異形波交代光波形光源のちらつきの 主観評価とその評価指数（その2）

——フーリエ級数展開による考察——

専門会員 田淵 義彦* 専門会員 中村 肇* 正会員 木本 哲也*

Subjective Appraisal and the Index of Flicker Sensation from Light Sources with Alternating Different Waves (Part 2)

(The Analysis with Fourier Expansion)

Yoshihiko Tabuchi (Fellow Member) Hajimu Nakamura (Fellow Member)

Tetsuya Kimoto (Member)

(Matsushita Electric Works, Ltd.)

Summary

In the former paper (1985), "Flicker Luminance Ratio" (FLR), which is a ratio of two such average luminances of alternating light waves that is divided the respective wave duration, was proposed and confirmed to be most adequate as the index of sensation for such flicker waves that is induced at both end parts of a fluorescent lamp.

The alternate different light waves are also periodic waves and the analysis with Fourier expansion can be applied for them.

Then, the amplitudes and the amplitude modulation degrees comprised of fundamental wave, second and third harmonics wave were compared each other in terms of the correlation to actual subjective appraisal data.

Furthermore those data of amplitudes and amplitude modulation degrees were compared with the above mentioned FLR. Results are as follows.

(1) Among them, the amplitude of fundamental waves and the amplitude modulation degree of them have practically sufficient suitability.

(2) FLR has higher correlation with subjective appraisal than above two.

FLR is confirmed to have practically sufficient suitability as the index for flicker sensation from alternate different light waves in peripheral visual field.

1. ま え が き

前報 (1985)¹⁾において、蛍光ランプの管端部（電極部）の放電発光のように、お互いに少し異なる発光波形が交互に交代する光源を異形波交代光波形光源と名づけ、このちらつきの主観評価については、従来のちらつきの評価指数とは異なった新しい評価指数が必要であることを明らかにして、交互の波形の時間平均された輝度の比を仮定すれば、よい適合性を有することを確認して、これを“フリッカ輝度比”と呼ぶことにすることを報告した。

しかるに、異形波交代光波形は、一組の異形波を一周期とする周期波形であり、周期波形の解析には当然フーリエ級数展開による方法が可能であり、この検討が必要である。すなわち、光源のちらつきの評価指数には、フーリエ級数展開による係数を用いる

方法と用いない方法に大別される。

前報では、フーリエ級数展開によらない各種評価指数についての検討結果を報告したので、本報ではフーリエ級数展開による評価指数についての検討結果を報告する。すなわち、これらのうち最も妥当性の高い指数を明らかにするとともに、前報のフリッカ輝度比との関連について言及した。

なお、本報での検討の基本的な方針は、評価指数について、前報で言及しなかったフーリエ級数展開による係数を単独もしくは組み合わせる評価指数をいくつか想定し列挙して、これらの適合性の判定は前報に述べた主観評価実験結果に立脚し、まったく同様の解析プロセスで行なうことにした²⁾。

2. 従 来 の 研 究

フーリエ級数展開を用いる指数としては主として以下の報告がある。

Ives (1922), de Lange (1958) はちらつき臨界融合周波数 (CFF) は基本波変調度（フーリエ基本波成分の振幅と平均輝度

* 松下電工㈱

本論文の一部は昭和57年および60年電気関係学会関西支部連合大会で発表された。

の比)により決まり³⁾⁴⁾, Kelly (1961) は基本波振幅の絶対値で決まるとした⁵⁾.

川上ら(1985)は発光波形の基本周波数を商用電源周波数の1/2 ($f=25\text{Hz}$ または 30Hz)に設定し, その第2高調波(50Hzまたは60Hz)成分が全体に占める割合によってちらつきを評価する方法を提案した⁶⁾. この場合, 商用電源の2サイクルについてフーリエ級数展開を行なっているが, この係数は1サイクルの場合と特定の関係がある. したがってこの指数は Ives, de Lange と解釈が類似である.

