

令和 5 年 6 月 1 日現在

機関番号：16301

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2019～2022

課題番号：19K06318

研究課題名（和文）トマト果実の機能性成分を増加させる貯蔵制御技術の開発

研究課題名（英文）Development of storage technique for promoting functional component contents in tomato fruits

研究代表者

高橋 憲子（TAKAHASHI, NORIKO）

愛媛大学・農学研究科・准教授

研究者番号：80533306

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,400,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、近赤外分光法を用いてトマト果実のリコペン含量を連続的に非破壊計測し、リコペン生成に最適に貯蔵環境を制御することにより、1果実あたりのリコペン含量を15 mg以上に増加させることを目的とし、最適な貯蔵環境を決定するモデルを確立した。その結果、貯蔵期間後のリコペン含量は、25 で大きく増加し、貯蔵前の5 mgから貯蔵後7日目で20 mg、14日間で25 mgと約5倍増加した。次に、貯蔵後のリコペン含量を推定するモデルを作成した。回帰モデルにはニューラルネットワークを用いて検証を行った結果、決定係数 $R^2 = 0.99$ 、平均二乗誤差RMSE = 0.68となった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

トマトには、カロテノイドの中でも秀でた抗酸化作用を持つリコペンが含まれており、リコペンを多く含む機能性野菜の生産が期待されている。研究成果のモデルを利用してリコペン生成に最適に貯蔵環境を制御することにより、トマト1果実あたりに含まれるリコペン含量を15 mg以上に増加させることで、厚生省で推奨されているリコペンの効果的な摂取量を1果実で補うことが可能となる。近年、健康志向が高まっている消費者に機能性野菜を提供することが可能となり、国民の健康維持に貢献できる研究である。

研究成果の概要（英文）：The objective of this study was to develop the model for estimating lycopene content after storage using spectral data before storage and storage duration. Tomato fruits after harvesting were stored at 5, 15, 25 and 35 in cool incubator for 14 days. The spectrum data of tomato fruits were measured with Visible/Near-infrared spectroscopy non-destructively. Lycopene content after storage was estimated using neural network (NN) model with spectral data before storage and storage duration.

The estimation model of lycopene content after storage were evaluated with the validation data set and R^2 was 0.99 and RMSE was 0.68 using NN. Our results suggested that the NN model with the spectral data of tomato fruits before storage and storage duration could be used for the estimation of lycopene content after storage and this technique might be contributed to increase the lycopene content with controlling storage condition.

研究分野：農業環境工学

キーワード：非破壊計測 トマト 近赤外分光法 ニューラルネットワークモデル リコペン

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

トマト果実の赤色素であるリコペンは、機能性成分として注目され、カロテノイドの中でも秀でた抗酸化作用を持つ成分であり、果物や野菜に豊富に含まれている植物由来の抗酸化栄養素であるファイトケミカルとして期待されている。その効力は β -カロテンの2倍以上、ビタミンEの約100倍にも匹敵する。リコペンの持つ抗酸化作用は、悪玉コレステロールの酸化を抑えるため、血流を改善する効果があり生活習慣病を予防することができる。リコペンを含む食品は多く存在するが、特にトマトは100gあたりのリコペン含有量が多く、また、身近な野菜であるため、生活習慣病予防の観点からトマト1個あたりのリコペン含量を上昇させる開発は、圧迫している医療費削減という観点からも非常に重要な課題である。

厚生省が推奨する1日のリコペン摂取量は15mgであり毎日確実に摂取するのは難しい。品種改良による高リコペントマトが販売されているが、中玉トマト1果実あたり8mgであり、2個摂取する必要がある。消費者の健康志向が高まる中、1日1個を摂取すれば良いように、1個あたりに15mg以上のリコペンを含むトマト果実の生産が強く望まれる。

