

# 照明学会研究調査報告書

人間の生理・行動に対する光放射の作用・効果に関する研究

人間の生理・行動に対する光放射の作用・効果に関する研究調査委員会

1999年3月

社団法人 照明学会

## 目 次

1. はじめに	1
2. 光放射とは	3
2.1 光の概念と定義	
2.2 光と光放射	
3. 光放射環境	8
3.1 自然界の光放射環境	
3.2 太陽放射と人工光源	
3.2.1 太陽放射と人体への影響	
3.2.2 人工光源の種類と特性	
4. 光放射と生体	24
4.1 光放射と目	
4.1.1 眼球の構造	
4.1.2 紫外放射による作用	
4.1.3 可視放射による作用	
4.1.4 赤外放射による作用	
4.1.5 眼の傷害に対する光放射の安全基準	
4.2 光放射と皮膚	29
4.2.1 UV-Bと皮膚	
4.2.2 UV-Aと皮膚	
4.2.3 可視放射と皮膚	
4.2.4 光放射と光過敏症	
4.2.5 UV-Bと光過敏症	
4.2.6 UV-Aと光過敏症	
4.2.7 可視放射と光過敏症	
4.2.8 光防御	
5. 光放射と生理	44
5.1 光放射環境と睡眠・覚醒リズム	
5.2 睡眠障害に対する光放射の応用	
5.3 光駆動について	
5.4 光と磁気とメラトニン	
6. 光放射の生理・生体面での新たなる応用	72
6.1 生体活性への光放射応用	
6.2 高照度光の産業界への応用	
6.3 オフィス空間の視環境による生理的効果	
6.4 生体計測への光放射応用	
7. 時間遺伝子	97
8. 光放射と成長および生殖	117
9. その他・新聞記事等	121
10. おわりに	135



## 1. はじめに

1999年度の電球類の生産高は、39億8400万個その生産額は実に4212億円に達した。1829年、トーマス・エジソンが発明した熱放射を利用した人工光源白熱電球は、今日では、ルミネセンスを利用した各種水銀放電ランプ、LEDランプ、レーザ、など極めて多種多様な光源へと発展しさらには従来の光源の概念を変えた、マイクロウェーブランプの開発も進められている。

これらの人工光源は、照明利用は勿論のこと一次、二次、三次産業の総ての分野で様々な用途に利用されているが、近年人工光源の著しい発達と広範な利用が人間のライフスタイルを変え、人間活動の昼夜の別をなくし、夜型ビジネスの拡大が急速に進むようになった。

そしてこれが現在では「光害」として、天文観測への支障や動植物などの生態系への影響、また、人にたいしても深夜勤務者への対応、TV放映に対する「光過敏症」など、様々な問題を投げかけるようになったのは周知の通りである。

古代ギリシャでは、太陽すなわち光は神であり、癒しの神殿ではスペクトルに分けられた光が治療の使われ、エジプト、ローマなどでも治療に光が利用されていたと言われる。

日光の治療効果が広く知られるようになったのは1880年代であり、1877年にはバクテリアに対する殺菌作用が、1890年代にはくる病の治療に、また1903年には、紫外放射を使った皮膚結核の治療によってニールス・フィンセンにノーベル賞が贈られている。

近年、光生物学、光生理医学、等の研究成果は著しいものがあるが、最近では精神医学に関連して睡眠・覚醒リズム障害、鬱病、老人の夜間徘徊にたいする高照度光療法が注目され、新たな展開が始まった。

とはいえ、光と生物の関係は未だ未知の分野が多い。今後はさらに生態系や人間生活に対して「光公害」を起こさない、健康的で質の高いかつ省力的な快適な光環境の探索と、創造技術の確率が一層求められるものと思われる。

この様な背景のもとに、照明学会では1996年「人間の生理・行動に対する光放射の作用・効果に関する研究調査委員会」を設置、12回の委員会を開催、各委員より次の課題について貴重な話題提供を頂くとともに、(財)電力中央研究所我孫子研究所、林原生物科学研究所の見学を行った。

本研究報告はその成果を取りまとめたものである。公私ともにご多忙のなか、快くご執筆いただいた先生方に、厚く御礼申し上げる次第である。

なお、本委員会の活動に積極的にご協力いただき、残念ながら1997年3月逝去された故佐藤愛子委員に、記して感謝と哀悼の意を表する次第である。

提供話題および提供者一覧（敬称略）

1. 光環境の基本要素である光について今改めて考える；河本康太郎

（東芝ライテック）

2. 光環境と人間の睡眠・覚醒リズム；小林敏孝（足利工業大学）
3. 人間の睡眠；小林敏孝（足利工業大学）
4. 睡眠障害に対する光の応用；大川匡子（国立精神・神経センター）
5. 光放射による生体透視イメージング；清水孝一（北海道大学）
6. 光と磁気とメラトニン；重光 司（電力中央研究所）
7. オフィスにおける視環境要素の生理的効果；佐藤仁人（東京電力）
8. 生体の活性度と光の影響について；森国 功（松下電工）
9. ポケモン騒動（一種のテンカン症状）と光の関与／光過敏症；  
小林敏孝（足利工業大学）
10. 時間遺伝子(Clock Gene)；山田眞裕（農水省 畜産試験場）
11. UV-A 防止効果の評価とPA表示；福田 實（資生堂）
12. 光駆動について；杉山貞夫（関西学院大学）
13. 高照度光システムの産業への応用；藤本順三（電力中央研究所）

「人間の生理・行動に対する光放射の作用・効果に関する研究調査委員会」

名 簿

委員長	蓑原 善和	（新日本気象海洋株式会社）
副委員長	河本康太郎	（（社）日本電球工業会）
幹事	菅沼 浩敏	（（財）電力中央研究所）
幹事	田澤 信二	（岩崎電気株式会社）
幹事	洞口 公俊	（松下電器産業株式会社）
委員	岩尾 憲三	（中部電力株式会社）
委員	大川 匡子	（国立精神・神経センター）
委員	小林 敏孝	（足利工業大学）
委員	阪口 敏彦	（松下電工株式会社）
委員	（故）佐藤 愛子	（浜松行動科学研究所）
委員	佐藤 仁人	（東京電力株式会社）
委員	重吉 竜哉	（株）H+Bライフサイエンス）
委員	清水 孝一	（北海道大学）
委員	杉山 貞夫	（関西学院大学・ハワイ大学）
委員	福田 實	（株）資生堂）
委員	藤本 順三	（（財）電力中央研究所）
委員	山田 眞裕	（農水省 畜産試験場）
委員	渡貫 美衣	（株）マルトキ）
委員	篠原 章	（（社）照明学会）
事務局	中村 三七雄	（（社）照明学会）

なお、途中退任の委員は安西 良矩（三菱電機）、星野 康之、  
野上 三郎（株）林原）の三氏である。

（蓑原善和）

## 2. 光放射とは（光放射の概念と定義）

### 2.1 光の概念と定義

旧約聖書に出てくる“始めに‘光’ありき。”は、地球上に出現した人類が、そこに既に存在していた“光”を初めて知覚した時の言葉として理解されている。したがって、“光”（我々人類の先人が“光”と呼んだもの）の概念と定義は、この時の言葉の実体と知覚システムとが密接に関連してくる。

この時、人類が“光”と呼んだものの実体は、いうまでもなく太陽からの“光”であり、またそれを知覚した人類の知覚器官は、視器官（眼）である。そして、その後これらの詳細について、人類の進歩・発展と共に研究が進み、太陽からの“光”とは、電磁波の様態をしたエネルギーであること、および人間の視器官の機能や特性が解明され、人間の眼は、電磁波のエネルギーの一部の波長域しか知覚しないことなどが明らかにされ、“光”の物理的実体とそれを特定する概念が明確になってきた。

### 2.2 光と光放射

前項で述べた、人類が視器官により知覚・認識した実体に対して使用された用語“光”がそのまま論文や専門書などにも使用されるようになってきたため、専門用語として明確に（専門的に）定義することが必要となり、例えば I E C 国際用語集などにより定義が（国際的に）標準化された。ただし、前項で述べたような知覚・認識の経過があるため、いろいろな意見があり、いろいろな用語集において、必ずしも一元化された定義となっていない。例えば前記の I E C 国際用語集では、“光”の定義は 2 義、日本の（社）電気学会によりまとめられた電気専門用語集では、3 義となっている。特に“光”を専門的に特定するために必要な“光”の波長域が必ずしも一本化されていない。

これは、専門用語としては不十分であるので、“光”とは別に、光と密接に関連している波長域の電磁波を特定する専門用語として、“紫外放射”“可視放射”“赤外放射”などが提唱され、標準化されてきている。図 2.2.1 に、これら各種専門用語の概略の区分波長と電磁波全体との関連を示す。図 2.2.1 には、“紫外放射”“可視放射”“赤外放射”以外の区分域の電磁波についても合わせて示してある。この中の“可視放射”というのが、人間の視器官が知覚する波長域の放射（電磁波）のことである。ただし、“人間が知覚するかどうか。”を特定するための基準としたのであるが、人間の知覚能力には個人差があり、人によって知覚する波長域が異なることなどにより、境界となる波長が 1 波長に特定されていない。（表 2.2.1 参照。）

本研究調査委員会では、人間の“光”に対する受容器官を視器官に限定しなかったことと、地球上の光環境における生理・行動という視点をとったため、対象とする放射（電磁波）の波長域を“可視放射”に限らず、“紫外放射”“赤外放射”を含めた広い波長域の放射とした。この“紫外放射”“可視放射”“赤外放射”の 3 波長域の放射を総称する専門用語が“光放射”である（表 2.2.1）。委員会の名称を“人間の生理・行動に対する光放射の作用効果研究調査委員会”としたのはこの理由による。表 2.2.1 に上記の電気専門用語集に採択されている関連の専門用語の定義を示す。

既に述べたように、表 2.2.1 では、“光”は 3 義となっているが、専門用語として定義

する以上、1語1義であるべきであり、“光”については、前項で述べた人類の先人達の知覚・認識の経過から、次の定義が妥当であるというのが筆者の意見である。

表 2.2.2 “光”の定義の一案

番 号	用 語	英 語	定 義
	光	light	要素として可視放射を含む複合または単色の光放射

なお、表2.2.1 に明らかなように、専門用語では、例えば紫外域の光放射については、“紫外線”ではなく、“紫外放射”となっている。これは、図2.2.1 に示したように、電磁波を区分する接尾語が、かつては短波長側から“ray (線)” – “wave (波)”の2区分であったのが、科学・技術の発展に伴い、“ray (線)” – “radiation (放射)” – “wave (波)”と3区分になり、光に関連する波長域の放射に対しては、接尾語が“ray (線)”から“radiation (放射)”に変更されたためである。

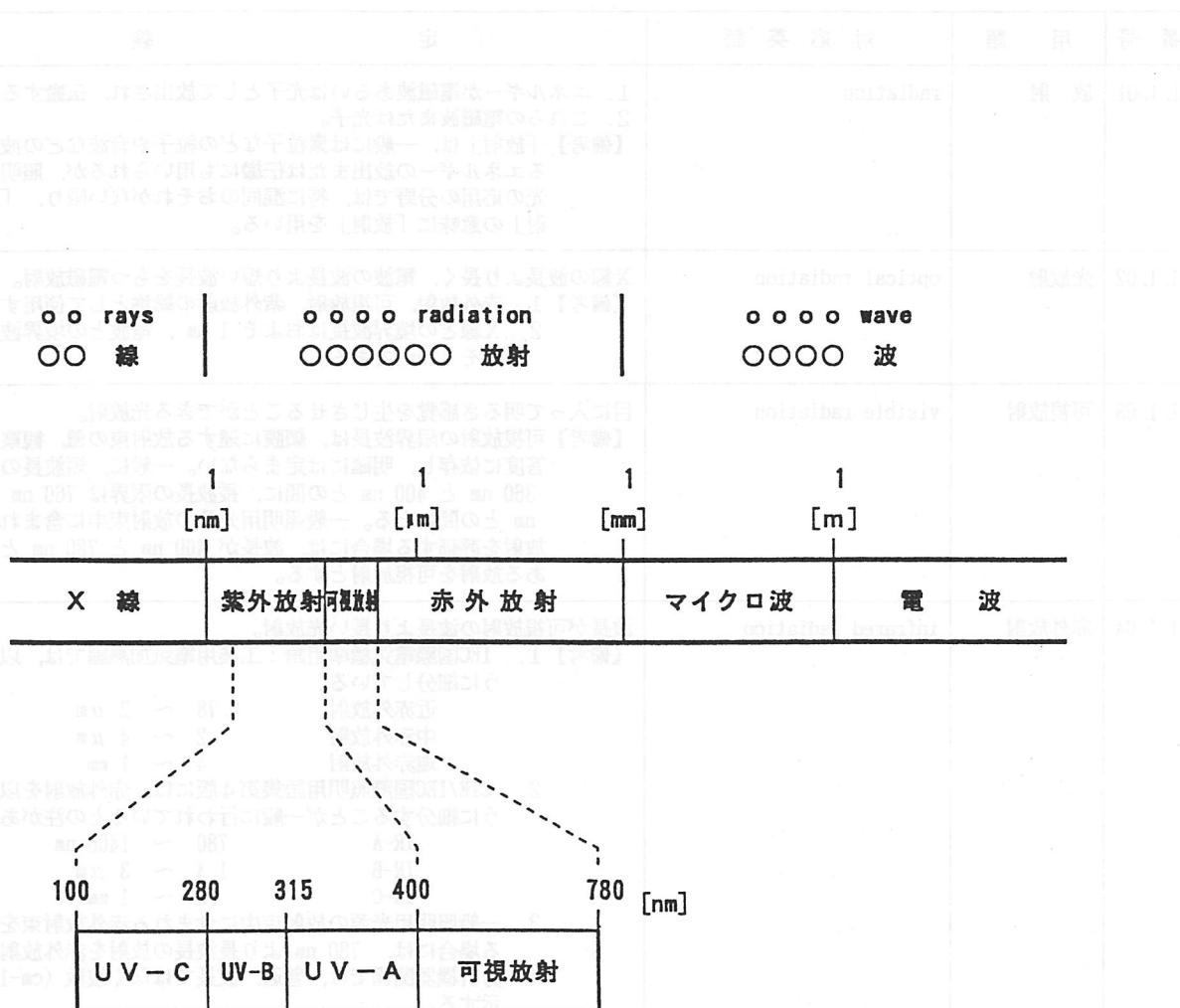
日本では、この経緯が充分理解されないで、日常用語としては、今だに“紫外線”が良く使用されている。本報告書は、照明学会の研究調査報告書であるから、当然専門用語を使用すべきであり、したがって“紫外放射”が使用される。

(河本康太郎)

#### 参考文献

- (1) IEC Publication No.841 : International Electrotechnical Vocabulary, Chapter 45: Lighting 4<sup>th</sup> Edition (1987)
- (2) 電気学会：電気専門用語集, No.13 照明, 改訂版, コロナ社 (平 8)
- (3) IESNA Lighting Handbook 8<sup>th</sup> Edition, (1991)
- (4) JIS Z 8113 : 照明用語 (改正中) (平11発行予定)

(注) 電磁波の波長によって、上図のように区分する集合の名称を、波長の短い方から、



(注)

電磁波の波長によって、上図のように区分する集合の名称を、波長の短い方から、

rays (線) — radiation (放射) — wave (波)

としている。

図2.2.1 電磁波 (放射) の波長区分と区分名称

表2.2.1 光と光放射に関連する専門用語の定義

[電気学会 電気専門用語集 No.13「照明」改正版(一部修正)]

番号	用語	対応英語	定義
1.1.01	放射	radiation	1. エネルギーが電磁波あるいは光子として放出され、伝搬すること。 2. これらの電磁波または光子。 【備考】「放射」は、一般には素粒子などの粒子や音波などの波動によるエネルギーの放出または伝搬にも用いられるが、照明および光の応用の分野では、特に混同のおそれがない限り、「電磁放射」の意味に「放射」を用いる。
1.1.02	光放射	optical radiation	X線の波長より長く、電波の波長より短い波長をもつ電磁放射。 【備考】1. 赤外放射、可視放射、紫外放射の総称として使用する。 2. X線との境界波長はおよそ1 nm、電波との境界波長はおよそ1 mmである。
1.1.03	可視放射	visible radiation	目に入って明るさ感覚を生じさせることができる光放射。 【備考】可視放射の限界波長は、網膜に達する放射束の量、観察者の応答度に依存し、明確には定まらない。一般に、短波長の限界は360 nmと400 nmとの間に、長波長の限界は760 nmと830 nmとの間にとる。一般照明用光源の放射束中に含まれる可視放射を評価する場合には、波長が400 nmと780 nmとの間にある放射を可視放射とする。
1.1.04	赤外放射	infrared radiation	波長が可視放射の波長より長い光放射。 【備考】1. IEC国際電気標準用語：工業用電気加熱編では、以下のよう に細分している。 近赤外放射 0.78 ~ 2 μm 中赤外放射 2 ~ 4 μm 遠赤外放射 4 ~ 1 mm 2. CIE/IEC国際照明用語集第4版には、赤外放射を以下の ように細分することが一般に行われているとの注がある。 IR-A 780 ~ 1400 nm IR-B 1.4 ~ 3 μm IR-C 3 ~ 1 mm 3. 一般照明用光源の放射束中に含まれる赤外放射束を評価 する場合には、780 nmより長波長の放射を赤外放射とする。 4. 分析機器関係では、普通、波長ではなく波数 (cm <sup>-1</sup> ) で表 示する。
1.1.05	紫外放射	ultraviolet radiation	波長が可視放射の波長より短い光放射。 【備考】1. CIE/IEC国際照明用語集第4版には、紫外放射を以下の ように細分することが一般に行われているとの注がある。 UV-A 315 ~ 400 nm UV-B 280 ~ 315 nm UV-C 100 ~ 280 nm 2. 一般照明用光源の放射束中に含まれる紫外放射束を評価 する場合には、400 nmより短波長の放射を紫外放射とする。
1.1.06	光	light	1. 視覚系に生じる明るさ及び色の知覚・感覚。 2. 光放射を標準分光視感効果度で評価したもの。 3. 可視放射。 【備考】日本では光放射のことを光ということもある。光放射につい ては、1.1.02参照。
1.1.07	光子	photon	放射エネルギーの素量。 【備考】振動数νの放射は、エネルギー hν、運動量の大きさ hν/c を持つ光子の集団である。ここに、hはプランク定数、cは光 速度である。

表2.2.1 光と光放射に関連する専門用語の定義（つづき）

〔電気学会 電気専門用語集 No.13「照明」改正版（一部修正）〕

番号	用語	対応英語	定義
5.1.01	光源	light source	電氣的又は他のエネルギーを変換して、光を発生する機能をもつもの。
6.1.01	照明	lighting; illumination	光を人間生活に役立たせることを目的として、 (1) 情景、視対象物とその周辺をよく見えるように照らす光の応用。 (2) 人の感情に訴え、気分をよくするように照らす光の応用。 (3) 視覚信号によって情報を伝達する光の応用。 (4) 可視放射だけでなく、紫外放射及び赤外放射を含むそれらの応用。 【備考】(1)～(3)は人間の視覚に関係するが、(4)は人間の視覚以外の生物、工業製品などを対象とすることで区別される。 CIE/IEC国際照明用語集では(1)の意味だけの定義を付けている。
6.1.02	照明工学 《照明技術》	illuminating engineering; lighting technology	放射と電気との相互変換並びに照明を扱う科学技術の分野の体系。
6.1.03	光環境	lighted environment	人間を取り巻く外界の物理的な側面の中で、200～5000 nm の光放射に着目し、放射の波長、照射される空間の形や大きさおよび空間を制限する面の反射率などで定まるもの。この定義によれば、可視放射・紫外放射・赤外放射が含まれ、また考察の対象は人工的に形成されたものばかりではなく、自然界の光放射も含まれる。 【備考】建築環境工学の分野では、この用語がよく使われている。
6.1.04	照明環境	luminous environment	光環境の中で、特にある目的を達成するために構築された人工的な光環境を指す。これには、人工照明施設、工業用・農業用・医療用などの光放射設備も含まれる。 【備考】CIE/IEC国際照明用語集に選定されており、その定義は「生理的および心理的效果に関連して考慮された照明」である（日本照明委員会訳・国際照明用語集第4版による）。
6.1.05	視環境	visual environment	人間がある光環境に置かれたとき、視覚を通じて大脳レベルで描写される空間ならびに種々の物体などの外界の環境。
8.1.23	光放射応用工学	applied engineering of optical radiation	光放射の作用を利用した各種の効果（化学的、生物的など）を、社会的に活用することを研究し、実用しようとする学問分野。
8.2.01	光効果	photoeffect	光が物質や生物、生体に作用して生じる物理的、化学的、生物的变化。 【備考】この場合、光をエネルギー源として取り扱う場合と、情報源として取り扱う場合がある。
8.2.02	光作用	photo action	物質や生物、生体に物理的、化学的、生物的变化を生じる光放射の効力の過程。
8.2.03	光反応	photoreaction	物質や生物、生体における光エネルギーの変換の様態。

### 3. 光放射環境

#### 3.1 自然界の光放射環境

##### (1) 地球上の光環境

人類がこの地球に出現したのは、およそ数 100 万年前といわれている。一方、現在の地球上の人間の光環境における最大の環境要素である太陽が誕生したのは約 50 億年前である。したがって人類が地球に出現した時には、この地球の周辺では現在とほぼ同等の、太陽による光環境が形成されていたことになる。即ち前項で述べたように、“始めに光があった” 訳である。そして人類はその出現以来、太陽によって形成される光環境の諸要素（始めにあった光）に好むと好まざるとに関わらず順応してきたことになる。

この光環境を地球上の一点で見ると、光の照射条件は、太陽と地球の相対位置関係により（地球の場所によって若干異なってはいるが）きわめて規則的かつ周期的に変化している。昼と夜の交替はその代表的な例である。このため、人類が出現した時の地球上の光環境には、昼間は余るほど十分な量の環境要素としての光が存在するが、夜は反対に、あったとしてもごく僅かな量の月の光や星の光だけで、とても“光” 環境とは呼ぶことができない状況であった。

いうまでも無く、光は人間にとって重要な環境要素である。これは、ひとつには、地球における全ての植物や動物の生活のためのエネルギーのほとんど全てが、太陽から光の形態のエネルギーによって供給されているということがある。

光が重要である今一つの理由は、光が人間の視覚支援の媒体となっていることである。人間は、生活し生命を維持していくための周辺からの情報の 80 % 以上を、五感の中の視覚を通じて入手している。そして、光は人間の視覚を支援するための重要な媒体となっている。したがって、視覚支援の媒体としての光は、視覚がいろいろな感覚の中で最も重要な感覚であることと相俟って、人間の生活環境において最も重要な環境要素となってくるのは当然である。即ち、環境に光が無ければ人間は満足に生活を送ることができない。このことは、例えば月も星も出ていない真夜中の深山の奥を体験してみればよく理解することができる。そのような状況では、一步を歩くことすら困難極まりないことになる。

したがって人類は、その出現以来の大部分の期間（およそ 3000 年前位までは）日の出と共に起きて昼間に活動して、夜が来ると休む、という生活をしていたものと考えられる。たまたま、満月の夜などに多少は活動していたであろうか？

そして、前に上げた深山の真夜中の暗闇においても、蠟燭や懐中電灯のようなごく小さな光でも、光があればその重要性を充分理解できることから明らかなように、夜の闇における光への希求は非常に強かったであろうと想像される。この希求を具現したものが人工光源であることはいうまでもない。

現在では、良く知られているように、数多くの種類の人工光源が身近に使用されており、特に日本の都会のようなところでは、人工光による照度も上がり、夜になっても照明が暗くて困るようなことはまず無くなった。それどころか、夜間の人工照明のお陰で、生活のパターンが夜にシフトし過ぎ、本来の昼間の活動性が低下したり、夜間照明が明るくなり過ぎて、種々の問題が生じているケースも指摘されている。

##### (2) 自然界の光放射環境の状況

前項までのところで述べたように、自然界の光放射環境の主要構成要素は太陽からの光である。太陽は宇宙における恒星のひとつであり、核融合反応により核エネルギーを熱エネルギーに変換し、その熱エネルギーを更に放射エネルギーとして宇宙空間に放出している。光源（光放射源）としての太陽の特性は、表3.1.1 に示す通りである。

表 3.1.1 光放射源としての太陽の諸特性

項 目	特 性 値
全放射束 [W]	$3.887 \times 10^{26}$
全 光 束 [lm]	$3.762 \times 10^{28}$
相関色温度 [K]	6430
色 度 (x, y)	(0.314, 0.330)
光 度 [cd]	$2.994 \times 10^{27}$
輝 度 [ $\text{cd}/\text{m}^2$ ]	$1.967 \times 10^9$
半 径 [m]	$6.960 \times 10^8$
地球との平均距離 [m]	$1.496 \times 10^{11}$
地球位置での放線照度 (大気外) [lx]	$1.338 \times 10^5$
全 上 放射照度 [ $\text{W}/\text{m}^2$ ]	$1.370 \times 10^3$

太陽は、放射源としては、億年単位で安定したエネルギーを放出しているが、これを地球上から見ると、地球は太陽の回りを自・公転しているので、前項で述べたように、太陽と地球との相対位置の変化、大気特性、天候・気象条件などによって地球上のある地点での光特性は種々に変動する。例えば、東京を例にとると、照度は真夏の晴天時の正午頃の：120,000 [lx] から、新月の時の真夜中のほほ：0 [lx] まで変動するし、相関色温度についていうと、晴天時には、およそ：5800 [K] であるが、曇天時には、相関色温度が晴天時に比べて高くなる。これらの変化の具体的状況を、図3.1.1 から図3.1.4 に示す。

### (3) 自然光源と人工光源の比較

前項までに記述してきたように、地球上の人類の光環境における光源としては、長い間の太陽を主とし、一部夜の月や星などを含む光源（自然光源）だけの時代を経て、現在の、特に夜が見違えるばかりに彩られる人工光源を併用する時代へと変ってきた。そして、人工光源により、夜が明るくなるにつれて、人間が自然光源だけで無く、人工光源からの光の照射を受ける機会も増加し、照射される量も増加してきた。その結果として、とにかく人工の光があればそれだけでありがたかった時代から、人工光源からの光の質に対する要求が強く出されるようになってきた。そこで、太陽を主とする自然光源と、電球、蛍光灯、HIDランプによって代表される各種の人工光源について、関連の諸特性を比較して見た。結果を表3.1.2 に示す。この表を見ると、やはり自然光源と人工光源には非常に違った点があり、最近の光環境の質的議論において、そのことが大きな話題になっている。以下にこの比較表の中から、1～2 の特性について、特に、最近の新しい問題点について述べて見たい。

#### (4) 光の照射リズムに関連する諸問題

地球上の光環境における人工光源と自然光源の決定的違いのひとつは、表3.1.2 に示したように（マクロに見て）自然光源の照射条件は変化するのに、人工光源の照射条件は、変化しない点である。前節までに述べてきたように、自然光源の照射条件は、地球と太陽との相対位置関係によって、実に規則正しく周期的に変化している。（この背景には、既に述べたように、光源としての太陽の放射特性〔大気圏外での特性〕が極めて安定していることがある。太陽が実に億年単位で、安定した放射特性を保持していること、すなわち地球に対して極めて安定した一定の放射エネルギーを供給してくれていること、は良く考えて見ると実に驚異的な事である。この理由については、本研究調査報告書の内容を逸脱するので、ここでは触れないこととする。別の機会にしたい。）そしてこの周期的変化のリズムに長年（何世代にも亘って）順応した結果、人間を始めとするこの地球上の植物・動物の生活リズムが形成されてきた。ところが、一方人工光源は、日常生活において一旦設備されると、原則的には（多少の on-off 以外は）照射条件は変化しない。そのため、人工光源による照射を受ける機会が増加し、人工光源の照射量が多くなると、本来の（長年の自然光源との関連で形成された）リズムが乱され、いろいろと影響が出てくることになる。この影響の具体例については、本報告書の他の章に詳細に記述されている。

#### (5) 光のマイクロな変化

前項で人工光源からの光の照射条件は、一旦設定するとマクロには変化しない、と記述したが、実は表3.1.2 に示したように、大半の人工光源の照射条件はマイクロには、実に規則的・周期的に変化している。この理由は世界中で大半の人工光源を点灯するために配電されている電力が 50 Hz または 60 Hz の交流であることに起因している。実は、エジソンが白熱電球の点灯のために開発した配電システムの場合の電力は、210 V の直流であった。この直流配電が現在の交流配電になるについては、複雑な経緯があったが、結果的な理由としては以下のように考えられている。即ち、配電線路内の電力損失は、電圧の 2 乗に逆比例するから、大電力を効率良く送るには電圧を高くした方が良く、ところが直流は簡単に電圧を上昇させる装置が無いのに対して、交流の場合は変圧器があり、簡単に昇圧することができるからである。そして、時代の推移と共に直流配電システムは姿を消し、50 Hz または 60 Hz の交流配電システムが主流となってしまった。

したがって、現在広く使用されている人工光源である白熱電球、蛍光灯、HID ランプなどは、一部の、例えば高周波に変換して点灯するような回路を除いては、点灯中に放射される光は 100 Hz または 120 Hz の周波数で脈動していることになる。

この脈動が人間や動・植物にどのような影響を与えるかは、未だ充分明らかにされていない。余り影響が無いという見解もある。実際に、現在はその影響の結果と思われる現象は具体的に確認できていない。ただし、現在影響が現れていないから、大丈夫であると断言するのは早計である。何世代かを経た後に影響が現れる可能性もあるからである。電気による人工光源が地球の光環境に登場してから、高々 100 年 — 3 世代である。3 世代は影響が現れるには短すぎるという意見もある。

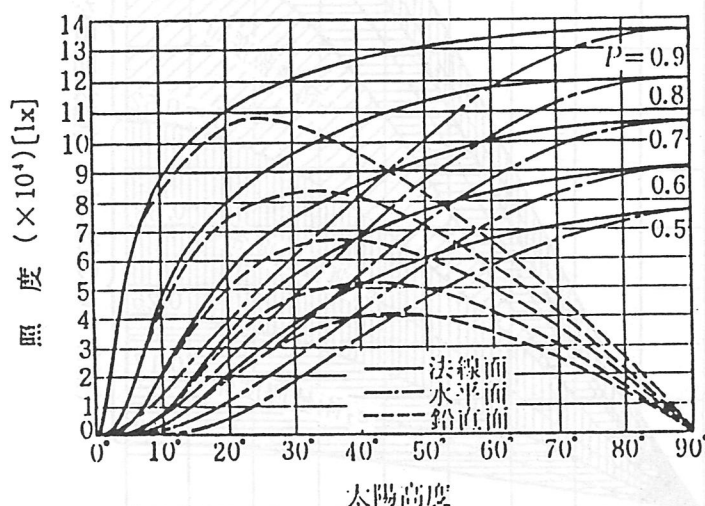
（河本康太郎）

参考文献

- (1) 週刊朝日百科 日本の歴史 34 - 原始・古代 (1)宇宙と人類の誕生、朝日新聞社 (昭61)
- (2) (社) 日本電球工業会・編：日本電球工業史 (昭38)
- (3) 柳田 国男：火の昔、實業之日本社 (昭19)
- (4) 照明学会誌「光環境の基本要素である光について今改めて考える」特集号、Vol.80, No. 1 (平 8)
- (5) 照明学会編：新編・照明のデータブック、オーム社 (昭43)

表3.1.2 光環境要素としての自然光源（太陽）と人工光源の比較

区分	光色の変動	分光分布	光量の時間的変動		光の空間分布の変動
			マクロな変動	ミクロな変動	
太陽	大気圏外	○連続スペクトル	○億年単位で安定。	○不規則な微小変動はあるが概ね安定。	○億年単位で安定。
	地球上	○連続スペクトル（大気の吸収などにより、大気圏外とは異なる）	○太陽と地球の相対位置により、周期的に（日周期と年周期）変動。 ○天候、気象条件により、変動。 [変動範囲] 0~130000 [lx]	○不規則な微小変動はあるが、ミリ秒単位では安定。	○天候、気象条件、太陽と地球の相対位置などにより変動。
人工光源	○光源の種類によって異なるが、同じ光源については使用中の変動はほとんど無い。	○連続スペクトルの他に、線スペクトル、狭帯域発光の組合せなどがある。	○使用中にゆるやかに（数1000時間単位で）減衰。	○100 Hzまたは120 Hzで脈動（商用交流電源の場合）。	○組合せる照明器具の空間分布そのものは異なるが、同じ光源・器具については、使用中変動はほとんど無い。



P : 大気の透過率

図3.1.1 地球表面における太陽直射光の照度

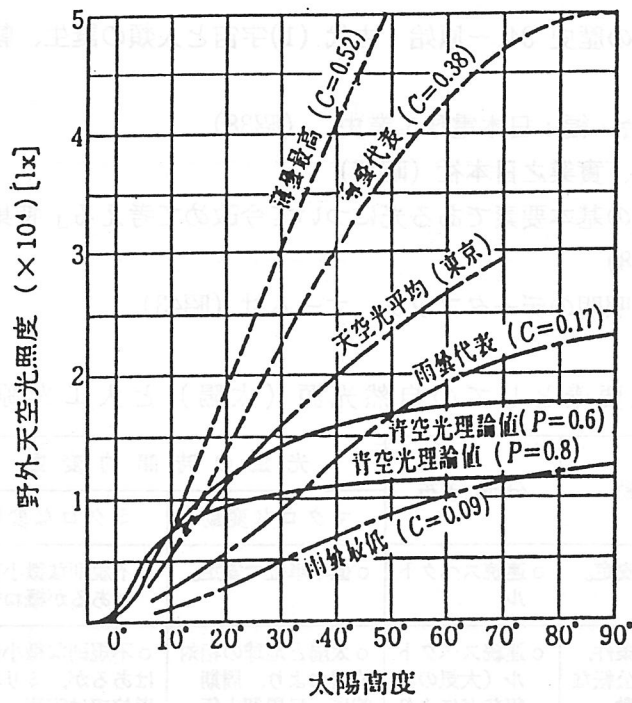


図3.1.2 地球表面における天空光の照度

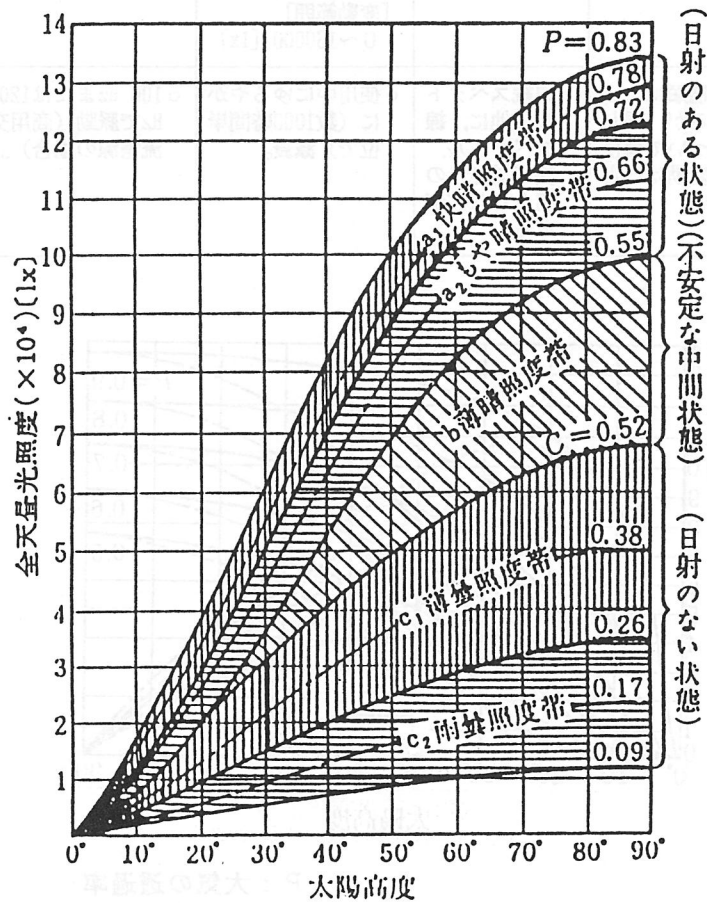
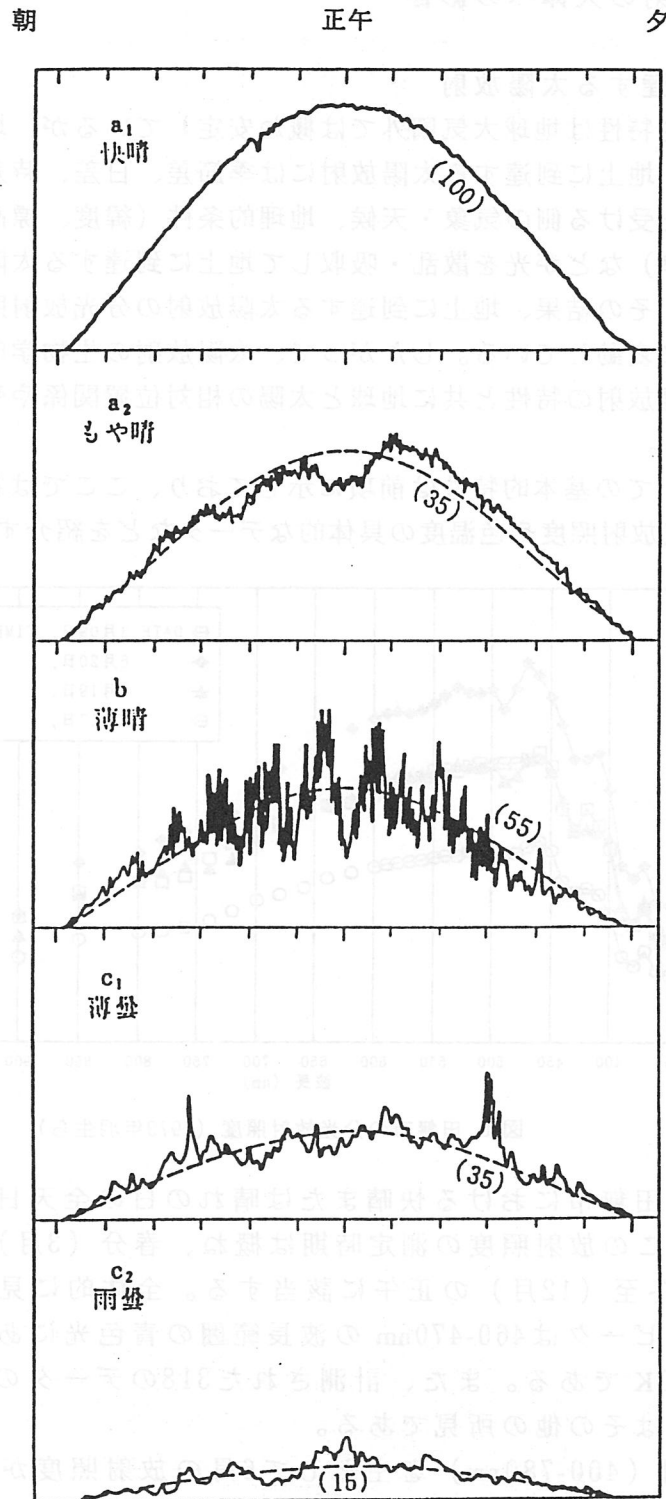


図3.1.3 地球表面における全天昼光照度



点線は正規変化曲線  
 数値は標準快晴に対する照度比

図3.1.4 地球表面における天候及び時間帯による全天昼光照度の変動の状況

### 3.2 太陽放射と人工光源

#### 3.2.1 太陽放射の人体への影響

##### (1) 地上に到達する太陽放射

太陽放射の放射特性は地球大気圏外では概ね安定しているが、地球と太陽の相対位置関係により、地上に到達する太陽放射には季節差、日差、時差などがある。さらに、太陽放射を受ける側の気象・天候、地理的条件（緯度、標高など）、環境条件（地上の反射率）などが光を散乱・吸収して地上に到達する太陽放射の放射特性に影響を及ぼす。その結果、地上に到達する太陽放射の分光放射照度や相関色温度などの特性は常に変動している。したがって、太陽放射の生物学的作用・効果を考えるときは、太陽放射の特性と共に地球と太陽の相対位置関係や受光側の条件も考慮する必要がある。

太陽放射についての基本的特性は前項に示しており、ここでは特に地上に到達する太陽放射の分光放射照度や色温度の具体的なデータなどを紹介する。

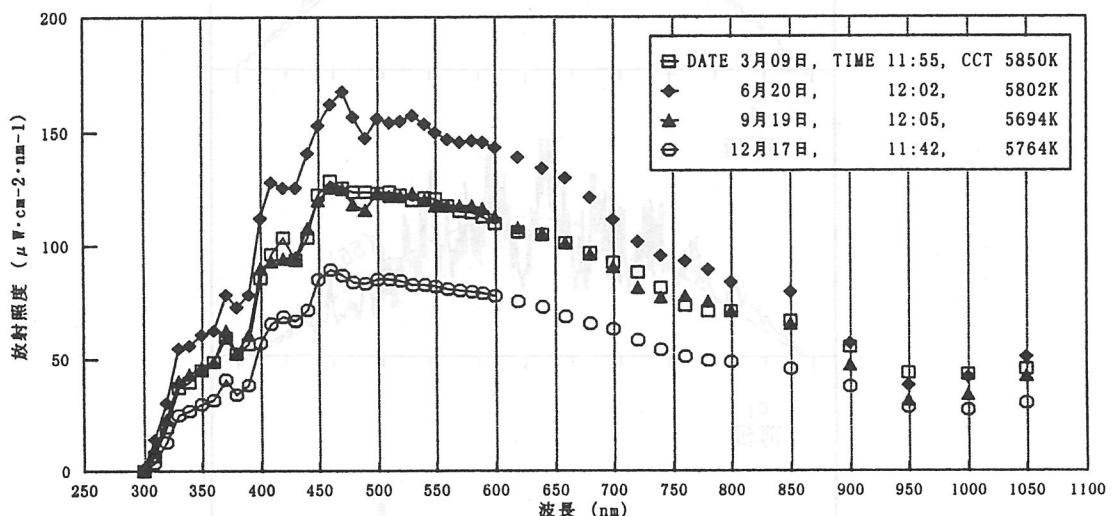


図1 田無市の分光放射照度 (1979年羽生ら)

図1は東京・田無市における快晴または晴れの日全天日射の分光放射照度分布を示す。この放射照度の測定時期は概ね、春分（3月）、夏至（6月）、秋分（9月）、冬至（12月）の正午に該当する。全体的に見ると、四季を通じて放射照度のピークは460-470nmの波長範囲の青色光にあり、相関色温度の平均は約5780Kである。また、計測された318のデータの平均値は5720Kであった。以下はその他の所見である。

(a) 可視放射（400-780nm）を主として6月の放射照度が一番強く、次いで3月と9月が同程度の強さであり、12月が一番弱い。6月の可視放射は12月の約1.5～2倍の放射照度を示している。

(b) 6月のUV-A（315-400nm）の放射照度は12月の約2倍になっており、UV-B（280-315nm、図1では300-315nm）は約3倍になっている。

(c) IR-A (780-1400nm, 図1では780-1050nm) の場合は、6月の放射照度が最高となる割合が多いが、900nm より長い波長では3月が最高となることもある。

(d) 3月と9月の放射照度は紫外域から可視域にかけて極めて近似している。四季を通じた可視放射の放射照度の変動の差に比べ、紫外放射や赤外放射の変動の差は小さい。

これらの所見により、田無近辺の地表に到達する太陽放射の相関色温度は約5780K 前後であり、紫外放射と可視放射のエネルギー量は夏に最高となり、冬に最低となると言える。また、紫外放射と赤外放射の季節的変動の範囲は可視放射の季節的変動の範囲よりも小さいと言える。これは、紫外放射や赤外放射が可視放射よりも大気中で吸収されやすいことに起因していると思われる。表1は自然光の相関色温度を示しており、屋外の昼光では晴天の平均で、5500K、曇天の平均で6500Kとしている。さらに、表2は月別、時間帯別の相関色温度を示しており、5000K～20000Kまでの幅広い変動があることを示している。

表1 自然光の相関色温度<sup>2)</sup>

自然光の状況		色温度 (K)
太陽光の平均	日の出	1,900
	日の出後1時間	3,500
	日の出後2時間	4,400
	正午	5,400
屋外の昼光	晴天の平均*	5,500
	曇天の平均	6,500
屋内の昼光**	晴天の最高	30,000
	晴天の平均	10,000
	晴天の最低	6,000
	曇天の最高	10,000
	曇天の平均	6,500
	曇天の最低	5,000

\*太陽放射と天空光の和、\*\*窓から入る天空光

表2 自然光の月別・時間帯別相関色温度<sup>3)</sup>

天空の状態			色温度 (K)		
			12月、1月 11月、10月	2月、3月 9月、8月	4月、5月 7月、6月
晴 天	直射光	9時～15時	5,500	5,700	5,800
		9時前、15時後	5,000	5,300	5,500
	太陽光+ 晴天光	9時～15時	6,100	6,300	6,500
		9時前、15時後	5,800	6,000	6,200
曇 天	微曇天光		5,700	5,800	5,900
	25～75%曇天光		6,300	6,500	6,600
	100%曇天光		6,700	6,750	6,800
もや、煙空 晴天光			8,000	7,900	7,800
			12,000	14,000	20,000

## (2) 光放射の人体に対する作用・効果

光放射の人体に対する作用・効果と関連放射源の概略を表3に示す。

表3 光放射の人体に対する作用・効果（文献4より引用改変）

波長 nm	区 分	作用・効果	関連光放射源
100～  280	UV-C	紫外性眼炎 (角膜炎、結膜炎)	太陽放射 (大気圏外) 殺菌ランプ 水素放電ランプ 多金属入カーボン・アークランプ キセノン放電ランプ 短波長殺菌ランプ 石英低圧水銀ランプ
280～ 315	UV-B	紅斑作用 第2色素沈着作用	健康線用蛍光ランプ カーボン・アークランプ 光化学用水銀ランプ
315前後	UV-A, UV-B	ビタミンD生成	
315～ 400	UV-A	色素沈着作用	高圧水銀ランプ ブラックライト蛍光ランプ
400～  780	可視放射	青色光網膜障害 新生児ビリルビン血清治療 メラニンホルモン制御	シアノ複写用蛍光ランプ 青色蛍光ランプ 白色蛍光ランプ HID ランプ キセノンランプ
780～ 1400	IR-A	人体への温熱効果	赤外線電球 白熱電球 (ガス入り) ジルコニウム放電灯
1400～3000	IR-B	やけど	固体レーザー

## (3) ビタミンDの生成

人間や動物の体内、特に皮膚などには7-デヒドロコレステロール（プロビタミンD<sub>3</sub>）という物質が存在する。これは体内で合成されたある種の脂質で、紫外放射を受けると化学構造が変化してコレカルシフェロール（ビタミンD<sub>3</sub>）という物質に変換される。一方、シイタケなどの中にはエルゴステロール（プロビタミンD<sub>2</sub>）という物質が存在する。この物質も、紫外放射を受けるとエルゴカルシフェロール（ビタミンD<sub>2</sub>）に変換される。プロビタミンとはビタミンの前駆体で、ビタミンに変換されなければその働きを発揮できないものである。したがって、ビタミンDが動物の体内で作用するには、紫外放射が必要になる。

ビタミンDは動物の体内でカルシウムとリンの代謝を調節している。体内でカルシウムとリンのバランスが崩れたり不足したりすると、くる病や骨粗鬆症などの原因となる。したがって、人間や動物は常に適量のプロビタミンDが体内で生成され、または食物として摂取され、太陽放射中の紫外放射によりビタミンDに変換され、正常な骨代謝などが維持されている。

図2は白色蛍光ランプと自然光の分光分布を模擬した蛍光ランプの照明下

で比較した健康な高齢者（男性）のカルシウム吸収率であり、図3はこれらの蛍光ランプの相対分光分布図である。

図2の1期と2期の左側の棒グラフは対照群（白色蛍光ランプ）の被験者、右側が実験群（自然光の分光分布を模擬した蛍光ランプ）の被験者のカルシウム吸収率である。

全ての被験者を7週間白色蛍光ランプ照明下に置いた後、対照群と実験群に分けて4週間それぞれの光源の照明下に置いた結果、自然光の分光分布を模擬した蛍光ランプ照明下に置かれた男性は白色蛍光ランプ照明下に置かれた男性よりも腸内カルシウムの吸収が著しく上回った。

この研究調査結果により、一定量の紫外放射は太陽放射や人工光源にかかわらずカルシウム代謝に必要なものであると言える。

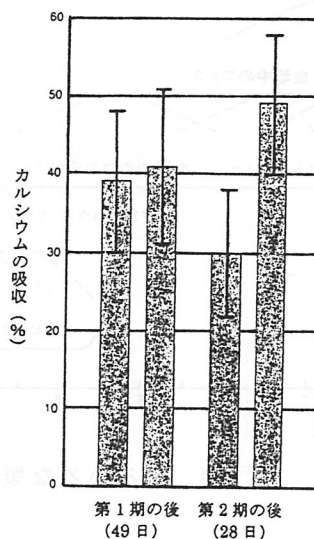


図2 高齢者のカルシウム吸収率  
(文献5より引用改変)

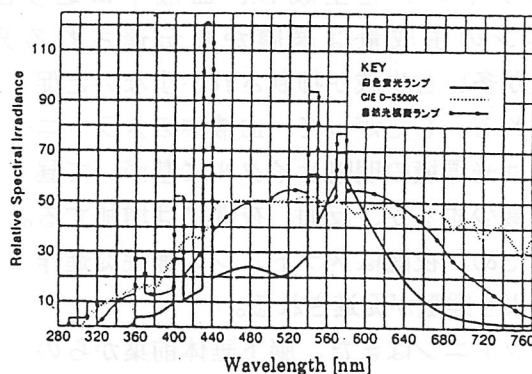


図3 白色蛍光ランプと自然光を模擬した  
蛍光ランプの分光分布 (文献6より引用改変)

