

令和 5 年 5 月 26 日現在

機関番号：14501

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2020～2022

課題番号：20K04807

研究課題名（和文）いつでも聴き取れるを実現する屋外拡声システムの分散配置デザイン

研究課題名（英文）Making outdoor public announcements intelligible at anytime by dispersal arrangement of loudspeakers

研究代表者

佐藤 逸人（Sato, Hayato）

神戸大学・工学研究科・准教授

研究者番号：30346233

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 2,900,000円

研究成果の概要（和文）：防災情報を提供する屋外拡声システムについて、品質を安定させるスピーカの分散配置設計のための基礎資料を得るために以下の(1)から(3)の研究を行った。(1)既存の屋外拡声システムを対象として長期実測調査を行い、スピーカからの距離と音圧レベルのばらつきの関係の一例を示した。(2)既存の警報音を用いた聴取実験を行い、緊迫感を感じさせるためには65dB程度の音圧レベルが必要であることを示した。(3)都市街区を対象とした幾何音響シミュレーションにより、スピーカをできるだけ高い位置に設置する方法と道路を音の伝搬経路として用いる方法について検討し、それぞれの利点を明らかにした。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究の成果は、屋外拡声システムのスピーカの分散配置の設計に不可欠な基礎情報を提供するものである。具体的には、本研究によって示された拡声音の必要最小限の音圧レベルの目安と、スピーカからの距離による音圧レベルのばらつきの実測事例は、それぞれのスピーカから再生する音の音圧レベルを十分な安全マージンを持って設計するための基礎資料となる。また、都市街区でのスピーカ配置の最適化事例も今後新設・増設される屋外拡声システムの参考資料となる。これらは社会的には災害に強い社会基盤の実現に貢献するものである。また、学術的には蓄積の少ない屋外における音声の長距離伝搬に関する貴重なデータとして資するものである。

研究成果の概要（英文）：The following studies (1) to (3) were conducted in order to obtain basic data for designing a dispersal arrangement of loudspeakers to stabilize the quality of outdoor public notification systems providing disaster prevention information. (1) A long-term measurement survey was conducted on existing outdoor public notification systems, and the results served as an illustrative example of the relationship between the distance from the loudspeaker and the variation of the sound pressure level. (2) Listening experiments were conducted using existing warning alarm sounds, and the results showed that a sound pressure level of about 65 dB is necessary to create a sense of urgency. (3) Geometric-acoustic simulations were conducted in an urban area, and the advantages of placing the loudspeaker as high as possible and using the road as a sound propagation path were summarized based on the results.

研究分野：環境音響学

キーワード：防災行政無線 屋外拡声システム 実測調査 幾何音響シミュレーション 音声了解度

1. 研究開始当初の背景

防災情報を不特定多数に一齐送信するシステムの1つとして、屋外拡声システムが挙げられる。しかし、拡声した音声が聞き取れないという指摘が多い。聞き取れない第1の理由として「音が小さい」が挙げられる。この問題を解決する方法として、音が遠くまで届きやすい特殊なスピーカ（アレイスピーカ）が採用されることも多い。しかし、スピーカからの距離が数百 m 離れると日によって音が聞き取れなかったり、反対に遠方のスピーカからの音や人工物による反射が近傍のスピーカからの音と同程度の大きさに聞こえることでエコー障害がひどくなったりすることもある。これは、音の伝搬経路が長くなるほど気象条件の影響が大きくなり、その結果、聴取点における音圧レベルのばらつきが大きくなるためだと考えられる。

図1に示すように、音の距離減衰の傾きはスピーカからの距離が近い範囲では急峻であるが、距離が離れるほど緩やかになる。したがって、理想的（図1左）には、距離が離れた位置でも周囲の暗騒音よりも音が大きくなるように拡声すれば広大な範囲で音が聞き取れることになる。しかし、現実（図1中）には上述したように気象条件による音圧レベルのばらつきは音の伝搬距離が長くなるほど大きくなると考えられるため、聞こえ方が不安定になる範囲が広大になってしまう。したがって、スピーカから大音量で再生する、あるいは音が遠くまで届きやすいスピーカを用いるといった方法では、この問題の根本的な解決にはならない。