2. 研究の目的

本申請の研究では、近赤外分光法を用いてトマト果実のリコペン含量を連続的に非破壊計測し、リコペン生成に最適に貯蔵環境を制御することにより、1果実あたりのリコペン含量を15mg以上に増加させることを目的としている。具体的には下記のとおりである。

(i) 収穫時のトマト果実の近赤外分光の波長特性からトマト果実のリコペン含量を増加させるための最適な貯蔵環境を決定するモデルを確立する。

(ii) 上記のモデルを利用して決定される最適な貯蔵環境条件を適用し、トマト果実の貯蔵環境を動的に制御することにより、1果実あたりのリコペン含量を15mg以上に増加させる。

3. 研究の方法

3.1 トマト果実のスペクトルデータを用いたリコペン含量の推定モデルの作成

愛媛大学太陽光利用型植物工場で栽培されているトマト果実 (*Solanum lycopersicum* L., りんか409, 定植:2019/9/9) 84個を用いた。Fig. 1に貯蔵庫の様子を示す。貯蔵期間は2019/12/9 ~ 2019/12/23の14日間とした。貯蔵温度は5、15、25、35°Cに設定した。測定は貯蔵前(0日目)と貯蔵後(2、4、7、10、14日目)に4個ずつ破壊測定と非破壊測定を行った。破壊測定ではトマト果実の硬度とリコペン含量、非破壊測定では新鮮重と可視・近赤外スペクトルの測定を行った。リコペン含量の測定は、ペースト状にしたトマトをアセトンで色素抽出し、分光光度計(U-1900, (株)日立ハイテクノロジーズ)を用いて行った。可視・近赤外スペクトルの測定は、分光測定器(フルーツセレクター(K-BA100R), (株)クボタ)を用いて、トマト果実の果頂部を暗幕下で測定した。測定波長は500~1010nm、波長分解能は2nmとした。

回帰モデルには重回帰分析(MLR: Multiple Linear Regression)とPLS回帰分析(PLS: Partial Least Squares Regression)を用い、モデルの構築にはScikit-learn(ver. 0.23.2)を使用した。PLSは、説明変数と目的変数を組み合わせて主成分を作り出し、MLRを行う手法である。作り出した主成分を新しい説明変数とするため、MLRなどで起こる多重共線性を回避できる。説明変数は非破壊測定によって得たスペクトルデータ、目的変数は破壊測定によって得たリコペン含量を用いて推定モデルを作成した。精度評価は決定係数(R^2)と平均二乗誤差(RMSE: Root Mean Squared Error)で行った。84個のデータの内、7/10をモデル作成用データ、3/10をテスト用データとした。本研究ではMLR1(式1)とMLR2(式2)の2つのMLRモデルを作成した。

$$y = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 \quad (1)$$

$$y = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + \dots + b_nx_n \quad (2)$$

ここで y は目的変数、 x_1, x_2, \dots, x_n は説明変数、 b_0 は切片、 b_1, b_2, \dots, b_n は回帰係数を表している。トマト果実の二次微分スペクトルデータにおいて、584nm付近のピークがリコペン、670nm付近のピークがクロロフィルに関係するものと言われている。また、トマトの成熟はリコペンが合成される一方でクロロフィルが分解される現象であるため、それら2つの波長をMLR1の説明変数に選択した。MLR2の説明変数は本実験で得られたデータを元を選択した。

3.2 トマト果実のリコペン含量を増加させる貯蔵モデルの開発

愛媛大学太陽光利用型植物工場で栽培されているトマト果実 (*Solanum lycopersicum* L., りんか409, 定植:2020/9/8) 100個を用いた。貯蔵期間は2020/11/26~2020/12/2の8日間とした。貯蔵温度は25°Cに設定し、貯蔵前(0日目)貯蔵後(2、4、6、8日目)に分光測定器を用いて、トマト果実の果頂部を測定した。

回帰モデルにはニューラルネットワーク(NN)を用い、モデルの構築にはKeras(ver. 2.4.3)

