic Imaging of Pre-tensioned Concrete Section Based on Extracting Ultrasonic Scattering Waves from Tendon

研究代表者

鈴木 啓悟 (Suzuki, Keigo)

福井大学・学術研究院工学系部門・准教授

研究者番号：40546339

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,300,000円

研究成果の概要(和文)：直接目視困難なプレストレストコンクリートのテンドンについて初期腐食状態の判定をするための非破壊検査手法を構築した。kHzオーダーの中心周波数の超音波をコンクリート表面より入射し、テンドンからの反射波を取得する。テンドン表面とコンクリートの境界条件はテンドンの健全時と腐食発生時で異なるが、初期腐食状態では差が小さく、判定が困難になる。本研究は寄生的離散ウェーブレット変換(P-DWT)による信号処理を施すことでこの問題を解決した。電食実験によって鋼棒に腐食を発生させた試験体に対し、実証実験を行ったところ、健全状態と初期腐食発生状態の鋼棒画像において、約30%の信号強度の差別化が可能となった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

プレストレストコンクリート内の鋼材は耐荷力上重要な役割を果たしている。初期状態の腐食の検知は外観目視では困難であり、非破壊的に可視検知できる本手法は社会基盤構造物の維持管理の高度化に寄与する。寄生的離散ウェーブレット変換による信号処理手法は、境界条件の微細な変化を捉えることができる。この手法ノイズ低減にも貢献するため、生波形からは判断しにくい条件下で、変化の徴候を抽出する必要のある検査対象物にも適用できる可能性を明らかにした。

研究成果の概要(英文)：A non-destructive inspection method was proposed to determine the initial corrosion state of prestressed concrete tendons, which are difficult to observe directly. Ultrasonic waves with a center frequency on the order of kHz were incident from the concrete surface to acquire reflected waves from tendons. Although the boundary conditions between the surface of the tendon and concrete differ depending on whether the tendon is healthy or corroded, the difference is limited in the initial corrosion state, making it difficult to judge. This study solved this problem by applying signal processing by parasitic discrete wavelet transform (P-DWT). A demonstration experiment proved the effectiveness of signal processing. A steel rod in a concrete specimen was corroded by the electrolytic corrosion experiment. It became possible to differentiate the signal strength by about 30% between the image of the steel rod in the healthy state and that in the initial corrosion state.

研究分野：構造工学・地震工学・維持管理工学

キーワード：超音波探傷 PC鋼材 初期腐食 画像化 信号処理 非破壊検査

1. 研究開始当初の背景

社会基盤構造物の損傷を早期発見するための診断手法が重要視されるなかで、プレストレストコンクリート(以下PC)構造物のPC鋼線、鋼棒(以下、これらを総称してテンドンと称する)の破断診断が課題の一つとなっている。テndonはPC構造の耐荷力の根幹を成す構成材であり、破断状況によっては耐荷力喪失事故を招く。プレテンション型PC構造に着目すると、PC鋼線の破断は腐食を起因とするケースが多いが、目視点検で損傷傾向を把握できるのは錆汁が表面に顕在化した後の状態であり、損傷の兆候を早期に把握し、予防保全を含む維持管理計画に反映させるためには、PC鋼線の腐食発生と破断の有無を診断するための非破壊検査技術を検討する必要がある。

これまでポストテンション型PC構造物のシースに対しグラウト充填不良を判定するための電磁パルス法やPC破断を判定するための漏洩磁束法などの非破壊検査手法が構築されてきた。これらの手法はシース管を有するポストテンション型PC構造を主な対象としており、シース管のないプレテンション型PC構造に対する非破壊検査手法については、その開発が求められる。

一般にコンクリートに対する超音波は媒質中の微小空隙や粗骨材による散乱減衰の影響を抑えるため、200kHz以下の周波数特性、すなわち波長が粗骨材寸法を越える長さの超音波を用いる。そのため、生波形を未処理で重畳する開口合成法では、再構成画像が不鮮明となる傾向がある。加えて、生波形には受信信号に混入する散乱波のノイズの影響により、探傷対象点からの反射波が散乱ノイズに埋もれやすい。