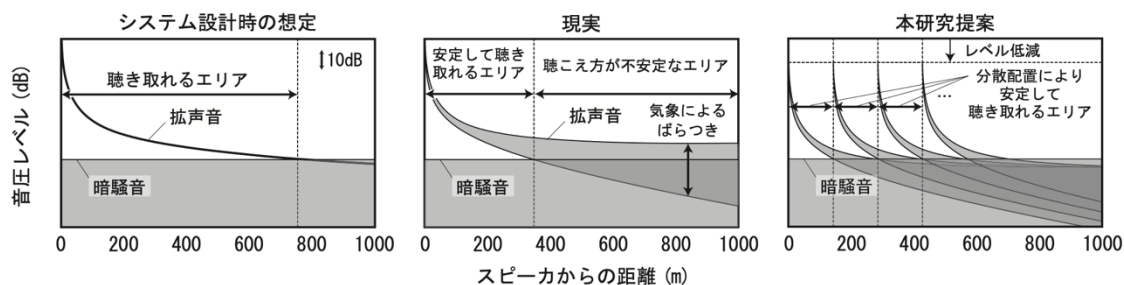


図1 音の距離減衰と屋外拡声システムのカバーエリアの考え方

2. 研究の目的

本研究では安定して音が聞き取れる範囲のみにスピーカのカバーエリアを限定し、エリア外ではそのスピーカからの音が聞き取れないようにシステムを設計することを考える。当然ながら、情報は広い範囲に均一に伝送する必要があるため、スピーカの数を増やして分散配置することになる（図1右）。このシステムを具体化する上で必要となる以下のテーマ(1)~(3)について明らかにすることを本研究の目的とする。

- (1) 音の伝搬距離と外乱要因による音圧レベルのばらつきの対応関係
- (2) 正常性バイアスを打ち破るために必要な音圧レベル
- (3) エコーを軽減するための屋外拡声システムの設計方法

3. 研究の方法

- (1) 音の伝搬距離と外乱要因による音圧レベルのばらつきの対応関係

安定して音が聞き取れるシステムを設計する上で、この対応関係を明らかにすることは最重要項目である。大島ら¹⁴⁾による測定事例はあるが、スピーカに比較的近い位置でのデータが無いため、新たに長期定点測定を行う必要がある。青森県深浦町の協力を仰いで町内に複数の図2に示す無人観測ステーションを設置し、定時放送の長期観測を行った。定時放送は試験放送である旨を伝える音声アナウンスと音響測定信号（Swept-sine 信号）からなる。音響測定信号の測定は、スピーカ近傍（図2左）と100mから700m程度離れた受音点（図2右）、そして基準音圧を得るために同じ型番のスピーカを用いた無響室で行った。これらの測定結果から、各受音点におけるスピーカ軸上1m地点を基準とした音圧レベルの減衰量を算出し、スピーカからの距離と減衰量のばらつきの関係について分析した。また、外乱要因として風に着目し、無人観測ステーションで測定した風向・風速と音の減衰量の関係について分析した。

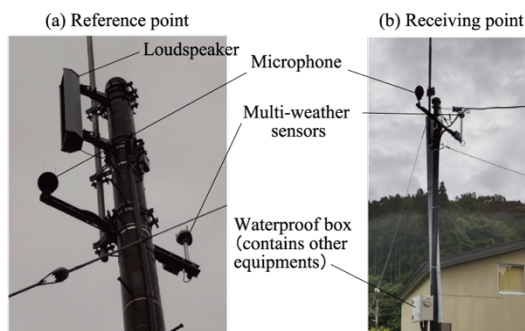


図2 無人観測ステーション

(2) 正常性バイアスを打ち破るために必要な音圧レベル

分散配置にすることにより、システムから放射する音の音圧レベルをある程度小さくすることも可能となるが、その一方で音圧レベルを下げすぎると、住民の「正常性のバイアス」を打ち破り、避難行動に迅速に移行させるという重要な役割を果たせないことが考えられる。このテーマでは、音声ではなく警報音に着目して、聴取者に強い「緊急性」の印象を与えるためにはどの程度の大きさが必要かを明らかにするための聴取実験を行った。警報音はいくつか広く一般に認知されているものがあり、その認知の程度が最低限必要な音圧レベルに影響することが予想されたため、実際に警報音として用いられている音を実験の刺激として用いた。

