

トンネル照明マネジメントのための 高速道路上落下物の反射率分布推定

坂口創¹・小濱健吾²・平川恵士³・貝戸清之⁴

¹学生員 大阪大学大学院 工学研究科地球総合工学専攻 (〒 565-0871 吹田市山田丘 2-1)

E-mail: s.sakaguchi@civil.eng.osaka-u.ac.jp

²正会員 大阪大学特任研究員 大学院工学研究科西日本高速道路学共同研究講座 (〒 565-0871 吹田市山田丘 2-1)

E-mail: k-obama@civil.eng.osaka-u.ac.jp

³非会員 西日本高速道路株式会社 (〒 565-0871 吹田市山田丘 2-8)

E-mail: s.hirakawa.ab@w-nexco.co.jp

⁴正会員 大阪大学准教授 大学院工学研究科 地球総合工学専攻 (〒 565-0871 吹田市山田丘 2-1)

E-mail: kaito@ga.eng.osaka-u.ac.jp

高速道路上落下物は、利用者の快適な運転を妨げ、重大事故発生の要因の1つとなるため、落下物の視認性の向上が大きな課題となっている。特に、トンネル内の落下物は、トンネル外の落下物と比較して視認しづらく、その視認性はトンネル照明方式により大きく左右されるため、トンネル照明方式の決定が重要な課題となっている。本研究ではトンネル照明方式決定手法の確立を最終的な目標と設定し、その基礎的研究として、落下物の反射率分布をモデル化する方法論を構築する。具体的には、反射率分布を、多峰性を表現できる混合ベータモデルを用いて表現し、混合ベータモデルの未知パラメータおよび混合率を、EM アルゴリズムにより推定する。最後に、実測データを用いた適用事例を通して、本研究で構築した方法論の有効性を実証的に検証する。

Key Words : falling objects on the highway, the reflectance distribution, Mixed beta model

1. はじめに

高速道路上落下物の存在は、利用者の快適な運転を妨げ、さらに落下物の視認性が低ければ、重大事故発生の要因となる。そのために、高速道路の管理においては、落下物に対する視認性の向上が課題となっている。中でもトンネル内の落下物の視認性は、トンネル照明方式により大きく左右される。トンネル照明方式は、対称照明方式、プロビーム照明方式、カウンタービーム照明方式の3種類に大分され、落下物の反射率分布、路面輝度、照明光度、順応輝度などといった道路トンネル照明に関する様々な要素によって規定される。現在の照明方式の決定過程においては、1930年代の反射率に関する調査結果が用いられ、その結果、我が国では従来、落下物の視認性が高いとされる対称照明方式が多く採用されてきた。しかし、これは1930年代の調査結果と実際の高速道路上落下物の特性との整合性が高いことが前提となっている。さらに、**2.(1)**において詳述するように、プロビーム照明方式は対称照明方式と比較して先行車の視認性が高いという利点がある。トンネル照明方式の決定についても、利用者の走行安全性の確保と費用削減という2つの指標を総合的に考慮した方法論の開発が課題となっている。

本研究では、照明方式決定に関する重要な指標であ

る、落下物の反射率分布に着目する。落下物の視認方法には、路面を明るく照らして落下物を影として捉えるシルエット視と、路面を暗くして落下物を明るく照らす逆シルエット視の2種類が存在する。ある落下物がシルエット視、逆シルエット視のどちらで視認されるかは、当該落下物の反射率とトンネル照明方式に依存する。いずれのトンネル照明方式を採用した場合でも、シルエット視、逆シルエット視の双方において視認しづらい反射率範囲が存在し、その範囲を占める落下物数の割合は反射率分布を用いることで決定されるため、反射率分布はトンネル照明方式決定の際に重要な指標となる。しかし、現行のトンネル照明方式は、1938年の歩行者の衣服を対象としたSmithの研究¹⁾で算出された反射率分布を基に決定されており、現在の高速道路上落下物の反射率分布とは乖離がみられると考えられる。本研究ではトンネル照明方式決定手法の確立を最終的な目標と設定し、その基礎的研究として高速道路会社が保有する落下物データに基づいて反射率分布を推定する。具体的には、反射率分布を多峰性を考慮可能な混合ベータモデルで表現し、混合ベータモデルの未知パラメータおよび混合率をEM アルゴリズムを援用して推計するための方法論を提案する。以下、**2.**において本研究の基本的な考え方を述べ、**3.**で混合ベータモデルとEM アルゴリズムについて記述する。