#### (4) メラトニンの調節と概日リズム

マクロな観点で言えば、太陽放射は地球大気圏外では常に一定であるが、地上では地球と太陽の相対位置関係によって規則正しく周期的に変化している。この規則的変化は億年単位で安定しているので、人間は、おおよそ100万年前に地球上に出現して以来、太陽による規則的な光環境の変動の影響を受けてきたと考えられる。動物にも言えることであるが、人間の生活は24時間を1周期とする昼夜の明暗に応じてリズムが保たれている。この24時間を1周期とするリズムを概日リズムまたはサーカディアンリズムといい、この影響が具体的に現れる例として図4に示すとおり、睡眠・覚醒リズムやその他のいろいろな生体リズムが挙げられる。

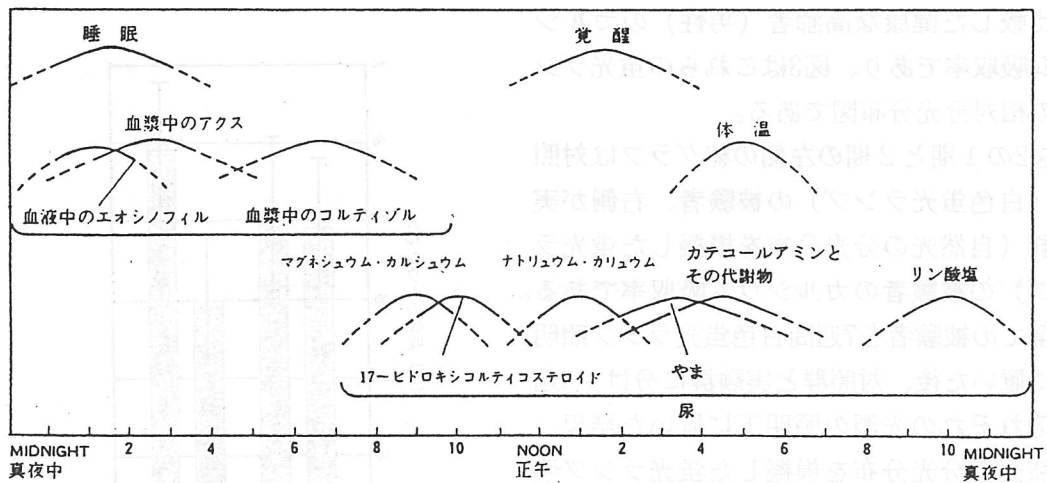


図4 いろいろな概日リズム (文献5より引用改変)

睡眠・覚醒リズムは以下の機構により発現する。光の明暗の変化はまず、視器官である眼で感知され、眼に入った光の信号は網膜で電気信号に変換される。電気信号は視神経を通じて脳に伝達される途中で一部が分岐し、脳幹を経て松果体に伝達される。松果体は睡眠促進作用をもたらすホルモンであるメラトニンを生成し、血液中に送り出す働きがある。松果体におけるメラトニンの生成量は網膜から伝達される光信号の量によって調節され、光信号の量が多いと生成が抑制され、少ないと促進される。したがって、血液中のメラトニン量は光環境の明暗サイクルに基づいて昼間は減少するが、反面、夜間には増加する。そのため、夜間はメラトニンの睡眠促進作用により睡眠が促進される。

メラトニンはまた、脳下垂体前葉からの黄体形成ホルモンの分泌を抑制する働きがある。黄体形成ホルモンは、雌動物では成熟した卵巣濾胞に作用して排卵を起こし、黄体・間細胞などからの発情ホルモンの分泌を促す(図5)。雄動物では間細胞に作用して雄性ホルモンの分泌を促し、この雄性ホルモンによって二次性徴が発達すると共に精子形成が完了する。したがって、メラトニンが減少することにより、卵巣の発達・排卵・精子形成など、性腺の発達が促進される。

人間や動物の身体の活動性は自然の光環境の明暗のサイクルに対応して形成されている。ところが何かの原因で急に明暗のサ

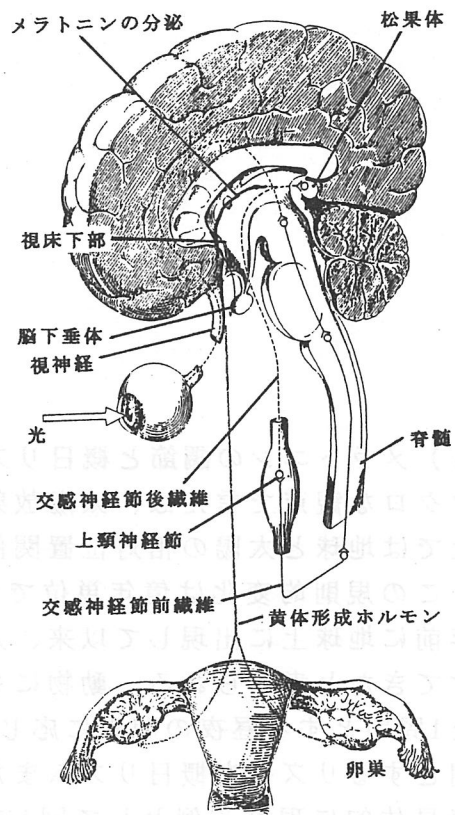


図5 卵巣と光の関係 (文献5より引用改変)

イクルがそれまでの状態と変化すると、血液中のメラトニンの量の変化と既に形成されている活動リズムとの間にズレが生じ、生活に支障が出てくる。時差のある地域へ移動する場合がその一例であり、活動リズムがズレて体調が狂った状態が「時差ぼけ」と言われている。

このようなリズム障害を改善するため、朝、高照度光（約3000 lx）を数時間受ける光療法が実施されている。複数の蛍光灯を組み込んで高照度光を放射するように設計された照明器具が多く用いられている。

### 3.2.2 人工光源の種類と特性

人工光源の発光スペクトルは太陽放射のように連続スペクトルを有するものもあれば、線スペクトルや帯スペクトルを有するものもある。連続スペクトルを有する主な人工光源は白熱電球であり、蛍光灯は水銀による線スペクトルと蛍光体による連続スペクトルの混成である。以下に各種人工光源のスペクトル特性を示す。

- (a) 白熱電球：フィラメントの発熱による連続スペクトルを放射する。
- (b) 蛍光灯：封入ガス中の水銀の放電で生じる紫外放射の線スペクトルおよび、その紫外放射に励起された蛍光体による帯スペクトルを放射する。使用する蛍光体の種類により、太陽放射に近似したスペクトル（連続した帯スペクトル）を得ることができる。
- (c) 水銀ランプ：封入ガス中の水銀の放電で生じる紫外放射の線スペクトルおよび、蛍光体付きについては、紫外放射で励起された蛍光体による連続スペクトルを放射する。
- (d) メタルハライドランプ：封入ガス中の金属の放電により線スペクトルを放射する。封入するハロゲン化金属の種類とその組み合わせにより、線スペクトルだけでなく帯スペクトルも放射するので、太陽放射に近似したスペクトル（連続した帯スペクトル）を得ることができる。
- (e) 高圧ナトリウムランプ：封入ガス中のナトリウムの放電による線スペクトルD線を放射するが、ガスが高圧になるにつれ、D線の自己吸収が起こり、D線の両側の波長域に連続スペクトルが発生する。
- (f) キセノンランプ：アーク放電中のキセノンガスの励起発光で、紫外域から可視域にかけて連続スペクトルを放射し、近赤外部では強力な線スペクトルを放射する。
- (g) マイクロ波放電ランプ：封入ガス中の金属をマイクロ波で励起し、線スペクトルを放射する。封入する金属の種類とその組み合わせにより、線スペクトルだけでなく帯スペクトルも放射する。
- (h) LED：電流で発光する固体発光素子により、帯スペクトルを放射する。使用する化合物半導体の種類により、赤色、橙色、黄色、緑色、青色などのものがある。
- (i) EL ランプ：高電界により蛍光体が励起発光し、帯スペクトルを放射する。蛍

光体と蛍光顔料の組み合わせにより青色、橙色、赤色、白色などのものがある。

前述の表3では主に医療用の特殊光源を示しているが、図6では各種一般照明用の人工光源の種類を示している。この中で、太陽放射に近似したスペクトルを有する人工光源は、蛍光ランプではトルーライト（Duro-Test）などがあり、メタルハライドランプでは陽光ランプ（東芝ライテック）、BOCランプ（三菱オスラム）、クリーンエース（岩崎電気）などがある。

人工光源の分光エネルギー分布については通常400～700 nm前後の可視放射範囲しかデータ公表されていないが、地上に到達する太陽放射の波長範囲は300～3000nmとされているため、容易に人工光源との比較はできない。よって、図7に波長範囲300～2500nmの各種人工光源の分光エネルギー分布の実測値を示す。また、表4は各種人工光源の光質バランス、相関色温度等を示したものである（オプトリサーチ社分光放射計：MSR7000使用）。表4に示すように、人工光源の種類によっては通常の可視放射の範囲と同程度の放射照度を赤外放射の範囲に有するものもあるため、生物系の照射試験などには注意が必要となる。従来の人工光源の設計基準は可視放射を効率的に追求することに重点が置かれてきた。しかし、最近では紫外放射や赤外放射の影響が懸念され、生物学的影響も次第に明らかになってきている。したがって、今後は人工光源の設計において、可視放射だけでなく、紫外放射、赤外放射の制御を加味した光源開発が必要とされる。

（渡貫美衣・田澤信二）

#### 参考文献

- (1) 羽生、鈴木、長坂、田無における太陽光の分光放射照度の測定(Ⅲ)、  
電総研報 830、pp. 72-168(1983)
- (2) 写真技術便覧編集委員会編：新版 写真技術便覧、コロナ社、p. 155(1987)
- (3) 写真技術便覧編集委員会編：新版 写真技術便覧、コロナ社、p. 127(1987)
- (4) 照明学会・照明普及会編：光放射の応用(Ⅰ)照明教室61、pp. 14-15(1985)
- (5) Wurtman, R. J. :The effects of light on the human body Scientific American  
233(1), pp. 68-77(1975)
- (6) Duro-Test Corporation, Technical Bulletin, E2025(1996)
- (7) 岩波生物学辞典、第2版、岩波書店、p. 130(1977)
- (8) 照明学会編：照明専門講座テキスト、pp. 14-1～14-9(1996)

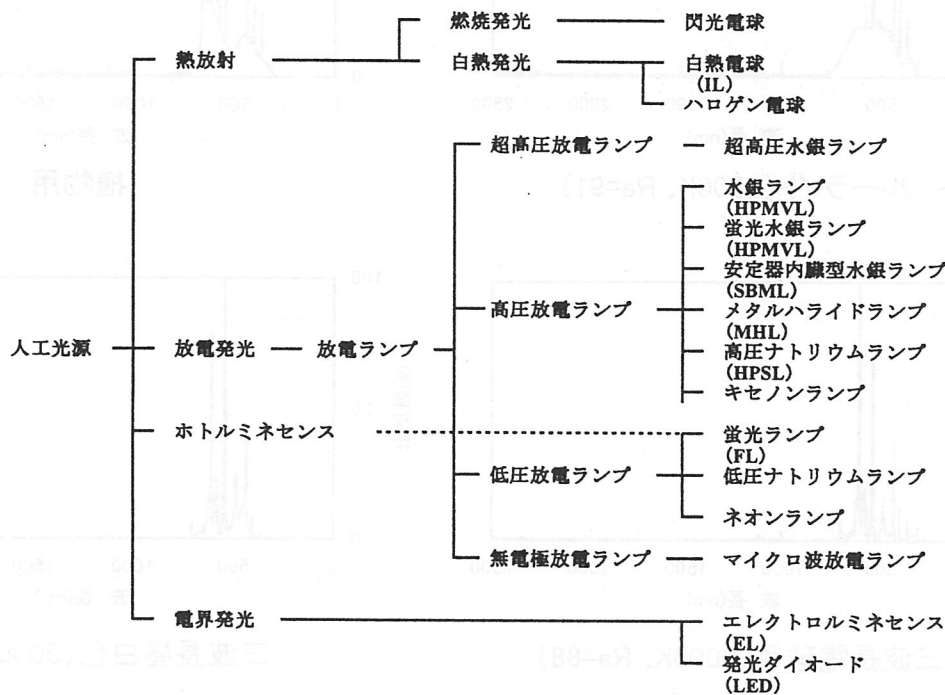


図 6 各種人工光源の種類

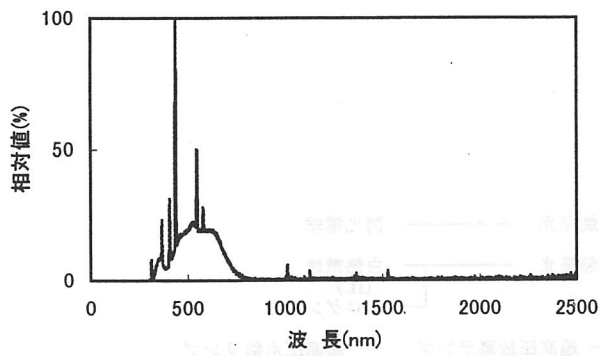
表 4 各種人工光源の光質バランス (田澤, 1999)

	ランプ種類	紫外放射 (300-380nm)	可視放射 (380-780nm)	赤外放射 IR-A (780-1400nm)	赤外放射 IR-B (1400-2500nm)	総計 (300-2500nm)	備考
蛍 光 ラ ン プ	ブルーライト	6 13	84 162	4 7	6 12	100 193	40W, Tc:5500K, Ra:91
	植物育成用	6 8	82 115	4 6	8 11	100 140	〃
	3波長電球色形	5 9	86 167	3 7	6 12	100 195	〃, Tc:3000K, Ra:88
	3波長昼白色形	1 3	93 291	2 8	4 12	100 313	〃, Tc:5000K, Ra:88
	白色形	2 4	87 155	4 8	7 11	100 177	〃, Tc:4200K, Ra:61
	昼光色形	2 5	88 178	4 7	6 12	100 202	〃, Tc:6500K, Ra:74
	昼白色形 色評価用	2 4	88 162	4 7	6 12	100 184	〃, Tc:5000K, Ra:71
		0 0	88 150	5 8	7 12	100 170	〃, Tc:5000K, Ra:99
H I D ラ ン プ	蛍光形水銀ランプ	10 44	61 270	18 82	11 46	100 442	400W, Tc:4100K, Ra:40
	蛍光形メタルハライドランプ	5 58	67 848	19 236	9 117	100 1259	400W, Tc:3800K, Ra:70
	太陽光メタルハライドランプ	5 56	62 712	22 259	11 128	100 1155	400W, Tc:6500K, Ra:90
	高压ナトリウムランプ	0 4	63 689	29 322	8 86	100 1101	360W, Tc:2100K, Ra:25
	高演色形HPSL	0 2	50 640	38 487	12 162	100 1291	400W, Tc:2500K, Ra:85
	コハク外MHL3500K	0 0	51 403	34 272	15 116	100 791	150W, Tc:3500K, Ra:96
	コハク外MHL4500K	1 4	57 384	25 171	17 113	100 672	150W, Tc:4500K, Ra:96
コハク外MHL6500K	1 7	69 596	23 199	7 62	100 864	150W, Tc:6500K, Ra:96	

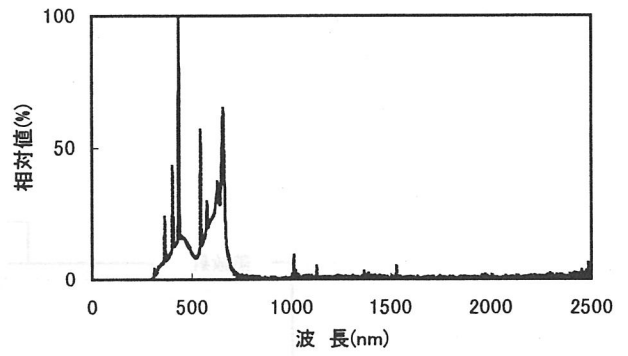
\*単位: %

\*オプトリサーチ社・MSR7000による実測値 (at 1m)

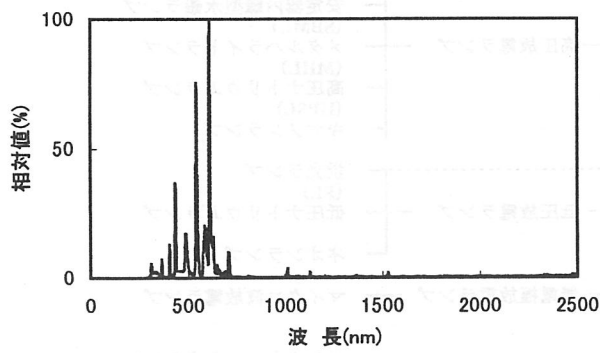
\*表中小文字数值は放射照度を示す (単位:  $\mu\text{W} \cdot \text{cm}^{-2}$ )



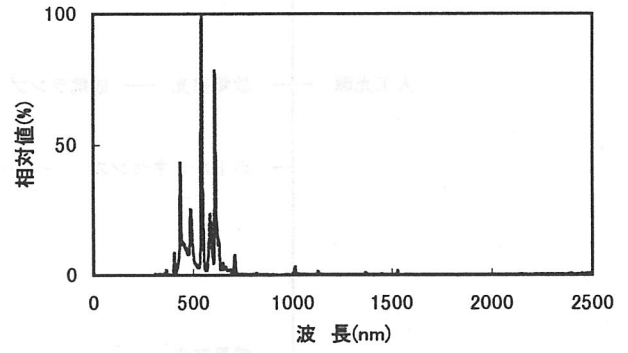
トルーライト(5500K、Ra=91)



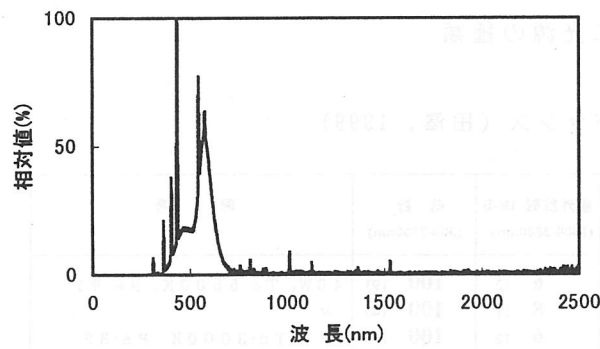
植物用



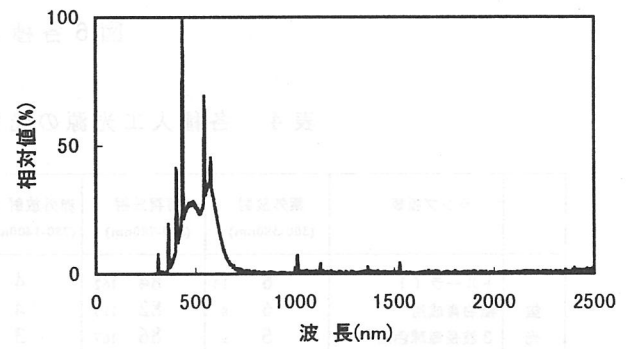
三波長電球色(3000K、Ra=88)



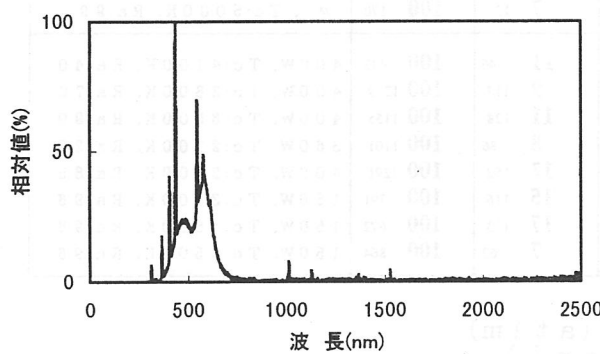
三波長昼白色(5000K、Ra=88)



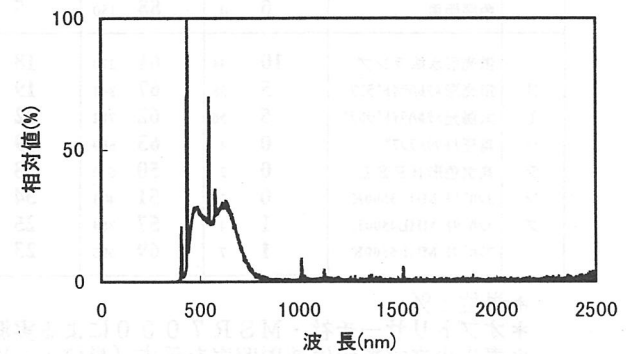
白色(4200K、Ra=61)



昼光色(6500K、Ra=74)

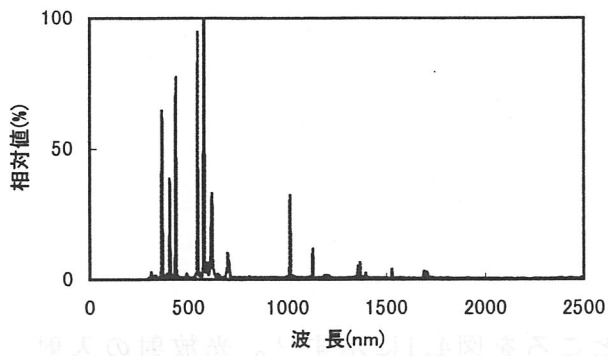


昼白色(5000K、Ra=71)

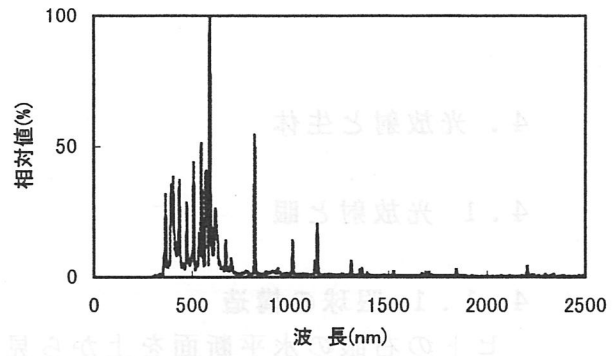


高演色形昼白色(5000K、Ra=99)

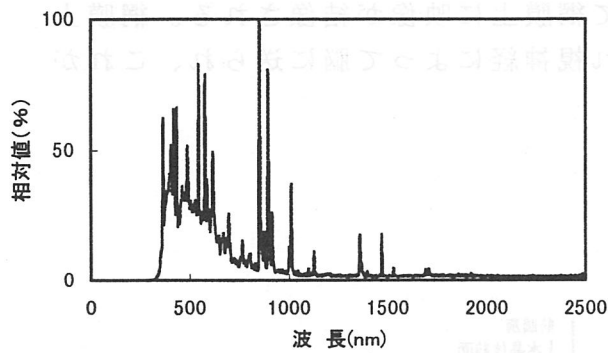
図7 各種人工光源の分光エネルギー分布 (I) (田澤、1999)



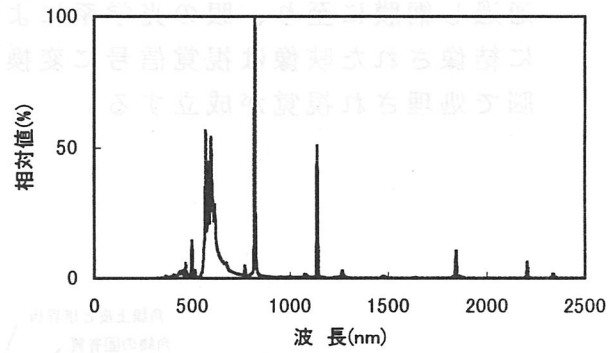
蛍光水銀ランプ(4100K、Ra=40)



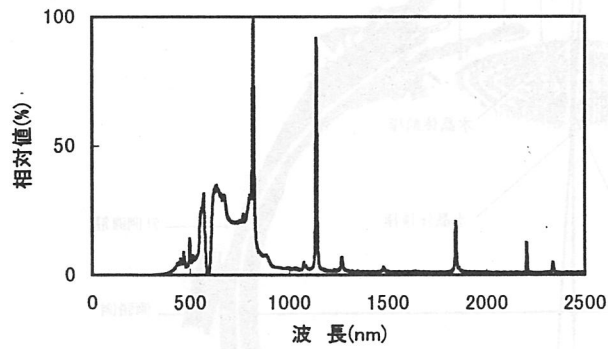
蛍光形メタルハライドランプ(3800K、Ra=70)



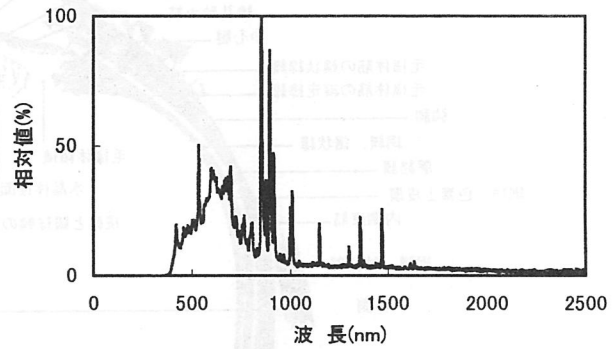
太陽光形メタルハライドランプ(6500K、Ra=90)



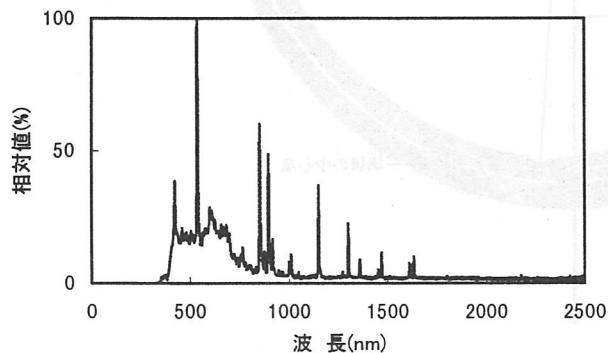
高圧ナトリウムランプ(2100K、Ra=25)



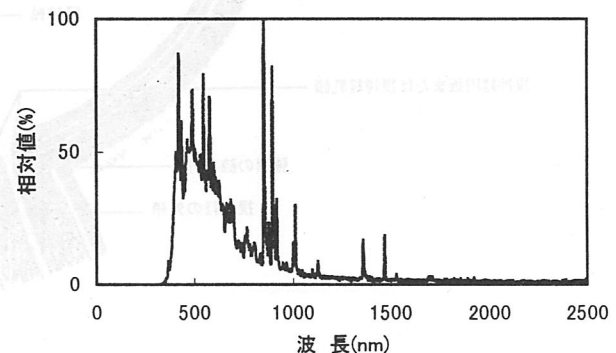
高演色形HPSL(2500K、Ra=85)



コンパクト形高演色MHL  
(3500K、Ra=96)



コンパクト形高演色MHL  
(4500K、Ra=96)



コンパクト形高演色MHL  
(6500K、Ra=96)

図7 各種人工光源の分光エネルギー分布(II) (田澤、1999)

## 4. 光放射と生体

### 4.1 光放射と眼

#### 4.1.1 眼球の構造

ヒトの右眼の水平断面を上から見たところを図4.1に示す<sup>1)</sup>。光放射の入射口となるのが、最外層部前面の角膜と呼ばれる透明体である。外界からの光放射は角膜、前眼房内の眼房水、水晶体、さらに透明なゼリー状の硝子体を通過し網膜に至り、眼の光学系によって網膜上に映像が結像される。網膜上に結像された映像は視覚信号に変換され視神経によって脳に送られ、これが脳で処理され視覚が成立する。

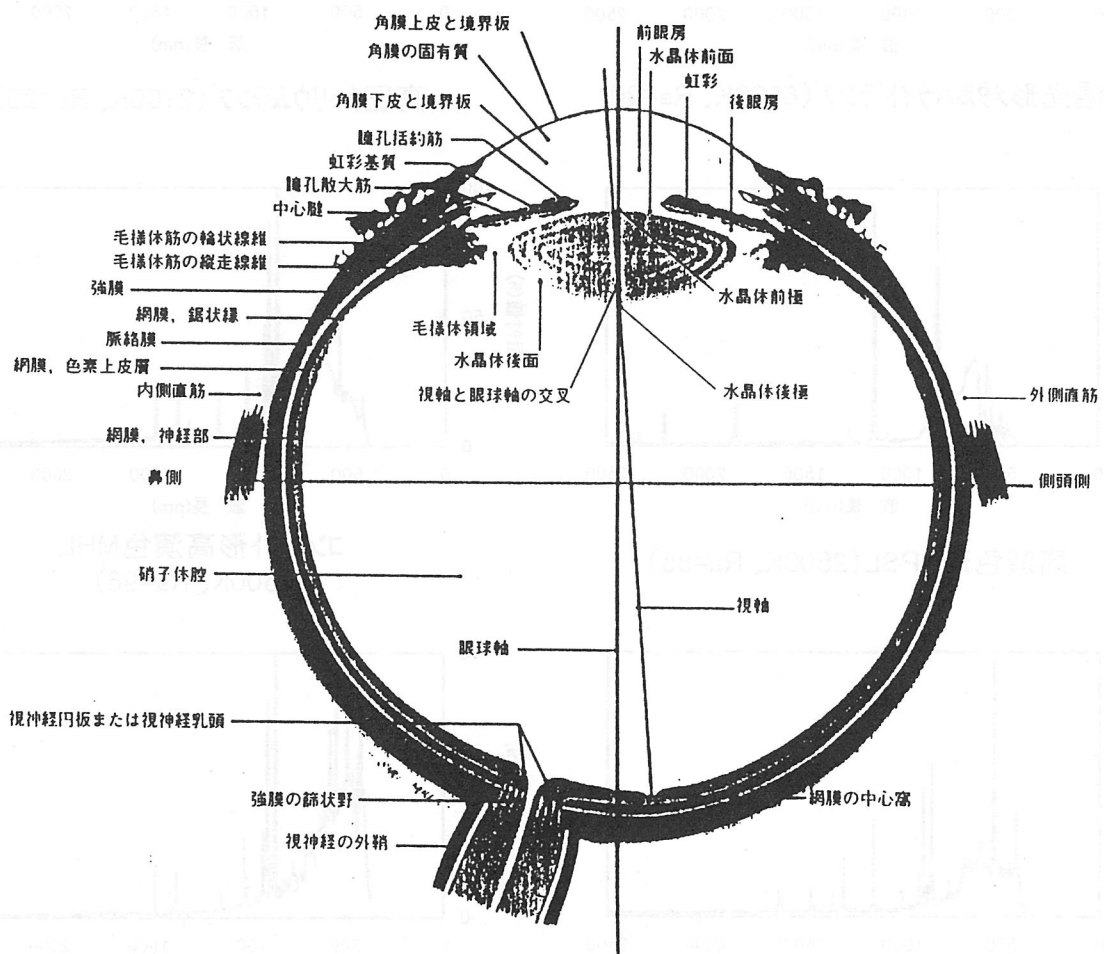


図4.1 ヒトの眼球の構造 (Stedman's Medical Dictionary 4th Edition, 1997)

#### 4.1.2 紫外放射による作用

角膜表面に入射した光放射が眼球の各部で吸収される割合を図4.2に示す<sup>2), 3)</sup>。図4.2から320nm未満の紫外放射はほとんど角膜で吸収され、また320~400nmの紫外放射の大部分は水晶体で吸収されることが判る。網膜に明白な作用を及ぼす量の紫外放射が到達するかどうかについては明確になっていないが、正常状態では硝子体および網膜そのものへの紫外放射の影響はほとんどないとされている。このため、紫外放射の眼に対する影響は角膜とその付近の結膜(眼球前面と眼瞼後面を包む粘膜)および水晶体に限定される。

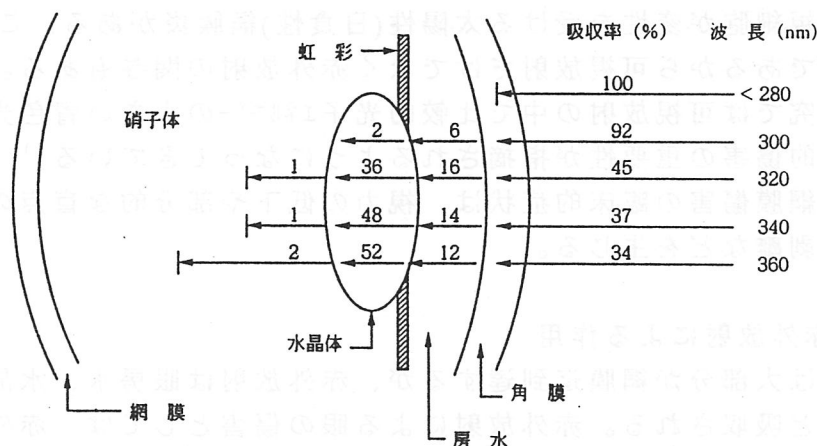


図4.2 角膜表面に入射した光放射エネルギーの眼球各部での吸収  
(IES Lighting Handbook, 1993)

紫外放射によって角膜の組織が破壊され炎症を起こす紫外性角膜炎は眼に非常な痛みを感じ、眼の中に異物感や催涙、羞明(光過敏状態にあって眼を開いていられなくなる状態)、眼瞼の痙攣のような症状が見られる。しかし、その症状は多くの場合、重篤なものではなく一時的で、そのまま安静にしていれば1日程度で自覚症状がなくなり、角膜の組織破壊も2週間程度で修復する。また紫外放射による結膜の傷害を紫外性結膜炎と云い、羞明や掻痒感などの症状が見られるが、紫外性角膜炎と同様に、多くの場合、1日程度で自覚症状がなくなる。

人間の眼は上方からの光放射に比べ、地面などの下方からの光放射に対しては防御が弱いため、雪原や氷原では日射にさらされた後、紫外性角膜炎や結膜炎を起し眼の痛みや視力障害を生じることがあり、これを雪盲あるいはゆきめと呼んでいる。

水晶体の混濁によって生じる白内障の発現への紫外放射の関与が最近注目されており、UV-Aが白内障の誘発、UV-Bが白内障発現に促進的に作用することの報告がある<sup>2)</sup>。白内障にかかっている人が西欧よりもインドに多く見られることも専門家の間では太陽放射の差異が主要要因ではないかとの見方もなされている<sup>3)</sup>。

戸外での紫外放射は適切なサングラスによりほとんど除去されるので、紫

外放射の多い季節や場所では眼の保護の観点から分光透過率が適切なサングラスの着用が推奨される。

#### 4.1.3 可視放射による作用

前述のように紫外放射はほとんど網膜に到達せず、網膜に到達する光放射の波長域は400~1400nmとなる。このため、可視放射の強度および照射時間が増大してくると視覚器、特に網膜に傷害を起す。その多くは網膜内の熱作用や光化学反応によるものである。

最も一般的な傷害としては、太陽などの強い光源の長時間凝視による網膜温度上昇で視細胞が変性を受ける太陽性(日食性)網膜炎がある。これは網膜の熱的変性であるから可視放射だけでなく赤外放射の関与もある。

最近の研究では可視放射の中で比較的光子エネルギーの大きい青色光による網膜の光化学的傷害の重要性が指摘されるようになってきている<sup>4)・5)</sup>。光化学作用による網膜傷害の臨床的症狀は、視力の低下や部分的な盲点の発生、さらには網膜剥離などを生じる。

#### 4.1.4 赤外放射による作用

可視放射は大部分が網膜迄到達するが、赤外放射は眼房水、水晶体、硝子体でほとんど吸収される。赤外放射による眼の傷害としては、赤外放射の照射による眼球内の温度上昇が水晶体の代謝異常を招き混濁する白内障が挙げられ、ガラス工場や窯工場などで赤熱物体を長時間見つめる作業者に多く発生することが指摘されている。

#### 4.1.5 眼の傷害に対する光放射の安全基準

一昨年(1997年)、米国から一般照明用光源を中心とする各種光源に対する安全基準の国際規格化の提案が、I E C (International Electrotechnical Commission, 国際電気標準会議)とC I E (Commission Internationale de l'Éclairage, 国際照明委員会)に提出された。この提案を受けて、I E CとC I Eの双方に検討のための技術委員会(I E C側はIEC TC34 SC34A内のWG、C I E側はCIE TC6-47:Photobiological Lamp Safety Standard)が組織され、昨年(1998年)、I E C - C I E両技術委員会合同の"光源安全基準検討パネル会議"がロンドン市内のB S I (British Standard Institution, 大英標準局)で開催された<sup>6)</sup>。安全基準の内容および考え方については、既に国家規格として制定されている米国のA N S I (American National Standards Institute, 米国国家規格協会)<sup>7)</sup>をそのままI E C規格およびC I E標準にしたい旨の提案が米国から提出され、A N S Iを基本に各種光源に対する安全基準の国際規格化が進められつつある<sup>6)</sup>。米国から提案された光源安全基準の内、眼の傷害に対する光放射の波長域、閾値、評価のための物理量を表4.1に、作用スペクトルを図4.3~4.5に示す<sup>6)・8)</sup>。

表4.1 眼の傷害に対する光放射の波長域・閾値・評価のための物理量  
(河本,1998)

傷害の種類	波長域(nm)	作用スペクトル	基準となる物理量	単位	傷害の閾値
皮膚と目の角・結膜に対する急性の傷害	200~400	S ( $\lambda$ )	有効放射照度	$\mu\text{W}/\text{cm}^2$	0.003 [ $\text{J}/\text{cm}^2$ ]
UV-Aによる白内障	320~400	なし	放射照度	$\text{mW}/\text{cm}^2$	1 [ $\text{J}/\text{cm}^2$ ]
可視放射と赤外放射による網膜傷害	400~1400	R ( $\lambda$ )	有効放射輝度	$\text{W}/(\text{cm}^2 \cdot \text{sr})$	5 [ $\text{W}/(\text{cm}^2 \cdot \text{sr})$ ], t
青色光網膜傷害	400~700	B ( $\lambda$ )	有効放射輝度	$\text{W}/(\text{cm}^2 \cdot \text{sr})$	100 [ $\text{J}/(\text{cm}^2 \cdot \text{sr})$ ]
青色点光源による網膜傷害 ( $\alpha \leq 0.011$ [rad])	400~700	B ( $\lambda$ )	有効放射照度	$\text{W}/\text{cm}^2$	0.01 [ $\text{J}/\text{cm}^2$ ]
赤外放射による水晶体および角膜の傷害	770~3000	なし	放射照度	$\text{W}/\text{cm}^2$	0.01 [ $\text{J}/\text{cm}^2$ ]
赤外放射(可視放射のほとんど無い)による網膜傷害	770~1400	なし	放射輝度	$\text{W}/(\text{cm}^2 \cdot \text{sr})$	0.6 [ $\text{W}/(\text{cm}^2 \cdot \text{sr})$ ], t

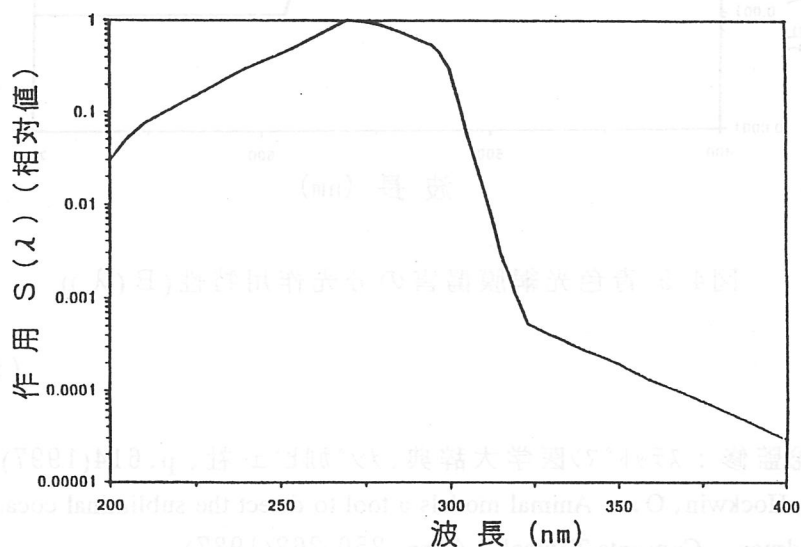


図4.3 紫外放射の眼と皮膚に対する有害作用の分光特性( $S(\lambda)$ )

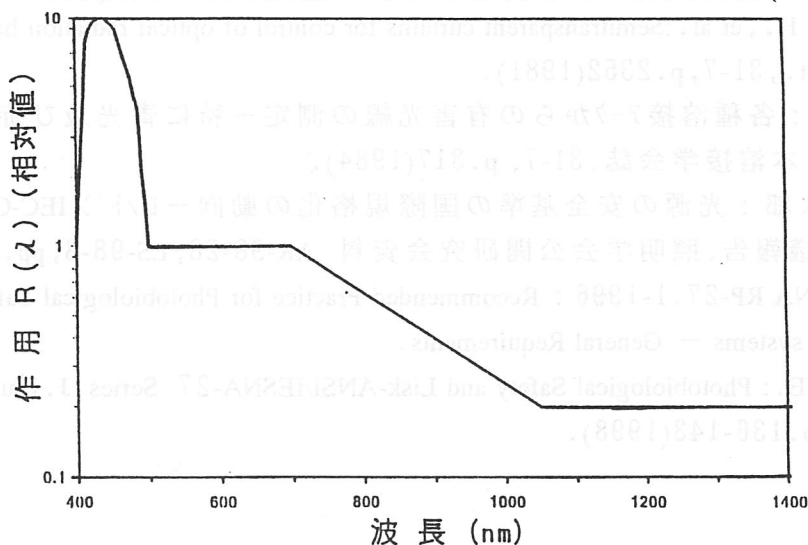


図4.4 可視・赤外放射による網膜傷害の分光作用特性( $R(\lambda)$ )

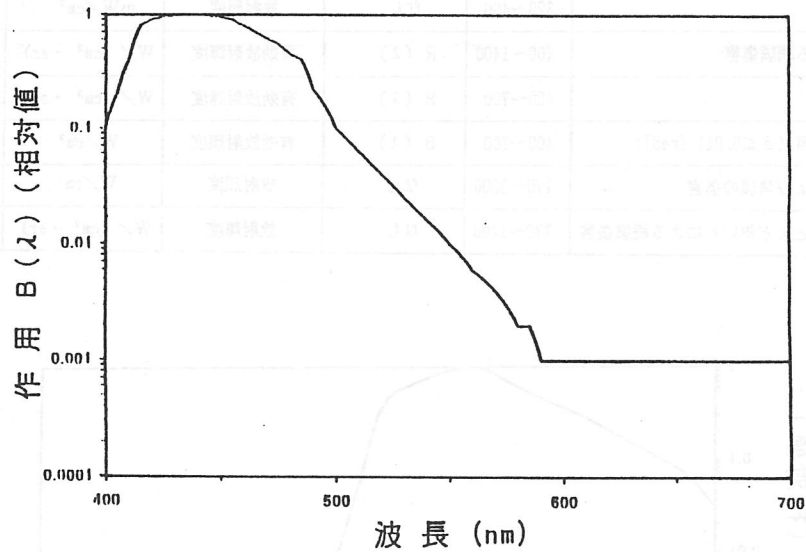


図4.5 青色光網膜傷害の分光作用特性( $B(\lambda)$ )

(洞口公俊)

#### 参考文献

- (1)高久史磨総監修：ステットマン医学大辞典、メジカルビュー社、p.614(1997)。
- (2)Wegner, A., Hockwin, O. : Animal models a tool to detect the subliminal cocataractogenic potential of drugs. , Concepts Toxicol. , 4, pp.250-262(1987)。
- (3)IESNA 編 :IES Lighting Handbook 8th Edition, Refer. &Appli. , IESNA, p.137(1993)。
- (4)Sloney, D. H. , et al. :Semitransparent curtains for control of optical radiation hazards, Appl. Opt.,31-7, p.2352(1981)。
- (5)小林 実：各種溶接アークからの有害光線の測定－特に青光及び赤外線について、日本溶接学会誌、31-7、p.317(1984)。
- (6)河本康太郎：光源の安全基準の国際規格化の動向－ワットソ IEC-CIE 合同ハ°礼会議報告、照明学会公開研究会資料 AR-98-28, LS-98-8, pp.9-15(1998)。
- (7)ANSI/IESNA RP-27.1-1996 : Recommended Practice for Photobiological Safety for Lamps and lamp systems - General Requirements. 53
- (8)Levin, R. E. : Photobiological Safety and Lisk-ANSI/IESNA-27 Series, J. Illum. Eng. Soc. Winter pp.136-143(1998)。

## 4. 2 光放射と皮膚

### 4. 2. 1 UV-Bと皮膚

#### (1) 急性反応

UV-B の皮膚への作用の中で、誰でも一度は経験したことがあるのは日焼けである。日本では日焼けは皮膚の炎症である紅斑（サンバーン）とその後に現れる黒化（サンタン）の2つの意味で使用される。紫外放射を受けた直後に現れる即時型紅斑と即時型黒化を区別する意味で、前者を遅延型紅斑、後者を遅延型黒化と呼ぶ。UV-B 曝露後数時間で皮膚は赤くなってくる。この赤味は2～3時間後から始まり、8～24時間後にピークとなり、その後徐々に弱くなりながらも持続する。多量のUV-B を浴びた場合はさらに進んで浮腫が起こり、所謂火傷の状態になる。この遅延型紅斑は損傷を受けた皮膚細胞から産生される炎症のケミカルメディエーターが関与し、血管を拡張させることから赤味が見えるようになるが、その詳細な過程はわかっていない。しかしアスピリンやインドメタシンがこの遅延型紅斑を抑制することから、アラキドン代謝系が関与しているといわれている。

遅延型紅斑の作用波長<sup>1)</sup>は高性能のモノクロメーターを使用し、ヒト皮膚に単波長の紫外放射を照射し、各波長ごとのMEDを測定することにより作成する。多くのばあい一定時間後の各波長ごとのMEDの逆数を取り、その内の最大値を基準に、波長ごとの相対値で表している。この作用波長は測定に使用する①モノクロメーターの光源の種類と②精度、③被験者の人種、④判定時間、⑤被験部位、⑥MEDの判定基準など多数の要因によって影響される。

この作用波長は1927年にHausserらによって報告されてから、これまで非常に多くの研究者達によって異なる提案がされてきた<sup>1)</sup>。そこで国際照明委員会は過去の8論文の紅斑曲線を包括したかたちで250～400 nmにわたる[新たな紅斑曲線]を提示し、この曲線には幾つかの問題はあるが、一応現在ではこれが標準曲線として広く受け入れられている。この曲線から考察すると太陽放射による遅延型紅斑に寄与する波長域は300～310 nmで最も高くなる。

遅延型黒化はUV-Bの照射を受けて48～72時間後に起こり、通常遅延型紅斑に引き続きおこることが多い。この黒化はメラニン色素の増加に起因するが、皮膚のメラニン色素の増加は色素細胞内でのメラニン生成の増加に起因するためと考えられている。色素細胞内のメラニンは膜の小器官メラノソーム内で酵素チロシナーゼあるいは近年明らかになったドーパクロームトートメララーゼやDIHCA酸化酵素により生成される。メラノソームにメラニンが充満し成熟したメラノソームとなるが、このメラノソームが周囲の角化細胞に従前の状態より多量に配達されて初めて肉眼的に黒化として捉えられる。

したがって皮膚のメラニンの増加は膜器官メラノソームの生成増加によるためメラノソームを構成しているタンパクや酵素の全体的な合成増加が必要である。したがって紫外放射のシグナルはこれらのタンパクや酵素のリボソームでの合成増加あるいはmRNAの増加まで、最終的に届いている筈である。

それでは紫外放射のシグナルがどのようにして色素細胞内でメラノソームの生成の亢進を起こすのであろうか？最初の説は、①紫外放射が照射された表皮角化細胞は IL - 1  $\alpha$  を合成、分泌する。次に②分泌された IL - 1 はオートクリン的に角化細胞に働き、角化細胞のエンドセリン - 1 の合成を促進し、分泌させる。③分泌されたエンドセリン - 1 はパラクリン的に色素細胞に作用し、細胞内の protein kinase C を経由してメラニン生成に関与する酵素やタンパクの合成を促進するとする説である。

次の説は  $\alpha$ -MSH と ACTH による色素増加説である。①紫外放射を曝露された表皮の角化細胞は  $\alpha$ -MSH や ACTH ばかりでなく、Thioredoxin を産生し分泌する。②  $\alpha$ -MSH と ACTH は色素細胞表面の MSH 受容体に作用して、色素細胞内の c - AMP を経由して色素生成を亢進する。一方、③ Thioredoxin も色素細胞に作用して MSH 受容体の mRNA 発現を亢進、増加させ、④結果として  $\alpha$ -MSH による作用を増強させる。

その他の説は、線維芽細胞増殖因子、肝細胞増殖因子、幹細胞増殖因子、ロイコトリエン C 4、ロイコトリエン D 4、プロスタグランジン E 2、ガストリン遊離ペプチドなどが細胞培養系で色素細胞の増殖作用を持つことが分かっている。またヒスタミンやビタミン D 3 なども色素細胞を刺激する。これらの諸因子も少なからず色素細胞に作用して色素産生の増加に関与している可能性がある<sup>2)</sup>。

## (2) 慢性反応

太陽放射曝露が皮膚癌（非悪性黒色腫型皮膚癌：non-melanoma skin cancer、NMSC）の発症の原因であることが明らかにされた。Urbach<sup>3)</sup> は、