大竹ら(1986)は商用電源で点灯した照明光のちらつきの有無はその電源周波数成分の変調度を求め, この値が直流光に正弦波光を重ねた光のちらつきいきにおける変調度より大きい小さいかで判定されることを明らかにした⁷⁾. これは Ives, de Lange の変調度の拡張形式といえる.

3. フーリエ級数展開による評価指数の検討

3.1 評価指数の仮定

一般に周期波形は以下のようにフーリエ級数に展開できる.

$$y(t) = A_0 + \sum_{n=1}^{\infty} A_n \cdot \sin(n\omega t + \varphi_n) \quad \dots\dots\dots(1)$$

今回フーリエ級数展開による評価指数としては, すでに報告されている基本波の振幅などを含めて, 以下の6つの指数を仮定し有効性を検討した. ここで2次以上の高調波に関してはCFFを越えるので, 評価指数とはなりにくいという予測もできたが, 従来2次以上の有効性についてはあまり言及されていないので, 今回確認することにした.

- (1) 基本波の振幅: A_1 (Kelly)
- (2) 2次高調波の振幅: A_2
- (3) 3次高調波の振幅: A_3
- (4) 基本波の変調度: A_1/A_0 (Ives, de Lange, 川上, 大竹)
- (5) 2次高調波の変調度: A_2/A_0
- (6) 3次高調波の変調度: A_3/A_0

3.2 本報の観察対象光波形と前報の評価指数

本報で論じる光波形の性質について前報でも言及したが, 再度詳述する.

今回の異形波交代光波形を定義づけるならば, 蛍光ランプ管端部の発光波形のように少し異なる発光波形が交互に交代しており, その波形が全波整流型の近似正弦波に直流成分の重畳した形をしていて, 1/2サイクルの位置に極小値があり, かつ前後の半サイクルに極大値を1個ずつ有するひずみ波形である. 簡単のためこれを本報では「ひずみ波」と呼ぶことにする. これは陽光柱のように前後の半サイクルにおける光波形がほぼ同一形状, 同光量である光源とは異なったものである.

同形波光源, たとえば矩形波あるいは正弦波刺激が繰り返される光源に関するちらつきは, 光刺激の切れ目が暗時として感じられることに対して, 異形波交代光波形光源によるちらつきは前後する2つの光刺激の明暗の交代として感じられているものと考えられる.

このひずみ波を 図 1 に再掲して示す.
参考のため前報で検討した評価指数の要点を再掲する.

- (1) フリッカインデックス
平均光出力以上の光出力が, 全光出力に対して占める比率で表す.

図 1 ひずみ波 (異形波交代光波形)

フリッカインデックス = $\frac{A+C}{A+B+C+D} \quad \dots\dots\dots(2)$

- (2) パーセントフリッカ
1サイクルの光出力波形の波高値の最大値と最小値をもとに, 下式として定義されている.

パーセントフリッカ = $\frac{P_1-Q}{P_1+Q} \quad \dots\dots\dots(3)$

- (3) 波高差比
光出力波形のピーク値をもとに下式として定義されている.

波高差比 = $\frac{P_1-P_2}{P_1} \times 100 \quad (P_1 \geq P_2) \quad \dots\dots\dots(4)$

- (4) 波高比
光出力波形のピーク値の比である.

波高比 = $\frac{P_2}{P_1} \times 100 \quad (P_1 \geq P_2) \quad \dots\dots\dots(5)$

- (5) フリッカ輝度比
1サイクルの光出力波形における前と後の波形の面積比である.

フリッカ輝度比 = $\frac{C+D}{A+B} \quad (A+B \geq C+D) \quad \dots\dots\dots(6)$

3.3 評価実験 (実験 I) の要約

評価指数は主観的ちらつき感との対応関係が強いほど有効性が高い. この対応関係を比較するためには, 形状の異なるひずみ波についてちらつきの感覚量と評価指数の値を求める必要がある. このため主要な2種類の実験を行なっている. 前報の主観評価実験のうち実験 I の要点を以下に述べる.