これに対して、研究代表者らの基礎研究によれば、逆散乱解析手法の適用により欠陥の再構成に有益な道筋が得られており、本手法を援用した内在テndonの状態可視化手法の構築が期待できる。ただし、同手法の適用は現場計測のように計測点数が限られる場合に課題がある。代表的な線形化近似手法であるキルヒホフ近似の逆散乱解析の式(1)を挙げれば、二重積分の外側積分は探傷対象点へ向けた全方向からの送受信を意味している。

$$\gamma(x) = \frac{-1}{\pi^2} \int_0^{2\pi} \int_0^{\infty} \frac{2}{u^0 k_L} A(k_L, \hat{y}) e^{2ik_L \hat{y} \cdot x} k_L dk_L d\hat{y} \quad (1)$$

すなわち、波数領域での積分と波形重ね合わせを組み合わせしており、探傷点が限られる現場作業を考慮した場合に当該手法の優位性を担保できず、目的信号の抽出に特化したフィルタの構築をしたうえで、逆散乱解析による画像化が必要となる。

2. 研究の目的

本研究はプレテンションPC構造に内在するテndonの状態を可視化し、腐食発生状況および破断検知を目的とした超音波探傷手法を構築する。テndonの腐食に伴うテndon・コンクリートの境界条件の変化を可視化することで、腐食検知を行う。

3. 研究の方法

本研究は数値シミュレーション、基礎実験、電食実験を行い、手法の確立、妥当性の検証(図-1)を行った。「数値シミュレーション」ではテndon界面の変化を捉えるための寄生

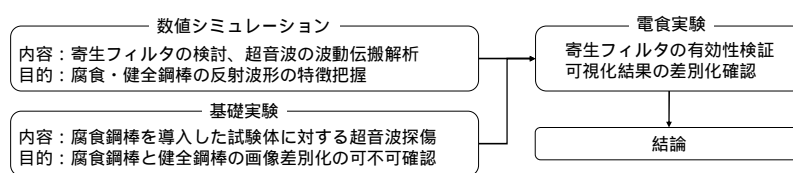


図-1 研究フロー

的離散ウェーブレット変換処理によるフィルタリング(以下、寄生フィルタ)の構築について議論するとともに、反射波形の特徴を考察した。「基礎実験」においては予め腐食させた鋼棒を導入した試験体に対し、寄生フィルタの適用性、画像化結果における腐食・健全鋼棒の差別化について確認した。「電食実験」では寄生フィルタの有効性検証、可視化結果の差別化を確認した。

4. 研究成果

(1)可視化手法

キルヒホフ近似に基づく線形化逆散乱解析を用いて、超音波探傷により得られた波形データの画像化処理を行った。逆散乱解析法は多点で計測された散乱波の積分表現を基に計測散乱波形から逆に欠陥の形状を再構成するための解析手法である。図-2 に示すように送信中心点に向け入射波を送信し、欠陥による散乱波を受信し線形化を施すことで欠陥化形状を再現する。以下に欠陥境界部を再構成するキルヒホフ近似逆散乱解析の再構成式を式(2)示す。本研究においてn=7とし、散乱振幅をAに代入し、探傷結果を重ね合わせた結果を画像化結果として用いた。

$$\gamma(x) = \frac{-1}{\pi^2} \sum_{t=1}^n \frac{2}{u^0 k_L} A(k_L, \hat{y}_t) e^{2ik_L \hat{y}_t \cdot x} k_L dk_L \quad (2)$$

(2) 寄生的離散ウェーブレット変換による目的信号の抽出

コンクリート試験体を超音波探傷して得た波形データには空隙や骨材によるノイズが含まれており、欠陥像がノイズに比して不鮮明になることがあるため、欠陥からの散乱波成分を抽出する必要がある。非定常信号の解析に広く用いられている離散ウェーブレット変換(DWT)はマザーウェーブレット(MW)と呼ばれる関数組を用いて対象となる信号を低周波成分(Approximation)と高周波成分(Detail)に分解、再構成することで目的とする周波数帯を抽出できる。

