

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 30 年 6 月 20 日現在

機関番号：14602

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2016～2017

課題番号：16K16257

研究課題名(和文) 眼球内散乱特性による見え易さ予測のための分光分布を考慮した眼球内散乱光量の定量化

研究課題名(英文) The quantification of intraocular scattering light considered spectral distribution for prediction of visibility

研究代表者

池上 陽子 (IKEGAMI, YOKO)

奈良女子大学・生活環境学部・非常勤研究員

研究者番号：20713928

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)：事故が起きない安全な空間計画のために多くの場面で、もの見えやすさ予測が利用されるに違いない。もの見えやすさ予測に波長特性を考慮することは重要である。

輝度差分閾値、順応輝度増加量は、被験者により傾向が異なり、赤が他色より小さい傾向にあるが、光色条件間で有意な差がみられない。また、被験者視力により共通の影響もみられない。

三刺激値 $Y(\lambda)$ を算出すると、本検討では、 $Y(\lambda)$ が、赤を除いた4色で各光色間で類似する。既往の場合では、 $Y(\lambda)$ が異なる。 $X(\lambda)$ 、 $Z(\lambda)$ では光色で分布が異なり、光色の影響が説明できない。以上から $Y(\lambda)$ により、分光分布を眼球内散乱光量の算出式に考慮することが重要である。

研究成果の概要(英文)：We studied whether light color affected the intraocular scattering light on fovea. The luminance difference threshold is measured for calculating the adaptation luminance increase as intraocular scattering light. The variables of this experimental are luminance of the near-background, size of the visual target, their colour and the colour of glare source. The colour conditions are blue, green, yellow, red and white. The subjects were 17 young female. Their ages ranged from 20 to 23 years, and their visual acuity ranged from 0.1 to 1.5.

The scattering light on fovea was affected by radiance spectral distribution. Even if the colour we recognize was different, when the each colour's the radiance spectral distribution was similar, the significance difference wasn't shown in each colour's scattering light. In the visual environment design, it is important to be considered that spectral distribution of a light source and the spectral reflectance of a material.

研究分野：建築環境工学

キーワード：眼球内散乱光 視認性 分光分布

## 1. 研究開始当初の背景

ランプの飛躍的な発展により、容易に光色を変化できるようになっている。加えて、日本は超高齢社会を迎え、ますます高齢者が限りなく健康で自立して活動できるために、事故が起きないような安全な空間となる整備が求められている。そのためには、見えていなければならない対象がはっきりと見えていることが重要である。

視対象の視認性は、目が慣れている明るさのことである順応輝度と関係があることから、視認性予測には順応輝度の把握が必要不可欠である。しかし、視野内の輝度(明るさ)分布を測定することの難しさや、順応輝度算出のために用いる眼の実刺激(実効輝度)の関数化が進んでいないことから、実用性が高い順応輝度の推定には至っていない。申請者の既往研究によって光源の位置・光色などの主要要因を組み込んだ日本人の実効輝度関数(眼球内散乱特性)を把握している。しかしながら、実空間の視認性予測方法の提案には至っていない。

L. L. HOLLADAY や、B. H. CRAWFORD ら、J. K. IJSPEERT らは視野内に非常に明るい光源が影響する視認性に関する基礎的な研究により、眼の中心窩に被る散乱量の特徴について以下のことを明らかにしている。

- ・加法性を有する。
- ・方位性がみられない。
- ・眼球内の散乱光量には視線とグレア源の間の角度の逆2乗則が成り立つ
- ・眼球内散乱光量が虹彩の色や年齢により異なる

これらをもとにして 2002 年に CIE から CIE General Disability Glare Equation として中心窩への眼球内散乱光量の式が提案されている。

同様の研究で井上らは、視野周辺から中心への眼球内散乱光と、視野中心から周辺への眼球内散乱光の双方を考慮した中心窩での眼の実刺激を実効輝度と定義し、中心視におけるこの実刺激と視野内の光源位置との関係を表す関数を提案している。

眼球内散乱光量算出のために、視対象とその背景とが見分けることができる境界の輝度(明るさ)差を測定する被験者実験を実施している。主に若齢者に対して行っており、以下の要因について明らかにしている。また、CIE Disability Glare Equation とは、離角が大きい箇所では相関が高いと思われる。

