

令和 6 年 9 月 30 日現在

機関番号：32641

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2021～2023

課題番号：21K04321

研究課題名（和文）VR技術を用いた波動音響マルチスケール解析に基づく交通騒音評価システムの構築

研究課題名（英文）Development of traffic noise evaluation system based on multi-scale wave acoustic analysis using VR technology

研究代表者

榎山 和男（Kashiyama, Kazuo）

中央大学・理工学部・教授

研究者番号：10194721

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,200,000円

研究成果の概要（和文）：本研究は、道路およびその周辺の構造物の新設・改変に起因する音環境の事前評価・事後分析、防音壁の設計等に供し得る高精度かつ実用的な交通騒音評価システムの構築を行った。具体的には、数値解析手法としては、3次元波動音響理論に基づく有限要素法および多重極境界要素法を用い、計算された非定常の音圧レベルを、VR技術を用いて立体聴覚情報としてVR空間に提示する騒音評価システムの構築を行った。本システムは、これまで理解が困難であった音圧レベルの理解を容易にし、道路やその周辺の構造物の新規の計画や設計、防音対策などの音環境の改善、住民との合意形成などを講じる上で有用なツールとなることが期待できる。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究で構築する、高精度かつ実用的な交通騒音評価システムは、これまで個別に進歩してきた計算力学における高度な離散化解析技術と、バーチャルリアリティ技術に基づく仮想空間での可視化及び可聴化技術との統合により構築可能となるものである。交通騒音評価および交通施設の計画・設計の新しい創造性（方向性）を与えるものと考えられる。また、道路やその周辺の構造物の新規の計画や設計、防音対策などの音環境の改善、住民との合意形成などを講じる上で有用なツールとなることが期待できる。

研究成果の概要（英文）：This study was conducted to develop a highly accurate and practical traffic noise evaluation system that can be used for preliminary evaluation and posteriori analysis of the sound environment caused by new construction or modification of roads and surrounding structures, and for the design of sound barriers. The finite element method and the boundary element method based on the three-dimensional wave acoustic theory were used as numerical methods, and the computed unsteady sound pressure level was presented in a VR space as three-dimensional auditory information using VR technology to develop a noise evaluation system. This system is expected to facilitate the understanding of sound pressure levels, which have been difficult to comprehend, and to be a useful tool in planning and designing new roads and surrounding structures, improving the sound environment such as soundproofing measures, and taking steps to build consensus with residents.

研究分野：計算力学、応用力学

キーワード：交通騒音 VR 波動音響理論 可聴化 マルチスケール法 時変畳み込み

## 様式 C - 19、F - 19 - 1 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

道路交通騒音は、心理的不快感や睡眠障害などの影響を人体に及ぼす可能性があるため、道路や防音壁等の計画・設計を行う際にその大きさを評価・検討し、必要に応じて低減させるなどの対策を講じる必要がある。これまで、道路交通騒音を評価するための数値シミュレーション手法は数多く提案され、それらは幾何音響理論と波動音響理論とに基づく方法に大別できる。従来の騒音シミュレーションシステムでは、計算された音圧レベルを等値面により可視化することが一般に行われ、非定常の音圧レベルを聴覚情報として提示する試みは行われていなかった。このため、専門家以外(一般住民など)が計算結果を直感的に理解・把握することは困難であった。

研究代表者である檜山は、この問題点を解決するために幾何音響理論に基づく計算手法の研究を行い、計算された音圧レベルをバーチャルリアリティ(以後 VR)技術を用いた可聴化の研究を行ってきた。しかし、1)音響計算に幾何音響理論に基づく方法を用いていたために、複雑な幾何形状を有する道路周辺環境への適用には限界があった。また、2)防音壁などの内部構造や材料の種別等を厳密に考慮できないため、防音壁等の防音対策に関する開発や設計に使用することは困難であった。

### 2. 研究の目的

本研究は、道路およびその周辺の構造物の新設・改変に起因する音環境の事前評価・事後分析、防音壁の設計等に供し得る波動音響理論に基づく高精度かつ実用的な交通騒音評価システムの開発を目的とするものである。

本研究は、これまで個別に進歩してきた計算力学における高度な離散化解析技術と、VR技術に基づく仮想空間での可視化及び可聴化技術との統合により実現可能となるものであり、交通騒音評価および交通施設の計画・設計の新しい方向性を与えるものとする。