を使用した。入力層は0日目のスペクトルデータと貯蔵日数、出力層は貯蔵後のリコペン含量を用いて推定モデルを作成した。500個のデータの内、7/10をモデル作成用データ、3/10をテスト用データ、モデル作成用データの内2/10をパラメータを決定するための検証用データとした。中間層は1層とし、活性化関数にはReLU (Rectified Linear Unit)、最適化関数にはRMSprop、評価関数にはRMSEを用いた。学習回数はEarlyStoppingを用いて自動で決定した。

4. 研究成果

4.1 トマト果実のスペクトルデータを用いたリコペン含量の推定モデルの作成

Fig. 2 に貯蔵期間と貯蔵温度がトマト果実の新鮮重減少率、硬度、及びリコペン含量に及ぼす影響を示す。貯蔵期間が長く、貯蔵温度が高くなると、新鮮重減少率は高く、硬度は低くなった。リコペン含量については、25℃で最もリコペン含量の増加が大きく、14日間で5mgから25mgと約5倍増加した。

Fig. 3 に貯蔵期間と貯蔵温度がスペクトルに及ぼす影響を示す。今回の実験で得られたデータでは、700nm以降の波長で大きな変化がみられなかったため、変化が確認された500~700nmの波長域に注目する。5℃では、14日間で564~568nmに4nmピークが移動した (Fig. 3 (a))。670nmのピークは貯蔵日数が長くなるにつれて減少した。15℃では、10日間で562~580nmにピークが18nm移動した (Fig. 3 (b))。10日目以降はピークの移動はみられなかった。670nmのピークは0日目から4日目にかけて大きく減少し、7日目以降はピークがみられなかった。25℃では、ピークの移動が最も大きく、4日間で562~590nmに28nmピークが移動した (Fig. 3 (c))。4日目以降はピークの移動はみられなかった。670nmのピークは4日目以降みられなかった。35℃では、4日間で564~570nmに6nm移動した (Fig. 3 (d))。670nmのピークは2日目以降でみられなかった。

Table 1 に推定モデルの説明変数の選択について示す。MLR1では赤色トマトのピークである584nmと670nmの2個を説明変数に選択した。MLR2では今回移動が確認された波長である、562~590nmの2nm間隔と670nmの16個を説明変数に選択した。PLSでは500~1010nmの2nm間隔の256変数を用いてモデルを作成した。モデル作成用データを用いてPLSの主成分数を決定した結果、主成分数は3とした。テスト用データを用いてモデルの検証を行った結果、PLSが $R^2 = 0.94$ 、 $RMSE = 1.09$ で最も精度が高く、MLRについては、2変数を用いたMLR1と比較して、16変数を用いたMLR2の方が $R^2 = 0.90$ と高く、 $RMSE = 1.44$ と低くなった (Fig. 4)。

4.2 トマト果実のリコペン含量を増加させる貯蔵モデルの開発

モデル作成用データを用いて学習回数とノード数を決定した結果、学習回数は8664回、ノード数は200とした (Fig. 5)。このモデルを用いてテスト用データでモデルの検証を行った結果、 $R^2 = 0.99$ 、 $RMSE = 0.68$ となった (Fig. 6)。以上の結果から、本研究で開発されたモデルを用いることで、貯蔵前のスペクトルデータと、リコペン含量を増加させるために必要な貯蔵日数から、貯蔵後のリコペン含量を推定できることが示唆された。

以上の結果から、研究成果のモデルを利用してリコペン生成に最適に貯蔵環境を制御することにより、トマト1果実あたりに含まれるリコペン含量を15mg以上に増加させることで、厚生省で推奨されているリコペンの効果的な摂取量を1果実で補うことが可能となる。



Fig. 1 Photo of tomato fruits in cool incubator during storage.