図-1 照明方式模式

2. 本研究の基本的考え方

(1) 道路トンネル照明と落下物の反射率

高速道路トンネル照明方式には、対称照明方式、プロビーム照明方式、カウンタービーム照明方式の3種類の方式がある。図-1にこれら3種類の照明方式の模式図を示す。同図 a) は対称照明方式を示している。対称照明方式は車両の進行方向に関係なく路面に対して鉛直下向き方向に光を照射する照明方式であり、他の2種類の照明方式と比較して低い光度（光の強さ）で路面輝度（路面の明るさ）を確保することができるために低コストでの設置が可能である。現在、我が国の照明方式は主に対称照明方式が採用されている。同図 b) はプロビーム照明方式を示している。プロビーム照明方式は車両の進行方向と同一方向に光を照射する照明方式である。路面に対して斜めに光を照射するために対称照明方式と比較して高い光度が必要となり、コストが増加する。その反面、先行車を視認しやすいという特徴があるため、交通量の多い道路トンネルで採用しやすい照明方式である²⁾。同図 c) はカウンタービーム照明方式を示している。カウンタービーム照明方式は車両の進行方向とは逆方向に光を照射する方式であり、主に米国などの交通量の少ない道路トンネルで採用されている。プロビーム照明方式と同様に、路面に対し斜めに光を照射するため対称照明方式と比較して高い光度が必要となり、コストが増加してしまうが、1) 運転者側へ高い路面輝度が得られる、2) 落下物の正面が暗くなることから路面と落下物の対比が容易になる、という特徴を有する。3種類の照明方式に関しては、上記のような様々な研究³⁾がなされてきたが、現在照明方式の決定方法は確立されていない。照明方式の決定に関して重要な項目の1つに落下物の視認性があげられる。高速道路上の落下物の視認方法にはシルエット視と逆シルエット視の2種類がある。図-2は、反射率の異なる

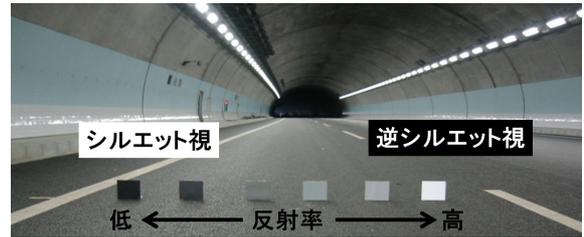


図-2 落下物視認メカニズム

る6つの立方体の落下物をトンネル内の道路上に設置したものである。シルエット視は路面を明るい背景として、落下物との間に輝度差を生じさせることで落下物をシルエット（影）として視認する。落下物をシルエットとして視認するため、反射率の低い落下物が視認しやすい（図-2の左2つの落下物）。逆シルエット視は落下物を明るくして、路面との間に輝度差を生じさせることで、落下物を視認する。落下物を明るくするため、反射率の高い落下物が視認しやすくなる（図-2の右3つの落下物）。シルエット視、逆シルエット視のいずれの方法で落下物が視認されるかは、照明方式、落下物の反射率や路面との輝度差により決定される。しかし、上記3種類いずれの照明方式を採用したとしても、シルエット視、逆シルエット視の双方で非常に視認しづらい反射率範囲が存在する（図-2の左から3つ目の落下物）。それは、人間の視覚には識別できる輝度差に限界があり、対象物と路面との間の輝度差が小さすぎることから視認できない領域が存在するためである。落下物の存在が確認できなくなる反射率範囲の両端の値は採用する照明方式により変化し、以下の式で表現される。

$$\rho_1(\%) \leq \frac{(Lb - \Delta L_{min}) \times (100\pi)}{E_v} \quad (1a)$$

$$\rho_2(\%) \geq \frac{(Lb + \Delta L_{min}) \times (100\pi)}{E_v} \quad (1b)$$

ρ_1 , ρ_2 は限界反射率, L_b は路面輝度, ΔL_{min} は順応輝度と路面輝度の和の最小値, E_v は鉛直面照度である. シルエット視で視認する場合, 反射率が高くなるにつれて視認しづらくなり, 反射率 ρ_1 の時に落下物の存在が確認できなくなる. また, 逆シルエット視で視認する場合には, 反射率が低下するにつれて視認しづらくなり, 反射率 ρ_2 の時に落下物の存在が確認できなくなる. このような反射率を限界反射率という. 式 (1a), 式 (1b) の分子は, すべて路面の状態で決定される. 一方, 分母に関しては, すべての照明方式の照度を等しくした場合, 照明方式によって鉛直面照度 E_v は異なってくる. 特に, プロビーム照明方式の場合, 対称照明方式に比べて鉛直面照度 E_v は大きくなり, 限界反射率 ρ_1 , ρ_2 はともに低い値となる. 一般的に限界反射率は, 対称照明方式の場合には約 20~30% 付近, プロビーム照明方式の場合約 5~15% 付近であると考えられている. 我が国の高速道路における交通量は非常に多いために, 先行車を視認しやすいプロビーム照明方式の採用が検討されることが多くなると思われる. また, 反射率の観点から安全性を考える上で総視認率と呼ばれる指標がある. 総視認率とは, 図-3 で示すようにシルエット視による視認率と逆シルエット視による視認率の総和である. この総視認率が高いほど, 落下物の視認に関する安全性が向上すると考えられる.