本研究ではこれを応用した寄生的離散ウェーブレット変換(P-DWT)を用いた。P-DWT は実波形に含まれる欠陥からの散乱波をもとに独自のマザーウェーブレット(RMW)を作成する。図-3 に 特徴波形の抽出法を示す。RMW に特徴波形、対象の信号に計測波形を使用し、ベースマザーウェーブレットを用いて分解しフーリエ変換して周波数特性を抽出し、対象信号に付与することで目的信号を抽出する。

(3) 数値シミュレーションに基づく腐食鋼棒の反射波形の特徴把握

腐食の発生が超音波波形に及ぼす影響の確認と寄生的離散ウェーブレット変換に使用するフィルタリング波形を作成するため、数値シミュレーションを行う。解析モデルの作成、伝播の様子の表示、保存にはプリポストプロセッサ Patran を、解析ソフトウェアには ABAQUS を使用した。

(3)- 解析モデル

解析に用いたモデルを図-4 に示す。300mm×300mm のコンクリート要素の中央に14mm 四方の鋼棒要素が配置されており、鋼棒要素からの反射波を得るために左右に無限要素が配置されている。コンクリート要素のメッシュサイズは1mm×1mm であり、鋼棒要素に近づくにつれ細くなっており鋼棒要素と付近のコンクリート要素のメッシュサイズは0.1mm×0.1mm とした。要素は2D-Solid 要素を用いて平面ひずみ条件とした。鋼棒要素の腐食層を1mm ずつ変化させ、計7パターンの反射波形の変化を解析した。コンクリート、鋼棒の健全部と腐食部の物性値は表-1 に示した値を用いた。

(3)- 反射波の特徴

図-5、図-6 は健全鋼棒モデルと腐食厚 3mm モデルの同一時間 1.07×10⁻⁴(s)における波の伝搬の様子である。腐食厚 3mm モデルの図からコンクリート-腐食部での着目反射波の信号強度は、健全鋼棒の着目反射波の信号強度に比べ、小さいことがわかる。鋼棒が腐食し密度が低下するとコンクリートと腐食部の物性値が近くなるため、音響インピーダンスの差が小さくなり、反射の割合が小さくなったと考えられる。

図-7 は解析によって得られた時刻歴波形である。時間 1.05×10⁻⁴(s)の後の波形が、健全モデルと腐食モデルとで位相が反転しているのがわかる。ここから、音波の反射時に、コンクリートと物性値が近い腐食部では自由端となり、反対にコンクリートと物性値が異なる健全部では固定端になっていると考えられる。初期腐食の腐食厚は解析よりも小さいため、腐食部と健全部からの反射波が合わせて帰ってくることで、実際は波形の反転を判断指標に用いることは困難と考える。

また解析により作成した健全鋼棒波形を寄生フィルタ作成のための波形に使用する。

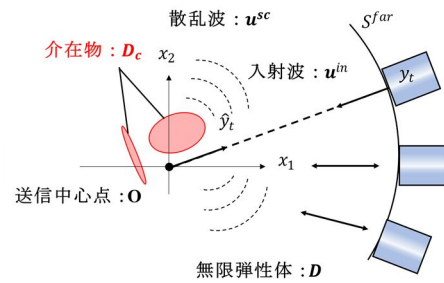


図-2 送信中心点と散乱波の捕捉

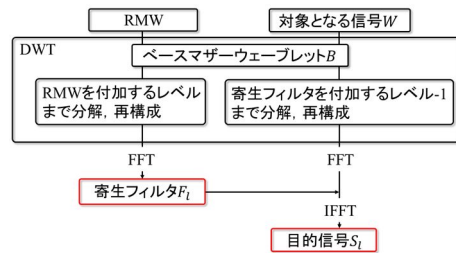


図-3 P-DWT による目的信号の抽出

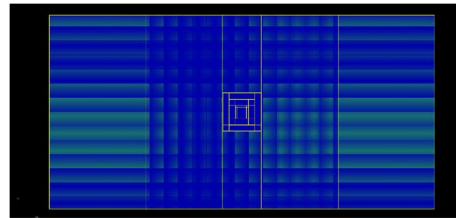


図-4 FEA モデル

表-1 FEA モデル内材料の物性値

	コンクリート	健全鋼棒	腐食鋼棒
弾性係数(MPa)	24000	205000	2050
密度(kg/m ³)	2450	7850	5240
ポアソン比	0.2	0.3	0.2