〔実験 I の要約〕

- 1) 観察対象は6台の学習用蛍光灯スタンドの管端部で, 周辺視である.
- 2) 各管端部の六つのひずみ波を重ね合わせて 図 2 に示す.
なお光波形の測定データの処理法は重要であるので, 前報よりもさらに詳しく述べる. すなわち, ウェーブメモリに受光器からの光波形の1サイクルを1,000分割して記録し, プロットで作図させて, 次にこの波形の包絡線をマニュアルで描いてある.
- 3) スタンドで照らされた紙面の照度は約 800 lx, 管端部輝度は約 10,000 cd/m²である.
- 4) 観察者は専門家13名である.
- 5) 観察者はちらつきに「気が付く」、「気が付かない」、「わか

図2 各ランプの管端部光波形

らない」のうちどれに相当するかを回答した。ここでちらつきの感覚量はちらつきに気付かない人の率とすることにし、これは「気が付かない」および「わからない」と答えた人の和の率とした。

表1 各光波形の評価データ

光波形 No.	ちらつきに気付かない率	フリッカ輝度比
1 (D)	92.3%	98.5%
2 (E)	84.6%	95.0%
3 (B)	46.2%	86.6%
4 (C)	30.8%	90.7%
5 (A)	7.7%	82.9%
6 (F)	0%	82.8%

表2 フーリエ級数展開結果と各指数値

光波形 No.	A_0	A_1	φ_1	A_2	φ_2	A_3	φ_3	A_1/A_0	A_2/A_0	A_3/A_0
1 (D)	0.482	0.0365	-20°	0.192	-127°	0.0204	-22°	0.0757	0.398	0.0423
2 (E)	0.405	0.0118	106°	0.167	-121°	0.00687	-4°	0.0291	0.412	0.0170
3 (B)	0.429	0.0383	-10°	0.166	-121°	0.0212	-31°	0.0893	0.387	0.0494
4 (C)	0.474	0.0318	-14°	0.184	-125°	0.0208	-35°	0.0671	0.388	0.0439
5 (A)	0.529	0.0909	-23°	0.196	-125°	0.0175	-31°	0.172	0.371	0.0331
6 (F)	0.420	0.106	-23°	0.167	-122°	0.0152	-40°	0.253	0.399	0.0362

6) 評価結果として、これらの光波形について、それぞれちらつきに気付かない率とフリッカ輝度比を再掲して表1に示す。

3.4 フーリエ級数による展開

前述(図2)の光波形を本報では1サイクルを60分割しディジタルタイザーを用いて電子計算機にインプットして、フーリエ級数展開した。その上で各評価指数を求めその結果を表2に示す。

3.5 各評価指数のちらつき感との対応関係の検討

各評価指数とちらつきに気付かない率の散布状況を図3(a)~

図4 フリッカ輝度比とちらつき感の関係¹⁾

(a) 基本波振幅とちらつき感の関係⁸⁾

(b) 2次波振幅とちらつき感の関係

(c) 3次波振幅とちらつき感の関係

(d) 基本波変調度とちらつき感の関係⁸⁾

(e) 2次波変調度とちらつき感の関係

(f) 3次波変調度とちらつき感の関係

図3 各評価指数とちらつき感の関係

(f)に示す。前報のフリッカ輝度比の場合を 図 4 に示す。これらは右へ行くほどちらつきが弱くなり、気付かない人の率が増加する傾向を示す。

図 3 (a)～(f)によれば(a)基本波振幅、(d)基本波変調度においてフリッカ輝度比とほぼ同等の、ちらつきに気付かない率との対応関係があり、基本波の振幅、およびその変調度は有効であるといえる。その他は図からみる限りほとんど相関を有しない。したがって、Ives, de Lange, Kelly らが矩形波などの同形波について定義したこれらの指数 ((a), (d)) は、今回のひずみ波についても成立するといえる。