(3) エコーを軽減するための屋外拡声システムの設計方法

スピーカを増やす場合、それらからの音が重なってエコーを生じさせないように注意深く設計しなくてはならない。基本的には指向性を持ったスピーカをカバーエリアの境界に順次配置し、それぞれに適切な遅れ時間を持たせて拡声する^[2]。平坦な土地であればこの方法で問題ないが、都市街区のように高層建築物が存在する場合、それらによる影響を考える必要がある。そこで、これまでに開発してきた 3D 都市モデルを対象とした Unity による幾何音響シミュレーション環境^[3] (図 3) を用いて都市街区におけるシステム設計のケーススタディを行い、実測結果との比較を行った。

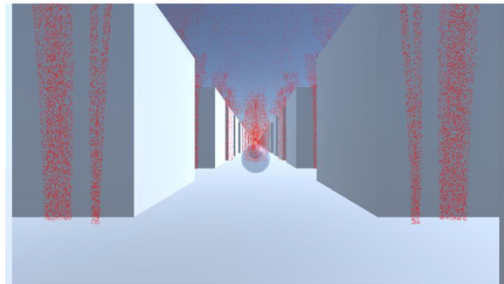


図 3 シミュレーションの実行例

4. 研究成果

(1) 音の伝搬距離と外乱要因による音圧レベルのばらつきに対応関係^[4]

図 4 に谷状エリアの Site 1 と海沿いエリアの Site 2 における測定結果を示す。500Hz から 2kHz までの帯域では、基準点からの距離が長くなるほど音圧レベルの減衰量が大きくなり、かつばらつき (90%レンジ) が大きくなる傾向が見られた。このばらつきのデータは、分散配置を採用するかどうかによらず、スピーカの再生音圧を定める際の安全マージンを考える上で重要な情報である。図 5 は月単位で集計した音圧レベルの減衰および風向・風速の平均値を用いた分析結果の例を示す。上段が基準点と受音点に平行なベクトル風速 (以下、風速 P)、下段が音圧レベルの減衰量から距離減衰と空気吸収の影響を除いた減衰量 ($\Delta L'$) を示す。この例では、下段の $\Delta L'$ は周波数によらず同様の月変動を示し、3 月から 5 月にかけて上段に示した風速 P がマイナス、つまり音の伝搬方向に対して向かい風になるほど、 $\Delta L'$ もマイナスの方向に大きくなるという対応が見られた。ただし、海沿いの Site 2 では海から吹く横向きの風が強くなるほど $\Delta L'$ がマイナスの方向に大きくなる傾向が見られ、地形によって風の影響は異なり、風向・風速の影響は単純にモデル化できないことが示された。

