

避難経路の視認性評価のための煙層内散乱を考慮した光束伝達性状予測

Prediction of Luminous Flux Transfer Considering Scattering in Smoke Layer for Evaluating Evacuation Route Visibility

建築学専攻 原田・仁井研究室 大音徹

1. 研究の背景・目的

火災発生時の安全な避難には、避難誘導灯の確実な機能が不可欠であるが、その視認性には煙による光の散乱や吸収の影響を考慮した設計が求められる。既往研究では煙の散乱光束が均一に分布する前提が多いが、大空間や火災室隣接空間では温度勾配が大きくなり、煙濃度が鉛直方向に異なるため、視認性に影響を与える可能性がある。煙内での避難誘導灯の見透しについては、古くから研究が行われ²⁾、避難誘導灯の小型化・高輝度化に繋がるなどの成果を上げているが、周囲環境の制限が不十分であり、広告灯や照明設備が多い空間では煙が充満すると散乱光が視野に入り、誘導灯が認識しづらくなるリスクがある。さらに、停電時の非常用照明基準は床面照度 1 lx 以上であるが、煙が充満すると足元の明るさが確保できない可能性がある。

本研究では、火災時の避難誘導において適切な視環境を検討するため、煙層が形成された状況での散乱を考慮した光束伝達を明らかにすることを目的として、煙層形成下実験と光束伝達モデルによる予測を行う。

2. 煙層形成下実験

2.1 実験方法

実験装置を図 1 に示す。実験装置は既往研究³⁾を参考に、幅 0.8m×奥行 0.8m×高さ 0.3m の測定空間上方に光源チャンバーを設置して、測定空間の天井面には図 2 に示す光源を設置した。測定空間の側面のうち 1 つを外気に開放し、それと正対する側面の上部に煙流入口を設けた。加温かつ白色に着色した熱気流（以下、煙という）を煙流入口から測定空間内に流入させた。煙の流入量と煙流出側に設置した垂れ壁を変化させることで測定空間内の煙層厚さ及び光学的濃度を表 1 に示すように調整した。

測定空間内への煙流入後、状態が安定したことを確認してから、鉛直温度分布、煙の透過率、光源面輝度、床面照度を一定時間測定した。以下では、これらの時間平均を実測値として示す。

煙層厚さは 2 箇所に設置した熱電対ツリーの平均温度分布から N%法を用いて算出した。

レーザー式透過率計を図 3 に示す測定空間側壁に 10 点設置し、測定した透過率から煙層の光学的煙濃度を計算した。輝度を測定するため輝度計を 1 点あるいは 4 点設置した。また、床面照度を測定するため床面に照

度計を 11 点設置した。輝度計と照度計の設置位置の一例を図 4 に示す。

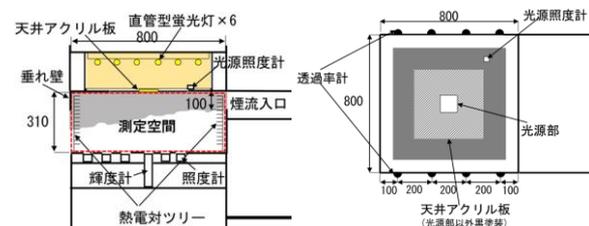


図 1 実験装置断面図 (左) と天井面平面図 (右)