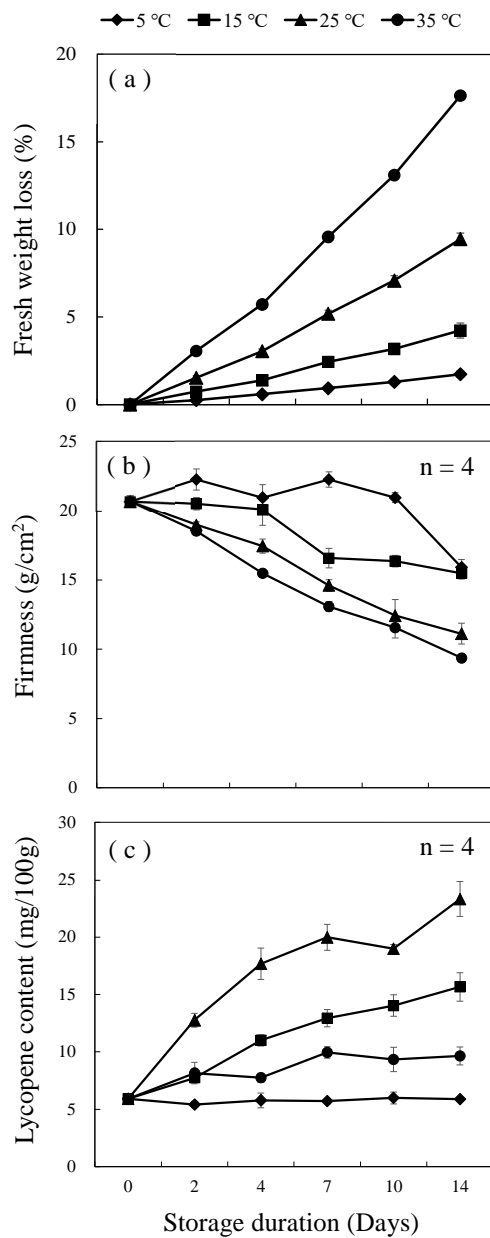


Fig. 2 Effects of storage duration and temperatures on fresh weight loss (a), firmness (b) and lycopene content (c) of tomato fruits.

