



電気電子工学特別講義 「グリーン・エレクトロニクスの現状と動向」

～道路および移動体用光源～

電気エネルギー変換工学
本村英樹

ヘッドランプについて

自動車前照灯用メタルハライドランプ



ハロゲンランプ

熱放射

× 小光束

× 低効率

× 短寿命

○ 水銀フリー



MHランプ

放電

○ 大光束

○ 高効率

○ 長寿命

× 水銀

デモ用ランプ点灯例



LED

e-h再結合

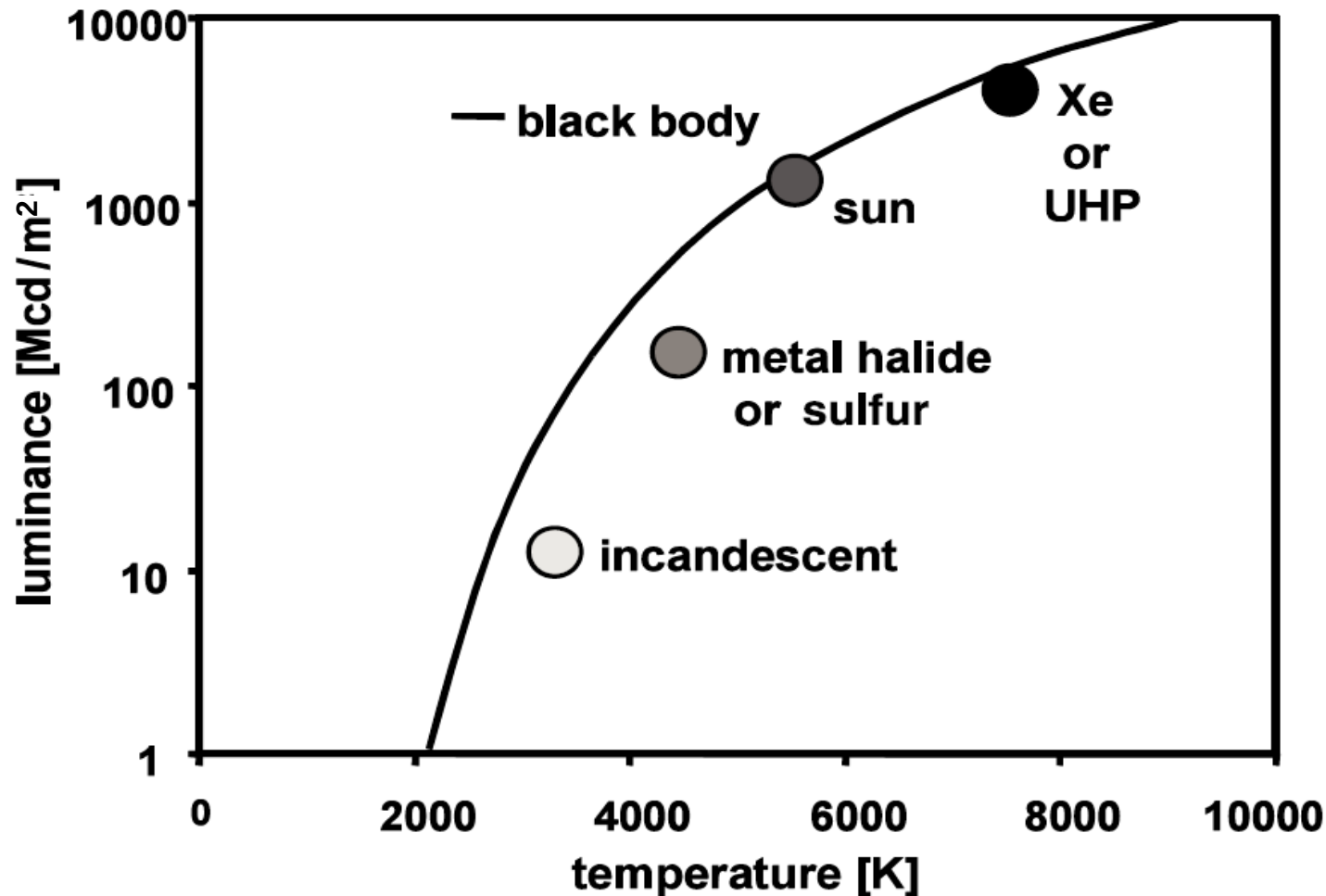
× 1個あたりは小光束

○ 高効率

○ 長寿命

電気電子工学特別講義

高輝度放電ランプ

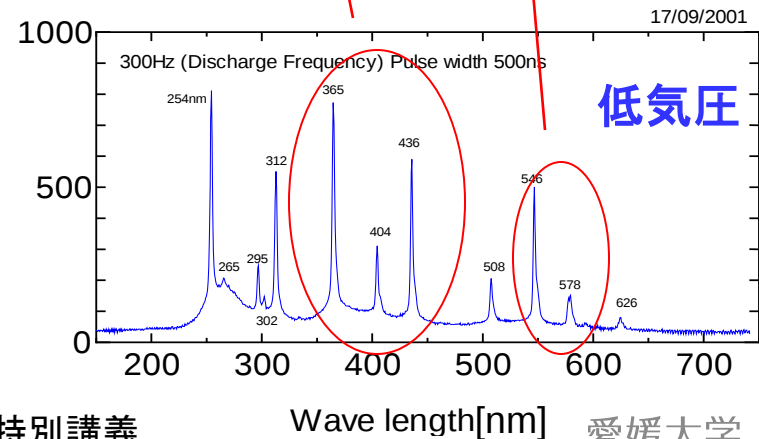
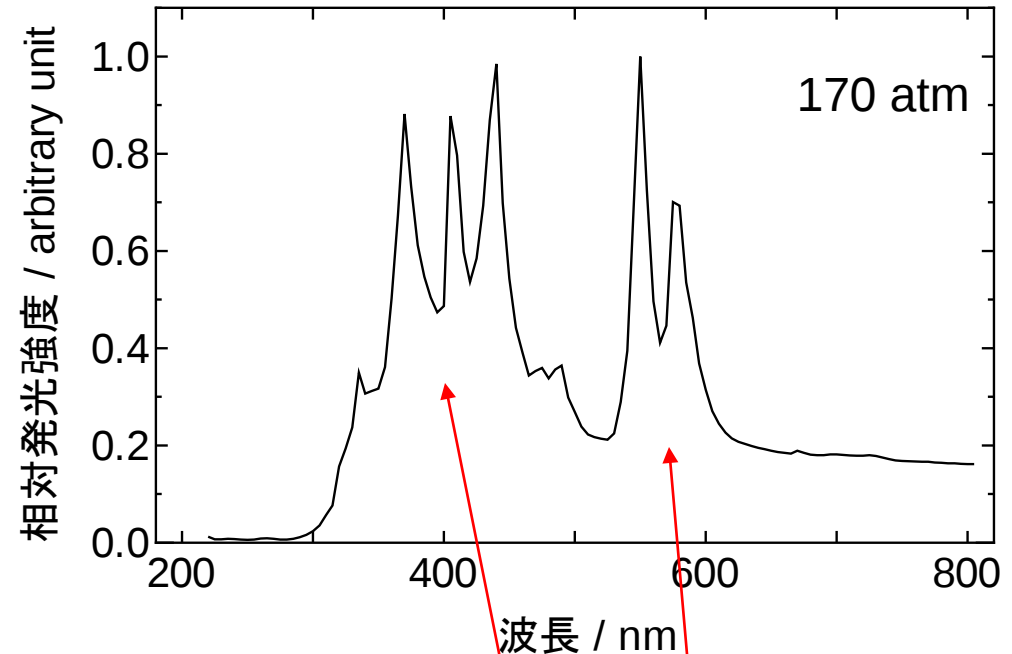
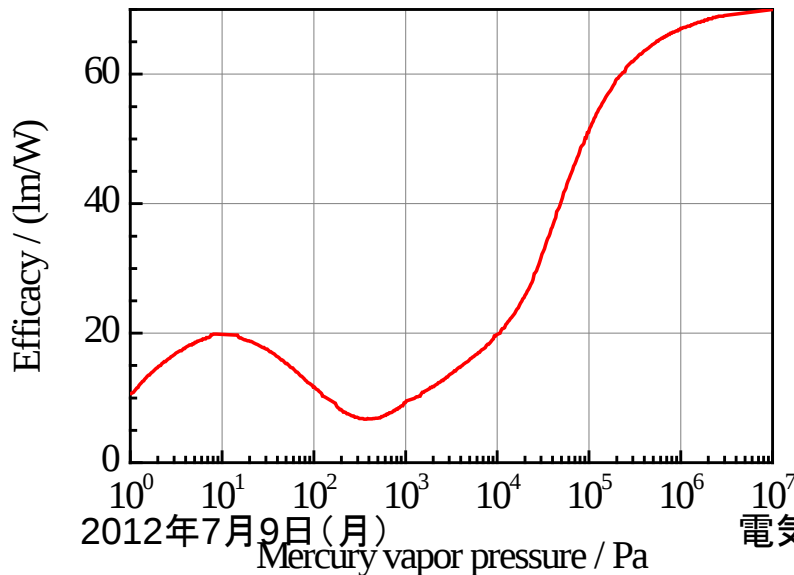


G. Derra et. al., J. Phys. D: Appl. Phys. **38** (2005) 2995

高圧放電プラズマの発光

高圧水銀放電の発光

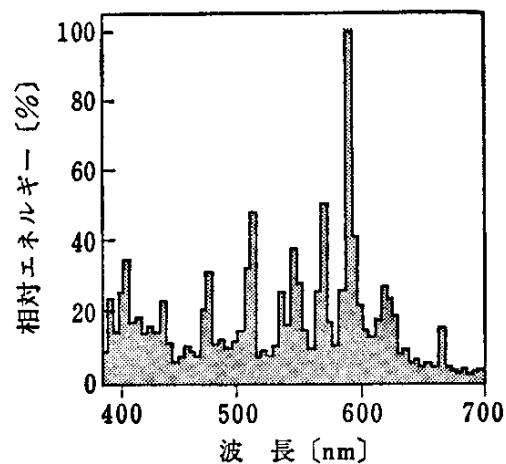
- 100気圧を超えると**連続線発光**が強くなる
- 254nmの共鳴線は**自己吸収**により消える
- 個々の線スペクトルの幅が広がる



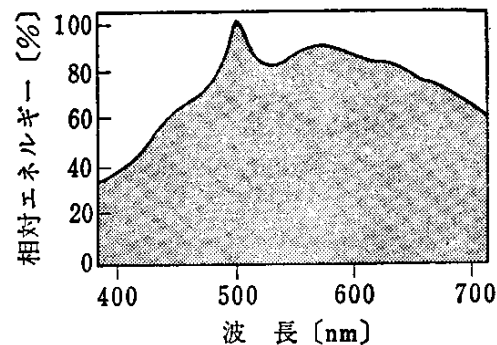
メタルハライドの添加

表 2・6 400 W メタルハライドランプの特性比較 (透明形)

ランプタイプ	封入物	全光束 [lm]	効率 [lm/W]	色温度 [K]	平均演色評価数 R_a
少数の強い線スペクトルの組合せ	Na-Tl-In	32 000	80	5 000	65
多数の線スペクトルと少数の強い線スペクトルの組合せ	Dy-Tl	32 000	80	6 000	90
	Sc-Na-Th	40 000	100	4 000	65
分子発光による連続スペクトル	Sn	20 000	50	5 000	92



(a) Sc-Th-Naタイプ



(b) Snタイプ

照明工学、オーム社(1991) 2.6節

研究背景

自動車前照灯用メタルハライドランプの無水銀化

＜水銀によるプラズマインピーダンスの保持＞

- インピーダンス低下→ランプ電流の上昇→点灯回路への負担、電極損失の増大
- 高い蒸気圧(~20 atm)、大きな弾性衝突断面積による
- 水銀を取り除く→ランプ電圧が90 Vから30 Vへ

＜水銀代替物＞

- 蒸気圧の高いメタルハライド(ZnI_2 , TaI, InI等)
- キセノンガス圧上昇

キセノン封入ガス圧の制御が必要

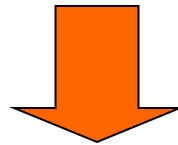


簡便な非破壊検査法の確立が望まれる

基本原理

ランプ始動時

- バラストによる電流制御前
- メタルハライドの蒸発前



プラズマインピーダンスが
キセノンガス圧で決まる

(電流 $\propto 1/\text{キセノンガス圧}$)