- ・視野中心から要素までの角度  $0.01 \sim 90^\circ$  の範囲の眼球内散乱光量
- ・眼球内散乱光量の加法性の成立
- ・散乱要素の方位性（若齢者の場合）  
→側部>下部>上部の順
- ・散乱要素が有する光色  
→中心と要素の間が  $10^\circ$  以上：青>緑=白>赤
- ・観察者の視力

→視力 0.8 以上で差はない

- ・少数の高齢者における加法性や方位性散乱要素の方位性

→下部>側部>上部の順

若齢者において、井上は 5 色の光色空間下で視力測定を実施しており、青ならびに緑、白(色温度 6700K)において視力が低く、黄、赤の順で視力が高く、散乱量の観点で考えると青、緑、白の散乱量が高く、黄、赤の散乱量が低いことを示す。しかし、申請者のこれまでの結果では、白(色温度 4000K)の傾向が井上の黄色と一致し、白の蛍光ランプが、黄色カラード蛍光ランプの分光分布と似ている。みかけの色の影響ではなく、光源の分光分布の影響であることが示唆される。また、LED の飛躍的な発展により、同じ色を異なる分光分布で簡単に表すことができる。よって、分光分布の視認性や眼球内散乱光量への影響を明らかにすることの重要性に気付くに至る。

## 2. 研究の目的

同様に、眼球内散乱光量算出のために、視対象とその背景とが見分けることができる境界の輝度(明るさ)差を測定する被験者実験を用いて、光源に様々な光色を用意し、高齢者に加え、若齢者でも行い、精度の高い結果を目指す。

1. 色度や色温度が同じである様々なランプにおける輝度差弁別閾値の測定を行うことで、分光分布の違いを把握する。
2. 1.の内容において年齢による影響を明らかにする
3. 視野内における中心から光源までの角度を種々に設定して得られる輝度差弁別閾値から眼球内散乱光量を算出し、分光分布の影響を変数にした視野内位置と眼球内散乱光量との関係を示す関数式を作る。

## 3. 研究の方法

実験は輝度差弁別閾値の測定である。離角とは注視線と高輝度面のなす眼の位置における頂角であり、方位角とは注視線を回転軸とした回転角で真上を  $0^\circ$ 、真下を  $180^\circ$  とする。

### 3.1 実験装置

暗室内に、色再現性と均一性が高い 27.0 型の液晶モニター (EIZO 社製 ColorEdge CG277) を被験者から 1000mm 離し設置し、モニター中心を視軸と合わせる。

液晶モニターに円形視標と半径  $5.1^\circ$  の近接背景を呈示する。モニター中心と、円形視標および近接背景の中心を合わせる。視標と近接背景の輝度分布は各々均一とし、視標輝度は背景輝度より高い。1 年目では、円形視標と近接背景の光色は白色のみである。2 年目では、白色に加えて、青、緑、黄、赤を設け

ている。

高輝度面については、1年目では5400cd/m<sup>2</sup>とした昼白色ツイン蛍光ランプを離角9.7°・方位角0°に設置する。高輝度光源の立体角0.0015srであり、舞台照明用カラーフィルター青、緑、黄、赤で光色を変える。2年目では、輝度6800cd/m<sup>2</sup>、離角15.8°・方位角0°に立体角0.017srの高輝度面光源を設置する。高輝度面はLEDランプであり、1年目と同じ舞台照明用カラーフィルターを用いる。

### 3.2 実験条件

高輝度面非呈示時の場合、近接背景は0.25~100 cd/m<sup>2</sup>の11条件、視標半径は4~128'の6条件である。円形視標と近接背景の光色は白、青、緑、黄、赤の5条件である。

高輝度面呈示時の場合、近接背景は0.25~2.0cd/m<sup>2</sup>の3条件、視標半径は4~32'の4条件である。高輝度面の光色は青、緑、黄、赤、白の5条件である。円形視標・近接背景が白色の場合には高輝度面の光色は5色それぞれで実施し、円形視標・近接背景が有彩色の場合には同色の高輝度面で実施する。

### 3.3 被験者

1年目は、21~22歳の両眼視力1.2~1.5の若齢女性6名である。2年目では、両眼視力0.1~2.5の20~23歳の若齢女性17名である。全員、色覚異常や眼疾患はない。

