

論 文

単層有機感光体特性に及ぼす電荷発生顔料添加量の影響

中沢 享*, 水田 泰史*, 川原 在彦*

宮本 栄一*, 武藤 成昭*

(1993年3月3日受理)

Dependence of Electrophotographic Properties of Monolayered Organic Photoconductor on the Added Pigment Amount as Charge Generation Material

Toru NAKAZAWA,* Yasufumi MIZUTA,* Akihiko KAWAHARA,* Eiichi MIYAMOTO* and Nariaki MUTOH*

(Received March 3, 1993)

Monolayered organic photoconductor using perylene pigment as charge generation material for positive charging xerography has been developed. Concerning the material design of the photoconductor, it is made clear that the amount of perylene pigment in the photoconductor extremely influences the electrophotographic properties like charge acceptance capability and photosensitivity of the film. For the development of the stable photoconductor for practical use with both high charge acceptance capability and photosensitivity, the optimum amount of perylene pigment exists, and this amount is determined on the balance of the lowering of charge acceptance and the improvement of photosensitivity with the increase of the amount of perylene pigment.

1. 緒 言

有機感光体 (OPC : Organic Photoconductor) は材料設計において選択の自由度が高いこと、成型性のフレキシビリティーが高く、種々の形状の感光体が容易に設計できること等の長所を兼ね備えた電子デバイスである。

1970年代、OPC は電子写真用感光体として盛んに研究開発が行われた結果、1980年代に入り、電荷発生層 (CGL : Charge Generation Layer) 上に電荷輸送層 (CTL : Charge Transport Layer) を積層した機能分離型積層感光体が開発され、電子写真用感光体として広く実用化された。このタイプの OPC は、従来の Se に代表される無機系感光体に比べ、

a. 構成材料の安全性が高い (人に無害である)。

b. 感光体設計の自由度に優れる。

c. 生産性が高く、初期コストが低い。

等、多くの長所を有するところから、現在では電子写真用感光体の主流を占めるに至った。

従来提案されていた OPC には、無機系感光体に比べ、感度が小さい、寿命が短いといった問題があったが、積層 OPC の開発はこれらの問題を解決した。しかしながら、この OPC は、優れた特性を示す有機電荷輸送材料のほとんどが正孔輸送型であるため、感光体の帶電極性を負で使用しなければならず、使用システム上オゾン発生等の新たな問題が発生した¹⁾。

電子写真法における感光体の帶電プロセスには、通常コロナ放電方式が用いられるが、一般的に負のコロナ放電は正のコロナ放電に比べてシステムからのオゾン発生量が多く、また、帶電の均一性に劣るといった問題がある。

オゾン発生量の増加に関しては、

- ①近年、環境保全の観点からオフィス用事務機器からのオゾン排出濃度規制が強まる中、複写機、プリンタ等においても、機械からの排気オゾン濃度を低下させる

キーワード：単層有機感光体、顔料添加量、感度、帶電能

* 三田工業株式会社技術部感光体研究所 (540 大阪市中央区玉造 1-2-28)
Photoreceptor Research Center, Department of
Technology, MITA Ind. Co., Ltd., 2-28, Tama-
tsukuri 1-chome, Chuo-ku, Osaka, 540 Japan

ことが求められ、オゾン分解システムを導入する必要が生じた。

②オゾンのような化学活性種により、OPCは化学変化を受けやすく、OPC保護のためオゾン排出システムを装置に導入する必要が生じた。

等により、装置のコストアップといった問題が発生した。

一方、感光体帶電の不均一性に対しては、

③スコロトロンシステム等、感光体の帶電安定化のためのシステム導入が必要となった。

等のことにより、やはり装置のコストアップを招いた。

このような背景の中で、OPCの特徴を生かし、かつ正帶電で使用できるOPC実現のため、種々研究が盛んに行われてきた²⁻⁷。著者らは、このような正帶電型OPCの研究開発の流れの中で、前記の課題を一挙に解決することのできる単層型OPCに着目し研究を行った。その結果、図1に模式構造を示したような、結着樹脂に電荷輸送材料(以下、CTM: Charge Transport Materialと略す。)を分子分散させたホール輸送型マトリックス中に、電荷発生材料(以下、CGM: Charge Generation Materialと略す。)であるペリレン顔料(図2)を分散させ、これを表面にアルマイド処理を施したアルミニウム基板上に塗布成膜した構造の単層型OPCを開発した⁸。

