

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 15 日現在

機関番号：14301

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2013～2014

課題番号：25630237

研究課題名(和文)分光放射束に基づく建築照明設計法の開発に関する基礎的研究

研究課題名(英文)Fundamental Research on the Spectrum Based Architectural Lighting Design

研究代表者

上谷 芳昭 (UETANI, Yoshiaki)

京都大学・工学(系)研究科(研究院)・准教授

研究者番号：00258302

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,100,000円

研究成果の概要(和文)：昼光と人工光の分光分布を一元的に扱う「分光放射束に基づく建築照明設計法」の新開発に必要な以下の要素技術を開発した。a)魚眼レンズ付デジタルカメラによる全天空分光放射輝度分布測定法を開発して高精度であることを検証した。b)約1年間で全天空画像約9000枚の撮影とCIE-IDMP昼光気象観測を行い、様々な天気、時刻、季節における全天空分光放射輝度分布のデータベースを開発した。c)全天空分光放射輝度分布、直達分光放射照度及び人工光源の分光分布から、建築空間の分光放射照度分布及び分光放射輝度分布を波長別相互反射計算により精度良く予測する方法を開発し、視対象の演色性や色の見えの可視化手法を開発した。

研究成果の概要(英文)：To develop Spectrum Based Architectural Lighting Design, three basic technologies have developed. a) Practical and accurate method to measure the spectral radiance of all sky elements using a general purpose digital camera with a circular fisheye lens and principal component analysis. b) All sky spectral radiance distribution database: While the long-term measurement was performed from 2013/2/25 to 2014/2/15, the CIE IDMP observation was in operation. Approximately 9000 images are captured, converted to equisolid angle images, and transferred to the spectral radiance and pixel by pixel. c) Spectral Lighting Simulation considering spectrum of both daylight and artificial light sources, spectral reflectance and transmittance of building materials to calculate interior spectral radiance/irradiance distributions in order to evaluate and visualize color rendering properties.

研究分野：建築環境・光環境

キーワード：昼光 全天空画像 分光放射輝度 主成分分析 紫外可視近赤外 分光シミュレーション 演色評価数  
相関色温度

1. 研究開始当初の背景

地球温暖化防止や東日本大震災に伴う節電対策のため、建築照明の分野では昼光利用が推進され、LEDなど従来とは分光分布の異なる新光源が予想以上の早さで導入されつつある。

建築照明設計法は一般に、(1)目標設定、(2)計画、(3)予測、(4)評価の4段階からなる。(1)目標設定と(4)評価では研究の進展に伴い多様な概念が導入されている。JIS Z 9125:2007(ISO 8995:2002)では従来の照度に加えて分光分布に依存する演色性、相関色温度などが追加された。またサーカディアンリズムなど分光分布に依存する評価指標の研究も進んでいる。(2)計画では、積極的な昼光利用のために自動ブラインドやライトダクトなどの実用的研究が行われているが照度や相関色温度の測定に留まり、屋内外とも分光分布はほとんど検討されていない。(3)予測では、従来の照明計算法は、昼光光源として全天空輝度分布や直射日光照度を、人工光源では配光などを用いて、空間的・時間的に精細な計算も可能となっている。しかし予測されるのは建築空間の測光量(照度や輝度など)に留まり、分光分布に依存する新しい評価指標に対応できない。

申請者は長年にわたり科研費などの補助を受けて、昼光光源の観測やモデル化、昼光・人工光併用照明の照度や輝度の相互反射計算、魚眼レンズ付きデジタルカメラによる全天空輝度分布測定値に連動する人工照明の調光制御など、測光量に基づく建築照明設計法の基礎的・応用的研究を行ってきた。しかし、分光分布に依存する新しい評価指標の出現により、予測・評価の対象を測光量から分光分布に発展させた新しい建築照明設計法を確立する必要性を感じた。

2. 研究の目的

本研究では、昼光と人工光の分光分布を一元的に扱う「分光放射束に基づく建築照明設計法」の新開発に必要な以下の要素技術を開発する。

$$[\text{建築照明}] = [\text{昼光照明}] + [\text{人工照明}]$$

- (a) 魚眼レンズ付きデジタルカメラによる全天空分光放射輝度分布の測定法の開発
- (b) 様々な天気、時刻、季節における全天空分光放射輝度分布のデータベースの開発
- (c) 昼光と人工光の分光分布を考慮した建築空間の分光放射束分布の予測法と可視化手法の開発