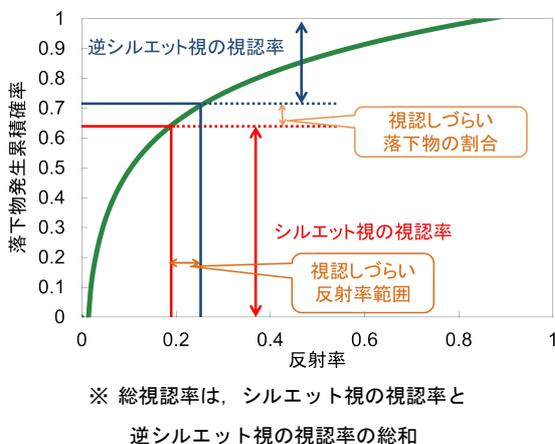


図-3 総視認率の概要

(2) 現状の反射率分布とその問題点

(1) で述べたように落下物の反射率分布は, トンネル照明方式決定において, 極めて重要な指標の 1 つである. 反射率分布に着目した代表的な研究として Smith の研究¹⁾があげられる. 1938 年, Smith はロンドンの街路を歩く歩行者の衣服の反射率を調査し, シルエット視として視認されるときに累積確率を求めた. 図-4 に Smith が算出した累積分布曲線 (以降, Smith 曲線と

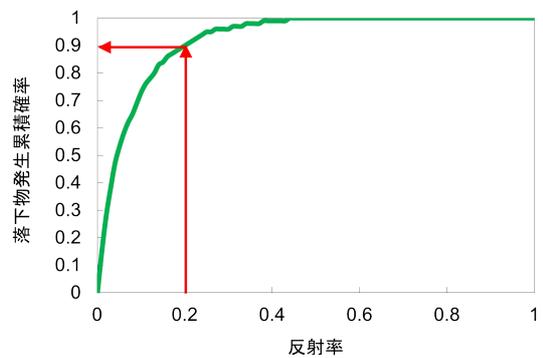


図-4 Smith の累積分布関数

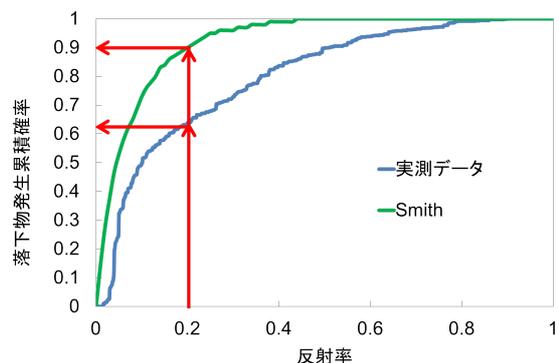


図-5 高速道路調査の結果

呼ぶ) を示す. 同図に赤線で示した反射率 20%において, 累積確率が 90%に達している. これは, 反射率が 20%以下の対象物を視認できる照明環境であれば, 歩行者全体の 90%を視認できることを意味している. しかし, (1) で述べたように, 90%がシルエット視で視認できるからと言って, 残りの 10%が逆シルエット視で視認できるわけではない. また, Smith の研究における対象物は歩行者となっているが, 現在の高速道路において歩行者の存在は稀有であり, 路上落下物にも様々な反射率を有する物がある. よって, 今後, より落下物視認性の高い照明方式を検討するためには, 現在の高速道路上落下物と反射率の関係を明らかにする必要がある.

上記の実務的要請を受け, 現在の高速道路上落下物の反射率特性を把握するために, ある道路会社が実際に調査を行った. その調査結果を Smith 曲線と併せて 図-5 に示す. 同図の赤線より, Smith 曲線においては反射率 20%以下の落下物が全体の約 90%を占めているのに対し, この調査では反射率 20%以下の落下物は全体の約 60%程度であることがわかる. このことから, 現在の高速道路上落下物の反射率分布は Smith の研究の対象であった当時の歩行者の衣服の反射率分布と大き