### 3.4 実験手順

円形視標、近接背景の光色条件毎に行う。被験者は暗室内で3分間目を閉じた後に、近接背景輝度を呈示した視野に両眼で5分間順応する。被験者が視標輝度を上げ、近接背景と視標の輝度差をкаろうじて見分けられる境界に視標輝度を調節する。視標寸法を変化させ、1分の順応後、同様に繰り返す。試行回数は3回である。

### 3.5 検討方法

#### 3.5.1 順応輝度増加量

高輝度面が点灯されることで、眼球内で光は散乱し、目が順応している輝度は増加する。この順応輝度の増加分を順応輝度増加量という。順応輝度増加量 $\Delta L_a$ は輝度差弁別閾値が等しくなる高輝度面非呈示時と呈示時の近接背景輝度の差であり、近接背景輝度に依存せず、高輝度面条件毎に唯一に定まる。また、呈示、非呈示毎に輝度差弁別閾値曲線の形状は唯一に定まる。順応輝度増加量 $\Delta L_a$ は非呈示の場合は $\Delta L_a=0$ である。下記の式で算出した順応輝度増加量ならびに輝度差弁別閾値を用いて分析する

$$\log \Delta L_{th}(\alpha)$$

$$=a(C_b) \cdot (\log(L_b + \Delta L_a(C_b)))^2 + b(C_b) \cdot \log(L_b + \Delta L_a(C_b)) + c(C_b, \alpha)$$

$L_b$ : 近接背景輝度、 $\alpha$ : 視標寸法 [']、

$a, b, c(\alpha)$ : 定数、

$C_b$ : 近接背景輝度の色、 $C_a$ : 高輝度面の色、

$\Delta L_a$ : 各高輝度面呈示条件による順応輝度増加量 [cd/m<sup>2</sup>]

#### 3.5.2 実効率 $k(\alpha)$

実効率とは実際の視標と近接背景の輝度

差に対する眼への実刺激差の比である。視野中心に呈示されている視標の輝度は同じであっても視標寸法が異なると認識する輝度は異なる。それは、視野中心の視標の輝度が中心から周辺へ散乱することで、環境で設定された輝度と、実刺激で認識する輝度が異なるためである。この相対的な散乱量を示しているのが実効率 $k(\alpha)$ である。

$$k(\alpha) = \frac{\text{視標半径128'の}\Delta L_{th}}{\text{視標半径}\alpha\text{の}\Delta L_{th}} \quad \dots(1)\text{式}$$

## 4. 研究成果

### 4.1 視野中心から周辺への散乱光への分光分布の影響

#### 4.1.1 実効率 $k(\alpha)$

図1に視力0.19の被験者の視標半径と実効率 $k(\alpha)$ との関係を示す。本報ではシェッフエの一対比較法により光色間で有意差はみられないが、光色によるわずかな差異があり、赤は他の光色よりわずかに $k(\alpha)$ が高く、中心からの散乱量が相対的に小さいことを示す。一方、カラー蛍光ランプを用いた既報<sup>2)</sup>においては、青で $k(\alpha)$ が小さく、赤で $k(\alpha)$ が大きく、光色間で有意水準5%の有意差がみられる。図2は被験者17人の5色の平均実効率 $k(\alpha)$ である。いずれの光色においても視力が低いと実効率 $k(\alpha)$ は低く、周辺の散乱が大きいたことが示されている。

#### 4.1.2 分光分布の影響

表1に示すモニターの分光放射輝度は青と緑および白と黄で類似し、赤が他と異なる。分光放射輝度に等色関数を乗じ、三刺激値

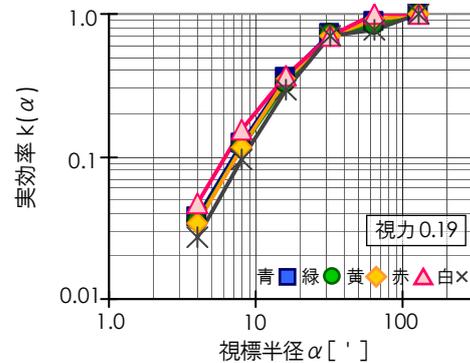


図1 視標半径と実効率との関係 (視力0.19の被験者)