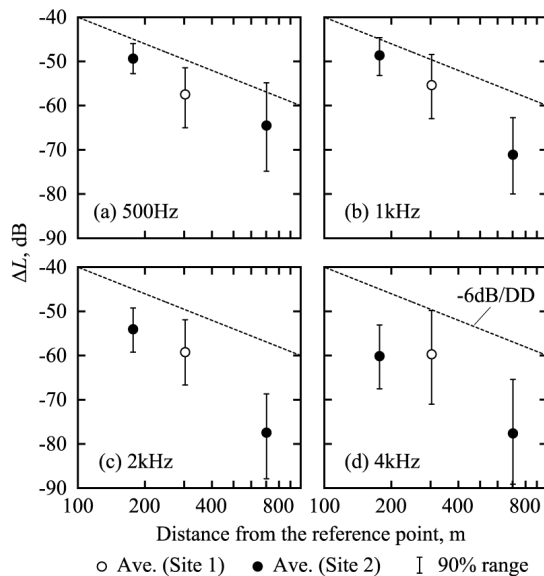


図 4 スピーカ軸上 1m 地点を基準とした音圧レベルの減衰量

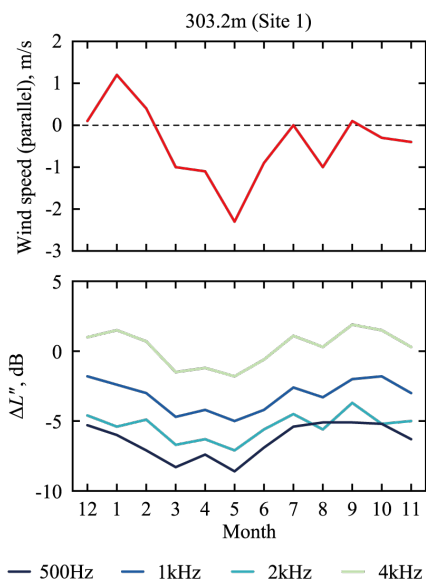


図 5 ベクトル風速と音圧レベルの減衰量の月変動

(2) 正常性バイアスを打ち破るために必要な音圧レベル

表 1 に実験に用いた刺激を示す。聴取者にヘッドホンでこれらの刺激を提示し、回答用ノー

トパソコンの画面に表示されるスライダーを用いて「緊迫感を感じ始める大きさ」に調整させた。調整後の刺激の音圧レベルは、あらかじめスライダーの位置とダミーヘッドマイクを用いて測定した鼓膜位置における音圧レベルの関係を求めておくことにより推定した。音圧レベルは、刺激の始点から終点までの等価騒音レベル (L_{Aeq}) とした。さらにその推定した音圧レベルを、自由空間における頭部中心に相当する位置の音圧レベルに換算した。聴取者 8 名の平均値と標準偏差を図 6 に示す。平均値は 62dB から 72dB の範囲に分布した。刺激 1 から 4 は実際に警報音として用いられている音源であるが、警報音ではない刺激 5 と 6 と比較すると緊迫感を感じ始める音圧レベルはやや小さく、62dB から 67dB の範囲に分布した。これらの結果から、警報音については 65dB 程度をカバーエリア内の最低音圧レベルとして確保する必要があると考えられる。

表 1 テーマ(2)の実験で用いた刺激

刺激番号	音源
1	NHK 緊急地震速報
2	地震防災訓練アプリからの録音
3	国民保護サイレン
4	大阪市大津波警報サイレン
5	案内放送前のピンポンパンポン
6	時間減衰させた三角波 (770Hz)

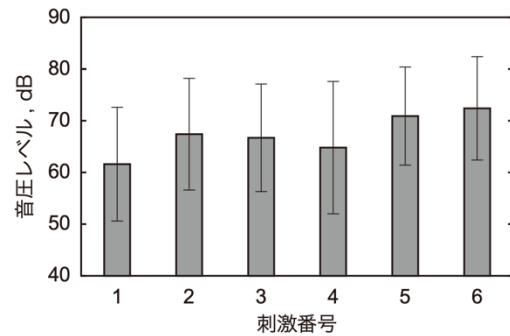


図 6 緊迫感を感じ始める音圧レベル

(3) エコーを軽減するための屋外拡声システム設計方法⁵⁾

図 7 に示す神戸市のある公園周辺を対象としたケーススタディを行った。この公園内には屋外拡声システムのスピーカが設置されている。そのスピーカ位置に全指向性音源、400m×400m の領域に 2m 間隔で受音球を配置し、音線法を用いた幾何音響シミュレーションを行った。その結果から、音声了解度の物理指標である U_{50} ⁶⁾ を算出した。 U_{50} はエコーと暗騒音がある場合は値が小さくなるため、 U_{50} が大きい場所ではエコーの影響が小さいということになる。また、図 7 に示す P1 から P8 において毎月実施されている試験放送を録音した。この録音から音声了解度の物理指標である $STOI$ ⁷⁾ を算出した。図 8 にシミュレーションから得られた U_{50} と実測調査から得られた $STOI$ の関係を示す。サンプル数が少ないため一概には言えないが、両者の間には強い正の相関 (相関係数 0.945) が見られ、シミュレーションの妥当性が確認できた。ただし、 U_{50} あるいは $STOI$ が大きい聴感上はエコーによりやや聞き取りにくい測定点 (P2) や、回折による音の回り込みがあるため聴感上はある程度明瞭に聞こえるが U_{50} は小さい測定点 (P6) なども見られた。

