

1

色の科学入門— 色の見えかた・使いかた

- 1 | 色はなぜ見える
- 2 | 色を数値化する，色を測定する
- 3 | 顔料の混色，調色の科学
- 4 | 商品設計における色彩効果

- Column 色彩の JIS
- Column 色票を使って色を表示する方法
- Column 新しい色差式 CIEDE2000

1 色はなぜ見える

■キーワード：物体色の三要素，光の正体，光電効果，光の波長とエネルギー，光の吸収，電子遷移

■ 物体色の三要素のはなし

物体に色がついて見えるのは何故なのでしょう。そもそも，色とは何なのでしょう。まずは，色が存在するための条件について考えてみます。ただし，ここで扱う色は物理的な現象としての色に限定します。

まっ暗闇では色は見えませんが，光が介在していることは直感的にわかります。色が存在するための条件としてのその1は「光」です。「光がなければ色はない」ということです。そして，「物体もなければ色もない」ので，色が存在するための条件その2は「物体」です。もう1つ，条件があります。「目」です。いま，前提にしているのは物理的な現象としての「色」ですから，心の眼ではなく，顔にある2つの目です。厳密にいうと目と脳の働きによる「視覚」です。さて，これで色が存在するための3つの条件がそろいました。光(光源)，物体，目(眼，視覚)の3つです。これらを物体色の三要素といいます。

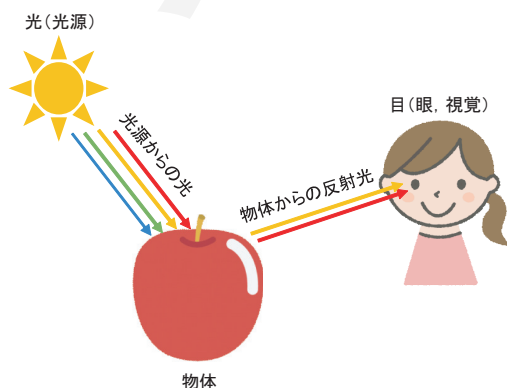


図1 物体色の三要素

■ 光の正体（光はエネルギー）

光→物体→目（視覚）という要素のつながりにおいて、最初の要素である光の正体に迫ります。ここで登場していただく科学者は皆さんがよくご存知のニュートンです。ニュートンは、万有引力の発見で有名ですが、実は光を科学的なアプローチで解明した先駆的な学者でもあります。ニュートンは太陽光（白色光）と白いスクリーンの上にプリズムを置くと、スクリーン上に赤橙黄緑青藍紫（せきとうおうりょくせいらんし）と並んだ色の帯（単色スペクトル）が現れることを実験で確認しています（図2）。このスペクトルは太陽光の中に含まれる可視光線がプリズムで屈折し、その波長の順に並んだものです。波長と色の関係は図3のようになっています。