3.6 相 関 分 析

一般にちらつきに気付かない率は、ちらつき刺激の強さに対して正規分布になると考えられるので、参考のため前回の報告で検討した指数も含めて、ちらつきに気付かない率との関係を、正規確率紙上でプロットし、直線性を比較するとともに、相関係数を求めて相関度を比較検討した。上述の結果、相関の高かった基本波振幅と基本波変調度、前回のフリッカ輝度比について正規確率上のプロットを 図 5 に示す。なお、この場合光波形 F はちらつきに気付かない率が 0 %であるので、合計 5 点のプロットとなる。一般的に相関分析を行なうためには、データ数 5 ではやや十分ではないが、傾向を知る上で一つの参考データとなるので、今回この分析を行なった。

図 5 正規確率紙における相関関係

表 3 (a)はフーリエ級数展開を用いた評価指数について、(b)にはフーリエ級数展開を用いない評価指数についての相関係数を示す。ただし、各評価指数は定義の仕方によってちらつきに気付かない率と正相関のものと負相関のものがあるので、相関度の比較の便利のために負相関のものは符号を変換し、符号を統一した。したがって、表 3 (a), (b)のすべての評価指数は数値の大小を比較すればよい。

なお、表 3 において符号変換した評価指数には * を付した。
表 3 (a)においては基本波振幅と基本波変調度が、(b)においてはフリッカ輝度比が他より相関係数が大きく、(a), (b)を通じてフリ

表 3 正規確率紙における相関係数

(*の相関係数については符号変換を行なった)

(a) フーリエ級数展開を用いる指数

評 価 指 数	相 関 係 数
基 本 波 振 幅*	0.76
2 次 波 振 幅*	0.31
3 次 波 振 幅*	0.31
基 本 波 変 調 度*	0.78
2 次 波 変 調 度*	-0.88
3 次 波 変 調 度*	0.21

(b) フーリエ級数展開を用いない指数

評 価 指 数	相 関 係 数
波 高 比	0.40
波 高 差 比*	0.40
フリッカインデックス*	-0.08
パーセントフリッカ*	-0.57
フリッカ輝度比	-0.94

ッカ輝度比が最も相関係数が大きい。

したがって、ちらつきに気付かない率の正規分布を想定した相関分析では、基本波振幅と基本波変調度はフリッカ輝度比とほぼ同等に近い有効性があるといえる。

3.7 順 位 相 関

3.7.1 実験Ⅱの要約

アプローチの異なる実験を増やし論証力を補強するために行なっている前報の実験Ⅱの、順位相関に準拠した検討結果を述べる。実験Ⅱの要点を再掲する。

- 1) 評価指数の実用性からみて、ちらつきの弱い範囲において適切な指数を明らかにすることが大切であるので、観察対象はフリッカ輝度比が0.9以上の3とおりの光波形 D, E, C とした。
- 2) 観察者は専門家13名。
- 3) 評価方法 7段階評価による一対比較方法(シェッフエの方法)
- 4) 結果として、ちらつき感の強さの順位は $D \leq E < C$ 、すなわち D と E はほぼ同じで非常にちらつき感は弱く、C はそれよりちらつき感はかなり強いことが明らかになっている。

3.7.2 各指数による予測結果と検討

上記の結果に対して、今回の各指数で計算されるちらつき感の強さの数値の大小の順位をまとめて 表 4 に示す。

ちらつき感の最も強い波形は C であるが、この表よりみてこの事実と合致する指数はフリッカ輝度比、3次波振幅、3次波変調度だけである。その他の指数はいずれも E または D が最も強いという結果である。さらに C, E, D の順を考慮すると主観評価順位に合致する指数はフリッカ輝度比だけである。したがって、今