単層感光体のデバイスとしての特性に関する研究結果は、これまで種々報告されているが、構成材料に関する

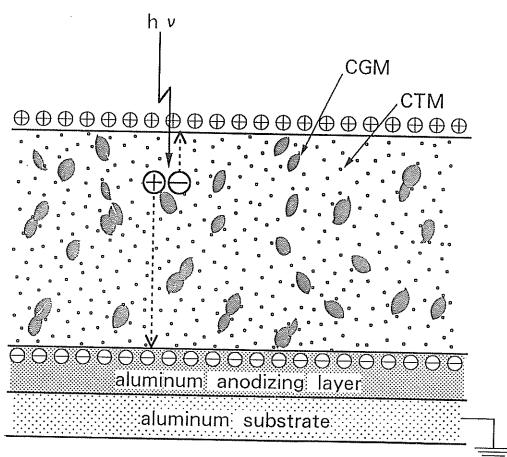


図1 単層 OPC の断面構造模式図

Fig. 1 Schematic diagram of cross section of monolayered OPC. The standard film (21 μm thick) in this study is composed of 8 weight part of perylene pigment (see Fig. 2, OGM), 75 weight part of IPCH (see Fig. 4-b, CTM), and 100 weight part of polycarbonate (see Fig. 4-a, binder resin).

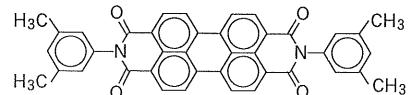


図2 ペリレン顔料の構造式

Fig. 2 Structural formula of perylene pigment used as charge generation material in monolayered OPC.

詳細な報告はほとんどなされていない。

本報告では、

①単層型 OPC の電荷発生顔料の添加量の変化が、感光体の電子写真特性に及ぼす影響に関し、特に帶電能、感度に及ぼす影響を明らかにした。

また、感光体は複写機が市場において様々な環境のもとで使用されること、複写機の繰り返し使用により機内温度が高くなることなどから、感光体を安定して使用するためには、感光体の電子写真特性が環境温度に依存しないことが好ましい。そこで今回は特に、
 ②感光体電子写真特性の温度依存性に着目し、その顔料添加量依存性も研究した。

2. 実験

2.1 感光体の作成

本研究では、図2に構造を示した *N,N'*-bis(3,5-dimethylphenyl)-3,4:9,10-perylene bis(carboximido)(以下、ペリレン顔料と略す。)のうち、図3に示すX線回折パターンを有する α 型結晶の顔料を電荷発生材料として使用した。

感光体試料は以下の要領により作成した。図4-aに構造を示した poly(4,4'-cyclohexylidenediphenylcarbonate) (以下、ポリカーボネート樹脂と略す。三菱ガス化学製) を結着樹脂として、図4-bの構造を有する 9-isopropyl-9H-carbazole-3-carbaldehyde diphenylhydra-

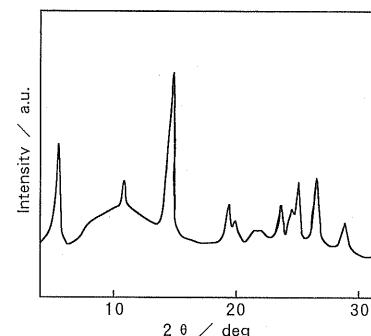


図3 α 型ペリレン顔料のX線回折パターン

Fig. 3 X-ray diffraction pattern of α -form perylene pigment used in monolayered OPC.