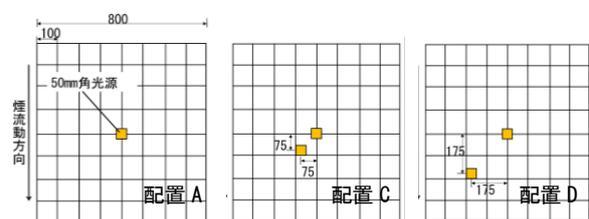


図 2 天井面の光源配置条件の一部

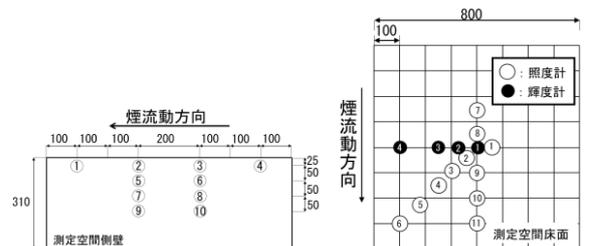


図 3 透過率計配置

図 4 輝度計・照度計配置

表 1 実験条件の一部

No.	光源		光学的煙濃度 Cs[l/m]	煙層厚さ ds[m]	光学的厚さ Csds[-]
	輝度 [cd/m ²]	光束 [lm]			
A1-1	3733	29.3	-	-	-
A1-2			0.358	0.131	0.047
A1-3			0.784	0.136	0.106
A1-4			2.166	0.145	0.315
A2-1	4321	33.9	-	-	-
A2-2			0.285	0.125	0.036
A2-3			0.818	0.124	0.102
A2-4			1.660	0.133	0.220
A2-7			0.807	0.149	0.121
A2-8			2.052	0.162	0.333
A2-11			0.887	0.207	0.183
A2-12			3.097	0.206	0.639
A2-13	4399	34.5	-	-	-
A2-15			1.623	0.145	0.235
A2-17			3.179	0.173	0.549
A2-21			3.409	0.219	0.746

2.2 測定結果

図5に実験 A1-1~12 の輝度分布を示す。なお、輝度計は全て真上に向けて測定したものである。横軸は床面中心から距離である。煙が濃い条件ほど光源直下以外の輝度は増加傾向にあった。詳細な分析のため光学的厚さ (=Cs×ds) による輝度の変化を示す。光学的厚さの増大により光源直下の輝度は減少する一方で、それ以外は増加する。これは光学的厚さの増大に伴い散乱光が増加していると考えられる。次に図6に実験 A1-1~12 の照度分布を示す。プロットが重なり、煙層条件による変化はほぼ無い。光学的厚さによる照度の変化をみると光学的厚さが大きくなることでわずかに減少傾向ではあるが、全体として煙層条件によりほぼ変化しないとと言える。

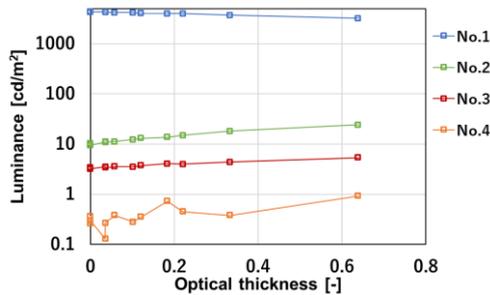
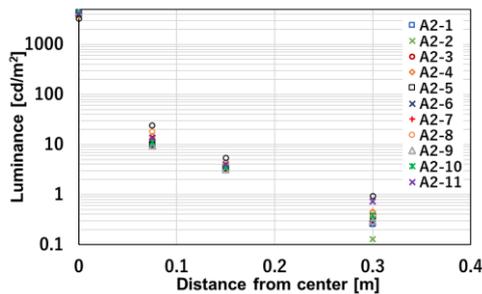


図5 輝度分布 (上) 光学的厚さによる輝度 (下)

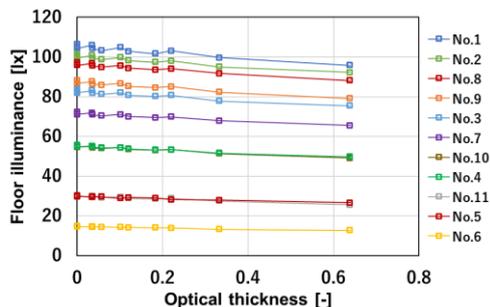
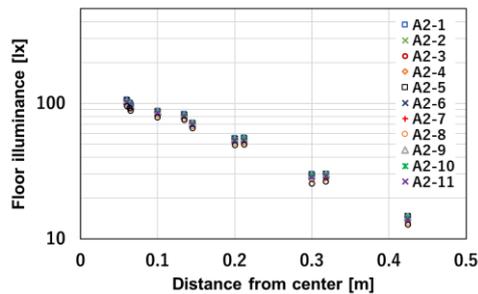