表 4 順 位 相 関

ちらつき感主観評価結果		$D \leq E < C$
本 報	基 本 波 振 幅	$E < C < D$
	2 次 波 振 幅	$E < C < D$
	3 次 波 振 幅	$E < D \leq C$
	基 本 波 変 調 度	$E < C < D$
	2 次 波 変 調 度	$C < D < E$
	3 次 波 変 調 度	$E < D \leq C$
前 報	フリッカインデックス	$D < C < E$
	パーセントフリッカ	$D < C < E$
	波 高 差 比	$E < C < D$
	波 高 比	$E < C < D$
フリッカ輝度比		$D < E < C$

回の順位相関の検討においては、フリッカ輝度比が最も優れているといえる。

4. フリッカ輝度比と基本波変調度の関係

前章において基本波振幅、基本波変調度ともにフリッカ輝度比にほぼ相当する、ちらつき感と強い対応関係を見出した。しかし基本波変調度とフリッカ輝度比は若干の相違がある。そこでフリッカ輝度比と基本波変調度の間の数学的な相違を述べる。なお、今回は簡単のため3次までの式で考える。

光波形は

$$y = A_0 + A_1 \sin(\omega t + \varphi_1) + A_2 \sin(2\omega t + \varphi_2) + A_3 \sin(3\omega t + \varphi_3) \quad \dots\dots\dots(7)$$

で与えられる。

フリッカ輝度比は以下のようにして求まる。

前の半サイクルの輝度の時間平均値 $\bar{y}_1$ は次式で表される。

$$\begin{aligned} \bar{y}_1 &= \frac{\int_0^T y dt}{T} \\ &= \frac{2}{T} \left\{ \int_0^{\frac{T}{2}} A_0 dt + A_1 \int_0^{\frac{T}{2}} \sin(\omega t + \varphi_1) dt + A_2 \int_0^{\frac{T}{2}} \sin(2\omega t + \varphi_2) dt \right. \\ &\quad \left. + A_3 \int_0^{\frac{T}{2}} \sin(3\omega t + \varphi_3) dt \right\} \\ &= A_0 + \frac{1}{T} \left(\frac{4A_1}{\omega} \cos \varphi_1 + \frac{4A_3}{3\omega} \cos \varphi_3 \right) \quad \dots\dots\dots(8) \end{aligned}$$

この場合2次波の積分項は0となり、1次と3次が残る。後の半サイクルの輝度の時間平均値 $\bar{y}_2$ は同様に

$$\begin{aligned} \bar{y}_2 &= \frac{\int_{\frac{T}{2}}^T y dt}{T} \\ &= A_0 - \frac{1}{T} \left(\frac{4A_1}{\omega} \cos \varphi_1 + \frac{4A_3}{3\omega} \cos \varphi_3 \right) \quad \dots\dots\dots(9) \end{aligned}$$

したがって、フリッカ輝度比 F は下式となる。

$$\begin{aligned} F &= \frac{\bar{y}_2}{\bar{y}_1} \\ &= \frac{\pi - 2 \frac{A_1}{A_0} \cos \varphi_1 - \frac{2}{3} \cdot \frac{A_3}{A_0} \cos \varphi_3}{\pi + 2 \frac{A_1}{A_0} \cos \varphi_1 + \frac{2}{3} \cdot \frac{A_3}{A_0} \cos \varphi_3} \quad \dots\dots\dots(10) \end{aligned}$$

フリッカ輝度比は変調度および位相角の関数であり、基本波以外の振幅および各成分の位相角 φ_i を与えなければ、基本波変調度とフリッカ輝度比の関係は定まらない。

なお、簡単のために基本波のみについて検討すると、フリッカ輝度比は

$$F = \frac{\pi - 2 \frac{A_1}{A_0} \cos \varphi_1}{\pi + 2 \frac{A_1}{A_0} \cos \varphi_1} \quad \dots\dots\dots(11)$$

となる。

参考のため基本波変調度とフリッカ輝度比の関係を図示する。

φ_1 をパラメータとして基本波変調度を横軸、フリッカ輝度比を縦軸にとって図6に示す。フリッカ輝度比は $\varphi_1 = 0$ と $\varphi_1 = \pi$ のカーブにかこまれる範囲をとらう。すなわち、いくつかの周期波形において、お互いに位相角 φ_1 が同一の値をとるような波形のグループにおいてのみ、基本波変調度はフリッカ輝度比と等価