- ①皮膚癌は頭部、顔、手、腕など明らかに太陽放射の曝露部位に好発する。
- ②白人に較べ、日焼けしにくい有色人種では皮膚癌は発症しにくい。
- ③白人の戸外労働者では室内労働者に較べ皮膚癌が好発する。
- ④白人の中では太陽紫外放射の強い地域に住む人に皮膚癌が好発する。
- ⑤実験動物は繰り返し紫外放射を照射すると容易に発癌し、作用波長の上限は 325 nm である。

⑥この波長はヒト皮膚の日焼けの作用波長に概ね一致することなどから太陽紫外放射が NMSC の原因であることを指摘した。

Blum<sup>4)</sup> は人工紫外放射をマウスに繰り返し照射し、NMSC を誘発することにより UV-B (290 ~ 320 nm) が皮膚癌の発症の原因波長であることを示した。

市橋<sup>5)</sup> は日本人の皮膚癌発症と太陽紫外放射の関係を調査するため、1976 ~ 1980年と1986 ~ 1990年の2期、各々5年間、全国27大学病院皮膚科受診者を対象に、皮膚癌の前癌症とされる日光角化症と有棘細胞癌および基底細胞癌の疾病率を調査した。その調査結果によれば、後期は前期に比較し、日光角化症と基底細胞癌は増加している。

彼らは1992年から兵庫県加西市で一般市民を対象に皮膚癌検診を開始し、1997年までの6年間に基底細胞癌が3例、有棘細胞癌が1例、日光角化症が128例見いだされた。彼らは皮膚癌については症例数が余りにも少ないため統計的な

解析から除外し、日光角化症の有病率と罹患率を求めている。人口10万人当たりの有病率と罹患率は、1997年度に101.8と99.9となり、6年間を平均すると、日本人の日光角化症罹患率は人口10万人当たり約150人と予測した。

この値から推測し毎年全国で15万人以上の日光角化症が発生すると考えている。沖縄県伊江村の同様な調査からは NMSC の罹患率は人口10万人当たり634.6人であり、加西市の調査に較べ著しく高い結果となっている。彼は沖縄の年間 UV-B 量が加西市の約2倍高く、日光角化症の罹患率が4～5倍高いことと一致するとしている。

ヘアレスマウスの皮膚に紫外放射を繰り返し照射すると所謂しわが形成することが実験的に証明されている。この紫外放射によるしわの形成メカニズムは、皮膚が紫外放射に連続して曝露されると、表皮細胞より分泌される液性因子が真皮線維芽細胞に働き、エラスターゼ遺伝子の発現を促進し、エラスターゼ酵素を過剰に分泌する。このエラスターゼ酵素は周囲のエラスチン線維に障害を与え、その結果として皮膚の弾力性を減少させると考えられている。そして弾力性の減少が一過性のしわを固定化することによってしわを形成する。さらに断続的に紫外放射の曝露を受けることにより、このエラスターゼ酵素の活性の亢進はすぐには減衰せず、新たに形成されたエラスチン線維も障害を受けるため、永久しわとして残るのではないかと推測されている<sup>6)</sup>。

一般にしみと言われているものに雀卵斑、肝斑、老人性色素斑、日光性花弁状色素斑、脂漏性角化症、リール氏黒皮症などの炎症後の色素沈着が含まれる。いずれのしみも紫外放射によって色素の増悪を見るが、直接的に UV-B と関係すると考えられるは老人性色素斑と花弁状色素斑である。

老人性色素斑は中年以降、主として顔面、手背、前腕伸側に生じる大小の褐色色素斑である。発生の原因は長期に繰り返し太陽紫外放射、とくに UV-B の曝露を受けることに起因すると考えられている。病理組織像は表皮突起が不規則に延長し、太鼓ばち状となり先端部にメラニン色素の増加が認められている。真皮には紫外放射による膠原線維の変性がある<sup>7)</sup>。

日光性花弁状色素斑は色白の人の背部、肩、前腕などの露出部にできる将に花弁のごとき褐色の小色素斑である。海水浴などで水疱を伴うような強い日焼けをしたときにできる。この色素斑は UV-B によって惹起される。UV-B がしみを惹起することは実験的にも確認されている。皮膚にメラニン色素を持つ有色のヘアレスマウスに繰り返し UV-B を照射すると、まず照射部位に限局性の均一な遅延型黒化色素斑ができ、その後この黒化は消失するが、数ヶ月の潜伏期を経て、多数のしみ（小色素斑）が発生する。

### (3) 皮膚免疫抑制

免疫抑制剤を投与された臓器移植患者の太陽放射曝露皮膚には癌が好発することが知られている。さらに免疫機能が欠如した SCID マウスに移植した健康なヒト皮膚に UV-B を連日照射すると約2年後に日光角化症や有棘細胞癌が発生する。このことはヒト皮膚で免疫能が著しく低下すると、紫外放射による発癌も著しく早くな

ることを示している。

またマウスでは紫外放射誘発皮膚癌を同系のマウスに移植する場合。あらかじめ紫外放射を少量でも照射しておく、マウスは移植皮膚を拒絶できなくなることから、紫外放射の照射そのものが皮膚の免疫能を奪うことも明らかになっている。これは UV-B が皮膚に照射されると、角化細胞から IL-1 $\alpha$ 、IL-1 $\beta$ 、TNF- $\alpha$ 、IL-10 などの各種サイトカインや神経ペプチドが生成、放出され、パラクライン的に表皮ランゲルハンス細胞の機能を一時的に障害するために免疫能が失われ、抗原特異的サブプレッサー T 細胞が誘導すると考えられている<sup>5)</sup>。

#### (4) DNA 障害

紫外放射の照射により細胞の DNA にはシクロブタン型のピリミジンダイマーや 6-4 光生成物といった DNA 損傷が生じる。これは DNA を構成する A、T、C、G の塩基の内、ピリミジン (C、T) が並ぶジミリジンサイトに生成される。同じ量の UV-B が照射されたとき、表皮内の DNA 損傷の生成量には個人差がみられ、とくに肌タイプ I の人では多い。これらの DNA 損傷は除去修復機構により修復されるが、この修復能の違いも紫外放射発癌感受性の差を決定する。紫外放射により高発癌する色素性乾皮症は除去修復機構に働く遺伝子の異常により生じるが、健康人の間にも除去修復能に差があり、BCC を有する患者では対照者に比較し修復能が有意に低いことが示された。ピリミジンダイマーや 6-4 光生成物は DNA に直接紫外放射の光子が作用して生じるが、活性酸素の生成を介して生じる DNA 損傷の 1 つである 8-Hydroxy-2'-deoxyguanosine の生成も紫外放射照射後のヒト皮膚で確認されている<sup>6)</sup>。

#### (5) 肌タイプ

紫外放射の皮膚に及ぼす影響は、色白の人は MED が小で皮膚癌の発症が多いこと、色黒の人は MED が大で比較的少ないことが分かっている。我々は誰でも過去に経験した日焼けの肌の変化を記憶している。肌のタイプはこの日焼けの記憶の自己申告により分類され、紫外放射皮膚障害と密接に関係することが多くの先人によって証明されている。肌タイプは紫外放射による皮膚障害を生体側から予測できる重要な因子である。

日本人男女 2500 名に紫外放射を受けたときの皮膚の反応を問診し、FDA の基準に従って、日本人の肌のタイプを I~VI に 6 分類した報告がある<sup>7)</sup>。その調査によると、[すぐに赤くなるが、黒くならない] 肌タイプ I は 18.2%、[すぐに赤くなり、少し黒くなる] 肌タイプ II は 28.0%、[赤くなったあと、黒くなる] 肌タイプ III が 29.8% で、タイプ I~III で 76% に相当する。[少し赤くなるが、すぐ黒くなる] 肌タイプ IV は 16.2%、[めったに赤くならず、必ず黒くなる] 肌タイプ V は 7.2%、[決して赤くならず、非常に黒くなる] 肌タイプ VI と答えた人も 0.3% と僅かながらも存在した (図 1)。また男性は肌タイプ III、女性は肌タイプ II と答えた人が最も多かった。

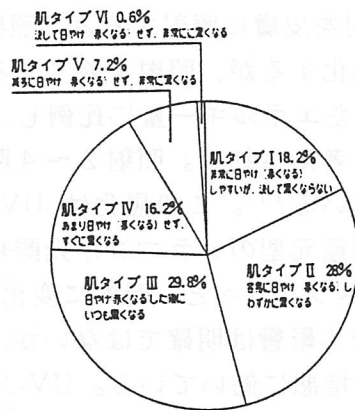


図1 日本人の肌タイプの分類

肌タイプと外眼角部のしわとの関係を研究した論文<sup>10)</sup>によれば、しわの重症度を肉眼的にスコア化し、肌タイプ別にスコアを比較検討すると深いしわは肌タイプ依存性に減少し、紫外放射感受性の高いタイプで、より高いスコアを示した。一方、微細なしわは肌タイプとの関連性を示さなかった。紫外放射に感受性の高い皮膚では深いしわが形成されやすい結果を得ている(図2)。ただしこの研究で使用した肌タイプ分類は肌タイプを4分類する Fitzparick らの提案した初期の分類方法で、現在使用されている6分類法とは若干異なる。

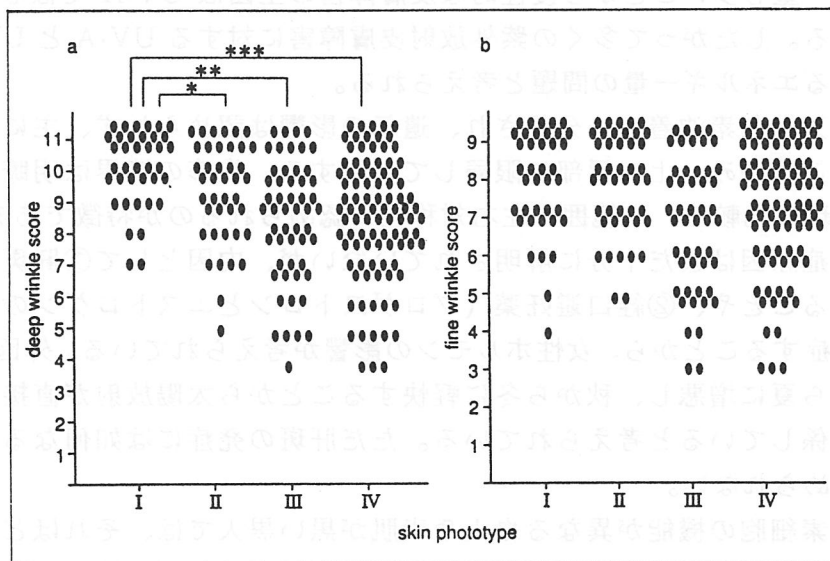


図2 肌タイプとしわの関係

a : 外眼角部の深いしわ、b : 同部の微細なしわ

#### 4. 2. 2 UV-Aと皮膚

##### (1) 急性反応

UV-A の皮膚に及ぼす代表的作用の1つに即時型黒化がある。即時型黒化は、波

長320～450 nmの放射を皮膚に照射すると、照射直後から暗灰色の黒化が始まり、照射時間とともに黒色化するが、照射を終了するとすぐに褪色化が始まる。褪色に要する時間は照射されたエネルギー量に比例し、UV-Aが大量に照射されると、遅延型黒化に移行すると考えられる。照射2～4時間後でも残存する黒化は持続型の即時黒化と定義されている<sup>11)</sup>。この黒化はUV-Bでは誘発されない。この現象は皮膚にすでに存在する還元型のメラニンが光酸化を受けてセミキノンラジカルを生じたために、より濃いメラニンへと一時的に変化するためと考えられている。

UV-Aのしみの発症に及ぼす影響は明確ではないが、発生された表皮内メラニンの酸化作用は明らかにしみの増悪に働いている。UV-Aは一般に紅斑を惹起しないとされているが、UV-A単独でもUV-Bの数百倍～1000倍の量が照射されれば皮膚に紅斑を作ることができる。UV-Aが大量に照射されたときは、紅斑のみならずUV-Bの持つ様々な急性反応を惹起すると考えるのが最も妥当な考え方であろう。さらにUV-AにはUV-Bの皮膚反応を増強する作用もある。

## (2) 慢性反応

UV-Aは基本的にはUV-Bによって惹起される皮膚癌、しわ、しみ等の様々な慢性反応を誘発することが分かってきた。大量のUV-Aが皮膚に照射されたときには、UV-Bとまったく同様な慢性的な変化を皮膚に引き起こす。UV-AのばあいUV-Bより波長が長いために皮膚のより深部まで到達する性質があり、太陽放射に含まれるエネルギー量も多いことから慢性的な皮膚障害の主因はUV-Aではないかとも考えられている。したがって多くの紫外放射皮膚障害に対するUV-AとUV-Bの違いは必要とするエネルギー量の問題と考えられる。

肝斑は後天性色素沈着症に分類され、遺伝の影響は認められず、主に顔面、特に前額、頬、こめかみ、上口唇部に限局して発生する。皮疹の境界は明瞭で暗褐色を呈し、雀卵斑に比較し、広範囲で左右対称性に認められるのが特徴である。

肝斑の発症原因はまだ十分に解明されていないが、内因として①肝斑が妊娠期間中に多発することや、②経口避妊薬（プロゲステロンとエストロゲンの合剤）の連用により発症することから、女性ホルモンの影響が考えられている。外因としては、肝斑が春から夏に増悪し、秋から冬に軽快することから太陽放射が直接的あるいは間接的に関係していると考えられている。ただ肝斑の発症には如何なる外因性の炎症症状は認められない。

肝斑は色素細胞の機能が異なる白人や素肌が黒い黒人では、それほど深刻な問題となっていない。しかし日本人は白人に比べ、メラニンの産生機能が大きで、皮膚色が中間色であるため発生しやすい。日本人の中でも肝斑患者の65%は普通肌で、色黒肌は22%、色白肌は13%に過ぎず中間色の普通肌に多く発症する<sup>12)</sup>。

日本人の肝斑患者のMEDとMMDを測定した研究<sup>13)</sup>は、UVBによるMEDは健常人とまったく同一であったが、MMDは健常人の1/2であった。しかし驚くべきことに、UV-Aによる肝斑患者のMMDは健常人の1/20であった。これらの実験が患者の非疾患部位との比較で行われたことを考えると、紫外放射は疾患部位を増悪するに止まらず、肝斑の発症そのものにも重要な役割を果たしているもの

と推測される。さらに地表に到達する太陽放射の中に含まれる UV-B と UV-A の量を考え合わせると、UV-A の影響が甚大であることを示唆している。

### 4. 3 可視放射と皮膚

可視放射の皮膚に及ぼす作用の研究はいまだ十分ではないが、即時型黒化の作用波長が可視放射にも及んでいる。しかし即時型黒化のメカニズムから考えて、美容的側面を別にすれば生体皮膚に障害性を持っているとは考えにくい。またポルフィリン症は可視放射の作用で重篤な皮膚障害を起こす疾患であるが、光放射と光過敏症の項で詳述する。

#### 4. 3. 1 光放射と光過敏症

##### (1) 光過敏症

通常、誰もが経験する日焼けはメラニンなどの生体防御機構を無効にするのに十分な太陽紫外放射量が皮膚に到達したときに起こる。しかし特殊な条件が整うと、常識では考えられないような非常に僅かな太陽放射の被曝でも、同様の日焼けが起こる。これが光過敏で、このような状態を光過敏症と呼ぶ。光過敏症は内服や外用で使用される医薬品や化粧品に含まれる薬剤に起因するばあいと、ある種の疾患を原因とするばあいの2つがある。光過敏症の作用波長は、原因となる薬剤と疾患の種類により異なり、紫外放射、可視放射、ときに赤外放射に及ぶことがある。

表1 紫外放射障害と作用波長<sup>14)</sup>

紫外線障害	作用紫外線(可視光線)
生理的障害	
サンバーン	UVB
サンタン	UVB/UVA
しわ	UVB/UVA
老人性色素斑, 肝斑, 脂漏性角化症	UVB/UVA
光発癌	UVB/UVA
光線過敏症	
色素性乾皮症	UVB > UVA
ポルフィリン症	UVA
薬剤性光線過敏	UVA > UVB
光接触皮膚炎	UVA
PUVA 皮膚炎	UVA
種痘様水疱症	UVA
日光蕁麻疹	可視光線 > UVB, UVA
多形日光疹	UVB > UVA
慢性光線過敏性皮膚炎(CAD)	UVB/UVA > 可視光線
光線により増悪する疾患	
エリテマトーデス(SCLE > SLE > DLE)	UVB > UVA
単純疱疹	UVB
アトピー性皮膚炎	UVB/UVA/赤外線
ペラグラ	UVB

光過敏症の発症機序には光毒性と光アレルギーがある。その作用機序が解明されているのは多くのばあい薬剤による光過敏症で、疾患を原因とする光過敏症の発症機序は原因も含め不明なことが多い。

疾患による光過敏症は、日光蕁麻疹、多形日光疹、ポルフィリン症、色素性乾皮症、種痘様水疱症などが著明である。

光毒性反応の作用波長は、原因薬剤の吸収波長に近似し、光アレルギー反応の作用波長より長い傾向があるといわれている。しかし実際には両者とも作用波長は吸

収波長より長く、UV-A に存在する場合が多い。疾患による光過敏症の作用波長は疾患の種類により UV-B から UV-A、可視放射までの多岐にわたる。通常は両域、極端なばあいは全域に跨るものもあり、ここでは主たる原因波長が何処にあるかにより分類した。なお紫外放射障害と作用波長を表 1<sup>14)</sup> に示す。

### (2) UV-B と光過敏症

薬剤による光過敏症の中で作用波長を UV-B に持つ例は非常に少ない。スルファニルアミド (sulfanilamide) は UV-B を作用波長とする数少ない光毒性物質の 1 つである。ソラレン類やハロゲン化フェノール類による光過敏症の主たる作用波長は UV-A にあるが、作用波長を詳細に観察すると UV-B 領域でも過敏性を示している例がある。

色素性乾皮症 (Xeroderma pigmentosum : XP)<sup>17)</sup> は乳幼児期より強い光過敏と若年での高頻度皮膚発癌を特徴とする常染色体劣性遺伝病である。健常人に比較し、ダイマーの修復酵素が遺伝的に欠損しているため極微量の UV-B によって反応が惹起される。この疾患は突然変異や悪性黒色腫、基底細胞癌、有棘細胞癌などの様々な皮膚腫瘍が早期に発現する頻度が非常に高い。皮膚癌の発現年齢は一般人が 60 才であるのに対し、XP の患者は平均 8 才であるとの報告がある。特徴は光過敏、皮膚萎縮、ソバカスである。診断がついた後は医師は目を含めた徹底的な光防御と油断なく皮膚癌の発見に努める必要がある。作用波長は 290 ~ 340 nm にある。

多形日光疹 (polymorphous light eruption)<sup>15)</sup> は一般的に成人に発症する。大部分は掻痒を訴え、皮疹は紅斑、丘疹、湿疹様の変化が見られるが、小水疱はまれである。作用波長は UV-B、あるいは UV-B と UV-A の両域にあるとするもの、また UV-A のみとする報告があり一致していない。大量の UV-B 単回照射あるいは 2 - 3 MED の反復照射で皮疹が再現されることから、現在は UV-B 説が有力である。また曝露から皮疹の発現までに数時間から数日の潜伏期が存在する。

太陽放射に曝露された皮膚に局限して生じる蕁麻疹反応が日光蕁麻疹 (solar urticaria) である。日光蕁麻疹は幾つかのタイプに分類され、タイプ I は作用波長が UV-B 領域にあり、被働転嫁試験と逆被働転嫁試験ともに陽性である。

Lupus Erythematosus の作用波長は 290 ~ 330 nm にあり、discoid LE と亜急性の LE がある。LE は UV-B の影響が大であるが、患者によっては UVA にも作用波長を持つばあいもある。その他にも UV-B によって増悪する光過敏症に慢性光性皮膚炎、単純疱疹、ペラグラなどが知られている。

### (3) UV-A と光過敏症

光過敏症を惹起する薬剤の内、光毒性反応に起因する薬剤は、スルフォンアミド類、降圧利尿剤、フェノサイアジン類、テトラサイクリン類、ソラーレン類、コールタール、フェオポーバイドなどがある。この内、スルフォンアミド類を除きほとんどの薬剤が UV-A に作用波長を持っている。

中でもソラレン (psolaren) は UV-A に過敏性を示す代表的な薬剤である。UV-A

により強い紅斑と黒化を惹起し、皮膚免疫を抑制する。これらの作用は、白斑症、アトピー疾患、乾癬症などの光化学療法に利用されている。UV-A によりソラレンが thymine と光結合して DNA 合成を抑制することが判っているが、この DNA 合成の抑制が光過敏性反応の惹起とどの様に繋がるのかまだ十分に解明されていない。しかし種々のソラレンの中で、DNA と光結合しないソラレンは光毒性反応を起こさないことから、何らかの関与が推測されている。

光アレルギー性反応の原因となる薬剤のほとんどの作用波長は UV-A にある。光アレルギー性を示す薬剤は、ハロゲン化フェノールなどの殺菌剤、グルセオフルビンなどの抗真菌剤、抗ヒスタミン剤、蛍光増白剤、クロールサイアザイド系の利尿剤、糖尿病薬、p-アミノ安息香酸などの紫外放射吸収剤、クロールプロマジンなどの精神安定剤、抗ガン剤やムスクアムプレットなどの香料成分と多岐にわたる。

疾患による光過敏症<sup>15)</sup>の作用波長も UV-A にある場合が多い。日光蕁麻疹は発現する現象としての蕁麻疹反応は同じであるが、何故か波長に対する反応性に多様性がある。日光蕁麻疹のタイプIIは UV-A に作用波長があることが知られている。種痘様水疱症 (hydroa vacciniforme)<sup>18)</sup>は小児の太陽放射被曝部、耳介、鼻部、頬部などの顔面、前腕伸側、手背などに小水疱が発生する原因不明の慢性の光過敏症である。UV-B による MED は正常であるが、UV-A を大量に反復照射するか太陽放射に約3時間曝露することにより、皮疹の再現ができる。大量の UV-B の反復照射でも皮疹が再現されるとの報告もあるが、一般的には UV-A に作用波長が存在するとまず考えるべきである。

#### (4) 可視放射と光過敏症

可視放射に反応する光過敏症にポルフィリン症<sup>16)</sup>がある。一般にポルフィリン症の臨床的特徴は太陽放射の被曝部位に紅斑、水疱、びらん、痂皮などが形成され、癍痕やびまん性色素沈着が混在する。皮膚は厚く粗造となり、しわが目立つと言われる。またまれに蕁麻疹や紫斑などの皮疹も生じる。

光過敏症を呈するポルフィリン症の中で最も多いのが晩発性ポルフィリン症 (porphyria cutanea tarda: PCT) と骨髄性プロトポルフィリン症 (erythropoietic protoporphyria: EPP) である。前者は飲酒歴の長い中年以降の男性に発症する例が多い。原因はポルフィリン代謝系内でウロポルフィリノーゲン デカルボキシラーゼ (uroporphyrinogen decarboxylase) の先天的ないし遺伝的活性低下が潜在し、これにアルコールなどの発症因子により誘発されるものと考えられている。治療にはアルコール、バルビツール、スルフォンアミドなどの誘発あるいは増悪する薬剤の使用を禁止し、皮疹の再発を防止するためにサンスクリーンが必須である。

後者はヘム合成酵素活性の低下が原因で、赤血球、プラズマおよび糞便中に過剰なプロトポルフィリンが検出される。この疾患のばあいβ-カロチンの内服療法が有効との報告があるが、決定的な治療法がないので増悪因子ないしは発症因子として知られるアルコールやバルビツール、スルフォンアミドなどの薬剤の服用は避けなければならない。

ポルフィリン症の作用波長は400～410 nmの可視放射にある。そのためポルフィリン症の患者は紫外線散乱剤により光防御をするかあるいは適当な衣服で太陽放射を防御しなければならない。

日光蕁麻疹<sup>15)</sup>のタイプⅢとタイプⅣは400～500 nmの可視放射に作用波長があるが、前者は被働転嫁試験と逆被働転嫁試験ともに陰性であるが、後者は被働転嫁試験のみ陰性で、逆被働転嫁試験は陰性である。タイプⅤは作用波長は280～600 nmで、UV-B、UV-A、可視放射の広範囲の領域に渡っている。またタイプⅥは400 nmに限局した作用波長を持ち、プロトポルフィリンを原因とする。

#### 4.4 光防御

福田<sup>19)</sup>は光防御を考える上での重要なことは、①太陽紫外放射が皮膚に及ぼす様々な障害の中で、防御剤の対象とする皮膚障害を明確にすること。そして②皮膚障害によって異なる作用波長域を決定あるいは推測し、把握すること。最後にそれらを踏まえて③皮膚の何処で、どの様に防御するかを決めることであるとしている。これにより防御剤が具備すべき条件が必然的に明確となり、その有効性の検定のための的確な実験モデルの開発と選択が可能になるとしている。

さらに防御剤を機構の面から分類し、①紫外放射が皮膚内部に新入するのを皮膚表面で防御するもの。②皮膚内部に侵入した紫外放射をターゲット細胞の周囲で防御、消去するもの。③惹起された紫外放射障害の進行の防御あるいは修復するものの3つに分類している。ここでは便宜上、①の観点からの光防御に焦点を絞って報告する。

##### 4.4.1 サンスクリーン

サンスクリーンには紫外線吸収剤と紫外線散乱剤の2種の紫外線防止剤が配合されている。紫外線吸収剤は有機化合物で母核の構造、分子内官能基などの違いにより、吸収する波長域と吸光係数が異なる(表2)。紫外線吸収剤を母核により、PABA誘導體、桂皮酸誘導體、サリチル酸誘導體、カンファー誘導體、ウロカニン酸誘導體、ベンゾフェノン誘導體、ジベンゾイルメタン誘導體、複素環誘導體、その他の9分類している<sup>19)</sup>。

紫外線散乱剤は酸化チタン、亜鉛華、酸化ジルコニウム等の無機粉体で、紫外線吸収剤に比較し、特異な吸収波長はないが、紫外放射から赤外放射までの広範囲の放射を比較的均一に遮断する。紫外線散乱剤は紫外線防止効果と安全性の面で優れた利点を持つが、多量にサンスクリーンに配合されると、皮膚に使用したときの着色による違和感があり男性や子供には好まれない。

サンスクリーンの剤型はクリーム、乳液、ジェル、ローション、オイル、スティック、パウダーファンデーションなど多岐にわたる。最近のサンスクリーンにはUV-Aの防止効果とUV-Bの防止効果が表示され、紫外線防止効果に優れたものが市販されている。

表2 紫外線吸収剤の種類と分類<sup>1)9)</sup>

分類	基本構造式	代表名	吸収波長
PABA誘導体 12種		PABA, E-106, E-506 E-507, Amerscreen-P	B
桂皮酸誘導体 25種		ネオヘリオバン、パルソールMCX Cinoxate、 サンガードB	B
サリチル酸誘導体 22種		オクチルサリシレート ホモサレート	B
カンファー誘導体 6種		Eusolex 6300 3-Benzyliden-Camphor	B
ウロカニン酸誘導体 12種		ウロカニン酸 Parasonal	B
ベンゾフェノン誘導体 18種		ASL-24, ASL-24S Uvinul D49	A, B
ジベンゾイルメタン誘導体 3種		Parsol-A, Parsol DAM Eusolex 8020	A
複素環誘導体 11種		チヌピン系	A, B
		Eusolex 232, Witisol	B
その他		1) ベンズアルファタライド 2) Lawson 3) DHA	A, B }併用

#### 4. 4. 2 サンスクリーンのUV-A防止効果の測定と表示 (表3)

UV-A 防止効果の測定方法は、光過敏症を惹起する薬剤の内、UV-A に作用波長を持つ薬剤を用い、人工的に UV-A に反応するようにしたヒトあるいは実験動物の皮膚反応を指標とする方法、健常な皮膚の UV-A による反応（即時型黒化と紅斑、遅延型黒化と紅斑など）を指標とした方法に加え、薄膜にしたサンスクリーンの透過率を測定する方法などが報告されている。

日本で市販されているサンスクリーンの UV-A 防止効果は、日本化粧品工業連合会で 1996 年に設定した「UV-A 防御効果測定法基準」に則って測定され、測定の結果によって PA +、PA ++、PA +++ の 3 分類で表示（+ の数が多いほど UV-A 防止効果が大きい）されている。

本測定は反応の指標に UV-A を照射して 2～4 時間の間に皮膚に誘発される持続型即時黒化反応 (PPD) を使用する。被験者は肌タイプ II～IV に相当する健常人を 10 名以上用いることとし、被験部位は均一な皮膚色を持つ背部を使用する。

測定光源の放射波長は UV-A 領域の連続スペクトルを持ち、UV-AII が UV-A 中に 8～20% 含まれるものを使用する。被験部位に一定量のサンスクリーンを塗布したときと塗布しなかったときの UV-A によって PPD を惹起した最少の紫外放射量 (MPPD) を求める。この MPPD の比から PFA (protection factor of UV-A) を計算し、PFA が 2～4 の範囲は PA +、4～8 が PA ++、8 以上のばあいには PA +++ と表示される<sup>20)</sup>。

表3 日本化粧品工業連合会の UV-A 防御効果測定法基準と SPF 測定法基準の概要

	UVA 防止効果測定法基準	SPF 測定法基準
被験者 被験者数	肌タイプⅡ, Ⅲ, Ⅳ 最小 10 名	肌タイプⅠ, Ⅱ, Ⅲ
標準サンプル	3% パラメトキシケイ皮酸 2-エチルヘキシル, 5% 4-tert-ブチル-4'-メトキシジベンゾイル メタン配合クリーム	8% ホモサレートローション
塗布量 塗布面積 試料塗布後の待ち時間	2 mg/cm <sup>2</sup> or 2 μl/cm <sup>2</sup> 最小 20 cm <sup>2</sup> 15 min	
光源	UVA 領域に連続スペクトルを有する人工光源 UVAⅡ to UVA : 8~20%	UVB 領域が太陽光に近似したキセノン アークソーラーシミュレーター
照射野 紫外線増量幅	最小 0.5 cm <sup>2</sup> 最大 25%	
判定時間 観察指標	UVA 照射 2~4 時間後 持続型即時黒化	照射 16~24 時間後 紅斑
PFA/SPF	$\text{PFA} = \frac{\text{MPPD in protected skin}}{\text{MPPD in unprotected skin}}$ Minimal Persistent Pigment darkening Dose (MPPD)	$\text{SPF} = \frac{\text{MED in protected skin}}{\text{MED in unprotected skin}}$ Minimal Erythema Dose (MED)
表示	PFA PA + 2 ≤ < 4 PA 表示は SPF 表示 PA ++ 4 ≤ < 8 と合わせて行う PA +++ 8 ≤ PA : Protection Grade of UVA	測定で得られた平均 SPF (切り捨て整数)

PFA : Protection factor of UVA

SPF : Sun Protection Factor

#### 4.4.3 サンスクリーンの UV-B 防止効果の測定と表示 (表3)

サンスクリーンの UV-B 防止効果は SPF (sun protection factor) で表される。SPF は、肌タイプⅠ~Ⅲの健常人の背部に UV-B を照射したときに惹起される僅かな紅斑を指標に、サンスクリーン塗布部位 MED / 未塗布部位 MED から計算される。ここで MED は僅かな紅斑を惹起する最少の紫外放射量と定義する。即ち、SPF はサンスクリーンを使用することにより何倍の UV-B を防止することができるかを示す指標である。日本のばあい 1992 年に日本化粧品工業連合会 SPF 専門委員会が定めた測定法基準に則って測定が行われている<sup>2)1)</sup>。この SPF は日本、米国、欧州、オーストラリア、ニュージーランドなど多くの国々のサンスクリーンに表示されている。

#### 4.4.4 サンスクリーンの効果

サンスクリーンが紫外放射によって惹起される様々作用を効果的に防御するとの実験的な報告は非常に多い。この観点でのサンスクリーンの効果は誰でも認めるところであるので、ここでは主にヒトでの効果に焦点を当てた。まず最初にサンスク

リーンが紫外放射により惹起される急性の紅斑と黒化を防御することは、サンスクリーンの SPF と PFA の測定実験で明らかである。

紫外放射の慢性作用をサンスクリーンが防御するか否かを検証するのは非常な困難が伴う。しかし幾つかの推計学的、疫学的研究が報告されている。太陽紫外放射は生後数ヶ月から始まり、死を迎えるまで量の多寡を別にすれば誰でも継続的に被曝している。人間の一生の中で子供のときが最も紫外放射を被曝する。そのため子供のときのサンバーンはメラノーマと NMSC 皮膚癌のリスクの増加と密接に関連しているため、避けるべきであることが常識化してきた。もし子供が 18 才まで SPF 15 のサンスクリーンを継続使用すれば NMSC の発現を約 78% 減少させることができるし、SPF 7.5 のサンスクリーンを生涯使用するとすれば NMSC の発現を約 97% 減少させることができるとの生物統計学的モデルによる試算がある<sup>22)</sup>。昨年からの母子手帳から赤ちゃんの日光浴の勧めが削除されたのは記憶に新しい。

最近、サンスクリーンの効果をヒトで臨床的に検証しようとする壮大な実験<sup>23)</sup>がオーストラリアで行われた。この実験には 40 歳以上の 588 人以上の志願者を、SPF 17 のサンスクリーンを毎日使用する群と基剤クリームを毎日使用する群の 2 群にわけ、夏季 (1991 年 9 月から 1992 年 3 月) の 7 ヶ月間、頭部、首、前腕と手に使用させたところ、前者の群は後者の群に比較し、有意に新たに出現する日光性角化症の数が少なかった。また日光性角化症は有棘細胞癌のプリカーサーであるので、継続的なサンスクリーンの使用が長期間を経て発生する皮膚癌のリスクを恐らく減少させると結論した。

#### 4. 4. 5 光過敏症に対する光防御

光過敏症に関わらずすべての疾患の治療の原点は原因の除去にある。薬剤による光過敏症は原因薬剤の使用を中止すれば光過敏症は時間の経過と共に改善するが、薬剤の代替ができないときや原因薬剤の使用を中止できないばあいに光防御が重要な意味を持つ。最も深刻な問題は疾患による光過敏症である。疾患に起因する多くの光過敏症の原因は不明で、また仮に解明されていても遺伝子の変異など、治療方法が根本的に確立されていないばあいが多い。必然的に光過敏症を惹起する光放射からの光防御が患者の生命と正常な社会生活を維持する上で重要な意味を持つ。市販のサンスクリーンは健常人を対象に設計されているが、紫外放射防止機能は飛躍的に向上している。

UV-A と UV-B の防止効果に優れたサンスクリーンは、実験的にも種々の光過敏症の患者の MED を有意に延長することができ、サンスクリーンの使用は光過敏症患者に正常な日常生活を送ることを可能にする。内服薬剤による光過敏症、光アレルギー性接触皮膚炎、湿疹型光過敏症、日光蕁麻疹、SLE、種痘様水泡症等の 27 例の光過敏症患者の外出時に UV-A と UV-B の防止効果に優れたサンスクリーンを使用せしめたところ、74.1% に相当する 20 例に有効性を認めたとの報告<sup>24)</sup>がある。無効な症例は 4 例で、この内 3 例が小児で、日焼け止め剤の使用が励行されたか否か問題が残るとしている。残る 3 例は薬剤過敏症で、比較的短期間に皮疹は治癒したが、薬剤の中止と同時にサンスクリーンの使用試験を開始したため、いず

れの原因で治癒に至ったか判定できない例であった。最近、UV-B と UV-A の防止効果を持つサンスクリーンの使用が4週間以上の期間、LE の症状の程度を減少させたとの報告がある<sup>25)</sup>。通常、薬剤による光過敏症は、原因薬剤の中止により改善が図られる。しかし、爪白癬の治療薬グリセオフルビンによる光過敏症は、しばしば高 SPF サンスクリーンを併用することにより、白癬の治療を継続することができる。この様に光過敏症患者にとってのサンスクリーンは、単に予防と言う観点での有用性に止まらず、しばしばサンスクリーンの使用が最適な治療行為の選択とその継続を可能にする。

(福田 實)

#### 参考文献

- (1)福田 實：紫外線紅斑の作用曲線、太陽紫外線防御研究委員会学術報告、3:p.38-45,(1993)。
- (2)富田 靖：太陽紫外線と皮膚の色素沈着、太陽紫外線防御研究委員会学術報告、8:p.1-5,(1998)。
- (3)Urbach F,Epstein JH,Forbes PD:Ultraviolet carcinoma genesis: experimental, global and genetic aspects. Sunlight and Man, (Pathak MA ,Harber LC, Seiji M,and Kukita A eds.), University Tokyo Press,pp.259-283,(1974)。
- (4)Blum HF: On the mechanism of cancer induction by ultraviolet radiation. J. National cancer institute, 11: 463-495, (1950)。
- (5)市橋正光：太陽紫外線と皮膚癌、太陽紫外線防御研究委員会学術報告 8:p.17-23,(1998)。
- (6)芋川玄爾：皮膚光老化と弾性繊維の代謝及び微細構造の動態、太陽紫外線防御研究委員会学術報告、8:pp.7-16,(1998)。
- (7)森、富田、芋川、松永：美白一しみは消せるか？皮膚科診療プラクティス5：スキンケアの実際(田上、宮地、滝川編集)、文光堂、pp.38-47,(1999)。
- (8)上田正登：光発癌、第98回日本皮膚科学会総会資料集、p.49-50,(1999)。
- (9)福田 實：日本人の肌タイプ調査結果、化粧品誌：15、p.103-105,(1991)。
- (10)Nagashima H,Hanada K,Hashimoto I:Correlation of skin phototype with facial wrinkle formation. Photodermatol Photoimmunol Photomed.,15:p.2-6,(1999)。
- (11)福田 實：紫外線防御能の評価と表示方法、粧技誌、31:pp.385-395,(1997)。
- (12)石原 勝ほか：化粧品皮膚炎および女子顔面黒皮症の診断、西日皮膚、41:pp.426-439,(1974)。
- (13)福田 實、長沼雅子：サンスクリーン、加齢と皮膚(高瀬、戸田、石原、森川編集)、清至書院、pp.369-381,(1986)。
- (14)花田勝美、新井清一：サンケアーサンケアの対象となる皮膚障害、スキンケアの実際(皮膚科診療プラクティス、宮地良樹、滝川雅浩編集)、文光堂、p.112-120,(1999)。
- (15)堀尾 武：光線過敏症、(佐藤吉昭編集)、金原出版、pp.63-98,(1983)。

- (16)三浦、西抜、熊井：光線過敏症、(佐藤 吉昭編集)、金原出版、  
pp.99-112,(1983).
- (17)佐藤吉昭、市橋正光：光線過敏症、(佐藤吉昭編集)、金原出版、  
pp.113-144,(1983).
- (18)市橋正光：光線過敏症、(佐藤吉昭編集)、金原出版、pp.144-157,(1983).
- (19)福田 實：防護剤の立場より、現状と将来の可能性を探る、太陽紫外線防御  
研究委員会学術報告、1、p.106-109、(1991).
- (20)福田 實：サンスクリーンの UVA 防御効果の測定、フレグランスジャーナル、  
3 : pp.21-30、(1996).
- (21)福田 實：日本化粧品工業連合会の SPF (日焼け止め指数) 測定法基準、  
日皮協ジャーナル、28、pp.102-110、(1992).
- (22)Stern RS, Weinstein MC, Baker SG:Risk reduction for  
non-melanoma skin cancer with childhood sunscreen use.  
Arch Dermatol,122:p.537,(1986).
- (23)Thompson SC, Jolley D, Marks R: Reduction of solar  
keratoses by regular sunscreen use、N Engl J Med :  
329(16)、p.1147-1151、(1993).
- (24)堀尾、滝川、伊藤、市橋：光線過敏症に対するサンスクリーン剤 (インターセプ  
ト) の効果、皮膚科紀要、83:p.381-386、(1988).
- (25)Callen JP, Roth De, McGrath MA, Dromgoole SH: Safety and  
efficacy of a broad spectrum sunscreen in patients with  
discoid or subacute cutaneous lupus erythematosus. Cutis  
1991;47,p.130-136,(1991).

## 5. 光放射と生理

### 5.1 光放射環境と睡眠・覚醒リズム

#### 5.1.1 はじめに

寝不足で職場の机に向かうと、昼食後1時間から2時間すると、非常に眠くなったり、夕方になると耐え難い眠気におそわれて仕事への集中度が下がったりすることは誰れもが経験することである。睡眠という人間の意識行動は、我々の日常生活に密接に関係していて、ちょっと不足しても意識していないところでその影響が現れている。このような軽度の不眠が長期間続くと、人間の行動に重大な影響をあたえることも多い。最近の我が国の疫学調査によると、国民の5人に1人が不眠傾向で、自分の睡眠に何らかの不満を感じているという結果がでている。米国の調査では、不眠が原因で起こる交通事故、医療事故、原子力発電所等にあるような長時間に及ぶ器機の監視作業にみられる信号の誤認による事故が我々の想像している以上に多いことが報告されている。また、そのような事故による社会的損失も大きいことが解ってきた。このように、睡眠の問題は個人の健康の問題である同時に現代社会が抱える大きな社会問題でもあるという認識を強く持つ必要がある。

この睡眠に関する社会問題の原因として考えられているのが、大都市における通勤時間の延長による睡眠時間の短縮、社会経済活動のグローバル化による生活リズムの乱れ、そして、都市活動の24時間化による夜間の昼間化等である。これらに最近の社会経済活動の悪化が加わり、日本国民を取り巻く睡眠環境は非常に深刻になりつつある。これらの原因の中で、社会経済活動のグローバル化による生活リズムの乱れ、都市活動の24時間化による夜間の昼間化の問題は、我々の生活空間の光環境と照明環境が密接に関与していると考えられる。社会経済活動のグローバル化による生活リズムの乱れの問題は、企業活動や社会活動がグローバル化すると、当然のことであるが、24時間体制で身の回り事柄が動くようになり、人間が本来持っている明るい光に満ちている昼間に活動して光がない夜間に休むという昼行性動物の行動のリズムの大原則に反した生活をしいられるようになる。光がない夜間に働いたり、昼間も夜も働くというような働き蜂のような生活を強いられ、身体的にもまた精神的にも益々忙しくなる。また、心理的な側面から、このグローバル化を考えると、一昔前では夜はみんなが休んでいて安心して寝れたが、現在では東京で自分が寝ているときにでも、ニューヨークやハリでは活発に物事が動いている。このような環境では安心して休むことができない。この安心こそが睡眠の質を確保するためには非常に重要な心理的基盤であるが、グローバル化が進むとこの安眠の基本的な条件が満たされなくなる。また、都市活動の24

時間化による夜間の昼間化の問題は、夜間の人工の照明環境がそれを可能にしている。この現象は本来昼行性動物である人間を夜行性動物化させるようなもので、本来の我々人間が有する睡眠覚醒リズムという意識の生物リズムの機構に直接的にまた間接的に大きな影響を及ぼしているものと考えられる。

このような人間の睡眠行動と光環境の問題を理解するために、光と睡眠行動の関係に基本的な理解と最近の新しい知見をここに紹介する。

### 5.1.2 光放射環境と睡眠・覚醒リズム

睡眠と覚醒という人間の意識活動は外見上約 24 時間という周期をもつ周期現象であり、この現象を発信している時計が脳の中に存在する。このような睡眠と覚醒が 24 時間の周期で繰り返される意識の振動現象を睡眠覚醒リズムと呼ぶ。またこの振動現象を司る時計機構を体内時計と呼ぶ。この時計は、左右の視神経が交叉する視交叉という所の上部に位置し、そこには非常に限局した神経核があり、ここを視交叉上核 (SCN) と呼ぶ。ここを選択的破壊すると、24 時間の睡眠覚醒リズムが消失し、リズム性が失われ、人間の睡眠覚醒リズムは不規則な振動現象となる。

(図 1 参照)

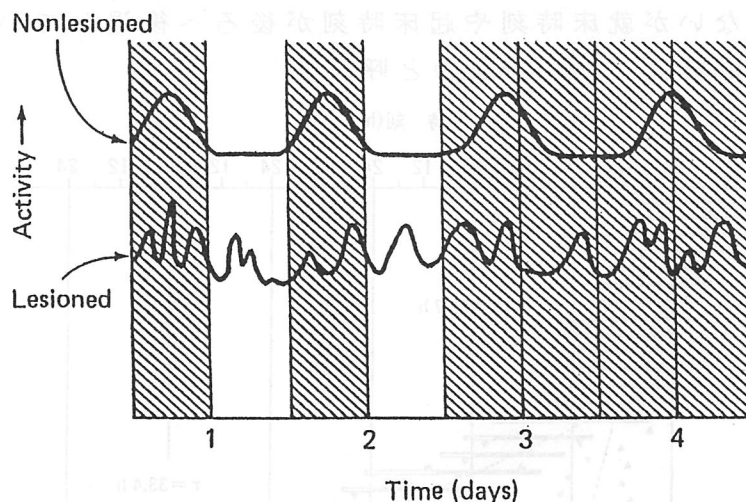


図 1 . 体内時計と視交叉上核 (SCN)

ラットの活動休止リズムを示す。上段は健康なラットで斜線を施した暗期に活発に行動し、白いところの明期では休息していることが分かる。ラットの活動は外界の光の明暗情報に合わせて変化している。これに対して下段の図は SCN を破壊したときに見られるラットの活動である。明暗情報とは無関係に変化している。このことから、SCN が体内時計の中核であることが理解できる。

一般に生物の行動に関する振動現象を扱う分野を時間生物学 (クロノバイオロジー: Chronobiology) という。時間生物学では、生物の振動現象をその

周期の長 ( $\tau$ ) さでリズムを分類していて、約 24 時間 ( $\tau = 24$  hrs) の振動現象を約一日のリズムという意味で概日リズムあるいはサーカディアンリズム (Circadian Rhythm) と呼ばれる。人間の意識活動に関する概日リズムには興味深い特性があることが、最近の研究で明らかにされつつある。その一番大きな発見の一つは、概日リズムの周期に関してである。我々が普段の生活から時間というものを意識しなくなったら、どのような生活をするのであろうかという素朴な疑問に答えを出したのがドイツのアショフ (Ashoff J) という生物学者である。彼は、時間の手がかりになるようなものを我々の生活から一切なくしたら人間はどのような行動を示すかという実験を行った。彼は、光の明暗という自然の時計、物理的な時間を刻む機械時計また電子時計、そして運動や食事という社会的時計から被験者を解放するような生活環境を洞窟の中に作り、そこで自由に暮らし、そのときの睡眠覚醒リズムを調べる実験を行った。その結果、被験者の睡眠覚醒リズムの周期 ( $\tau$ ) が 24 時間ではなく、25 時間に近かったという興味深い知見を発見したのである。図 2 にそのときの実験結果を示したが、これを観ると、被験者が毎日就床時刻や起床時刻が 1 時間から 1 時間半ずつ後退していることが読みとれる。つまり、毎日被験者は 1 時間から 1 時間半夜更かし、それだけ遅く起きていることになる。つまり睡眠時間の長さは変わらないが就床時刻や起床時刻が後ろへ後退している。この現象をリズムの自由継続 (Free Running) と呼ぶ。

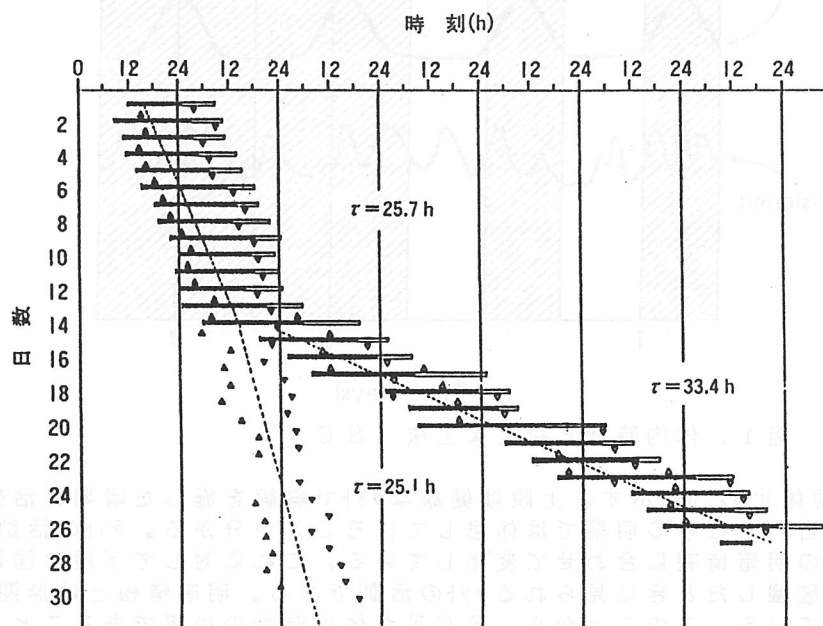


図 2. 人間の睡眠覚醒リズムと体温リズムの関係

時間情報が絶たれると我々人間は 25.7 時間の周期で睡眠と覚醒という意識状態を繰り返す。しかし、この隔離された条件下で長期間過ごすと、睡眠覚醒リズムと体温リズムは脱同期する。

では、人間の概日リズムの体内時計の周期は 25 時間なのに、なぜ我々の社会生活は 24 時間の周期で行動できるのかという問題が起こる。この問題に答えを与えた研究が光パルスの研究である。北海道大学の研究グループは、被験者を隔離実験室で長期間生活させ、被験者の睡眠覚醒リズムが自由継続状態になったことを確認して、被験者の就床前に強力な光を数時間与えると、就床時刻と起床時刻はさらに後ろへ十数分程度後退するが、起床後に同じような光パルスを与えると逆に就床時刻と翌朝の起床時刻が 1 時間から 1 時間半程度前進することを（図 3 参照）発見した。