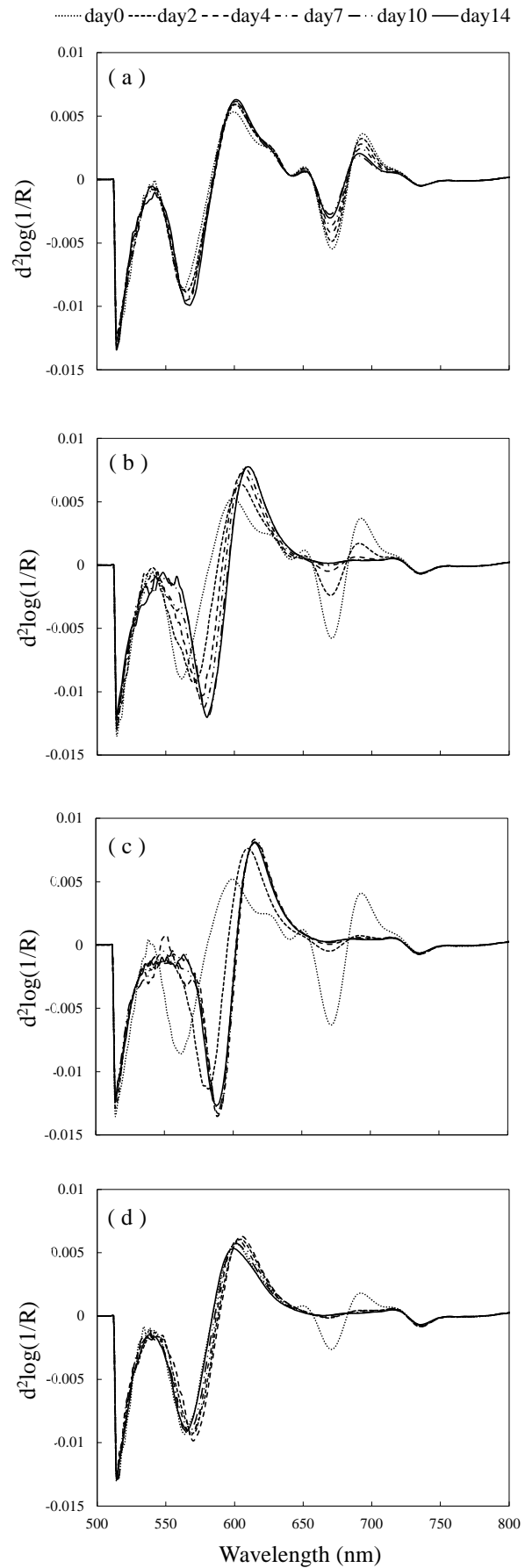


Fig. 3 Effects of storage duration and storage temperatures for 5 °C (a), 15 °C (b), 25 °C (c) and 35 °C (d) on spectrum of tomato fruits.

Table 1 Selection of explanatory variables for lycopene content estimation model.

	Wavelength (nm)
MLR1	584, 670
MLR2	562, 564, 566, 568, 570, 572, 574, 576, 578, 580, 582, 584, 586, 588, 590, 670
PLS	500 ~ 1010 (interval : 2 nm)

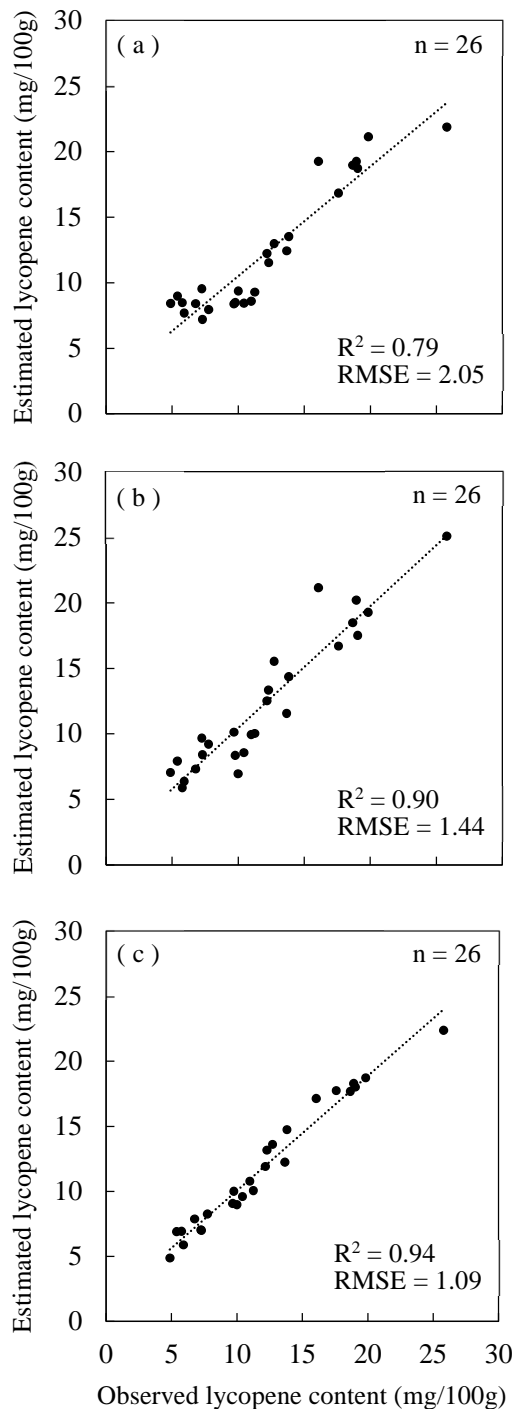


Fig. 4 Estimated and observed lycopene content of tomato fruits using MLR1 (a), MLR2 (b) and PLS (c).