### 3. 研究の方法

本研究では、研究目的を達成するため、以下の4項目に分けて研究を実施した。

#### 1) GIS/BIM/CIM によるデジタル都市作成システムの構築

複数の GIS/BIM/CIM データを組み合わせ、高精度なデジタル都市を作成するシステムの構築を行う。

#### 2) マルチスケール理論に基づく波動音響解析手法の構築

空気中の音波の離散化解析手法としては、複雑な幾何形状の表現が可能な有限要素法および無限遠方での放射条件の取り扱い可能な高速解法である多重極境界要素法を用いた。一方、防音壁内部の構造は微小なスケールの周期構造を持つため、マルチスケール法として均質化に基づく有限要素法を採用する。

#### 3) VR 技術を用いた騒音評価システムの構築

VR 技術を用いて計算結果の可聴化を行うとともに、VR 空間内において立体音響場の構築を行う。なお、立体音響場の構築には、球面調和関数展開手法に基づくアンビソニックス法を採用する。また、可視化デバイスとしては安価でかつ近年普及が著しいポータブルなヘッドマウントディスプレイ(以下:HMD)に実装を行う。

#### 4) システムの適用と評価・改良

システムを実際の道路交通騒音に適用して、システム全体の妥当性の検討と改良を行う。

#### 4. 研究成果

##### (1) 数値解析手法

本研究では、波動音響理論に基づく騒音評価システムの構築を行うため、支配方程式としては、PML(Perfectly Matched Layer)法に基づく開境界処理が可能な3次元修正波動方程式を用いる。また、遮音壁の微視構造を評価するため均質化手法を用い、得られた吸音率をマクロ解析に反映するモデルとしては、Zwikker Kostenn のモデルを用いる。

支配方程式に対して、空間方向の離散化には有限要素法、時間方向の離散化には差分法を用いた。研究の初期段階においては、空間方向の離散化として多重極境界要素法を用いた手法の開発も実施したが、計算効率の面で有限要素法の方が有利であることが明らかとなったため、騒音評価システムの開発においては有限要素法に基づく手法を採用した。

また、本研究では、インパルス応答解析手法を用い、受信点で得られるインパルス応答と対象の実音源との畳み込み演算により可聴化音を作成し、遮音効果の比較や騒音体験システムの構築を行った。なお、移動音源を考慮するために、時変畳み込み演算手法を導入した。

##### (2) シミュレーション結果

数値解析例として、自動車の交通騒音問題を取りあげる。インパルス応答解析に対して畳み込みを行う音源データとしては、大型車、中型車、バイクの3車種を用いた。そして、片側および対面交通を取り上げ、遮音壁の効果等の検討を行った。

解析モデルを図1に示す。遮音壁には直立型遮音壁を用い、高さ3.0m、厚さ0.1mとしている。音速、時間離散化幅、空間離散化幅はそれぞれ340.0m/s、 $6.67 \times 10^{-5}$ s、0.022mとし、入射波には1.0kHzまでを解析対象範囲としたLubichの擬似インパルスを使用する。並列計算手法として、領域分割法に基づく並列計算を用いている。有限要素には、4面体1次要素を用い、節点数および要素数はそれぞれ約3800万、約2億3000万である。なお、音源位置について、遮音壁中心から直交方向に3.0m離れた位置に仮想音源I(手前側車線)を設置し、遮音壁中心から直交方向に3.0m離れた位置に仮想音源II(後方側車線)を設置した。

解析例1として、移動音源として大型車の走行音を用い、仮想音源I(手前側車線)を音源位置としたときの受信点におけるインパルス応答と時変畳み込み演算を行う。走行条件は図2に示す通りで、時速80kmで150mの区間を走行することを仮定している。遮音壁と