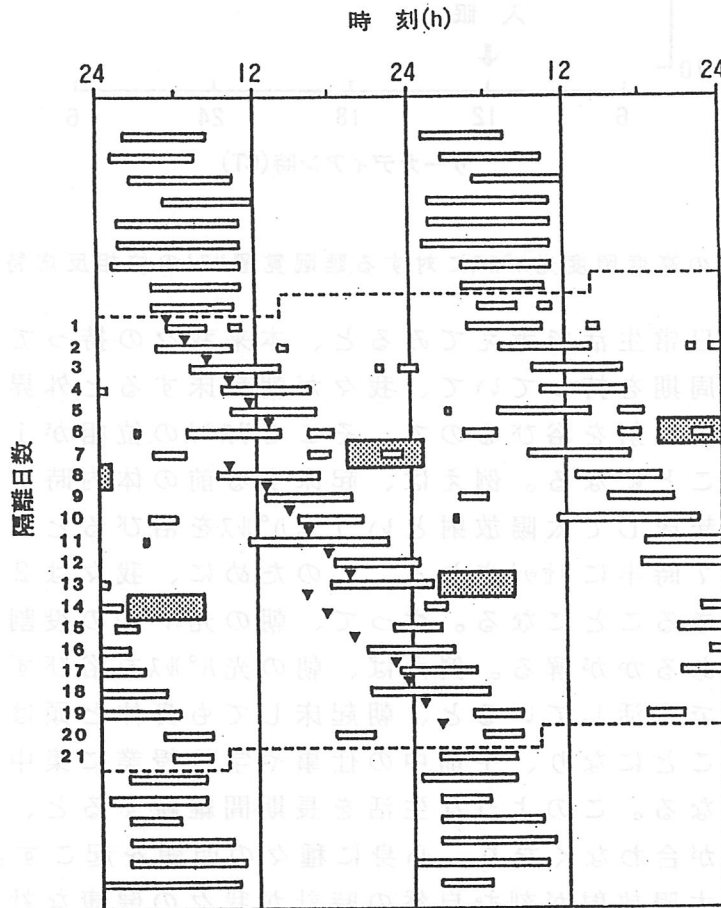


図 3 . 隔離実験室での光パルスによる睡眠覚醒リズムの位相変位

自由継続をはじめ 7 日目の主観的な朝に起床してから数時間の光パルスを暴露したときに睡眠覚醒リズムと体温リズムに生じたリズムの位相の前進を示した。白い横棒が睡眠を示し、網掛けの長方形が光暴露を示す。下向きの三角形は体温の最低点を示す。

これは、昼間の太陽放射のように非常に強い光を起床直後に浴びるとリズムの位相が非常に短時間の内に前進することを示している。この現象を概日リズムの光パルスに対する位相反応とよぶ。この現象をまとめたものが光パルスによる概日リズムの位相反応曲線である。（図 4 参照）

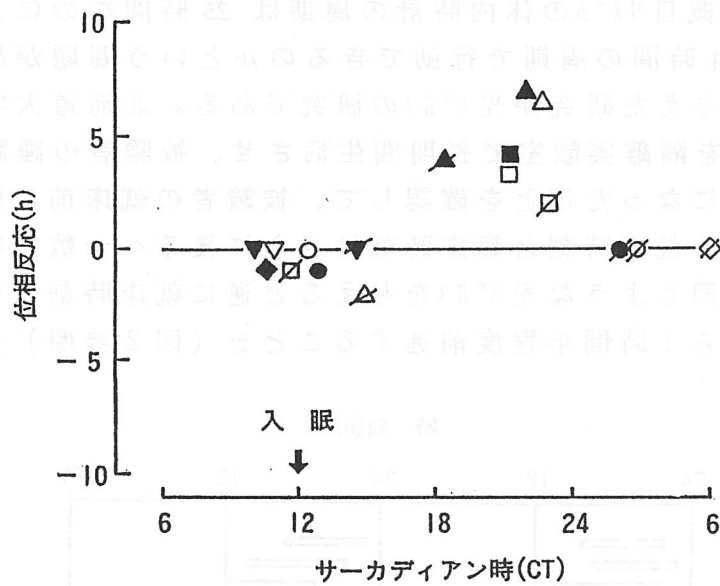


図4. 人間の高度照度光パルスに対する睡眠覚醒リズムの位相反応特性

これを我々の日常生活で考えてみると、本来我々の持っている体内時計は25時間の周期を持っていて、我々が朝起床すると外界から朝日という形で強い太陽放射を浴びるので、そこでリズムの位相が1時間から1時間半前進することになる。例えば、起床する前の体内時計が6時であっても、実際に起床して太陽放射という光パルスを浴びると、同時に体内時計が7時とか7時半にリセットされる。このために、我々は24時間という周期で生活できることになる。従って、朝の光パルスの役割を果たす太陽放射が重要であるかが解る。例えば、朝の光パルスを浴びずに単に社会的な時計にだけで生活していると、朝起床しても身体と頭はまだ明け方であったりすることになり、午前中の仕事や学校授業に集中できなかつたりすることになる。このような生活を長期間継続すると、社会生活に自分の生活リズムが合わなくなり、心身に種々の問題を起こす。

このように、太陽放射が刻む自然の時計が我々の健康な社会生活にとって非常に重要な役割をはたしていることが理解できる。

### 5.1.3 体温の概日リズムと睡眠覚醒リズム

昼行性動物は昼間活動し、夜間休息をとり、夜行性動物はその逆の行動をとるが、このような行動のリズムを活動休止リズム (Rest Activity Cycle) という。人間の睡眠覚醒リズムも典型的な活動休止リズムである。動物は活動期には体温が上昇し休止期には低下する。この体温リズムは活動休止リズムと密接な関係を持っており、人間の睡眠覚醒リズムも体温リズムと密接な関係にある。普通の規則正しい生活をしていれば、これらのリズムには強い

相互関係があり、人間の活動期にあたる覚醒期には体温は上昇し、休止期にあたる睡眠期には低下する。しかしこのような相互関係は社会的な時計と体内時計が同期しているときに起こる現象であることがわかっている。人間をあらゆる時間情報から隔離してしまうと、先ほど述べたように睡眠覚醒リズムには自由継続という現象が観測される。これを数ヶ月に渡って継続すると、睡眠覚醒リズムの周期期が30時間というように非常に長くなり、かなり複雑なリズム現象となる。しかし、体温リズムだけは25時間という周期を維持し続ける。(図2参照) このように睡眠覚醒リズムと体温リズムの同調関係が崩れることを内的脱同期というが、このような状況になると、人間の精神状態に少なからず影響を及ぼすと言われている。したがって、健康な生活を維持するには、体温のみならずホルモンの分泌リズムにも概日リズムが観られ、これらのリズムと睡眠覚醒リズムとの同期が非常に重要である。このような同期現象をつりだしている大きな要因の一つが光り環境である。一日薄暗いところで生活すれば光が作る明暗サイクルの振幅が低くなるので、リズムは自由継続する確率が高くなり、種々の概日リズム間の同期がうまく取れなくなる可能性が高くなる。朝の光パルスのようにあるリズム位相での強い光暴露は種々のリズムの同期を強化する働きがあるものと考えられる。

リズムの強化という観点でリズムの安定性を考えると、太陽放射のような光にはリズムの振幅を大きくするはたらきがあるようである。鬱病の治療で光療法という治療法があるが、気分の優れない(鬱傾向)の人に明るい光の前に座って、その光を目に入れると、気分が高揚し、鬱傾向が軽減されることが報告されている。人間の精神状態特に気分は体温の概日リズムでみられるように、リズムの振幅と密接に関係している。(図5参照)

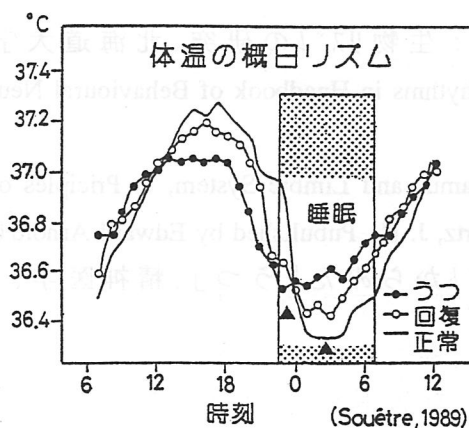


図5. 体温の概日リズムと鬱気分

実線は健康な人の体温の概日リズム、黒丸付き線は鬱気分が高い時のもの、白丸付き線は鬱気分から回復したときのもの。鬱になると、体温の概日リズムの振幅が現象し、体温の最低点が位相前進する。

気分が鬱傾向になると振幅が低下し、改善すると振幅が回復し大きくなる。このような相関関係は、気分が変化するからリズムの振幅が変わるのか、リズムの振幅を制御すると気分が変わるのかは未だ不明であるが、少なくとも昼間の明るい光を暴露すると、気分が高揚させ、体温リズムの振幅も大きくする。このように昼間に明るい光環境に身体をおくことが、リズムの安定性と精神状態の改善に関係していることはかなり確からしい。さらに、リズムの安定性と昼間の気分の改善は昼間の活動量にも反映し、昼間の活動量が大きくなる。この活動量の増加が夜間の睡眠の質を高め、昼間は活動し夜間は完全に休止をするという振幅の高いメリハリの効いた睡眠覚醒リズムがえられるものと考えられる。

#### 5.1.5 おわりに

このような観点から、我々を取り巻く光環境を考えてみると、大都市の24時間化という現象は、昼間が長くなり夜が極端に短くなることであり、さらには一人の人間が光を浴びる光暴露量が昼間と夜間とでは、その差が明確でなくなることを示している。これは、まさに光の明暗サイクルの振幅の低下を意味し、これが人間の行動に影響し、昼間（明期）活動し夜間（暗期）休止する活動休止リズムの振幅を低下させている可能性が高い。このリズムの振幅の低下は体温リズムと睡眠覚醒リズムにも反映され、睡眠の質の劣化と気分の低下といったことが顕在化してくる。このような意味からも都市の24時間化が引き起こす都市生活者の光環境はかなり重大な問題を引き起こす可能性を秘めているものと考えられる。

(小林敏孝)

#### 参考文献

- (1)本間、本間、広重著：生物リズムの研究、北海道大学図書刊行会、(1989)。
- (2)Aschoff, J.: Biological Rhythms in Hnadbook of Behavioural Neurobiology, published by Plenum (1981)。
- (3)Kupfermann, I.:Hypothalamus and Limbic System, in Priciples of Neural Science ed by Kandel, E. R. and Schwartz, J. H., Pubulished by Edward Arnold (1981)。
- (4)小林敏孝：生体リズムからみた「うつ」、精神医学、32巻12号 pp.1367-1374 (1990)。

## 5.2 睡眠障害に対する光放射の応用

### 5.2.1 はじめに

近年の時間生物学の発展により生体の内因性リズム機構についての知見が蓄積され、ヒトにおいても行動、睡眠、内分泌機構、自律神経機構などの日内変動が生体時計の発振する概日リズムにより支配されていることがわかった。外界から完全に隔離した実験室(Isolation unit)で強い光を浴びないようにして、被験者を長期にわたって生活させると、睡眠障害、体温などの生体リズムの周期は約 25 時間を示し、実際の 1 日より長いことがわかった。こうした実験条件下で対象者にとっての朝の時間に高照度光を浴びることにより、本来 24 時間より長い周期を持つ概日リズムの位相を前進させて同調を達成している。一方、夜の入眠前の時間帯に高照度光を浴びると生体リズムが遅れ、次の入眠時刻が遅くなることがわかった。ヒトはこのように光により、睡眠の時間帯を調節している。また、光以外にも学校や会社での対人接触など社会的活動による社会的同調因子あるいは三度の食事、身体的運動といった要素が生体リズムを整える補助となる。

われわれは日常生活では生物時計の存在を意識することは少ない。これは通常の哺乳類と比べヒトでは睡眠・覚醒リズムに対する生物時計の支配が強く、睡眠のスケジュールを意志的に変えることができるためである。しかし、生体リズムが昼夜の明暗周期と大きくずれたまま通常的生活を送ろうとすると種々の症状が起こる。生体リズムが昼夜逆転していると日中に眠気や易疲労感が出現すると同時に夜間の不眠が出現する。また、昼夜逆転した状態でないと生活できなくなる。概日リズム睡眠障害(circadian rhythm sleep disorders)はこうした生体リズムの同調の不良による睡眠障害を示す一群である。

このような睡眠障害の治療として光放射を応用した高照度光療法が有効であることがわかってきた。ここでは、概日リズム睡眠障害に対する高照度光療法を紹介する。

### 5.2.2 概日リズム睡眠障害

概日リズム睡眠障害は 1990 年に睡眠障害国際分類(International Classification of Sleep Disorders)<sup>1)</sup>により①夜勤や時差地域への急速な移動など内因性生体リズムに逆らったスケジュールで生活することによって生じる睡眠障害(時差症候群、交代勤務性睡眠障害)、②内因性生体リズム自体の変調により睡眠と覚醒スケジュールが望ましい時間帯から慢性的にずれてしまう睡眠障害(睡眠相後退症候群、非 24 時間睡眠・覚醒症候群、睡眠相前進症候群、不規則睡眠・覚醒リズム)に分けられている。

#### (1) 時差症候群

5 時間以上の時差のある地域をジェット機で急速に移動すると睡眠・覚醒障害、疲労感、精神作業能率の低下、胃腸障害など、さまざまな症状が発現

し、このような症状が消失して、到着地の生活に順応するまでに数日を要する。成因は生活時間が著しくずれた時に体内時計がその生活時間のずれに同調できなくなり、生活時間との間に非同調化現象(desynchronization)を起こし、さまざまな心身の不調和をひき起こすことによる<sup>2)</sup>。

治療と対策：到着地の生活時間に早く適応するために生体時間を昼夜の環境に合わせる。このために日中に高照度人工光や自然光を浴びる、運動をする方法がある。

## (2) 交代勤務症候群

現代社会では夜勤や変則的な勤務者が増加している。このようなシフト勤務者は通常の睡眠・覚醒時間帯からずれた不規則な労働や昼夜逆転を余儀なくされた生活では生体リズムの乱れが生じ、心身の不調和を起こす。シフト勤務者には疲労感、胃腸障害、睡眠障害がみられる。睡眠障害の内容としては持続時間が短く、中途覚醒が多く、熟眠感が得られないなどである<sup>2)</sup>。

治療と対策：交代勤務の勤務体制により常夜勤、不定期、ローテーションなどがあり、それぞれ異なった治療対策が考えられるべきである。原則的には生体リズムの乱れあるいは生体リズムと外部リズムの非同調をいかにして最小限に食い止められるかということになる。乱れた生体リズムの矯正に対し、高照度光療法は有力であり、夜間勤務中に用いて夜勤に都合の良い生体リズムを整える方法もある<sup>3)</sup>(図1)。このような夜間勤務中の高照度光は常夜勤者には都合がよいが、ローテーション勤務者は頻回に生体リズムを変えてしまうことではなく、通常的生活スタイルからはずれないように注意する方がよい。

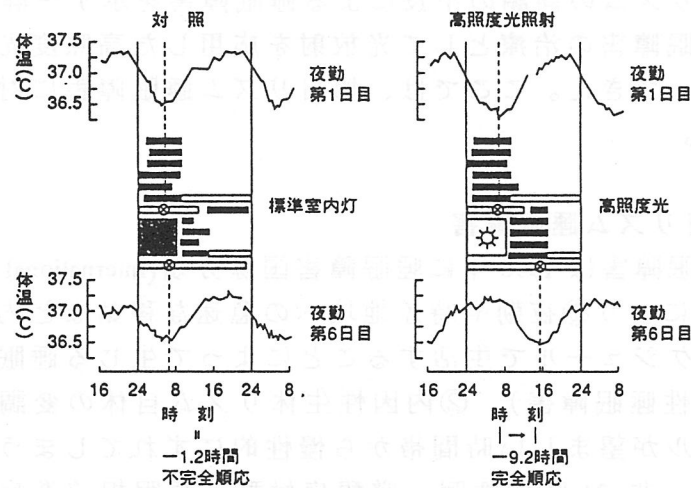


図1 交代勤務後の睡眠の光条件による違い

左は、夜勤中照明を標準室内灯ですごした場合(対照)、右は夜勤の照明を高照度光にした場合(高照度光照射)の夜勤後の朝睡眠を比較している。一方、高照度光照射では、夜勤前の夜睡眠とほぼ同じ長さの睡眠がとれている。体温リズムをみると、対照では4日間の夜勤のあともリズム位相がほとんど同じなのに対し、高照度光照射では約9時間の体温リズムの位相後退が起きている。

### (3) 睡眠相後退症候群 (delayed sleep phase syndrome: DSPS)

この症候群は睡眠時間帯が一般の健康人の生活よりも数時間遅れた状態が慢性的に続き、睡眠時間を早めることが困難な状態である<sup>4)</sup>。患者は日中の行動や心理状態と関係なく朝方まで入眠できず、しかし一度入眠すると比較的安定した睡眠が得られ遅い時刻まで目覚めない。この遅れた時間帯を患者自身の努力により早めることが困難である。睡眠時間の遅れのために出勤、登校できず、社会生活上の障害が出現する。

DSPS は思春期か青年期に発症することが多い。夏休みなどの長い休暇中の昼夜逆転生活、受験勉強などが発症の誘因となる<sup>5)</sup>。このように発症の誘因はありふれたものであるが、健康人と異なり DSPS では遅れた時間帯の生活を元に戻せないことが特徴である。

治療と対策：遅れた入眠・覚醒時刻を適切な時刻に矯正するために、1日2-4時間ずつ入眠時刻を遅らせることで<sup>4)</sup>、ほぼ1週間かけて入眠時刻を22-24時の望ましい時間帯に固定する方法がある。遅れた生体リズムを前進させるために高照度光療法が有効である(図2)。治療器のみならず自然光を有効利用する方法として朝、寝室のカーテンを開けて覚醒前から光に暴露させておくことも効果がある。

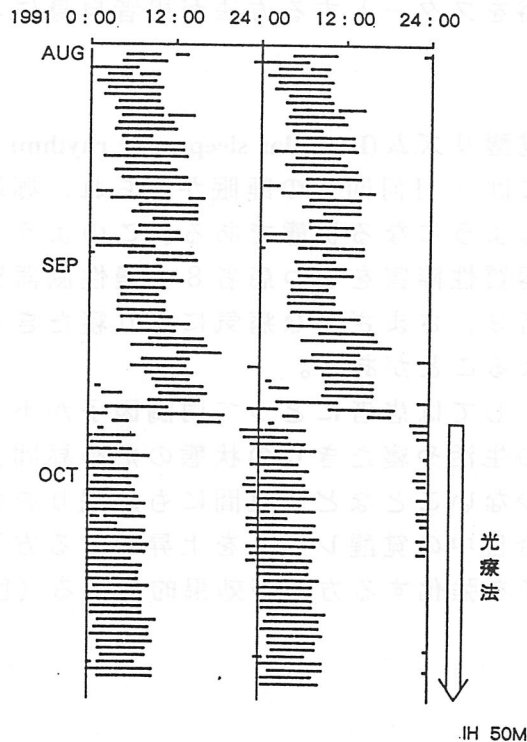


図2 症例 1:50 歳、男性

学生時代から朝の起床困難があった。大学卒業後就職したが、睡眠時間帯が遅れ出社に支障を来し退職した。その後は、学習塾で講師として16～21時まで働くようになった。49歳の時に、外来を受診し、ビタミンB12の投与を受けたが効果がなかった。これに高照度光療法(照度:3,000 lx, 9～11時頃の2時間)を併用したところ睡眠相が前進し、1時に入眠し8時に起床するスケジュールで睡眠がとれるようになった。(黒の棒は睡眠を表す。図は横軸を48時間としたダブルプロット法で示してある。高照度光療法で睡眠相の前進がみられている。)

#### (4) 非 24 時間睡眠・覚醒症候群 (non-24-hour sleep-wake syndrome : Non-24)

この症候群では通常の 24 時間周期の環境のもとで入眠と覚醒の時刻が毎日 1 ～ 2 時間遅れ、睡眠・覚醒リズムが隔離実験室と同様に約 25 時間の周期となる。初期の報告では全盲など視力障害者に多いとされたが<sup>6)</sup>、現在は視力障害のない患者にも多いことがわかった<sup>5)</sup>。いずれの場合にも生体時計の同調機構が正常に機能しないため内因性リズムがそのまま出現し、non-24 が起こると考えられている。患者は周期的な昼夜逆転を訴えて来院する。本症候群を呈する患者では睡眠相が定まらないために深刻な社会的不適応を示す。患者自身が一定の時刻に就寝、覚醒しようとする場合、同調的に不眠や覚醒困難として自覚される。昼間睡眠時間帯が来る時期には日中無理に覚醒していても眠気や注意力、集中力低下、易疲労感、倦怠感などが出現し、時に慢性疲労症候群と診断される場合もある。

治療と対策：毎日少しづつ遅れていく睡眠・覚醒リズムを 24 時間に固定させ、しかも睡眠時間帯を夜間に合わせるという 2 段階の操作をする。短期間に矯正するためには高照度やメラトニンなどの投与時刻が重要である。高照度光療法は早朝の最低体温出現時刻の直後から光を浴びると効果的である<sup>7)</sup>。従って 25 時間周期の睡眠が昼間にある時よりは睡眠が夜間にきた時期に朝の光療法、日光浴をスタートする方法が患者自身にとっても都合よく、成功率も高い。

#### (5) 不規則睡眠・覚醒リズム (Irregular sleep-wake rhythm)

この症候群の患者には 1 日何回もの睡眠がみられ、極端な場合には昼夜の区別なく睡眠が起こるようになる状態である。このような睡眠パターンは視床下部に局限した脳器質性障害をもつ患者 8、慢性脳器質性障害患者（多発性脳硬塞など）の患者 9、さまざまな病気により寝たきりの生活をおくっている患者などにみられることがある。

治療と対策：成因としては患者にとって同調因子が不十分である場合が多い。すなわち室内での生活や寝たきりの状態のため昼間光暴露量が少ないこと、他人との接触が少ないことなどが昼間にも居眠りを引き起こしている。このような患者の場合日中の覚醒レベルを上昇させる方法としての高照度光療法や社会的同調因子を強化する方法が効果的である（図 3）。

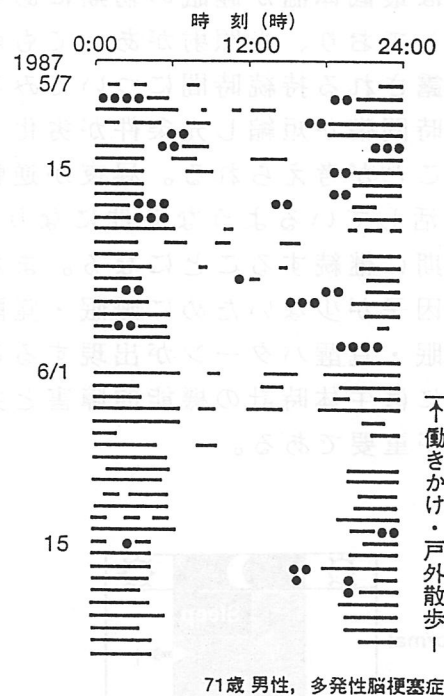


図3 症例3: 71歳、男性

50歳頃より高血圧症のため治療を受けていた。65歳頃より物忘れがひどくなり、また夜間に不眠がみられるようになった。夜間不眠時に外出し、睡眠中の近隣の人々を起こしたり、ゴミ箱に放火するような行為が目立つようになった。70歳時に、精神病院の老人病棟に入院した。検査から多発脳硬塞性痴呆と判定された。入院後にも昼間に寝ていたり、夜間に起きて病棟内を大声を出して歩き回ったり、部屋の中で放尿したりするような行為が目立った。睡眠・覚醒リズムは非常に不規則であった。

1987年6月上旬から看護者による接触を多く持ち、戸外にでて日光浴をさせるなどの社会的同調因子あるいは光同調因子を強化したところ、異常行動が減少し、睡眠・覚醒リズムがかなり改善した。(黒の横棒は睡眠、黒丸は夜間徘徊、不穏、せん妄などの異常行動を示す。5月中は昼間にも眠っていることが多く、夜間には覚醒して異常行動がみられるなど、不規則な睡眠・覚醒リズムである。6月には看護者の働きかけにより異常行動が減少し、夜間にまとまった睡眠がみられるようになった。)

### 5. 2. 3 概日リズム睡眠障害の病態

DSPS や non-24 の患者ではいったん遅れた睡眠を正常な生活時間帯に戻せないことが問題である。その原因としてこれらの患者では朝の光同調因子による前進可能な範囲が短いことが仮説として提唱された<sup>10)</sup>。すなわち健康な人では1日23～27時間の範囲で睡眠・覚醒サイクルを変えることができるが患者では前進部分が短いため一度遅れたリズムを元に戻すことが極めて困難であると考えられた。しかし、この仮説には実証されてない。

筆者らは最近これらの患者についての病態研究から患者の総睡眠時間が長く、しかも最低体温の出現時刻が相対的に睡眠相の前にあることを明らかにした<sup>11)</sup>。最低体温出現時刻から4～5時間の範囲は体内時計を前進させるのに有効な時間帯である。健康な人では朝目覚めたときにこの有効時間帯の範囲にあり、ここで光を利用し、体内時計の25時間周期を24時間にリセッ

トする。しかし、患者では最低体温が睡眠の初期にあるため目覚めたときにはこの有効時間帯を超過しており、光照射があっても前進させることが不可能になる。さらに光に暴露される持続時間についてみると図4に示すように患者では実質的に昼間の時間帯が短縮し光条件が劣化し、十分に体内時計を調節することができないことが考えられる。昼夜が逆転したような患者ではあたかも隔離実験室で生活しているような条件になり、睡眠が25時間周期になったり昼夜逆転が長期に継続することになる。また、室内で生活することの多い老人では光同調因子が少ないために睡眠・覚醒の振幅が低下した状態、すなわち不規則な睡眠・覚醒パターンが出現することになる。様々な概日リズム睡眠障害の病態には生体時計の機能的障害と共に同調因子としての環境条件を考慮することが重要である。

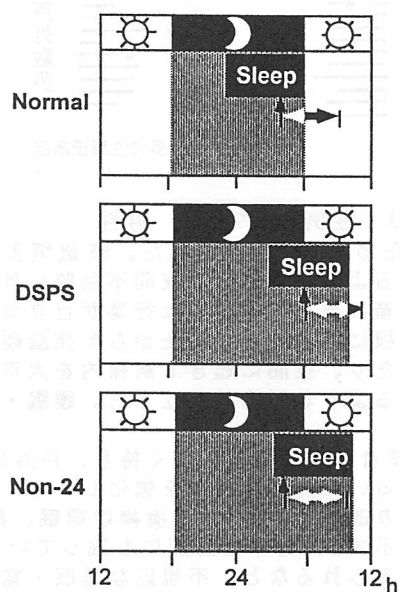


図4 睡眠による遮光効果の模式図

睡眠正常者 (Normal)、睡眠相後退症候群患者 (DSPPS)、非24時間睡眠・覚醒症候群患者 (Non-24) について、睡眠相、体温の関係を模式的に表わしてある。上向き矢印は最低体温出現時刻を表わす。横向き矢印は睡眠を早める、すなわち位相前進可能な部分を表す。正常者では最低体温出現時刻が睡眠の後半にあるため朝起床したときに位相前進部分を利用して位相前進を起こしうる (横向き矢印の黒色部分)。睡眠相後退症候群患者では最低体温出現時刻から起床まで眠っている時間がより長いので位相反応曲線の前進部分を十分に利用できない (横向き矢印の白色部分が短い)。非24時間睡眠・覚醒症候群患者ではさらに最低体温出現時刻から起床までの時間が長いので起床したときには位相変化を起こさず生体時計の内在性周期がそのまま次の日のリズムとなる。睡眠相後退症候群や非24時間睡眠・覚醒症候群では睡眠が光をさえぎる働きをし実質的暗期 (網かけ部分) を長くしていることになる (睡眠の遮断効果) ため位相反応曲線の前進部分 (横向き矢印) に光が入らなくなる。

#### 5. 2. 4 おわりに

体内時計に関連した様々な睡眠障害を概説し、治療としての光放射につい

て述べた。これらの睡眠障害は将来ますます増加する傾向にある。生体リズムはヒトばかりでなく地球上に生息するあらゆる生物に共通した生存のための適応機能である。体内時計の機構を明らかにし、それを基礎にした概日リズム睡眠障害の病態の解明と治療法の開発はまだ始まったばかりである。今後、生体リズムにとって光の重要性が十分に認知されるならば治療のみならず、生体リズムに関連したさまざまな疾患の予防にも役立つであろう。

(大川匡子)

#### 参考文献

- (1) American Sleep Disorders Association. The International Classification of Sleep Disorders, Allen Press Inc. Lawrence, Kansas (1990).
- (2)伊藤、松永、田村ほか：時差症候群と夜勤症候群.神経進歩 39、104-115 (1995).
- (3) Czeisler CA, Johnson MP, Duffy JF et al. : Exposure to blight light and darkness to treat physiologic maladaptation to night work. N Engl J Med 322, 1253-1259 (1990).
- (4) Weitzman ED, Czeisler CA, Coleman RM, et al.: Delayed sleep phase syndrome. Arch Gen Psychiatry 38, 737-746 (1981).
- (5)高橋、森田、三島ほか:わが国における睡眠・覚醒リズム障害の多施設共同研究 第1報人口統計的研究精神医学 35,605-614, (1993) .
- (6) Okawa M, Nanami T, Wada S, Shimizu T, Hishikawa Y. : Four congenitally blind children with circadian sleep-wake rhythm disorder. Sleep 10, 101-110 (1987).
- (7)内山、大川、尾崎ほか:覚醒リズム障害 神経進歩 39, 92-103 (1995) .
- (8) Okawa M, Takahashi K & Sasaki H.: Disturbance of circadian rhythm in severely braindamaged patients correlated with CT findings. J Neurol. 233, 274-282 (1986).
- (9) Okawa M, Mishima K, Hishikawa Y, et al.: Circadian rhythm disorders in sleep-waking and body temperature in elderly patients with dementia and their treatment. Sleep 14, 478-485 (1991).
- (10) Czeisler CA, Richardson GS, Coleman RM, et al.: Chronotherapy: Resetting the circadian clocks of patients with delayed sleep phase insomnia. Sleep 4, 1-21 (1981).
- (11)Ozaki S, Uchiyama M, Shirakawa S, et al.: Prolonged interval from temperature nadir to sleep offset in patients with delayed sleep phase syndrome. Sleep 19, 36-40 (1996).

### 5.3 光駆動について

#### 5.3.1 視覚機能範囲は有限であること

ここでは生体への光放射作用の一つとして、光駆動現象をとえいあげてみたい。生体機能の変動をある測定単位から眺めると、X Y 両軸にその変動はプロットされる。X 軸は変動の時間的成分を表し、Y 軸は変動対象の機能値を示すのが一般的である。Y 軸の機能変動値は普通の尺度で表記できるものもあるが、生体機能の場合、例えば視覚機能などでは対数尺度をとるものもあり、流入する広範なエネルギー量に生体は対応できることを示している。このことは生体が光環境に順応しつつ生命を維持してきたことを意味する。

その順応結果は機能を促進方向にも、また抑制方向にもはたらかせる。生体機能は常時一定の枠内で変動していると考えねばならない。

ここに紹介する光駆動現象は、このような一定の枠内での機能変動現象と考えることができる。即ち、可視放射帯域の光放射をセクターを切って、臨界融合頻度近辺の断続光や融合光をつくり、それらが視覚系にあたえる影響について調べたものである。

従って、生体機能を破壊せずにその反応枠内で機能変動をみるのはなかなか難しいこととなる。かつて多くの動物実験がなされてきた理由の一つでもあるが、使用するエネルギー強度はその個体の属する種によって適正幅が異なると考えられるため、最初の実験段階では人間を使用することは多くの場合さげなければならない。

多くの生体機能の測定をめざす実験で、最初に生体機能範囲を想定してかかるか、機能の無限性を想定するかという基本的なことは、意外に深く考えられてこなかった。研究者の勘に依存してきたと云ってもよい。しかし、機能範囲が存在することはむしろ当然のことであって、すべての生理、心理機能の計測は、一定量のエネルギー付加に対する一定範囲内での機能変動の一時相の値を見ていることになる。

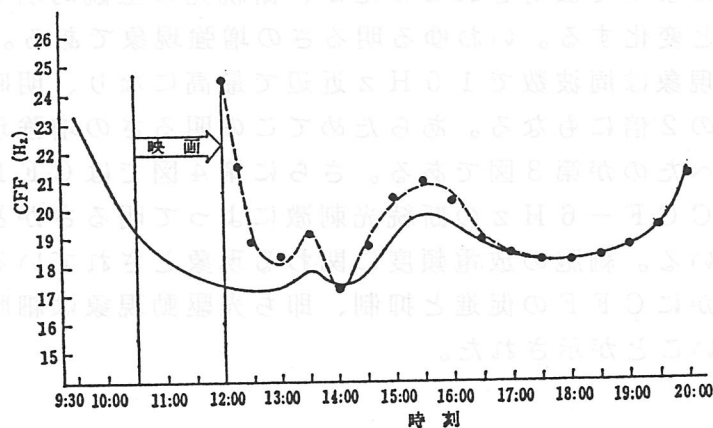
#### 5.3.2 光駆動における周波数要因の影響

前述のとおり、本研究では C F F をとりあげた。それは断続光刺激にたいする生体の時間分解能を示すものと解釈できる。光が断続して見られるか、融合して静止光に見られるかの限界周波数をもって表す。非常に微妙な判断を要するもので、心理学的には一種の判断実験でもある。このことは、C F F 測定には中枢部の心理作用が関与すると考えられる。

しかし光駆動の結果、C F F が変化すれば、それは生理的变化にもとづく心理的判断基準の変化と考えることができる。かかる前提にたつて実験は行われた。フリッカー現象の生理学的基盤については、DeValois の実験に学ぶところが多かった。彼は猫の retinal ganglion cells, lateral geniculate cells, cells in striate cortex に微小電極を挿入し、断続光刺激にたいする各部位の反応を調べたが、結果断続光による機能昂進がみられたことを報告している。網膜にたいする

刺激光頻度とこれらの細胞の放電頻度には直接的な関係があることとなる。刺激光頻度が増加するにつれ、各細胞の放電頻度も高まり、CFF（猫の主観的判断は明確にする術はないが）に近づくとつれて、それは断続光刺激の周波数に同期しない放電の不発がみられたという。

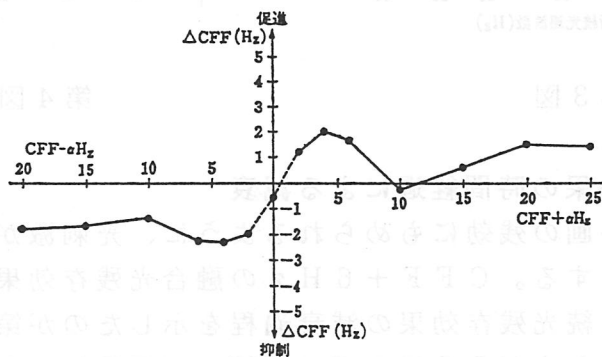
筆者がここで云う光駆動現象を見出したのは、映画を見たときに疲労すると考え、CFFを測定したときであった。予期に反しCFFは異常に高まり、基線まで回復するには2～3時間かかることが見出された。しかもその回復過程はゆるやかに振動しながら上下することが観察された。第1図はその1例である。



第1図

この結果の解釈は別として、映画という融合光刺激（普通、映画で光の断続を感じることはまれである）は、物理的には断続光刺激であるがCFFよりも高い周波数を使用されるとき融合光になると考えると、CFF以上の周波数をもった断続光刺激はCFFを高めるらしい。

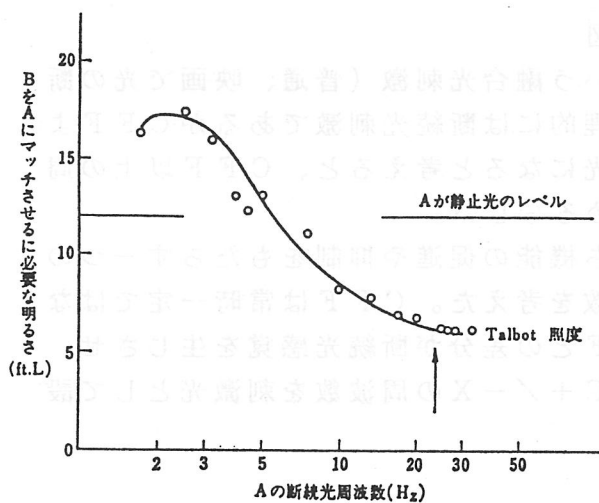
このようにCFFを上下させる、即ち機能の促進や抑制をもたらす一つの要因として、筆者は断続光刺激の周波数を考えた。CFFは常時一定ではなく、変動するので刺激光周波数はCFFとの差分が断続光感覚を生じさせ、また融合光を感じさせるように、 $CFF + X$ の周波数を刺激光として設定した。実験の結果を第2図に示す。



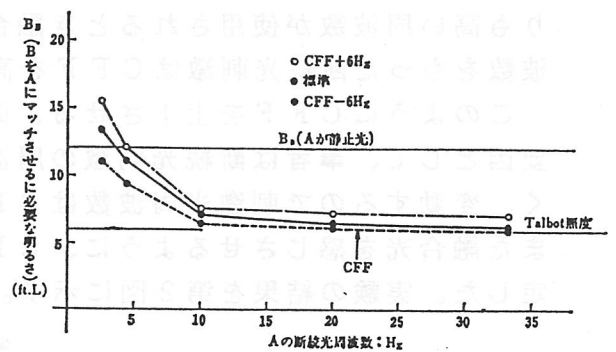
第2図

この図の左側は断続光刺激であって、その刺激周波数は C F F からそれぞれ 5 H z、10 H z、15 H z、20 H z を引いた周波数が刺激として使われた後の C F F が、刺激提示前の C F F からどのくらい低下したかを示している。C F F + 10 H z の場合をのぞいて、比較的明確に C F F の促進と抑制が見られることがわかった。この例外的な場合の意味は明らかではない。即ち、C F F が輝度調整によって 25 H z に設定されていたので、35 H z という周波数に生体にとって何らかの意味があるのかと云うことになるが、それはないと思われる。また、Bartley は刺激光頻度が増加するにつれて断続光の見かけの明るさは変わることを指摘している。即ち、明るさは神経系における放電頻度によって伝導されるのだが、断続光の主観的明るさは刺激光頻度が増加すると変化する。いわゆる明るさの増強現象である。

明るさの増強現象は周波数で 10 H z 近辺で最高になり、明暗比 1 : 1 で静止光の明るさの 2 倍にもなる。あらためてこの明るさの増強現象と光駆動現象の関係を調べたのが第 3 図である。さらに第 4 図では C F F + 6 H z の融合光、および C C F - 6 H z の断続光刺激によって明るさがどのように変化するかを見ている。細胞の放電頻度に関わる現象とされているので、この結果からは明らかに C F F の促進と抑制、即ち光駆動現象は細胞放電頻度とは無関係ではないことが示された。



第 3 図

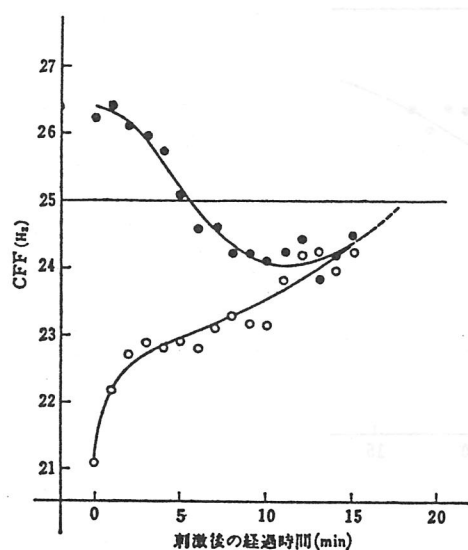


第 4 図

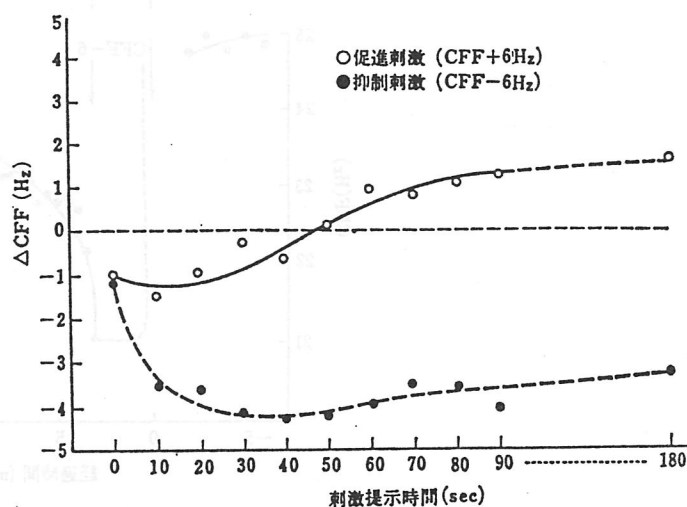
### 5.3.3 光駆動効果の時間経過による減衰

最初に示した映画の残効にもめられるように、光刺激が取り除かれた後にもその効果は残存する。C F F + 6 H z の融合光残存効果の減衰、および C F F - 6 H z の断続光残存効果の減衰過程を示したのが第 5 図である。前者は機能促進をもたらすが 5 分足らずで基線まで回復し、さらに効果は抑制方向にはたらく点不明であるが、前述の促進の不十分な効果ともメカニズム

的にはあるいは共通するものかも知れない。後者は抑制された効果が基線にむかって回復する様相が理解できる。前者と後者の残効は10分から15分でほぼ同じ水準の抑制状態にいたり、基線に向かってさらに回復するにいたる。回復過程で促進刺激効果が抑制を生じさせることは刺激効果の複雑なメカニズムを示しているが、それでは刺激開始から提示中の効果の推移はどうか。それを調べたのが第6図である。

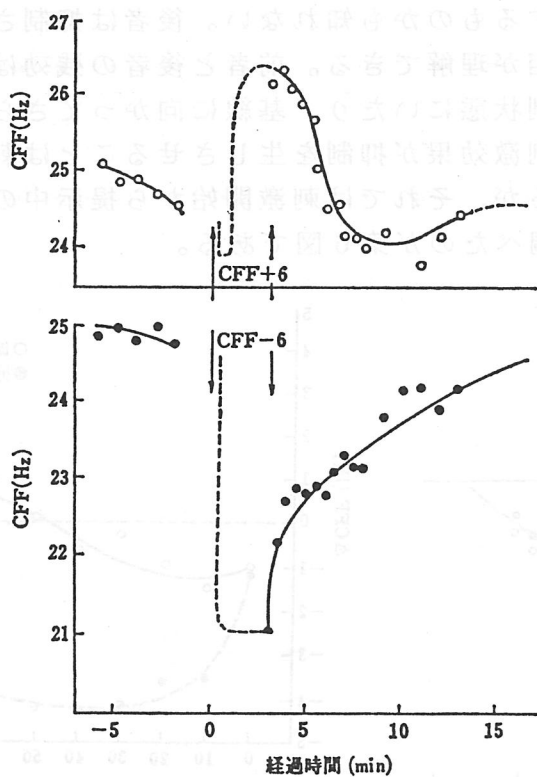


第5図



第6図

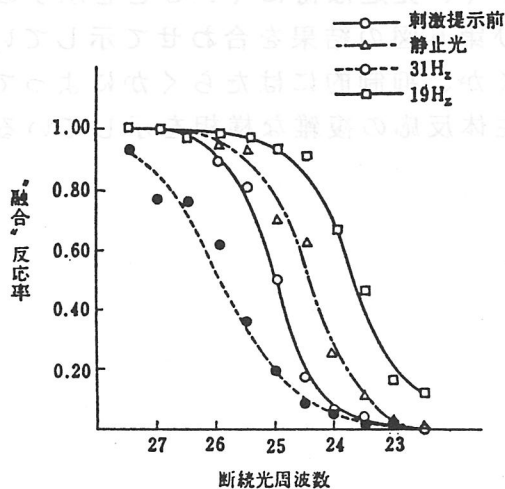
CFF + 6 Hz、CFF - 6 Hz の融合光と断続光は3分間提示された。その前後のCFFを測定したのだが、10秒、20秒・・・180秒の時点での前後の差を示したものである。促進刺激(CFF + 6 Hz)は50秒くらいまでは抑制効果をもたらし、促進効果を生じさせない。50秒を超えてから促進効果が発揮される。抑制効果はそれに反し最初から抑制を生じさせる。前後のCFFの差分は抑制刺激の場合に大きく促進刺激で小さい。ということは生体では抑制がかかりやすく、促進は得にくいことを示すのかも知れない。第7図では第5図および第6図の結果を合わせて示している。刺激が生体にとって促進的にはたらくか、抑制的にはたらくかによって機能の変動過程は異なることがわかる。生体反応の複雑な様相を示している。



第7図

#### 5.3.4 静止光の効果

静止光と融合光とは表面的にはなんら変わるところはない。しかし上記のようにたとえ融合光であっても物理的には高頻度断続光であるので、時間的な断続成分のない静止光とは異なると理解される。CFFを輝度調節によって25Hzに固定し、断続光(CFF-6Hz=19Hz)、融合光(CFF+6Hz=31Hz)、および静止光をそれぞれ3分間注視したあとのCFFを測定した。その結果を第8図に示す。

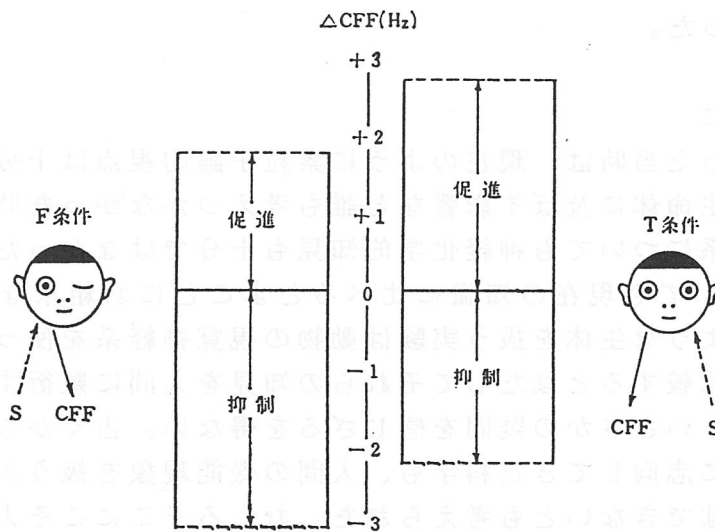


第8図

実験手法として Constant Stimulus Method を使用したため反応回数のうち「融合」と判断されたものの率を縦軸にとっている。刺激提示前の反応は 25 Hz を中心に分布しており、判断の信頼性を示している。断続光刺激が提示されたあとの反応は大幅に低周波数側に移動している。それに反し融合光提示前後は高い周波数側に反応は移動している。ただ反応分布は前者と異なり平行移動とは云いがたい。ところでこの実験では静止光は CFF を低下せしめることがあらためて証明された。断続光ほどではないが明らかに静止光の効果は抑制的である。

### 5.3.5 光駆動効果の両眼転移

前述の DeValois の猫をつかった実験では大脳視覚領の細胞放電を調べたのであるが、人間を使った実験はこのようなことはできない。しかし光駆動効果が皮質におよぶと考えることはむしろ当然であろう。左眼に促進・抑制光刺激を与え、右眼で CFF を測定する T 条件と右眼で刺激を受け、また CFF を測定するという F 条件の 2 者を比較してみる。結果を第 9 図に示す。



第 9 図

要するに光刺激によって興奮する神経細胞群と CFF 測定によって興奮する神経細胞群が同じか、異なるかに着目したわけである。この効果の転移は神経細胞相互間でのインパルスのリークを想定するか、皮質での神経細胞の相互関係を考えるかということになる。DeValois は外側漆状体以下の周辺部でこのようなことが生起する可能性はなく、おそらく中枢機能が関与した結果であろうと述べていた。この実験では中枢関与説の立場をとることにする。ここで結果をまとめてみると、

促進刺激を使った場合、

F : T = 1.75 : 2.73、即ち、F を 1 とすると T は 1.6 となる。

抑制刺激を使った場合、

F : T = 3.10 : 2.22、即ち、Fを1とするとTは0.7となる。

F条件では、促進・抑制刺激に対する反応変化の幅は、4.85 Hz、それに対し、T条件下では、その幅は4.95 Hzとほぼ同じであるが、T条件の場合には約0.9 Hzほど促進方向にシフトしている。

T条件とは、両眼からのシグナルが中枢部のどこかで、干渉するような回路に神経インパルスが流れる場合であると考え、その場合、促進刺激が流れやすく、抑制刺激が流れにくいとも考えられる。さらにF条件とT条件の差については、F条件の場合、CFF測定によって興奮したり制止したりする神経細胞群と、刺激によって促進、あるいは抑制される神経細胞群、および事後測定によって興奮・制止されるそれらは皆同じ領域内の神経細胞であると考えられるのに反し、T条件ではCFF測定によって興奮・制止される神経細胞群と、刺激によって促進・抑制される神経細胞群とは異なり、それら2種の神経細胞群の間に、興奮の伝導、即ち効果の転移があると推論される。問題は効果の転移する場であるが、外側膝状体以上の中枢部での働きと考えざるを得ない。いずれにしても片眼にもたらされた物理的断続光刺激の効果は中枢回路を経て別の眼でのCFF測定値に促進・抑制の効果をもたらすことがわかった。