図6 照度分布 (上) 光学的厚さによる照度 (下)

2.3 間接照度の推定

床面照度は煙層を透過して伝達する直接照度と煙粒子による散乱や壁面反射による間接照度の和である。実験では直接光束と間接光束を分離して測定できないため、逐点法を用いて床面に入射する直接照度を予測し、間接照度の推定を試みた。図7に実験 A1-1,2,3,4 における逐点法による直接照度の予測値と全照度測定値の比較結果を示す。

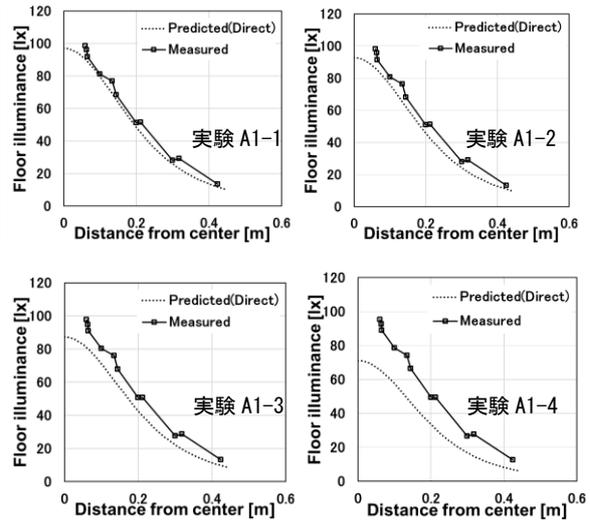


図7 直接照度の予測値と全照度測定値の比較

まず煙が無い場合、図7 (左上) より予測値は実測値と良く一致している。煙の光学的濃度が大きくなるにつれ直接照度の予測値は減少しており、特に光源直下での減少量が大きい。逐点法は広く利用される計算方法であり、煙がある場合でも、光学的煙濃度と煙層内の光路長が既知であれば、煙層を透過する直接照度は比較的良好な精度で予測できると考えられるので、測定値との差は間接照度の分布と等しいとみなせ、これは間接照度が光源直下ほど大きくなることを意味する。

以上から、煙層内での散乱光束についても分布があると推定でき、煙層形成下の光束伝達を考える際には散乱光束の分布を考慮する必要がある。

3. 光束伝達モデル

3.1 モデル概要

本章では既往の予測式に基づき、光束伝達モデルを構築する。原ら⁴⁾が提案する計算法では天井照明から下部層へ伝達する光束を直接光束、初期間接光束、相互反射による光束に分類し、計算を行う。直接光束は煙層を透過して伝達する光束であり、初期間接光束は煙層下端の境界面に到達するまでに煙粒子あるいは壁面で1回以上反射した光束である。それらが上下空間で相互反射した結果形成される光束が相互反射光束であり、作業面切断法の応用により計算される。原らは天

井面全般照明を想定し、これら間接光束は煙層境界面に一様に分布するとしている。一方で、個別の照明を対象として煙層内での散乱光束分布を考慮した計算法を提案した福田⁵⁾は初期間接光束の中でも煙粒子に1回だけ衝突して散乱した光束（第一回散乱光束とよぶ）が同心円状に分布する光膜（仮想リングとよぶ）によって形成される煙層下端に分布する光束が形成されることを仮定した。