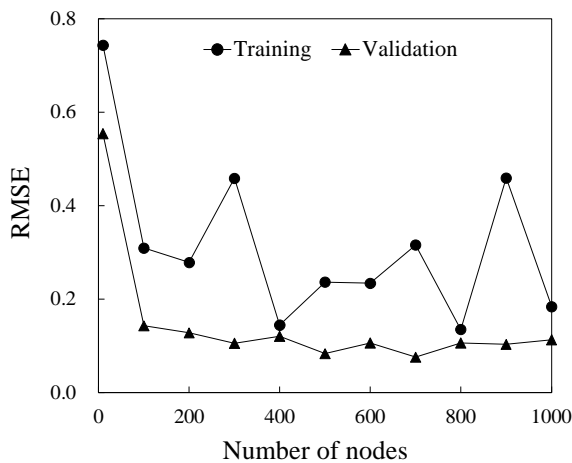


Fig. 5 RMSE and number of nodes in the middle layer of NN model using Training and Validation data for model development.

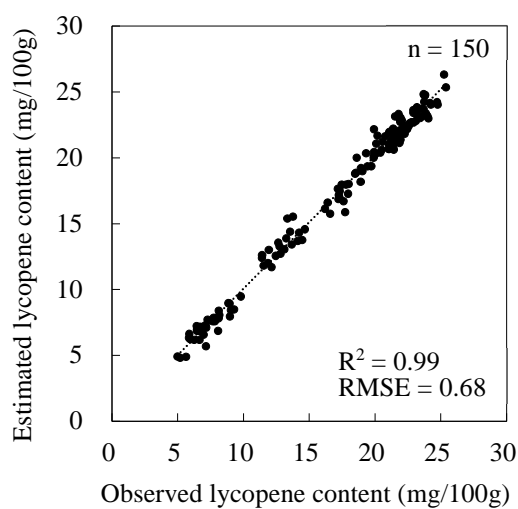


Fig. 6 Estimated and observed lycopene content of tomato fruits using NN model with spectral data before storage and storage duration.

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 1件）

1. 著者名 Konagaya K, Takahashi N, Fukugaichi S, Morimatsu K, Kuramoto M	4. 巻 924
2. 論文標題 Effect of post-harvest temperature of tomato 'Rinka 409' on quality and autofluorescence during overripening	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 IOP Conference Series: Earth and Environmental Science	6. 最初と最後の頁 012020 ~ 012020
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/1755-1315/924/1/012020	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 小長谷圭志, 近藤直, 高橋恵子, 倉本誠, 鈴木哲人	4. 巻 82(5)
2. 論文標題 トマトの蛍光と貯蔵温度との関係	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 農業食料工学会誌	6. 最初と最後の頁 505-507
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 -

〔学会発表〕 計4件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 3件）

1. 発表者名 Noriko Takahashi, Takuya Hirata, Keiji Konagaya, Kazuya Morimatsu
2. 発表標題 Estimation of lycopene content in tomato fruit at different storage temperatures using visible / near-infrared spectroscopy
3. 学会等名 19th Australian NIR Spectroscopy Group Meeting (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Konagaya K, Takahashi N, Fukugaichi S, Morimatsu K, Kuramoto M
2. 発表標題 Effect of post-harvest temperature of tomato 'Rinka 409' on quality and autofluorescence during overripening
3. 学会等名 6th International Conference on Green Agro-industry and Bioeconomy (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 平田拓也, 高橋憲子, 森松和也
2. 発表標題 トマト果実のリコピン含量を増加させる貯蔵モデルの開発
3. 学会等名 農業食料工学会関西支部144回例会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Noriko Takahashi, Takuya Hirata, Kazuya Morimatsu, Kotaro Takayama
2. 発表標題 Estimation of lycopene content in high soluble solids tomato fruit using visible / near-infrared spectroscopy
3. 学会等名 NIR 2019 Conference (国際学会)
4. 発表年 2019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
研究協力者	小長谷 圭志 (Konagaya Keiji)		

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