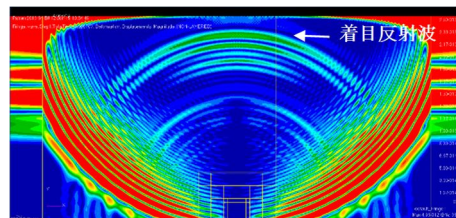


図-5 健全鋼棒モデル

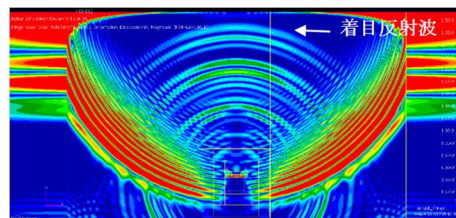


図-6 腐食層厚 3mm 鋼棒モデル

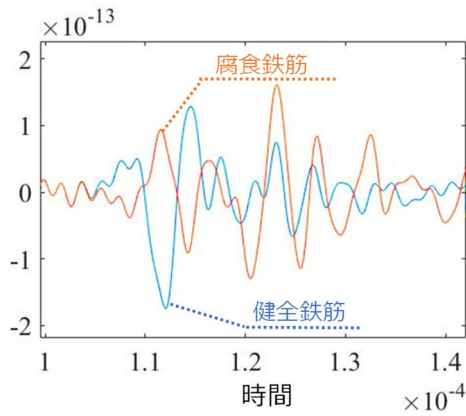
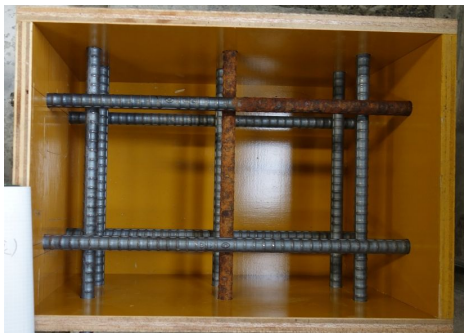


図-7 反射波形の反転

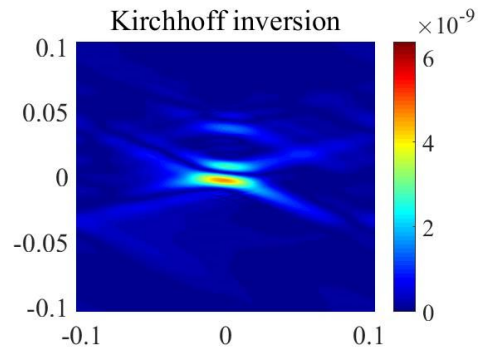


(a) 鋼棒の配置

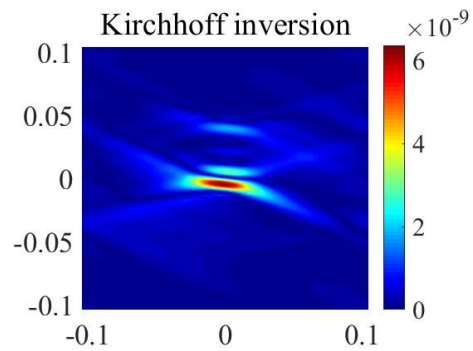


(b) 打設後外観

図-8 基礎実験用試験体



(a) 腐食鋼棒画像



(b) 健全鋼棒画像

図-9 鋼棒の画像化結果(健全鋼棒 RMW)