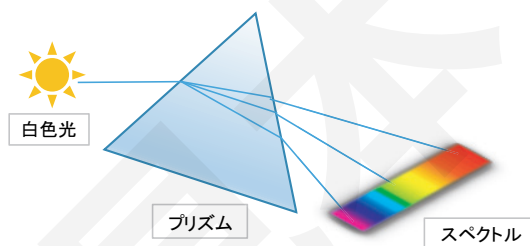


図2 プリズムによる分光

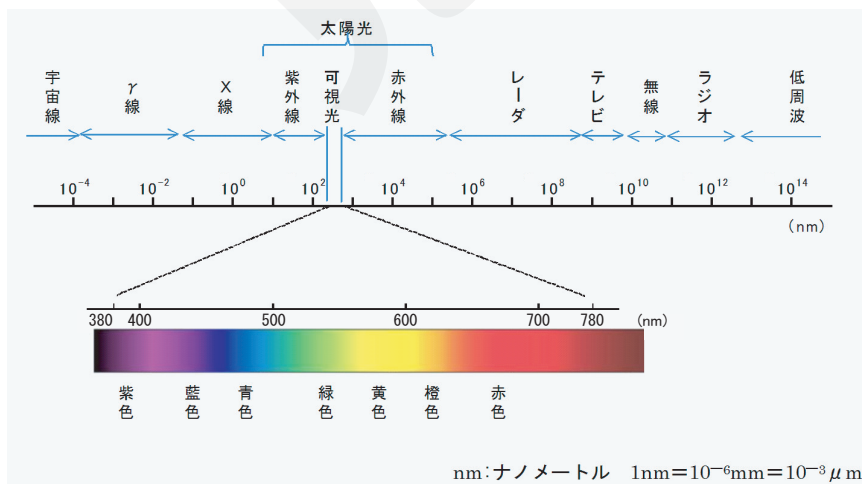


図3 電磁波・光の波長と色

2

顔料総論— 色材としての顔料

- 1 | 顔料とは—顔料と染料の違い
- 2 | 顔料の歴史
- 3 | 顔料の種類と用途
- 4 | 顔料の発色機構
- 5 | 顔料が色におよぼす粉体としての特性
- 6 | 顔料分散の基本的な考えかた
- 7 | 顔料の安全性と法規制
- 8 | 顔料の一般的な性能と試験方法

Column カラーインデックスによる顔料の識別

Column 顔料の今昔

1 | 顔料とは— 顔料と染料の違い

■キーワード：色素の分類、染料との違い、色素粒子の分散

■ 染料との違いから顔料を考える

可視光線を選択的に吸収して固有の色を発現する物質を総称して色素といいます。私たちがおもに着色のための材料（色材）として使用する色素の代表例は染料と顔料です。それぞれに、天然物から得られるものと人工的に合成して得られるものがあります（図 1）。さて、染料と顔料の違いは何でしょう。

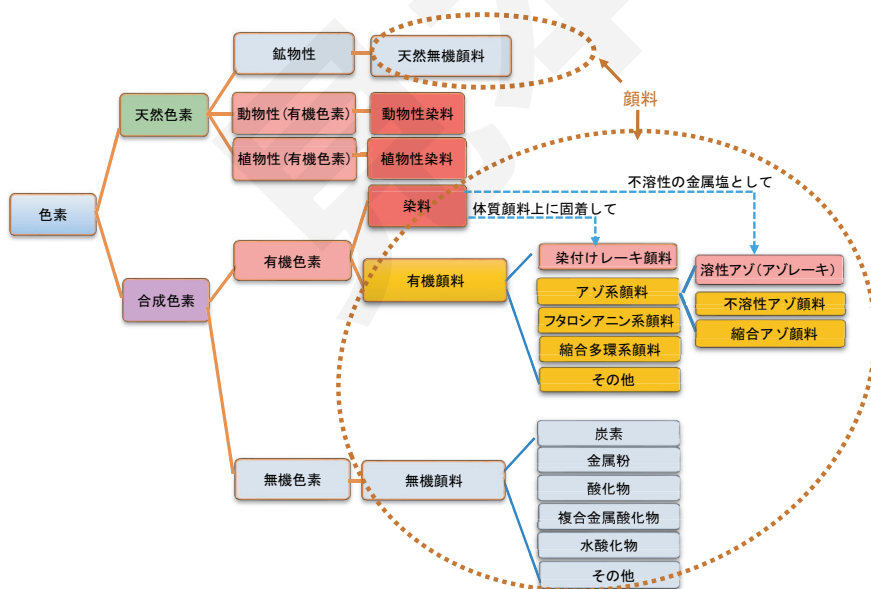


図 1 色素の分類（筆者作成）

染料と顔料－用途の違い？

一般的には「繊維や紙の染色に使用される色素が染料で、塗料やプラスチック着色などに用いられるのが顔料」といわれていますが、果たして、用途による明確な区別は可能でしょうか。繊維の着色では染料を使用する方法（染色）が一般的ですが、樹脂捺染や原液着色という顔料を使う着色方法もあります（第3章9, 10を参照）。プラスチックの場合も顔料による着色が一般的ですが、染料も使える例（PMMA, PS, PC, PET, 硬質PVCなど）があります。このように、用途による区別は十分ではありません。

一部のプラスチックに染料が使えることの理由を説明します¹⁾。プラスチックの高分子（ポリマー）の構造には、高分子が規則正しく密に並んでいる結晶部分と不定形の非晶部分があります（図2）。プラスチックの分子はある温度以上になると運動（ブラウン運動）を始めますが、非晶部分の分子が運動を始める温度をガラス転移温度（ T_g ）といい、結晶部分の分子が運動を始める温度（融点 T_m ）とは区別されます（ $T_g < T_m$ ）（表1）。