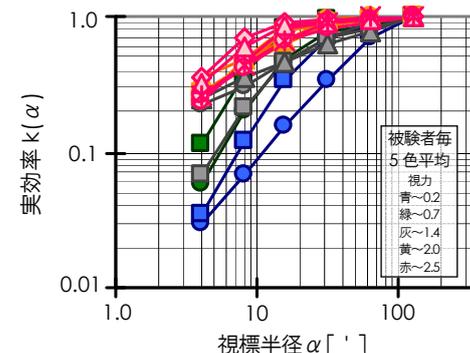


図2 視標半径と実効率との関係 (被験者毎5色平均)

表 1 視標・近接背景による中心窩における実刺激(実効輝度)の分光分布

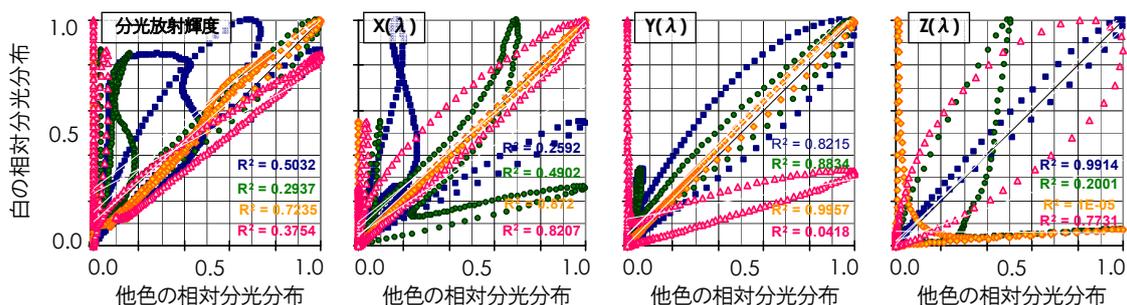
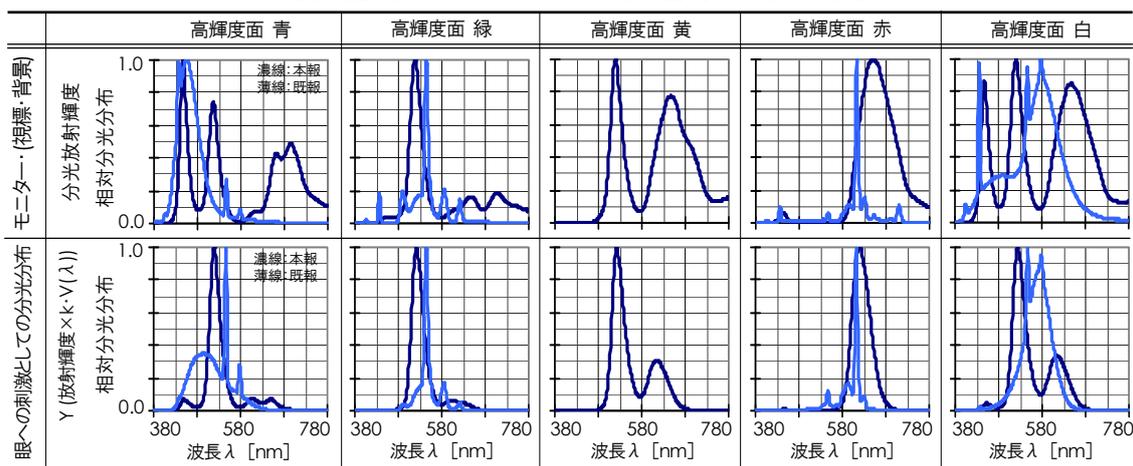


図 3 白の相対分光分布と他色の相対分光分布の相関関係 (プロットの色が比較されるモニターの光色)

$X(\lambda)$ ,  $Y(\lambda)$ ,  $Z(\lambda)$  分布を算出すると、 $Y(\lambda)$  では赤を除き、残りの光色の分布が分光放射輝度分布よりも明確に類似し、実効率  $k(\alpha)$  で赤を除き差がみられないことと一致する。図 3 に白の相対分光分布と他色の相対分光分布の相関関係を、分光放射輝度ならびに  $X(\lambda)$ ,  $Y(\lambda)$ ,  $Z(\lambda)$  それぞれで示す。相関係数より  $Y(\lambda)$  の分布が実効率の傾向を最も説明できる。 $X(\lambda)$ ,  $Z(\lambda)$  では、相関係数の傾向と実効率の傾向が一致していない。また、カラー蛍光ランプを用いた既報<sup>2)</sup>では、分光放射輝度分布においても差がみられ、三刺激値  $Y(\lambda)$  分布ではより明確になり、 $k(\alpha)$  の傾向と一致する。以上より、見かけの色ではなく、分光放射輝度や三刺激値  $Y(\lambda)$  の分布が関係している。