図6 基本波変調度とフリッカ輝度比の関係

である。

5. 結 論

ひずみ波光源のちらつきの評価指数について、フーリエ級数展開を用いた評価指数すなわち、基本波、2次高調波、3次高調波のそれぞれの振幅およびそれぞれの振幅変調度の適合性の高さの検討、および前報のフリッカ輝度との比較を行なった結果、

(1) ちらつきに気付かない率と各指数との対応関係では、基本波振幅、基本波変調度が妥当であり、フリッカ輝度比とほぼ同等に有効である。

(2) 従来上記の基本波振幅および基本波変調度は、矩形波などの同形波の周期波について適合性が確認されているが、ひずみ波についても拡張形式がほぼ成立するといえる。

(3) しかし、ちらつき感との順位相関の検討結果では、フリッカ輝度比のみが相関が高く、他は相関が低かった。

(4) 基本波変調度とフリッカ輝度比の数学的な関係はひずみ波においては基本波変調度だけでなく他の高調波の振幅と各成分波の位相角 φ_1 を定めなければ、フリッカ輝度比は一意に定まらず、基本波変調度とフリッカ輝度比とは等価なものではない。

(5) 今回の実験結果の範囲では、ひずみ波のちらつきの評価指数として基本波振幅と基本波変調度、フリッカ輝度比ともに実用的には十分な適合性を有していると考えられるが、フリッカ輝度比が最も適合性が高いといえる。

したがって現段階では実用的には、周辺視におけるひずみ波によるちらつきの評価指数として、フリッカ輝度比を用いることが妥当である。

さらに上記の結果の十分な実証のためには、同種でかつ独立した実験結果が数組必要と考えられるので、これは今後の課題とし

たい。

6. あ と が き

光源のちらつきは物の見え方が悪くなったり不快感を生じる原因となることがあり、照明環境の質を高めるためにはそれをできるだけ抑制することが望ましい。そのため従来からこのちらつき感の定量化の研究が積極的に進められ、種々の評価指数が提案されている。今回周辺視において、発光波形を近似正弦波のひずみ波に限定した場合について、フーリエ級数展開によるいくつかの評価指数および前報のフリッカ輝度比の有効性を検討した。

なお、終わりにのぞみ、実験にご協力いただいた当社インテリア照明事業部松尾幸二社員ならびに、ご指導を賜った関係各位に深謝の意を表す。

参 考 文 献

- (1) 田淵, 中村, 木本: 異形波交代光波形光源のちらつきの主観評価とその評価指数, 照学誌69-6 (昭60) 267~273
- (2) 田淵義彦ほか: ちらつきの主観評価とその評価指数, 昭57電気関係学会関西支部連合大会, G13-11
- (3) Ives, H.E.: Critical frequency relations in scotopic vi-

sion. J. Opt. Soc. Am. and Rev. Sci. Instr., 6 (1922) 254~268

- (4) Lange, H. de: Research into the dynamic nature of the human fovea-cortex system with intermittent and modulated light, J. Opt. Soc. Am., 48 (1958)
- (5) Kelly, D.H.: Visual responses to time-dependent stimuli, J. Opt. Soc. Am., 51 (1961)
- (6) 川上幸二, 小久保哲夫: 光源発光波形の商用電源周波数成分によるちらつき評価, 照学誌 69-6 (昭60) 291~297
- (7) 大竹, 猪野原, 武内: 光源のちらつきの評価方法, 照学誌 70-2 (昭61) 51~54
- (8) 田淵, 中村, 木本: フーリエ級数展開による異形波交代光波形光源のチラツキの評価, 昭60電気関係学会関西支部連合大会
- (9) 腰原, 伊藤, 杉浦: HID光源のちらつき現象の一考察, 昭55照明学会全国大会30

(受付1986年11月6日)