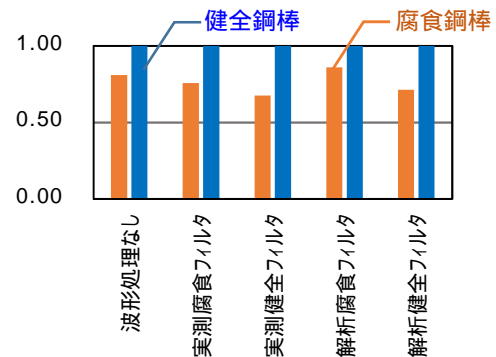


図-10 画像上の信号強度の差異

(4) 基礎実験による可視化手法の有効性確認

予め初期腐食を発生させた鋼棒を導入したコンクリート試験体(図-8)に対し、P-DWT と線形化逆散乱解析を適用し、健全状態の鋼棒と画像を比較した。この時の鋼棒の平均腐食減肉厚は0.07mmである。P-DWTのフィルタ作成の基となるRMWは、実測腐食鋼棒、実測健全鋼棒、解析腐食鋼棒、解析健全鋼棒の4ケースの反射波を使用した。図-9は信号強度の差別化が最も良好であった、健全鋼棒反射波ベースの寄生フィルタ適用の画像化結果である。腐食鋼棒に比して、健全鋼棒の反応が強く、初期腐食状態であっても健全と腐食の差別化が出来ていることが見てとれる。図-10は画像上の健全鋼棒の信号強度で正規化した、信号強度の差を示している。波形処理無しでは、信号強度の差が20%程度であったが、寄生フィルタの適用により最大30%の差別化が可能となった。健全鋼棒ベースのフィルタが差別化に有効な傾向を示した。コンクリートと鋼棒の音響インピーダンスの差に着目すれば、健全状態とコンクリートの差は、腐食層とコンクリートの差と比して大きく、反射波が強くなる。よって健全状態の反射波は健全鋼棒の特徴をより多く含んでいると考えられる。

(5) 電食実験による可視化手法の有効性実証

水槽に水を張り試験体を浸漬し、鋼棒を陽極、銅板を陰極として直流電源により定電圧を負荷することによって、本来腐食することのないコンクリート中の鋼棒を腐食させる手法のことである。電食試験の浸潤状況を図-11に示す。電食試験により鋼棒が腐食し、鋼棒周囲のコンクリ



図-11 試験体の浸潤状況

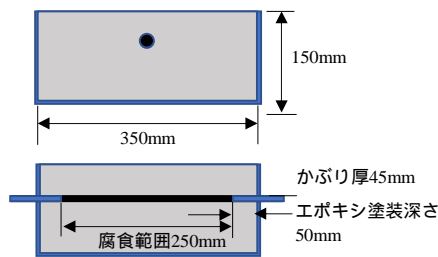
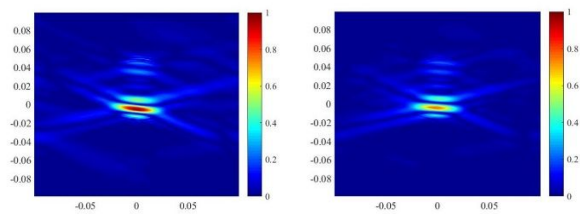
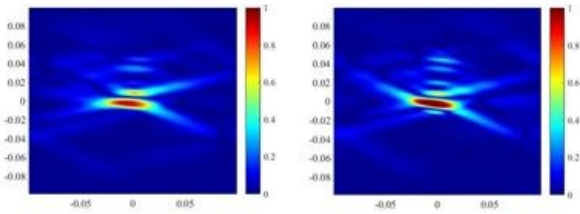


図-12 試験体寸法



2020/11/3 2021/2/2
(a) 異形鋼棒の変遷(異 1)



2020/11/3 2021/2/2
(b) 丸形型鋼棒の変遷(丸 3)

図-13 鋼棒画像化結果の変遷

ートにひび割れが発生、進展するまでの期間で超音波探傷試験を行い、腐食レベルに応じた鋼棒からの反射波の変化を計測した。これにより腐食発生が超音波波形に及ぼす影響を可視化し、初期腐食発生状態の可視的判断について検証する。図-12 に示す通り鋼棒にはコンクリート外部および表面から50mmの深さまでエポキシを塗布し、指定範囲で腐食が生じるようにした。