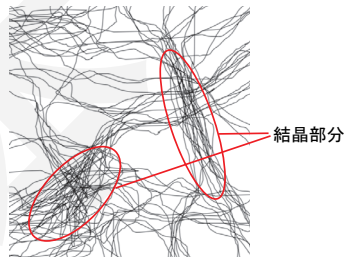


図2 高分子の結晶部分
（イメージ図）

表1 おもなプラスチックのガラス転移温度と融点¹⁾

	プラスチック名	略号	ガラス転移温度 T_g (°C)	融点 T_m (°C)
結晶性	低密度ポリエチレン	LDPE	-30, -45, -125	110
	高密度ポリエチレン	HDPE	-66, -85	130
	ポリプロピレン(アイソタクチック)	PP	-10	160~170
	ポリプロピレン(ランダム)	PP	-18, -20	150~160
	ポリアミド ナイロン6	PA6	50	220
	ポリアミド ナイロン66	PA66	50	260
	ポリエチレンテレフタレート	PET	69	256
	ポリブチレンテレフタレート	PBT	22	227
非晶性	ポリ塩化ビニル	PVC	78	180
	ポリスチレン	PS	90	230
	ポリカーボネート	PC	130~150	225
	エチレン-酢酸ビニル共重合体	EVA	69	65~90

プラスチックによっては T_g が常温域あるいは常温以下という場合もあり、そのような場合は、プラスチックの一般的な使用温度においても非結晶部分の

3

顔料はどのように使われているか

- 1 | 化粧品
- 2 | 画材（油絵具, 水彩絵具, 岩絵具, パステル, クレヨン）
- 3 | 文具・筆記具
- 4 | インクジェット印刷
- 5 | 印刷インキ
- 6 | 塗料
- 7 | プラスチック
- 8 | ゴム・エラストマー
- 9 | 繊維の着色(1)捺染
- 10 | 繊維の着色(2)原液着色法
- 11 | 顔料の機能的な使われかた(1)機能性色素
- 12 | 顔料の機能的な使われかた(2)遮熱(近赤外反射)顔料
- 13 | 顔料の機能的な使われかた(3)酸化チタンの光触媒機能
- 14 | 顔料を効果的に使うために(1)顔料の分散加工機械
- 15 | 顔料を効果的に使うために(2)湿潤・分散剤の作用機構と選択

Column 2.5D プリント・3D プリントの世界

Column 塗装技術の進歩と自動車塗膜の意匠性

Column カラータイヤの可能性

1 | 化粧品

■キーワード：化粧品，薬機法，粒子径，形状，屈折率，パール顔料，機能性顔料，複合化，酸化亜鉛蛍光体，高アスペクト比合成マイカ，フォトクロミック酸化チタン，六方晶窒化ホウ素

■ メーキャップ化粧品の歴史

人間の歴史において古代よりメーキャップ化粧がなされていました。呪術的な意味合いや権威の象徴の要素もありましたが，より魅力的に見せるための化粧の歴史は長いのです。顔を白く，唇は赤く，眉は黒く着色されました。素材として白は塩基性炭酸鉛やタルクなどの鉱物，赤はベンガラ，ベニバナ（紅藍），^{えんじ}臙脂，などの鉱物や植物，昆虫，黒は木炭，コール，鉄タンニンなどの天然由来のものが使われていました。時が経ち素材は変わっても顔に化粧料を塗布するといった行為は基本的には変わっていません。しかし，その機能は素材の進歩，製造方法の進歩とともに確実に進化しています。

■ メーキャップ化粧品の組成と使用される顔料²⁾

① メーキャップ化粧品の組成

メーキャップ化粧品は基本的には粉末，油分，保湿剤，水によって構成されています。その中でも粉末は多量に使われていて，とくにパウダリーファンデーションやおしろいには90%を超える粉末が使用されています。そのため，仕上がり感や使用感には粉末の物性の寄与率が高いのです。化粧品技術者はこういう観点から粉末素材を吟味

表1 メーキャップ化粧品の組成

		粉末	油分	保湿剤	水
おしろい		95	5	0	0
パウダリーファンデーション		90	10	0	0
油性ファンデーション		50	50	0	0
乳化ファンデーション		20	20	10	50
サンスクリーン		20 ↓	45	5	30
口紅		5	95	0	0