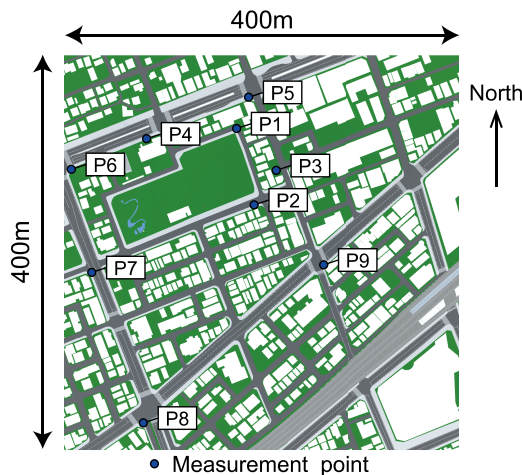


図 7 分析対象の都市街区と実測調査の測定点

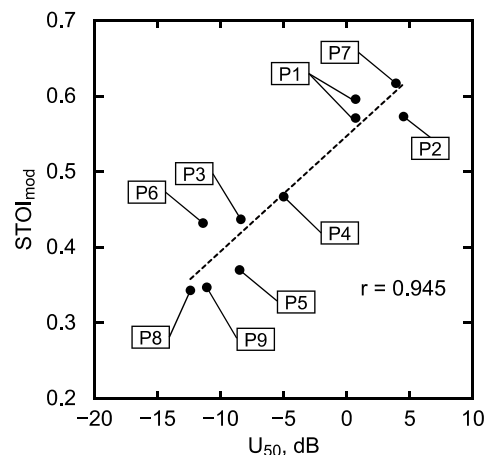
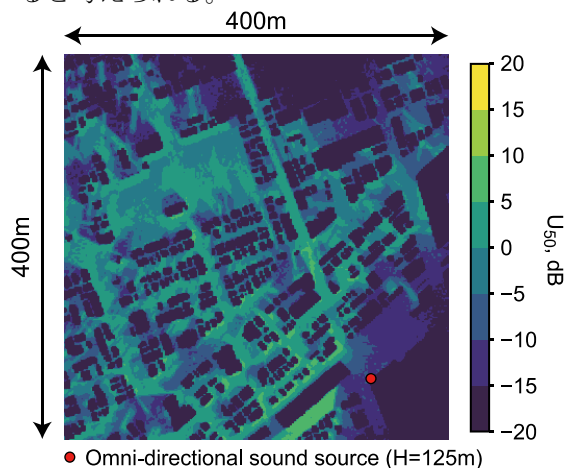


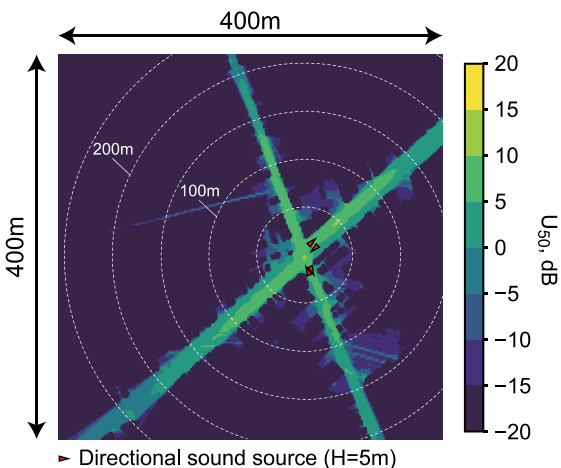
図 8 シミュレーション (U_{50}) と実測調査 ($STOI$) の対応

シミュレーションの結果を踏まえて、都市街区においてエコーを軽減し、ある程度遠方まで音声了解度を確保する方法として、音源をできるだけ高い場所に配置する方法と、道路を音の伝搬経路とする方法について、仮想音源を配置してシミュレーションを行った。図 9 は分析領域内で最も高い建築物の屋上に全指向性音源を配置した場合の U_{50} の分布である。公園内の既存のスピーカ位置に全指向性音源を配置した場合と比較して、 U_{50} が 0dB よりも大きくなる領域の割合が 13.8%から 20.1%に増加し、音声了解度の改善が確認された。図 10 は分析領域内における長い直線道路 2 本をスピーカのカバーエリアとして想定し、それぞれの道路の交差点付近に