以上の既往研究に基づき、図7に示すように本モデルでは煙層形成下において煙濃度が鉛直方向に分布するとして、煙層をN分割し、各層の煙濃度は均一であることを仮定する。また、光束を3つに分類し、直接光束、第一回散乱光束、多重反射光束に分けて計算する。多重反射光束とは初期間接光束のうち第一回光束を除く複数回の散乱・壁面の反射による光束と相互反射による光束を合わせたものを指す。

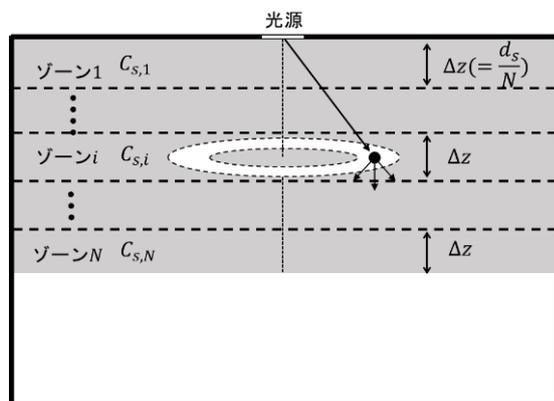


図7 光束伝達モデル・仮想リングのイメージ

3.2 直接光束の計算方法

直接光束は逐点法により煙の減衰を考慮して計算する。光源は光束 F_0 、輝度 L_0 で中心から均等拡散するものとする。光源面の法線となす角 θ 方向の射出する光束がつくるゾーン i の煙濃度 $C_{s,i}$ と各ゾーンの高さ Δz 、空間高さ H を用いて見かけの光源輝度、直接照度は

$$L_d = L_0 \cdot \exp\left(-\sum_{i=1}^N C_{s,i} \Delta z / \cos \theta\right)$$

$$E_d = \frac{F_0 \cos^4 \theta}{\pi H^2} \cdot \exp\left(-\sum_{i=1}^N C_{s,i} \Delta z / \cos \theta\right)$$

3.3 第一回散乱光束

光源面の法線となす角 θ 方向の光度 I_θ は

$$I_\theta = \frac{F_0 \cos \theta}{\pi}$$

光源から角度 θ で微小角 $d\theta$ 内に放射される光束は

$$F_{\theta,d\theta} = I_\theta d\omega = \frac{F_0 \cos \theta}{\pi} \cdot 2\pi \sin \theta d\theta$$

となり、煙層内での減衰を考慮すると仮想リング $(\theta, d\theta, i)$ に入射する光束は、

$$F'(\theta, d\theta, i) = I_\theta d\omega \cdot \exp\left(-\left[\sum_{j=1}^i (C_{s,j} \Delta z / \cos \theta) - C_{s,i} \frac{\Delta z}{2} / \cos \theta\right]\right)$$

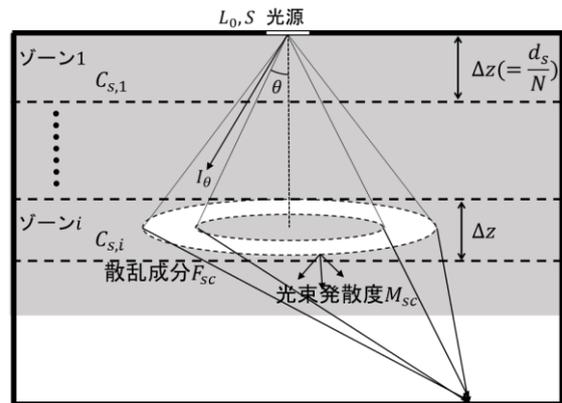


図8 第一回散乱光束

光が煙層を透過する過程で、煙粒子との衝突によって減衰する成分の一部が散乱成分だから反射率 ρ_p を用いて、仮想リングにおける散乱光束は

$$F_{sc}(\theta, d\theta, i) = \rho_p \cdot \left(-\frac{\partial F'}{\partial z} \Delta z\right) = \rho_p \cdot \left(\frac{C_{s,i}}{\cos \theta} F'(\theta, d\theta, i) \Delta z\right)$$