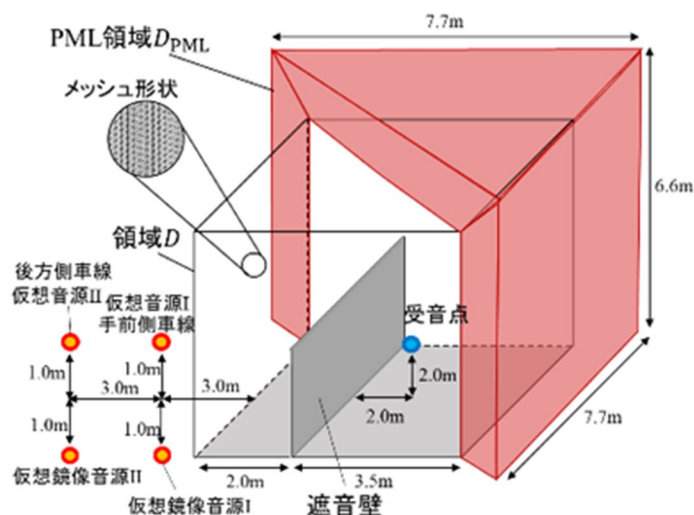


図1 解析モデル

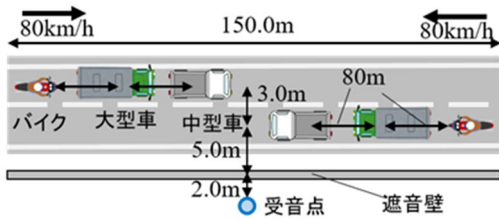


図2 解析例1

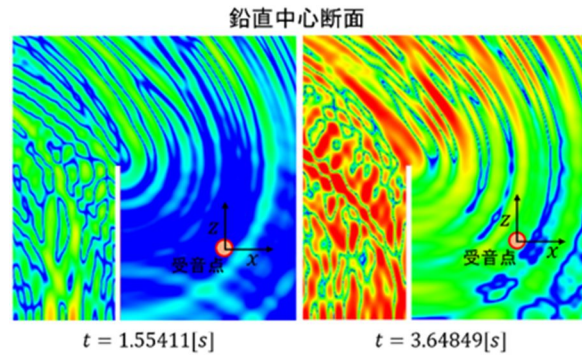


図3 計算結果

直交する鉛直中心断面及び、遮音壁と直交する水平断面の各節点におけるインパルス応答と大型車走行音の時変畳み込み演算結果の可視化を図3に示す。図より、音源の移動に伴う音圧レベルの変動と、遮音壁後方において回折の影響による音圧レベルの低減が確認できる。

本システムの特徴として、受音点で得られるインパルス応答と実音源の時変畳み込み演算結果の重ね合わせを行うことで、様々な車種が混在する交通騒音の再現が可能である。図4に解析例2を示す。本例題では、150mの区間を時速80kmで走行することを仮定し、両車線ともに中型車、大型車、バイクの順に車間距離80mで走行することを仮定している。図5に、遮音壁がない場合と直立型遮音壁を有する場合の計算結果の時刻歴波形を示す。遮音壁による音圧レベルの低減を定量的に確認でき、様々な車種が混在する場合においても、音源が遠方から近づくと次第に音が大きくなり、遠ざかると小さくなるという移動音源の特徴を表していることを確認できる。時変畳み込み演算結果の重ね合わせにより、実現象に近い道路交通騒音を再現可能であることを確認した。

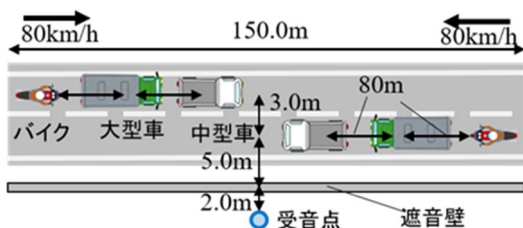


図4 解析例2

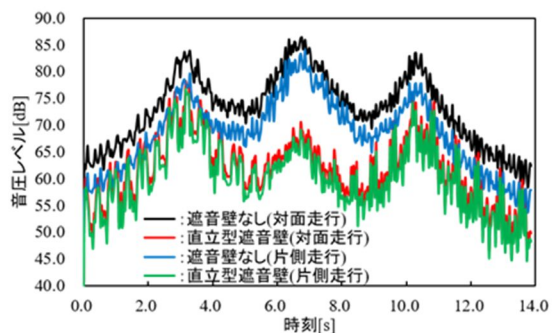


図5 時刻歴波形の比較

### (3) 騒音体験システムの開発

時変畳み込み演算によって得られた受音点における計算結果を用いて、VR技術を用いた可聴化・可視化システムの構築を行った。著者らの既往の研究では、騒音評価システムにおけるデバイスとして、主に没入型VR装置を用いて開発を行っていたが、本研究では、可搬性に優れたHMDを用いてシステムの開発を行った。

本システムのフローチャートを図-6に示す。数値解析によって得られた受音点における畳み込み結果データを読み込み、可視化側ではUnityを用いてCGによる周辺環境の描画、立体視画像の作成を行い、可聴化側ではUnityのAudio Source内の3D sound settings機能を用いて、立体音響場の構築を行った。最後に、スクリーンとスピーカーを通じて結果の

提示を行う。3D モデルは、CAD ソフト及び Unity 内の Game Object により作成するとともに、Unity アセットストア内のアセットを使用した。なお、走行開始、停止、遮音壁の切り替えは、デバイスのコントローラーのボタンにより操作を行う。