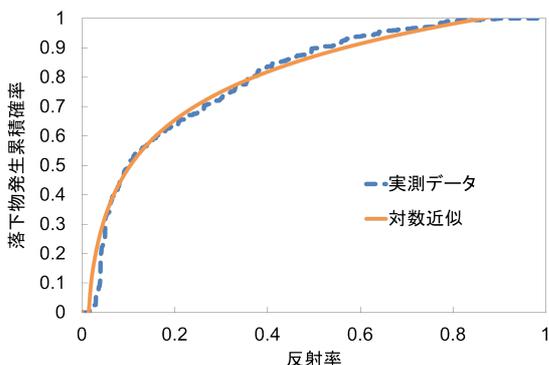


図-6 対数近似された累積分布関数

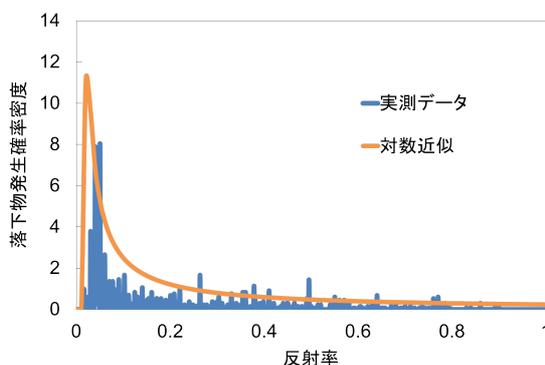


図-7 対数曲線の確率密度関数

く異なることがわかる。

そこで、道路会社は実務で汎用させるため、実測データから反射率と累積確率の関係を対数近似した曲線で表現した⁴⁾。その反射率と落下物発生累積確率の関係を図-6に示す。図-5と同様、反射率20%での累積確率を確認すると、約60%とSmith曲線との乖離が確認できる。また、図-7には対数曲線の確率密度関数を示した。同図を見ると、反射率約5%付近に分布のピークが存在し反射率5%以上では分布のピークが確認できない、単峰性の分布であることが確認できる。しかし、実際的高速道路上落下物の種類は多岐に亘り、単峰性の確率密度関数を有する分布では十分な当てはまりが期待できない。そこで、本研究では多峰性の確率密度関数を表現できる混合ベータモデルを落下物の反射率分布に当てはめることによりこの問題点の解消を図る。

(3) 混合モデルとEMアルゴリズム

図-7に示したような、多岐に亘る反射率の分布を考慮するために、本研究では混合モデルの援用により、Smith曲線に代わる新基準の提案を目指す。混合モデルとは、いくつかの確率モデルを組み合わせることにより複雑な関数形を表現できるようにした確率モデルのことである。自然現象や社会現象などをモデル化しようとするとき、母集団が均一でない場合が少なくなく、結果として非常に複雑な現象が起こっていることが観察され、モデル化が困難なことがある。このような複雑な確率現象のモデル化において混合モデルは、非常に汎用性の高いモデリング手法を提供するツールとなる。その高い汎用性から、混合モデルは19世紀の終わりにPearson⁵⁾が生理学の問題に関連して考察して以来、物理学、社会科学など幅広い分野において用いられている。本研究においては、反射率の定義域が0から1であり、分布の非対称性を表現できるベータ分布を採用し、加えて確率密度関数の多峰性を表現するため、ベータ分布を混合することで定義される混合ベータモデルを

採用する。反射率分布に混合ベータモデルを当てはめることで、現在の複雑な反射率分布を表現できる。混合ベータモデルを生成する K 個のベータ分布を推計するには、各ベータ分布のパラメータである a 、 b に加え、データ集合からは観測されない潜在的な仮想変数である混合率 ϕ を推計する必要がある。このような不可観測な混合率を有する混合モデルにおいて、各パラメータを求める代表的な手法としてEMアルゴリズムがある。EMアルゴリズムは、1977年のDempster等による論文⁶⁾で体系化された。EMアルゴリズムは、観測不可能な潜在変数に確率モデルが依存する場合に用いられる。その汎用性から、音声認識や因子分析などに用いられている。本研究においてもEMアルゴリズムを用いて混合ベータモデルのパラメータを推計し、反射率分布の推定をおこなう。

3. モデルと推計手法

(1) ベータ分布

高速道路上落下物の反射率は0から1の値を取る。この反射率の分布をモデル化するにあたり、本研究では定義域が0から1の値をとるベータ分布⁷⁾を採用した。ベータ分布は幅広い分野で使用されているが、読者の便宜を図るため、ベータ分布について少し説明を加えておく。ベータ分布の確率密度関数は、2種類のパラメータ a 、 $b(a > 0, b > 0)$ を用いて、