通常の分光放射計は照度計や輝度計と同様に全天空分光放射照度や単一の天空要素の分光放射輝度しか測定できない。上記の(a)測定法によると全天空分光放射輝度分布を瞬時に測定できる。1年程度の自動観測でデータを蓄積し、天気・時刻・季節などで検索できる(b)データベースを開発して、(c)予測法と合わせ、革新的な「分光放射束に基づく建築照明設計法」の基盤を構築する。

3. 研究の方法

昼光と人工光の分光分布に基づく「分光放射束に基づく建築照明設計法」の新開発に必要な要素技術として以下の項目について研究を実施する。

(a) ビデオ測色法を用いて魚眼レンズ付きデジタルカメラによる全天空XYZ三刺激値分布の測定を行い、主成分分析を用いて分光放射輝度を算出することで、全天空画像の各画素に相当する微小な天空要素の分光放射輝度を測定する。

(b) 全天空画像、全天空分光放射輝度分布、全天空分光放射照度、直達分光放射照度および各種昼光気象データで構築する。

(c) 昼光と人工光の分光分布を考慮した建築空間の分光放射束分布の予測法と、色の見えを正確に再現する可視化手法を開発する。

4. 研究成果

(a) 全天空分光放射輝度分布の測定法の開発：まず、研究発表者が開発したビデオ測色法を用いて、暗室にてXenon光源と分光放射輝度計により魚眼レンズ付14bitデジタルカメラ(以下、魚眼カメラ)の色彩較正を行い、デジタル画像のRGB値とCIE XYZ三刺激値の絶対値( $Y[\text{cd}/\text{m}^2]$ )との較正関数を求める。表1に示すように、測定範囲(最小値~最大値)は天空の測定には十分広い。シャッタースピードの早い画像と遅い画像を同時に撮影すれば、さらに広げることが可能である。図1は魚眼カメラと分光放射輝度計による絶対値( $Y[\text{cd}/\text{m}^2]$ )の比較で、十分に高い精度を持つことがわかる。

表1 シャッタースピード(1/250)での測定範囲

	X	Y [ $\text{cd}/\text{m}^2$ ]	Z
max	48733	49369	61189
min	65	68	58

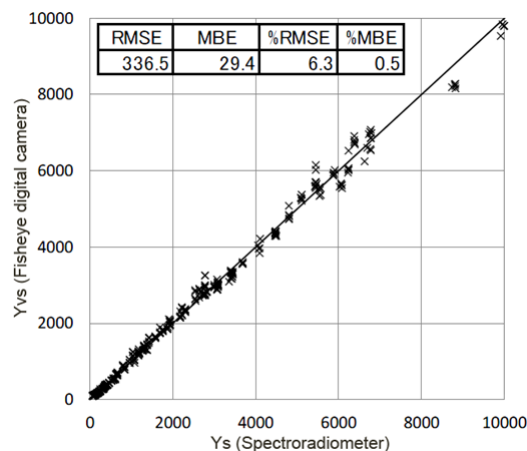


図1 魚眼カメラと分光放射輝度計の測定値  $Y[\text{cd}/\text{m}^2]$  の比較

次に、様々な天気や時刻における様々な方位の天空要素の分光放射輝度を図2に示すPC制御の自動雲台および分光放射輝度計で測定し、主成分分析により図3に示す平均および固有ベクトルを求める。

実際の測定時には、図4に示すフローのように、魚眼カメラで測定した天空要素のXYZの絶対値から色度xyを経てスカラー係数 $M_1$ ,  $M_2$ を求め、相対分光分布を再構築して、魚眼カメラの絶対値 $Y[\text{cd}/\text{m}^2]$ により分光放射輝度 $[\text{W}/\text{m}^2\text{sr}^{-1}\text{nm}^{-1}]$ を得る。表2は、分光放射輝度計のXYZによる再構築の精度で、高い精度を示している。