しながら処方を組み立てていきます。

② 化粧品に使われる顔料

化粧品で使われる顔料は天然の粘土鉱物、合成の無機顔料、高分子粉末など塗料やインキ、紙やゴムといった産業で使われているものと共通するものが多いです。しかし、化粧品は常に皮膚上に塗布されているので安全性が重視されます。さまざまな安全性確認を経て必要な規格を取り決め使用が決定されます。

表2 化粧品で使われる顔料

分類	原料	配合目的
体質顔料	粘土鉱物 タルク マイカ セリサイト カオリン ベントナイト	のび 透明感 成型性
	無機粉末 炭酸カルシウム シリカ、合成マイカ ケイ酸アルミニウム 硫酸バリウム 窒化ホウ素 アルミナ	
	有機粉末 ナイロン ポリエチレン、テフロン セルロース PMMA、ウレタン シリコーンレジン・ゴム 金属石鹸	
白色顔料	超微粒子酸化チタン・酸化亜鉛	紫外線防御
着色顔料	無機 酸化チタン 酸化亜鉛	カバー効果
	ベンガラ 黄酸化鉄 黒酸化鉄 焼結顔料 群青 紺青	着色
	有機 赤色202、226 黄401 カーボンブラック	
パール剤	雲母チタン オキシ塩化ビスマス	パール感 肌の美しさ
ラメ剤	アルミ蒸着PET 積層樹脂フィルム	ラメ効果

■ 薬機法と化粧品^{3), 4), 5)}

化粧品は従来「薬事法」とよばれていた法律が、2014年11月に改訂され医薬品、医薬部外品、化粧品、医療機器を定義する「医薬品、医療機器等の品質、有効性及び安全性の確保等に関する法律」（薬機法）により定められています。その前の2001年4月には国際的な規制の整合性をとることを目的に大幅な規制緩和がなされました。それまでは化粧品の原料はすべて旧厚生省に申請し許可を得てはじめて使用できるようになっていましたが、規制緩和後は原料の安全性確保は企業の自己責任であるという考え方になり、基本的には多くの原料が自由に使えるようになりました。それに相まって、配合されるすべての成分を表示することが義務化されました。ただし、化粧品に配合される成分は配合禁止成分リスト（ネガティブリスト）（今までの日本での禁止成分＋

4

顔料はどのように作られているか

- 1 | 二酸化チタン
- 2 | カーボンブラック
- 3 | 酸化鉄系顔料（鉄黒, 黄色酸化鉄, べんがら）
- 4 | 紺 青
- 5 | 群 青
- 6 | 酸化クロム
- 7 | 複合酸化物顔料
- 8 | 体質顔料
- 9 | 金属粉顔料
- 10 | パール光沢顔料
- 11 | 蛍光顔料・蓄光顔料
- 12 | フタロシアニン系顔料
- 13 | 縮合多環系顔料
- 14 | 縮合アゾ顔料
- 15 | 不溶性アゾ顔料
- 16 | 溶性アゾ顔料
- 17 | 染付レーキ顔料

Column アニリンブラック

Column 新しい顔料 YInMn(インミン)ブルー

1 | 二酸化チタン

■キーワード：酸化チタン，結晶形（アナタース，ブルッカイト，ルチル），製造プロセス（硫酸法，塩素法）

■ 酸化チタンの結晶構造

酸化チタン（ TiO_2 , titanium dioxide, 二酸化チタン）は白色顔料の中で最も屈折率が高く，優れた隠蔽力^{いんぺい}，着色力を有し，化学的に安定であることから，「白色顔料の王様」とよばれています。

酸化チタンにはアナタース（Anatase），ブルッカイト（Brookite），ルチル（Rutile）の3種類の結晶形があります。顔料として

工業的に製造されているものはアナタースとルチルであり，両者とも，正方晶系に属しますが，ルチルはアナタースよりも結晶のユニット・セルの原子の配列が緻密です¹⁾。この違いにより，表1に示すような物性に差異がでできます。また，顔料として使用される酸化チタンは，最適な物性を得るために，0.1～0.4 μm 程度の平均粒子径を有しています。