と表せて、半分が下向きに放射されるため仮想リングにおける光束発散度、輝度はリングの面積 $A(\theta, d\theta, i)$ を用いて、

$$M_{sc}(\theta, d\theta, i) = \frac{1}{2} \cdot \frac{F_{sc}(\theta, d\theta, i)}{A(\theta, d\theta, i)}, L_{sc}(\theta, d\theta, i) = \frac{1}{2\pi} \cdot \frac{F_{sc}(\theta, d\theta, i)}{A(\theta, d\theta, i)}$$

第一回散乱による煙層の見かけの輝度は視線軸上に存在する各ゾーンの仮想リングを考える。各仮想リングの輝度 $L_{sc,i}$ はそれより下層の煙を透過して到達するから散乱による輝度は視線角度 α で次のように書ける。

$$L_{smoke,1} = \sum_{i=1}^N L_{sc,i} \cdot \exp\left(-\left[\sum_{j=i}^N (C_{s,j} \Delta z / \cos \alpha) - C_{s,i} \frac{\Delta z}{2} / \cos \alpha\right]\right)$$

光源直下から R_f 離れた床面微小面から見た、床面から h の高さにある光源直下を中心とする半径 r 、微小区間 dr の仮想リングの立体角投射率 $\frac{\partial U}{\partial r} dr$ と微小面との平均距離 D を用いて、床面照度は次式で表す。

$$E_{indirect,1} = \sum_{i=1}^N \left[\int_r M_{sc} \exp\left(-\left[\sum_{j=i}^N \left(C_{s,j} \frac{D}{h} \Delta z\right) - C_{s,i} \frac{D}{h} \frac{\Delta z}{2}\right]\right) \frac{\partial U}{\partial r} dr \right]$$

3.4 多重反射光束

詳細は省略するが、原らと同様の方法で計算し、多重反射光束は境界面あるいは床面に一様に分布するとして扱った。

3.5 実験との比較

計算では実験模型の開口部は黒い周壁面で覆われているものとして、空間寸法や煙層条件は実験の値を用いた。煙粒子反射率は1とした。

図9に実験 A2-13,15,21 との輝度の比較、図10に実験 A2-13,15,21 との照度の比較を示す。光学的厚さが小さい順に示した。

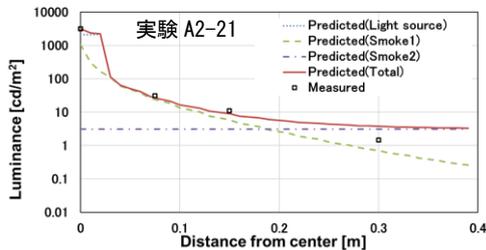
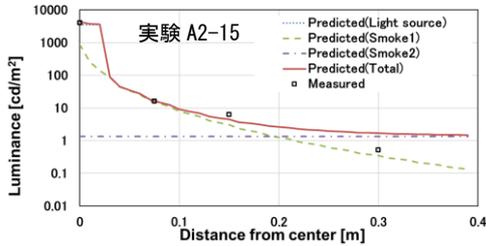
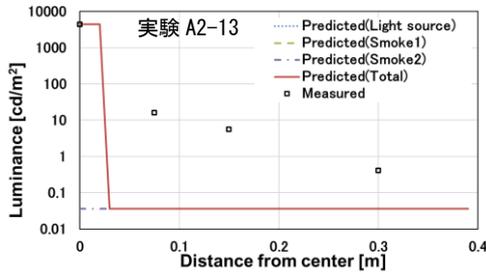