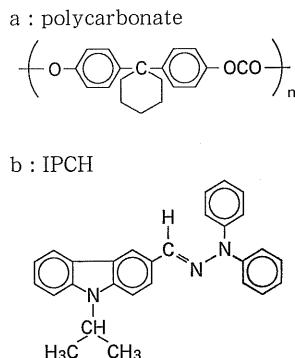


図4 単層 OPC、構成材料の構造式

Fig. 4 Structural formulae of the components monolayered OPC.
 a : poly(4,4'-cyclohexylidenediphenyl carbonate)
 b : 9-isopropyl-9H-carbazole-3-carbaldehyde diphenylhydrazone

zone (以下、IPCHと略す。) の所定量 (樹脂/電荷輸送材料 = 100 : 75, 重量比) をテトラヒドロフラン (以下、THFと略す。) 中に溶解させたものに、THF 溶媒中超音波分散を 2 分間行ったペリレン顔料を、顔料重量が結着樹脂 100 重量に対し 4~25 重量部となるよう添加し、更に超音波分散を 2 分間行い感光体塗布液とした。この感光体塗布液を、表面に 8 μm のアルマイト層を形成したアルミニウム基板上にバーコート法により、乾燥後の感光層膜厚が 21 μm となるよう塗布し、100°C 20 分間の熱処理を行い、1 昼夜暗所に放置後感光体試料とした。なお、IPCH は再結晶により精製したものを使用した。

2.2 感光体特性の評価

感光体特性の評価は、静電複写紙試験装置 (川口電機製、Model EPA-8100) により行った。

感光体帶電能は、 $1.53 \times 10^{-7} \text{ A/cm}^2$ の流れ込み電流を感光体に加えた後の帶電電位で評価した。暗減衰率は感光体を 500 V に帯電させ、5 秒後の電位を測定し、表面電位の保持率により評価した。感光体感度は、感光体の表面電位を 500 V に帯電させたものに、ハロゲンランプを光源として 10 lux の白色光を照射し、表面電位が半減するのに要する露光量 (半減露光量/lux·s) を測定し評価した。

感光体特性の温度依存性の評価は、内作の感光体温度依存性測定装置を用いて、20°C 及び 50°C における感光体帶電能と感度を測定することで行った。方法は、20°C において感光体表面電位が 500 V に帯電する流れ込み電流と等しい大きさの流れ込み電流を、50°C の温度下で感光体に印加したときの感光体表面電位変化量で帶電能

の温度依存性を評価した。感度の温度依存性は 20°C 及び 50°C で上記と同様に測定した半減露光量で評価した。

感光層の体積固有抵抗率は、アルミニウム基板に感光層を塗布し、感光層表面に圧接したアルミニウム電極とアルミニウム基板間に定電圧電源により 100 V の電位差を与えたとき感光層に流れる電流値を測定することにより求めた。

2.3 過渡光電流の測定

感光体の過渡光電流は、通常の Time of Flight 法により測定した。試料はアルミニウム基板上に乾燥後膜厚が 5 μm になるよう塗布作製した感光層に、半透明金電極を蒸着したサンドイッチセル構造のものを使用した。測定に使用した感光層試料は、IPCH をポリカーボネート樹脂中に 75/100 の重量比で分子分散したものと、ペリレン顔料、IPCH 及びポリカーボネート樹脂を重量比 8/75/100 で、先に示した感光体と同様の方法で作製したもの 2 種を用いた。なお測定は、金電極側を外部電源により 300 V 印加し、窒素レーザーを光源に用いて行った。