図2 PC制御の自動雲台および分光放射輝度計

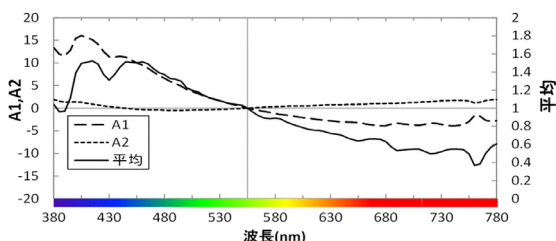


図3 主成分分析による平均および固有ベクトル

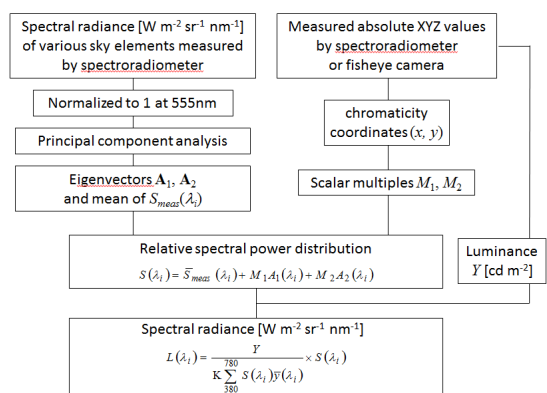


図4 実際の測定フロー

表2 分光放射輝度計のXYZによる再構築の精度

Accuracy (n=2712)		
%RMSE	%MBE	GFC
4.7	-0.1	0.99851 (c)

(c): colorimetrically accurate.

さらに、図5に示すようにPC制御の自動雲台に魚眼カメラおよび分光放射輝度計を載せて、魚眼カメラのXYZによる再構築の精度を検証した。表3に精度の結果を示すが、平均は表2の分光放射輝度計による再構築の精度に大きく劣ることは無く、魚眼カメラによる分光放射輝度の測定が実用上十分な精度を持つことが明らかとなった。図6に魚眼カメラから再構築された分光放射輝度と分光放射輝度計の測定値の比較を2例示す。



図5 魚眼カメラのXYZによる再構築の精度検証

表3 魚眼カメラのXYZによる再構築の精度

	Average	Max	Min	SD
%RMSE	10.0	36.0	2.3	4.5
%MBE	2.3	20.2	-35.3	6.3
GFC	0.99643 (c)	0.99982 (g)	0.98562 (-)	0.00271

(g): good, (c):colorimetrically accurate

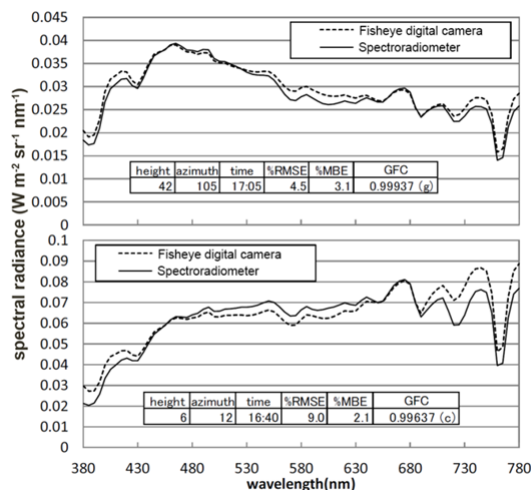


図6 魚眼カメラから再構築された分光放射輝度と分光放射輝度計の測定値

(b) 全天空分光放射輝度分布のデータベースの開発：図7に示すように、魚眼カメラにステンレスの半球をかぶせて防水・遮熱対策を施し、PC制御のインターバル撮影を行って2013/2/25 から 2014/2/15 の約1年間で約9000枚の全天空画像を撮影した。図8に例を示す。撮影は図9に示す京都大学 CIE-IDMP

観測所で行った。画素毎に分光放射輝度を算出するとデータベースの容量が巨大になるので、図 10 のように、等立体角全天空画像を視野角 1°、3°、5°、11° の 4 通りに分割しそれぞれの XYZ の平均値から分光放射輝度を再構築した。



図 7 防水・遮熱魚眼カメラ



図 8 全天空画像の例 (2014/1/10, 12:00)