### 5.3.6 おわりに

この実験を行った当時は、現在のように素粒子論的視点は十分育っていなかった。光子が生命体に及ぼす影響など誰も考えつかなかった時代である。また、生体視覚系についても神経化学的知見も十分ではなかった。勿論、神経伝達物質についても現在の知識に比べるとまことに粗末なものであった。当時、このような生体を扱う実験は動物の視覚神経系を使っていたが、人間のそれとを比較するとはたしてそれらの知見を人間に敷衍することが妥当なのか、否か、いささかの疑問を感じざるを得ない。古くから人間の主観を排すべく客観に志向してきた科学も、人間の機能現象を扱うかぎり主観からは脱することはできないとも考えられた。むしろそこにこそ人間機能を知る手がかりがあるようにも思えたものである。

光放射を自然の現象と考えてみよう。太陽光に関するかぎりそれは当然のことである。しかし、同時に人間は人工光の恩恵にも浴している。それによって本来見えないはずのものが見えるのである。だが人工光は自然光とは異なる。波長においても、照度においても、色感においても自然のものではない。人間の生活が本来いかなるものかを考える時、その生活は知らず、知らずのうちに変化してしまったのではないかと思うことが多い。不自然を不自然と感じないで便利と考え、しかもそれが当たり前のことと思っているのが現代の人間であろう。

筆者の報告した光駆動は、単に断続光も周波数次第では融合光に見えること、その閾値は断続光と融合光の臨界周波数であって、それは周波数成分をもった光刺激によって分光視感効率は上昇したり、低下したりするといった

些細なことであった。だが筆者には、人間にとって光というものは何かということ深く考えさせられた経験であった。そして人間は光によって機能的に多大の影響を受けることを知らされたものである。

(杉山貞夫)

#### 参考文献

- (1) Alperm, M. & Sugiyama, S.: Photic driving of the critical flicker frequency, *J. opt. Soc. Amer.*, 51, 1379-1385 (1961).
- (2) Bartley, S. H. : Subjective brightness in relation to flash rate and the light dark ratio, *J. exp. Psychol.*, 23, 313-319 (1938).
- (3) Bartley, S. H. & Chute, E. : *Fatigue and impairment in man*, New York: McGrawHill (1947)
- (4) Bartley, S. H. : Central mechanisms of vision. In *Handbook of Physiology, Section I : Neurophysiology, 1*. Washington, D. C.: American Physiological Society (1959).
- (5) Devalois, R. L., Smith, C. J., Kitai, S. T., & Karoly, A. J.: Responses of single cells in different layers of the primate lateral geniculate nucleus to monochromatic light. *Science*, 127, 238 (1958).
- (6) Devalois, R. L., Smith, C. J., Karoly, A. J., & Kitai, S. T. : Electrical responses of primate visual system I . Different layers of macaque lateral geniculate nucleus. *J Comp. Physiol. Psychol.*, 51, 662 (1958).
- (7) Devalois, R. L., Smith, C. J., & Kitai, S. T. : Electrical responses of primate visual system II , *Physiol. Psychol.*, 52, 635 (1959).
- (8) 杉山貞夫 : フリッカー法使用による映画の影響度測定の試み、一視聴覚教育の1実験的研究一、「心理学研究」、25巻、42-42 (1954)。
- (9) Sugiyama, S. & Alperm, M. : The effects of viewing a pulsing light on human visual flicker discrimination. *Amer. Psychologist*, 15, 7, 500 (Abstract) (1960).
- (10) Sugiyama, S. : On the effect of duration of facilitator photic stimulus on subsequent CFF measurements. *Kwansei Gakuin University Annual Studies (Kwansei Gakuin University)*, 11, 71-78 (1962).
- (11) 杉山貞夫 : フリッカーの生理心理学的研究、心理学モノグラフ、No.12, 日本心理学学会、東京大学出版会、(1970)。

## 5.4 光と磁気とメラトニン<sup>1, 2, 3, 4)</sup>

### 5.4.1 はじめに

メラトニンは概日リズムによって松果体から産出・分泌されるホルモンである。その分泌は明期に低く、暗期に高いレベルになる。このリズムは殆どほ乳類に共通である。松果体は視神経系の終端器官で、その活性は網膜での光の認知によって決められている<sup>5)</sup> (図1)。網膜で受容される明暗周期の変化情報は、視床下部の視交叉上核に伝わり、上頸神経節に到達する。そこで交換神経節後線維に情報は乗り換え、松果体に入り、 $\beta$ 受容器を介して松果体細胞によるメラトニン分泌活動に影響を与える。メラトニンは主に松果体で作られ、トリプトファンから様々な酵素の働きにより、産出される。暗期に高いリズム変化を示すメラトニンはセロトニン-N-アセチル転移酵素(NAT)の内因性リズムによって調整させている。メラトニンの分泌は視交叉上核の生物時間に従って、抑制され、24時間リズムに一致している。すなわち、松果体は日長変化の光情報をメラトニンの含有量と分泌パターンという液性情報に変化する神経内分泌情報変換器であると考えられる。メラトニンの作用は、1)視床下部-性腺への抑制作用、2)抗腫瘍作用、3)免疫機能の修飾など生理・生殖機能・神経内分泌機能を調節することが良く知られている。

ここでは、メラトニンの作用の中で、1)生殖機能、性腺に対する光の効果(日長変化)を松果体機能、メラトニン変化との関係で、また2)抗腫瘍作用について、磁気(磁界曝露)がヒトの発ガンとの関連で行われている実験を整理し、光、磁気とメラトニンの関係についての理解の一助とする。

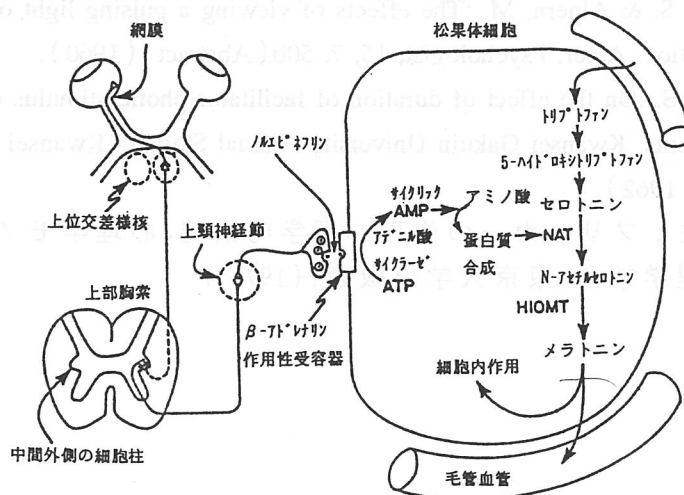


図1 網膜と松果体の関連図<sup>1)</sup>

### 5.4.2 光とメラトニン

ハムスターは長日型の季節繁殖性動物である。即ち、日長変化(季節変

化)が松果体を介して、メラトニンの分泌リズムに変換され、生殖中枢に伝わり、繁殖が生じると考えられている。この動物を用いて、生殖機能と光周期との関連性が調べられ、性腺の発達、精巣の萎縮が日長変化によって影響を受けることが明らかになった。この日長変化の限界は12.5時間であり、明期がこの長さ以下(短日条件)になると精巣の萎縮が劇的に生じる。一方、長日性のハムスター、特にゴールデンハムスターの雄の松果体を摘出すると短日条件下で誘発される精巣の萎縮が見られない。松果体摘出は Progonadal (新性的)効果をもたらしている。一方、松果体摘出により、長日条件下において精巣萎縮をもたらす、Antigonadal (反性的)効果を持っている種もある。さて、ジャンガリアンハムスターでは、短日条件下で、松果体摘出によって精巣萎縮がブロックされるが、この短日条件下で萎縮した精巣は、長日条件下にもどすと数週間で回復する。このような結果は松果体摘出により、日長情報を生殖行動に伝達する効果が遮断されることを示している。すなわち、生殖機能が光周性反応に順応するためには松果体機能が重要であることを意味している。このように多くの動物種で松果体機能、メラトニン分泌のリズムが明らかになり、メラトニン分泌パターン変化が、明暗サイクルの違いを伝える内分泌シグナルと考えられるようになった。結果として、松果体摘出で正常なメラトニン分泌機能をなくした動物は、明暗サイクルの変化を読み取ることができず、環境との同調を失う。逆に、季節繁殖性の動物で性腺機能の季節変化を失った場合、合成メラトニンを投与することにより、生殖行動を制御することが可能である。長日飼育のハムスターでメラトニン投与により精巣萎縮が観察された結果、短日で誘発される性腺萎縮がメラトニンにより妨害される結果などにより、人為的に家畜の繁殖をコントロールしようとする試みがある。しかし、このメラトニン投与による効果は動物種差が著しく、投与の時間によっても異なってくる。条件によって、メラトニンが生殖機能を抑制する場合、促進させる場合が見られる。

実験用ラットやマウスは、非光周性動物であり、日長の変化に応じて生殖機能を変化させることはなく、メラトニンの生殖行動への影響は少ない。また、その生理的な作用も詳しくわかっていない。

#### 5.4.3 磁気とメラトニン

5.4.1で述べたような作用を持つメラトニンが電界曝露によってその産出・分泌が影響を受け、その正常な機能が阻害され、腫瘍の成長が促進されるとするという仮説が提案された<sup>6)</sup>。電界がメラトニンの分泌に対する影響実験は1980年代になされ、当初は抑制が見られたとする結果が報告された。その後、メラトニンの産出能力に対する電界曝露の影響については系統的な研究はなされていない。一方、生体に対する磁気、特に磁界の影響は、発ガンと関連性があるのではないかとの疑問から重要な問題として取り上げられている。ここでは、地磁気とメラトニン、および商用周波磁界とメラトニンについて、これまで行われてきた研究を紹介する。

松果体細胞の電気生理学的な応答から、地磁気と細胞の活性とに深い関係があるらしいことが判ってきた。最初に磁界が松果体に影響を与えることを報告したのは Semm 等である。彼らはモルモット松果体細胞の活動電位が地磁気の垂直成分を逆転することにより、顕著に減少することを見出した。その後、地磁気の水平成分を15分間逆転することにより、メラトニンの産出分布が有意に低下したことも明らかになった。このような結果から、松果体機能の変化リズムと地磁気との関係が重要な研究課題となった。1980年代に、地磁気の水平成分を逆転させるとラットの松果体からのメラトニン分泌が影響を受けることが報告された。その後の実験で、地磁気の大きさよりも、強さの変化が松果体機能により強く働くことが判った。特に、夜間のメラトニンの抑制、松果体での c-AMP 量の昼間に低く、夜間に増加するのが、地磁気の水平成分の逆転によって減少することが明らかになった。松果体機能には網膜での光受容が関与することも判ってきた。正常なラットと視覚をなくしたラットを地磁気の水平成分を逆転させた人工磁界に置いて、松果体の NAT 活性とメラトニン含有量を調べると、正常なラットでは松果体機能は低下するが、視覚をなくしたラットでは磁界の効果が見られていない。一方、地磁気が松果体機能には影響しないとする報告もある。地磁気の大きさを実験的にゼロにし、ラットの松果体からの NAT 活性、メラトニン産出を調べると、自然の地磁気の条件下においた場合と違いがないことが明らかになっている。また、ラットやハムスターなどの齧歯類でも、磁界曝露による松果体機能の変化に種特異性が見られ、ゴールデンハムスターでは磁界の影響は見られていないことなどが報告されている。

商用周波磁界がメラトニン分泌に与える影響は、抗腫瘍、発ガンとの関連性から過去数年にわたり動物（ラット、ハムスター、ヒツジ等）やヒトを対象にして多くの実験がなされてきた。ヒトを対象にした場合、実験条件が制御できる室内実験と磁界に曝露されていると考えられる作業者を対象にした実験の2通りが取り上げられている。それらの結果を表1に示す。

表1から判るように、ヒトを用いた実験では、実験室内での曝露結果からは、メラトニン分泌への影響は観察されていない。一方、作業環境下での尿中代謝産物を指標とした結果からは、その変化が観察されているが、作業は日中に行われており、磁界への曝露と同時に太陽光にも曝されている。従って、磁界と光の相乗効果を検討しなければならない。視神経への光刺激が、松果体への磁界刺激効果を効果的にすることが必要であるとの報告もある。

動物に対する実験結果は、相反したままである。表1で示しているように、実験動物として改良が進められてきた非光周年繁殖動物であるラットを用いた実験で、磁界が直線方向に印加されている場合には、メラトニン分泌の抑制が見られない結果が報告されている。一方、回転円磁界に曝露された場合には、メラトニンの分泌抑制が観察されている。この結果は、再現されていないが、Reiter等は最近の研究では夜間のメラトニン増加に対する商用周波の直線磁界での効果を認めない傾向があると述べている。

表1に示すようにメラトニン分泌に対する磁界の影響は様々な結果が報告されているが、これに対して以下のような項目を考察する必要がある。1) 実験計画、2)動物の系統と種差による違い、3)光に対する感受性、4)季節、5)曝露特性を含めた曝露装置・曝露パラメータの評価、6)メラトニンの測定方法。

表1 実験対象と磁界曝露によるメラトニン分泌への影響結果(その1)

対象 (種・系統)	磁界強度 ( $\mu T_{rms}$ )	磁界 (方向性)	周波数 (Hz)	曝露時間	メラトニン 抑制	著者 (年)	備考
<b>ラット</b>							
Wistar (♂♀)	5, 500	垂直	50	24時間	無 <sup>(1)</sup>	Bakos (1995, 1997)	尿中メラトニン代謝産物
Wistar (♂)	1, 100	垂直	50	24時間	無 <sup>(1)</sup>		
Sprague-Dawley (♂) 100-125g	1mT	水平	60	6週間	無 <sup>(2)</sup>	John (1998)	尿中メラトニン代謝産物
	1mT	水平	60	10日間	無 <sup>(2)</sup>		
Sprague-Dawley (♂) 3ヶ月令 350-400g	1mT (1分On/off)	水平	60	1時間	無 <sup>(2)</sup>		
	1mT (1分On/off)	水平	60	2日間	無 <sup>(2)</sup>		
Sprague-Dawley (♀) 44-47日令	100	水平	50	13週間	無 <sup>(2)</sup>	Loescher (1998)	DMBA処理群を含む
Sprague-Dawley (♀) 42日令	50	水平	50	9-12週間	無 <sup>(2)</sup>	Mevissen (1996)	DMBA処理群を含む
Sprague-Dawley (♂) 55-70日令	50-500 100	水平	直流	15-120分	- <sup>(3)</sup>	Reiter (1998)	直流磁界
Wistar (♂)	10, 100	水平	50	短期と 長期	有	Selmaoui (1995)	短期12時間で 長期は30日間 (18時間/日)
Wistar (♂)	1, 1.4	円 直線 楕円	50	6週間	有(円) <sup>(2)</sup> 無(直線)	加藤 (1993, 1994)	磁界の特性で 抑制は変化
<b>ハムスター</b>							
Djungarian (♂) 3.6ヶ月令	450 <sub>p-p</sub> 360	水平 -	50 直流	56日間 56日間	無 <sup>(4)</sup> 無	Niehaus (1997)	血中メラトニン
Djungarian (♂) 16-25日令	100	垂直	60	15分	有 <sup>(4)</sup>	Truong (1996)	短日下では変 化なし
Djungarian (♂) 4-8ヶ月令	100 10	垂直	60	15分	無 <sup>(4)</sup>	Truong (1997)	
Djungarian (♂♀)	100	直線	60	15分	有	Yellon (1994, 1995)	曝露は消灯2 時間前
<b>マウス</b>							
OF1 (♂)	15	水平	50	3ヶ月	有 <sup>(5)</sup>	Picazo (1998)	曝露中での第 3世代使用
<b>ヒヒ</b>							
Papio- (♂) Cynocephalus	50, 100	水平	60	6週間	?	Rogers (1995)	電界との複合 曝露。抑制は 実験に依存
<b>ヒツジ</b>							
Suffolk (♂♀)	4	?	60	10ヶ月	無	Lee (1993, 1995)	500kV試験送 電線下実験 (電界6kV/m)
<b>ウシ</b>							
Holstein 600±50kg	30	水平	50	28日間	無	Burchard (1998)	電界との重畳 曝露(10kV/m)

注：(1)明暗；9L:15D、(2)明暗；12L:12Dで赤色光、(3)明暗；14L:10Dで赤色光、(4)明暗；16L:8D、(5)明暗、12L:12D

表1 実験対象と磁界曝露によるメラトニン分泌への影響結果（その2）

	磁界強度 ( $\mu T_{rms}$ )	磁界 (方向)	周波数 (Hz)	曝露時間	メラトニン 抑制	著者 (年)	備考
<b>ヒト</b>							
事務員：47名	—	—	—	—*	有	Arnetz (1996)	VDT作業員 (電気過敏症)
男性：142名 20-60才	0.15-0.32 (TWA)	—	60	—	有	Burch (1998)	電力作業員
男性：33名 19-34才	1、20	円	60	8時間	無	Graham (1996)	低メラトニン 者は曝露で低 下
	20	円 (間欠)	60	8時間	無		
男性：40名 18-35才	20	円	60	8時間	無	Graham (1997)	
男性：108名	20 1	—	17.6	—	有**	Pflugger (1996)	鉄道作業員 尿中代謝産物
男性：32名 20-30才	10	水平	50	9時間	無	Selmaoui (1996)	
男性：44名 18-49才	20	円 (間欠)	50	2時間	有***	Wood (1998)	15秒On/Off

注：\*；VDT作業の従事日と休日での違いを検討、\*\*；光の影響の可能性も考慮する必要有り、\*\*\*；上昇開始時間の遅れ、

#### 5.4.4 おわりに

磁界とメラトニンに重点をおいてとりまとめた。さて、磁界中において網膜で起きる現象として、前世紀から磁気閃光が知られている。この磁気閃光の刺激閾値は背景の照度および周波数によって変わり、最も低い値は20Hzで約8mTであり、網膜が刺激されたために起きる現象である。さらに、網膜の神経節細胞の活動電位を視神経で記録し、光に応答する視神経が磁気刺激にも応答することが見出されている。この結果は、網膜の視神経あるいは網膜内のシナプス接続のところで磁気による刺激効果が現れたことを示している。視神経を切除して網膜からの光情報が松果体に達しないラット、あるいは視神経は正常だが真っ暗な部屋で磁界に曝露されたラットでは、メラトニンへの影響は見られず、磁界曝露の作用の発現には、何らかの光刺激が共存することが必要と考えられている。これらの実験結果を考えると、磁気刺激だけでは閾値以下であっても、弱い光が共存すればこれら両者が有効な刺激となり、磁界を網膜で受容し、その信号は視神経を経由して松果体に達し、メラトニンの合成・分泌を抑制する可能性が考えられる。

松果体からのメラトニンは概日リズムを持っている。このリズムは外因性で、光の情報によって調節されている。通常、光は波長が約1nm～1mmの範囲にある電磁波の一部である。電磁波は電界・磁界の時間的な変動であり、磁界が網膜の光受容機構に影響することは十分考えられる。光と磁気とメラトニンに付いてはさらに総合的な検討が必要である。

(重光 司)

#### 参考文献

- (1)加藤正道・重光 司：メラトニンに及ぼす磁界影響、電気学会マグネティックス研究会資料、MAG-96-13(1996)。

- (2)重光、山崎、加藤：メラトニンの分泌に対する磁界曝露効果－文献調査を中心にして－、電気学会マグネティックス研究会資料、MAG-96-128(1996)。
- (3)重光、山崎、加藤：メラトニンの分泌に対する磁界曝露効果－文献調査を中心にして(その2)－、電気学会マグネティックス研究会資料、MAG-99-20(1999)。
- (4)Stevens. R. G, B. W. Wilson and L. E. Anderson:The Melatonin hypothesis-breast cancer and use of electric power. Battelle Press(1997)。
- (5)Reiter. R. J: Melatonin Suppression by static and extremely low frequency electromagnetic fields: relationship to the reported increased incidence of cancer. Reviews of Environmental Health 10(3-4), pp. 171-186(1994)。
- (6)Stevens. R. G: Electric power use and breast cancer: a hypothesis. Am. J. Epidemiology. 125, pp. 556-561(1987)。

## 6.1 生体活性への光放射応用

### 6.1.1 活性の必要性

高度情報化社会は政治・経済・文化活動を地球的規模に拡大し、社会環境の変化と生活様式の多様化を招き、人間の生活環境を急速に変化させ複雑化してきた。情報機器の高度化と都市を中心として24時間化が進み、人間生活に便利さと利益をもたらしてきたが、その反面多くの弊害を解決しないまま突き進んでいることも見逃してはならない。

長距離トラック輸送の深夜から明け方における異常な事故率の増加、鉄道運転士の意識低下による停車駅の通過、夜間作業の事故等はその典型例であろう。また、米国ではプラントや交通機関の事故は深夜から早朝かけて多いことや、航空機のパイロットの居眠りによる操縦ミスの可能性などが報じられている。近年、職場における精神的疾患の増加は単に人間関係の諸問題やテクノストレスということで片付けるわけにはいかない。

エジソンが電球を発明して以来、更に明るい照明手段が開発され、そのお陰で人間は夜間の行動することが可能になった。しかし、その弊害が不規則な交替制勤務制を生み、人間の持つ睡眠/覚醒リズムに逆行する行動が要求されるようになった。

昼行性動物としての人間本来の生体リズムを維持しながら、不本意な不規則就労を遂行するところに大きな問題が潜んでいる。長期間の生体リズムに逆行する生活が健康に与える影響は未だ不明であり、また意識低下の中での作業は安全性、作業効率への影響は大きな問題点となる。

ハーバード大学医学部のマーチン・ムーアアイード博士は、24時間社会はハイテクがもたらした”ハイテク・グローバル社会の革命期”と称している。狩猟社会から農業革命が起こったのは約7,000年前、産業革命は約200年前である。しかし、”ハイテク・グローバル社会”はまだ始まったばかりで、結果の予測できないヨチヨチ歩きの子供が一人で横断歩道を渡るような状態であるとムーアアイード博士は言う。また、技術は地球全体を一つの村にした（グローバル・ヴィレッジ）と言っている。人類が地球に誕生して以来、夜眠り、昼に狩りをする生活をして、1日数十マイルの移動しかできないようにデザインされているにも拘わらず、現在は村を一周する時間で地球を一周している。つまり時間帯だけで距離を無視した行動であると。

人間は緩やかな社会環境の変化には上手に適応してきたが、急速な社会システムと環境の変化には生理機能とのギャップが生じ、そのギャップは人間の機能許容限度を越えているように思われる。マウスは環境の変化に適応するまでに三世代掛かると言われているが、これを人間に適用すると何年間に相当するのだろうか。

引き返すことのできないこのノンストップ社会の中で新たな秩序の形成が必要であり、“必要なときに活性度を高め、寝たいときに眠る”ための”人間中心の技術”がその鍵となるであろう。

### 6.1.2 光と覚醒度

光が生体の睡眠／覚醒リズムに影響を及ぼしていることは周知のとおりであるが、一時的に短時間の高照度光を照射することによって交感神経が亢進して覚醒度が上昇することも知られている（図6.1）。

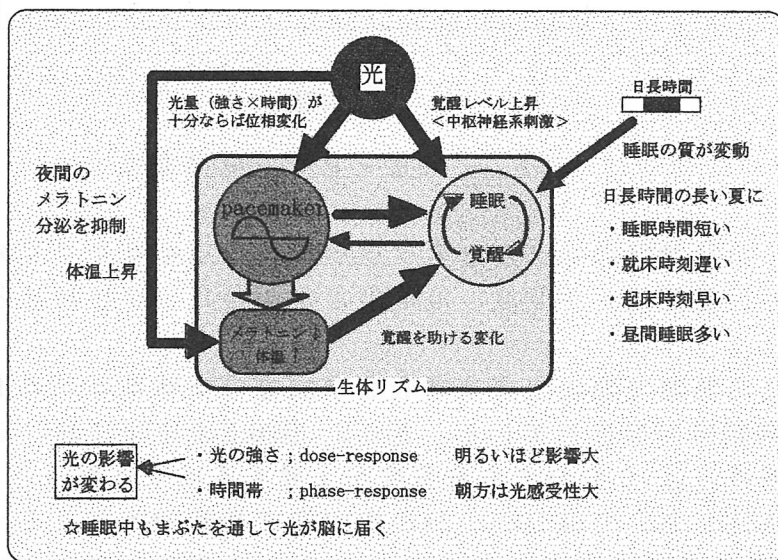


図 6.1 光の生理的影響

また、照度の覚醒度への影響は図6.2に示すように、照度が高いほど脳波の分析による覚醒度は高くなっている。また、心電R-R間隔による自律神経の活動度の同じような傾向を示している（図6.3）。

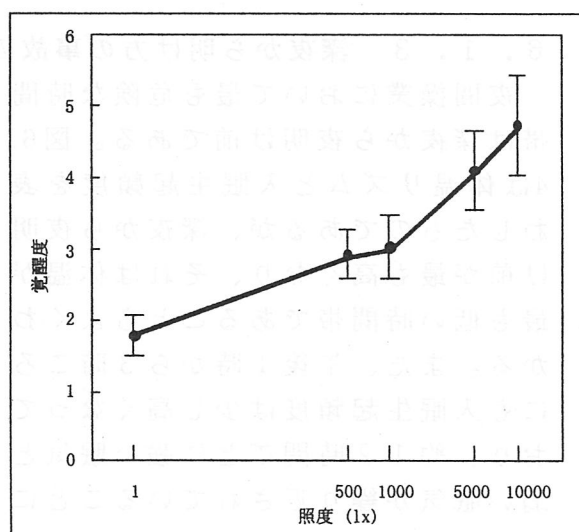


図 6.2 照度と覚醒度

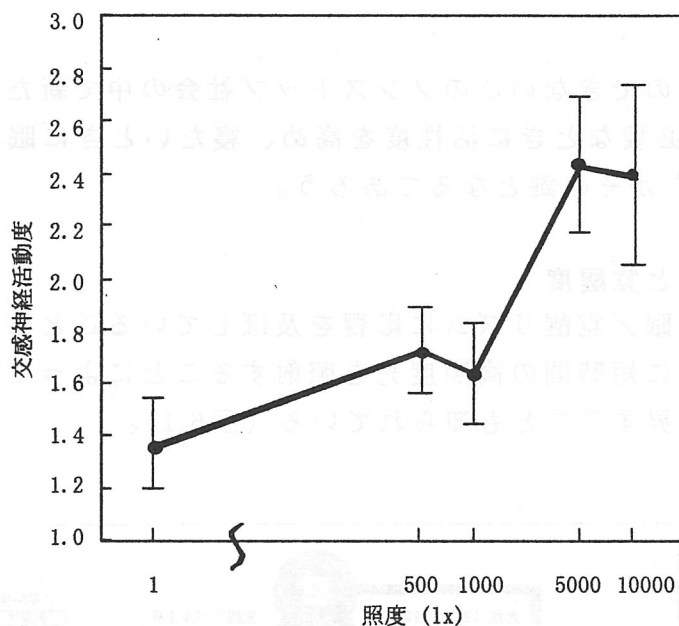


図 6.3 照度と自律神経活動度

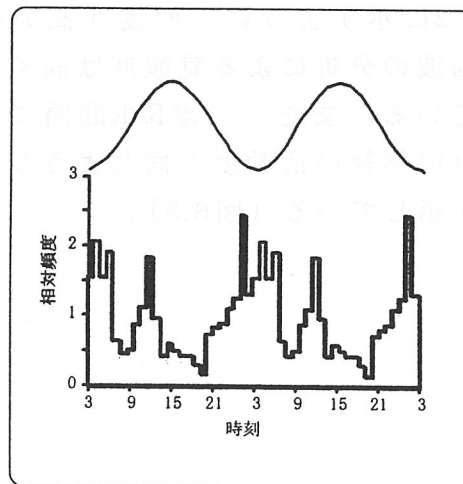
覚醒度、自律神経の活動度ともに低照度から高照度まで連続的に変化するのはではなく、低照度、中照度、高照度とグルーピングされる傾向が見られる。

高照度光の照射で血圧上昇や呼吸数増加等の交感神経が亢進することが、他にも研究報告がなされている。図6.2、図6.3は昼間における測定データであるが、明け方は1000 lxでも覚醒度が上昇する結果も報告されている。

また、夜間においては1000 lxの中照度で長時間照射（1～2時間）すると体温リズム（体内時計）がシフトするという実験結果もあり、覚醒度上昇を目的とするのか、体温リズム（体内時計）をシフトするものかを明確にする必要がある。

### 6.1.3 深夜から明け方の事故の増加

夜間操業において最も危険な時間帯は深夜から夜明け前である。図6.4は体温リズムと入眠生起頻度を表わしたものであるが、深夜から夜明け前が最も高くなり、それは体温が最も低い時間帯であることもよくわかる。また、午後1時から3時ごろにも入眠生起頻度は少し高くなっており、約12時間ごとに強い眠気と弱い眠気が繰り返されていることになる。



(Strogatz 1989)

図 6.4 体温リズムと入眠生起頻度

図6.5は米国において1988年の1年間で発生した高速道路での交通事故の時間帯別事故発生数である。このデータによると深夜から午前6時までの事故数が究めて高く、また午後3時ごろにも少し高くなっており、入眠生起頻度のデータとほぼ近い結果を示している。

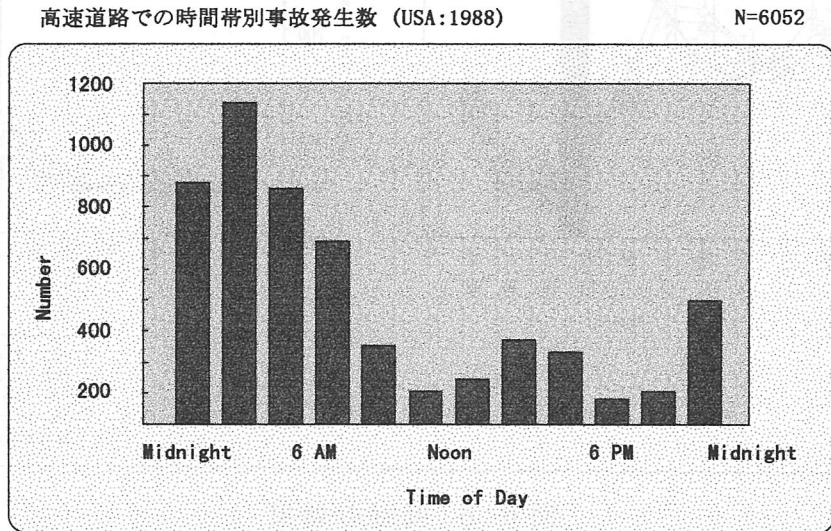


図 6.5 時間帯別交通事故発生数

#### 6. 1. 4 仮眠と高照度光照射

図6.5は仮眠と高照度光照射の効果を比較した結果である。実験条件は午後3時から翌日の午前9時まで2時間ごとにパソコンを使ったタスクによるパフォーマンステストを実行し、その反応時間から評価を行なった。午前3時から4時30分まで仮眠を取った場合と全く仮眠を取らなかった場合、および午前3時から20分間の短い仮眠を取り、その後10,000 lxの高照度光を5分間照射した場合の3種類の条件である。

図6.6は3条件における直腸温の変化を示したものであるが、仮眠を取っても取らなくても直腸温には変化はないが、午後21時から24時にかけて体温が上昇しているのは午後8時に摂取した夕食の影響と思われる。

反応時間 (ReactionTime (msec))では仮眠を取らない場合は午前中に顕著に遅くなり、午前9時には反応時間は早くなる。午前9時に反応時間は早くなるのは直腸温のデータからも判るとおり、代謝量が増加した結果であると推察する。これは生体が持つ本来のCircadian Rhythmと一致するものである。1時間30分の仮眠を取った場合、仮眠後の反応時間に大きな変化がなく、仮眠の効果が認められる。また、20分間の短い仮眠の後に10,000 lxの高照度光を5分間照射した場合、仮眠直後の反応時間は1時間30分の仮眠と同じ効果が得られたが、2時間後の反応時間は遅くなり、持続効果は得られなかった。

この実験結果から仮眠の時間と時刻、および高照度光照射との最適な組み合わせによって長時間の仮眠と同じ効果が得られるものと推測する。

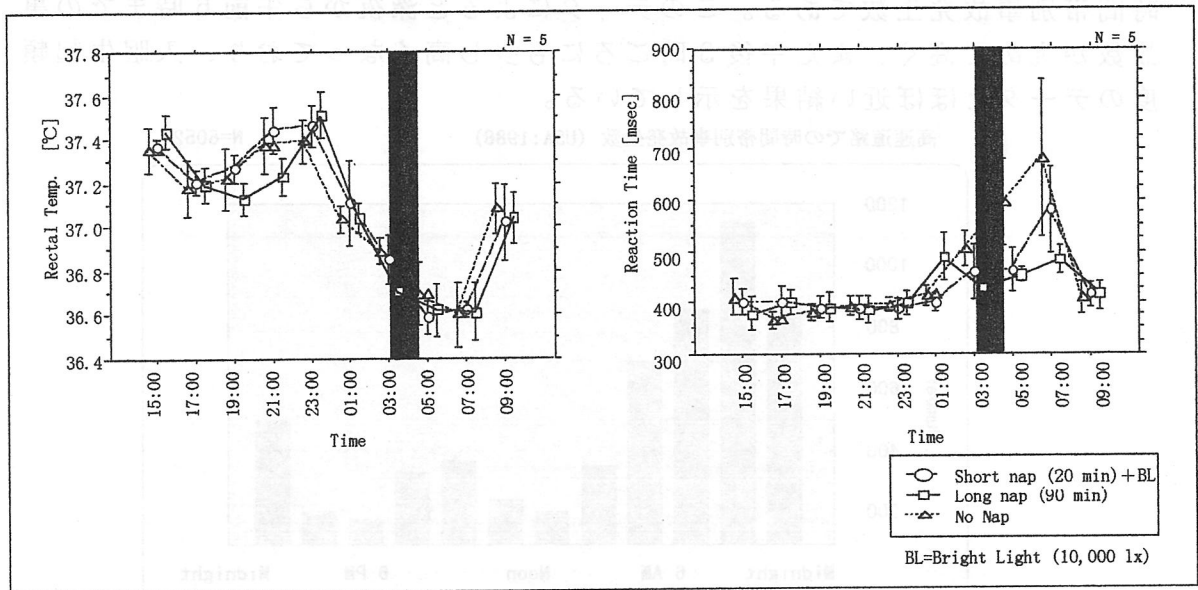


図 6.6 仮眠の効果

### 6.1.5 夜間作業の照明による覚醒効果

夜間作業中に一時的な覚醒効果を狙いとした実験結果を図6.7、図6.8、図6.9に示す。実験は午後3時から翌日の午前9時までプラント監視作業を対象としたコンピュータ上のタスクを与え、1時間ごとに覚醒度を計測したものである。

室内照明の条件は照度750 lxの下で18時間作業を継続した場合と室内全体は750 lx で午前3時から午前5時30分まで局所照明で3,000 lx にした場合の比較を行なった。図6.7は直腸温の変化であるが、両条件に差異は見られない。つまり明け方に3,000 lx という高照度光を照射したにも関わらず、深部体温に影響を与えていないということになる。通常、明け方には1,000 lxでも深部体温に影響を与えるという研究報告がある。これはベースとなる室内全体照明が深夜から明け方に掛けての照度750 lxは高すぎたのではないかと推察する。また、局所照明としての3,000 lxでは網膜に入る光量が少なすぎるとも考えられ、全体照明で3,000 lx であれば高照度光の効果が得られたと思われる。

図6.8は脳波のα波から覚醒度を求めるα-AttenuationTestによって得られた結果である。全体照明の750 lxと局所照明の3,000 lxでは覚醒度に有意差は認められなかった。また、図6.9はパフォーマンステストにおける追従誤差(エラー)での比較を行なったもので、これにも有意差は認められなかった。

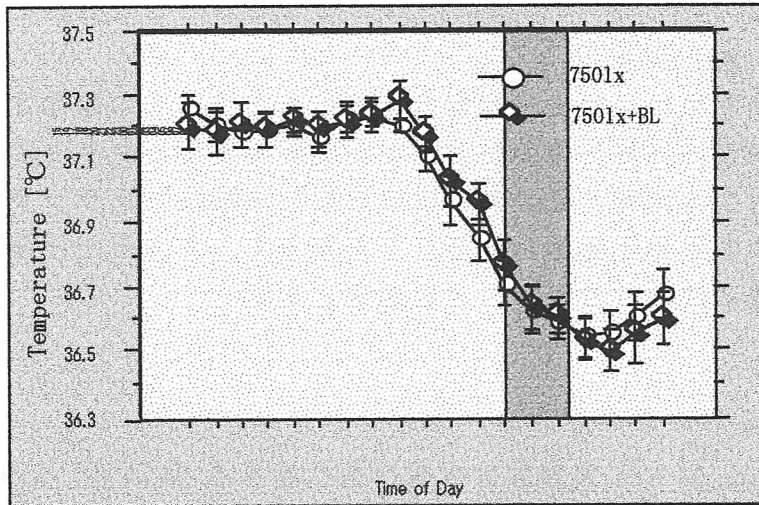


図 6.7 夜間作業における深部体温の変化

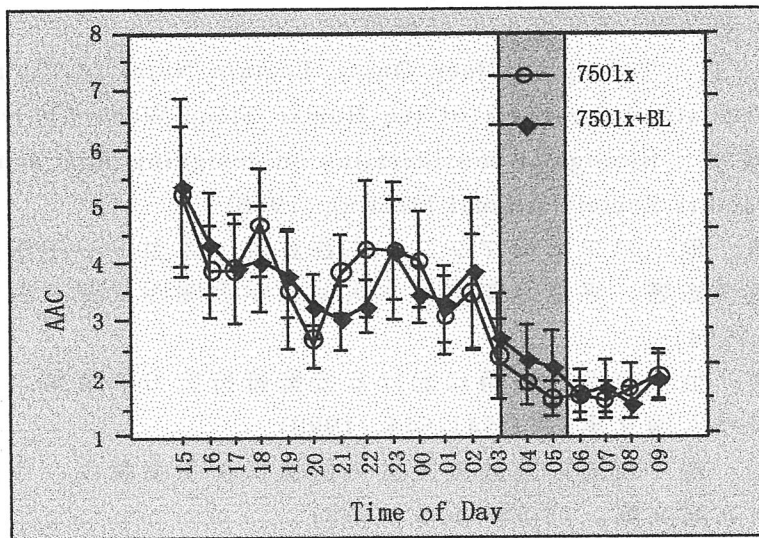


図 6.8  $\alpha$ -Attenuation test による覚醒度

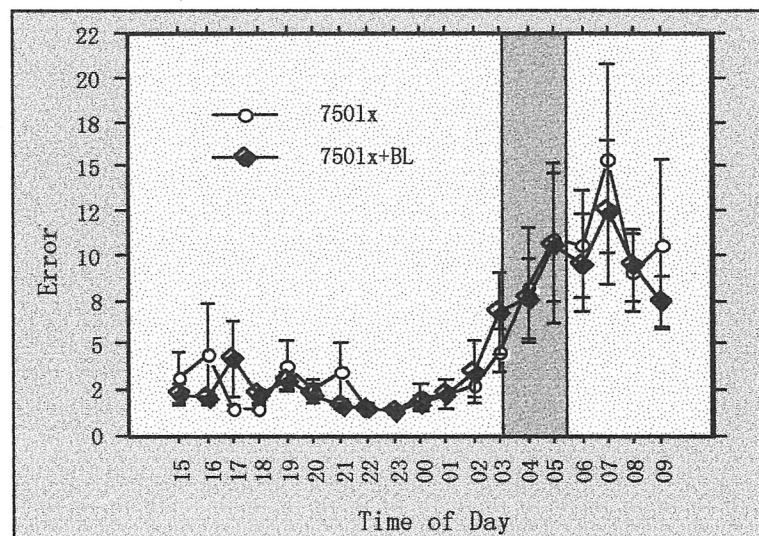


図 6.9 目標追従誤差の変化

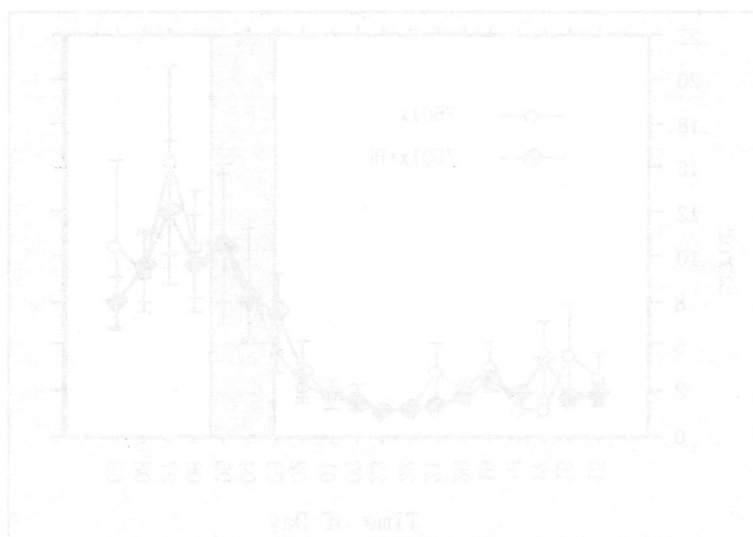
### 6. 1. 6 あとがき

生体活性のための高照度光照射の応用はまだ技術的に確立されていない部分が多く、今後の実用テストを含めて研究成果が待たれるところである。特に個人差に対する影響とその対応はほとんど未解決であり、実用化には数年の時間を要するものと考えられる。したがって、できるだけ多くに方々がこの分野の研究に携わって戴くことを希望します。

(森国 功)

### 参考文献

- 1) Moore-Ede, M.C.: 大事故は夜明け前に起きる、講談社、(1994)
- 2) 小山恵美: 生体リズムと光環境、組織培養工学; 生体リズム特集、(1998)
- 3) 荒木和典、他: 照度の違いによる脳波、心拍の変化、生体生理学シンポジウム論文集、6:439-442、(1991)
- 4) Strogatz, S.H.: Timing of Sleep Onset. Lecture Notes in Biomathematics, The Mathematical Structure of the Human Sleep-Wake Cycle 82-84、(1986)
- 5) Mitler, M.M.: Biological consideration on designing shift schedule. Human factors Society Annual Meeting、(1988)
- 6) 荒木和典、他: パフォーマンス・主観評価・体温・心拍数の夜間変動および仮眠の影響、平成6年度日本人間工学会関西支部大会講演論文集、85-88、(1994)
- 7) 中野紀夫、他: 夜間断眠時における姿勢維持能力の変動、生体生理学シンポジウム論文集、13:541-544、(1998)
- 8) 道盛章弘、他: 夜間の覚醒度変動の脳波による定量化、生体生理学シンポジウム論文集、13:545-548、(1998)



## 6. 2 高照度光の産業分野への応用

### 6. 2. 1. はじめに

社会の高度情報化・国際化にともない、労働時間帯は多様化し、産業の生産性維持や生産効率の向上、安全性、公益性の必要から24時間社会を支える交替制勤務は、現代社会にとって必要不可欠なシステムとなっている。この交替制勤務では、普通の人々が眠る夜間の時間帯に仕事に従事し、翌日の昼間に睡眠をとることになる。しかし、夜勤後の睡眠は、本来の睡眠・覚醒リズムからずれるために中断されやすく、持続性が悪い。さらに、早朝勤務にあたる人は、普通の社会生活の時間帯より早く起床しなければならない。ところが前日に早く就床しても眠れないため、普段の入眠時刻となり、しかも早朝に覚醒するため睡眠不足の状態勤務することになることから、勤務中の強い眠気（覚醒水準の低下）や作業能率の低下（ヒューマンエラーの誘発）を招くことになる。

最近、このような交替制勤務にともなう睡眠・覚醒リズムの乱れを緩和する方法として、高照度の光を利用した照明システムが注目されている。ここでは、交替制勤務者の睡眠・覚醒リズムを勤務スケジュールに調整する目的で開発されたサーカディアン・ライティング・システムの適用事例について紹介する。

### 6. 2. 2. 高照度光と交替制勤務

#### 1) 概要

1989年に、Czeislerら<sup>1)</sup>は夜間に7,000~12,000lxの高照度光を照射すると体温、覚醒水準、計算能力などが影響を受け、睡眠・覚醒リズムが後退することを明らかにした。以後、高照度光照射が夜勤対策として応用できるか否かの議論が高まり、夜勤中の眠気防止や夜勤後の睡眠確保に高照度光照射の有用性を認める報告が多くなった。

高照度光照射による睡眠・覚醒リズムに対する効果は、通常、夕刻から深夜に生じる深部体温の低位位相やメラトニン分泌の頂点位相が、高照度光照射を行うことによって昼間に位相遅延するかどうかに関係がある。このことは、連続の夜勤を行っても完全には逆転しないとされる睡眠・覚醒リズムを、高照度光照射で補償し、夜勤の適応を高める効果を期待するものである。

これまでの種々の被験者実験から、夜間に行う高照度光照射には、睡眠・覚醒リズムの位相を変化させ、夜間の生理・心理機能、そして眠気防止の指標となる覚醒水準を維持し、さらに夜勤後の昼間睡眠の量と質を向上させる効果が明らかとなった。このことから高照度光照射は、夜勤対策の一つとしてなり得ることが示唆されている。

#### 2) 高照度光照射の条件

高照度光照射を実際の交替制勤務に応用するためには、各自の勤務スケジュールに合わせた照射強度、照射時間、照射時刻、照射日数といった諸条件を

決める必要がある。しかし、これらの具体的なパラメータは特許としての価値があるためその詳細は明らかにされていない。これまでの夜勤対策としての高照度光照射に関する幾つかの実験からは、次のような知見が得られている。(1) 夜間に2,500lx以上の高照度光を照射すると睡眠・覚醒リズムの位相が移動する。(2) 移動の幅は、照射強度、照射時刻、照射時間に関係している。(3) 位相の移動方向は、照射時刻に影響を受け、深部体温が最低となる前後で位相が反転(リセット)する。(4) 3,000lxを120分間照射した効果は、5,000lxでは60分、10,000lxでは30分程度でほぼ同等の影響が得られる。

### 6. 2. 3. サーカディアン・ライティング・システム (CLS) <sup>2)</sup>

米国のShiftWork Systems, Inc. (SWS社) は、勤務時間中の室内照明を調光することにより、交替制勤務者の勤務と睡眠のスケジュールを合致させる照明システムを1992年に開発している。SWS社が開発した照明システムは、サーカディアン・ライティング・システム (Circadian Lighting System) という製品名で実用化し、照度を制御するパーソナルコンピュータ (PC)、専用ソフトウェア (Lighting Schedule Supervisor)、および照明機器の3つの要素で構成されている (図1)。

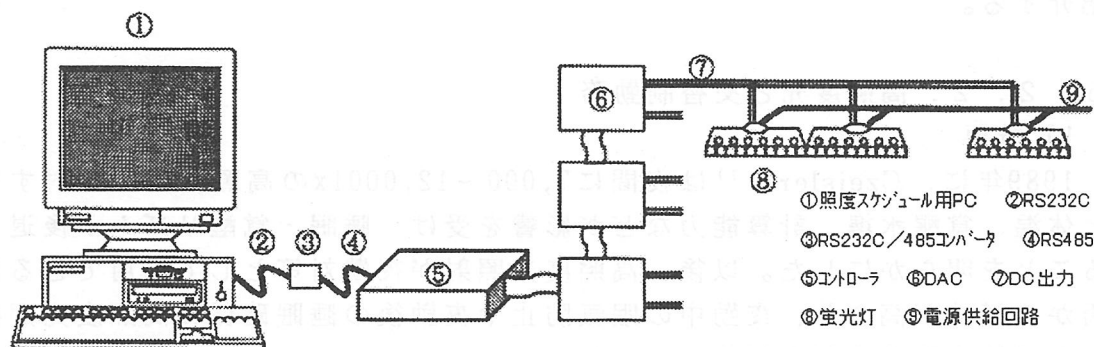


図1 サーカディアン・ライティング・システムの構成

CLSは、およそ500lxから5,000lxまで照度を4,096段階の範囲で調光することができ、光源に高周波点灯専用蛍光ランプ(32WのHf蛍光ランプ6灯搭載、色温度は5,000K)を使用している。

このHf蛍光ランプは、高周波で点灯したとき最も効率が高くなるように設計されたランプであり、専用の調光式・高周波点灯型安定器 (ADVANCE TRANSFORMER MrakVII)

表1 調光式・高周波点灯型安定器の仕様

項目	仕様
光源	フリット型F32T8,F25T8蛍光灯
制御電圧	クラス1/2の低電圧0~10VDC
電源電圧	120V(100-145V)50/60Hz 277V(200-305V)50/60Hz
安定器係数	0.88-0.05(出力100-5%)
安定器力率	最大出力98%以上
全高調波	最大出力10%以下
EMI/RFI	FCCクラスA(業務用仕様に適合)

あり、専用の調光式・高周波点灯型安定器 (ADVANCE TRANSFORMER MrakVII)

が組み込まれている。また、照明器具に付属しているルーバー（American Louver製）はパラボラ（球面）型の断面を持つ白色を使用している。表1に高周波点灯型安定器の仕様を示す。

#### 6. 2. 4. 高照度光システムの適用例

SWS社のCLSは、1992年にNASAのスペースシャトルの施設に初めて適用され、その後、米国原子力規制委員会の緊急対策指令センター、米国Connecticut Yankee Atomic 電力会社のHaddam Neck原子力発電所など6カ所の交替制勤務に導入されている。

図2は米国原子力規制委員会の緊急対策指令センター内に設置したCLSである。室内の天井全面に照明設備が設置され、調光できるエリアを細かく区分し、業務に使用するコンピュータのディスプレイには高照度光による映り込みを防ぐ遮光用の長いフードが取り付けられている（図3）。そして照度を制御するPCには、各交替制勤務者に対応した照度と照射時間が表示されていた（図4）。1996年にCLSを設置したHaddam Neck原子力発電所の運転員からは、高照度光について次のような評価を述べている。<sup>3)</sup>

- ・夜勤での行動がより敏捷になり、早朝の最も辛い時間帯で苦勞する（睡魔と闘う）ことやカフェイン飲料の摂取が減った。
- ・運転操作に対して精神的な準備がうまくできるようになった。
- ・夜勤時での作業能率と安全性が向上した。
- ・夜勤明けには、従来よりも長く眠れるようになり、目覚め感もよくなった。
- ・家族とのコミュニケーションが改善された。

なお、この原子力発電所は6日間の連続夜勤を行う勤務編成である。

#### 6. 2. 5. おわりに

交替制勤務者の負担を緩和する一つの選択肢として高照度光の利用が期待されている。高照度光システムが普及するためには、夜勤現場での研究事例を増やし、実験室で得られた知見を検証する必要がある。また、仮眠との関係、睡眠の個人差（朝型・夜型）、男女差、加齢などの問題は、今後の課題である。

（藤本順三）



図2 CLSの設置例

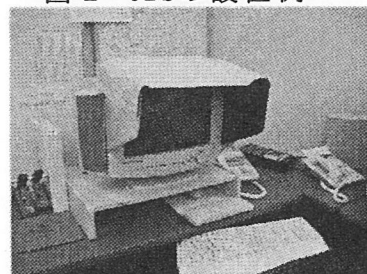


図3 長い遮光フード



図4 CLS用のパソコン

参考文献

- (1) Czeisler, C.A., Johnson, M.P., Duffy, J.F., Brown, E.N., Ronda, J.M., Kronauer, R.E.: Exposure to bright light and darkness to treat physiologic maladaptation to night work. N Engl J Med 322:1253-1259(1989).
- (2) 「サーカディアン・ライティング・システム™」パンフレット、(株)関西テック
- (3) Circadian system lights up the control room. Nuclear News (May 1997).