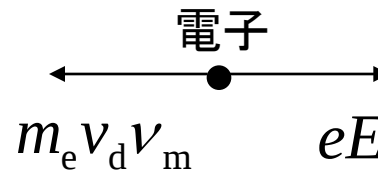
基本原理

ランプ電流は電子密度と電子のドリフト速度の積に比例する

$$I = en_e S v_d$$

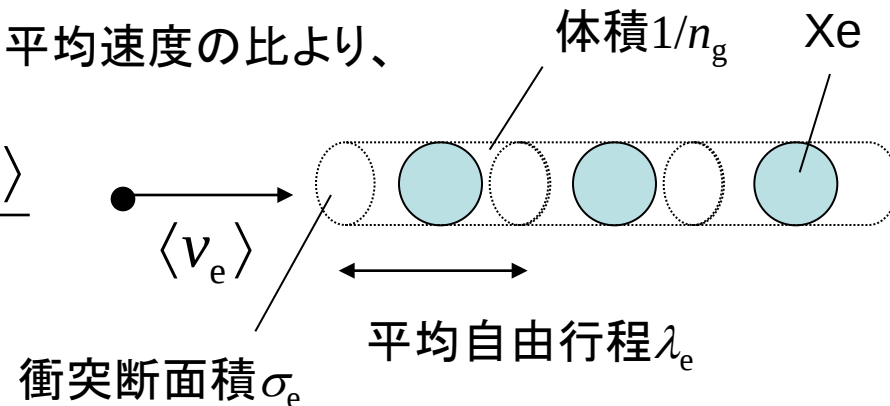
電子のドリフト速度は、力の釣り合いより

$$v_d = \frac{eE}{m_e \nu_m}$$



弾性衝突周波数は、平均自由行程と電子の平均速度の比より、

$$\nu_m = \frac{\langle v_e \rangle}{\lambda_e} = n_g \sigma_e \langle v_e \rangle = \frac{P \sigma_e \langle v_e \rangle}{kT}$$



以上より

$$I(P, T) = K(T) \frac{1}{P} \left(K(T) = \frac{e^2 n_e k S E T}{m_e \sigma_e \langle v_e \rangle} \right)$$

ガス圧に反比例
ガス圧と温度の関数

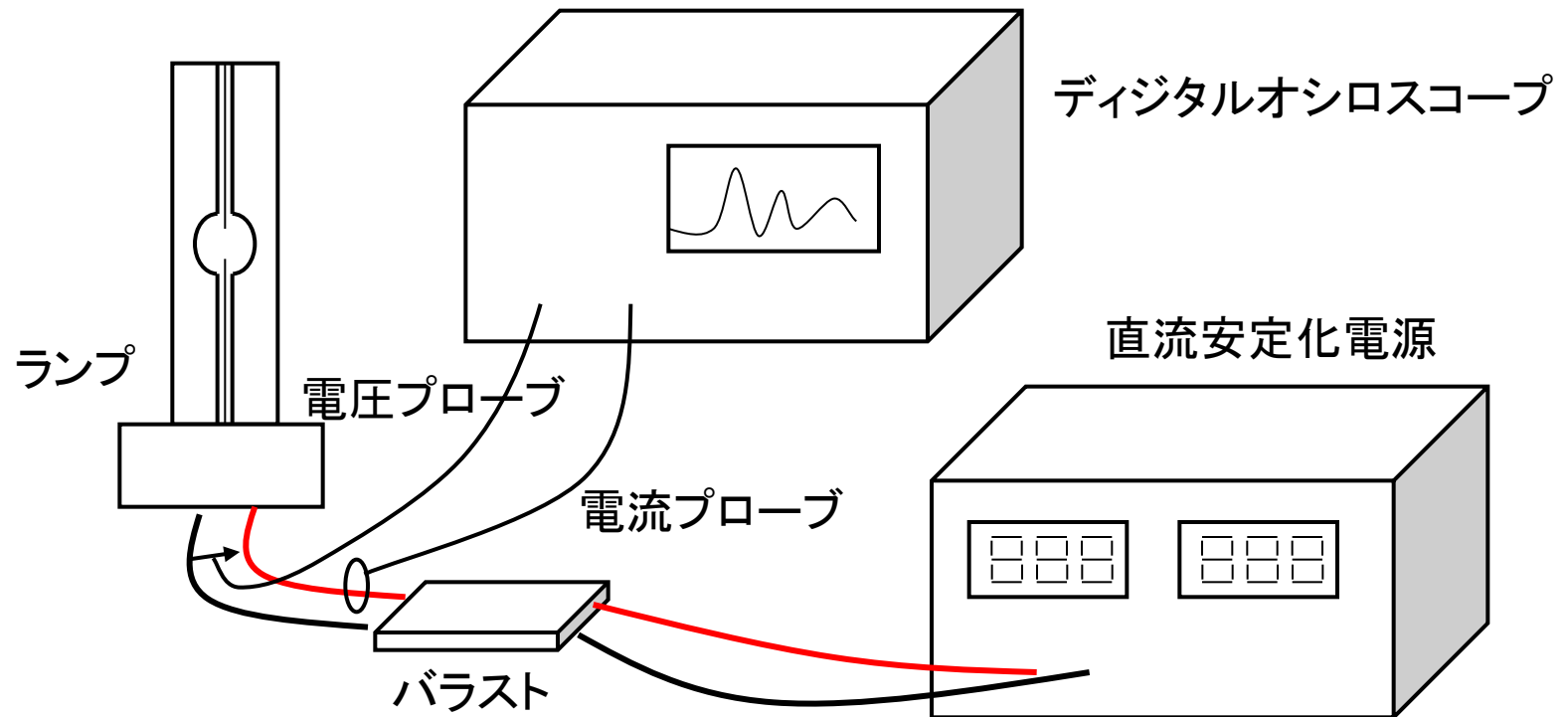
実験装置構成

<キセノン封入ガス圧>

10.0, 12.1, 13.5および15.4 atmの4種のガス圧(仕様値)について各4本
品質検査合格品(封入ガス圧仕様値が正しいと仮定)

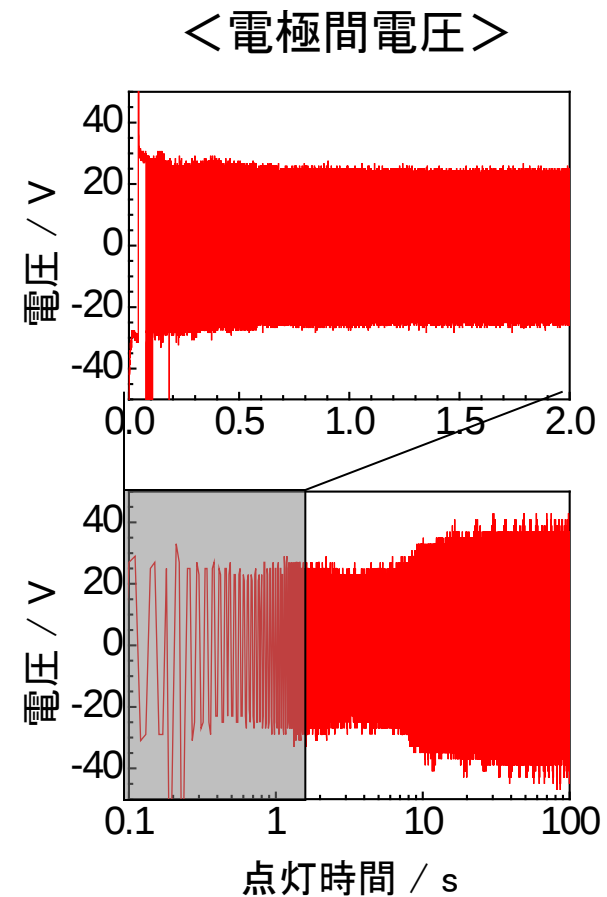
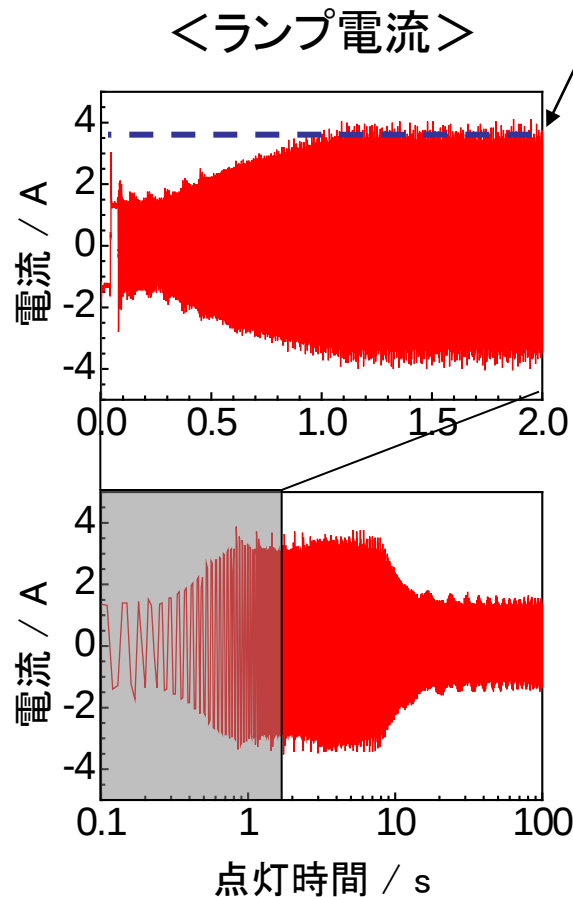
<封入メタルハライド>

ScI_3 , NaI , ZnI_2 および InBr

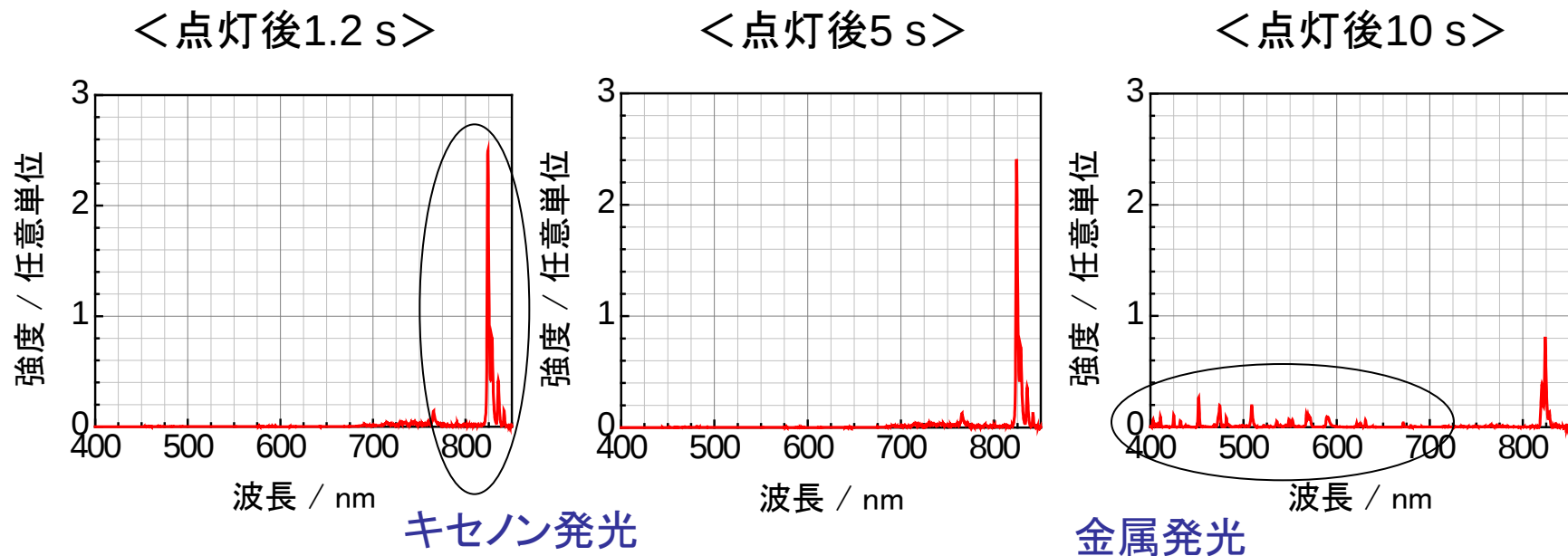


測定タイミング

点灯後1.2–1.8 sの間のランプ電流の振幅平均値を記録



発光スペクトル



点灯後1.2 sでは、キセノン発光が支配的であることを確認

測定手順

ランプを(再)点灯し、電圧・電流波形を記録する。



(再)点灯後1.2~1.8 sの電流振幅平均値を計算する。



ランプが安定するまで点灯状態を保つ(約2分)