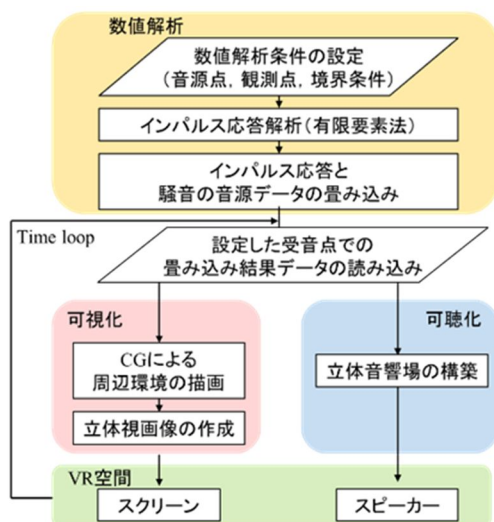


図6 VRシステムのフローチャート

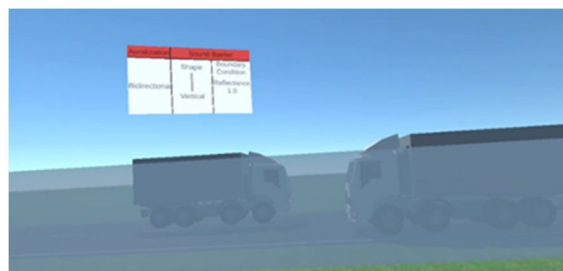


図7 システム体験中のHMD映像

VRシステムにおいて、走行車両は、走行開始時に整数乱数を生成し、その乱数の値によって決定している。走行車両が決定したのちに、システム内で時変畳み込み演算による計算結果の重ね合わせを行い、その結果を音として出力している。VRシステム内でのシステム体験中のHMD映像を図7に示す。HMDによるVRシステム内で結果の重ね合わせを行うことで、リアルタイム性の向上および実現象に近い道路交通を再現可能であることを確認した。

#### (4) 結論

本研究では、波動音響理論を用いたインパルス応答解析に基づくマルチスケール解析手法を構築した。また、計算結果をVR技術を用いて、HMDにより可聴化して提示する道路交通騒音評価システムの構築を行った。解析手法としては、有限要素法を用いて、インパルス応答結果と時変畳み込み演算の重ね合わせにより、様々な車種が混在する交通騒音を再現した。

本研究により得られた結論をまとめると以下ようになる。

- PML法を用いた有限要素法と多重極境界要素法によるシステムを用いてベンチマーク問題を解析したところ、両システムの計算精度は同程度であったが、計算効率の面で有限要素法によるシステムの方が有利であることが明らかとなった。
- インパルス応答結果と時変畳み込み演算の重ね合わせにより、様々な車種が混在する道路交通を再現可能であることを確認した。
- HMDに基づくVR可聴化システムの構築において、テキストデータをHMD内で読み込みことで、リアルタイム性の向上と計算結果を正確に可聴化できることを確認した。

今後の課題として、様々なタイプの遮音壁周辺およびより複雑な道路環境下での実測値との比較による、本システムの改良が挙げられる。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計6件（うち査読付論文 6件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 5件）

1. 著者名 深澤一志, 宮内暖季, 櫻山和男, 吉川仁	4. 巻 80
2. 論文標題 有限要素法による音場解析手法の構築とその可聴化	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 土木学会論文集A2 (応用力学)	6. 最初と最後の頁 23-15021
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.2208/jscej.23-15021	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 櫻山和男	4. 巻 47
2. 論文標題 VRの騒音評価への適用	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 騒音制御	6. 最初と最後の頁 149-152
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	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 吉川 仁, 林 正磨	4. 巻 23
2. 論文標題 トポロジー導関数を用いた3次元スカラー波動散乱場のクラック決定解析	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 計算数理工学論文集	6. 最初と最後の頁 129-136
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.2208/jscejam.73.1_255	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 川井郁哉, 吉川仁	4. 巻 22巻
2. 論文標題 境界要素法により数値的に求められた散乱音場と頭部伝達関数によるバイノーラル信号の合成,	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 計算数理工学論文集	6. 最初と最後の頁 131-138
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 庄子諒, 深澤一志, 吉川仁, 高橋徹, 櫻山和男	4. 巻 77巻2号
2. 論文標題 インパルス応答解析に基づく高速多重極境界要素法による音場解析とその可聴化	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 土木学会論文集A2 (応用力学)	6. 最初と最後の頁 I_171-I_182
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.2208/jscejam.77.2.I_171	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 吉川仁, 西上駿祐	4. 巻 21巻
2. 論文標題 遠方近似を用いた3次元時間域境界要素法による仮想空間における移動点のリアルタイム可聴化	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 計算数理工学論文集	6. 最初と最後の頁 125-129
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