$$f(x|a, b) = \frac{1}{B(a, b)} x^{(a-1)} (1-x)^{(b-1)} \quad (2)$$

$$(0 \leq x \leq 1)$$

と表される。また、 $B(\alpha, \beta)$ はベータ関数であり、ガンマ関数

$$\Gamma(z) = \int_0^\infty x^{(z-1)} e^{-x} dx \quad (3)$$

を用いて、

$$B(a, b) = \frac{\Gamma(a)\Gamma(b)}{\Gamma(a+b)} \quad (4)$$

と表される。式 (2) 中の係数 $(1/B(a, b))$ は、ベータ分布が正規化されることを保証しており、

$$\int_0^1 f(x|a, b)dx = 1 \quad (5)$$

が満たされる。ベータ分布の平均 μ と分散 Σ は、パラメータ a, b を用いて、

$$\mu = \frac{a}{a+b} \quad (6a)$$

$$\Sigma = \frac{ab}{(a+b)^2(a+b+1)} \quad (6b)$$

と与えられる。

(2) 混合ベータモデル

本研究においては、高速道路上落下物の反射率分布を、落下物の分類ごとに定義された反射率分布の重ね合わせによって表現する。また、落下物の分類ごとに定義される反射率分布は、ベータ分布の重ね合わせによって表現される。いま、ひとまず落下物の分類 $i (i = 1, \dots, I)$ に着目し、以下では煩雑さをさけるために、分類を示す添え字 i を省略することとする。分類 i , 種類 $j (j = 1, \dots, J_i)$ の落下物の反射率 r が、ベータ分布 $f(r|a_j, b_j)$ に従うとすると、分類 i に属する落下物の反射率分布の確率密度関数 $g(r|\phi, \theta)$ は

$$g(r|\phi, \theta) = \sum_{j=1}^{J_i} \phi_j f(r|a_j, b_j) \quad (7)$$

と表すことができる。ただし、 $\theta = (a_1, b_1, \dots, a_{J_i}, b_{J_i})$ である。未知パラメータベクトル $\phi = (\phi_1, \dots, \phi_{J_i})$ は混合係数であり、

$$0 \leq \phi_j \leq 1 \quad (j = 1, \dots, J_i) \quad (8a)$$

$$\sum_{j=1}^{J_i} \phi_j = 1 \quad (8b)$$

を満たす。さらに、2 値確率変数ベクトル $\boldsymbol{\iota} = (\iota_1, \dots, \iota_{J_i})$ を導入する。 $\boldsymbol{\iota}$ の要素 ι_j は、

$$\iota_j = \begin{cases} 1 & j = \bar{j} \\ 0 & j \neq \bar{j} \end{cases} \quad (9)$$

を満たす。ただし、 \bar{j} は、落下物の種類 j に対する観測値である。これにより、 ι_j は $\iota_j \in \{0, 1\}$ かつ $\sum_{j=1}^{J_i} \iota_j = 1$ を満たしている。また、 $\boldsymbol{\iota}$ の周辺分布は混合係数 ϕ_j により、

$$p(\iota_j = 1|\phi_j) = \phi_j \quad (10)$$

と定まる。 $\boldsymbol{\iota}$ はどれか一つの ι_j のみ 1 を、他のすべてを 0 とするため、式 (10) を

$$p(\boldsymbol{\iota}|\phi) = \prod_{j=1}^{J_i} \phi_j^{\iota_j} \quad (11)$$

と書き換えることができる。路上落下物の分類 i , 種類 j が与えられたとき、反射率 r の条件付き確率密度関

数は、

$$g(r|\iota_j, a_j, b_j) = f(r|a_j, b_j) \quad (12)$$

となり、これはまた、

$$g(r|\boldsymbol{\iota}, \theta) = \prod_{j=1}^{J_i} \{f(r|a_j, b_j)\}^{\iota_j} \quad (13)$$

と書き換えられる。以上より、反射率 r と路上落下物の種類に対する確率変数 $\boldsymbol{\iota}$ の同時分布を考えることで、式 (7) を

$$\begin{aligned} g(r, \boldsymbol{\iota}|\phi, \theta) &= g(r|\boldsymbol{\iota}, \theta)p(\boldsymbol{\iota}|\phi) \\ &= \prod_{j=1}^{J_i} \{\phi_j f(r|a_j, b_j)\}^{\iota_j} \end{aligned} \quad (14)$$

と書き換えることができる。

式 (14) で示される落下物の分類 i の反射率分布を用いることで、高速道路上の落下物反射率分布を

$$h(r, \tilde{\boldsymbol{\iota}}|\boldsymbol{\pi}, \phi, \Theta) = \sum_{i=1}^I \pi_i g_i(r, \boldsymbol{\iota}_i|\phi_i, \theta_i) \quad (15)$$