2.4 イオン化ボテンシャルの測定

CGM 及び CTM のイオン化ボテンシャルは、大気下光電子分析装置 (表面分析装置 AC-1M, 理研計器製) を用い測定した。

3. 結果と考察

3.1 帯電性

CGM であるペリレン顔料の添加量を変化させることによる感光体帶電能変化の測定結果を図 5 に示した。添

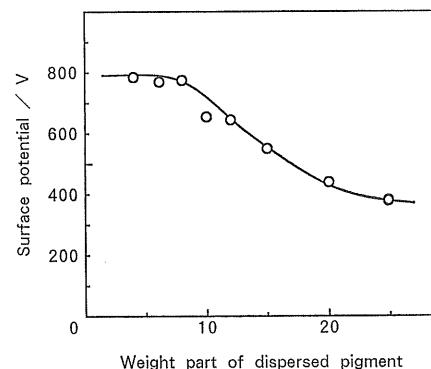


図5 単層 OPC、帶電能の顔料添加量依存性

Fig. 5 Acceptance potential of monolayered OPC under $0.153 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ plate current. Weight part of perylene pigment dispersed in the hole transport matrix is changed from 4 to 25. The hole transport matrix is composed of 75 weight part of IPCH and 100 weight part of polycarbonate.

加量が 10 重量部以下であるときは、帯電能に大きな変化は認められないのに對し、8 重量部以上では顔料の添加量の増加にともない、帯電能が大きく低下することが明らかとなった。

この現象は、ペリレン顔料粒子の体積固有抵抗が樹脂、CTM に比べ比較的小さいこと、単層感光体の構造的特徴として表面に顔料が露出していること等に起因すると考えられる。

感光体中に存在するペリレン顔料量の増加は、感光層の体積固有抵抗の変化に反映される。単層感光体の体積固有抵抗値の顔料添加量依存性を測定した結果を図 6 に示した。感光層の体積固有抵抗値は、顔料添加量 4~15 重量部の範囲では大きな変化を示さないが、添加量 15 重量部を変曲点として体積抵抗値は明瞭に低下する。この変化は、絶縁性樹脂に導電性物質を添加した際に、体積固有抵抗が percolation threshold 型変曲点を示す現象に類似している⁹⁾。顔料は比較的低抵抗な物質であるため、結着樹脂に顔料を添加して作製した感光体では、添加量が増加するに従い顔料間の接触確率も増し、添加量があるしきい値を超えた場合、体積固有抵抗値が極端な低下を示はじめ、それに伴い感光体としての帯電能も低下するものと考えられる。従って、単層感光体の帯電能を大きく設計するためには、顔料添加量は、感光層の体積固有抵抗が percolation threshold 型類似の変曲点を示す添加量 15 重量部以下で設計すべきであると考えられる。

また、感光体中の顔料添加量が増加するに従い、表面

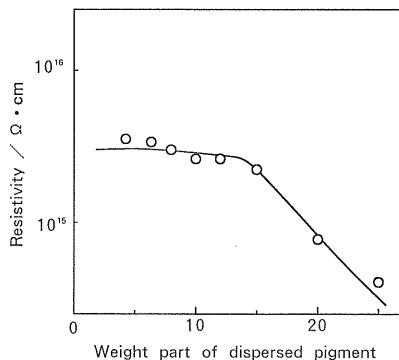


図 6 単層 OPC 膜、体積固有抵抗値の顔料添加量依存性

Fig. 6 Dependence of resistivity of monolayered OPC ($21 \mu\text{m}$ thick) on the weight part of dispersed perylene pigment (sandwich cell with aluminum electrodes, applied voltage 100 V). Weight part of perylene pigment dispersed in the hole transport matrix is changed from 4 to 25. The hole transport matrix is composed of 75 weight part of IPCH and 100 weight part of polycarbonate.