図1 制御室の様子

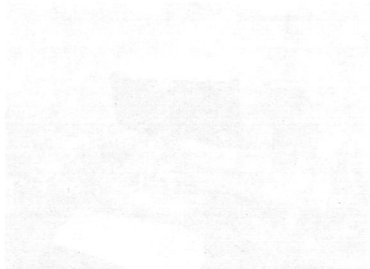


図2 作業員の様子

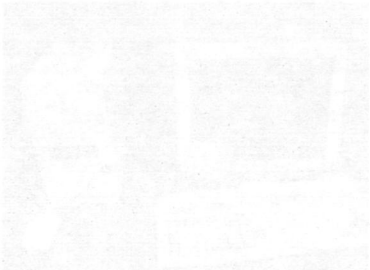


図3 作業員の様子

（以下は本文の抜粋です）

本稿では、夜勤作業による生体リズムの乱れを軽減するための照明設計について、その重要性と具体的な設計手法を説明する。夜勤作業は、人間の自然な生活リズム（サーカディアンリズム）と相反する環境に置かれるため、健康とパフォーマンスに悪影響を及ぼす。適切な照明設計は、この問題を軽減し、作業員の健康と安全を確保する上で重要な役割を果たす。

照明設計においては、光の強度、色温度、および光の周期を考慮する必要がある。夜勤作業の環境では、高照度の照明を必要とする一方で、作業員の目を保護するためには、適切な色温度と光の周期の制御が不可欠である。また、作業員の健康と安全を確保するためには、照明設計だけでなく、作業環境全体の改善も必要である。

本稿では、夜勤作業の環境における照明設計の重要性と具体的な設計手法を説明する。また、作業員の健康と安全を確保するための照明設計の重要性についても触れる。本稿は、夜勤作業の環境における照明設計の重要性と具体的な設計手法を説明する。また、作業員の健康と安全を確保するための照明設計の重要性についても触れる。

（以下は本文の抜粋です）

### 6.3 オフィス空間の視環境による生理的効果

オフィス空間において視環境が重要な役割を演じることは自明であり、それが執務者に及ぼす生理、心理的影響を評価し、その意味を解釈することが大切である。しかし、今迄に視環境が及ぼす生理的影響についてはあまり研究が行われていないのが実状である。

ここでは、オフィス空間において視環境が及ぼす生理的影響を実験的に評価した実例を紹介する<sup>1)</sup>。

#### 6.3.1 実験概要

この研究で用いられた生理的指標は、脳波、心拍数、指先容積脈波、臨界融合頻度である。

脳波は脳の神経細胞群の電気的変動を導出し、縦軸を電位、横軸を時間として記録したものである。α波は心身の弛緩あるいは安静時に、β波は思考等の心的活動が活発なときに優勢に現われるとされている。心拍数は自律神経系の支配を受け、身体や精神の活動時には増加し、安静時には減少するとされている。臨界融合頻度（以降、CFF）は心身の弛緩や疲労によって低下するとされている。指先容積脈波（以降、脈波）は心拍動の影響を受けるので心身の弛緩や緊張の指標となりうるのは勿論であるが、指先の末梢細動脈は物理的環境や精神的ストレスにも敏感に反応し緊張を起こすため、視環境を評価できる指標になる可能性がある。

生理的影響を解釈するための心理的測定としては、眠気の自己評価（以降、KSS）およびSD法による室内視環境の印象評価が行われている。

実験は通常のオフィス空間を模擬した実験室で行われ、実験要因に用いた視環境要素は、窓、植栽・絵画、実験条件は窓および植栽・絵画の有無を組み合わせた次の4条件である。

I. 窓および植栽・絵画ともない条件

（以降、「窓ナシ／植ナシ」と略記する）

II. 窓はないが植栽・絵画はある条件

（以降、「窓ナシ／植アリ」と略記する）

III. 窓はあるが植栽・絵画はない条件

（以降、「窓アリ／植ナシ」と略記する）

IV. 窓および植栽・絵画ともある条件

（以降、「窓アリ／植アリ」と略記する）

実験に参加した被験者は年齢21.24歳の大学生12名（男女各6名）、一回の実験は一人ずつ行われ、5つのセッションからなり約2時間継続している。

#### 6.3.2 実験結果

##### (1) 脳波

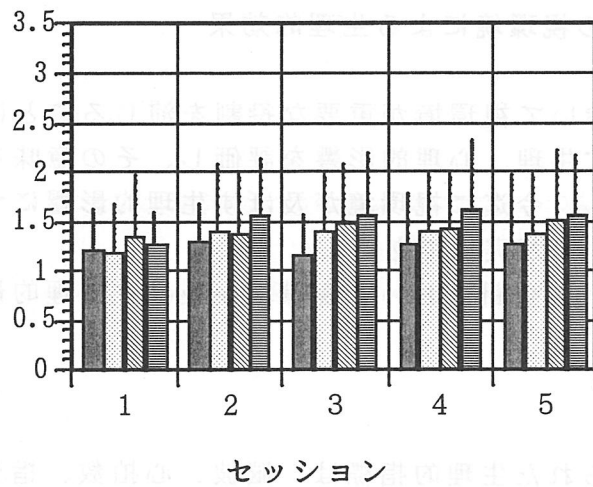


図1  $\alpha$  帯域パワー相対値

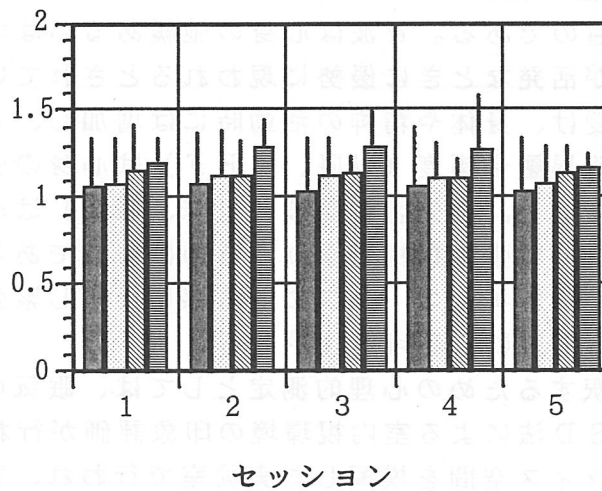


図2  $\beta$  帯域パワー相対値

図1は $\alpha$ 帯域パワー相対値である。第2セッション以降は視環境条件による違いが顕著に見られる。窓および植栽・絵画によってパワー相対値が高くなっている。すなわち、窓あるいは植栽・絵画によってリラックスする傾向があることがわかる。一方、「窓ナシ/植ナシ」条件での値は大半のセッションを通して最も低く、緊張が持続していることが伺える。

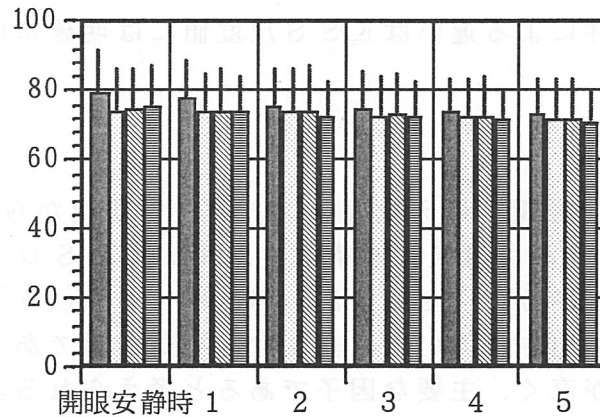
図2は $\beta$ 帯域パワー相対値である。視環境条件による違いが顕著に見られ、窓および植栽・絵画によってパワー相対値が明らかに高くなっている。すなわち、窓や植栽・絵画が契機となって思考等の心的活動が活発になったことを示している。

一方、「窓ナシ/植ナシ」条件ではセッションを通してそれぞれのパワー相対値の変化は小さい。

## (2)心拍数

図3は各セッションの心拍数を示している。心拍数は心身が緊張すると高

く、弛緩すると低くるとされている。セッションや条件別には、実験前の開眼安静時が多少高く、セッションが進むにつれてなだらかに低下している。視環境条件別には「窓ナシ／植ナシ」の値が比較的高くなっている。



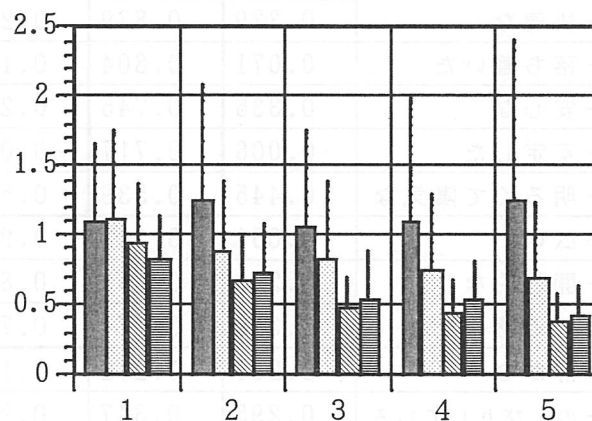
セッション  
図3 心拍数

### (3) C F F

C F F に関しては、「窓ナシ／植ナシ」の値が多少高いが、条件別の違いは明かではない。

### (4) 脈波

脈波の拍動波成分の振幅は心身の緊張や弛緩の状態を反映するとされている。図4に脈波パワー相対値を示す。「窓ナシ／植ナシ」条件においてセッションが進んでもパワー相対値は減少しないが、他の条件、特に窓がある条件ではセッションが進むにつれて減少する傾向が顕著である。従って、窓や植栽・絵画の存在によってリラックスしているようである。



セッション  
図4 脈波パワー相対値

### (5) K S S

K S Sは22項目の眠気を表す文章からなり、各項目には眠気の程度に応じて0から7の間の数値が割り当てられている。K S S尺度値は主観的な眠気の評価で緊張や弛緩の相対的評価に有効であると考えられている。

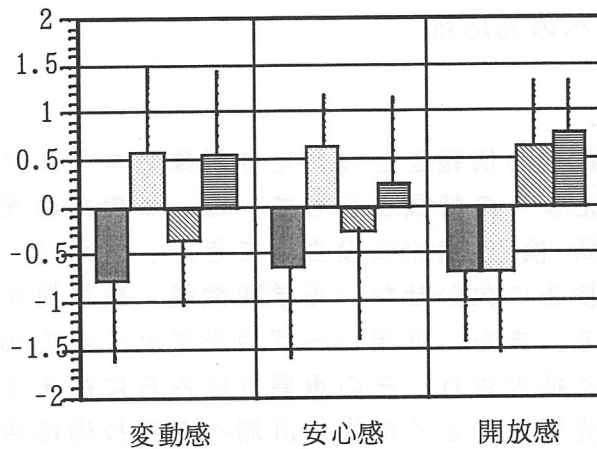
しかし、視環境条件による違いはK S S尺度値には明確には現われていない。

### (6) S D法

S D法による室内視環境の印象評価は、既往の研究から適当な形容詞対18項目を選び、7段階の評価尺度を構成されている。S D法による視環境の印象評価データに因子分析（主成分法、バリマックス回転）が行なわれ。その結果、4因子が抽出されている。表1は因子負荷量である。このうち第3因子までの寄与率が高く、主要な因子であると考えられる。これら3因子は第1因子から順にそれぞれ「変動感」「安心感」「開放感」であると考えられる。図5に3因子についての因子得点の条件別の平均値を示す。「変動感」と「安心感」に関しては植栽・絵画がある場合に評価が高く、「開放感」に関しては窓がある場合に評価が高い。

表1 因子負荷量

形容詞対	第1因子	第2因子	第3因子	第4因子
単調な－変化に富んだ	0.803	0.158	0.228	-0.241
冷たい－暖かい	0.803	-0.049	0.237	0.156
殺風景な－潤いがある	0.753	0.463	0.238	-0.142
つまらない－面白い	0.748	0.198	0.349	0.187
寒々としている－暑苦しい	0.738	0.156	-0.303	-0.198
かたい－やわらかい	0.682	0.278	0.507	0.035
親しみにくい－親しみやすい	0.669	0.422	0.422	0.192
不健康な－健康的な	0.538	0.521	0.404	0.215
不快な－快適な	0.329	0.839	0.229	0.091
落ち着かない－落ち着いた	0.071	0.804	0.155	0.145
不安な－安心な	0.336	0.745	0.231	0.093
不安定な－安定した	-0.006	0.717	-0.005	0.352
暗くて陰気な－明るくて陽気な	0.445	0.539	0.571	0.038
狭い－広い	0.051	0.102	0.924	0.006
閉鎖的な－開放的な	0.230	0.152	0.885	-0.065
圧迫感のある－圧迫感のない	0.320	0.274	0.732	0.093
騒々しい－静かな	-0.269	0.272	-0.180	0.782
せかせかしている－のんびりしている	0.295	0.347	0.280	0.721
固有値	4.905	3.845	3.718	1.570



因子

図5 条件別因子得点

### (7) 視環境の印象と生理的指標との関係

視環境の印象と脳波との関係は、植栽・絵画による「安心感」や「変動感」、窓による「開放感」によってリラックスし、 $\alpha$ 波が増加しているようである。また、植栽・絵画による「変動感」と窓による「開放感」が得られることによって心的活動が活発になり $\beta$ 波が増加したと考えられる。逆に、窓も植栽・絵画もないと「単調感」「不安感」「閉鎖感」が引き起こされて緊張し、 $\alpha$ 波の増加が抑制され、また、視覚的刺激が少ないので心的な活動の契機が少なくなり $\beta$ 波が低くなると考えられる。

脈波に関しては、植栽・絵画による「変動感」や「安心感」と、窓による「開放感」とによってリラックスしたことが考えられる。

### 6.3.3 まとめ

視環境が執務者に及ぼす生理的影響は、特に、脳波において明快に現われている。また、室内視環境印象の心理的因子としては「変動感」「安心感」「開放感」等が抽出されている。総合的に考えると、 $\alpha$ 帯域パワー相対値からは、窓は開放感を与え、植栽・絵画は変動感および安心感を与えて執務者をリラックスさせる効果があり、 $\beta$ 帯域パワー相対値からは、窓や植栽・絵画による刺激は思考などの心的な活動の契機となるといえそうである。

このように、限られた範囲ではあるが、オフィス空間の視環境が執務者に及ぼす生理的影響を評価し、また、心理的影響との関係が示されている。

今後のこの分野の研究が期待される。

(佐藤仁人)

### 参考文献

- (1) 佐藤：室内の窓や植栽・絵画が脳波等に及ぼす影響，日本建築学会計画系論文報告集第461号，pp.87-95，1994.7

## 6.4 医用生体計測への光応用

### 6.4.1 はじめに

光は、非接触で対象物の情報をとらえたり対象にエネルギーを与え得ることなど、医療に適した多くの特長を有している。このため光学技術は、早くから医療の分野で診断・検査・治療に役立ってきた。例えば、耳鼻科医のつけている額帯鏡、検体検査に欠かせない光学顕微鏡、新生児黄疸に対する光線療法などがあげられる。また、近年レーザや光ファイバの出現により光の医療応用の範囲は大きく拡大され、その重要性はさらに高まりつつある。ここでは、医療における光利用、とくに生体計測への光技術応用につき、調査結果を報告する。

### 6.4.2 医療応用の動向

レーザや光ファイバを用いた新たな診断・治療技術のいくつかは、すでに臨床応用の域に達し、その領域で不可欠のものとなりつつある<sup>1)</sup>。光ファイバ内視鏡は、食道や胃だけではなく、血管を含む種々の臓器の診断用に分化発展してきた。またその働きは、単に観察にとどまらず、低侵襲の外科的治療を可能とするなど、医療の革新に貢献しつつある。レーザ光の高エネルギーを利用した応用も、レーザコアギュレータによる眼底治療やあざの処置など皮膚科的治療のように、臨床に定着したものとなっている。最近では、光感受性薬剤と併用してガン治療を行う PDT (photodynamic therapy)、血管内視鏡と組み合わせて血管形成術を行う laser angioplasty などが、新たな臨床応用の可能性をめざして実用が試みられている。また、レーザ光の非熱効果を利用した応用も興味深く、創傷治癒の促進や痛みの緩解などへの応用が期待されている<sup>2, 3)</sup>。

一方研究の分野でも、医療応用につながる光技術の研究が盛んになってきている。そのひとつの現れとして、光学関連学会における生体応用に関する研究発表数や、生体工学関連学会における光応用に関する研究発表数が、年々増加してきている<sup>4, 5)</sup>。そのような中で、既存の方法や手法の深化発展が図られているが、また多くの新たな試みも報告されつつある。例えば、光の生体安全性や無侵襲計測の可能性に着目して体内構造イメージングをめざしたり、分光法を応用して体内機能を計測しようとする研究などがある<sup>6)</sup>。また、光を用いることにより情報伝送量が飛躍的に向上することに着目し、光通信技術を医療に応用しようとする試み<sup>7)</sup>なども盛んである。以下、これらの具体例として、生体透視イメージングと光バイオテレメトリ手法を紹介する。

### 6.4.3 生体の光透視イメージング

これまで「光は生体を透過しない」と考えられ、光を用いて X 線のような透視を行うことは不可能とされてきた。しかし近年の光学技術の進歩は、こ

の常識をくつがえしつつある。生体組織の吸光スペクトルを見ると、生体色素や水による吸収のため、光の透過率は一般に低い。しかしその中で、波長 700 ~ 1200 nm の近赤外領域は、部分的に吸光度の低い「分光領域の窓」となっている。つまりこの波長域の光は、生体組織をよく透過する。またこの波長域では、ヘモグロビンなどの生体色素がその酸素化状態に応じて特有の吸光スペクトル変化を呈する。したがって透視像が得られれば、体内の生理的变化を体外から無侵襲的にイメージングできるという重要な可能性が期待できる。

しかし透過率が高いだけでは体内構造を可視化することはできない。光の場合、X線や磁気と異なり、生体組織における散乱という困難な問題が存在するからである。すなわち、吸光度の低い波長域を選ぶことにより透過光が得られるが、強い拡散性の散乱のため生体内の構造物を見ることはできない。これに対し近年、拡散されて出てきた光から体内構造の情報を抽出することによって、光による生体透視ひいては光CTを実現しようとする試みが見られるようになってきた。最近の国内外の研究動向については、他<sup>8-11)</sup>に詳しい。

### (1) 近赤外光の生体透過性

まず、近赤外光の生体透過性の高さを図1に示す。これは、波長 880 nm の発光ダイオードを光源とし、手部を透過してきた光を特殊な高感度撮影装置で撮影した動画像の一シーンである。この場合、生体には何ら操作を加えておらず、血管造影剤等も一切使用していない。像中には、血管像が明瞭に観察できる。しかし、骨などの内部構造物はほとんど見えていない。これは骨が、この波長域では血液に比べ吸光度が小さいこと、また比較的深い位置にあるため散乱の影響を大きく受けることに起因すると考えられる。この結果からも、生体組織による強い光散乱の問題が、生体透視に対し大きな障害となっていることがうかがえる。

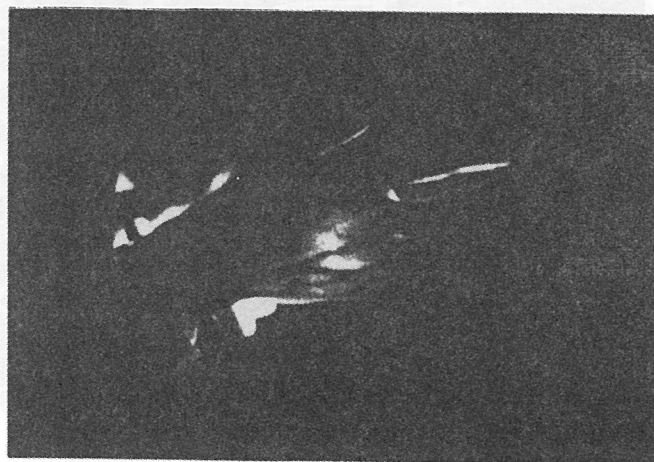


図1 近赤外光の生体透過性  
(ヒト手部動画像)

Fig.1 Transmission of near-infrared light  
through biological body (moving image).

### (2) 体内機能のイメージング

前述のように近赤外域では、組織の酸素化状態の変化に応じて、生体色素が特有の吸光スペクトル変化を呈する。光による透視の大きな意義は、この

原理を利用して体内の機能情報をイメージングすることにある。なお、散乱の影響を抑制しつつ体内の吸光度変化を求める原理については、他<sup>8, 11)</sup>を参照されたい。

高等動物の脳皮質は、感覚野や運動野などのように高度に機能が局在していることが知られている。したがって、体の特定部位を動かしたり刺激したりすると、その部位に対応する脳の特定部位の血流量が局所的に変化すると考えられる。そこで、光透視によりこの変化をとらえることが試みられている。

ラット前肢を電気刺激した前後の透過像の変化を光透視によりイメージングした結果を図2に示す。ラット頭部は、除毛以外の処置はとくにっていない。計測の詳細については、他<sup>12)</sup>を参照されたい。

図2(a)は右前肢を刺激した場合、(b)は左前肢を刺激した場合である。刺激側と反対側の対称位置に、局所的変化が検出される。変化部位は、脳波計測により最大振幅を観測した部位とほぼ一致する。このような結果より、脳における機能的変化を透過像中にイメージングできると考えられる。

### (3) 光による断層イメージング

光による透視が可能になると、光による生体断層イメージングすなわち光CTの可能性が期待される。現在この光CTの実現をめざして、各国で競って研究が行われている<sup>9, 10)</sup>。

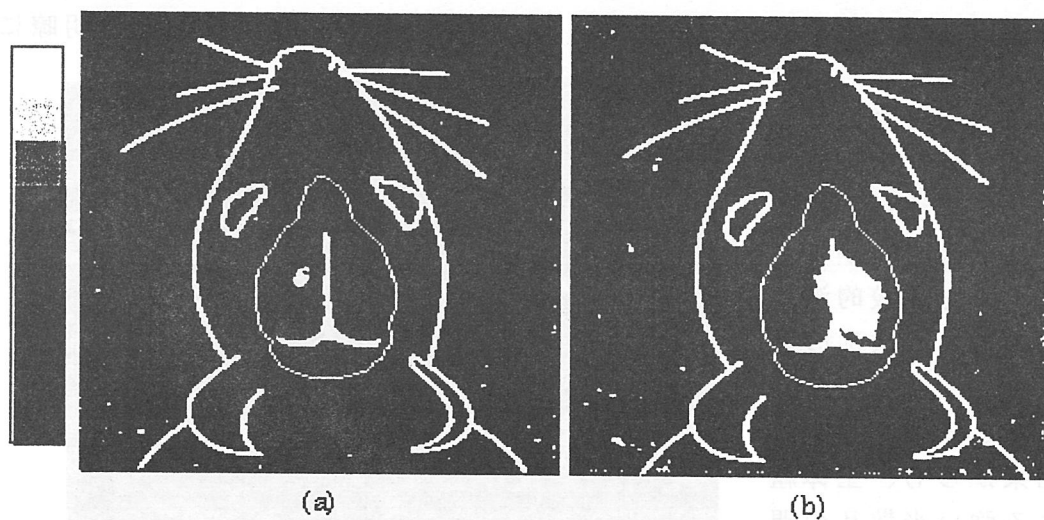


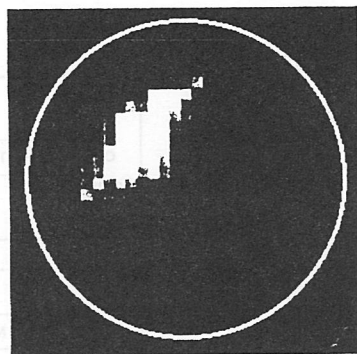
図2 ラット脳の機能的イメージング：(a)右前肢刺激,(b)左前肢刺激

Fig.2 Functional imaging of rat brain:

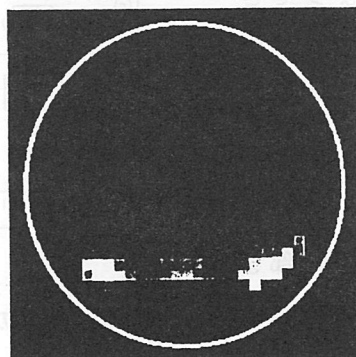
(a) right forelimb stimulated, (b) left forelimb stimulated.

図3にマウス腹部の光CT像を示す。計測の詳細については、他<sup>13)</sup>を参照されたい。(a)はマウス腹部の肝臓を含む横断面の像、(b)は左右腎臓を含む横断面像である。右側の解剖図に示す破線は、それぞれの測定横断面の位

置に対応している。  
 血液量の多い臓器の存在位置に高吸光度の分布が得られていることがわかる。種々の技術的制約から、まだ分解能の低い像ではあるが、肝臓や腎臓の存在を識別できる程度の光CT像が得られるようになってきている。



(a) liver



(b) right and left kidneys

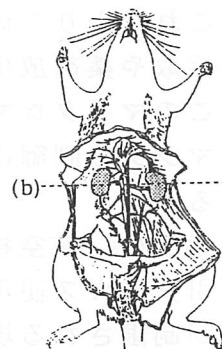
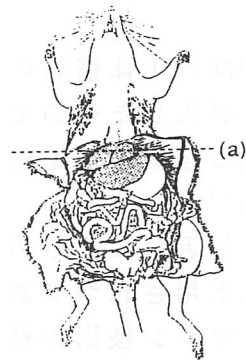


図3 光によるマウス腹部のCT像：  
 (a)肝臓を横切る断層面、(b)腎臓を横切る面  
 Fig.3 Optical CT images of mouse abdomen:  
 (a)cross section at the liver, (b)at the kidneys.

#### 6.4.4 光バイオテレメトリ

光ファイバ通信に見られるように、光技術は通信技術と結びついて多くの技術革新をもたらしつつある。医療の中で通信技術を利用したものに、バイオテレメトリ (biotelemetry、生体情報の遠隔計測) という手法がある<sup>14)</sup>。ここでは、それらのいくつかを紹介する<sup>15-17)</sup>。

バイオテレメトリは、その機能に従って、次のように分類することができる。すなわち、(1)生体内情報の取出し、(2)生体の無拘束計測、(3)生体情報の遠隔地への伝送、(4)生体の位置追跡、である。これらのうち、(1)~(3)は医学や医療の分野に利用されるが、(4)は主として野性動物の行動追跡などに用いられる。

これらの機能に対し、伝送媒体として光を用いたバイオテレメトリ手法の原理図を図4に示す。その応用の違いによって、図のような伝送形態の異なったものが考えられる。また、これらの原理の実現可能性を調べるため開発したシステムの概念図を図5に示す。(a)は、生体内情報の取り出しに光技術を導入したものであり、実験動物に用いる植え込み式経皮テレメトリ装置として実現された<sup>18, 19)</sup>。(b)は、生体情報の無拘束計測に光技術を導入したものであり、体表装着式の心電図・体温テレメトリ装置として実現された<sup>20)</sup>。

(c)は、生体情報の遠隔伝送に光技術を導入したものであり、多元医用情報の建物間伝送装置として実現された<sup>21)</sup>。

最近はこれらの技術が新たな対象に応用されつつある。近年のマイクロマシン技術の進歩により、飲み下し可能な大きさのカプセルに微小機械を封入することが可能となってきた。これにより、体内特定部位での検体採取や薬剤放出が考えられている。このマイクロマシンとの通信およびマシンの制御に(1)の手法が用いられる。

(2)の手法は、航空機や宇宙船内部または引火性ガス使用環境など電波の利用が制限される場合にその意義が大きく、救急車内の患者や宇宙船内の飛行士の生体情報取得などに利用される<sup>16, 17)</sup>。

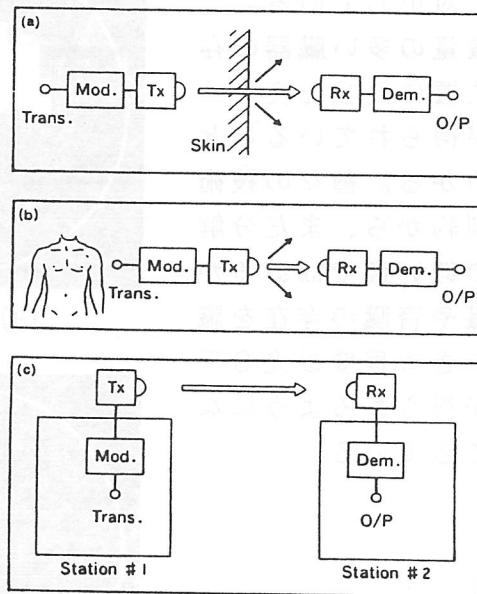


図4 光バイオテレメトリ手法の原理：  
(a)体内情報の取出し，(b)無拘束計測，(c)遠隔伝送  
Fig.4 Principles of optical biotelemetry:  
(a) data acquisition from inside of the body,  
(b) ambulatory measurement, (c) remote transmission.

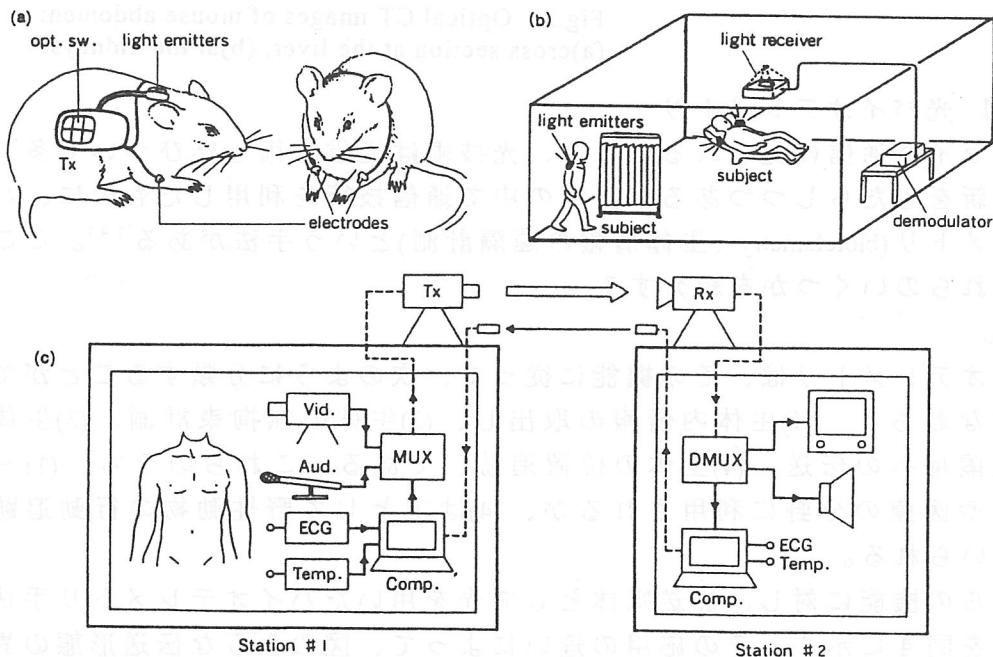


図5 光バイオテレメトリの実現例：  
(a)ラット体内心電図の経皮テレメトリ(装置および導線はすべて体内)，opt.sw.:光駆動式の電源スイッチ，(b)間接散乱光による無拘束計測，(c)多元生体信号の実時間遠隔伝送，Vid:画像信号，Aud:音響信号，MUX:多重化器，Comp:マイクロコンピュータ，Tx:送信機，Rx:受信機，DMUX:多重化分離器，破線:光ファイバ

Fig.5 Realized examples of optical biotelemetry:(a) transcutaneous ECG telemetry in the rat body (Equipment and leads were all inside the body.), opt.sw: power switch driven by optical signal, (b)

ambulatory measurement using indirect scattered light, (c) real-time remote transmission of multichannel biological signals, Vid:video signal, Aud:audio signal, MUX:multiplexer, Comp:microcomputer, Tx:transmitter,Rx:receiver, DMUX:demultiplexer, Broken lines are optical fibers.

またこの手法は、手術室や集中治療室で患者周囲に電線やケーブルが錯綜する問題の解決にも利用される<sup>22)</sup>。(3)の手法は、光ファイバ通信網や衛星通信<sup>23)</sup>を利用して、全地球規模の遠隔医療の実現に利用される。

上記の例は、光を電波のように情報伝送における搬送波として用いた場合であるが、光そのものを情報取得のプロローブとして用いることもできる。そのひとつに、未熟児や新生児の呼吸監視への応用がある<sup>24, 25)</sup>。原理を図6に示す。これは、ビーム光を新生児胸壁面に照射し、体表に生じる散乱性のスポットの動きをとらえることにより、胸壁の微小な動きを検出するものである。このようにして、光を用いることにより、非接触で対象の生体情報をとらえることができる。

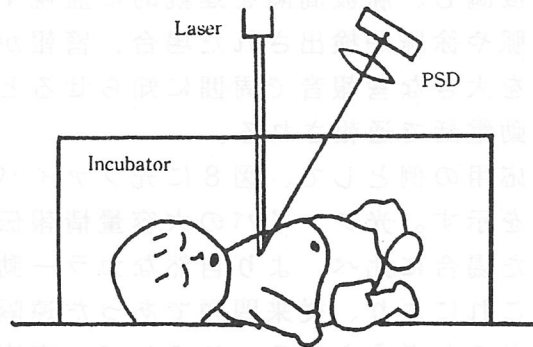


図6 光による呼吸監視

Fig.6 Respiration monitoring with light.

#### 6.4.5 在宅医療・福祉への応用

近年、在宅医療や福祉充実の重要性が指摘され、支援機器の開発が活発に行われるようになってきた。光学技術を利用したものとしては、視覚障害者用の種々の読書補助機器や照明制御装置、赤外線リモコンによる室内環境制御(カーテン開閉、エアコンの制御など)のように、既に実用化されているものもある。しかし、在宅医療や福祉支援のために光学技術を基本として利用したものは、現在のところ多くはない。

図7に、在宅医療や福祉支援に光学技術を用いた手法の一例を示す<sup>26)</sup>。この手法は、バイタルサインをテレメトリにより無拘束モニタリングし、被験者が危険状態になったときに自動的に警報を発す

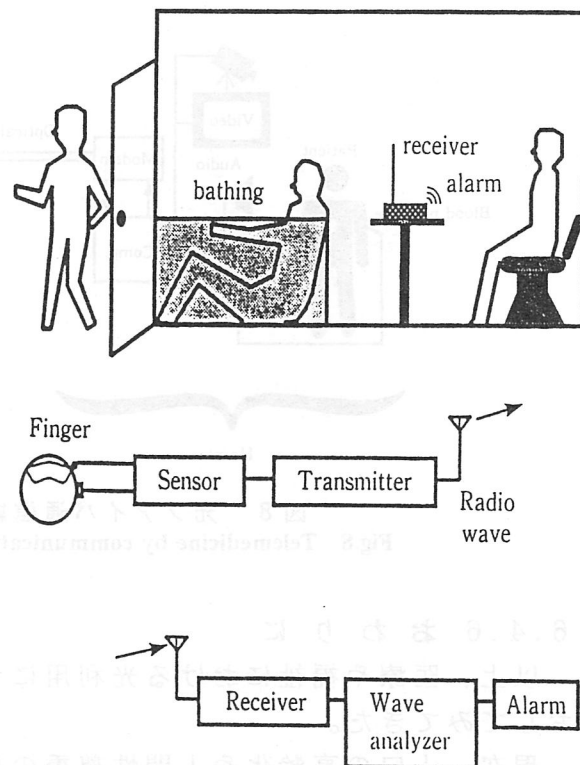


図7 テレメトリによるバイタルサイン監視:

- (a) 在宅モニタリングの原理,
- (b) モニタリングシステムの構成

Fig.7 Vital sign monitoring by telemetry:

- (a) principle of in-home monitoring,
- (b) outline of monitoring system.

るものである。このテレメトリシステムの送信部は指輪型にできており、常時装着が可能である。バイタルサインとしては、指輪装着部位で光電脈波を検出する。光電脈波は、指輪に組み込まれた一対のLEDとフォトダイオードにより、受光強度の変化として検出する。受光強度に対応する信号は、テレメトリにより同一室内の受信機に伝送される。受信機では、受信信号から脈波を復調し、脈波間隔を連続的に監視する。脈波間隔が設定範囲を越え異常な頻脈や徐脈が検出された場合、警報が自動的に発せられる。警報は、緊急事態を大きな警報音で周囲に知らせるとともに、ホームドクターや別居親族に自動電話で通報される。

別な応用の例として、図8に光ファイバ公衆通信網を利用した遠隔医療の概念図を示す。光ファイバの大容量情報伝送能力により、従来の電話回線を利用した場合に比べ、より自然なカラー動画像を利用した遠隔医療が可能となる。これにより、従来問題であった遠隔医療の時間遅れや違和感を大きく軽減できると考えられる。こうして、家庭にいながら専門医の診断を受けることが可能となり、またナースがいれば医師からの指示により家庭で治療を受けることも可能となる。

このように、光学技術を導入することにより、在宅医療や福祉の支援に対し、新たな可能性を拓いたり、従来の手法の能力を大きく向上させることができる。

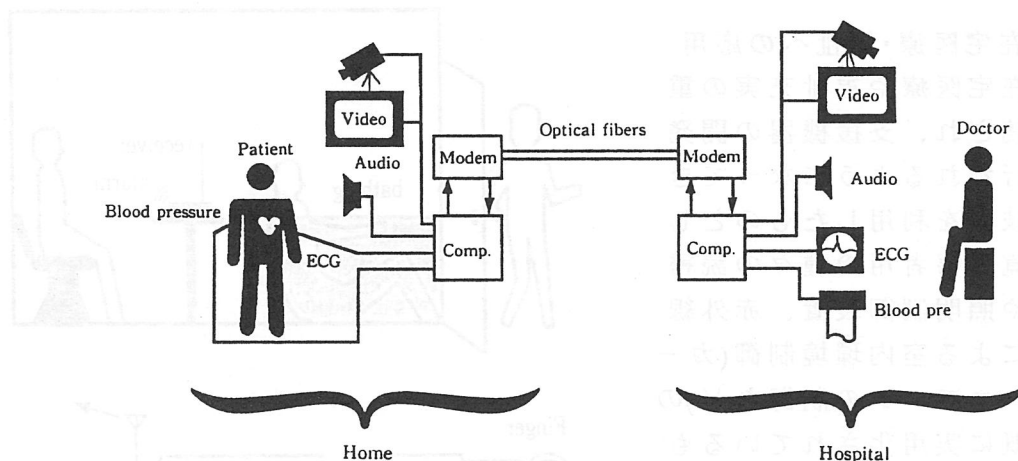


図8 光ファイバ通信網による遠隔医療  
Fig.8 Telemedicine by communication network of optical fibers.

#### 6.4.6 おわりに

以上、医療や福祉における光利用につき、その可能性と将来性を事例をとおしてみた。

現在、人口の高齢化や人間性尊重の思潮の高まりの中で、医療や福祉の面でもQOLやひとにやさしいものが求められるようになってきた。具体的には、これまでの技術や手法に対し、無侵襲(あるいは低侵襲)、非観血、無拘束、非接触、無意識などの特性が求められてきている。本稿で述べたように、

光や光学技術は、これらの要求を満たしたりその目的によく適合する性質を本質的に備えている。

近年の光学技術の進歩は、科学史上特筆に値するほど大きくまた急速である。その結果、それを利用する側にも大きな変革を与えつつある。これらを考え合わせると、今後医療や福祉における光利用は、種々の形でますます進展していくものと思われる。それらの積極的な推進と、その中から真に上記の要求に応えるものを評価選別していくことが、これからの課題と考える。

(清水孝一)

#### 参考文献

- (1)電気学会調査専門委員会：生体を対象とした光応用技術、電気学会技術報告、371,pp.1-73 (1991).
- (2)電気学会調査専門委員会：医療を中心とする光応用技術、電気学会技術報告、525, pp.1-88 (1994).
- (3)電気学会調査専門委員会：臨床医学への光応用技術、電気学会技術報告、in press.
- (4) OSA: Abstracts of OSA annual meeting, (1997).
- (5)日本M E学会：医用電子と生体工学、35 suppl. (1997).
- (6) B.Chance, R.R.Alfano and A.Katzir, ed.: Optical tomography, photon migration, and spectroscopy of tissue and model media, SPIE, 2389 (1995).
- (7) ISOB, Biotelemetry, 14, pp.15-338, (1998).
- (8)清水孝一、山本克之：「生体の光透視と機能イメージングの可能性」、B M E , 8, No.5, pp.41-50, (1994).
- (9)清水孝一、山本克之：「光による生体断層イメージングー基礎研究の現状と連続光CTー」、B M E , 8, No.8, pp.4-13, (1994).
- (10)清水孝一：「生体の光透視イメージングー光CT実現のための研究の進展」、O plus E , No.160, pp.100-110, (1993).
- (11)清水孝一(分担執筆)：生体情報の可視化技術、コロナ社 (1997).
- (12)高、酒谷、北間、清水、山本：「光透視による脳機能イメージングの試み」、電子情報通信学会技術研究報告、MBE95-176, pp.13-18, (1996).
- (13)北間、清水、山本：「光による生体断層イメージングの試み」、医用電子と生体工学、31, pp.282-288 (1993).
- (14) R.S.Mackay: Bio-medical telemetry, IEEE Press (1993).
- (15)清水孝一：「光を用いたテレメトリー」、臨床モニター、3、 pp.327-339 (1992).
- (16)清水孝一：「光バイオテレメトリー」、体力科学、44, pp.317-324 (1995).
- (17)清水孝一：「光による生体情報テレメトリ技術」、B M E、9、No.10, pp.35-50, (1995).
- (18)工藤、清水、松本：「散乱光による経皮バイオテレメトリーの基礎的研究」、医用電子と生体工学、23、 pp.194-198 (1985).
- (19) N.Kudo, K.Shimizu and G.Matsumoto: "Fundamental study on transcutaneous biotelemetry using diffused light, Frontiers Med. Biol. Eng., 1, pp.19-28 (1988).

- (20)工藤、清水、松本：「間接伝搬光による光バイオテレメトリ」、医用電子と生体工学, 25, pp.91-98 (1987).
- (21)小田切、津田、清水、松本：「光空間伝搬による多元生体情報伝送システムの開発」、電子通信学会技術研究報告、MBE85-36, pp.21-28 (1985).
- (22)宮永、清水、山本、上：「光による医用機器間データ伝送システムの開発」、電子情報通信学会技術研究報告、MBE94-120, pp.57-62 (1995).
- (23)H.Murakami, K.Shimizu, K.Yamamoto, T.Mikami, N.Hoshimiya and K.Kondo: "Telemedicine using mobile satellite communication", IEEE Trans. Biomed. Eng., 41, pp.488-497 (1994)
- (24)K.Shimizu, K.Kobayashi and G.Matsumoto: "Respiratory and cardiac monitoring of neonate by non-contact optical technique", Biotelemetry, 10, pp.626-632 (1989).
- (25)清水孝一：「光による体表変位計測」、B M E、4, No.4, pp.33-43 (1990).
- (26)山下、清水、松本：「指輪型バイタルサインテレメータの開発」、電子情報通信学会技術研究報告、MBE95-40, pp.63-68 (1995).