と表すことができる。ただし、 $\Theta = (\theta_1, \dots, \theta_I)$, $\tilde{\boldsymbol{\iota}} = (\boldsymbol{\iota}_1, \dots, \boldsymbol{\iota}_I)$ である。また未知パラメータベクトル $\boldsymbol{\pi} = (\pi_1, \dots, \pi_I)$ は混合係数であり、

$$0 \leq \pi_i \leq 1 \quad (i = 1, \dots, I) \quad (16a)$$

$$\sum_{i=1}^I \pi_i = 1 \quad (16b)$$

を満たす。分類 i に属する落下物の反射率分布を導いたときと同様に考えると、2 値確率変数ベクトル $\boldsymbol{\delta} = (\delta_1, \dots, \delta_I)$ を用いて式 (15) を

$$\begin{aligned} h(r, \boldsymbol{\delta}, \tilde{\boldsymbol{\iota}}|\boldsymbol{\pi}, \phi, \Theta) &= \prod_{i=1}^I \{\pi_i g_i(r|\boldsymbol{\iota}_i, \theta_i)\}^{\delta_i} \\ &= \prod_{i=1}^I \left\{ \pi_i \prod_{j=1}^{J_i} \{\phi_{i,j} f_i(r|a_{i,j}, b_{i,j})\}^{\iota_{i,j}} \right\}^{\delta_i} \end{aligned} \quad (17)$$

と書き換えることができる。

いま、路上落下物の反射率サンプル k に関するデータ $\boldsymbol{\xi}^k (k = 1, \dots, K)$ を

$$\boldsymbol{\xi}^k = \{\bar{i}^k, \bar{r}^k\} \quad (18)$$

と定義する。さらに、データセット全体を集合 $\bar{\Xi} = \{\boldsymbol{\xi}^k : k = 1, \dots, K\}$ と定義する。このとき、データセット全体が観測される対数尤度 $\ln \mathcal{L}(\bar{\Xi}, \boldsymbol{\pi}, \phi, \Theta)$ は

$$\begin{aligned} \ln \mathcal{L}(\bar{\Xi}, \boldsymbol{\pi}, \phi, \Theta) &= \sum_{k=1}^K \ln h(\bar{r}^k, \bar{\boldsymbol{\delta}}^k, \tilde{\boldsymbol{\iota}}|\boldsymbol{\pi}, \phi, \Theta) \\ &= \sum_{k=1}^K \sum_{i=1}^I \bar{\delta}_i^k \left\{ \ln \pi_i \right. \end{aligned}$$

$$+ \sum_{j=1}^{J_i} l_{i,j} \{ \ln \phi_{i,j} + \ln f(\bar{r}^k | a_{i,j}, b_{i,j}) \} \quad (19)$$

と表される．対数尤度 (19) を最大とするような未知パラメータベクトル $\boldsymbol{\pi}$ の最尤推定量は，ラグランジュ未定乗数法を用いることにより，

$$\hat{\pi}_i = \frac{1}{K} \sum_{k=1}^K \bar{\delta}_i^k \quad (20)$$

と解くことができる．一方で，未知パラメータベクトル $\boldsymbol{\phi}$, $\boldsymbol{\Theta}$ に関しては，2 値確率変数ベクトル $\tilde{\boldsymbol{l}}$ が実際に値を得られない潜在変数であるため，解析的に解くことが不可能となる．そこで，本研究では，潜在変数を含む混合モデルを推計するための代表的な手法である EM (expectation-maximization) アルゴリズム⁶⁾を用いて，未知パラメータベクトルの最尤推定値を推計する．

(3) EM アルゴリズム

EM アルゴリズムは E ステップ (expectation step) と M ステップ (maximization step) の繰返しにより対数尤度関数を最大化する手法である．E ステップでは潜在変数の事後分布を計算し，M ステップでは E ステップで計算した潜在変数を用いて，未知パラメータおよび混合係数を計算する．本研究においては，混合ベータモデルに対して EM アルゴリズムを適用する．理論の詳細については文献⁸⁾に詳しいが，以下にその詳細について述べる．(2) で述べたように，2 値確率変数ベクトル $\tilde{\boldsymbol{l}}$ は値のわからない潜在変数なので，潜在変数の事後分布に関して完全データ尤度関数の期待値を考える．式 (11)，式 (13) をベイズの定理とともに用いると，潜在変数の事後確率分布は次式となる．

$$g(\tilde{\boldsymbol{l}}_i | r, \boldsymbol{\phi}, \boldsymbol{\theta}) \propto \prod_{j=1}^{J_i} \{ \phi_j f(r | a_j, b_j) \}^{l_{i,j}} \quad (21)$$

この事後分布に関する潜在変数 $l_{i,j}$ の期待値は以下のようなになる．

$$\begin{aligned} E[l_{i,j}] &= \frac{\phi_j f(r | a_j, b_j)}{\sum_{j=1}^{J_i} \phi_j f(r | a_j, b_j)} \\ &= \gamma(l_{i,j}) \end{aligned} \quad (22)$$