に露出した顔料が多くなる。表面に露出する顔料が増加するほど感光体表面に印加した静電荷が直接顔料に注入される確率が高くなる。この点からも感光体帯電能低下が誘起されるものと考えられる。

帯電性に対する顔料添加量の影響は感光体の暗減衰率の変化からも確認できる。図 7 からも明らかなように、ペリレン顔料の添加量が増えるに従い、感光体の暗減衰が大きくなっている。漏れ電流量が大きくなることを示している。この結果は、感光体中における顔料の存在量の増加は、帯電性を低下させることに加え、電荷保持率の点からも望ましくない結果を与えることを示している。

次に、感光体帯電能の温度依存性に及ぼすペリレン顔料添加量の影響であるが、図 8 に感光体の使用温度を 20°C から 50°C に変化させた時の表面電位の変化率を示した。顔料添加量が 10 重量部を超えると、温度上昇による表面電位の低下量が大きくなりはじめ、20 重量部を超えるとこの傾向は更に顕著になり、感光体設計上、特に実用特性の設計において留意すべき点であることが明らかとなった。

この結果は、ペリレン顔料のもつサーマルキャリアの、感光体中の移動特性を反映しているものと考えられる。顔料の存在量が増えることで、感光層中に発生したサーマルキャリア移動性が向上し、感光層が低抵抗化している影響で、電荷の保持性が低下していることなどが原因として考えられる。

3.2 感 度

3.2.1 顔料添加量と単層 OPC の電子写真感度

感光層へのペリレン顔料添加量を種々変化させ、電子

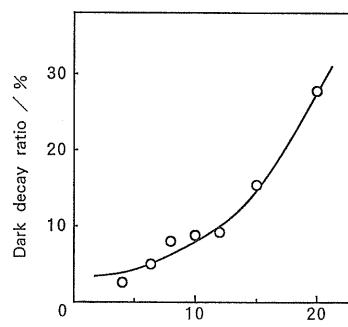


図 7 単層 OPC、暗減衰率の顔料添加量依存性

Fig. 7 Percentage of the increase of dark decay ratio (5s decay, initial surface potential 500 V) of monolayered OPC. Weight part of perylene pigment dispersed in the hole transport matrix is changed from 4 to 20. The hole transport matrix is composed of 75 weight part of IPCH and 100 weight part of polycarbonate.

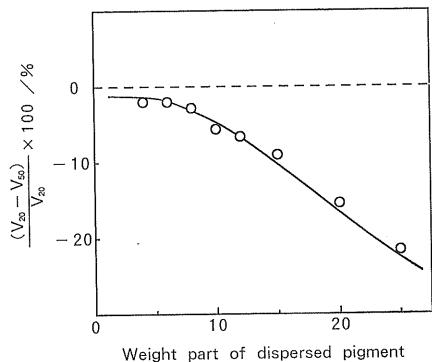


図8 単層 OPC、顔料添加量による帯電能温度依存性変化

Fig. 8 Percentage of the decrease of surface acceptance potential of monolayered OPC when temperature is changed from 20 to 50°C. The same plate current as for attaining 500 V ($= V_{20}$) surface potential at 20°C is applied at 50°C, surface potential (V_{50}) is measured, and $(V_{20} - V_{50}) / V_{20} \times 100$ is calculated. Weight part of dispersed perylene pigment in the hole transport matrix is changed from 4 to 25. The hole transport matrix is composed of 75 weight part of IPCH and 100 weight part of polycarbonate.

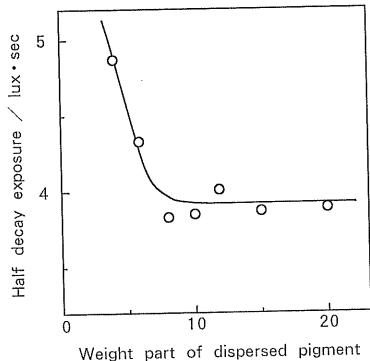


図9 単層 OPC、光感度の顔料添加量依存性

Fig. 9 Dependence of photosensitivity of monolayered OPC on the weight part of dispersed perylene pigment. Weight part of perylene pigment dispersed in the hole transport matrix is changed from 4 to 20. The hole transport matrix is composed of 75 weight part of IPCH and 100 weight part of polycarbonate.