互いに向きを反対にした指向性音源を2つずつ配置した場合の U_{50} の分布である。 U_{50} が 0 dB 以上となる領域は音源から 200m 程度まで伸びていた。音源をできるだけ高い場所に配置する方法は領域全体の音声了解度を向上できるが領域内のばらつきも大きく、「音が聞こえるが聞き取れない」という問題を生じさせる可能性がある。したがって、警報音のような聞こえるだけで情報伝達が可能な音の提供に適していると言える。一方、道路を音の伝搬経路として用いる方法は、建築物の遮蔽により1つのスピーカのカバーエリアは限定されるものの、その領域内での音声了解度のばらつきは少なく、音声による情報伝達において「音が聞こえるが聞き取れない」領域を狭くして確実性を高められるという利点がある。また、音の伝搬経路が固定されるため、本研究の対象であるスピーカの分散配置によるカバーエリアの延長が比較的容易に実現できると考えられる。



● Omni-directional sound source (H=125m)
 図9 全指向性音源を最も高い建築物の屋上に配置した場合の U_{50} の分布



▶ Directional sound source (H=5m)
 図10 指向性音源を直線道路の交差点に配置した場合の U_{50} の分布

参考・引用文献

- [1] 防災拡声放送の長期モニタリングとクロススペクトル法による気象影響の把握, 大島他, 日本音響学会騒音・振動研究会資料 N-2014-25, 1-11 (2014).
- [2] 屋外の遠心拡声方式の可能性について, 松本他, 日本音響学会学術講演論文集 (春), 1553-1554 (2014).
- [3] 都市街区における屋外拡声システムの最適配置に関する基礎的検討 —音源の設置高さ と指向性が及ぼす影響—, 佐藤, 日本音響学会建築音響研究会資料 AA2019-50, 1-8 (2019).
- [4] 地形及び気象が屋外拡声音の伝搬特性に及ぼす影響 —無人観測ステーションを用いた長期観測によるケーススタディー—, 佐藤, 栗栖, 松石, 日本音響学会学術講演論文集 (春), 1143-1146 (2023).
- [5] 都市街区における屋外拡声システムの音声了解度の面的評価 —音線法によるケーススタディー—, 佐藤, 日本建築学会環境系論文集, 88巻, 803号, 13-21 (2023).
- [6] On the combined effects of signal-to-noise ratio and room acoustics on speech intelligibility, J. S. Bradley, R. D. Reich and S. G. Norcross, The Journal of the Acoustical Society of America, Vol. 106, No. 4, 1820-1828 (1999).
- [7] An algorithm for intelligibility prediction of time-frequency weighted noisy speech, IEEE Transactions on Audio, C. H. Taal et al., Speech, and Language Processing Vol. 19, No. 7, 2125-2136 (2011).

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 1件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 佐藤逸人	4. 巻 88
2. 論文標題 都市街区における屋外拡声システムの音声了解度の面的評価 音線法によるケーススタディ	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 日本建築学会環境系論文集	6. 最初と最後の頁 13~21
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.3130/aije.88.13	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3件（うち招待講演 0件/うち国際学会 0件）

1. 発表者名 佐藤逸人, 倉本 樹
2. 発表標題 屋外拡声システムの明瞭性の面的調査法に関する基礎的検討
3. 学会等名 日本音響学会建築音響研究会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 佐藤逸人
2. 発表標題 音線法を用いた都市街区における屋外拡声システムの明瞭性の面的評価
3. 学会等名 日本音響学会2021年秋季研究発表会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 佐藤逸人, 栗栖清浩, 松石遼太
2. 発表標題 地形及び気象が屋外拡声音の伝搬特性に及ぼす影響 -無人観測ステーションを用いた長期観測によるケーススタディ-
3. 学会等名 日本音響学会2023年春季研究発表会
4. 発表年 2023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
---------	---------