ランプを消灯し、管壁が設定温度になるまで待つ。

各ランプについて
40回繰り返し測定
を行った。

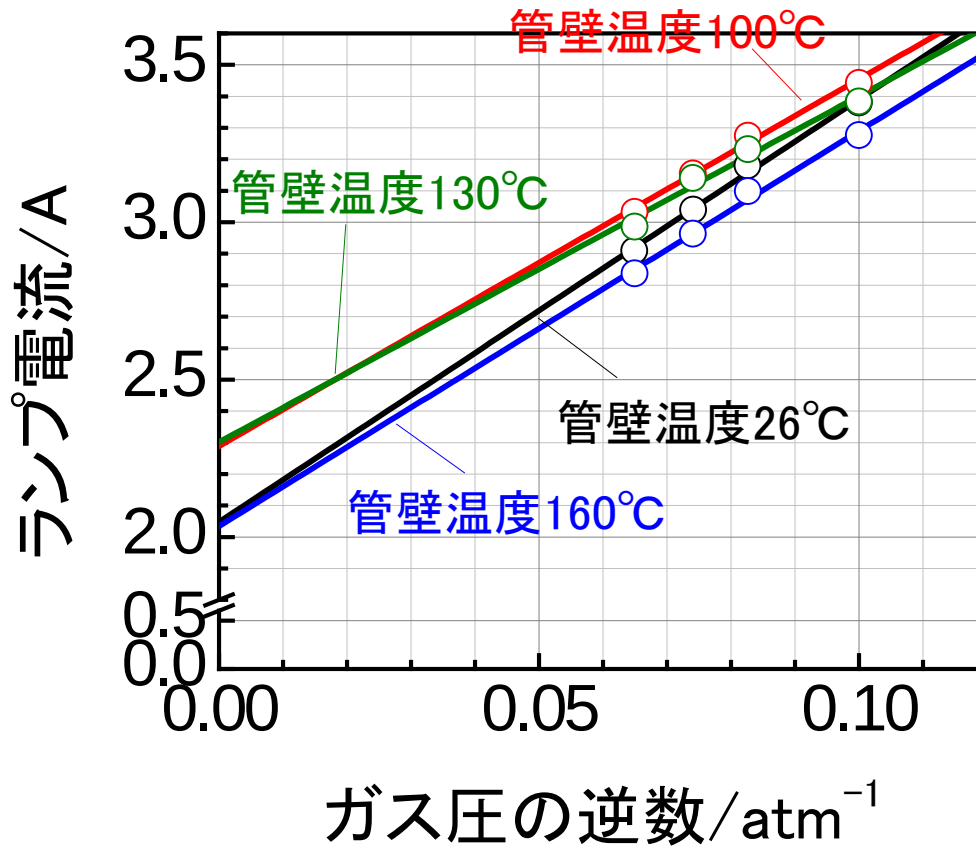
低温: 金属の影響が小さい
高温: 同じ測定時間で測定回数
を多く取れる



複数の設定温度について測定を行
い、妥当な設定温度を見出す。

(160°C: 3分、室温: 13分)

測定結果



「(ランプ電流) $\propto 1/(\text{キセノンガス圧})$ 」
とはならなかった(切片を持った)



残留金属の電離による電子生成を考慮

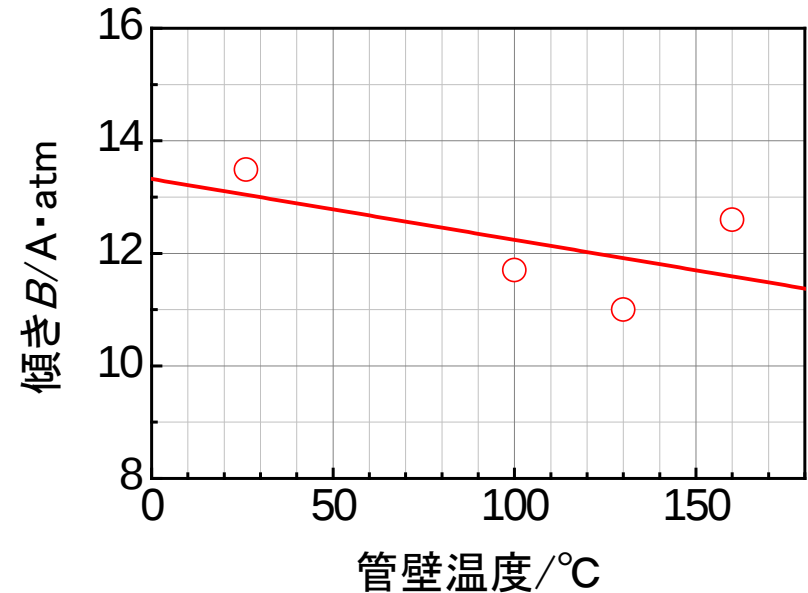
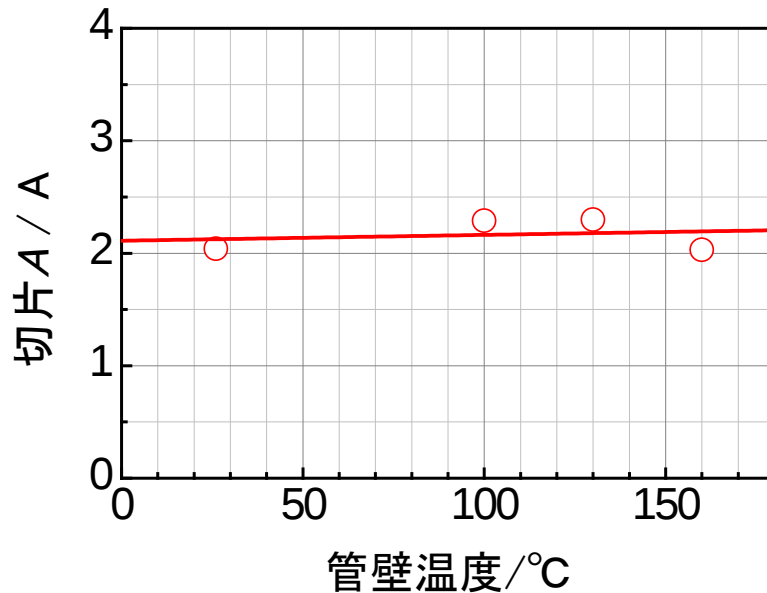
キセノンの電離による電子生成量:
キセノンガス圧に比例
金属の電離による電子生成量:
キセノンガス圧に依存しない

$$n_e = \alpha P + \beta$$



$$I(P, T) = A(T) + \frac{B(T)}{P}$$

実験式の決定



測定データから、最小二乗法により切片と傾きを管壁設定温度ごとに決定



それぞれ管壁温度の関数としてプロットし、A, Bの代表値を最小二乗法により決定

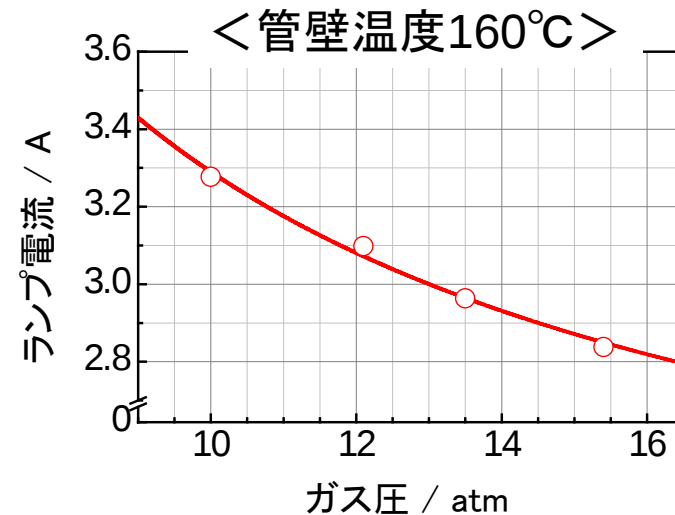
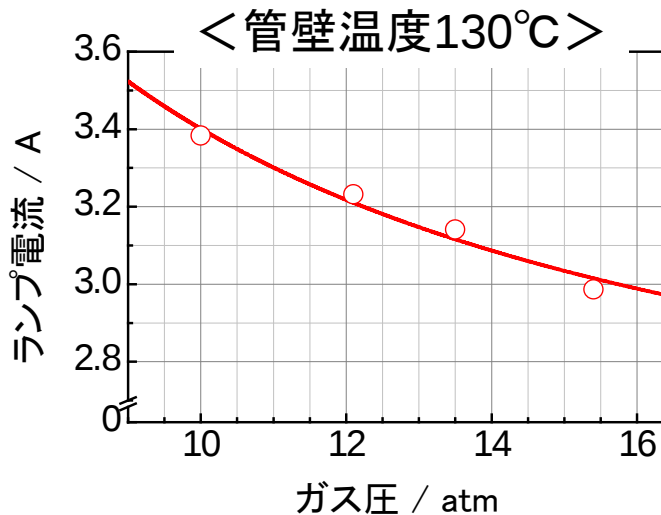
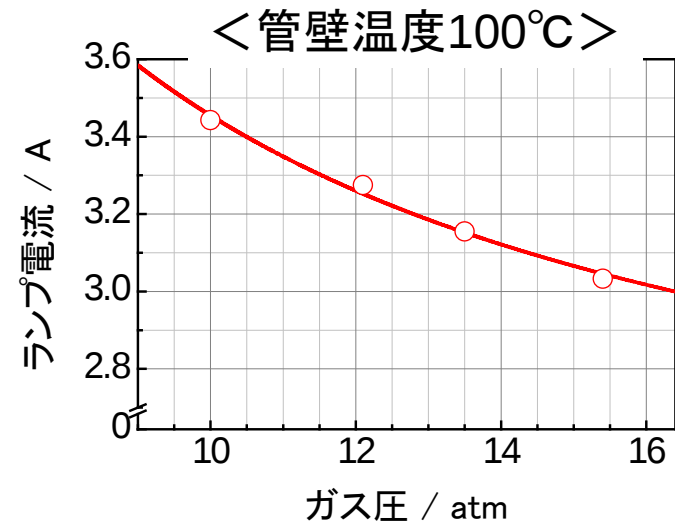
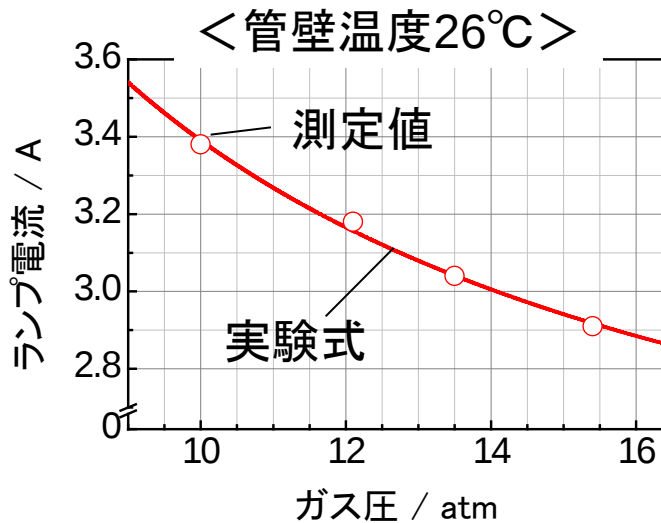


実験式 $I(P, T) = A(T) + \frac{B(T)}{P}$ を決定

$$A(T) = 0.519 \text{ mA/}^\circ\text{C} \cdot T + 2.11 \text{ A}$$

$$B(T) = (-10.8 \text{ mA} \cdot \text{atm/}^\circ\text{C}) T + 13.3 \text{ A} \cdot \text{atm}$$