$\gamma(l_{i,j})$ は，種類 j が r_i の観測を説明する度合いを表しており，一般的には負担率と呼ばれる．式 (22) は種類 j のデータ点 r_i に対する負担率そのものである．それゆえ，完全データ対数尤度関数の期待値は

$$\begin{aligned} E_z[\ln \mathcal{L}(\boldsymbol{\Xi}, \boldsymbol{\pi}, \boldsymbol{\phi}, \boldsymbol{\Theta})] &= \sum_{k=1}^K \ln h(\bar{r}^k, \bar{\delta}^k, \tilde{\boldsymbol{l}} | \boldsymbol{\pi}, \boldsymbol{\phi}, \boldsymbol{\Theta}) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} &= \sum_{k=1}^K \sum_{i=1}^I \bar{\delta}_i^k \left\{ \ln \pi_i \right. \\ &\quad \left. + \sum_{j=1}^{J_i} \gamma(l_{i,j}) \{ \ln \phi_{i,j} + \ln f(\bar{r}^k | a_{i,j}, b_{i,j}) \} \right\} \end{aligned} \quad (23)$$

となる．これを用いて次の順序で推計をおこなう．

- パラメータ $\boldsymbol{\theta}$ ，混合係数， $\boldsymbol{\phi}$ に初期値を与える．
- E ステップとして，現在のパラメータを用いて，式 (22) に基づき負担率を計算する．
- M ステップとして，現在の負担率を固定して，対数尤度を最大化するパラメータ $\boldsymbol{\theta}^{new}$ をニュートンラフソン法により，混合係数 $\boldsymbol{\phi}^{new}$ をラグランジュ未定乗数法によって求める．なお，混合係数 $\boldsymbol{\phi}$ は以下のように表される．

$$\hat{\phi}_{i,j} = \frac{1}{N_i} \sum_{n=1}^{N_i} \gamma(l_{i,j}) \quad (24)$$

ここで， N_i は分類 i の総サンプル数である．

- (c) で得られたパラメータおよび混合係数を用いて，式 (23) より対数尤度を計算する．対数尤度の変化が収束基準を満たす場合は終了し，そうでなければ (b) に戻る．

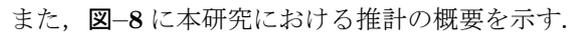
また混合ベータモデルの自由度は種類の数に依存している．これにより，AIC を用いた最適な種類数の選択を行う．種類数 J_i の混合ベータモデルにおける AIC(J_i) は，

$$\text{AIC}(J_i) = -2E_z[\ln \mathcal{L}(\boldsymbol{\Xi}, \boldsymbol{\pi}, \boldsymbol{\phi}, \boldsymbol{\Theta})] + 2(3J_i) \quad (25)$$

で表される．これにより，混合ベータモデルの最適な混合数 J_i は，

$$\hat{J}_i = J_i | \min(\text{AIC}(J_i) : J = 1, \dots, J_{imax}) \quad (26)$$

により与えられる．なお， J_{imax} は最大混合数を表す．

また，-8 に本研究における推計の概要を示す．

4. おわりに

本研究では，最適トンネル照明方式の決定手法の確立を最終目標に，その基礎的要素である反射率分布の推定手法を提案した．具体的には，反射率分布の持つ特徴からベータ分布を採用し，複雑な現象を精度よく表現するために複数のベータ分布を混合した，混合ベータモデルを反射率分布にあてはめ，混合ベータモデルが有する複数のパラメータを，EM アルゴリズムを援用し推計した．今後は，環境などの様々な要素を考慮できるモデルへの拡張や，世界的な標準モデルとして扱えるモデルへ逐次改善していくことが必要である．なお，講演会当日には，実測データにもとづいた反射率分布を示し，本研究の有効性を実証的に検証した事例を紹介する．