写真感度を測定した結果を図9に示した。顔料添加量の増大に伴い感度の向上傾向が認められるが、その効果は、添加量8重量部付近で飽和し、それ以上の顔料添加量の増大は感度向上にはほとんど寄与していない。

ペリレン顔料添加量の増大が、単純に感度の向上に結びつかない事実は、単層感光体中の顔料の存在が、感度の向上に対し正負二面性を有するためと考えられる。

单層感光体の感度を支配する主な因子としては、①電荷発生特性、②電子輸送特性^{10,11)}、③ホール輸送特性などが考えられる。单層感光体では、同一層中に CGM と CTM が共存している。この構造的特徴が、感度を支配するこれらの3因子にどのように影響するのかを考察することで、実験事実を以下のように説明することができるであろう。

单層感光体中、電荷発生材料であるペリレン顔料の量を増加すると、好ましい効果としては、①発生電荷数の増大、②電子輸送効率の向上が起こる。すなわち、①発生電荷数の増大は、吸収光子数の増加に伴うもので、当然感度向上に寄与すると考えられる。次に②の点についてであるが、单層感光体では、感光層内で発生した電子キャリアが感光体表面まで到達できることが感度発現のための必要条件となる。单層感光体の電子輸送特性は、ペリレン顔料の添加量を増加することで向上することから、感度の向上を助けることになると考えられる^{11,12)}。また、ペリレン顔料の増加は、感光層の吸光度を増加させ、その結果、キャリア発生サイトがより感光層表面近傍に局在化することで、感度発現のために必要な電子移動距離を実質的に短縮する効果がもたらされる。従って、電子輸送特性の向上に加えて、この点からも感度の向上に寄与するものと考えられる。

これらの好ましい効果がペリレン顔料の増加によりもたらされる反面、感光体中に電荷発生顔料が多く存在することは、③ホール輸送の効率を低下させる因子になると考えられる。

複数の材料により構成される OPC では、そのホール輸送特性は、④各構成材料のイオン化ポテンシャルや、⑤材料中の不純物、構成材料の接合界面などが原因となって生じるトラップ準位などにより影響を受ける。

まず、④イオン化ポテンシャルの影響を考えてみると、CTM 中にイオン化ポテンシャルがより小さい CGM が存在した場合、CGM が CTM 中のホールトラップとして作用することが推測される。感光層中にホールトラップが発生すると電荷輸送効率は低下すると考えられ、当然感度を低下させる要因となりうる。この点について、CGM としてペリレン顔料を、CTM として IPCH を用いた单層感光体への影響を考えてみると、ペリレン顔料及び IPCH のイオン化ポテンシャルは各々 5.65 eV, 5.59 eV であり、このような関係であればペリレン顔料は IPCH 中でホールトラップとしては作用しない。次に、⑤材料中の不純物、構成材料の接合界面などが原因となって生じるトラップ準位の影響を考えてみる。CTM として用いられる化合物は、一般的には低分子化合物であり、比較的容易に精製が可能である。OPC 用 CTM

として使用する際には、十分に精製されたもの（本研究においては純度 99.9% 以上）を使用するので、CTM に含まれる不純物がホールトラップになることはあまり考えられない。これに対して、CGM として用いる有機顔料は、有機溶媒に対する溶解性が低く、CTM に比較して精製が一般的に困難であるため、合成途上における不純物の影響を受けやすい。それに加え、顔料粒子は分子の凝集体であるため、分子の重なり、粒子同士の接合界面などの多くの構造的要因が、顔料としての電気的性質に影響を及ぼすと考えられている。OPC の代表的 CGM にフタロシアニン顔料があるが、フタロシアニンを用いた単層感光体のホール輸送特性の研究結果として、顔料中の粒子接合界面及び顔料に含まれる不純物の存在がトラップ準位を形成したホール輸送効率を低下させることが報告されている^{12,13}。ペリレン顔料に関してもフタロシアニン顔料で確認されているのと同様のホールトラップ準位の形成が推測される。従って、IPCH 中にペリレン顔料を添加することは、ペリレン顔料が併せ持つトラップ準位をも与えることとなり、感度低下の原因になると考えられる。