実験式によるフィッティング

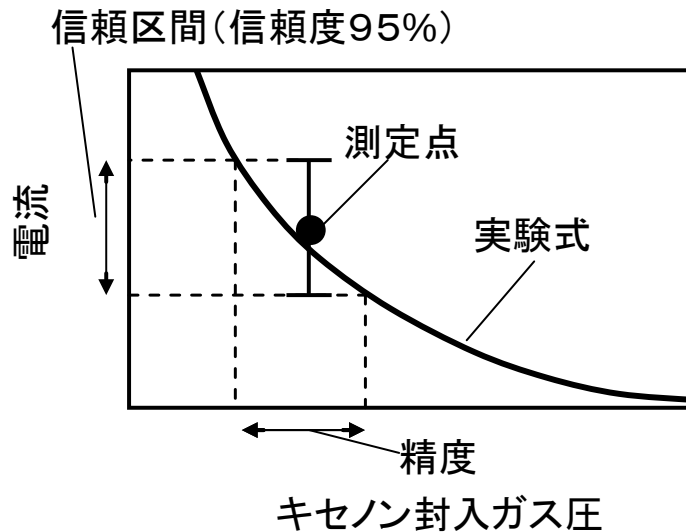


実験式と測定結果が一致 → 実験式を用いたガス圧推定が可能

2012年7月9日(月)

電気電子工学科

推定精度の見積もり



信頼度95%における電流値の信頼区間に対応するガス圧幅を推定精度と定義

管壁温度設定値 / °C	キセノン封入ガス圧 / atm			
	10.0	12.1	13.5	15.4
26	±0.151	±0.166	±0.218	±0.325
100	±0.099	±0.154	±0.217	±0.222
130	±0.093	±0.226	±0.134	±0.184
160	±0.064	±0.149	±0.067	±0.158

光の単位(測光量)について

光の強度

「光」はエネルギーの一形態

J(ジュール)～エネルギーの単位

1 J = 1 N(約100 gの重さ)のものを1 m引き上げるのに必要なエネルギー

食品: 1 kcal = 4190 J

基礎代謝量(青年): 1秒当たり58~72 J (1200~1500 kcal/日)

電力量: 1 kWh = 3,600,000 J (約20円)

W(ワット): 1秒当たりのエネルギー

1 W = 1秒間に1J

(例) 1か月の電力消費が500 kWh(18億J)

→ $18\text{億J} \div (60 \times 60 \times 24 \times 30\text{秒}) = 700\text{ W}$

光のエネルギー(例)

蛍光灯(30型): 約8 W

LED電球(60型、消費電力7.5 W): 1~2 W程度

教室で、A4資料1ページを照らす光: 約0.1 W*

* 照度600 lx、平均視感度360 lm/Wとして計算
電気電子工学特別講義

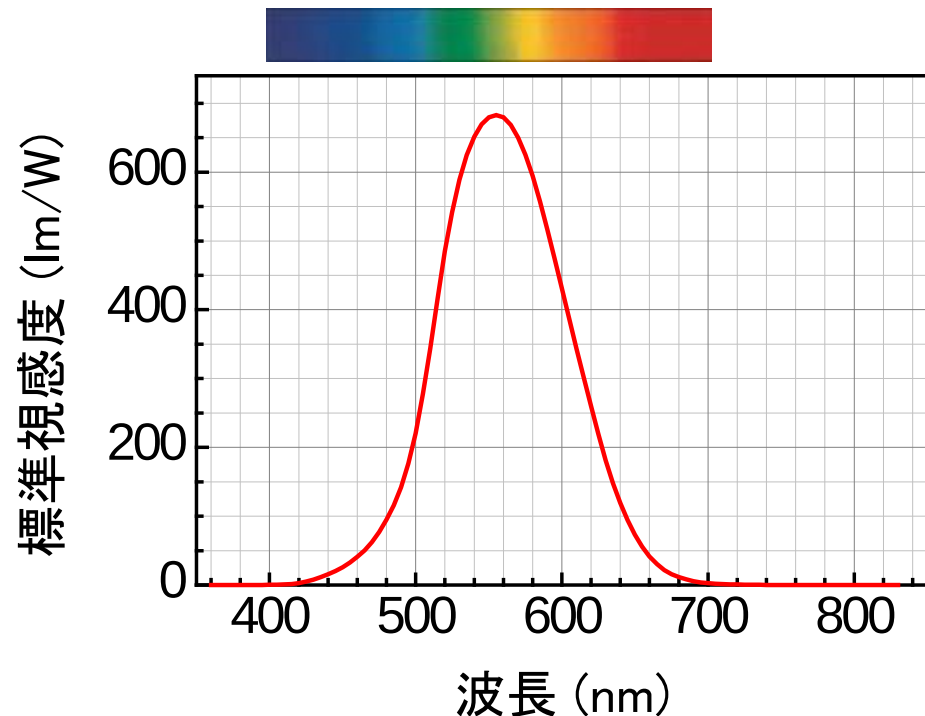
放射量と測光量

色(波長)によって光の見えやすさが異なる

lm(ルーメン): 見えやすさを勘案した光の強さの単位

1 Wの光

紫外光:	0 lm
青色:	62 lm (470 nm)
緑色:	683 lm (555 nm)
橙色:	517 lm (590 nm)
赤色:	181 lm (630 nm)
赤外光:	0 lm

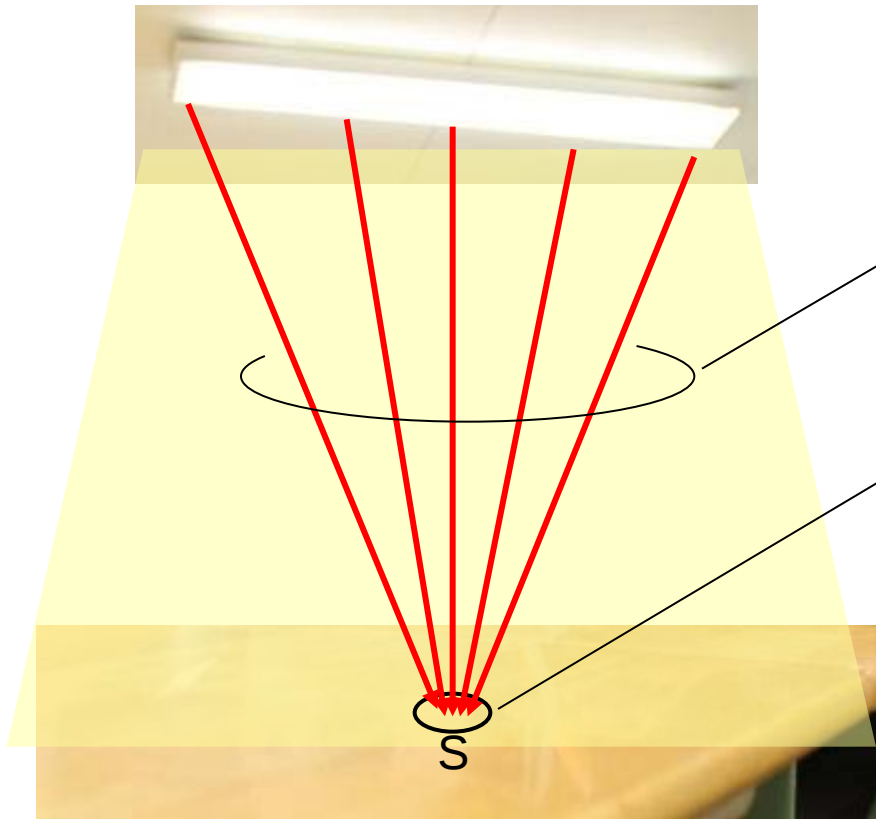


主な測光量

測光量	記号	単位	対応する 放射量	単位
光束	Φ	lm (ルーメン)	放射束	W (ワット)
照度	E	lx (ルクス)	放射照度	W/m ² (ワット毎平米)
光度	I	cd (カンデラ)	放射強度	W/sr (ワット毎ステラジアン)
輝度	L	cd/m ² (カンデラ毎平米)	放射輝度	W/(sr·m ²) (ワット毎ステラジアン毎平米)

測光量と放射量で同じ記号→必要に応じて添え字で区別する
 (例) E_v : 照度、 E_e : 放射照度 (v: visible, e: energetic)

光束と照度

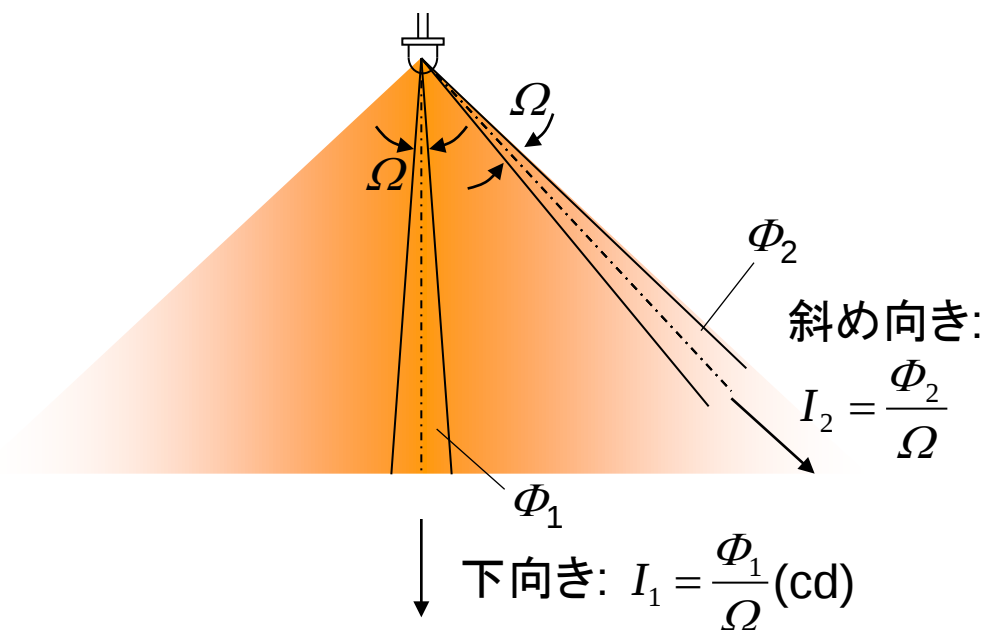


エリアSに入射する光束= Φ (lm)
1秒間に入射する光エネルギー
× 目の感度

エリアSの面積= S (m²)

机の天板面の位置Sでの照度= $\frac{\Phi}{S}$ (lx)

光度



光源を中心とする微小錐体: 立体角 Ω
微小錐体に含まれる光束: Φ

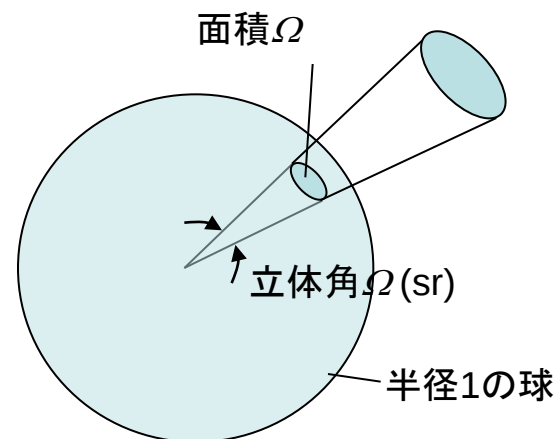
↓

その方向の光度 $I = \frac{\Phi}{\Omega} \text{ (cd)}$

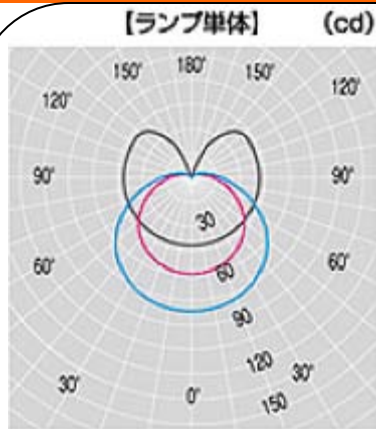
<立体角>

錐体の頂点から見た広がりを表す量のこと。

錐体の頂点を中心とする半径1の球の球面を切り取ったときの面積で表す。



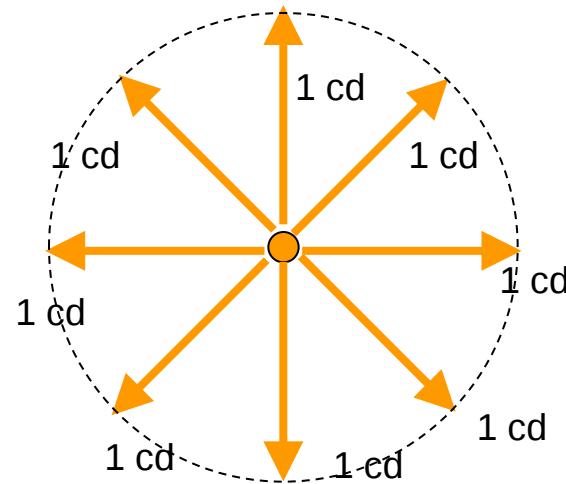
光の向き(配光特性)



配光曲線例
(東芝ライテック
ホームページより)

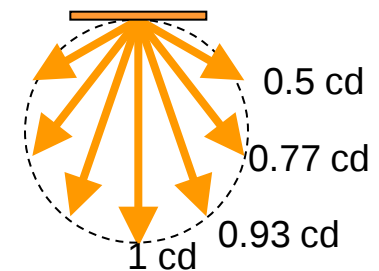
— 一般電球 40W 形
— LEL-A1W4L/2
— LEL-AW4N/2

「理想的な」場合
点光源

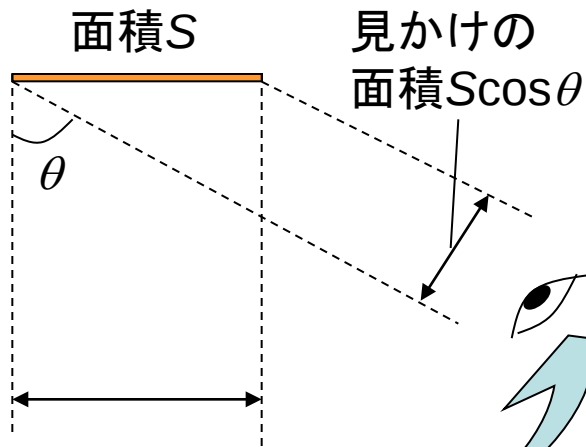


全部で 4π lm

面光源



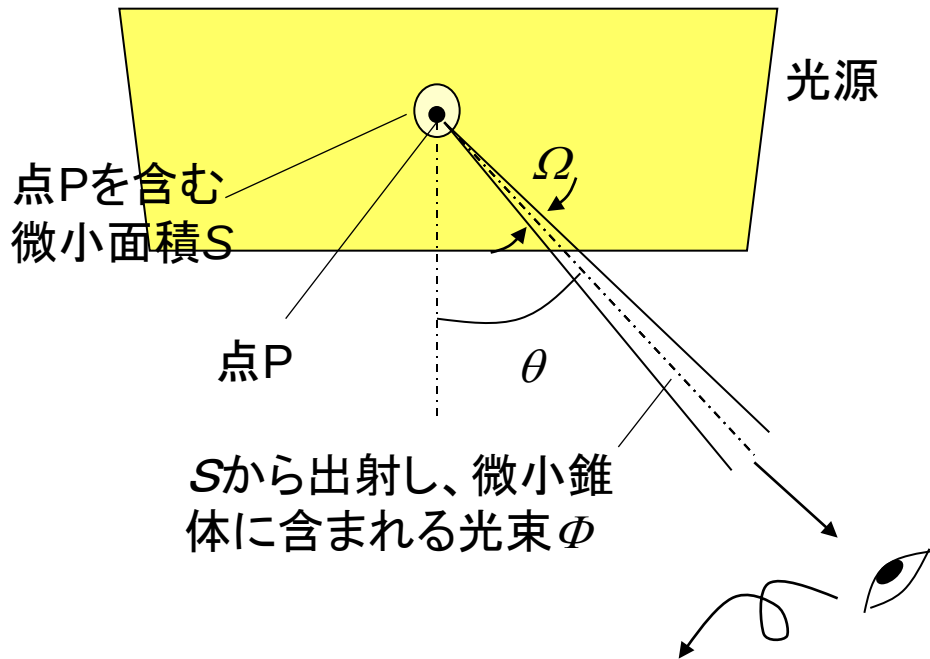
全部で π lm



光源が見かけ上小さくなる($\cos \theta$ 倍)
→「明るさ」(光度)も小さくなる($\cos \theta$ 倍)

ランベルトの余弦則
均等拡散面

輝度

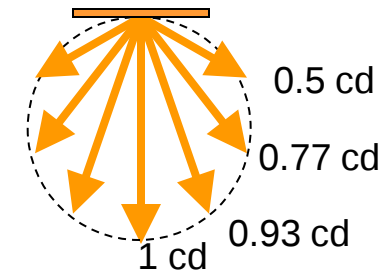


この方向から見た点Pの輝度

$$L = \frac{\Phi}{\Omega S \cos \theta} = \frac{I}{S \cos \theta}$$

光度を光源の**見かけの**面積で割ったもの

均等拡散面の場合



θ 方向の光度

$\cos \theta$ 倍

$$L(\theta) = \frac{I(\theta)}{S(\theta)} = \frac{I \cos \theta}{S \cos \theta} = \frac{I}{S}$$

θ 方向の見かけの面積

$\cos \theta$ 倍

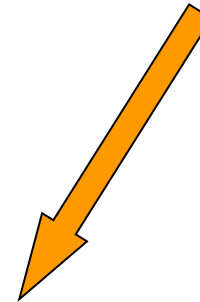
輝度は、真正面から見ても斜めから見ても同じ

道路照明について

道路照明の目的

道路照明の目的

- 夜間やトンネルのように明るさの急変する場所で、視覚環境を良好にし、道路交通の安全・円滑を図る。
- 商業活動を盛んにする。
- 住宅地区の防犯のため。



必要な視覚情報

- 道路上に障害物や歩行者などが存在するかどうか。
- 道路の幅や形状
- 道路上の特殊箇所(交差点、分岐点、屈曲点等)
- 走行車線の路面の状態
- 他の自動車などの存否、種類、速度、移動方向

照明ハンドブック、第2版、オーム社(2003) 6編3章

道路照明の要件

路面輝度

ある一定の明るさが必要

0.5～1.0 cd/m²

均斉度

路面輝度にむらがあると、

- 暗い部分での視認性が悪くなる。
- 運転者に不快感を与える。

グレア

不快グレアと視覚低下グレア

光源のまぶしさをカットする必要がある。

誘導性

道路の線形、勾配、構造が認識しやすい照明設計が必要。

照明ハンドブック、第2版、オーム社(2003) 6編3章

輝度基準

■表1 基準輝度

(単位: cd/m^2)

道路分類		外部条件		
		A	B	C
高速自動車国道等		1.0	1.0	0.7
		—	0.7	0.5
一般国道等	主要幹線道路	1.0	0.7	0.5
		0.7	0.5	—
	幹線・補助幹線道路	0.7	0.5	0.5
		0.5	—	—

(注) 外部条件

A:道路交通に影響を及ぼす光が連続的にある道路沿道の状態をいいます。

B:道路交通に影響を及ぼす光が断続的にある道路沿道の状態をいいます。

C:道路交通に影響を及ぼす光がほとんどない道路沿道の状態をいいます。

(道路照明施設設置基準・同解説)

岩崎電気(株)ライティング講座、<http://www.iwasaki.co.jp/kouza/index/>

輝度分布と障害物の見え方

図1 対象物の見え方特性

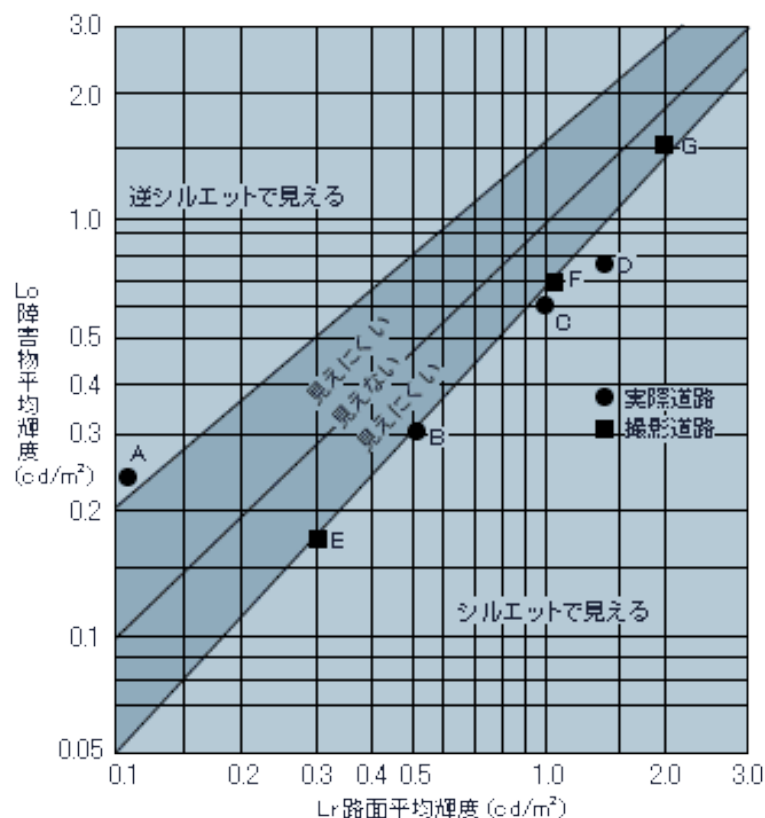
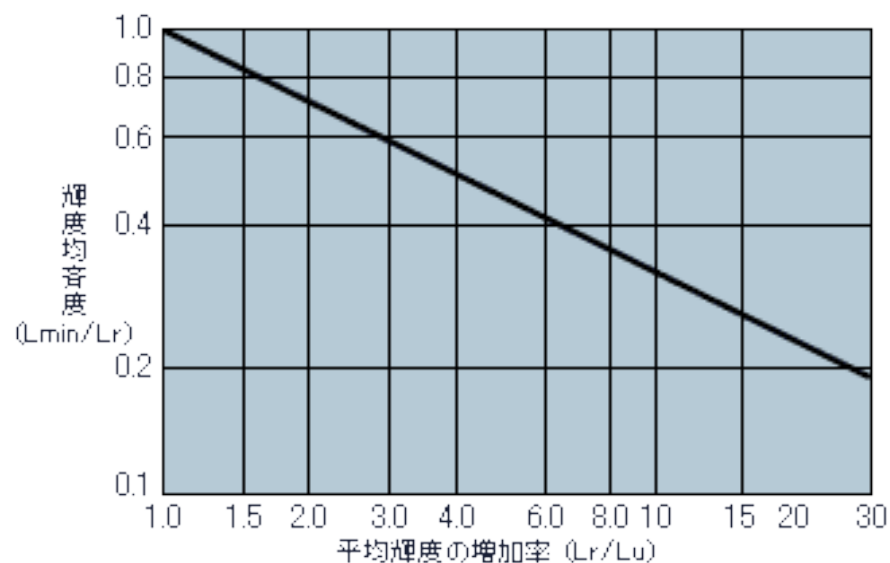


図2 最小知覚可能輝度比を得るに要する平均輝度の増加率と輝度均斉度の関係



岩崎電気(株)ライティング講座、<http://www.iwasaki.co.jp/kouza/index/>

灯具配光の選定

■表3 灯具配光の選定

道路分類		外部条件		
		A	B	C
高速自動車国道等		セミカットオフ形	カットオフ形	カットオフ形
		—	セミカットオフ形	セミカットオフ形
一般 国道等	主要 幹線道路	セミカットオフ形	カットオフ形	カットオフ形
		—	セミカットオフ形	セミカットオフ形
	幹線・ 補助幹線道路	セミカットオフ形	セミカットオフ形	カットオフ形
		—	—	セミカットオフ形

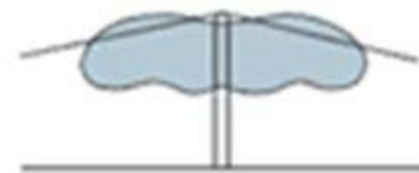
(道路照明施設設置基準・同解説)



カットオフ形



セミカットオフ形



ノンカットオフ形



岩崎電気(株)ライティング講座、
<http://www.iwasaki.co.jp/kouza/index/>

照明方式の比較

◎優れている、○普通、△劣る

項目	ポール照明	ハイマスト照明	高欄照明	カテナリー照明
照明方法	地上8～12mのポールの先端に照明器具を取付け照明にするもので広く使用されている方式	照明塔などによる高所からの照明で、通常地上高20～40m程度の照明塔に大容量の光源を多数取付けて照明する方式 照明器具が地上に下りてくるようにした昇降装置付もある	ポール照明方式が採用できない所で高欄に低ワットの灯具を取付けて道路を照明する方式	一般には、道路に沿って、中央分離帯に長い間隔（50～100m）でポールを立てワイヤーを張り照明器具を懸垂して道路を照明する方式
誘導性	○	△	◎	◎
均斉度	○	○	○	◎
グレア	○	◎	△	○
経済性	◎	◎	△	○
保守性	◎	◎	△	△
長所	●ポールの連立により誘導性がある ●比較的経済的である	●ポールの本数が少なく、スッキリとした景観になる ●シンボルとして利用できる	●誘導性が良い ●昼間の景観が良い	●均斉度を良くすることができる ●誘導性が良い ●ポール数が少なくできる
短所	●各ポール毎に配線が必要 ●保守作業の場合、道路を規制する必要がある	●誘導性に欠ける ●施設外に光がもれる	●幅の広い道路では均斉度が悪い ●取付け高さが低くグレアの生ずる可能性が大きい	●ワイヤーで器具を吊っているため風等により灯具が揺れる ●保守がしにくい
用途	インターチェンジ パーキングエリアのランプウェイ 道路本線	インターチェンジ パーキングエリア 料金所広場	空港周辺で灯具の高さに制限がある場所 ポールが設置できない場所	一般道路 広い道路



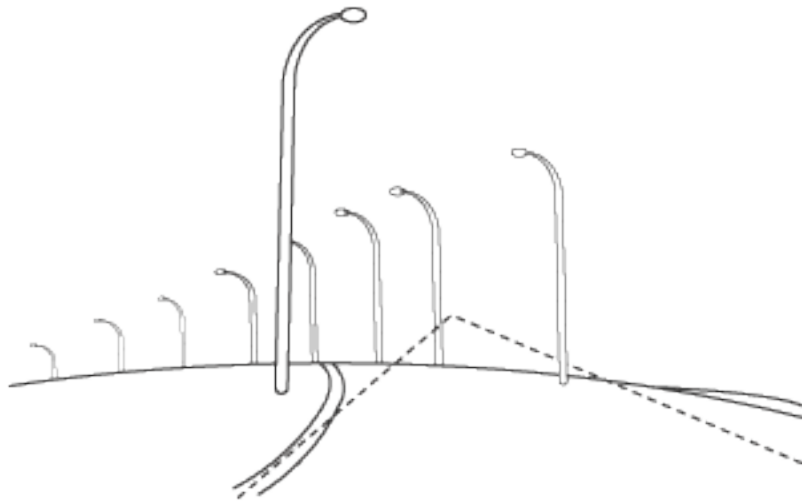
照明ハンドブック、第2版、
オーム社(2003) 6編3章

2012年7月9日(月)

岩崎電気(株)ライティング講座、<http://www.iwasaki.co.jp/kouza/411/>

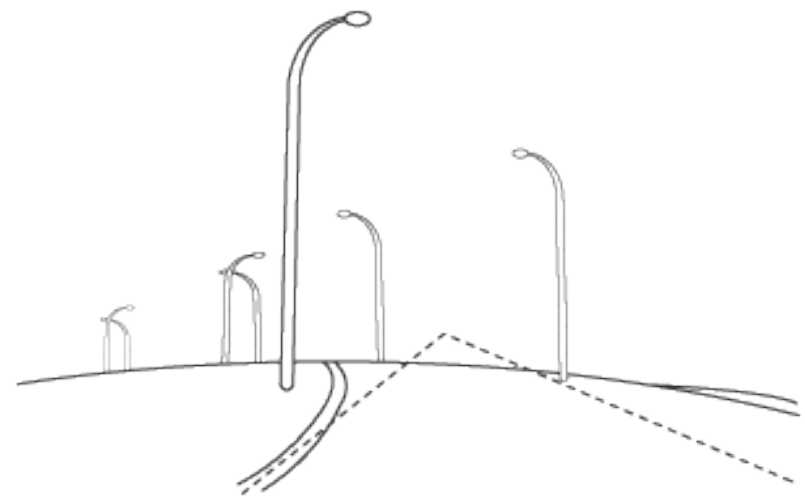
誘導性の例

図4 誘導性が良い例



曲線部における灯具の片側配列の透視図
(路面の輝度分布が良好で誘導性も良い)

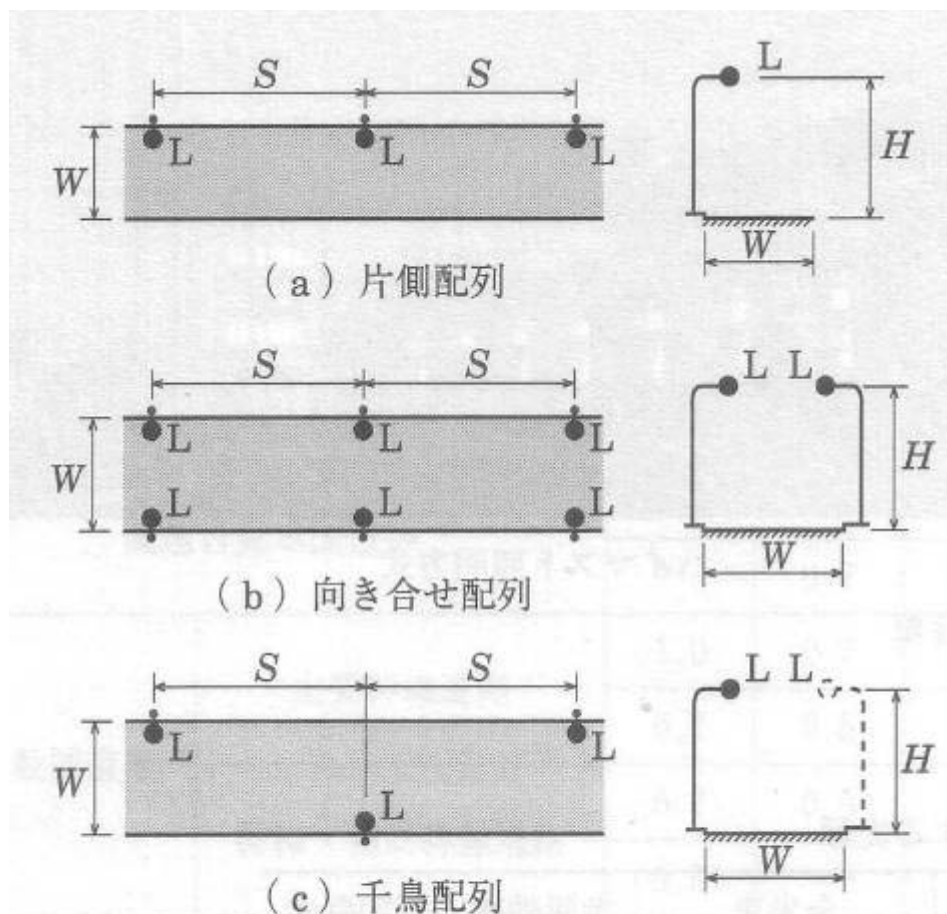
図3 誘導性が悪い例



曲線部における千鳥配列の透視図
(路面の輝度分布が不均一で誘導性も悪い)

岩崎電気(株)ライティング講座、<http://www.iwasaki.co.jp/kouza/index/>

灯具配置の種類



S : 取付け間隔 W : 車道幅員
 L : 照明器具 H : 取付け高さ

図 3・6 配置の種類

照明ハンドブック、第2版、
 オーム社(2003) 6編3章

分合流点での照明

図1 照明施設を中央部に配列する場合の灯具の配置例

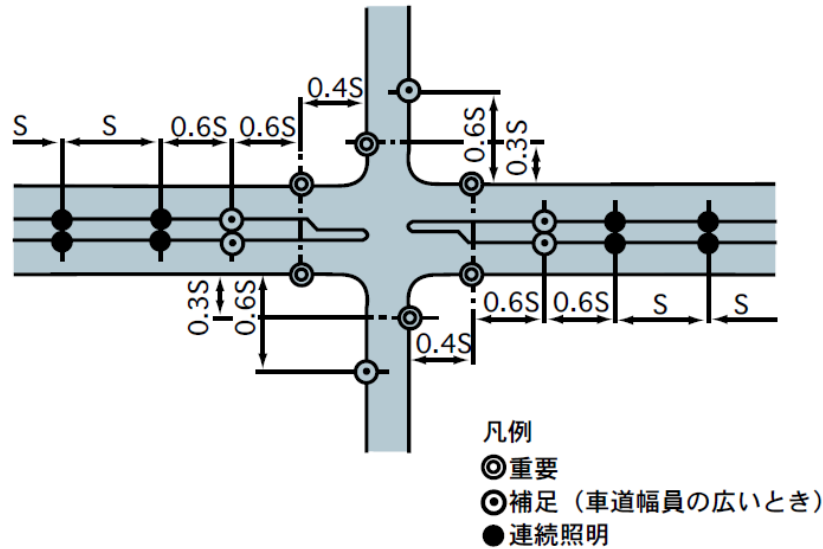


図4 図1により配置した場合の透視図

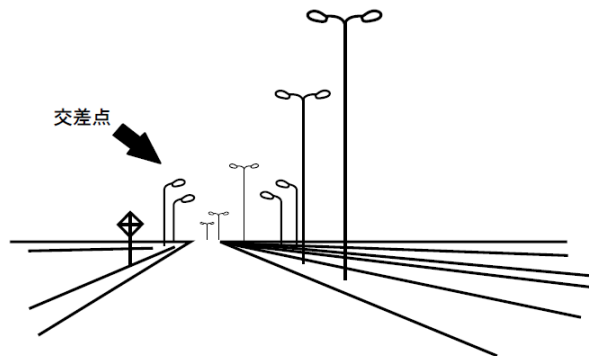


図5 照明施設を路側に配列する場合の灯具の配置例

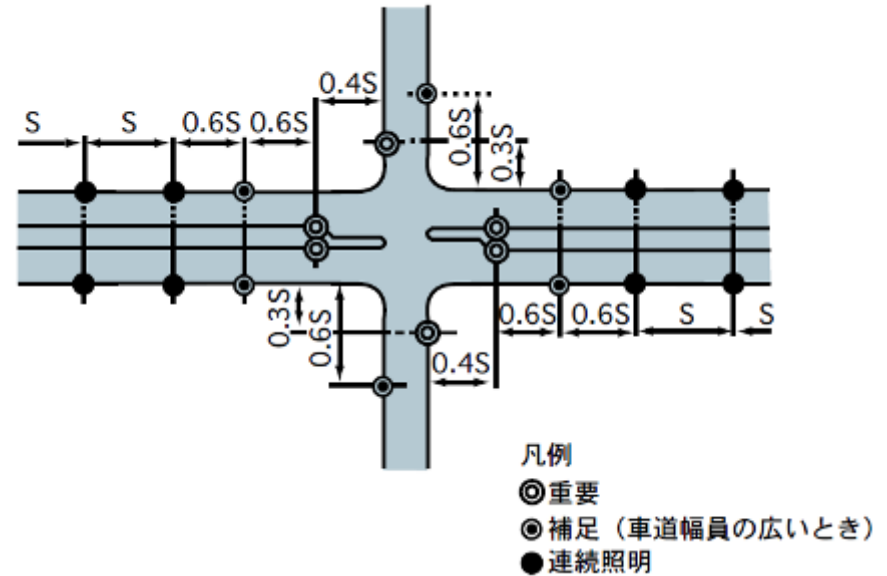
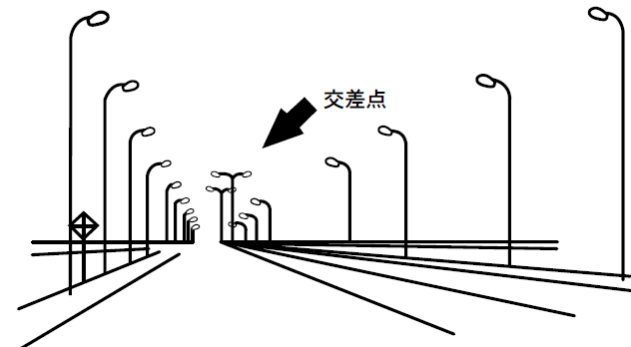


図6 図5により配置した場合の透視図

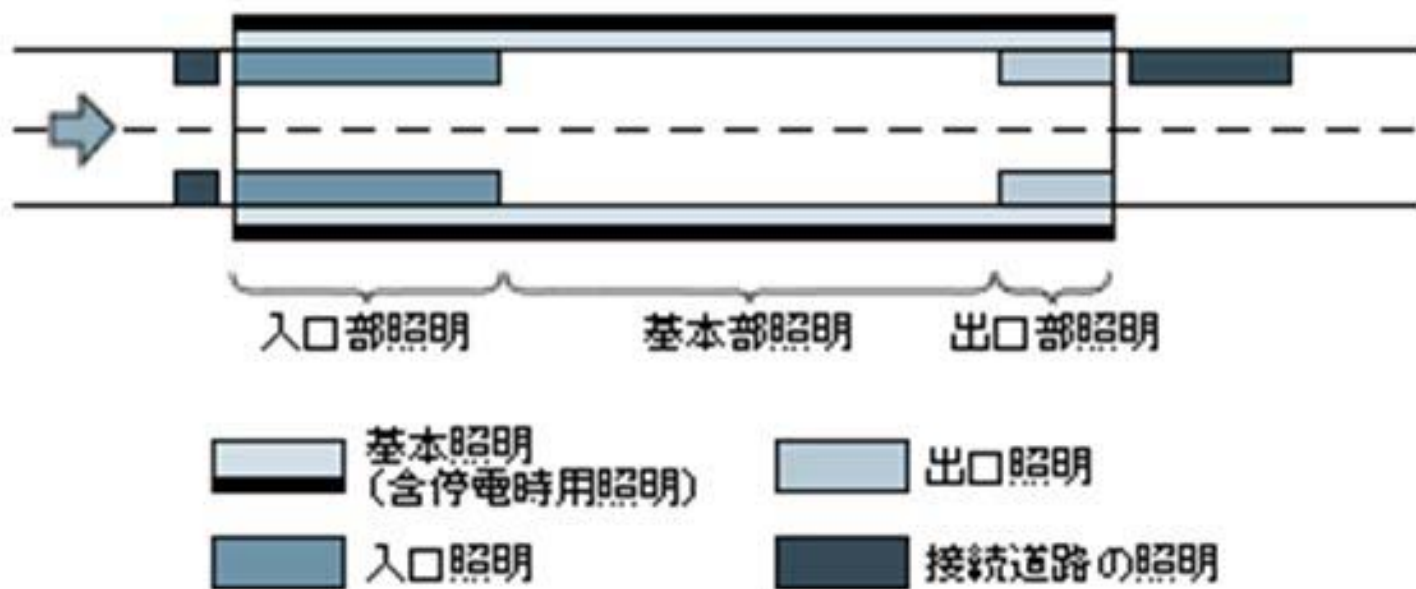


トンネル照明について

トンネル照明の構成

入口部照明
基本照明
出口部照明
停電時用照明

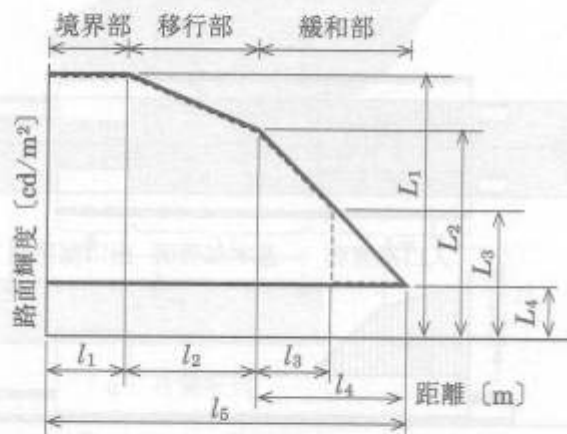
図1 トンネル照明の構成



入口部照明

昼間にトンネル内が暗黒の穴に見える→詳細を識別できるようにする必要がある
トンネル内の輝度に順応する時間が必要→過渡的な照明が必要

L_1 : 境界部の路面輝度 [cd/m^2]
 L_2 : 移行部最終点の路面輝度 [cd/m^2]
 L_3 : 緩和部最終点の路面輝度 [cd/m^2]
 L_4 : 基本照明の平均路面輝度 [cd/m^2]
 l_1 : 境界部の長さ [m]
 l_2 : 移行部の長さ [m]
 l_3, l_4 : 緩和部の長さ [m]
 l_5 : 入口部照明の長さ [m]



トンネル入口

- 〔注〕 1. 図の輝度変化は片対数目盛グラフで直線。
 2. L_3, l_3 は延長の短いトンネルについてのみ適用され、その場合の路面輝度は、図の点線のように変化する。

入口部照明 (野外の輝度 $4\,000\text{cd}/\text{m}^2$ の場合)

設計速度 [km/h]	トンネル 延長 [m]	路面輝度 [cd/m^2]				長さ [m]				
		L_1	L_2	L_3	L_4	l_1	l_2	l_3	l_4	l_5
40 以下	75 以下	94	74	—	—	15	20	0	0	35
	100	73	51	38	—	15	30	10	0	55
	125	58	40	18	—	15	30	25	0	70
	150	46	33	8.6	—	15	30	45	0	90
	175	36	25	4.0	—	15	30	60	0	105
	200	29	20	1.8	—	15	30	80	0	125
	250 以上	29	20	—	1.5	15	30	0	85	130

- 〔注〕 1. 路面輝度は、野外の輝度が $6\,000\text{cd}/\text{m}^2$ の場合は本表の 1.5 倍、 $3\,000\text{cd}/\text{m}^2$ の場合は 0.75 倍とする。
 2. 短いトンネルでも、進入時に出口が見えない線形の場合、路面輝度 L_1 および L_2 については、延長 250m 以上の値を適用することができる。
 3. 対面通行の場合は、両入口それぞれについて本表を適用する。短いトンネルで両入口の入口部照明区間が重なる場合は、路面輝度の高いほうの値が得られればよい。
 4. 通常のトンネルでは、自然光の入射を考慮して、トンネル入口より 10m の地点より入口照明を開始する。
 5. 設計速度、延長が本表の値以外の場合は、内挿法によって求める。

基本照明

■表1 基本照明の平均路面輝度

設計速度 (km/h)	平均路面輝度 (cd/m ²)
100	9.0
80	4.5
60	2.3
40以下	1.5

道路照明よりも高い輝度基準

岩崎電気(株)ライティング講座、<http://www.iwasaki.co.jp/kouza/index/>

出口部照明

昼間時、次の条件を満たす場合に設ける。

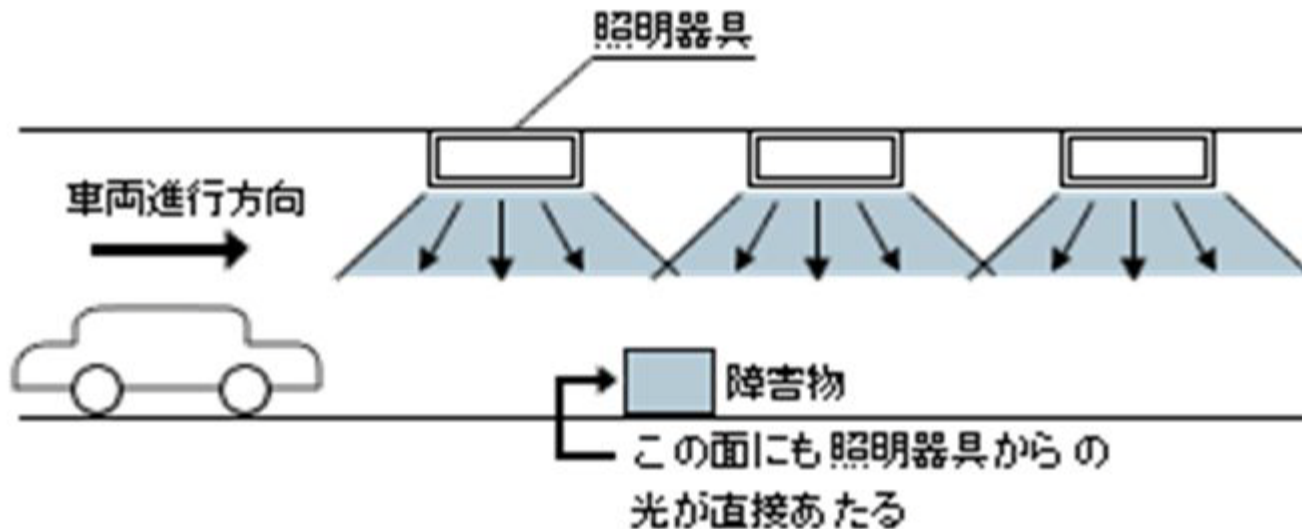
- 1.トンネルの設計速度が80 km/h以上
- 2.トンネル出口部の野外の輝度が6000 cd/m²以上
- 3.トンネル延長が400 m以上

昼間時の路面照度は出口部の野外輝度の数値の1/10の値とし、照明区間は80mとする。

照明方式

[1]対称照明方式

対称照明方式とは隅角部に照明器具を取り付け、道路縦軸に対して対称配光の照明器具を使用する照明方式で、基本照明および入口照明に用いられます。



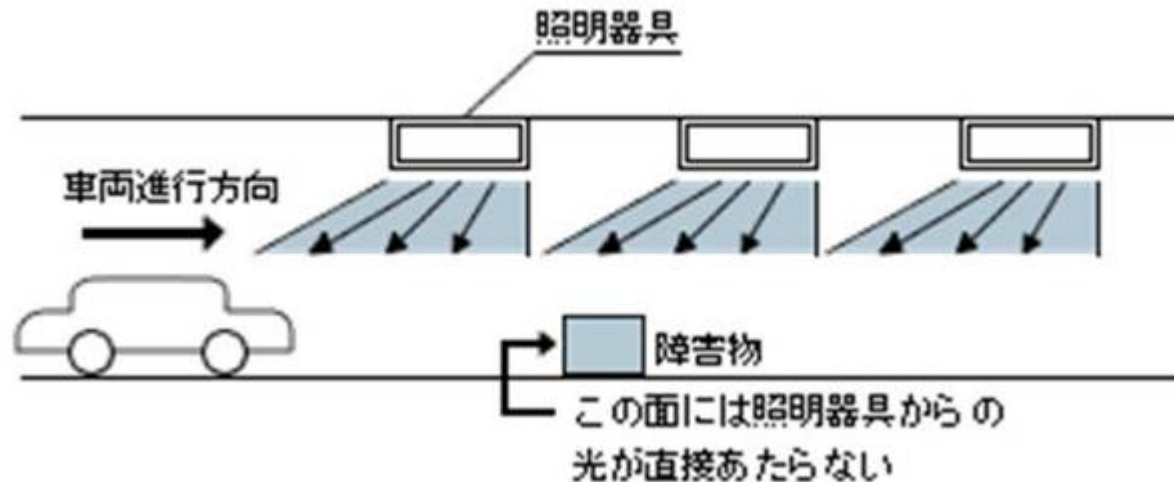
岩崎電気(株)ライティング講座、<http://www.iwasaki.co.jp/kouza/index/>

照明方式

[2]カウンタービーム照明方式

カウンタービーム照明方式とは、天井部に照明器具を取付け、走行する自動車の進行方向と逆方向に照明する方式です。

この方式は、交通量の少ないトンネルの入口照明に適しており、運転車側への高い路面輝度と障害物正面が暗くなることから、路面と障害物に高い輝度対比が得やすい特徴があります。入口照明に用いられます。

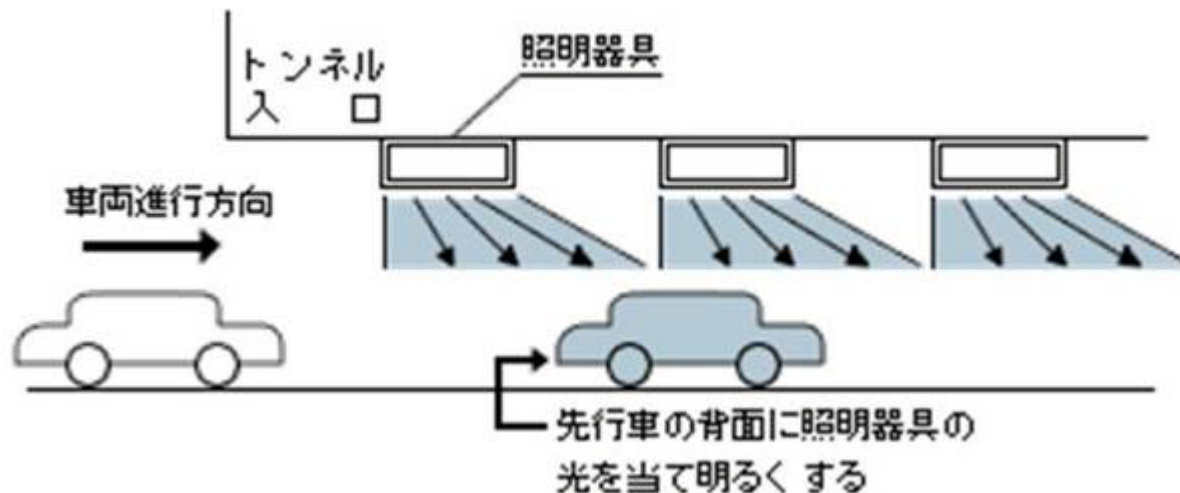


照明方式

[3]プロビーム照明方式

プロビーム照明方式とは、天井部に照明器具を取付け、走行する自動車の進行方向に照明する方式です。

トンネル坑口付近に存在する先行車の背面を照明することにより、先行車に対する視認性を改善した照明方式で、交通量の多いトンネルの入口照明で補足的に用いられます。



順応

明順応: 1分以内
暗順応: 30分以上



図3・2 眼球の構造
(Walls, 1942²¹)

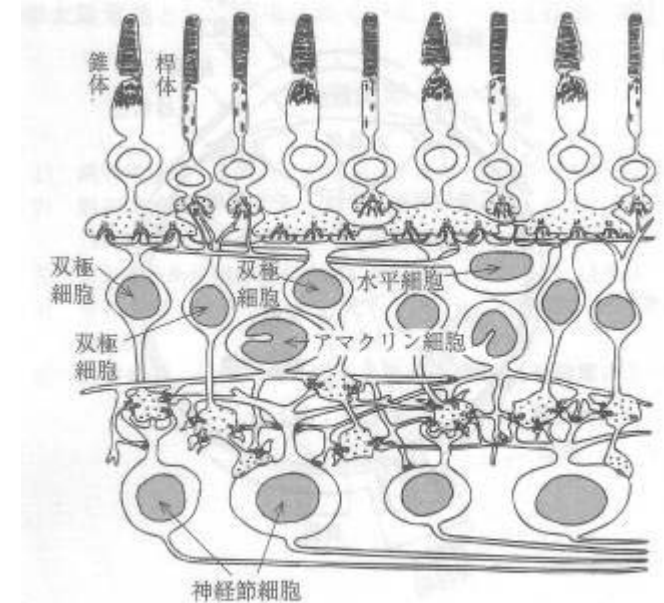


図3・4 網膜と光受容器および神経細胞
(Dwling, et al., 1966²²)

月明かり0.1 lx～直射日光100 klx
(ダイナミックレンジ 10^6)
→ 錐体と桿体の切り替え

錐体: L, M, Sの3種類→色の識別
桿体: 高感度、色は識別できない

照明ハンドブック、第2版、オーム社(2003) 1編3章

道路・トンネル照明用光源

道路照明で使用する光源

表 3・3 道路照明で使用する光源

光源の種類		形 式	全光束	光源効率	平均寿命
			[lm]	[lm/W]	[h]
高圧ナトリウムランプ	拡散形	NH 110 F・L～NH 360 F・L	9 900～45 000	90～125	12 000
	透明形	NH (T) 110・L～NH (T) 360・L	10 400～47 500	95～132	12 000
	両口金形 ^{*1}	NH 70 TD～NH 150 TD	6 600～14 000	94～93	12 000
蛍光水銀ランプ		HF 100 X～HF 400 X	3 900～21 000	39～52	12 000
メタルハライドランプ		MF 250・L～MF 400・L	16 000～30 500	64～76	9 000
低圧ナトリウムランプ		NX 35～NX 180	4 600～31 500	131～175	9 000
蛍光ランプ		FLR 20	1 070	54	7 500
		FLR 40	2 800	70	10 000
		FHF 32 (45) ^{*2}	4 950	110	12 000
		FHP 45 ^{*3}	4 500	100	12 000

* 1 建設電気技術協会発行の道路・トンネル器材仕様書による。

* 2 45 W 出力とする (光束はメーカーカタログ値)。

* 3 光束はメーカーカタログ値とする。

[道路照明設計指針より 400 W 以下を抜粋]

ナトリウムランプ

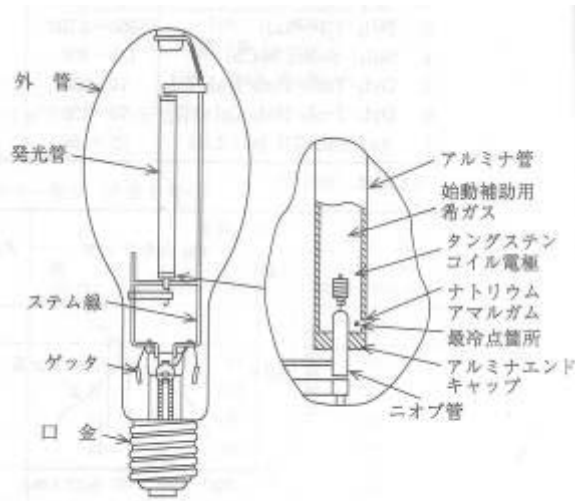
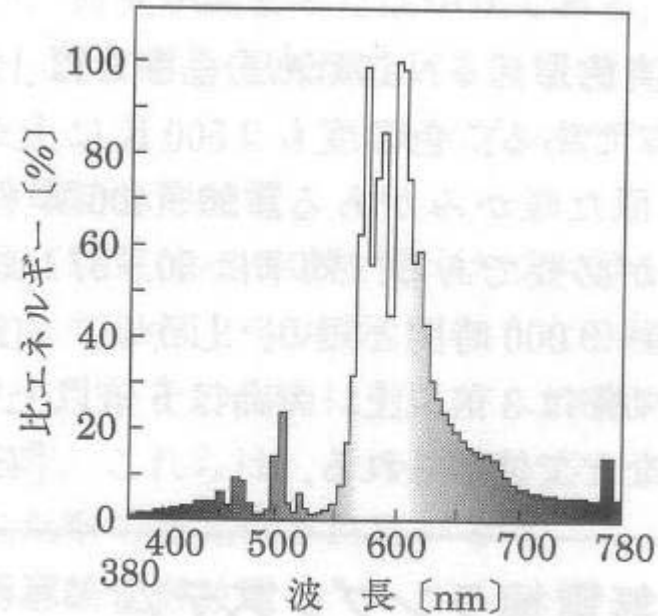


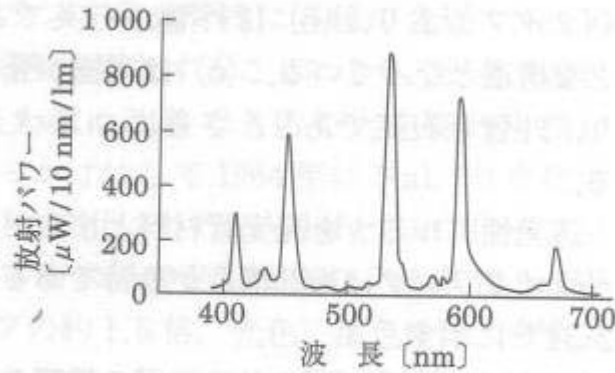
図2・38 高圧ナトリウムランプの構造
(照明学会, 1978⁽²⁰⁾)



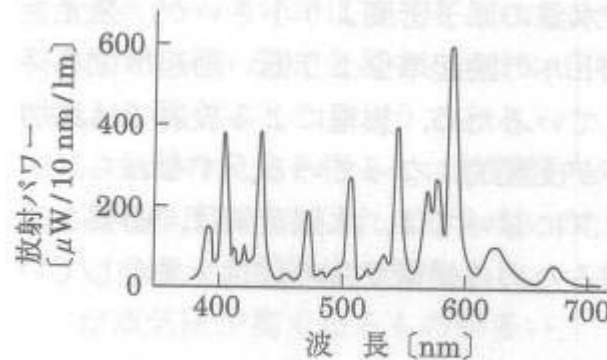
(a) 高効率形

NaのD線による発光 (590 nm)
高効率 (~130 lm/W)
オレンジ色の発光

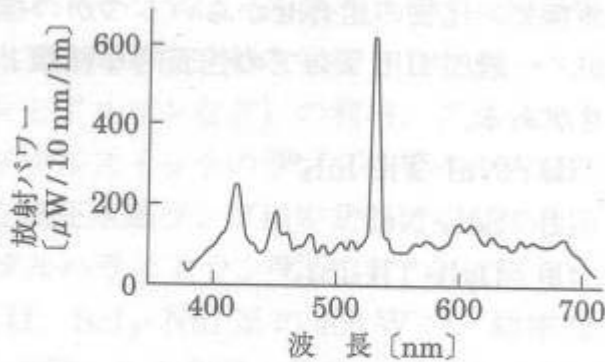
メタルハライドランプ



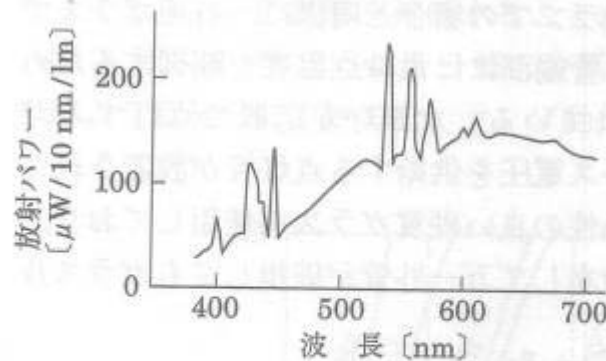
(1) NaI-Tl-InI



(2) ScI₃-NaI



(3) DyI₃-Tl-InI

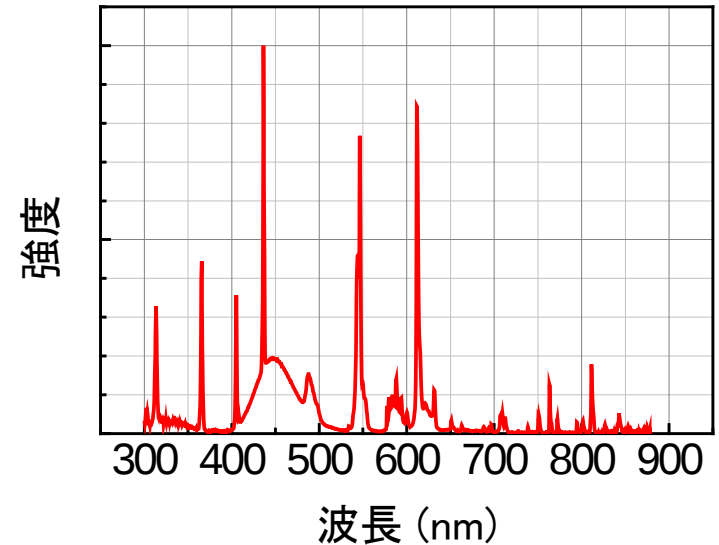
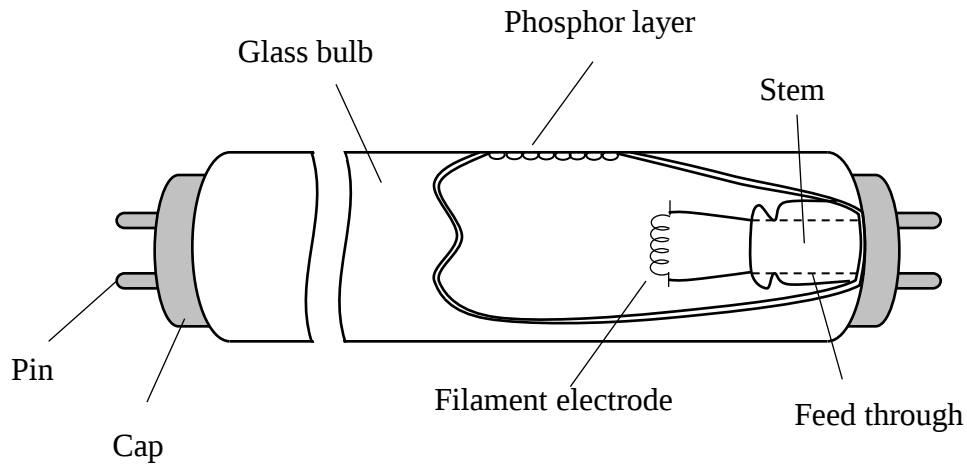


(4) SnI₂-SnBr₂

図2・35 一般照明用メタルハライドランプの分光分布
(照明学会, 1978⁵⁹⁾)

金属のヨウ化物を封入
→演色性改善

蛍光水銀ランプ



低圧・低輝度・低温

MHランプ: 100 Mcd/m², 数気圧以上, 数千K

蛍光ランプ: 10 kcd/m², 1/100気圧以下, 数10°C