図 9 京都大学 CIE-IDMP 観測所

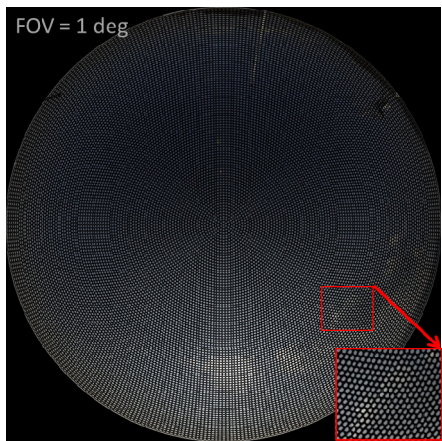
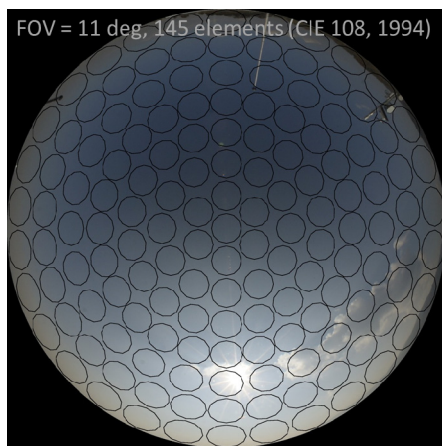


図 10 等立体角全天空画像の分割

時刻	緯度	経度	高度	方位角	視野角	要素数	分光放射輝度	色温度	全日射量	全天空照度	全天空照度 (W/m²)	全天空照度 (lux)
2014/1/10 12:00	35.0	138.0	100	180	11	145	...	...	...	...	...	...

図 11 データベースの検索画面

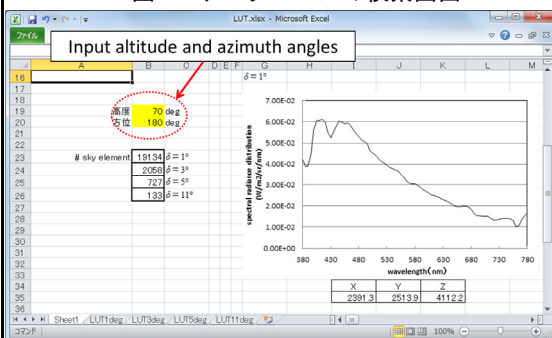


図 12 検索結果表示画面

図 11 に示すように撮影と同時に観測していた全天空照度や全日射量など昼光気象データおよび月日・時分で検索し、図 12 の表示画面で天空要素の高度と方位角を入力すると、視野角 1°、3°、5°、11° の分光放射輝度のグラフが表示される。

(c) 建築空間の分光放射束分布の予測法と可視化手法の開発：分光照明計算を用いて室空間における分光放射照度分布などを算出し、照明光の分光分布や内壁色の違いが建築空間の光環境に及ぼす影響を定量的に明らかにする方法を開発する。分光相互反射計算と演色評価数の計算を組み合わせることで、間接光を含めた視対象面入射光の演色性を表す「視対象演色評価数」を算出する。また、色の見えモデルである CIECAM02 と組み合わせることで、室空間における色の見えの属性を算出する。従来の測光量のみで依存した照明計算からは導くことができなかった事象を定量的に明らかにし、分光放射束による建築照明設計の有用性を示した。

光源の分光分布として、全天空分光放射輝度分布は(b)のデータベースを、直達日射分光放射照度は Bird や SMARTS2 など既存のモデルを、人工照明はメーカーが公開しているものを用いた。

採光窓のブラインドの分光透過指向特性はスラットの分光反射率とスラット間の分光相互反射をモデル化して定式化した。

均等拡散反射の閉面を一樣な  $m$  個の要素に分割する。分割した各面で反射率を一定とすると、その  $i$  面に入射する全分光放射照度  $E_i(\lambda)$  [ $W/m^2 \cdot nm$ ] は次式で表される。

$$E_i(\lambda) = E_{di}(\lambda) + \sum_{j=1}^m \rho_j(\lambda) f_{ji}(\lambda) E_j(\lambda)$$

ここで  $E_{di}(\lambda)$  は  $i$  面に入射する直接分光放射照度 [ $W/m^2 \cdot nm$ ]、 $\rho_j(\lambda)$  は  $j$  面の分光反射率、 $f_{ji}$  は  $j$  面から  $i$  面への全形態係数である。