以上の考察に基づき、IPCH にペリレン顔料を添加することがホール輸送性能の低下を招くことを、TOF 法による過渡光電流測定により確認した。光電流の測定結果を log-log プロットしたものを図 10 に示した。図 10-a から明らかなように、電荷輸送材料として使用している IPCH の樹脂分散膜の過渡光電流波形は、本研究の測定条件下では、10 μs 付近にショルダを示す。しかし、ペリレン顔料と IPCH を共分散した膜の光電流波形（図 10-b）には明確なショルダは認められなくなっている。これらの光電流波形の比較から、IPCH 中にペリレン顔料が存在することで、IPCH のホール輸送系にトラップが形成されたと予測できる。

この結果から、ペリレン顔料の添加量が増加するに従い、感光体のホール輸送特性は低下するものと予測できる。つまり、顔料添加量の増加は、ホール輸送特性面からは、単層感光体の感度向上にとって好ましくないものと考えられる。

以上、単層感光体の感度と電荷発生顔料の添加量の関係を①電荷発生特性、②電子輸送特性、③ホール輸送特性などの感度を支配する主な 3 因子から考察した結果をまとめると、顔料添加量を増加させることが単純に感度の向上につながらず、添加量 8 重量部程度のところで感度増加の飽和点が存在する実験事実が、次のように説明できると考えられる。顔料添加量が比較的少ないときでは、添加量増加に伴う電荷発生、電子輸送効率の向上がホール輸送特性効率低下効果に比べ顕著であるため、そ

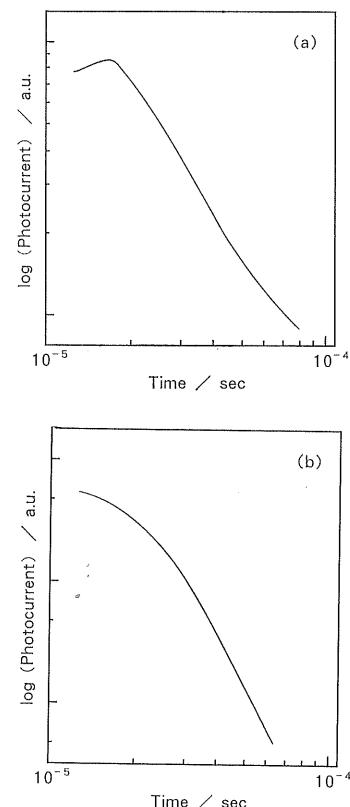


図 10 ペリレン顔料共分散による IPCH 樹脂分散膜の TOF 波形変化

Fig. 10 Transient photocurrent curves of (a) a film of molecularly dispersed IPCH (75 wt.) in polycarbonate (100 wt.), and (b) a standard film of Fig. 1 containing 8/75/100 weight parts of perylene pigment, IPCH and polycarbonate. Thickness of the photoconductive film 5 μm with evaporated semitransparent gold electrode and aluminum plate. N₂ laser is used for excitation with the applied potential of 300 V.

の総合として感光体感度を向上させる。しかし、顔料添加量があるしきい値を越えた場合、一本研究結果では約 8 重量部であるが一電荷発生、電子輸送効率の向上傾向以上にホール輸送特性の低下効果が大きくなり、増感効果を打ち消すこととなる。つまり、単層感光体における顔料添加量が感度に及ぼす影響は、増感因子と減感因子のバランスにより変化するものと考えられる。

3.2.2 顔料添加量と感度の温度依存性

図 11 に単層 OPC の 20°C と 50°C における感度を比較し評価した結果を示した。結果から明らかなように、感度の温度依存性に対する顔料添加量の影響には、変化率としては特に明確な傾向は認められず、ほぼ一定の値を示した。この結果は、先に示した感度を支配するプラ