## 7. 時間遺伝子

### 7.1 はじめに

人間の生理・行動には性質の異なったいろいろな生理形質や行動様式が存在することは良く知られている。個体レベルでの行動および生体内部における各生理形質の機能は生体を取り巻く外部環境要因との複雑な動的平衡状態を取りながら発現される。人間や他のいろいろな動物にとって、温度、湿度、光、栄養、重力、音などの外部環境要因のうちで光要因は主に眼および頭蓋部を通過し、光受容機能を持つ受容体や器官および生体成分を経由する情報要因として作用したのちに異なった種類の行動および生理形質の発現を誘起するのに深く関与している。植物にとっての光要因は光合成などのエネルギー源として機能する重要な性質を持つが、動物にとっての光要因は一連の生理反応の最初の反応を引き起こす引き金としての役割を果たすことが多く見られる。このように、光放射の影響は光受容器や生体組織による光吸収によって始まり、いろいろな生理機能や行動・生態の発現機構と密接に関係するが、その影響の程度は光放射の量および質によって異なることが知られている<sup>1)、2)</sup>。さらに、これらの生理形質、行動、生態の変化様式は時間要因が関与する事象を時間単位毎にグループとしてまとめることが可能であり、いろいろの種類のリズムとして区分されている。特に、リズムの周期が約24時間であるものをサーカディアンリズム（概日リズム）と呼び、人間の日常生活においてこのサーカディアンリズムは行動や生理機能の時間的な発現様式として容易に認められる<sup>3)~5)</sup>。

最近のいくつかの科学雑誌（Nature, Science, Cell, Brain Research, Neuron など）において生体リズムおよび生体時計に関連した論文が掲載され、時間遺伝子（Clock Gene）と呼ばれる言葉が生物学、特に、時間生物学領域において重要な言葉（キーワード）になって来ている<sup>6)~9)</sup>。この時間遺伝子は、ヒトを含んだ生物の生理・行動・生態などにいろいろの関係し、生物が環境変動、特に光環境の明暗変動に対応するための分子装置である生物時計の中心部分を構成すると考えられる。実際、特定の研究集団の努力によって、いろいろの生物のリズム機構の解明は現在鋭意取り組まれ、急激に進展しているので、時間遺伝子は従来の架空の概念から実際に実在する遺伝情報を所有した機能分子として報告されつつある。しかし、時間遺伝子の分子論的な実体は極めて複雑な分子機構であり専門的な内容を多く含むので、自然科学、特に生物学に関与している研究者や関心を持っている人々にとってもあまり平易でなく、理解しがたい内容をかなり含んでいると言える<sup>10)、11)</sup>。

それゆえ、今回は、生体リズムの形成において重要な役割を果たすと思える時間遺伝子の機能と性質に焦点を当て、人間を含んだ動物の行動・生理機能の発現機能に関連する最近の研究について調査したので報告する。

## 7.2 生体リズムと生物時計の存在部位

バクテリアなどの単細胞生物から人間などの高等動物に至るまでの多くの生物において、図1から図4の(1)生物発光遺伝子の移入によるシアノバクテリアの発光リズム、(2)ナツメガイの自発的視神経の活動電位リズム、(3)ニワトリ松果体のNAT活性リズム、(4)ヒトの睡眠・覚醒リズムなどに示されるように、いろいろな種類の概日リズム(サーカディアンリズム)が微生物から高等動物にわたって存在する<sup>12)~15)</sup>。この概日リズム(サーカディアンリズム)の発現は生物の内部に存在する生物時計の作用によって制御され、これらの時計の存在場所は生物によって顕著に異なると言われている。例えば、アメフラシなどでは眼が存在する神経節に生物時計が存在するが、昆虫では複眼と脳の間位置する視葉に存在すると言われている。生物進化がすすみ脳機能が充実してくるにつれて、は虫類や鳥類では生体リズム形成機構における松果体の機能強化が行われはじめ、この松果体も生体リズムの発現を調節する生物時計としての重要な機能分担を行っている。高等動物の脳がさらに発達するに伴って人間を含む哺乳動物では頭蓋骨で脳を包囲し外部からの衝撃から防御するように進化したので、眼や脳幹の立体配置が効率よく整理され、主な生物時計は視交叉上核部位に局在するように変化している。実際、図5に示すように視交叉上核は動物の進化とともに発達し、主に眼や松果体およびその他の光受容体からの光情報を視神経をはじめとした関連神経群の興奮・発火現象として発現する経路を制御している<sup>16)</sup>。これらの神経線維を主軸とした情報経路は視交叉上核の手術処理、例えば、周囲の組織・器官との情報連絡機構を切断分離し視交叉上核の”島”形成することや視交叉上核そのものの摘出操作の実験結果からの的確に証明されている(図6)<sup>17)</sup>。

光合成系IIの *psbAI* 遺伝子のプロモーター (*PpsbAI*) 下流にルシフェラーゼ遺伝子 (*luxA luxB*) を連結し、シアノバクテリア *Synechococcus* sp.PCC7942 のゲノムに組み込む。生物時計が *PpsbAI* の活性を制御するので、ルシフェラーゼ量の変動し、基質デカナルを与えれば、生物発光の概日リズムを示す。この概日リズムは周期が温度補償されており、位相が光条件でリセットできる。即ち真核生物と同じ性質を持っている。なおオリジナルの *PpsbAI* は無傷であるので成育は野生型と変わらない。発光強度は相対値で示してあるが、極めて弱く、ヒトの目の感度の1万分の1以下である。

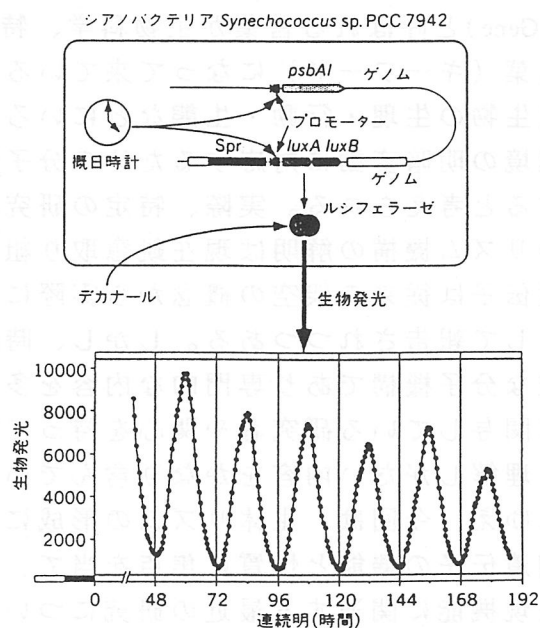


図1 生物発光遺伝子の移入によるシアノバクテリアの発光リズム<sup>12)</sup>

(a)単離した眼の視神経にガラス吸引電極を接着させて概日リズムを記録した。眼は連続的暗期の下、15℃の人工海水の中に置いた。(b)ナツメガイの単離眼における視神経のインパルス(発火)頻度のリズム。眼は、7日以上自動的にリズムを示す。明暗条件下の時間の24は夜明け時間を示す。(c)59個の眼が示した第1回目のサイクルの平均的波形。その波形は急激に活性が上昇し、その後徐々に減少する特徴を示す。

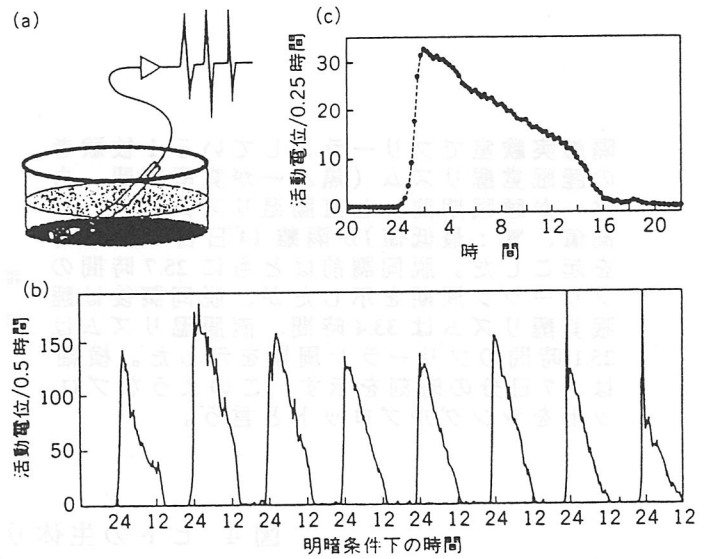


図2 自発的視神経における活動電位の概日リズム<sup>13)</sup>

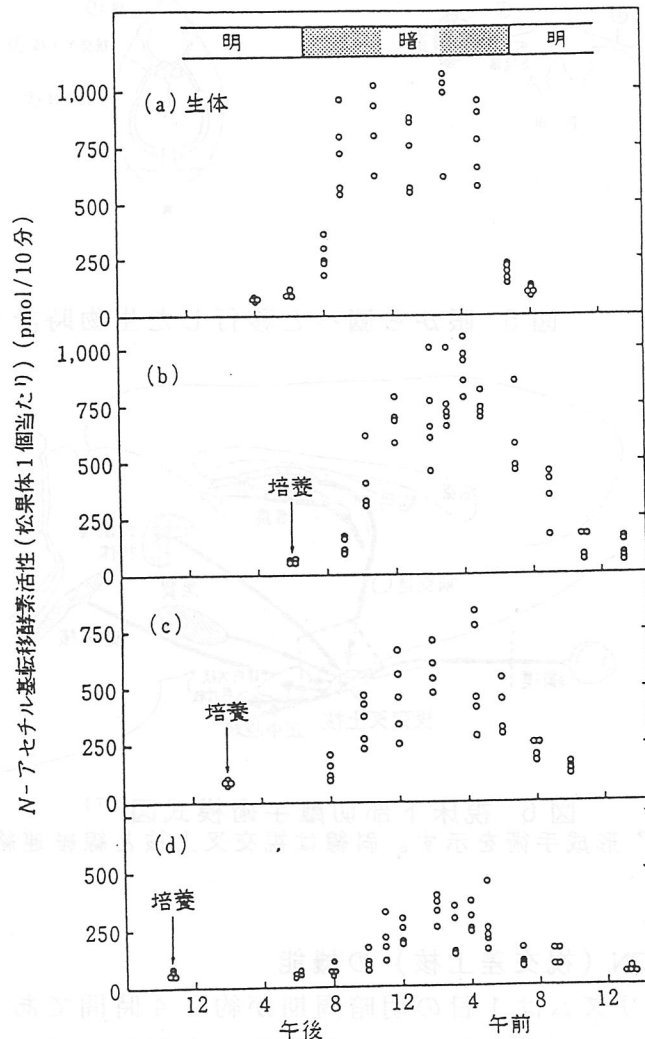


図3 ニワトリの生体(a)及び器官培養松果体(b~d)におけるNATリズム<sup>14)</sup>

丸印1個は1羽のニワトリの松果体の活性値を示す。

隔離実験室でフリーランしている1被験者の睡眠覚醒リズム（黒バーが覚醒期間、白バーが睡眠期間）と直腸温リズム（▲：最高値、▼：最低値）が隔離14日目で脱同調を起こした。脱同調前はともに25.7時間のフリーラン周期を示したが、脱同調後は睡眠覚醒リズムは33.4時間、直腸温リズムは25.1時間のフリーラン周期を示した。横軸は、7日分の時刻を示す。このようなプロットをシングルプロットと言う。

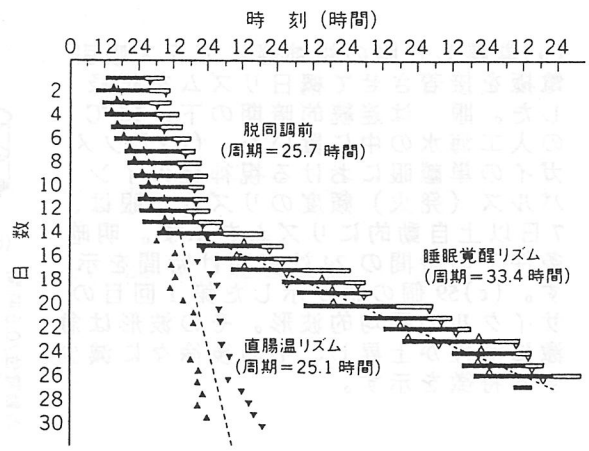


図4 ヒトの生体リズムの内的脱同調<sup>15)</sup>

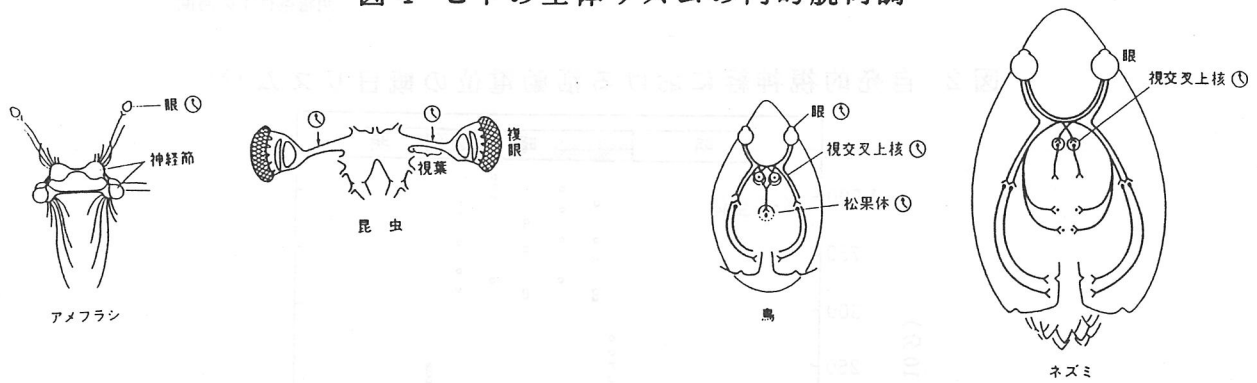


図5 眼から脳へと移行した生物時計<sup>16)</sup>

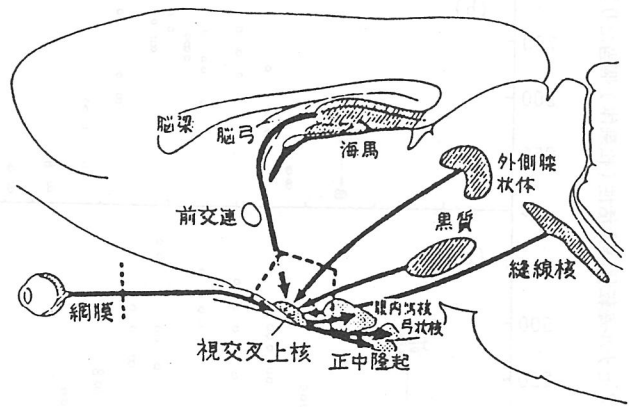


図6 視床下部切離手術模式図<sup>17)</sup>

太い破線は“島”形成手術を示す。斜線は視交叉上核と線維連絡をもつ部位

### 7.3 哺乳動物 SCN (視交差上核) の機能

サーカディアンリズムは1日の明暗周期が約24時間であることは良く知られているが、このリズムを形成し、その動作を制御している分子機構はいまだに完全には解明されていない。哺乳動物を含む高等動物のサーカディアンリズムは脳の視交差上核 (Suprachiasmatic nucleus)(SCN) 上に存在する生物

時計によって制御されている証拠が数多く報告されている。実際、視交差上核は脳内のいろいろの部位、例えば、正中隆起、海馬、外側膝上体、縫線核、腹内側核、弓上核、網膜などと神経線維の連絡を持つことは "島" 形成手術によって前述のとおり明らかにされている (図 6)。さらに、"島" 状態の視交差上核におけるニューロンのマルチユニット活動は明確な正弦波様のリズムを描くが、黒質ではサーカディアンリズムは認められていない。さらに、視交差上核部位を外科的に摘出することによりいろいろな生理機能のサーカディアンリズムの発現が消失することも認められている<sup>18)</sup>。同様な現象として、文鳥の視交差上核あるいは松果体を摘出した場合にフリーランしていたリズムの消失が報告されている。また、視交差上核部位を摘出して他の個体に移植すると、サーカディアンリズムの周期は移植した視交差上核のリズム周期にしたがって変化した<sup>19)</sup>。これらのことは視交差上核に存在する生物時計がサーカディアンリズム形成に必須であることを示唆している。しかし、高等動物のサーカディアンリズム形成機構が視交差上核の機能に依存することは予測されても、秒、分、時間、日、月、年等の具体的な時間単位の決定機能がどんな要因によって制御され、個体の機能として発揮されるのかは明確でない。最近、視交差上核の時計細胞 (Clock Cell) による機能発現機構が提唱されている<sup>20)</sup>。しかし、現在のところ、これらのモデルは依然としてモデルの域を出ず、時計細胞による時間単位の決定に関する生理学的な機能解明は残されたままである。

#### 7.4 時間遺伝子

時間遺伝子が現実的な物質として実証され、さらに遺伝情報物質としての核酸配列が詳細に決定されて、科学雑誌 CELL に報告されたのが 1997 年秋であるので、それ以前には染色体や生体レベルでの研究報告が主流を占めていた。また、時間遺伝子に相当する遺伝物質は微生物から人間に至るまでの多くの生物種に存在し、さらに生物が生存する外部環境に適応したいろいろの機能を保持した特異的な形態で存在することが推察されてきたが、これらの遺伝物質の基本構造 (塩基配列) の相互比較によってかなりの相同性が認められることが明らかになりつつある。

##### 7.4.1 時間遺伝子の種類

時間遺伝子の種類は同一個体内の臓器・器官に特異的な時間遺伝子を考慮すると少なくとも生物種の数だけは存在すると考えられる。生物進化の過程において下等な生物では体表面に近い部位に生物時計が存在し、哺乳動物に近づくに従っていろいろの神経節や脳幹部位にも生物時計の存在が数多く認められている。これらの生物時計は機能的に類似し、塩基配列の側面では構造的にも相同的なものが多く認められることから、基本的には同質の時計遺伝子が存在するものと推察されている。1999 年 3 月現在、生物種に特異的ないろいろの時間遺伝子の名前が提唱されているが、分子生物学的な解析が進

展するに伴って遺伝子間の相同性が証明され、整理統合されるであろう。最近急激に解析が進行している時間遺伝子としては、Synechococcus(シアノバクテリア)の kaiA,kaiB,kaiC, Neuro-spora(アカパンカビ)の frq,wc-1,wc-2, Drosophila(ショウジョウバエ)の変異株遺伝子(per,tim, ),dbt,cyc, Clk(jrk), Mouse(マウス)の per1, per2, per3,tim,clock,bmal1/mop3 gene およびハムスターの tau などである<sup>10)</sup>、<sup>21)</sup>。

#### 7.4.2 実証論的研究方法の展開

サーカディアンリズムの形成および制御機構に関係している時間遺伝子の機能解明のためには、最初、動物個体でのサーカディアンリズムの存在、特に明確なリズムの変異を示す動物群の作出が重要である。事実、ショウジョウバエ、マウス、ハムスターなどを用いた研究では行動変異種の探索と人為的作出および作出系統の維持と多量生産が実施されてきた。変異株が多く、生理形質の遺伝的背景が比較的詳細かつ具体的に解明され、実際の個体実験に用いられているショウジョウバエの場合においては、Konopka and Benzer(1971)は EMS(Ethylenemethane sulfate)を用いることにより対照群(24h cycle)から短周期(19h cycle)、長周期(28h cycle)、無周期の3変異種を作出した(図7)。さらに、いろいろの交配実験を重ねてこれらの行動変異種はX染色体の特定部位の機能欠損に由来することが1971年 Konopka & Benzerによって報告された(図8)<sup>22)</sup>。その後においてもショウジョウバエを用いた時間遺伝子の研究は鋭意継続され、per, timなどの時間遺伝子の機能研究が成功した。現在も尚、時間遺伝子の先端的な研究において重要な一翼を担っている。次に、高等な哺乳動物に関しては、米国のJ. TakahashiグループはDNA核酸の塩基配列に関して point mutataionを誘起するN-Ethyl-N-Nitrosourea(ENU)を雄マウスに処理して、図9のように雌マウスと交配させ第1世代を作出した。この第1世代のマウス304頭の中に、303頭のマウス群が平均23.8時間の行動周期を示すのに対し特定の1頭のマウスが1時間以上長いリズム周期(24.8h)を示すことが見出された。この個体を繁殖・選抜用の開始基礎個体とし、戻し交配などと組み合わせたスクリーニングが実施された。その結果、暗黒(暗期)の中で24.8時間の行動周期を示すマウスの系統が確立された(図9)<sup>23)</sup>。このマウス集団には +/+, clock/+, clock/clock の遺伝子型を示すマウスが存在するので、分子生物学的手法を用いておのおのの遺伝子型マウスの、特定の照明条件における行動周期に関する生理的特徴および各遺伝子の機能と構造が詳細に研究されている(図10-11)<sup>23)</sup>。また、ショウジョウバエやマウスと同様な考え方と実験手法に従って、ハムスターを用いた研究も最近進展しており、tau(τ)遺伝子型と呼ばれる時間遺伝子の分子生物学的な解析が日本において鋭意推進されている<sup>24)</sup>。

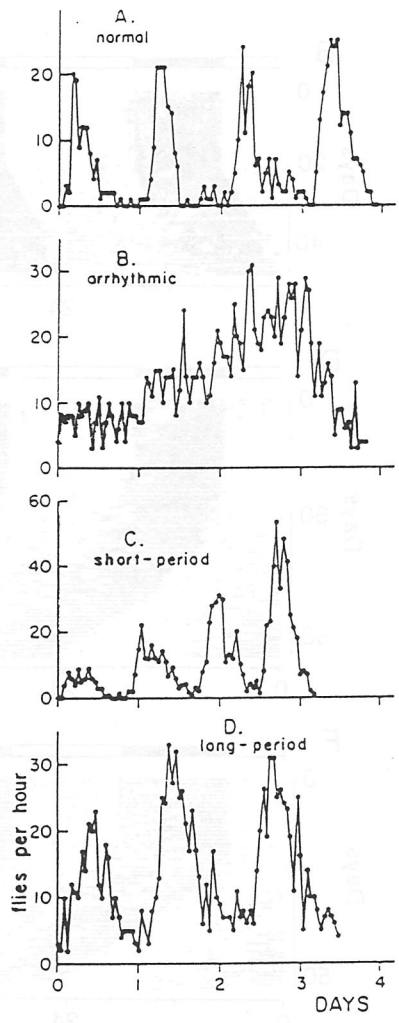


図7 継続的な暗黒照明における正常および突然変異種ショウジョウバエの羽化リズム<sup>22)</sup>

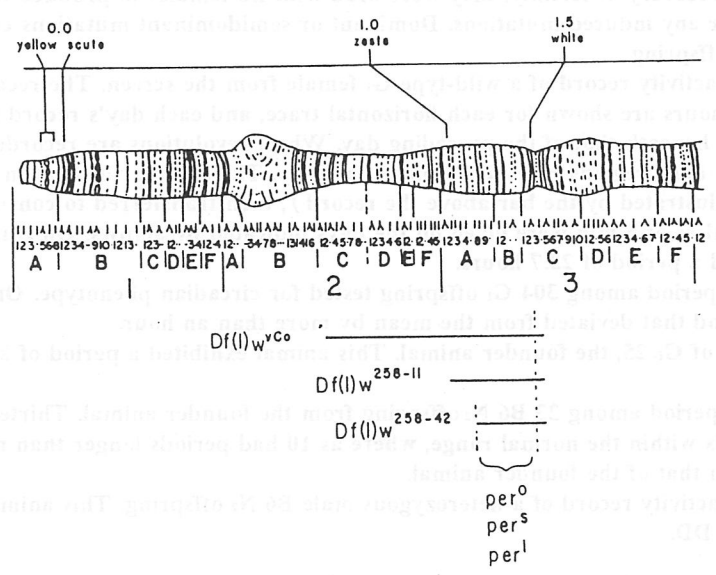


図8 ショウジョウバエ (*Drosophila melanogaster*) X染色体の Bridge's map<sup>22)</sup>

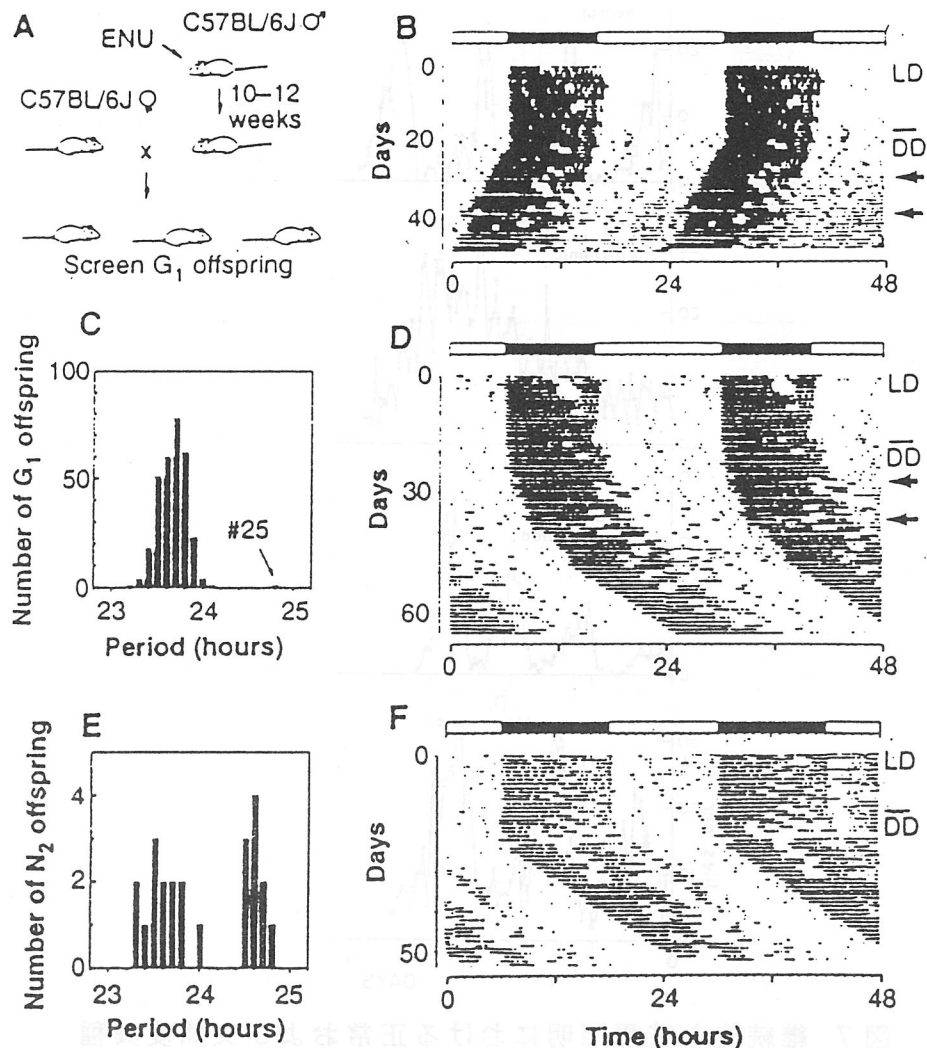


Fig. 9. ENU mutagenesis screen. A behavioral assay was used to test for the presence of circadian rhythm mutations in first generation offspring of ENU-treated males.

(A) The mutagenesis procedure. Young male B6 mice were injected intraperitoneally with ENU at 150 mg/kg. On recovery of fertility, they were bred with B6 females to produce  $G_1$  offspring heterozygous for any induced mutations. Dominant or semidominant mutations could then be detected in  $G_1$  offspring.

(B) Representative activity record of a wild-type  $G_1$  female from the screen. The record is double-plotted so that 48 hours are shown for each horizontal trace, and each day's record is presented both to the right and beneath that of the preceding day. Wheel revolutions are recorded as pen deflections so that the dark regions represent times of activity. The animal was kept in LD14:10 for the first 20 days (illustrated by the bar above the record), then transferred to constant darkness (DD). Light pulses of 5 min were given on the days indicated by arrows. On transfer to DD, this animal exhibited a period of 23.7 hours.

(C) Distribution of period among 304  $G_1$  offspring tested for circadian phenotype. One animal, #25, exhibited a period that deviated from the mean by more than an hour.

(D) Activity record of  $G_1$ -25, the founder animal. This animal exhibited a period of 24.8 hours after 30 days in DD.

(E) Distribution of period among 23 B6  $N_2$  offspring from the founder animal. Thirteen offspring exhibited periods within the normal range, whereas 10 had periods longer than normal, comparable with that of the founder animal.

(F) Representative activity record of a heterozygous male B6  $N_2$  offspring. This animal had a period of 24.8 hours in DD.

図9 ENUによる突然変異の作出<sup>23)</sup>

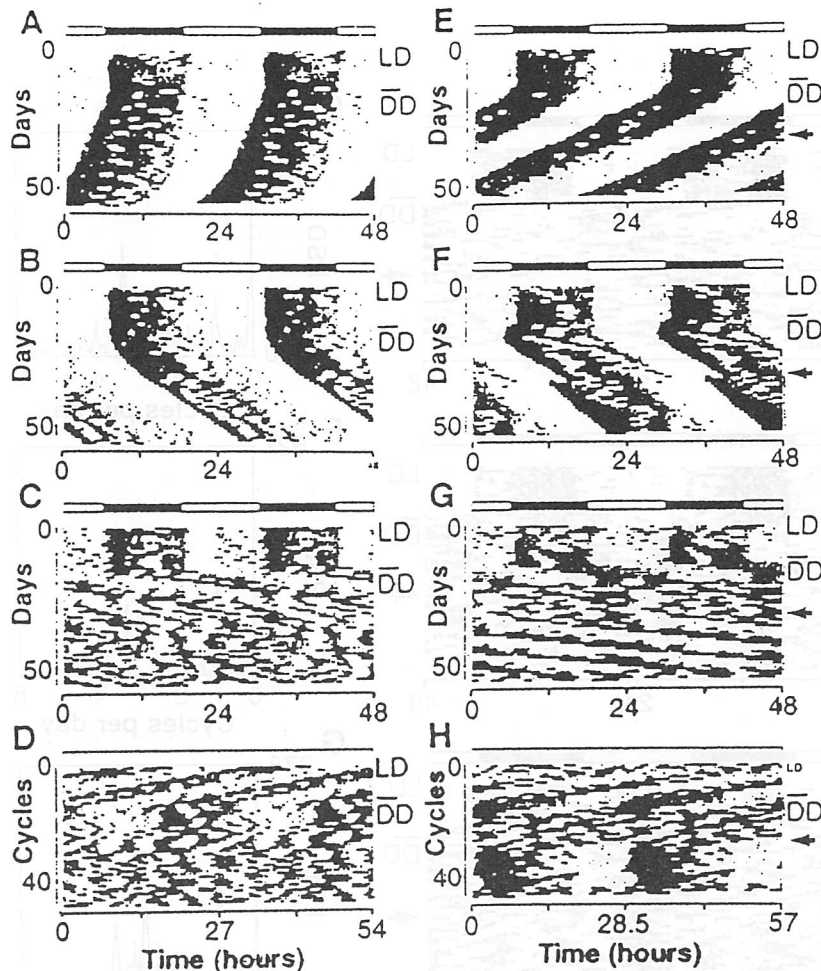


Fig.10. Circadian activity records of  $F_2$  generation mice. The activity records of six  $F_2$  offspring [B6  $F_2$ , A to D; (BALB  $\times$  B6)  $F_2$ , E to H] are shown. All animals were kept on LD12:12 for the first 7 to 10 days illustrated, then transferred to DD on the day indicated by a line in the right margin.

(A) Activity record of a wild-type B6  $F_2$  mouse. This animal had a period of 23.6 hours in DD.

(B) Activity record of a heterozygous *Clock*<sup>+/+</sup> B6  $F_2$  mouse. This animal had a period of 24.8 hours in DD.

(C) Activity record of a homozygous *Clock*/*Clock* B6  $F_2$  mouse. This individual had a period of 27.1 hours for the first 10 days in DD. There is a loss of circadian rhythmicity thereafter and only an ultradian rhythm is apparent.

(D) The same activity record as illustrated in (C), plotted on a 27-hour time base. The approximately 27-hours periodicity during the first part of exposure to DD appears as vertically aligned activity bouts.

(E) Activity record of a wild-type (BALB  $\times$  B6)  $F_2$  mouse. This individual had a steady-state period of 23.1 hours in DD. A 6-hour light pulse was given on the day indicated by an arrow, resulting in a 1-hour phase advance in the activity rhythm.

(F) Activity record of a heterozygous *Clock*<sup>+/+</sup> (BALB  $\times$  B6)  $F_2$  mouse. This individual had a steady-state period of 24.7 hours in DD. A 6-hour light pulse was given on the day indicated by an arrow, resulting in a 3.3-hour phase advance in the activity rhythm.

(G) Activity record of a homozygous *Clock*/*Clock* (BALB  $\times$  B6)  $F_2$  mouse. This animal had a long period during the initial interval in DD, which damped out after about five cycles leaving an ultradian pattern. After a 6-hour light pulse indicated by the arrow, a period of 28.2 hours was observed, which then persisted for at least 15 cycles.

(H) The same activity record as illustrated in (G) plotted on a 28.5-hour time base to show the transient restoration of a long periodicity after the light pulse by vertically aligning activity bouts.

図 10 第 2 世代 ( $F_2$ ) マウスのサーカディアン活動<sup>23)</sup>

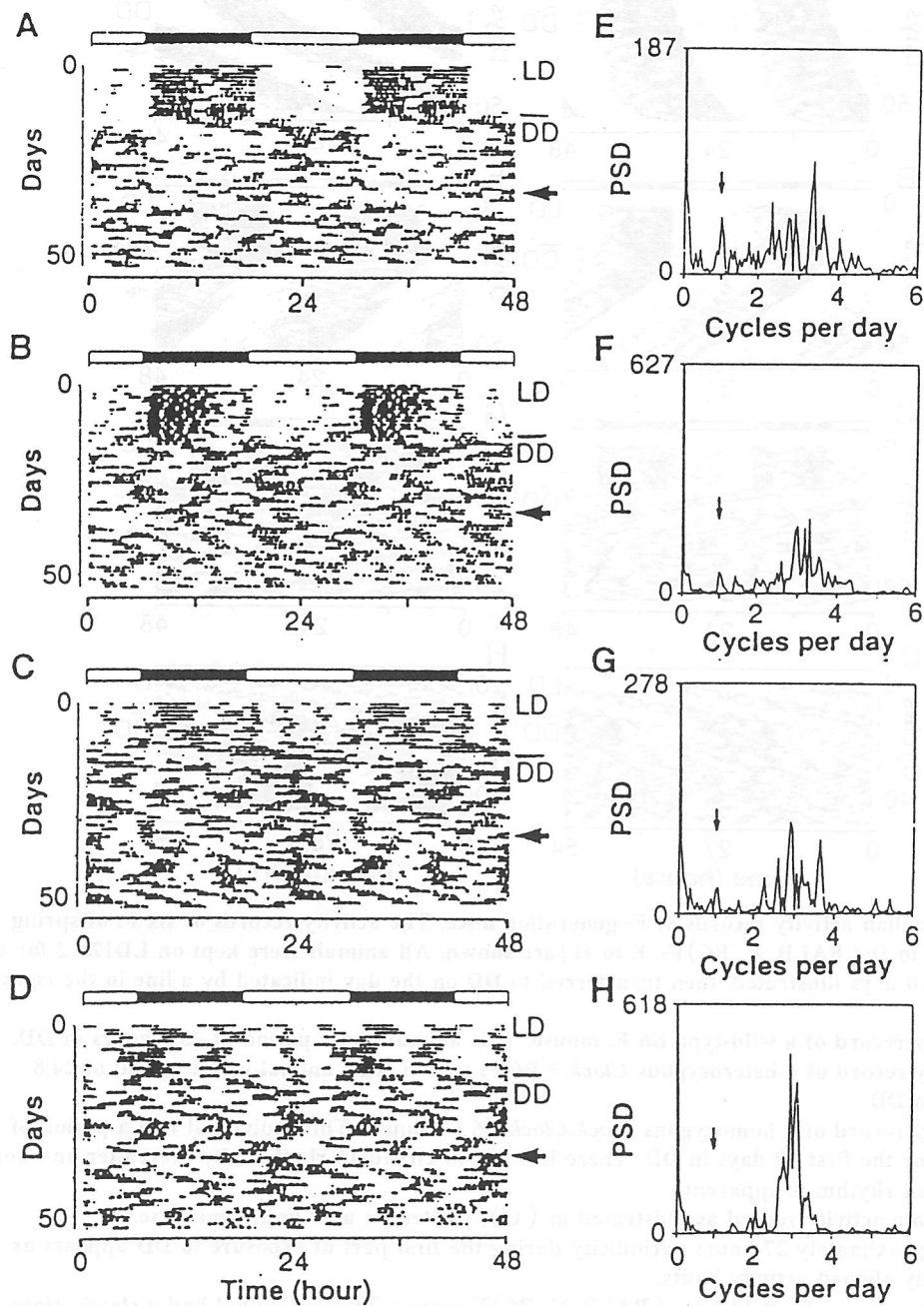


Fig.11. Analysis of periodicity of homozygous *Clock* mutants. The activity records of four homozygous *Clock/Clock* (BALB  $\times$  B6) $F_2$  individuals are shown (A to D). All animals shown were kept under LD 12:12 for the first 12 days shown, then transferred to DD as indicated by the line in the right margin. A 6-hour light pulse was given on the day indicated by an arrow. Among the animals whose records are shown, no circadian rhythmicity persisted for more than about 10 cycles after either the initial transfer to DD or the light pulse. The corresponding Fourier analysis for each activity record is shown to the right (E to H). Fourier analyses encompass a 10-day interval corresponding to the 10 days preceding the light pulse (18). PSD, power spectral density. The frequency corresponding to one cycle per day, or a 24-hour period, is indicated by an arrow. Peaks corresponding to approximately 6- to 9-hour ultradian periods are seen for each animal.

図 1 1 ホモ型 *Clock* mouse 突然変異種の活動周期性の解析<sup>2,3)</sup>

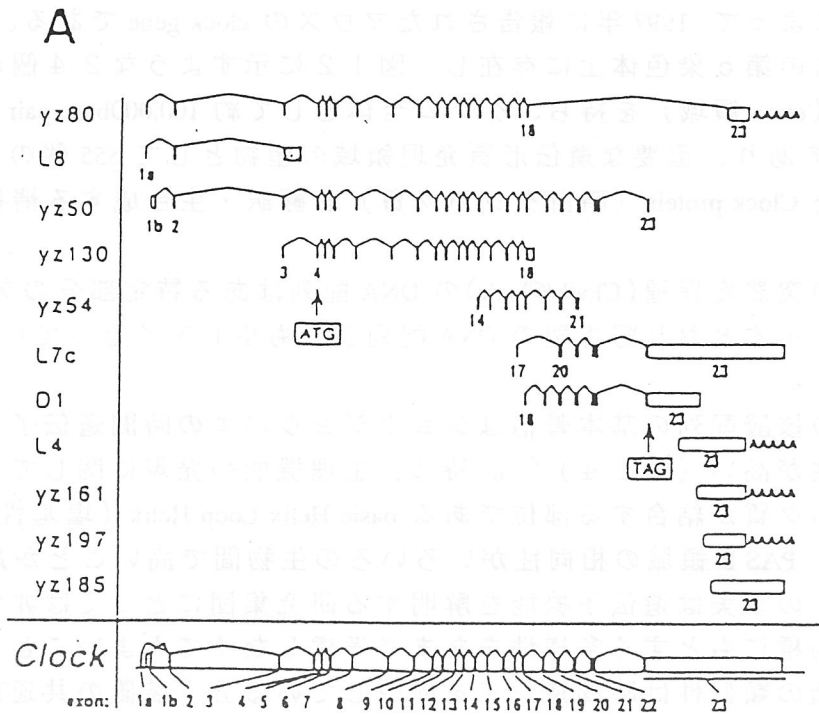
### 7.4.3 構造

現実的に機能的な時間遺伝子として単離され、その一次構造が解明されたのは king らによって 1997 年に報告されたマウスの clock gene である。この遺伝子はマウスの第 5 染色体上に存在し、図 1 2 に示すような 2 4 個の遺伝情報発現領域 (exon 領域) を持ち、ゲノム全体として約 100,000base pair で構成された DNA であり、重要な遺伝形質発現領域の産物として 855 個のアミノ酸が連結した Clock protein (時計タンパク質) を翻訳・生合成する情報を保持している。

さらに、この突然変異種 (Clock/Clock) の DNA 配列はある特定部分の欠落のため、図 1 3 に示すとおり野生型の DNA 配列よりも少し短くなっている (図 1 3 C 参照)。

さらに、この核酸配列の基本骨格はショウジョウバエの時間遺伝子 dClock と極めて相同性が高い (図 1 4) <sup>7)</sup>。特に、生理機能の発現に関して、遺伝子産物のタンパク質が結合する部位である basic Helix Loop Helix (塩基性 HLH) や PAS A および PAS B 領域の相同性がいろいろの生物間で高いことが最近報告されたが、この事実は遺伝子機能を解明する研究集団にとっては非常に興味深いし、生物種にもとづく多様性をあまり考慮しなくてもよいことを示唆するので、構造の類似性は時間遺伝子を構成している分子装置の共通的な理解と解析にとって非常に便利である。いろいろの生物種の間で共通する遺伝情報物質の存在から生物進化の過程と機能分子の保存機能が実際に発生したことが興味深く推察される。

マウスの時間遺伝子型には 野生型 (wild/wild) と突然変異型 (clock/clock) の存在が報告されている。両者の間には遺伝子の構造に関して何らかの差が存在すると予測され、詳細な構造解析がなされた結果、図 1 3 に示すように、特定部位での塩基配列が異なっていることが明らかになった。例えば、第 18exon の特定部位では野生型の塩基 A (アデニン、A) が clock/clock では塩基 T (チミン、T) に変化している。最近見出されたショウジョウバエの 時計遺伝子 dClock gene は 1015 個の塩基から構成されていて、図 1 5 にしめすとおり bHLH, PAS A, PAS B などの塩基配列順序においてマウスの mClock と良く似ている。これらの事実は生物進化の過程において clock gene が種を越えて多くの生物に強く保存されていることを示している <sup>6), 7)</sup>。



**B**

```

1   HVFTVSCSKMSSIVDRDSSIFDGLVEEDDKAKRVS RNKSEKRRDQF
51  NVLIXELGSHLPGNARKQDKSTVLQKSI DFLRKHKETTAQSDASEIRQDW
101 KPTFLSNEEFTQLMLLEALDGFFLAIMTDGSI IYVSESVTSLLEHLPSDLV
151 DQSIFNFIPEGEHSEVYXILSTHLLSESOLTP EYLKSKNQLEFCCHMLRG
201 TIDPKPESTYEVVRFIGNFKSLTSVSTSTHMG FEGTIQRTHRPSYEDRVC
251 FVATVRLATPQFIKEMCTVEEPNEEFTSRHSLE WKFLFLDHRAPPIIGYL
301 PFEVLGTSGYDYHVDOLENLAKCHEHLHQYCKG KSCYRFLTKCQQWIW
351 LQTHYYITYHQWNSRPEFIVCTHTVVSYA EVRAERRRELGIEESLPETAA
401 DKSQDSGSDNRINTVSLKEALERFDHSP TPSASSRSSRKSSHTAVSDPSS
451 TPTKIPTDTSTPPRQHLPAHEXHTQRRSSFSS QSINSQSVGPSLTQPAMS
501 QAAANLPIPOGMSQFQFSAQLGAMQHLKDQLE QRTRMIEANIHRQEEELRK
551 IQEQLQHVHGQGLQHFLLQSNPGLNFGSVQLS SCNSNIQQLTPVMHQQV
601 VPANQVQSCHISTCQHMIQQQTLQSTSTQ QSQQSVHSGHSQQTSLPSQTP
651 STLTAPLYNTHVISQPAAGSMVQIPSSHPQN STQSATVTTFTQDRQIRFS
701 QQQLVTKLVTA PVACGAVHVPSTHLHCQVVTAY PTFATQQQQAQTL SVT
751 QQQQQQQQQP PQQQQQQQSSQEQLPSVQQP AQAQLGQPPQQFLQTSRL
801 LHGNPSTQLILSAAFPLQQSTFPPSHHQHQ PQQQQQLPRHRTD$SLDPS
851 KVQPQ

```

図 1 2 Clock gene を規定している cDNA clones および CLOCK タンパク質のアミノ酸配列<sup>6)</sup>

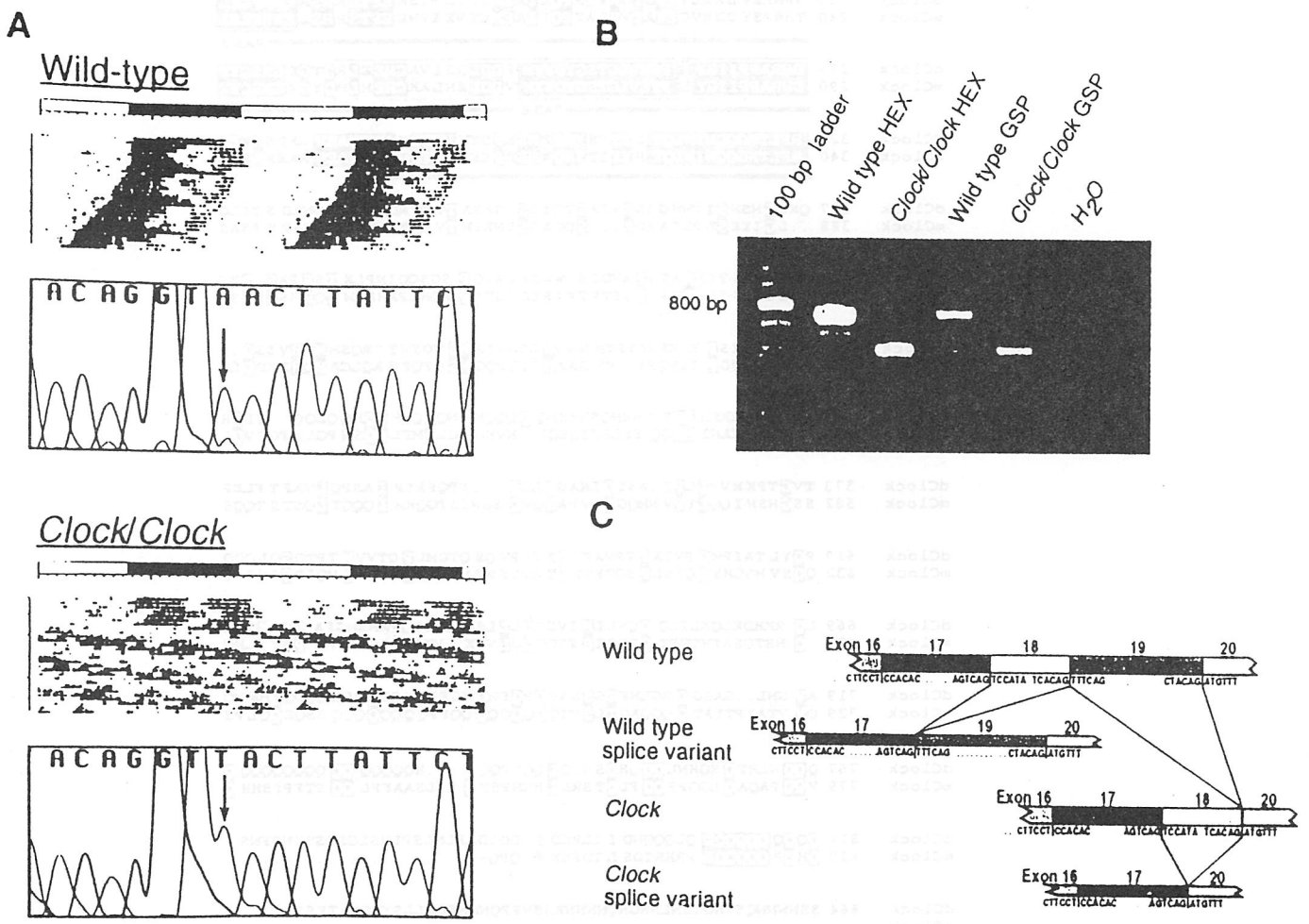


図 1 3 Clock mutation (時間突然変異種) の行動様式確認と解析<sup>6)</sup>





ト脳の視交差上核(SCN)において clock mRNA が鮮明に in situ hybridization で発現されている。また、図 16 のように、clock/clock では wild/wild と比較して、眼、視床下部、心臓、肺、腸、肝臓、脾臓、精巣、卵巣での RNA のノーザンブロット解析結果に関して発現程度に顕著な差が認められた<sup>6)</sup>。マウスおよびショウジョウバエの clock gene にはともに bHLH-PAS 領域を持っているので、転写因子との結合が可能である(図 17)<sup>7)</sup>。特に、clock gene の上流に存在するサーカディアン エンハンサー(CE)の E-box(CACGTG)への clock protein (CLK)の結合が clock gene の機能発現に密接に関係している。図 18<sup>7)</sup>に示すように、CE 領域への CLK や他の未知物質の結合が遺伝子機能の発現機構に重要である。事実、この制御機構の分子論的機序に焦点を合わせ、結合分子の推定および作用機構についての報告がなされつつある<sup>25)、26)</sup>。動物のサーカディアンリズムの現象はいろいろの生理機能や生理形質において見られるが、そのリズム形成の分子機構は最近の研究によってフィードバック機構を機軸とし関連する代謝成分(CLK, TIM, PER など)と遺伝子 DNA の特定部位との相互作用として解明されつつある。図 19、図 20、図 21 に示すように、リズム形成には時間遺伝子本体と E-box で表現されるエンハンサー部位、遺伝子が発現することによって生産されるいくつかのタンパク質(CLOCK, PER, TIM など)、さらに CLOCK タンパク質とヘテロダイマーを形成する未同定タンパク質などの相互作用が重要な役割を演じると考えられるので、各メタボライトの濃度変化を時系列的に正確に測定し、継続的に機能する制御機構を解明することが重要になるであろう<sup>10)、26)~28)</sup>。

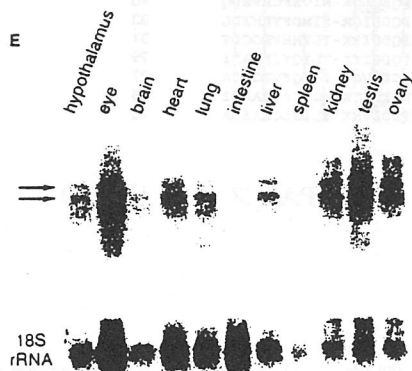
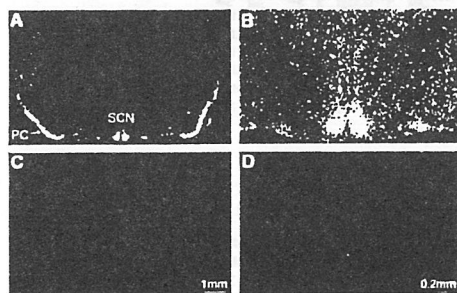


図 16 Clock mRNA の発現解析<sup>6)</sup>

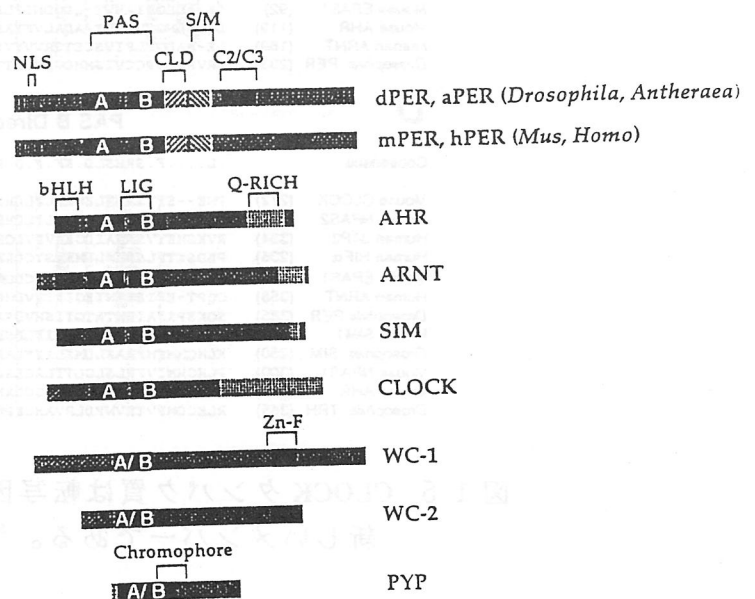


図 17 PAS ファミリータンパク質は clock gene の産物と blue light phototransducer および photoreceptor を含む<sup>11)</sup>

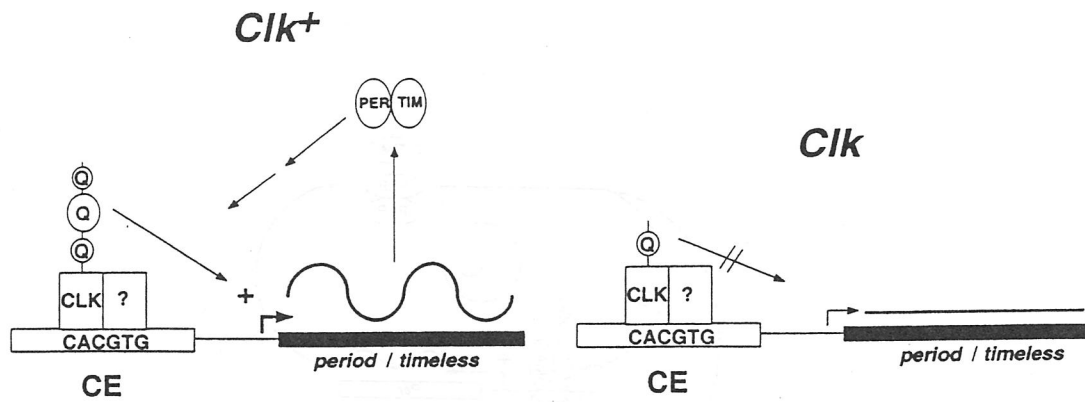


図 18 野生型ショウジョウバエ(Clock+)における時計遺伝子機能のモデル<sup>7)</sup>

fig.19. Transcriptional activation of *per* and *tim* by dCLOCK.

(A) Specific activation of *period* and *timeless* promoters by dCLOCK. *Drosophila* S2 cells were transfected with pAct expression plasmids as a source of dCLOCK, dARNT, or dSIM. These were cotransfected with *per-luc*, *tim-luc*, or CME-*lacZ* reporter plasmids (35).

(B) The E-box was necessary for dCLOCK-mediated activation of *period* promoter fragments. S2 cells were transfected with either dCLOCK or pAct as indicated. Reporter plasmids contain a portion of the *per* promoter fused to the *hsp70* basal promoter driving *lacZ* (10). The 69- and 154-bp fragments correspond to -563 to -494, and -603 to -449 of the *per* promoter, respectively. 154 ( $\Delta 1$ ) refers to a deletion from -529 to -519, and 154 ( $\Delta 2$ ) to -539 to -529, both of which remove a portion of the E-box (10).

(C) The E-box was sufficient for activation of *per* and *tim* promoters by dCLOCK. Reporters contained four copies of an 18-bp element from either the *per* or *tim* promoters fused to *hsp70* driving luciferase (39). Identity between the *per* and *tim* E-boxes and the surrounding sequence is indicated in bold. In mutant E-box targets, the central CG of the E-box was replaced with GC (underlined). Plasmids expressing dCLOCK or dCLOCK( $\Delta Q$ ) were cotransfected alone or in combination. dCLOCK( $\Delta Q$ ) contains amino acids 1 through 792 of dCLOCK, omitting two of the three glutamine repeats.

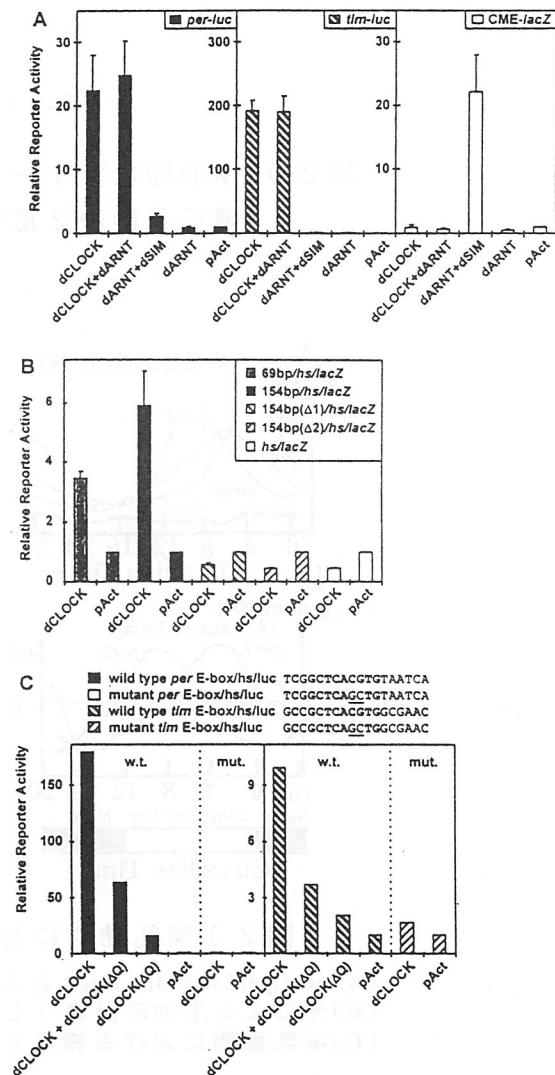


図 19 dCLOCK による *per* および *tim* の転写機能の活性化<sup>9)</sup>

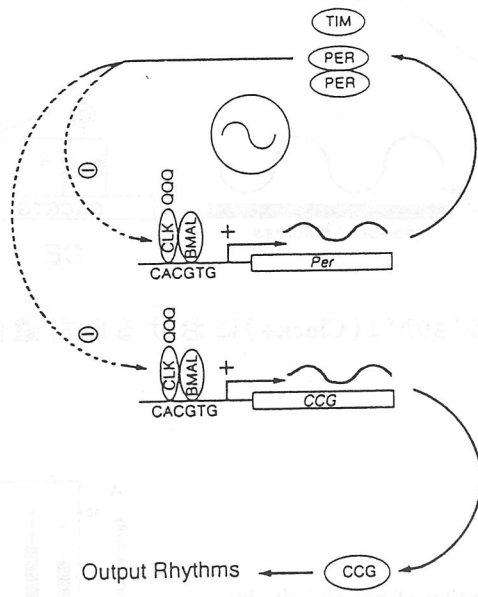


図 2 0 中心的なフィードバックグループと時計が支配する遺伝子群の 2 重制御モデル<sup>28)</sup>

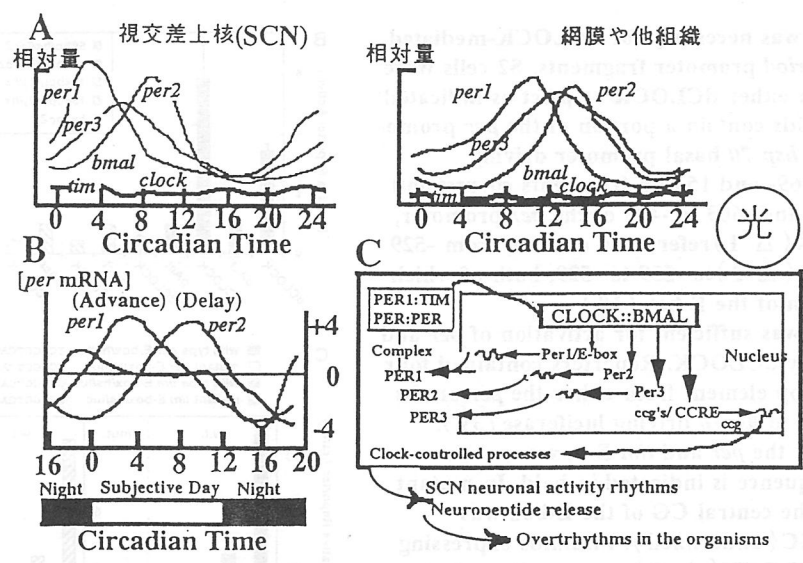


図 2 1 哺乳動物における時計遺伝子の発現機構

- (A) *per1*, *per2*, *per3*, *tim*, *clock* および *bmal* 遺伝子の動態
- (B) 光による生物時計のリセット
- (C) 哺乳動物における概日リズム (サーカディアンリズム) の制御

## 7.5 将来展望

現代社会では高度な照明技術の普及がすすみ、いろいろの照明環境の造成が可能になり、さらには、交通・情報手段の高速化が進展しているので、生物の体内リズムは極めて容易に乱されやすい状況に曝されていると言える。この様な社会環境で生活および生産活動を継続している高等動物、特に、人間は自己の生活サイクルを上手にコントロールすることがますます重要になってきている。その理由としては、人間の生活環境において睡眠や覚醒などの基本的な生理機能のサイクル維持に対してそれを乱す可能性の大きい刺激要因がますます増加しているからである。時間遺伝子が正常に機能するようにいろいろの手段を用いて工夫することが必要であり、そのための具体的な方策として1日当たり最低1回適当な時間帯に明暗周期の操作を組み込むことが必要である<sup>26)、29)、30)</sup>。

(山田真裕)

## 参考文献

- (1)山田真裕:高等動物と光放射、照明学会編「光バイオインダストリー」、オーム社、pp.43-67、(1992)。
- (2)山田真裕:養鶏・畜産業と光放射、照明学会編「光バイオインダストリー」、オーム社、pp.302-317、(1992)。
- (3)川村浩:生体リズムとは何か?、鳥居鎮夫、川村浩編「生体リズムの生理学(新生理科学大系(13巻))」、医学書院、pp.1-11、(1987)。
- (4)海老原史樹文:生体リズムの時計機構(鳥)、鳥居鎮夫、川村浩編「生体リズムの生理学(新生理科学大系(13巻))」、医学書院、pp.36-47、(1987)。
- (5)井上慎一:生体リズムの時計機構(哺乳類)、鳥居鎮夫、川村浩編「生体リズムの生理学(新生理科学大系(13巻))」、医学書院、pp.47-58、(1987)。
- (6)King,D.P.et al.: Positional cloning of the mouse circadian clock gene. *Cell* 89,641-653,(1997)。
- (7)Allanda, R.et al.:A mutant *Drosophila* homolog of mammalian clock disrupts circadian rhythms and transcription of period and timeless. *Cell* 93,791-804,(1998)。
- (8)Gekakis, N.et al.: Role of the CLOCK protein in the mammalian circadian mechanism. *Science* 280,1564-1568,(1998)。
- (9)Darlington, T.K.et al.:Closing the circadian loop: CLOCK-induced transcription of its own inhibitors per and tim. *Science* 280,1599-1603,(1998)。
- (10)Dunlap,J.C.: Molecular bases for circadian clocks. *Cell* 96,271-290,(1999)。
- (11)Young,M.W.:The molecular control of circadian behavioral rhythms and their entrainment in *drosophila*. *Annu. Rev. Biochem.*67,135-152,(1998)。
- (12)近藤孝男・石浦正寛:概日時計の分子機構(シアノバクテリアの時計遺伝子)、*科学* 68,138-143,(1998)。
- (13)Block, G.D.:軟体動物の生物時計に脳進化の礎をみる、*科学* 68,144-149,

- (1998).
- (14) 出口武夫: 生体時計としての松果体の機能、蛋白質・核酸・酵素(臨時増刊) 27,355-364,(1982).
  - (15) 本間研一: 人工環境への適応とヒトの生物時計(24時間社会がヒトにもたらしたもの)、科学 68,188-194、(1998).
  - (16) 長谷川健治・塚原保夫: 生物の"時間"の意味するもの、科学 68,124-132、(1998).
  - (17) 川村浩: サーカディアンリズムと視交叉上核、蛋白質・核酸・酵素(臨時増刊)27,365-377,(1982).
  - (18) Klein,D.C.et al.: Suprachiasmatic nucleus; The mind's clock (New York:Oxford University Press).
  - (19) Ralph,M.R.et al.: Transplanted suprachiasmatic nucleus determines circadian period. Science 247,975-978,(1990).
  - (20) Liu,C.et al.: Cellular construction of a circadian clock: Period determination in the suprachiasmatic nuclei. Cell 91, 855-860,(1997).
  - (21) Dunlap,J.C.: Genetic and molecular analysis of circadian rhythms. Annu.Rev. Genetics. 30,579-601,(1998).
  - (22) Konopka,R.J. and Benzer, S.: Clock mutants of *Drosophila melanogaster*. Proc. Nat. Acad. Sci. USA, 68, 2112-2116,(1971).
  - (23) Vitaterna,M.H. et al.: Mutagenesis and mapping of a mouse gene, clock,essential for circadian behavior.Science264,719-725,(1994).
  - (24) Shigeyoshi,Y.et al.: Light-induced resetting of a mammalian circadian clock is associated with rapid induction of the mPer1 transcript. Cell 91,1043-1053,(1997).
  - (25) Rutila,J.E. et al.: Cycle is a second bHLH-PAS clock protein essential for circadian rhythmicity and transcription of *Drosophila* period and timeless. Cell 93,805-814,(1998).
  - (26) Jin,X. et al.: A molecular mechanism regulating rhythmic output from the suprachiasmatic circadian clock. Cell 96,57-68,(1999).
  - (27) Tosini,G.and Menaker, M.:Circadian rhythms in cultured mammalian retina. Science 272,419-421,(1996).
  - (28) Campbell,S.S.and Murphy, P.J.: Extraocular circadian phototransduction in humans. Science 279, 396-399,(1998).
  - (29) Foster,R.G.: Shedding light on the biological clock. Neuron 20, 829-833,(1998).
  - (30) Herzog,E. et al.: Clock controls circadian period in isolated suprachiasmatic nucleus neurons. Nature Neurosci.1,708-713,(1998).

## 8. 光放射と成長および生殖

前章までに「光放射と生体」、「光放射と生理」ならびに「光放射の生理・生体面での新たな応用」に述べてきた。

「光放射と生体」においては、光放射が目および皮膚に及ぼす影響を中心に、「光放射と生理」においては、光放射環境が睡眠・覚醒リズムに及ぼす影響、睡眠障害に対する光放射の応用、光放射とメラトニン等について述べてきた。また、「光放射の生理・生体面での新たな応用」においては、生活空間の中での光放射の応用、生体計測への光放射の応用等を中心に述べてきた。

本章では、「光放射と成長および生殖」について紹介する。

生物（植物、動物）の環境要素としての光放射には様々な態様があり、それらは相互に関連し合って生物に作用する。「光放射と動物の成長および生殖」の関係をみる前に、古くから言われている「光放射と植物の成長および生殖」について振り返ってみる。

### 8.1 光放射と植物の生長および生殖

光放射は植物の生長や運動において種々の面で関与している。

光放射に対する植物反応の作用スペクトルについてみると、①屈光性に対しては 400 ~ 500 nm、②葉緑素の生合成に対しては 400 ~ 700 nm、③光合成に対しては 400 ~ 700 nm、④光形態形成に対しては、赤色光の影響を受ける反応は 500 ~ 720 nm、遠赤色光の影響を受ける反応は 650 ~ 800 nm、藍色光と遠赤色光の影響を受ける反応は 400 ~ 500 nm および 650 ~ 800 nm に分類できる。

#### ①屈光性

植物が光の入射方向に向く現象、すなわち屈光性はエンバクをはじめ多くの植物で観察されている。この作用スペクトルは弱光したの反応では 500 nm 以下に 4 つのピークが現れる。この作用スペクトルのパターンはフラビン色素とカロチノイド色素の吸収スペクトルと似ているため、屈光性の光受容体はこれらの色素ではないかと考えられている。

#### ②傾光性

マメ科植物の複葉などによくみられる葉枕の運動は光によって作動することが多い。日中に葉が開き、夜に閉じる反応、すなわち就眠運動も傾光性現象の一つである。この傾光性の作用スペクトルは、植物によって異なり、イネの第二葉の葉角の上偏生長現象は青色光照射によって、サルビアでは赤色光により葉角が大きくなる。

### ③ 光合成

光合成の作用スペクトルは葉緑素の生合成と同様に 400 ~ 700 nm である。光合成の詳細については、省略する。

### ④ 光形態形成、光周性、概日リズム

光放射に対する植物反応の中で、光合成による植物の生長とは別に、光による植物体の分化、発達、生長の制御を光形態形成と Mohr(1969)は定義している。種子発芽、胚軸および節間の伸長、葉の展開および伸長等にはフィトクロームが関与しているといわれている。また、花芽や冬芽の分化には日長が影響している。

光周性は光受容体フィトクロームの作用であるといわれ、短日植物では明期に大量にフィトクローム遠赤色吸収型が形成、暗期のはじめに花芽誘導が起こり、残りの暗期にフィトクローム遠赤色吸収型からフィトクローム赤色吸収型（またはフィトクローム遠赤色吸収型の不活性化）に変化する。一方、長日植物では、暗期のはじめにフィトクローム赤色吸収型、暗期の終わりにフィトクローム遠赤色吸収型になるような状態で花芽分化を行う。

1920年にアメリカ農務省の植物性理学者 Garner と Allard が晩秋の頃タバコの新品種であるメリーランド・マンモス (Maryland・Mammoth) の実生を温室に入れて育てたところ、夏に栽培すれば 4.5 m も生長して開花しないものが、冬の温室栽培ではわずか 1 m 足らずしか生長しないのに立派な花を着け、多くの種子が結実するのを観察した。両氏は、ダイズの開花についても実験を行い、植物の開花と一年の間の季節が密接に関係あること、すなわち日長効果現象が発見された。また、植物の運動、代謝、生長などの反応が環境条件を一定にしても、周期的に変化し、同じリズムを 21 ~ 28 時間周期で繰り返し、一般的には 24 時間の周期になっていることが多い。このリズムを概日リズムといい、これにはフィトクロームが関与しているといわれている。

## 8.2 光放射と動物の生殖

上記の植物にみられる一年の周期性は、動物の繁殖活動はじめ、冬眠、鳥の渡り、ウサギの換毛、雄シカの枝角の脱落など、動物の行動や生理機能にも認められ、一年の特定の季節におきるものが多い。

この動物における光周性は、昆虫において Macrovitich により 1924 年に最初に明らかにされ、続いて鳥類、哺乳類、魚類などにおいても明らかになった。

哺乳類における繁殖活動と年周リズムについてみると、温帯から高緯度地域に生息する動物の多くは、一年の決まった季節にだけ繁殖活動がみられる。季節繁殖と呼ばれるこの現象は、人や一部の家畜を除く哺乳類一般に認められる現象で、それぞれの種にとって、食物量が最も豊富になる季節に出産と哺育の時期が一致するよう、その種の進化の過程で獲得した繁殖戦略といえる。例えば、妊娠期間の短い齧歯類 (20 日前後) や妊娠期間の長い馬 (約 340 日) は、日長の長くなる春から初夏に繁殖期 (交尾期) があり、長日繁

殖動物といわれている。一方、妊娠期間が約半年のヒツジやニホンザルでは、日長の短くなる秋から初冬にかけて繁殖期があり、短日繁殖動物といわれている。いずれの場合も、出産期は春から初夏で、それぞれの種に固有な妊娠期間だけ逆算した時期に繁殖期が設定されている。

熱帯地域でも、雨期と乾期の季節差の明瞭な地域では、繁殖活動に季節性をもつものが多い。たとえば、中南米に生息するリスザルの繁殖期（妊娠期間約 150 日）は乾期にあたる 7～9 月で、それから 5 ヶ月後の雨期が出産期である。子ザルの離乳期が雨期の終わりにあたり、この時、餌になる果実や葉が最も豊かになる時期である。

動物も、日長や気温、降水量、食物量など季節に応じて変化する様々な環境要因の中から、その動物にとって最も適した環境要因を季節の変化のよりどころとしている。温帯から高緯度地域に生息する哺乳類や鳥類の多くが、日長の変化をよりどころに季節繁殖リズムを確立しているのは、日長が安定性と再現性に最も優れた指標であることによる。この動物が一日の日長を測り、その基づいて生理機能や行動を調節する仕組みを、植物と同様に光周性（photoperiodism）と呼ぶ。

### 8.3 光放射と動物の成長

光放射が動物の性機能や生殖行動に大きな影響を与えることを述べてきた。ここでは、光放射が身体発達をも調節することについて、日長に応答して体重変化をさせる光周性齧歯類について紹介する。

日長の変化に応答して体重を調節し、変化させる動物は大きく分けると、日長の短縮とともに体重を増加させる動物と、逆に、日長の短縮とともに体重を減少させる動物の 2 種類に分類される。

前者としては、リス類の齧歯類で、ジリス、マーモット、ウッドチャックなどがこれに属する。これらの動物は、夏至が過ぎ日長が短縮し始めるのに対応して、冬に入る前から体重を増加させる傾向を示し、冬眠に入る直前に体重はピークに達する。これらの動物では、普通、体重だけでなく、餌の摂取量、生殖機能、場合によっては、冬眠などの機能も同時に変化することが観察されている。

逆に、日長の短縮に対して体重を減らす後者の例としては、シベリアハムスターやハタネズミが挙げられる。シベリアハムスターやハタネズミでは日長の短縮に対して体重を減らすだけでなく、同時に性機能をも萎縮させる。なお、冬季にシベリアハムスターは休眠に入るが、ハタネズミは身体のサイズを小さくさせることにより必要エネルギーを少なくし、冬眠や休眠に入ることなく越冬する。

このように季節性繁殖動物の多くは日長の変化に応答して体重を増減させるが、実験室で用いるラット、モルモット、マウスでは、光放射に対する応答性は弱く、通常は日長の変化に応じて体重を増減することはない。

（菅沼浩敏）

参考文献

- (1)田口亮兵:植物生理学大要、養賢堂、(1972).
- (2)菅沼浩敏:作物栽培における光質利用に関する調査研究、電力中央研究所調査報告:484006,(1984).
- (3)(社)照明学会編:光バイオインダストリー、オーム社、(1992).
- (4)佐々木 隆、千葉喜彦:時間生物学、朝倉書店、(1979).
- (5)佐藤、利島、大石、井深編:光と人間の生活ハンドブック、朝倉書店、(1995).

### 9.その他・新聞記事等

本委員会の期間中の平成9年12月16日(火)に、テレビ東京系列で放映されたテレビアニメ番組「ポケットモンスター」をみていた子供達が全国でけいれん症状を起こすなど気分が悪くなり、相次いで救急車で運ばれるという事件が発生した。

12月17日(水)以降のマスコミで取り上げられ、「光過敏症」との関連で種々の専門家の意見等が載せられた。また、厚生省においても「テレビ番組の視聴による健康被害への対応について」通知が出された。これらの新聞記事等について以下に整理する。

光過敏症関連新聞記事を資料 No.1～7に、厚生省の通知を資料 No.8に、また、「体内時計」解明の鍵を握ると考えられるアメリカの研究者の「ひざの後ろに光センサー」の記事について資料 No.9に添付する。

(菅沼浩敏)

# 「ポケモン」TV見て異常

## けいれんや嘔吐

### 全国で550人以上病院へ

テレビ東京系列で十六日午後六時三十分から同七時にかけての時間帯に放映されたテレビアニメ番組「ポケットモンスター」を見ていた子供たちが全国でけいれん症状を起すなど気分が悪くなり、相次いで救急車で運ばれた。各地の消防本部などに「テレビを見ているうちに目がチカチカした」と訴える子供が多くなり、一時重症にもなるといふ。共同通信によると、五百五十人以上が救急車で病院に運ばれた。郵政省は十七日にもテレビ東京関係者から事情聴取する。

東京都内では同日午後六時五十分ごろから同七時半ごろにかけて、小中高校二歳の男女がけいれん症状を起すなど気分が悪くなり、相次いで救急車で運ばれた。各地の消防本部などに「テレビを見ているうちに目がチカチカした」と訴える子供が多くなり、一時重症にもなるといふ。共同通信によると、五百五十人以上が救急車で病院に運ばれた。郵政省は十七日にもテレビ東京関係者から事情聴取する。



赤や青の光が激しく輝く「ポケモン」の「一輪車」(テレビ東京提供)

ポケットモンスター(ポケモン) 九六年五月、任天堂がゲームソフトとして発売。以来、百五十一種類のポケモンを集め、育てたり戦わせるなどの遊び方が、小学生を中心に爆発的に

人気を集めている。ピカチュウは、メタモリをこけたキャラクター。小半鐘のロロロミミックの漫画雑誌にも掲載され、九七年四月からは東京、大阪、愛知、岡山、福岡、北海道

テレビ東京系六局ネットがアニメ番組を放映。他の地方でも三十局が放送している。同番組は平均視聴率一七％で、関東地区で同時視聴の視聴率一位を記録するなどブームが起っている。

た。東京消防庁の調べによると、病院に運ばれたのは五十七人になり、うち十三人が入院した。東京都以外の関東地方の主要都市では、横浜市で二十五人、川崎市で二十一人、千葉市八人などで、九十五人以上が救急車で搬送された。けいれんや嘔吐(おうと)や発作などの症状を訴えていたが、大部分の患者は重症で搬送後治療を受けて帰宅。このうち横浜市消防局によると、十一歳の女児が重症、中等症の患者七人が入院、埼玉県大宮市でも一人、神奈川県藤沢市でも一人が入院した。

愛知県下では、名古屋市の十六人を含め、少なくとも五十人以上が症状を訴え、病院に運ばれたとされた。いずれも軽症というが、名古屋市内などでは念のため入院させた病院もある。大阪府消防防災安全課のまとめによると午後十一時半現在、府内で七十五人が搬送された。大阪市内は四件の一一九番通報が入り、うち女児(〇)が一、重症となった。また番組組を見ていたといふ守口市の男

も五十人以上が症状を訴え、病院に運ばれたとされた。いずれも軽症というが、名古屋市内などでは念のため入院させた病院もある。大阪府消防防災安全課のまとめによると午後十一時半現在、府内で七十五人が搬送された。大阪市内は四件の一一九番通報が入り、うち女児(〇)が一、重症となった。また番組組を見ていたといふ守口市の男

も五十人以上が症状を訴え、病院に運ばれたとされた。いずれも軽症というが、名古屋市内などでは念のため入院させた病院もある。大阪府消防防災安全課のまとめによると午後十一時半現在、府内で七十五人が搬送された。大阪市内は四件の一一九番通報が入り、うち女児(〇)が一、重症となった。また番組組を見ていたといふ守口市の男

### 因果関係 分からない

ポケットモンスターを制作・放送していたテレビ東京本社(東京・港区)では、午後十一時過ぎから断続的に浦本広報部長が記者会見。浦本部長は「子供さんの中に気分が悪くなったり、嘔吐(おうと)したりする方がいると聞いて、驚いている。お騒がせしたことは申し訳ないと思っている」と陳謝した。ただ、番組との因果関係については「まったく分からない」と繰り返した。

同日では問題のシーンを含む同日放送分他地域での放送については、中止を各放送局に要請するが「人気が高い番組なので打ち切りはできないだけ放送した」として、未だ以降の放

送は通常通り行う方針という。浦本部長によると、同日午後十時すぎに都内の病院から「番組を見た子供が病院に運ばれた」との「報が

「突然真ッ青に」都内の小6女児 東京都文京の東大医学部付属病院には十六日夜、「テレビを見た後にけいれんを起した」として男児一人、女児一人が救急車で運び込まれた。

午後十一時五分過ぎに搬送された都内の小六年の女児(〇)は、録画したビデオで「ポケモン」を見ていたとされた。突然「気持ちが悪い」と言って意識を失い、けいれんを起したという。母親によると、女児はビデオを見ていた間に顔が真っ青になって意識を失ったが、一緒にビデオを見ていた幼稚園に通う男児(〇)は何ともなかったという。母親は「名前を呼んでも意識が回復しなかった。驚いたが、けいれんも収まり、寝ているような感じだ」と報告した様子で話した。

「突然真ッ青に」都内の小6女児 東京都文京の東大医学部付属病院には十六日夜、「テレビを見た後にけいれんを起した」として男児一人、女児一人が救急車で運び込まれた。

午後十一時五分過ぎに搬送された都内の小六年の女児(〇)は、録画したビデオで「ポケモン」を見ていたとされた。突然「気持ちが悪い」と言って意識を失い、けいれんを起したという。母親によると、女児はビデオを見ていた間に顔が真っ青になって意識を失ったが、一緒にビデオを見ていた幼稚園に通う男児(〇)は何ともなかったという。母親は「名前を呼んでも意識が回復しなかった。驚いたが、けいれんも収まり、寝ているような感じだ」と報告した様子で話した。

専門家

# 「光過敏性」と関連

## 体内時計異変との声も

アニメ番組「ポケットモンスター」を見た子供が次々病院に運ばれた事態について、専門家からは「光過敏性てんかん」や体内時計の異変との関連を指摘する声が出ている。

国立療養所静岡東病院(てんかんセンター)の濱野員(各書院長は「ひきつき」)は、この刺激を受けると、一瞬間に十五〜二十回の周期で点滅する強烈な光刺激を受けると、症状の出る可能性のある子もいる。

本来、この刺激を受けると、目を背けるなどするので、人々を驚かすことなどで、子供たちが驚視してしまっただけだ」と話す。

一方、鈴木務(電気電子工学)は「一方、鈴木務(電気電子工学)は、一チカチカと画面が点滅することによって、人間の体内時計を狂わせた可能性がある」という。

「画面が一秒間に八回前後点滅して、脳波とほぼ同じ周波数を発信すると、体内時計の発信器が刺激され、時計が狂ってしまう。大人より子供の方が感受性が強く、けいれんなどの症状を起すケースが多い」

不二門尚(大阪医学部眼科講師(神経眼科))によると、テレビゲームや立体映像がてんかんなどを引き起す可能性は以前から指摘され、光刺激によって、脳が異常に興奮する要因を持つ子供に症状が現れたという。

「画面を見て驚いてパニックに陥ると、体内の二酸化炭素が減少。代わりに酸素が多くなり、けいれん発作などを起したと考えられる」と指摘している。

「画面を見て驚いてパニックに陥ると、体内の二酸化炭素が減少。代わりに酸素が多くなり、けいれん発作などを起したと考えられる」と指摘している。

「画面を見て驚いてパニックに陥ると、体内の二酸化炭素が減少。代わりに酸素が多くなり、けいれん発作などを起したと考えられる」と指摘している。

「画面を見て驚いてパニックに陥ると、体内の二酸化炭素が減少。代わりに酸素が多くなり、けいれん発作などを起したと考えられる」と指摘している。

「画面を見て驚いてパニックに陥ると、体内の二酸化炭素が減少。代わりに酸素が多くなり、けいれん発作などを起したと考えられる」と指摘している。

「画面を見て驚いてパニックに陥ると、体内の二酸化炭素が減少。代わりに酸素が多くなり、けいれん発作などを起したと考えられる」と指摘している。

# 「ポケモン」被害

# 光刺激で発作解明へ

## 厚生省、専門家の研究班

テレビ東京系列の人気アニメーション番組「ポケットモンスター」を見ていた子供らが相次いで体の不調を訴えた問題で、厚生省は十八日、原因とされる「光感受性発作」の発生メカニズムの解明など緊急調査に乗り出すことを決めた。小児科や神経科の医師、映像の専門家ら約十人で構成する研究班を設置、年内に第一回会合を開き、今年度内に報告書をまとめる。



ポケモン問題で会見する田部兼右衛門民放連副会長(右)と午後、千代田区

### 年度内に報告書

調査は研究班のメンバーが診察した子供らを中心とした重い症例から、めまいに、全国で百一十五人の患者を抽出。年齢、性別、例まで幅広い患者を対象に病歴や症状などの実態を把握し、それぞれのケースにつ

いて、症状が現れた状況やその後の経過、病歴との関連などを調べる。特に、吐き気などの症状が現れる前に異常を示す脳波の動きについて詳しく調べる方針。

また、不調を訴えた原因とされる光による刺激について、点滅速度や長さ、光の強さ、周波数、色彩、形などを分析。さらに、部屋の明るさやテレビまでの距離を訴えるなどの被害が国内外で出ている。英米両国にメンバーを派遣するなど情報交換を急ぎたい」と説明している。

「ポケモン」放送中止決定相次ぐ  
再開は来春以降か  
「ポケットモンスター」の今後の放送についてテレビ東京や系列のテレビ大阪などは二十三日の次回放送

### 民放連 アニメの新基準検討 テレビ東京は調査チーム

テレビ東京系列の人気アニメ番組「ポケットモンスター」を見たり子供がけいれんなどを起こした問題で、日本民間放送連盟(民放連)は十八日午後、千代田区

後定例理事会を開き、「ポケモン問題は全民放共通の課題」として緊急に調査・研究し、テレビアニメの新たな基準作りに向けて検討することを決めた。

原因究明のための社内調査チームを充足。編成総局や技術局などアニメ製作担当のメンバー十人で構成、十九日に初会合を開く。同社は「過去にも強い光の刺激を受けた視聴者が体調不

当初は社内調査チームに医療関係者を含めて究明に当たると方針だったが、厚生省に設置された研究班と人選が重なり、ほかに適切な専門家が見つからなかったことから、医学的な調査は研究班に任せることになっ

た。また、一本豊・同社社長は同日、民放連の理事会で今回の事態を説明。この問題を放送基準審議会(議長・武田圭策北海道文化放送社長)の場で話し合い、医師など専門家の協力も得ることにした。NHKでもアニメで三月に数人の被害者が出ているため、共同歩調を呼び掛けるという。

光感受性発作 画面のちらつき、図形の変化、せん光の反復などの刺激で誘発される発作で、全身のけいれんなどを起こす。刺激を受けてから極めて短時間で発作を起こすのが特徴。一九七〇年にテレビ視聴者が

発作を起こす例が相次ぎ、八一年にはテレビゲームが原因とされる症例が欧米で報告された。発生の頻度は四千人に一人とされ、患者は幼児、小学生が中心。男性より女性の方が発生が多

分の中止を決定、三十一日の年末スペシャル版と二一日から三日まで予定するポケモンを題材にしたクイズ番組についても「放送がかなり難しい状況」(藤成・テレビ東京編成専任)としている。

酒田 福徳長

その後の放送をどうするかは未定だが、「安全の認が放送再開の条件に」としている。厚生省

# NHKが暴走で動く

## 教育新たに被害者2人判明

「ボケモン」問題が公共放送のNHKをも動かした。今年三月にNHK教育テレビのアニメ番組「YAT安心宇宙旅行」を見た静岡の子供四人が発作を起こして病院に運ばれていた問題で十八日、廣瀬百穂副編集長が緊急委員。新たに山形、千葉両県の二人の子供が「同番組を見て似た症状を起こし病院に運ばれた」との連絡があったことを明らかにした。また、今後の対策として局内に「アニメーション問題等検討プロジェクト」を発足させた。同プロジェクトは、

はれたとの連絡を視聴者から受けていたとの「新事実」を公表した。現在、NHKでは衛星放送「教育テレビ」で十四本のアニメを放送している。YATは三月二十九日放送する。これまでに山形、千葉の二人の子供が「同番組を見て似た症状を起こし病院に運ばれた」との連絡があったことを明らかにした。また、今後の対策として局内に「アニメーション問題等検討プロジェクト」を発足させた。同プロジェクトは、

「クロスアップ現代」で緊急検証番組を放送した。事件の起こった当日、番組を見ていた子供と両親、病院に運ばれた患者の診察に当たった医師らの証言や、アニメ制作現場からのレポートなどで構成。岡谷博キヤスターは、今年三月の同局アニメ「YAT」の問題も伝え「因果関係ははっきりしませんが、その後NHKでは積極的に刺激の強いアニメは避けるようにしています」と説明した。

## アニメ問題検討プロジェクト発足

「現代」で検証。この日夜、NHKでは



# 城も深刻 フラッシュ過敏症

サッカー日本代表の中田英寿(平塚)に続いて、城として言ったのは中田。目眩、フラッシュ攻撃による視力低下を訴え、サン格拉斯をかけた始末。テレビのポケット・モンスター騒動で、ピカピカ公書がクローズアップされる中、カメラのフラッシュも危険なのか?

「目が悪くなるので、フラッシュをたかないでください」と、今年12日に行われたW杯初出場祝賀会で、

テレビ・インタビュに対像で目が疲れ、以前は2あった視力が、今は0.4まで下がったという。視力低下がフラッシュによるものなら、来年6月のW杯を前にマスキングの視力低下よりストレスが心配



サングラスなしのぼうがスッキリしている城

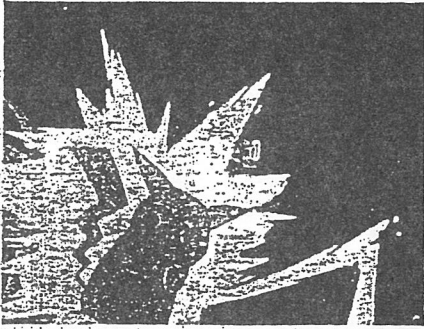
をかけるようになったのが城。「目の保護のため。写真をとるときにはフラッシュをたかないで」と要望。城の場合は深刻で、フラッシュを多く浴びると光の残網膜が損傷して視力が落ち

た例を紹介しながらも、「フラッシュを多く浴びたとしても、それは断続的な口正之講師だ。」「ボケモンと同じで短い時間には断続的にたかられるフラッシュはストレスの種類を要しているとい

(藤田 恵)

# 光過敏症

「ポケモン」の問題のシーン



## 点滅回数や量の規制が必要

「ポケモン」の光過敏症問題が、今年11月、大阪府で発生した。大阪府では、この問題をきっかけに、テレビ番組の点滅回数や量の規制が必要だと指摘している。この問題が、今年11月、大阪府で発生した。大阪府では、この問題をきっかけに、テレビ番組の点滅回数や量の規制が必要だと指摘している。

「光過敏症」は、強い光や閃光にさらされると、頭痛、めまい、吐き気、目眩、視力低下などの症状が現れる。特に、テレビ番組の点滅回数や量の規制が必要だと指摘している。

「光過敏症」は、強い光や閃光にさらされると、頭痛、めまい、吐き気、目眩、視力低下などの症状が現れる。特に、テレビ番組の点滅回数や量の規制が必要だと指摘している。

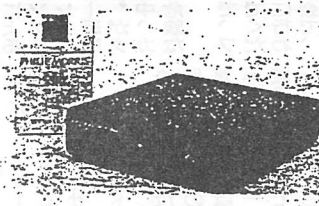
## ポケモン騒動から1カ月…再開のメド立たず

「光過敏症」の問題が、今年11月、大阪府で発生した。大阪府では、この問題をきっかけに、テレビ番組の点滅回数や量の規制が必要だと指摘している。

「光過敏症」は、強い光や閃光にさらされると、頭痛、めまい、吐き気、目眩、視力低下などの症状が現れる。特に、テレビ番組の点滅回数や量の規制が必要だと指摘している。

「光過敏症」は、強い光や閃光にさらされると、頭痛、めまい、吐き気、目眩、視力低下などの症状が現れる。特に、テレビ番組の点滅回数や量の規制が必要だと指摘している。

# 子供を守る装置



## テレビ接近防止センサー

「オクダケ・レーダー」

騒動が勃発したのは昨年12月16日。テレビ東京「ポケモン」に集中して、子供たちがけいれんなど、光過敏症の症状を訴えた。この問題をきっかけに、テレビ番組の点滅回数や量の規制が必要だと指摘している。

「光過敏症」は、強い光や閃光にさらされると、頭痛、めまい、吐き気、目眩、視力低下などの症状が現れる。特に、テレビ番組の点滅回数や量の規制が必要だと指摘している。

## 画面前方1mの動きを感知する警告音

「画面前方1mの動きを感知する警告音」は、子供たちがテレビを見ているときに、画面前方1m以内で動きを検知すると、警告音が鳴る。この装置は、子供たちがテレビを見ているときに、画面前方1m以内で動きを検知すると、警告音が鳴る。

「画面前方1mの動きを感知する警告音」は、子供たちがテレビを見ているときに、画面前方1m以内で動きを検知すると、警告音が鳴る。この装置は、子供たちがテレビを見ているときに、画面前方1m以内で動きを検知すると、警告音が鳴る。

「画面前方1mの動きを感知する警告音」は、子供たちがテレビを見ているときに、画面前方1m以内で動きを検知すると、警告音が鳴る。この装置は、子供たちがテレビを見ているときに、画面前方1m以内で動きを検知すると、警告音が鳴る。

「画面前方1mの動きを感知する警告音」は、子供たちがテレビを見ているときに、画面前方1m以内で動きを検知すると、警告音が鳴る。この装置は、子供たちがテレビを見ているときに、画面前方1m以内で動きを検知すると、警告音が鳴る。

平成9年12月18日

## テレビ番組の視聴による健康被害への対応について

1. 今般の12月16日放映のテレビ番組の視聴による健康被害の問題については、健康被害を受けた方等が精神保健福祉センター等において相談を受けられるようにするため、都道府県・政令指定都市の衛生部局長に対し、本日、指導通知を発出した。(別紙1)
2. 本件についての現状を把握し、その原因を調査するため、厚生科学研究費により研究班を設けることとした。(別紙2)

問い合わせ先 厚生省障害保健福祉部精神保健福祉課  
担 当 阿部(内3065)、斎藤(内3055)  
電 話 (直)03-3501-4864  
厚生省大臣官房厚生科学課  
(健康危機管理調整会議事務局)  
担 当 岡本(内3806)  
電 話 (代)03-3503-1711  
(直)03-3595-2171

障精第193号  
平成9年12月18日

各都道府県・指定都市  
精神保健福祉担当部(局)長 殿

厚生省大臣官房障害保健福祉部  
精神保健福祉課長

## 精神保健相談の適切な実施及び情報提供について

精神保健福祉対策については、かねてより特段の御配意を煩わしているところである。

今般の12月16日放映のテレビ番組の視聴による健康被害の問題については、その原因は現在特定されていないが、「光感受性発作」等精神保健上の問題である場合も考えられることから、相談の求めがあった場合は、貴管下精神保健福祉センター等においても、関係医療機関との連携を図りつつ、その適切な実施について遺漏のないよう御配意願いたい。

なお、別添資料のとおり情報提供するので、相談業務の参考に供されたい。

(別添1)

### 今般のテレビ番組(12月16日放映)の視聴による健康被害 についての考え方

今回多発した事例について、詳細は調査してみなければ不明であるが、下記のようなものが考えられる。

#### 1、光感受性発作の場合

光感受性発作は、画面のちらつき、図形の変化、反復する閃光などの刺激によって誘発される発作であり、全身のけいれん発作などの症状を呈するものである。  
(詳細は参考を参照のこと)

#### 2、その他の場合

閃光刺激、素速く動く色模様、強烈な図形反転などのスクリーン映像を長時間にわたって凝視していると、眩暈、嘔気、冷汗、動悸などの徴候を自覚することがある。これらの徴候・症状は急に起始し、数分の間に消褪するのであれば、必ずしもてんかん発作ではない。

(参考)

## 光感受性発作について

### 【概要】

1970年にテレビ視聴中に発作を起こす患者が増加しているという報告が紹介されたことを契機として、1981年にはテレビゲームによって誘発された可能性のある発作症例が散発的に英米の医学誌に報告されるようになった。我が国においては、1987年にてんかん学会において発作症例が報告されている。閃光や光の点滅で発作が起こるものを光感受性発作と呼び、発作誘因として画面のちらつき、図形の変化といった光の感受性の異常、図画面上の物体を追う眼球の動きなどが考えられている。閃光刺激周波数は、15ないし20ヘルツにある。刺激から発作までの潜伏時間は短く、スクリーン注視後にまもなく発作がおこることが多い。

### 【発生頻度】

4000人に1人の割合とされる。性別では、女性で多く、幼児、学童期が好発年齢とされる。

### 【機序】

知覚刺激が加えられると、種々の脳レベルで過敏な反応を示す反射弓が構成され反射発作が生ずるが、特に知覚性求心路と発作症状に関連する遠心路、およびそれらを連絡する中枢神経からなる反射路の光感受性に異常があるためと考えられている。

### 【症状】

発作型としては全般性強直間代発作、ミオクロニー発作、欠神発作が多く、時に複雑部分発作もみられる。全般性強直間代発作は、全身のけいれん発作で二つの相がある。最初の強直相では意識を失って倒れ、四肢を伸展させて固くなる。次いで体幹と四肢の間代けいれんが生じる。発作が終わると徐々に意識を回復する。これとは別に、部分発作から始まる二次性全般化発作があり前兆を伴うことが多い。

### 【診断】

脳波検査が不可欠であり、反復閃光刺激などの手段によって脳波上で光感受性発作波をとらえることが必要である。

### 【予防手段】

テレビ画面から十分な距離をとる、部屋を明るくするなどの方法がある。

## 【治療方法】

発作を繰り返すような場合には、抗てんかん薬の服用が必要となる。

## 【予後】

良好なことが多く、日常生活上の注意を守り、定期的な脳波検査を施行することで、再発を予防することができる。

(別添2)

## ビデオゲーム誘発発作等に関する専門家リスト

北海道大学医学部	小児科	香坂忍
	精神科	中村文裕
弘前大学医学部	小児科	村中秀樹
東北大学医学部	小児科	飯沼一字
八乙女クリニック(仙台市)		高橋剛夫
福島県立医科大学	神経精神科	丹羽真一
	〃	管るみ子
埼玉医科大学	小児科	小出博義
	神経精神科	山内俊雄 相川博
国立療養所静岡東病院 (てんかんセンター)		八木和一 清野昌一
名古屋大学医学部	小児科	渡辺一功
岡山大学医学部	小児神経科	岡鋈次
	〃	大田原俊輔
福岡大学医学部	小児科	満留昭久

(注) ESGS(Electronic Screen Games and Seizures:ビデオゲーム誘発発作)国内共同研究会議((財)精神・神経科学振興財団の研究班構成員を専門家リストとして掲載した。

(別紙2)

厚生省精神保健福祉課

平成9年12月18日

## 厚生科学特別研究「光感受性発作に関する臨床研究班」 について

(概要)

### 1. 研究の概要

#### 【研究課題】

光感受性発作に関する臨床研究

#### 【研究内容】

##### (1) 今回のテレビ番組視聴者症例の把握

1. 症状発現者の年齢、性別、病歴、症状
2. 成因、診断、治療、臨床経過
3. 症状発現の状況

##### (2) 原因となる光刺激の物理的条件

1. 映像の点滅速度、強度、色彩、図形等
2. 光感受性と関連するその他の物理的条件
3. 反復閃光刺激の脳波に対する影響

### 2. 研究班組織

#### 【班長】

山内 俊雄 埼玉医科大学教授 他

### 3. スケジュール

年度内に3回程度会議を開催

# ひざの後ろに 光センサー!?

米の研究者発表

ひざの後ろに強い光を当てると、「体内時計」を進めたり遅らせたりする効果がみられる。そんな実験結果を、米コーネル大のS・キャンベル博士らが米科学誌サイエンス(二月十六日号)に発表した。体内時計の仕組みを解明する手がかりになるとも、時差ボケや不眠症、うつ病の解決にも役立つと期待される。

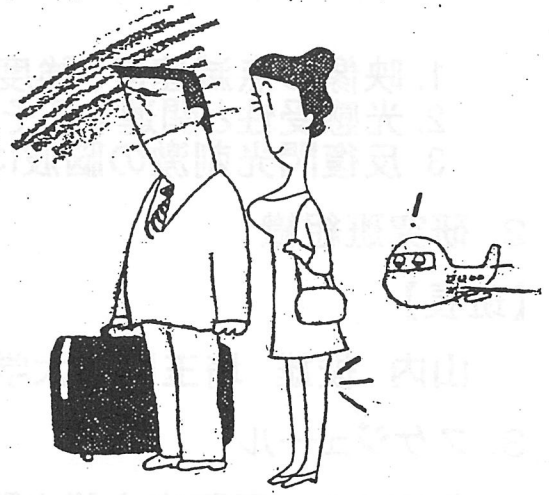
眠り、目覚め、食欲など約二十四時間周期の生活リズムを支配する体内時計はこれまで、目から入る光で調節されると考えられてきた。だが、目と時計との明確な関係が見つからず、全盲の人にも時差ボケがあることなどから、キャンベル博士らは、皮膚にもセンサーが存在するはずだと考えた。

二十二一六十七歳の男女十五人に四日間、薄暗い実験室で暮らしてもらい、体温とメラトニンと呼ばれるホルモンの分泌量の変化を測った。体温は昼間高く、夜間低い。一方、眠りと深い関係のあるメラトニンは、昼間少なく、夜間に多い。四日間とも午前零時から正午までベッドに横たわり、二日目だけは眠らないようにした。その間に本人にはわからないように時間帯を変えて三時間ずつ、光ファイバーを使いひざの後ろ側に光を当てた。一部の人はずっと光を当てなかった。

その結果、光を当てなかった人の体内時計のリズムに変化は見られなかったのに、光を当てた人は体温やメラトニンの変化が最大三時間前後にずれていた。たとえば午前一時から四時までで光を照射された男性(20)は、体温が最も低い時刻が照射前は午前四時四分だったが、実験後は午前七時八分(三時間四分遅れた。また、午前六時から九時まで光を照射された男性(20)は、午前七時十三分(四分遅れた)から午前七時三十分(二分遅れた)になった。

このことからキャンベル博士らは、ひざの後ろ側にあるセンサーが光を感じ、その情報が脳の視交叉上核と呼ばれる部分に存在すると考えられるマスタックロック(体内時計の本体)に伝えられた@時計を遅らせる

## 「体内時計」解明へ



か進ませるか、光を当てると時間帯によって決まる①ひざの後ろ側は皮膚が薄く血管が集まっているので、血液中の何らかの物質が情報伝達に関与している、と推測している。

この方法が応用できれば、睡眠中に夜勤の人の体内時計の昼夜を逆転させたり、海外渡航時、体内時計を目的地の時刻に合わせて調整したりすることも可能になるかもしれない。千葉喜彦・山口大名教授(時間生物学)は「生物は全身どこでも光を感じていると考えられるが、そのうちどこが時計として働いているのか、脳までどのように情報を伝えるのかなど、詳しいメカニズムはわかっていない。今後の研究に期待したい」と話す。

高照度光療法による睡眠障害などの治療をしている佐々木三男・慈恵医大教授(精神看護学)は「本当にひざの後ろに当てた光だけの作用なのか、実験条件をいろいろ変えて確かめるべきだろう。臨床応用に発展できればすばらしいが、まだ基礎研究が必要だ」とみている。

## 10. おわりに

本文でも述べたように、人類を含めた地球上の諸生物は、その出現以来、その時既に遙か以前より存在していた地球上の光環境に順応しながら生存し、進化してきた。近年、技術開発が進み、各種の人工光源が開発・実用化され、人工光源からの光の量が増加してくるにつれて、太陽による自然の光環境に変化を与え、結果として従来の自然環境に順応してきた、人類を含めた諸生物の生態系に影響を及ぼすようになってきた。

本研究調査委員会では、地球上の光環境を構成する基本要素である自然光源および人工光源の特性、光の人間の生理・行動に与える影響などについて調査してきた。

人類の活動による結果的な地球環境に対する破壊行為（必ずしも明確に認識してこなかった部分もあるが）が大きな話題になってきている今日、上記述してきた内容が、われわれの行動を今一度考え直し、地球環境とのかかわりを再検討するための資料となれば幸である。

（河本康太郎）



## 研究調査委員会報告書の著作権について

本報告書の著作権は（社）照明学会に帰属します。

複写をされる方に

本報告書に掲載された著作物は、政令が指定した図書館で行うコピーサービスや、教育機関で教授者が講義に利用する複写をする場合等、著作権法で認められた例外を除き、著作権者に無断で複写すると違法になります。