#### 4.2 視野周辺から中心への散乱光量への分光分布の影響

##### 4.2.1 順応輝度増加量 $\Delta L_a$

被験者毎に 5 色間で順応輝度増加量  $\Delta L_a$  の大小に対して順位を付け、順位の累積相対度数を図 4 に示す。4.1 の実効率と同様に、本報では、シェッフエの一対比較法により光色間で有意差はみられないが、赤の場合に他の光色よりわずかに順応輝度増加量  $\Delta L_a$  が小さい。また、全ての高輝度面光色で  $\Delta L_a$  の測定に用いる視標・近接背景が「白色」か「高輝度面と同色」かによる有意差はない。一方、カラー蛍光ランプを用いた既報<sup>2)</sup>においては、青で  $\Delta L_a$  が大きく、赤で小さく有意水準 5% の差異がみられる。

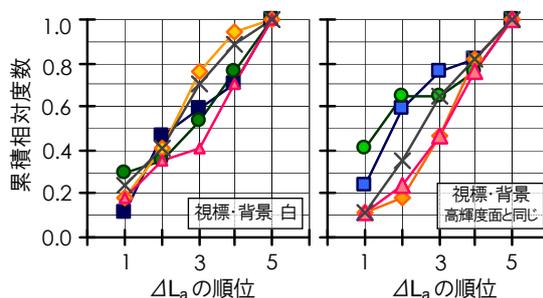


図 4  $\Delta L_a$  の順位 青■緑●黄◆赤△白×

##### 4.2.2 分光分布の影響

表 2 に示す視標・背景の分光分布と高輝度光源の分光分布から眼への実刺激の分光分布を推定する。既報の実効率関数を用いてそれぞれの中心窩への散乱光量を算出すると、本報の近接背景輝度  $1 \text{ cd/m}^2$  では視標・近接背景の散乱量：高輝度光源の散乱量 =  $1.0 : 2.0$  になり、このとおりに分光分布に重みづけする。推測される中心窩上での分光放射輝度は、高輝度面と類似する。また、高輝度面の重みが大いことから、視標・近接背景輝度の影響量は小さく、視標・背景が白色の場合と高輝度光源の光色が同じ場合では分光分布に大きな差異はない。図 5 に白の相対分光分布と他色の相対分光分布の相関関係を、分光放射輝度ならびに  $X(\lambda)$ ,  $Y(\lambda)$ ,  $Z(\lambda)$  それぞれで示す。三刺激値  $X(\lambda)$ ,  $Y(\lambda)$ ,  $Z(\lambda)$  においても 4.1 の視野中心における散乱の場合と同様である。また、 $Y(\lambda)$  の赤の