図9 実験 A2-13, 15, 21 との輝度の比較

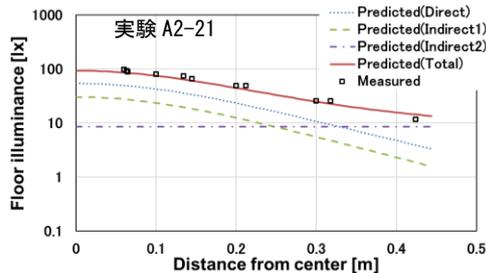
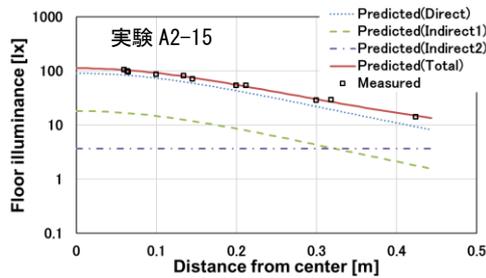
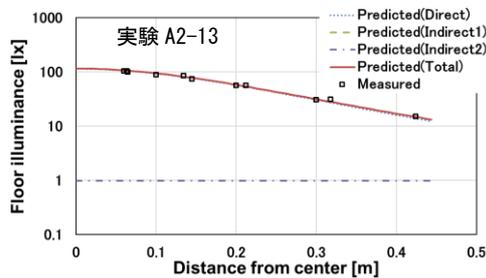


図10 実験 A2-13, 15, 21 との照度の比較

輝度の予測について、第一回散乱光束は特に光源付近の散乱輝度に大きく影響し、光学的厚さが小さい場合の輝度分布計算においては占める割合が高いため重要な要素となる。また、光学的厚さが大きい条件においても光源付近の輝度に占める割合は高く、光源付近の輝度を考える際には一回目の散乱の分布を考慮することによる効果が大きいと確認できた。

照度の予測について、第一回散乱光束の分布を考慮することは特に光学的厚さが小さい場合の床面照度の予測において重要だと考えられる。また、光学的厚さが大きい条件においても、光源直下付近の床面照度に占める第一回散乱の割合は高い。光学的厚さが大きくなるにつれて、光源から離れた観測点では、多重反射が最も占める割合が大きくなることが確認された。

4. 結論

模型実験の結果から、煙層内での散乱光束の分布を推定した。また、光学的厚さが大きくなるほど散乱光束が増加すると考えた。

提案した光束伝達モデルは煙層内の鉛直方向の煙濃度分布を考慮したものである。また、煙層内の各仮想リングから放射された光束が観測点に直接伝達することを前提とすることで、輝度計算において観測点および視線軸角度を考慮することが可能となった。第一回散乱光束は、特に光源付近の散乱輝度や、煙が薄い場合の床面照度分布を計算する際に影響が大きい。煙が濃い条件においても光源直下付近の床面照度に占める割合は高いためその影響を評価できる。さらに、多重反射光束の計算を加えることで、特に煙が濃い場合や煙層内光路長が長くなる観測点において、煙粒子による複数回の散乱や壁面の多重反射による光束の影響が大きくなることの評価が可能となった。

今後の課題として、提案した光束伝達モデルが黒煙などの煙条件や壁面反射率の高いなどの想定空間条件においても適用可能であるか検証の必要がある。

参考文献

- 1) 水落秀木ほか、実大規模平面における火災時の煙流動に関する実験的研究、日本建築学会技術報告集、第15巻第31号、pp.761-766、2009。
- 2) 神忠久、煙中の誘導標識の見透し距離について(I)、日本建築学会論文報告集、第182号、日本建築学会、pp.21-32、1971。
- 3) 林春光ほか、煙層がある空間内における天井照明による床面照度及び煙層透過輝度に関する研究、日本建築学会近畿支部研究報告集 環境系、53号、pp.37-40、2013。
- 4) 原直也ほか、散乱媒質の充満する室の照度の簡易計算法、日本建築学会近畿支部研究報告集 環境系、54号、pp.9-12、2014。
- 5) 福田笑美、複数光源下における煙層内での光の散乱が視対象光源の輝度対比に及ぼす影響、京都大学、2024。