視対象演色評価数は、一般的な演色評価数の計算における試料光源の相対分光分布を視対象面に入射する光の全分光放射照度に置き換えることで算出する。基準光や色順応補正に関しては、従来の計算方法と同様に扱う。

分光相互反射計算から得られる室内の分光放射照度と輝度を色の見えモデルである CIECAM02 に適用することで色の見えの属性（明度、彩度、色相）を数値化する。

図 13 の室を計算対象とし、昼光条件、窓ガラス、ブラインド、人工照明、内壁色を設定し、各パラメータを変化させて計算を行うことで、それぞれの要因が分光放射照度や演色評価数、色の見えの属性にどのような影響を与えるかを定量的に明らかにした。

昼光は「快晴・午前」、「晴れ・正午」、「晴れ・夕方」、「曇り・午後」の 4 条件とする。窓ガラスは透明ガラス、ブラインドのスラットの色はグレイ、ダークグレイ、ブラウンで、図 14 に分光反射率を示す。図 15 に人工光源の分光分布と内壁色の分光反射率を示す。

図 16 は昼光条件別の視対象演色評価数  $R_i'$ 、図 17 はクロマ C の計算結果で、昼光の影響を受けていることがわかる。図 18 は天井・床の分光放射照度分布で 420, 555, 700nm と波

長により異なることが定量的に示された。図 19 は視点から見たスクリーンの分光放射照度分布を可視化したもので、波長、視点・スクリーンの位置は任意に変化させることが出来るので、分光放射束による建築照明設計に有用である。

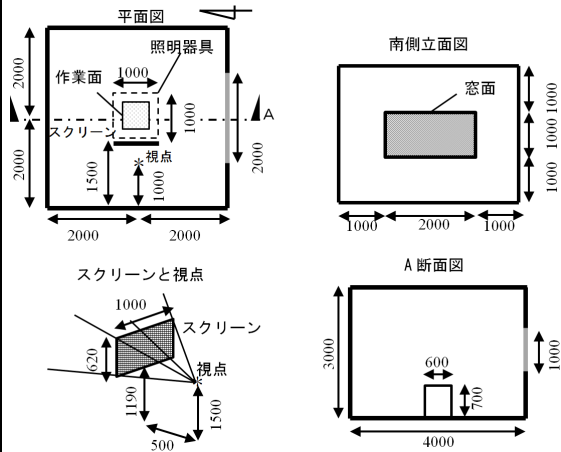


図 13 計算対象

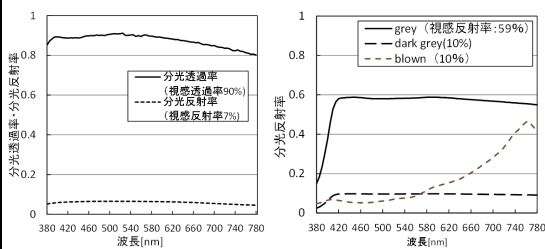


図 14 窓ガラスとスラットの分光反射率

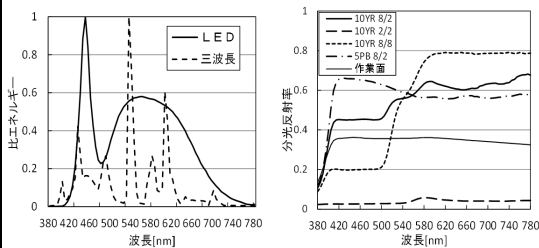


図 15 人工光源の分光分布と内壁色の分光反射率

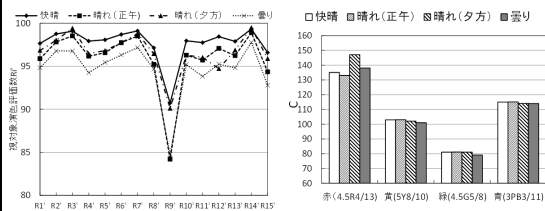


図 16 視対象演色評価数  $R_i'$  図 17 クロマ C

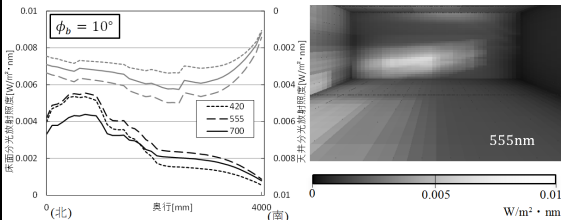


図 18 天井・床の分光放射照度分布

図 19 視点から見た分光放射照度分布

## 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計4件)

(1) 吉田悟郎, 上谷芳昭: ベネシャンブラインドの分光透過指向特性の算出方法、日本建築学会環境系論文集、査読有、第79巻、第705号、pp.937-945、2014.11  
DOI:10.3130/aije.79.937

