

令和 5 年 6 月 27 日現在

機関番号：17201

研究種目：若手研究

研究期間：2020～2022

課題番号：20K15623

研究課題名（和文）局所耕うん法の人工マクロポア内外の水分・ガス移動計測に基づく有機物蓄積効果の評価

研究課題名（英文）Evaluation of the organic matter accumulation effect based on the measurement of water and gas movement inside and outside the artificial macropores using the shaft tillage method

研究代表者

徳本 家康（Tokumoto, Ieyasu）

佐賀大学・農学部・准教授

研究者番号：80445858

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）：当初の実施計画を延長することで、以下の3つの研究成果の概略を示す。

I. 黒ボク土を用いた土槽栽培実験，II. 人工マクロポアとSOM蓄積量の関係性，III. Hydrus2Dによる水分移動解析を実施した。局所耕うん法による密集根群下において、密集根群を伝う2次元の水分流れ、蒸散量およびCO<sub>2</sub>濃度変化を計測した。とくに、有機物分解をモデル化するため、CO<sub>2</sub>濃度の循環型計測システムを構築・評価した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究は、局所耕うん法における人工マクロポアが及ぼす水・炭素循環機構の要因を明らかにする点に学術的意義がある。本研究の成果により、局所耕うん法の地球温暖化軽減効果に繋がるような、人工マクロポア内のガス動態の実態把握が可能になった。

研究成果の概要（英文）：By extending the original implementation plan, the following three research outcomes are summarized:

「I. Cultivation experiments using Andisol, II. Relationship between artificial macropores and SOM (Soil Organic Matter) accumulation, III. 2D water movement analysis using Hydrus2D」Using the shaft tillage method, we measured the two-dimensional water flow, evapotranspiration, and CO<sub>2</sub> concentration changes in the artificial macropore. To model organic matter decomposition, we developed and evaluated a CO<sub>2</sub> concentration measurement system.

研究分野：地域環境工学および農村計画学関連

キーワード：人工マクロポア CO<sub>2</sub> 有機物分解

### 1. 研究開始当初の背景

不耕起栽培は、土壌保全の観点から注目された農法 (Unger and McCalla, 1980) であり、土壌有機物 (SOM) の分解を抑制するため、地球温暖化軽減に資する SOM 増加効果が高い栽培法である。これに対して、局所耕うん法は不耕起畑に人工的に鉛直方向の空洞 (人工マクロポア) を作成し、人工マクロポアの上へ苗移植を行う部分耕起栽培法である (田島ら, 2000) (Fig. 1)。この栽培法は、より土中深くへ根を張ることができる点で不耕起栽培法の改良法と考えられ、雑草と作物の水分競合が生じずに作物生産性を維持できる。SOM の分解には、土壌水分量が重要な要因となり、人工マクロポアを介した水流れの把握は必要不可欠である。

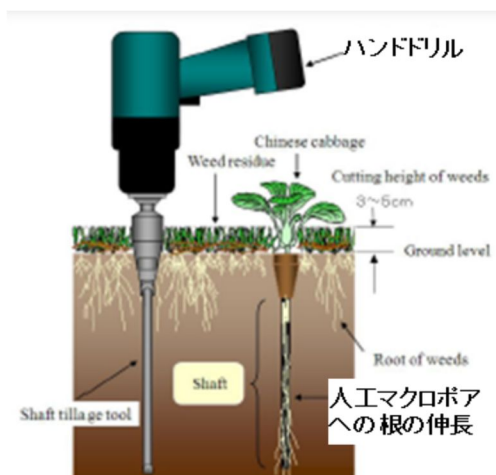


Fig. 1 局所耕うん法の概略図

(田島ら, 2000) (修正・加筆)

これまでの応募者の研究成果により、畑地における粗間隙は不飽和流れに関与しないため (徳本ら, 2005; 徳本ら, 2007), 局所耕うん法の不均一な水分移動の解明には人工マクロポア内に密集した根 (密集根群) が水分移動へ与える影響の解明の必要性が示された。そのため、局所耕うん法を模擬した土槽栽培実験を行い、以下の 3 点を明らかにした (業績 1)。