表 2 高輝度面の分光分布と中心窩における高輝度面呈示時の実刺激(実効輝度)の推定分光分布

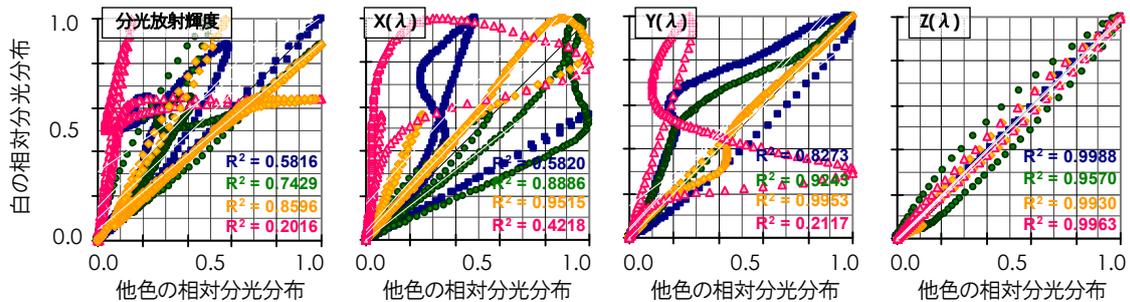
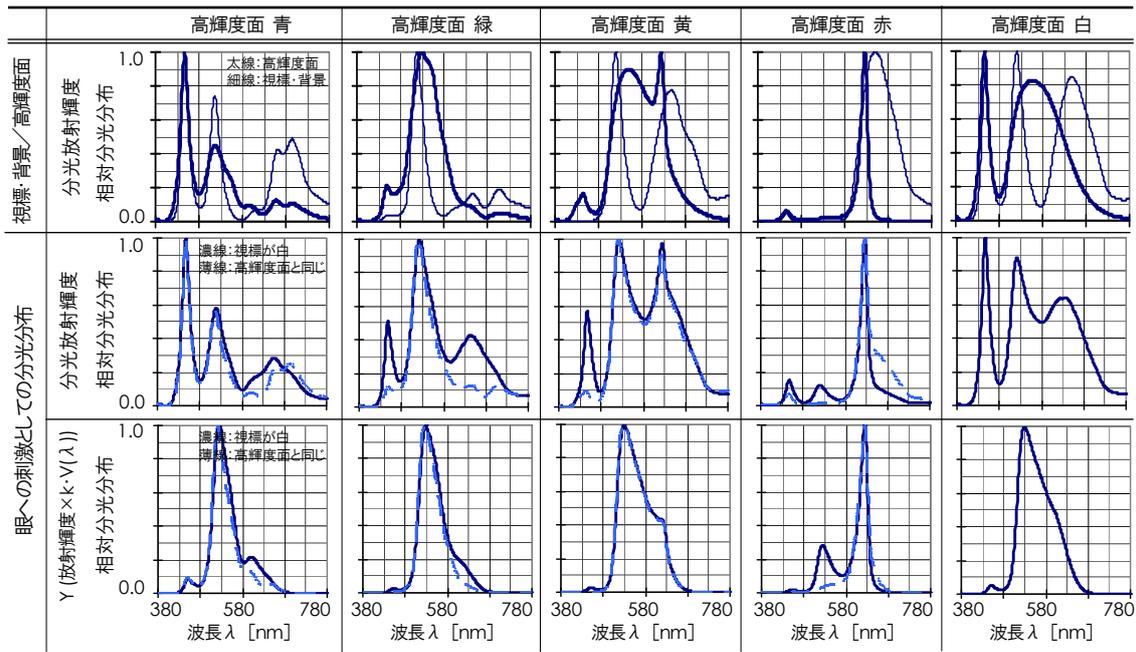


図 5 視対象が白色の場合における高輝度面が白と他色の相対分光分布の相関 (プロットの色が検討される光色条件)

傾向より分光分布の波形が類似していても、ピークの波長が 70nm 以上異なると、相関係数は小さく傾向は異なることが示唆される。

#### 4.3 総括

眼球内散乱特性に見た目の色ではなく分光分布が影響している。また、分光分布の違いは分光放射輝度で示され、今回の条件では三刺激値  $Y(\lambda)$  の分布でより明瞭に違いが判別されている。今回使用したランプの分光分布では分光の影響を考慮しなくてもよい場合が多いと考えられ、カラー蛍光灯のように明らかな違いがみられる場合には、分光分布の影響を考慮する必要がある。

#### 5. 主な発表論文等

[学会発表] (計 3 件)

①池上陽子、井上容子、実効輝度を用いた視環境評価法に関する研究 その 6 眼球内散乱特性への分光分布の影響、日本建築学会近畿支部研究報告会、2018 年 6 月

② Ikegami, Y., Fujita, K. and Inoue, Y., Study on Visibility under Visual Field within Non-Uniform Luminance Distribution: Influence of Spectral Distribution of Light Source on

Intraocular Scattering Light, the 8th Lux Pacifica Life and Lighting, pp. 48-51, March 2018

③池上陽子、井上容子、複雑な輝度分布視野の順応輝度に関する研究 — 光源の分光分布、被験者の年齢および視力の順応輝度増加量への影響 —、平成 29 年度(第 50 回)照明学会全国大会、No. 0626、2017 年 9 月

#### 6. 研究組織

(1) 研究代表者

池上 陽子 (IKEGAMI Yoko)

奈良女子大学・生活環境学部・非常勤研究員

研究者番号：20713928