(2) 八塚秀樹, 上谷芳昭: 主成分分析を用いた天空要素の分光放射輝度の推定法、日本建築学会環境系論文集、査読有、第79巻、第697号、pp.227-232、2014.3  
DOI:10.3130/aije.79.227

(3) 吉田悟郎, 上谷芳昭: 分光相互反射計算による昼光・人工光併用照明の演色性評価、日本建築学会環境系論文集、査読有、第78巻第691号、pp.697-702、2013.9  
DOI:10.3130/aije.78.697

(4) 八塚秀樹, 上谷芳昭: 魚眼レンズ付デジタルカメラによる全天空分光放射輝度分布の測定法、日本建築学会環境系論文集、査読有、第78巻、第690号、pp.623-629、2013.8  
DOI:10.3130/aije.78.623

[学会発表] (計10件)

(1) Yoshiaki Uetani: Measurement of the All Sky Spectral Radiance Distribution Using a Fisheye Camera and Principal Component Analysis, Proceedings of International Solar Energy Society EuroSun 2014 Conference, Paper ID 95602, 10pages, Aix-les-Bains, France, 2014.9 (査読付き国際会議)

(2) 角田仁美, 上谷芳昭, 原田和典: 駅舎の昼光環境における輝度分布および不快グレアの測定、日本建築学会大会学術講演梗概集環境工学I, pp.423-424, 2014.9

(3) 秦由季, 八塚秀樹, 上谷芳昭: 魚眼レンズ付デジタルカメラを用いた紫外・可視・近赤外域の全天空分光放射輝度分布の測定法、日本建築学会大会学術講演梗概集環境工学I, pp.459-460, 2014.9

(4) 秦由季, 八塚秀樹, 上谷芳昭: 魚眼レンズ付デジタルカメラによる紫外・可視・近赤外域の全天空分光放射輝度分布の測定法、日本建築学会近畿支部研究報告集. 環境, 第54号、pp.1-4, 2014.6

(5) 吉田悟郎, 上谷芳昭: 分光放射束に基づく建築照明設計のための分光シミュレーション、日本建築学会近畿支部研究報告集. 環境, 第54号、pp.25-28, 2014.6

(6) 角田仁美, 上谷芳昭: 駅舎の昼光環境の実測と評価、日本建築学会近畿支部研究報告集. 環境, 第54号、pp.53-54, 2014.6

(7) 八塚秀樹, 上谷芳昭: 魚眼レンズ付デジ

タルカメラの色彩校正における相関色温度の適用範囲の検討、日本建築学会大会学術講演梗概集環境工学I, pp.449-450, 2013.8

(8) 吉田悟郎, 上谷芳昭: 昼光・人工光併用照明下における色の見えの分光相互反射計算による予測法、日本建築学会大会学術講演梗概集環境工学I, pp.451-452, 2013.8

(9) 八塚秀樹, 上谷芳昭: 主成分分析による全天空分光放射輝度分布の測定に関する研究、日本建築学会近畿支部研究報告集. 環境, 第53号、pp.25-28, 2013.6

(10) 吉田悟郎, 上谷芳昭: 昼光・人工光併用照明空間における色の見えの分光相互反射計算による予測法、日本建築学会近畿支部研究報告集. 環境, 第53号、pp.33-36, 2013.6

[図書] (計0件)

[産業財産権]

○出願状況 (計0件)

名称:  
発明者:  
権利者:  
種類:  
番号:  
出願年月日:  
国内外の別:

○取得状況 (計0件)

名称:  
発明者:  
権利者:  
種類:  
番号:  
出願年月日:  
取得年月日:  
国内外の別:

[その他]

ホームページ等

## 6. 研究組織

(1) 研究代表者

上谷 芳昭 (UETANI, Yoshiaki)

研究者番号: 00258302

(2) 研究分担者

( )

研究者番号:

(3) 連携研究者

( )

研究者番号: