

厚木における北空昼光の分光分布の測定

大 熊 良 夫

Measurements of Spectral Power Distributions of Daylight from North Sky at Atsugi

Yoshio OHKUMA

The spectral power distributions of daylight from the north sky at Tokyo Institute of Polytechnics, Atsugi in the medium latitude region were measured by using an automatic spectro-radiometer in the period of four years (1989 to 1993) in order to investigate the applicability of the CIE daylight data.

The principal component analysis was applied to the spectral power distributions of daylight measured in the period of three months (January 1991 to March 1991), and the first and second contribution factors became 98.3 percent.

The reconstituted distributions of daylight at Atsugi had quite a good agreement in comparison with those of CIE in the visible spectral range, but had lower values in the ultra violet spectral range.

1 はじめに

厚木における北空昼光が、1960年代の欧米における観測データに基づくCIE昼光と比較してどの程度相違するか、また、工業製品の色彩管理にもちいる常用光源として有効なものかを評価する目的で、北空昼光の分光分布を1989年～1993年まで継続観測した。そのなかで観測色度が低色温度から高色温度まで、一様に分布している1991年1月から3月までの有効220件のデータから、CIE昼光とおなじ手法で主成分分析して、厚木における合成昼光を算出した。

また、おなじ観測データから常用光源として評価するために、JISでの常用光源の評価等級区分

に従い、可視条件等色指数 MI_{vis} および蛍光条件等色指数 MI_{uv} を求めた。

2 昼光測定システム概要

2.1 測定装置

測定装置は図1に示すように分光器に積分球式の採光器を取り付けた。

北空昼光は採光器で、真北、仰角 45° 、採光立体角 $0.48[sr]$ で採光され、迷光および二次回析光除去フィルタを通り、分光器で分光され、光電子増倍管で光電流に変換される。光電流はホルダー内のヘッドアンプで増幅され電流－電圧変換し、デ

* 本学電子工学科 助手
1996年10月8日 受理

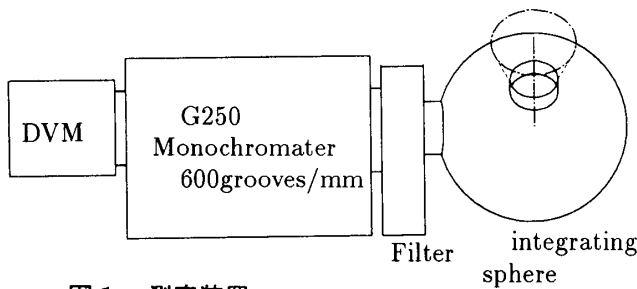


図1 測定装置

受光器 分光器 積分球式採光器

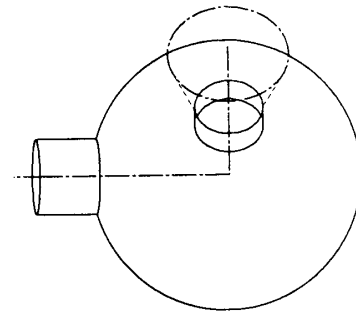


図2 積分球式北空昼光採光器

仰角 45° , 採光立体角 $0.48[sr]$
内面に硫酸バリウム塗布

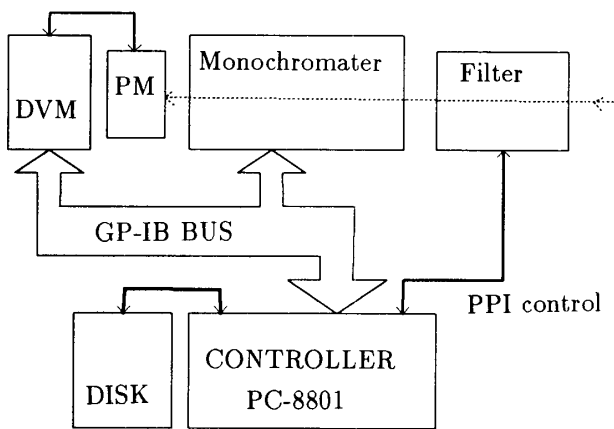


図3 測定システム

PCで分光器とDVMをGP-IB制御

デジタルボルトメータで数値化されパーソナルコンピュータに取り込まれ、分光分布が計算されフロッピーディスクに記録する。

2.2 測定システム

測定システムは図3に示す。コントローラーはパーソナルコンピュータ(PC-8801)を用いインターフェイスはIEEE-488(GPIB)を使用した(分光器, デジタルボルトメータ)。回転フィルタのパルスモータはPC-8801のPPI命令を用いて直接コントロールしている。

2.3 使用機器

使用機器はおおよそ次のようなものを用いた。

1) 分光器 G250(日本光学製) ツエルニターナー型, シングルビーム, グレイティング 600 本/mm, 波長再現性 $0.1nm$

測定波長範囲は $300nm - 800nm$, 測定間隔 $5.0nm$, 入出力スリット幅 $0.73mm$ (測定半値幅 $5.0nm$) に設定。

2) 光電子増倍管 R1508(浜松ホトニクス製) ヘッドオン型光電子増倍管

印加電圧 $700V$, 最大出力電流 $1.0\mu A$ 未満で使用。

3) フォトマルホルダー フォトマルホルダー A(日本光学製) 専用ヘッド・アンプ内蔵

ヘッドアンプの出力電圧は, 光電流 $1.0\mu A$ 時 $1.0V$ 。

4) オートスキャナー AS-C101(日本光学製) モノクロメータ・オートスキャナー・コントローラー, GPIB インターフェースによるマイクロコンピュータ内蔵波長駆動装置

5) DVM 7552(YOKOGAWA 製) デジタル・ボルトメータ, GPIB インターフェース付き
光電子増倍管の光電流測定に用いる。光電流はヘッドアンプで電圧に変換され電圧値で測定した。

6) パーソナル・コンピュータ PC-8801(日本電気製) Z80 8ビット CPU, 5 インチ 2D フロッピーディスク, GPIB インターフェース付き

OS としては N88DISKBASIC を用いプログラムは自製した。旧式なものであるが, 測定時は簡単な計算, データ処理なので負担が軽く使用に耐

える。

7) 高圧直流安定化電源 HTV C-665(浜松ホトニクス製) 光電子増倍管用電源

8) 光源用交流安定化電源 812(メトロニクス製) AC100V, 10A, 出力電圧変動率 0.5%

測定装置の校正に用いるハロゲン電球の電源として用いた。電圧変動が $100V \pm 0.5V$ 程度なので、校正は 3 回測定して平均をとる必要があった。

9) 昼光採光器 (自製, 外観図 2 に示す)

仰角 45 度, 採光立体角約 0.48 ステラジアン, 直経 30mm の石英ガラス円形入射窓付き, 内面硫酸バリウム塗布積分球, 直経 200mm

積分球内での多重反射の影響で紫外部の減衰が懸念されたが, 頻繁に行う標準校正が容易になるので採用した。硫酸バリウム塗布の際バインダは使用せず, 圧着した。構造はプラスチックの半球を重ねて造り, 容易に分解して硫酸バリウムの塗り直しができるようにした。また重量もかなり軽量にしてあり, 分光装置全体への構造的な負担を軽くした。

10) 回転フィルタ (自製)

4 種類のフィルタをパルスモータで回転位置制御した。直経 180mm のアルミ円盤に, 4 枚のフィルタ (素通し, ND, ND+YA3, R69 の順) を 90 度に配置し, 回転位置が 2 種のフィルタ間は分光器入射光のシャッターに兼用する。パルスモータでギヤを介して駆動した。

フィルタの役目は, ND: 感度調整, YA3: 迷光除去, R69: 二次回折光の除去。

11) 校正用標準光源 (自製)

ハロゲンランプ GS JCV 内蔵, 100V, 150W

内部に矩形スリットを設けてフィラメント中央部分 4mm の光のみ取り出し, 分光放射照度標準電球により値付けし常用とした。

12) 波長校正用光源 (島津理化製)

低圧放電灯の水銀およびカドミウムの輝線を用いて分光器の波長校正に用いた。

3 測定方法とプログラム

3.1 測定場所と方法

北側の空が開けて障害物が無い場所に採光装置を設置する必要があり, 光工学科のご好意により工学部 2 号館 3F 旧写真施設室に設置させて頂くことができた。(北緯 $36^{\circ} 26'$, 東経 $139^{\circ} 22'$)

日の出後 3 時間後から日没 3 時間前までの北空昼光を 1 時間毎に毎日測定した。天候の安定しない日はもう少し頻繁に測定する必要があるが, データが膨大になるので 1 時間毎とし, その代わり期間をなるべく長くすることとした。1 回の測定に 3 分掛かるので空光の不安定の時はどうするか, 問題があったがとにかく測定データ数を多くして平均化することにした。

測定時なるべく直接観察するのが望ましいが, 毎日のことなので無人で自動測定できるように準備した。

標準電球による装置の校正は原則的には毎週おこなった。

93 年度末になり入射光路間に回転セクタ型チョッパを入れ, 光電流測定をロックインアンプによる同期検出法に改めた。また, 全自動カメラで測定毎に空の状態を撮影できるようにした。

3.2 測定プログラム

測定は完全に自動で行われるようにプログラムした。順序はおおよ次の様である。

1. 初期設定

すべての機器の電源 ON

分光器: 波長 800nm

回転フィルタ: 分光器の入射光遮断の位置

2. 測定時間内の空光安定性のモニタ

設定測定開始時刻になると, 光電子増倍管の暗電流測定を 10 秒間行なった後, 回転フィルタを R69 の位置にして波長 800nm での測定を行なう。(空光の変動のモニタのため同一

波長での開始時の値と終了時の値を記録し安定性を検討する), その後回転フィルタを遮断の位置に戻す。

3. 300nm – 800nm, 5.0nm 間隔で空光測定する

- (a) 波長を 300nm にして再び光電子増倍管の暗電流測定を 10 秒間行ないつぎに, 回転フィルタを素通しの位置にする。波長 300nm の測定 10 秒間行なう。
- (b) 波長を 5nm 変えて 305nm の測定を 2 秒間行なう, 引き続き 345nm まで波長を変えて繰り返す。
- (c) 波長を 350nm に設定してから ND フィルタに変えて測定を 2 秒間行なう, 引き続き 495nm まで繰り返す。
- (d) 波長を 500nm に設定してから ND+YA3 フィルタに変えて測定を 2 秒間行なう, 引き続き 715nm まで繰り返す。
- (e) 波長を 720nm に設定してから R69 フィルタに変えて測定を 2 秒間行なう, 引き続き 800nm まで繰り返す。

4. 測定後の処理

- (a) 回転フィルタを遮断の位置にして, 光電子増倍管の暗電流測定を 10 秒間行なう。
- (b) 測定電流 – 暗電流測定を各波長データ毎に行ない, フロッピーディスクに記録する。

5. 定刻になるまで時間待ち, 定刻になったら再び 2. に戻り繰り返す。

1 回の測定時間は掃引時間に限ると 2 分ほどであるが, 光電流測定に多少時間がかかり 3 分余り必要であった。1 回の計測で, 300nm – 800nm まで半値幅 5.0nm 測定間隔 5.0nm で 101 波長を測定する。データ名, 日付, 開始時刻, 終了時刻, 測定開始時の 800nm 光電流値, 101 波長の光電流値を 1 データとした。データ量は約 1KB である。

データの名前は測定順に自動的に定め, 1 日分まとめて 1 つのファイルに日付をファイル名としてテキストデータとして記録した。1 枚の 2 D フロッピーディスクに約 20 日分ほど記録できる。

以上の計測処理は無人で自動的におこなわれる。

波長毎の光電流値から分光スペクトルなど他の測光値に変換処理するのは, 別の高速・大容量のコンピュータを利用した。

分光スペクトルは次の式で計算した。

$$St(\lambda) = \frac{Ss(\lambda)}{Rs(\lambda)} Rt(\lambda)$$

$St(\lambda)$: 分光スペクトル

$Ss(\lambda)$: 標準光源の分光スペクトル

$Rt(\lambda)$: 北空昼光による測定器の値 (光電流値)

$Rs(\lambda)$: 標準光源による測定器の値 (光電流値)

λ : 300nm – 800nm, 5nm 間隔

4 測定結果と検討

4.1 分光感度特性

相対分光感度特性を図 4 に示す。最高感度の値を 100% で示している。測定波長帯域を 4 分割してフィルタをかけているので, ほぼ $\pm 6\text{db}$ の範囲に収まっている。感度は, 光電子増倍管の分光感度 \times 採光器の分光感度 \times 分光器の分光効率の積となるが, R1508 型光電子増倍管の規格では紫外域の量子効率は 25% を超えているが, 近赤外域の 800nm では 0.25% と低下している。採光器の分光感度は硫酸バリウムの反射率の低下で紫外域ではかなり低下する。総合すると赤外域の感度がかなり不足するのは否めないが, 測定対象の北窓昼光は天候にかかわらず, 赤外域の光量は少なくないので, 感度不足は軽減される。

採光器の相対分光感度特性を図 5 にしめす。560nm の感度を 100% とした。硫酸バリウム塗布後 6 ヶ月以降の特性である。塗布直後は低下が激しく 3 ヶ月位は安定しない, それ以後安定するが, 紫外域はかなり低下する。赤外域が感度が良いように見えるが, 新しい内は, ほぼ全可視光域でこ

の値を示す。

検出器に用いた光電子増倍管のフリッカーノイズの影響で暗電流を不安定にしているため、光量の不足する場合の光電流値の誤差が大きくなる。顕著なのは標準電球を使用した場合の310nm以下の波長域で、光量が非常に少ない。暗電流の変動がS/N比を下げ校正が不正確になるが、空光にはこの波長域の成分は殆ど無いので、結果にあまり重大な影響を及ぼさないと思われた。94年1月に光電流測定をロックインアンプを用いた同期検出法に改めたところ、S/N比が20dB以上改善された。以後20日間昼光測定した結果、以前の検出法と分光分布に変化が無く、それ以前の測定が有効であることが確認できた。

4.2 実測昼光

図6に工芸大での一般的な測定例を示す。季節は2月であるが、1年を通してグラフの形は同じような傾向を示す。一見して曇空はD65とかなりよく合致している。雨の日も曇空と同様であるが、放射量はかなり低下する。図7は同じものをCIE色度図上に示したもので、ほぼ黒体軌跡に沿っている。

図8に220例の測定データのCIE xy 色度図上での散布図と代表昼光軌跡を示す。破線で示すのはCIE昼光軌跡で、交差しているのは等色温度線である。 xy および uv 色度図上での代表昼光軌跡は次のように表せた。

$$y = -1.850x^2 + 2.101x - 0.152$$

$$v = -16.992u^2 + 8.048u - 0.619$$

CIE 昼光軌跡と比べると、工芸大学では高色温度領域では緑側に、低色温度領域では逆に紫側にずれ込んでいる。

4.3 TIP 合成昼光

CIE 昼光と同じく Judd らの方法¹⁾と同様な手法

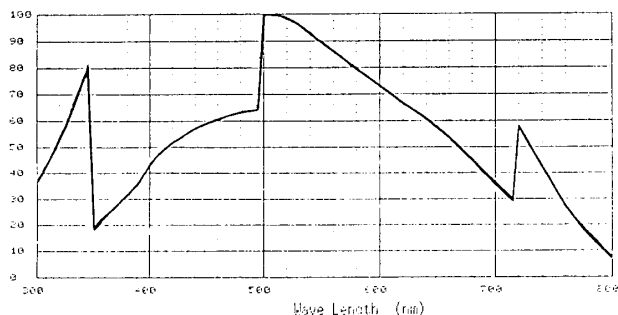


図4 測定装置の相対分光感度

Y軸は相対感度 最大100 %
フィルター切り換えで不連続になる

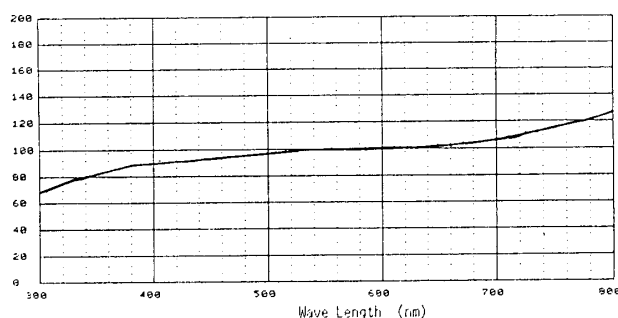


図5 探光器の相対分光感度

Y軸は相対感度 560nmの感度を100 %
製作6ヵ月後の特性

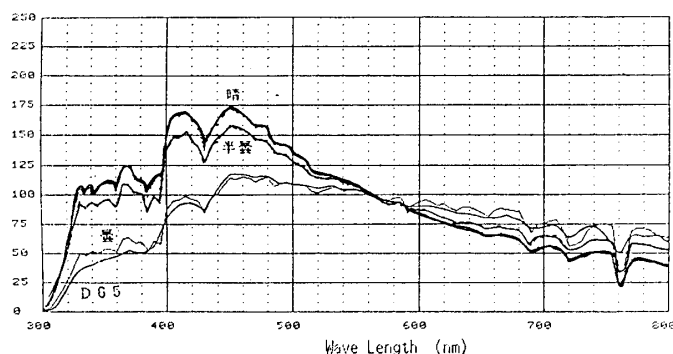


図6 天候別の分光分布（典型的な例を示す）

Y軸は相対感度 560nmの感度を100 %

で工芸大学の実測データを主成分分析した結果は次のように示される。主成分解析波長範囲は $300\text{nm} \sim 800\text{nm}$, 5nm Step である。第二固有ベクトルまでの累積寄与率は 98.3% となった。

$$S(\lambda) = S_0(\lambda) + M_1 S_1(\lambda) + M_2 S_2(\lambda)$$

$S(\lambda)$: 分光分布 $S_0(\lambda)$: 平均ベクトル

$S_1(\lambda), S_2(\lambda)$: 2つの固有ベクトル

M_1, M_2 はスカラー係数で波長には無関係である。図 9 に平均ベクトル, 第一, 第二固有ベクトルを示す。スカラー係数は次式で示す。

$$M_1 = \frac{-0.5524 + 0.0267x + 1.7779y}{0.0093 + 0.0710x - 0.2426y}$$

$$M_2 = \frac{-0.1187 - 24.4321x + 23.9648y}{0.0093 + 0.0710x - 0.2426y}$$

このようにして求められる任意色温度の分光分布の光源は, CIE 合成昼光と同じ手続きで統計的に定められた合成昼光であるので, TIP 合成昼光と呼称することができる。図 10 にこうして求めた TIP 合成昼光を示す。

各色温度での TIP 合成昼光の分光分布は CIE 昼光 (CIE 合成昼光の慣用) と比較すると, 可視域ではよく近似しているが, 750nm 付近では CIE 昼光の方が高く, 逆に紫外域では低くなっている。

可視条件等色指数 MI_{vis} および蛍光条件等色指数 MI_{uv} を用い, TIP 合成昼光を常用光源として評価した結果を図 11, 図 12 に示す。 uv 色度図において各等色温度線と CIE 昼光軌跡との交点座標を uv 偏差ゼロとした。座標の + は色度図で昼光軌跡から緑側, - は紫側方向とした。JIS での常用光源の評価等級区分に従うと, 可視条件等色指数は A 級または B 級となり, また蛍光条件等色指数は A 級から D 級の範囲であり, 表面色の視感比較用常用光源として用いても支障が無いと考えられる。

4.4 長期間測定の問題点

期間を定めても自然現象を毎日 1 時間毎に測定するのは, 困難なことが多々あった。

一番は故障で, 測定に立合っていれば不具合が

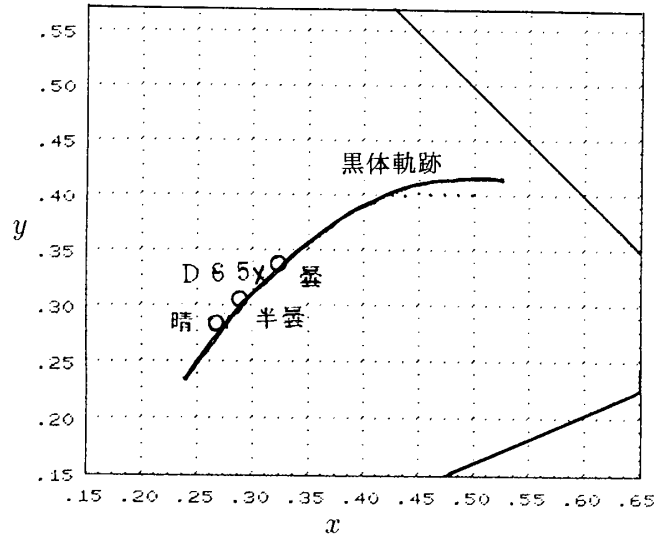


図 7 CIE xy 色度座標上の軌跡

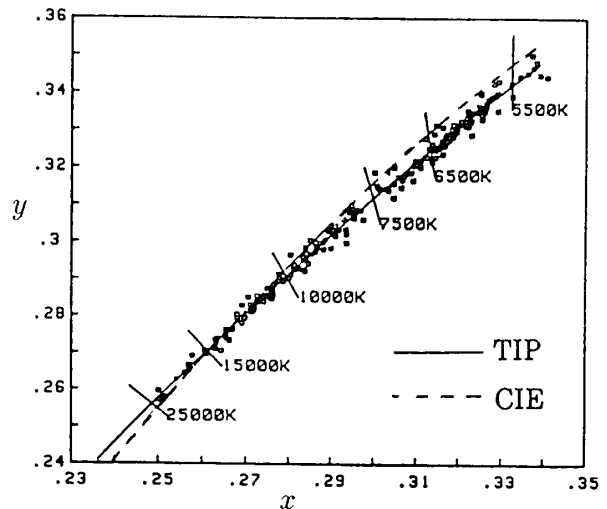


図 8 工芸大での CIE xy 色度座標の散布図と代表昼光軌跡

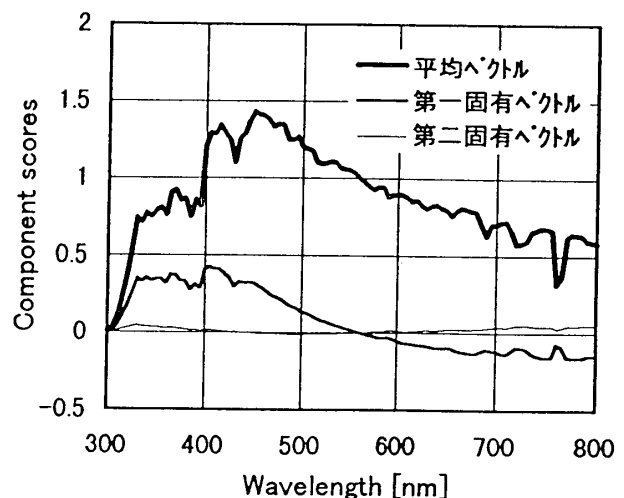


図 9 工芸大での平均ベクトルおよび第一, 第二固有ベクトル

直ちに判るが、無人であると気付かず無効なデータを収集することになる。修理に時間を要する場合は測定できない期間が続くので、装置をもう1台用意して故障に直ちに応じられるようにすべきである。心配された分光器は4年間にわたり調整のみで足りた。自製の機器の故障が多く、試作検討が不足していた。コントローラ関係はまったく故障が無かった。採光器は、直接外気に触れる石英ガラス窓の清掃が煩わしかった。ただし、見た目に汚れていても特性はそれほど低下せず1週間で全波長域で1~2%低下する程度である。

二番は観察する人の問題で、なまじ自動化してあるので、観察を怠りがちになり、空光の状態記録が不明となりデータ処理の時悩むことになる。雨上がりの時などは雨粒が採光器の窓に付着したままになっていたりする。自動的に測定毎にカメラで空を撮影してみたが、肉眼と異なり写真のみでは明確な判定は困難であった。昼光測定システムに対する興味関心が強固である必要がある。

5 まとめ

東京工芸大学において、厚木における北空昼光の分光分布を実測し、CIE 昼光の分光分布と比較した。

厚木における北空昼光の代表昼光軌跡は $y = -1.850x^2 + 2.101x - 0.1520$ で示され、その軌跡は約 14000K で CIE 昼光軌跡と交差し、低色温度では紫側、高色温度では緑側に偏位した。

分光分布は可視域では CIE 昼光とよく近似するが、紫外域では CIE 昼光よりやや低下する。

厚木における北空昼光を JIS による常用光源として評価の等級区分に従うと、可視条件等色指数は A 級または B 級となり、また蛍光条件等色指数は A 級から D 級の範囲であり、表面色の視感比較用常用光源として用いても支障が無いことが分かった。

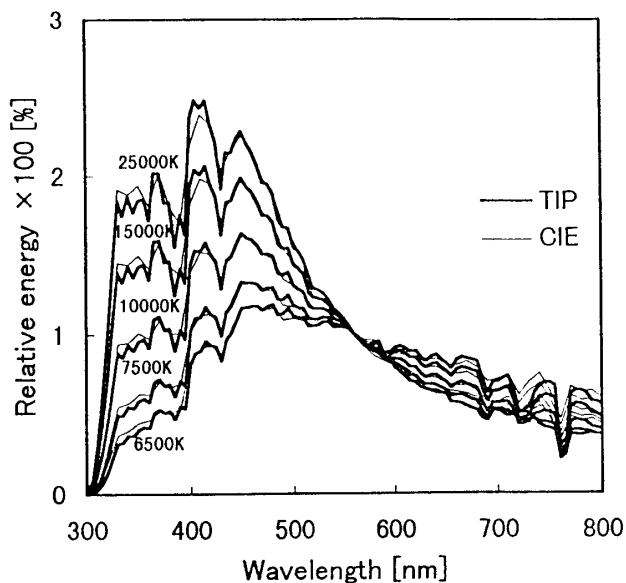


図 10 工芸大での合成昼光の分光分布

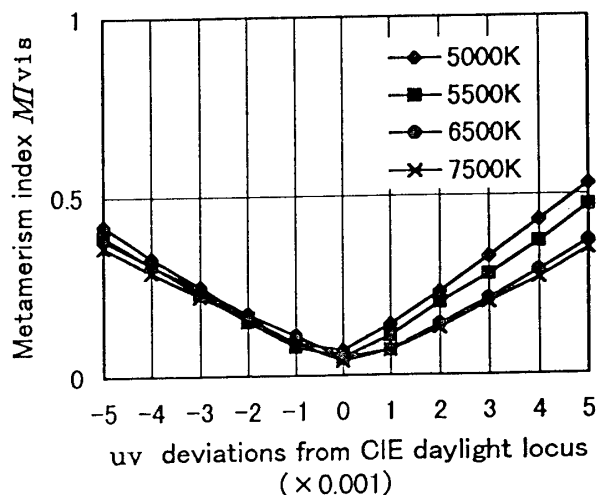


図 11 可視条件等色指数による TIP 合成昼光の評価

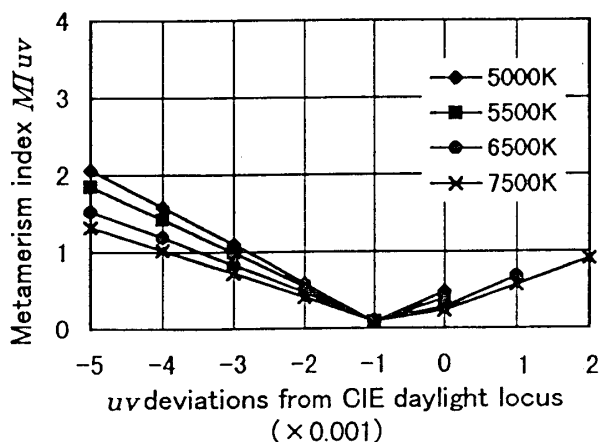


図 12 蛍光条件等色指数による TIP 合成昼光の評価

6 謝辞

諸事万端ご指導頂いた川上元郎本学名誉教授、長期間にわたり測定場所を提供賜り、便宜下された光工学科の畑田豊彦教授ならびに石川和夫講師、合成昼光の算出に尽力頂いた長岡工業高等専門学校的小林和久助教授、偏光に関して教えて頂いた基礎教養の川畑州一助教授に、また卒業研究生諸君に心からお礼申し上げます。

参考文献

- (1) D.B.Judd,D.L.MacAdam,G.Wyszecky:Spectral Distribution of Daylight as a Function of Correlated Color Temperature, J.Opt.Soc.Am. ,54, pp.1031-1040(1964)
- (2) 日谷正一, 栗岡豊, 湊秀幸: 尼崎における北空光の分光分布とその解析, 電子技術研究所彙報, Vol.37,No.8,P733(1973)
- (3) 昼光標準確立調査委員会: 昼光標準確立調査委員会報告 (1), 照学誌,54-3 (昭 45) 111
- (4) 昼光標準確立調査委員会: 昼光標準確立調査委員会報告 (2), 照学誌,54-4 (昭 45) 179
- (5) 峰松陽一, 山崎光広: 硫酸バリウムの絶対反射率の測定: 照学誌,69-2.PP.94-98(昭 60)
- (6) 小林和久, 池守隆夫, 川上元郎, 大熊良夫: 日本における合成昼光について, 日本色彩学会誌,Vol.20 ,SUPPLEMENT,PP.94-95(平 8)
- (7) 小林和久, 川上元郎, 大熊良夫, 池守隆夫: 厚木における北空昼光の分光分布, 照学誌,80-8A,PP.37-40(平 8)
- (8) JIS Z 8720-1983 付属書 常用光源の分光分布の評価方法
- (9) 照明学会編: 光の計測マニュアル (日本理工出版会, 東京,1990)