密集根群の形成条件および存在の確認

密集根群を介した選択的な下方浸透の発生

水収支に基づき、密集根群が蒸散に及ぼす影響を定量評価

土壌中の SOM 分解の把握には、土壌中における CO<sub>2</sub> ガス動態が重要である。酸素供給が増加すれば SOM 分解 (CO<sub>2</sub> ガス発生量の増加) が進むなど、人工マクロポアの有無が SOM の蓄積量に及ぼす影響には不明な点が多い。しかし、人工マクロポアを介した土中内外へのガス移動は、人工マクロポア内における土壌ガス計測が必要となり、報告例はほとんどない。

### 2. 研究の目的

本研究の目的は、局所耕うん法の SOM 蓄積効果を水分・ガス移動の視点から考察することである。この目的を達成するために、局所耕うん法を模擬した土槽栽培実験により、以下に焦点を当てた。

点滴灌漑の前後における人工マクロポア内外の CO<sub>2</sub> ガス動態の解明

人工マクロポアの有無条件において、作物の乾物重および SOM 蓄積量の定量評価

2次元に拡張した水・ガス移動と SOM 分解モデルを明らかにするため、人工マクロポア内の 2次元の水分移動解析

### 3. 研究の方法

#### 1. 黒ボク土を用いた土槽栽培実験

局所耕うん法による密集根群下において、密集根群を伝う 2次元の水分流れ、蒸散量および CO<sub>2</sub> 濃度変化を計測した。供試作物には、チンゲンサイなどの葉菜類を用いた。CO<sub>2</sub> 濃度の循環型計測により、人工

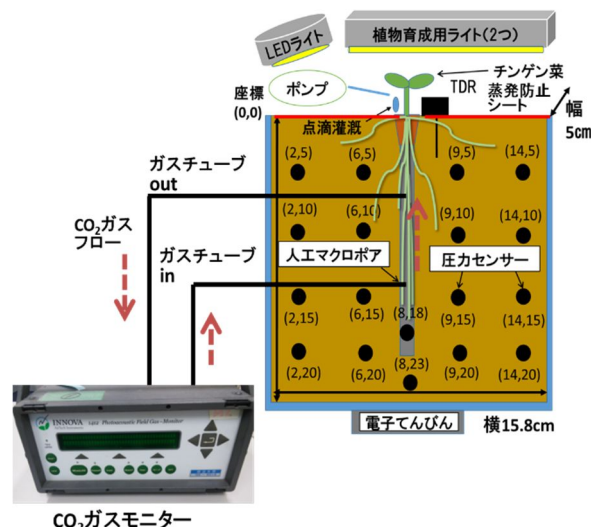


Fig. 2 密集根群周囲の水・CO<sub>2</sub>ガス移動計測実験の概略図

マクロポア内の CO<sub>2</sub> ガスフラックスの変化を連続的に明らかにする．土壌ガスの測定箇所は，土中に 2 箇所（人工マクロポア内，土壌間隙）とし，マクロポアの微小空間内における CO<sub>2</sub> ガス濃度を計測するには定量ポンプを用いたガスの循環が重要となる．したがって，電磁弁を用いた CO<sub>2</sub> 濃度の循環型計測システムの構築・評価も行った．

## II. 人工マクロポアと SOM 蓄積量の関係性

小型ワグネルポットを用いて，局所耕うん法の反復実験を行った．対照実験として，人工マクロポアの無い同様の反復実験も実施した．また生育調査として，葉面積や作物長を計測した．実験終了後，作物地上部・地下部の乾物重を計測し，強熱減量試験を用いて SOM 蓄積量を定量的に評価した．

## III. HPx プログラムによる SOM 蓄積効果の評価

1 次元の水分・CO<sub>2</sub> ガス移動を扱う Hydrus 1D および有機物分解反応を扱う PHREEQC の結合プログラム HP1 がある．不均一な水・ガス移動の考慮には，2 次元の物質移動を扱う HP2 に拡張する必要がある．本研究では，まず Hydrus2D を用いて，水分移動解析を試みた．

## 4. 研究成果

### I. 土槽栽培実験

実験：

栽培実験において，チンゲンサイの生育は良く，良好な根の活着が確認された．栽培実験では，チンゲンサイの生育状況に応じて灌水量を 0.5 mm d<sup>-1</sup> から 1.5 mm d<sup>-1</sup> まで増加させた (Fig. 3a)．平均値は 3.81 mm d<sup>-1</sup> であり，深さ 7.5 cm までの  $\theta$  は減少する傾向がみられた (Fig. 3b)．灌水中には，選択的に下方浸透の様子が観察された (Fig. 4)．土槽実験後には，人工マクロポア内に密集根群が確認された (Fig. 4)．

実験：

土壌ガス計測システムの構築

土壌ガス計測システムは，定量ポンプ (TKA27-1-12, TOKIO LAB) を用いて土壌ガスを循環させ，非分散型赤外線式 CO<sub>2</sub> 濃度変換器 (GMP252, Vaisala 社製) によって人工マクロポア内の CO<sub>2</sub> ガス濃度を計測する仕様とした (Fig. 5)．電磁弁 (USB2, 3, CKD 社製) により，ガスの流路を制御し，気密性を高めた．また，データロガー (CR1000, Campbell Scientific 社製) を用いて電磁弁およびポンプの制御し，GMP252 および小型流量計 (PF2M701, SMC 社製) の出力値を記録した．人工マクロポア内の CO<sub>2</sub> ガス濃度 ( $C_{CO_2}$ ) は，以下の提案式から算出した．

$$C_{CO_2} = \frac{C'(V_{pore} + V_{sys.}) - C_0 V_{sys.}}{V_{pore}}$$

ここで， $C'$  はポンプ作動後の CO<sub>2</sub> 濃度 (ppm)， $C_0$  はポンプ作動前の CO<sub>2</sub> 濃度 (ppm)， $V_{pore}$  は人工マクロポアの体積 (mL)， $V_{sys.}$  は電磁弁 SV1 から SV2 までのシステム内の容積 (24.6 mL) である．提案式により，ポンプ作動前後のシステム内のガス濃度を考慮して  $C_{CO_2}$  を求めた．

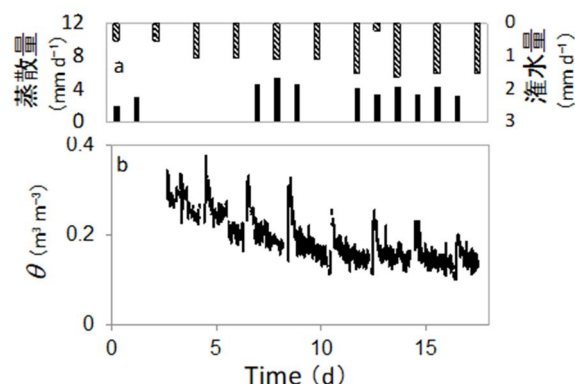


Fig. 3 栽培実験における蒸散量の経時変化(a)および $\theta$ の経時変化(b)

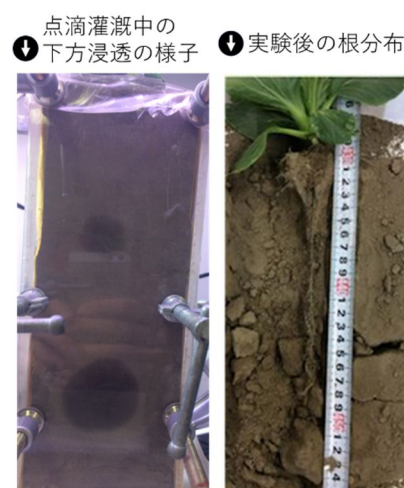


Fig. 4 栽培実験における下方浸透の様子および実験後の根分布

ガスシステムの気密性を評価するため、N<sub>2</sub> ガスフラッシュ後におけるシステム流路内の CO<sub>2</sub> 濃度の経時変化も求めた。時間経過に伴って、大気中の CO<sub>2</sub> 濃度に達したため、GMP252 内への大気流入が確認された。大気の流入は GMP252 本体部分の気密性の低さによるものと推察された。したがって本システムでは、大気の流入時間に対して、2分30秒のポンプ作動による循環計測により、大気流入の影響を抑制できたと考えられる（未発表）。

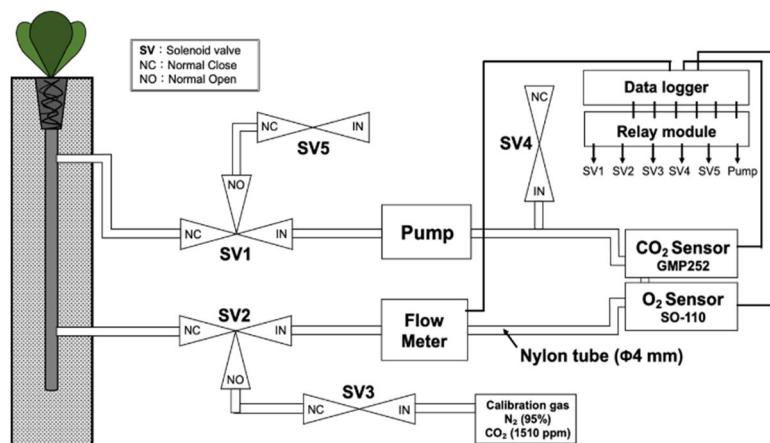


Fig. 5 構築した本システムの概略図

CO<sub>2</sub> 校正ガスの濃度と提案式から得られた CO<sub>2</sub> 濃度の比較を Fig. 6 に示す。CO<sub>2</sub> 濃度 0~8,000 ppm において、両者の CO<sub>2</sub> 濃度はおよそ一致した。GMP252 の測定精度では、CO<sub>2</sub> 濃度が 3,000~10,000 ppm の範囲において、±2% 指示値の測定誤差が報告されている。これにより、本システムを用いた CO<sub>2</sub> 濃度計測において高濃度で誤差が大きくなった理由として、本システムを構成する GMP252 の測定精度の影響が考えられた。

今後は、栽培条件下の人工マクロポア中の CO<sub>2</sub> および O<sub>2</sub> ガス動態を検討する予定である。

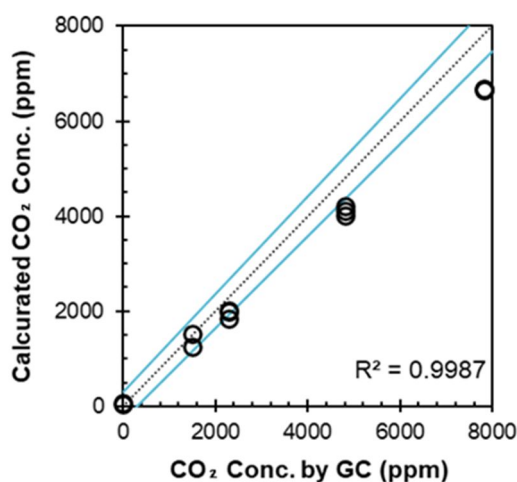


Fig. 6 GC を用いて計測した CO<sub>2</sub> 校正ガス濃度と提案式で求めた CO<sub>2</sub> 濃度の比較

## II. 人工マクロポアと SOM 蓄積量の関係性

人工マクロポアと SOM 蓄積量の関係性を明らかにするため、非火山灰土である土壌において（予備実験）、人工マクロポアの有無条件における地上部乾物重を調べた（業績 1）。

Table 1 は、局所耕うん法と不耕起栽培法におけるカラム栽培実験終了後のチンゲンサイの乾物重の比較である。根と地上部の乾物重は、人工マクロポアを有する局所耕うん法がより大きくなり、それぞれ有意差が認められた（t-test, p 値 < 0.1）。

局所耕うん法の根に関して、人工マクロポア内の密集根群の形成がすべての土壌カラムにおいて確認された。主根などの比較的大きな根が鉛直方向に伸長し、人工マクロポア内を覆うように張った毛細根が観察された。根の採取部位（苗部、人工マクロポア内、人工マクロポア外）における乾物重の比較では、およそ 25%（標準偏差 7.3%）の割合の根が人工マクロポア内に存在した。

黒ボク土においては、SOM が 33.4% であった。栽培実験前後において、SOM 蓄積量の変化を明らかにできるほど反復実験が十分とは言えない。したがって、今後の追加実験により、検討する必要がある。

Table 1 局所耕うん法と不耕起栽培法によるチンゲンサイの乾物重の比較（反復数 5 回）

		局所耕うん法	不耕起栽培法		
		人工マクロポア			
		有り	無し		
試料採取部位	乾物重 (mg)	乾物重 (mg)	乾物重 (mg)	t 検定 p 値	
根	140.8	113.8		0.098	
地上部	936.0	769.9		0.041	

### III. Hydrus 2D による人工マクロポア内の水分移動解析

2次元の水分・CO<sub>2</sub>ガス移動を精度よく予測するため、まずは Hydrus 2D を用いた水分移動解析を実施した。

数値解析のデータには、実験 1 の結果を用いた。数値解析は、土槽栽培実験を行った 18 日間を対象とし、初期条件および境界条件には土槽栽培実験の条件を設定した (Fig. 7)。密集根群の水分特性として仮定した wick (Mid-Mountain Inc.) の van Genuchten (VG) モデルのパラメータを Table 2 に示す。チンゲンサイの吸水モデルには、Feddes モデルをし、モデルパラメータには Hydrus のデータベースにあるセロリを用いた。

数値計算では、Hydrus 2D によって求めた 10 日後の 2 次元における  $\theta$  鉛直分布を予測した。密集根群が存在しない場合には選択的な下方浸透は生じず、wick を適用した水分移動計算において下方浸透を表現できた。

Fig. 8 は、実測した圧力の鉛直分布に、人工マクロポア周囲 (6, z) 座標の h 推定値を併記したものである。非常に高い wick の透水係数を用いても、灌水中における密集根群内の圧力分布の計算値は実測値に比べて低かった。これは、wick と密集根群の水分特性の違いによるものと推察される。

今後の課題として、実測値の推定には密集根群の水分特性の逆解析的な検討が必要である。また、今後は実測した CO<sub>2</sub> ガス濃度変化に基づき、HP1 を用いた CO<sub>2</sub> ガス発生・消失の解明が考えられる。

#### <引用文献>

田島淳・加藤雅義・樹野淳也：カパークロップを用いた被覆栽培のための定植器具の開発に関する研究，農作業研究，35(4)，223-228 (2000)

徳本家康・取出伸夫・井上光弘：不攪乱黒ボク土中の水分と溶質の流れについて，農業農村工学会論文集，252，51-60 (2007)

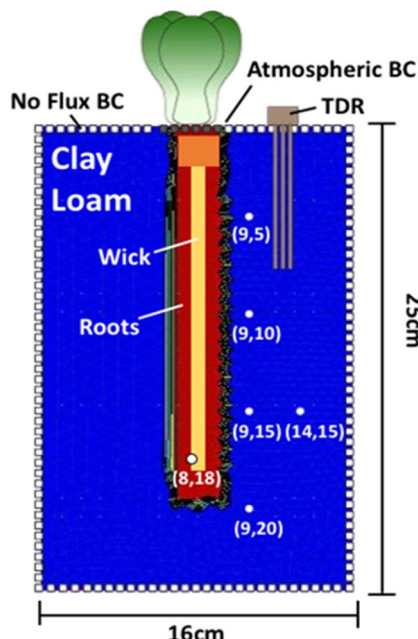


Fig. 7 数値実験の概略図

Table 2 供試土と wick の VG パラメータ

Material	$\theta_r$ (m <sup>3</sup> m <sup>-3</sup> )	$\theta_s$ (m <sup>3</sup> m <sup>-3</sup> )	Alpha	n	K <sub>s</sub> (cm d <sup>-1</sup> )
Clay Loam	0.078	0.493	0.034	1.23	6.8
Wick	0.021	0.49	0.0172	1.961	19200

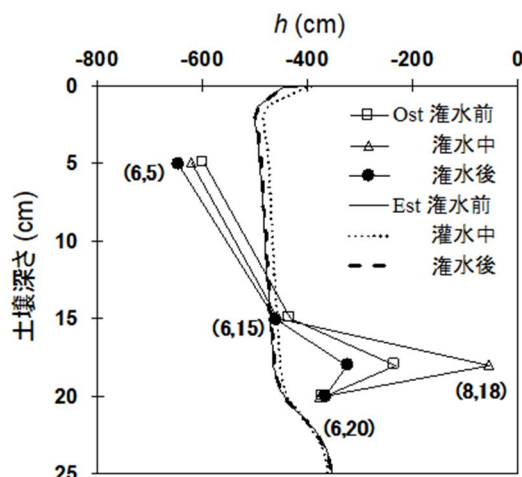


Fig. 8 灌水前後における h の鉛直分布の比較：実測値 Obs vs 計算値 Est

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計5件（うち査読付論文 5件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 2件）

1. 著者名 I. Tokumoto, K. Chiba, M. Mizoguchi	4. 巻 35
2. 論文標題 Soil salinity management using a Field Monitoring System (FMS) in tsunami-affected farmlands in Miyagi, Japan	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 International Agrophysics	6. 最初と最後の頁 227-234
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 石川洋平, 野口卓朗, 宮本英揮, 徳本家康	4. 巻 149
2. 論文標題 ArduinoとXBeeを用いた土壌水分・塩分センサネットワークの開発-宮城県津波被災農地における土壌水分・塩分の計測事例-	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 土壌の物理性	6. 最初と最後の頁 55-61
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 平嶋雄太, 牧貴広, 古藤田信博, 徳本家康, 宮本英揮	4. 巻 149
2. 論文標題 M5Stack IoT開発ボードを利用した栽培環境の遠隔モニタリング	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 土壌の物理性	6. 最初と最後の頁 63-68
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 石川洋平, 野口卓朗, 田崎小春, 堀田孝之, 小山真二郎, 徳本家康	4. 巻 印刷中
2. 論文標題 土壌水分・塩分センサネットワークを用いた被災農地の復興支援とセンシング技術教育	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 電気学会論文誌	6. 最初と最後の頁 印刷中
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 徳本家康*・藤巻晴行	4. 巻 67
2. 論文標題 局所耕うん法の密集根群における吸水と下方浸透	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 日本砂丘学会誌	6. 最初と最後の頁 69-77
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6件(うち招待講演 0件/うち国際学会 0件)

1. 発表者名 田崎小春・徳本家康・小宮秀治郎・登尾浩助・森由貴子
2. 発表標題 局所耕うん法における人工マクロポアが与えるCO2ガス動態の影響
3. 学会等名 土壌物理学会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 徳本家康・田崎小春・藤巻晴行
2. 発表標題 局所耕うん法の人工マクロポア内外の水分移動計測に基づく吸水量解析
3. 学会等名 農業農村工学会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 田崎小春・高木健伸・徳本家康
2. 発表標題 局所耕うん法の密集根群を介した土壌水分移動の解析
3. 学会等名 土壌物理学会
4. 発表年 2020年

〔図書〕 計1件

1. 著者名 M. Mizoguchi, C. Kato, M. Sakai, J. Nishiwaki, I. Tokumoto, T. Hirozumi, K. Watanabe	4. 発行年 2020年
2. 出版社 Toho News Service	5. 総ページ数 28
3. 書名 Dr. Doroemon 's Exciting Lecture "The Wonder of Soil"	

〔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
---------	---------