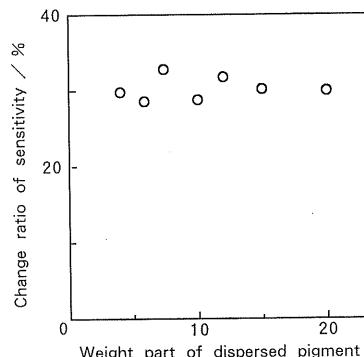


図 11 顔料添加量による光感度の温度依存性変化

Fig. 11 Change ratio of photosensitivity of the monolayered OPC when temperature is changed from 20 to 50°C. Weight part of perylene pigment dispersed in the hole transport matrices changed from 4 to 20. The hole transport matrix is composed of 75 weight part of IPCH and 100 weight part of polycarbonate.

ス因子(電荷発生数、電子移動特性)、マイナス因子(ホール輸送特性)のうち、特異的な温度依存性を示すものが無いことを示すものと考えられる。

4. ま と め

単層有機感光体の帶電能、感度に対する電荷発生顔料の添加量影響を研究した結果、以下の2点が明らかになった。

- ① 単層感光体の帶電能は、顔料添加量が10重量部を越えると顕著な低下傾向を示す。また、帶電能の温度依存性は顔料添加量の増加に伴い温度上昇による低下率が大きくなる傾向を示す。
- ② 単層感光体の感度は、顔料添加量増加に伴い大きくなるが、添加量8重量部付近から増感傾向は飽和する。この現象は、単層感光体では、顔料添加量の増加が、電

荷発生量の増加、電子輸送特性の向上によると考えられる増感作用と、ホール輸送特性の低下とともに減感作用の二面性を有し、これら因子の相互関係により感度が決定されるためと考えられる。

ペリレン顔料をCGMとして、帶電能、感度が大きな正帯電型単層有機感光体の設計を行うには、上記①、②の結果を考慮し、顔料添加量の最適化を行うことが重要であると考えられる。

参 考 文 献

- 1) 山崎憲明：静電気学会誌，12 (1988) 418
- 2) K. Yamamoto, R. Igarashi and I. Ojima : *The Second International Congress on Advances in Non-impact Printing Technologies, Advance Printing of Paper Summaries*, p.115, SPSE (1986)
- 3) グェン・チャン・ケー、相沢政男：日本化学会誌，1986 393
- 4) I. Ogawa, K. Mito and S. Otsuka : *Japan Hardcopy '88 Advance Printing of Paper Summaries*, p.66, Soc. Electrophotography Jpn. Tokyo (1988)
- 5) T. Nakazawa, N. Muto and M. Tsutsumi : ibid., p.70
- 6) 中谷 要、吉田武史、花谷靖之、池田利光：電子写真学会第64回研究討論会, p.54, 電子写真学会 (1989)
- 7) 佐藤徹哉、繩間潤一、新ヶ江龍一、九門 明、久田 均、村上嘉信：Japan Hardcopy '91 論文集, p.185, 電子写真学会 (1991)
- 8) 中沢 享、武藤成昭、水田泰史、川原在彦、宮本栄一、堤 真洋、池田利光、永橋啓一：日本化学会誌，1992, 1007
- 9) 住田雅夫：静電気学会誌，16 (1992) 107
- 10) 川原在彦、水田泰史、宮本栄一、武藤成昭、中沢 享：第52回応用物理学会学術講演会予稿集 (No. 3), p. 1077, 応用物理学会 (1991)
- 11) 川原在彦、水田泰史、宮本栄一、武藤成昭、中沢 享：第53回応用物理学会学術講演会予稿集 (No. 3), p. 1041, 応用物理学会 (1992)
- 12) H. Scher and E.W. Montroll : *Physical Review, B*, 12 (1975) 2455
- 13) 北村孝司、小門 宏：電子写真学会誌，20 (1982) 60