図-13 に実測健全鋼棒をベースとした寄生フィルタを施し、画像化した結果を示す。異形鋼棒においては、電食試験開始当初の11/3の結果と比較して、3か月後の2/2では鋼棒の反応が小さくなっていることが見て取れる。これは基礎実験と同様の傾向であり、腐食の発生と進行を示唆している。一方、丸形鋼棒については、3か月を経て画像の信号強度が強くなり、基礎実験と逆の傾向を示した。破壊試験の結果、丸形鋼棒の上面は錆が進行しておらず、ほぼ下面のみに錆が進行していたことが判明した。水平方向に配された鋼棒は下面側にブリージングが生じやすく、打設時にその発生を招き、その部位に腐食発生が集中した可能性がある。試験体上面から入射した超音波が鋼棒上面で反射した結果、ほぼ健全状態の反射波を画像化したといえる。ただし、鋼棒下面部にわずかながら信号が割れるような反応が得られており、鋼棒下面の腐食膨張によるコンクリートのき裂発生兆候を捉えている可能性もある。なお、腐食の鋼棒によるひび割れ発生基準は本研究の適用したφ9の丸鋼で8mg/cm²(本間ら)であり、表-1の結果を鑑みると丸鋼棒下面にき裂が発生していた可能性は高い。

なお、裏面の腐食発生検知についてはサポートベクターマシンを適用した機械学習モデルにより腐食判定を試み、交差検証の結果、鋼棒下面を分類精度82%で腐食判定が出来ている。画像上での差別化が出来ているが、機械学習の援用が、腐食発生の判断のさらなる一助になると思われる。

<引用文献>

本間大輔, 米澤敏男, 押田文雄, 山口善弘, 岡本博史, 中尾正純: 鉄筋のひび割れ発生限界腐食量に関する研究, 日本建築学会構造系論文集, Vol.79, No.701, pp.867-876,2014



(a) 丸形鋼棒 上面



(b) 丸形鋼棒 下面

図-14 電食実験後の丸形鋼棒

表-1 電食実験による腐食減肉量

	異 1	異 2	異 3	丸 1	丸 2	丸 3
mg/cm ²	13.23	22.11	24.86	20.67	14.97	24.33

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計2件（うち査読付論文 2件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Suzuki K., Hirata H.	4. 巻 1
2. 論文標題 Non-destructive inspection of corroded steel bars in concrete structures	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Bridge Maintenance, Safety, Management, Life-Cycle Sustainability and Innovations	6. 最初と最後の頁 1516 ~ 1523
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1201/9780429279119-207	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 TSUNODA Takaya, SUZUKI Keigo	4. 巻 75
2. 論文標題 IMAGE SHARPENING OF LINEARIZED INVERSE SCATTERING METHOD FOR CONCRETE VOIDS	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Journal of Japan Society of Civil Engineers, Ser. A2 (Applied Mechanics (AM))	6. 最初と最後の頁 23 ~ 36
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.2208/jscejam.75.23	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計4件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 1件）

1. 発表者名 平田 颯・鈴木 啓悟
2. 発表標題 超音波探傷に基づくコンクリート内鉄筋の腐食判別手法の検討
3. 学会等名 第74回土木学会全国大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 鈴木啓悟・五藤高弘
2. 発表標題 滞水状態のPCシース管を対象とした超音波可視化手法の検討
3. 学会等名 日本非破壊検査協会 2019年度第1回超音波部門講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 辻 洸人, 鈴木 啓悟, 平田 楓
2. 発表標題 サポートベクターマシンを用いたコンクリート内鉄筋の腐食判別
3. 学会等名 第75回土木学会全国大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 K. Suzuki & H. Hirata
2. 発表標題 Non-destructive inspection of corroded steel bars in concrete structures
3. 学会等名 10th International Conference on Bridge Maintenance, Safety and Management (IABMAS2020) (国際学会)
4. 発表年 2021年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関