〔学会発表〕 計20件 (うち招待講演 0件 / うち国際学会 3件)

1. 発表者名 Kazuo Kashiya
2. 発表標題 Traffic Noise Simulation and Its Auralization Using VR Technology
3. 学会等名 5th International Conference on Civil and Building Engineering Informatics (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 宮内暖季, 櫻山和男, 吉川仁
2. 発表標題 有限要素法による混合交通騒音評価システムの構築とその可聴化
3. 学会等名 第37回数値流体力学シンポジウム
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 宮内暖季, 深澤一志, 櫻山和男
2. 発表標題 有限要素法による風速の影響を考慮した音場解析
3. 学会等名 第28回計算工学講演会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 宮内暖季, 櫻山和男, 吉川仁
2. 発表標題 有限要素法による双方向交通騒音評価システムの構築
3. 学会等名 第51回土木学会関東支部技術研究発表会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 深澤一志, 宮内暖季, 櫻山和男, 吉川仁
2. 発表標題 有限要素法による音場解析手法の構築とその可聴化
3. 学会等名 第26回応用力学シンポジウム
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 宮内暖季, 深澤一志, 櫻山和男
2. 発表標題 有限要素法による交通騒音シミュレーションシステムの構築とその可聴化
3. 学会等名 土木学会全国大会第78回年次学術講演会
4. 発表年 2023年



1. 発表者名 深澤一志, 櫻山和男, 吉川仁
2. 発表標題 インパルス応答解析に基づく有限要素法を用いた音場解析手法の構築
3. 学会等名 第27回計算工学講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Kazushi Fukazawa, Hitoshi Yoshikawa, Kazuo Kashiya,
2. 発表標題 Time Domain Sound Field Analysis Using the Finite Element Method and the Fast Multipole Boundary Element Method
3. 学会等名 WCCM-APCOM YOKOHAMA 2022 (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 深澤一志, 櫻山和男, 吉川仁
2. 発表標題 有限要素法による遮音壁周辺の音場解析手法の構築
3. 学会等名 土木学会全国大会第77回年次学術講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 深澤一志, 櫻山和男, 吉川仁
2. 発表標題 有限要素法による道路交通騒音シミュレーションシステムの構築とその可聴化
3. 学会等名 第50回土木学会関東支部技術研究発表会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 宮内暖季, 深澤一志, 櫻山和男
2. 発表標題 有限要素法による風速の影響を考慮した音場解析
3. 学会等名 第50回土木学会関東支部技術研究発表会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 吉岡 朋紀, 吉川 仁
2. 発表標題 トポロジー導関数を用いた定量的非破壊評価のための LASSO によるクラック決定
3. 学会等名 第26回応用力学シンポジウム
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 小金丸一輝, 吉川仁
2. 発表標題 ポイドとクラックが混在する材料に対するトポロジー導関数を用いた非破壊評価
3. 学会等名 第36回計算力学講演会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 川井郁哉, 吉川仁,
2. 発表標題 境界要素法により数値的に求められた音場を用いた頭部伝達関数によるバイノーラル信号合成,
3. 学会等名 第27回計算工学講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 林正磨, 吉川仁
2. 発表標題 3次元スカラー波動問題におけるトポロジー導関数を用いたクラック決定解析,
3. 学会等名 第14回最適化シンポジウム2022
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 庄子諒, 深澤一志, 吉川仁, 櫻山和男
2. 発表標題 高速多重極境界要素法による音場解析とVR技術を用いた可聴化
3. 学会等名 第26回計算工学講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 深澤一志, 庄子諒, 吉川仁, 櫻山和男,
2. 発表標題 高速多重極境界要素法による遮音壁周辺の音場解析
3. 学会等名 土木学会全国大会第76回年次学術講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 深澤一志, 櫻山和男, 吉川仁
2. 発表標題 有限要素法による遮音壁周辺の音場解析
3. 学会等名 第49回関東支部技術研究発表会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 西上駿祐, 吉川仁
2. 発表標題 遠方近似を利用した時間域境界要素法による3次元空間を移動する受音点のリアルタイム可聴化
3. 学会等名 第26回計算工学講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 K. Kashiyama, M. Shoji, K. Fukazawa and H. Yoshikawa
2. 発表標題 Experience-Based Noise Evaluation System Using VR Technology
3. 学会等名 16th U.S. National Congress on Computational Mechanics (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
研究 分 担 者	吉川 仁  (Yoshikawa Hitoshi)  (90359836)	京都大学・情報学研究科・准教授   (14301)	

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
---------	---------