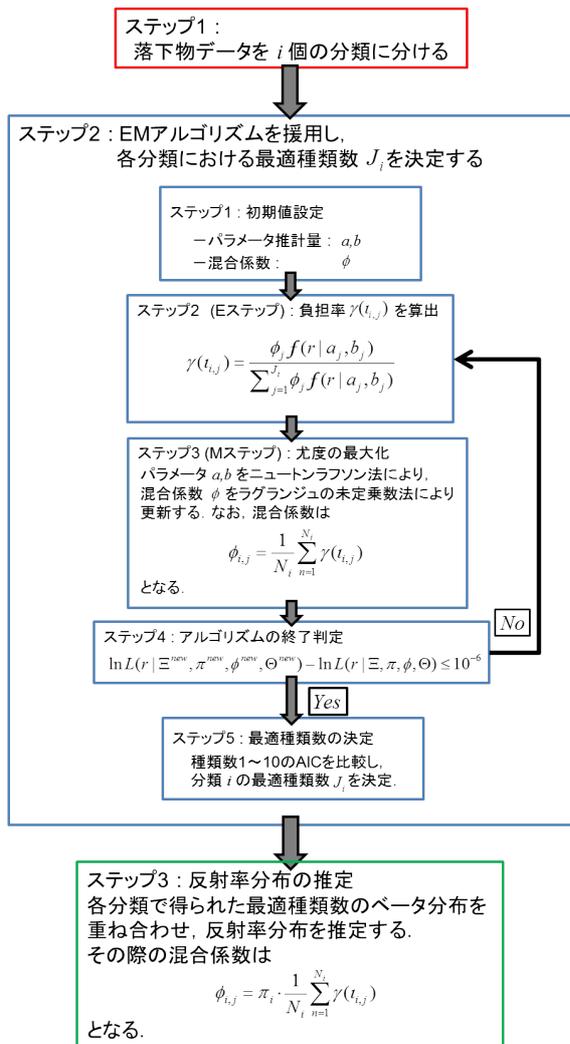


図-8 推計手法の概要

参考文献

- 1) F. C. Smith, : Reflection factor and revealing power, Trans. I. E. S. (London), Vol.13, pp.196-206, 1938.
- 2) 建設電気技術協会：道路・トンネル照明の考え方と光源について, Vol.140, 1, 2003.
- 3) 稲森 真：トンネル照明, 照明学会誌, 第91巻, 第3号, pp.125-129, 2007.
- 4) 高速道路調査会：高速道路の照明技術に関する調査検討報告書, 2012
- 5) Christensen, R., Pearson, L. M. and Johnson, W. : Case-Deletion Diagnostics for Mixed Models, *Technometrics*, Vol.34, No.1, pp.38-45, 1992.
- 6) Dempster, A. P., Laird, N. M. and Rubin, D. B. : Maximum Likelihood from Incomplete Data via the EM Algorithm, *Journal of the Royal Statistical Society. Series B(Methodological)*39(1), pp.1-38, 1977.
- 7) Christopher M. Bishop : パターン認識と機械学習 上 ベイズ理論による統計的予測, 丸善出版, 2012.
- 8) Christopher M. Bishop : パターン認識と機械学習 下 ベイズ理論による統計的予測, 丸善出版, 2012.
- 9) 山添史郎：得点分布からみた選抜試験について, 滋賀大学教育学部紀要 自然科学, NO.49, pp.25-28, 1999.
- 10) 北本朝展, 高木幹雄：未来セルの内部構造を反映する面積占有率密度を用いた画像分類法, 電子情報通信学会論文誌, D-2, Vol. J81-D-2, No.11, pp.2582-2597, 1998.
- 11) 岡田晃夫, 加賀哲記, 伊藤勇人, 坂本正悦：トンネル照明における総視認率の検討, 照明学会誌, 90-8A, pp.495-503, 2006.
- 12) 金田尚久, 新居玄武：混合分布問題—その基礎からカーネル降下法まで— Part1, 学習院大学 経済論集, 第46巻, 第1号, 2009.
- 13) 田中研太郎：混合分布モデルにおける一致推定量の構成, 数理解析研究所講究録, 第1380巻, pp.94-97, 2004.
- 14) 建設電気技術協会：道路・トンネル照明における視認性について, Vol.143, 9, 2003.
- 15) 建設電気技術協会：道路照明における視認性の考え方, Vol.144, 1, 2004.
- 16) 魚住拓司：道路照明の視認性評価に関する研究動向, IWASAKI 技報, 第7号, 2002.

(2013. 5. 7 受付)

ESTIMATION OF THE REFLECTANCE DISTRIBUTION
IN FALLING OBJECTS ON THE HIGHWAY
FOR TUNNEL LIGHTING MANAGEMENT

So SAKAGUCHI, Kengo OBAMA
Satoshi HIRAKAWA and Kiyoyuki KAITO

The falling objects on the highway disturb the user's comfortable drive and cause serious accidents. Therefore the problem is that the improvement of visibility for falling objects. It is hard to sight especially the falling object in a tunnel and the visibility is greatly influenced by a tunnel lighting system. In this study, we set the eventual goal the establishment of tunnel lighting system determined approach and propose the methodology which models reflectance distribution of a falling objects. Specifically, it is represented reflectance distribution by Beta mixture model that can consider the multimodal and estimate mixing rate and unknown parameters of beta mixture model with the aid of the EM algorithm. Finally it lets the application example which used survey date pass, and verifies positively the usefulness of the methodology proposed by this research.