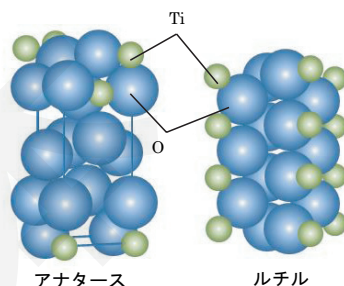


図1 酸化チタンの結晶構造¹⁾

表1 酸化チタンの結晶構造と物性²⁾

物 性	ルチル	アナタース
比 重	4.2	3.9
屈折率	2.71	2.52
硬度（旧モース）	6～7	5.5～6
融 点 / °C	1,858	高温でルチルに転移
相対隠蔽力	125	100
着色力	1,700	1,300
紫外線吸収（360 nm）	90	67
反射率（%）400 nm	47～50	88～90
反射率（%）500 nm	95～96	94～95

■ 酸化チタンの2つの製造プロセス

酸化チタン顔料は現在、硫酸法と塩素法の2種の工業的プロセスによって製造が行われています³⁾。以降、製造プロセスの代表例について述べます。

① 硫酸法

原料鉱石としては、北南米、インド、オーストラリア、マレー、スリランカ、アフリカなどで産出されるイルメナイト (TiO_2 品位 50~60%)、また、イルメナイトを脱鉄、濃縮したチタンスラグ (TiO_2 品位 75~85%) が使用されています。

- 1) 蒸解工程： $\text{FeTiO}_3 + 2\text{H}_2\text{SO}_4 \rightarrow \text{FeSO}_4 + \text{TiOSO}_4 + 2\text{H}_2\text{O}$
- 2) 加水分解工程： $\text{TiOSO}_4 + n\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{TiO}_2 \cdot m\text{H}_2\text{O} \downarrow + \text{H}_2\text{SO}_4$
- 3) 焼成工程： $\text{TiO}_2 \cdot m\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{TiO}_2 + m\text{H}_2\text{O} \uparrow$
- 4) 仕上げ工程

反応性を高めるために粉碎した原料鉱石を硫酸で蒸解し、Ti、Feなどを硫酸塩として水抽出します。全量イルメナイトを使用する場合、不純物である鉄分は硫酸鉄 ($\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$) として晶析分離して取り除きます。

残りの硫酸チタニル溶液をろ過精製した後、酸化チタンの結晶を生成するための核となる物質（結晶核）を添加し、昇温速度を制御しながら熱加水分解を行うと、含水酸化チタンが沈殿します。この加水分解条件は、後の焼成工程で決定される粒子径、粒度分布などに大きく影響します。また、添加する結晶核の種類によって、焼成後の結晶形がルチルであるのかアナタースであるのかを決定します。

生成した含水酸化チタンから硫酸を取り除き、ろ過洗浄してFeやほかの夾^{ぎょう}雑^{ざつ}不純物を除去した後、種々の焼成調整剤を添加し、800~1,000℃で10時間程度焼成すれば酸化チタンの粗顔料が得られます。粗顔料は、ルチルでは0.2~0.4 μm 、アナタースでは0.1~0.2 μm の一次粒子が焼結凝集したものです。

粗顔料に、顔料的性質を付与するため、仕上げが行われます。粗顔料を水に懸濁させてスラリー化し、湿式粉碎、分級により、焼結凝集粒子をほぐし、整粒します。この整粒した粒子の表面に、酸・アルカリの中和反応を利用して、アルミニウム、ケイ素、ジルコニウムなどの含水酸化物をコーティングし、分散性や耐候性などの顔料物性を付与します。コーティング後のスラリーを濾^ろ

顔料一覧表

- (註) 1. C.I. No. の2つ以上の併記は、各化合物の混晶または混合物であることを示します。
2. 化合物名に2種以上の化合物を併記しているものは、各々のケースがあることを意味します。
化合物名に2種以上の化合物を「・」で結んでいるものは、両者の混晶を意味します。
化合物名に2種以上の化合物を「/」で結んでいるものは、両者の混合物を意味します。
3. アスタリスク「*」付きの CAS No. は、この化学物質がある特定の分子式や構造を持った化学物質ではなく組成不明もしくは可変物質、複雑な反応生成物、生物物質などであることを意味します。
4. 染付レーキ、蛍光顔料において、C.I.No. ～ CAS No. の () 付き記載は染料での分類を意味する。
5. 色調見本は実際の顔料の色調を忠実に再現したものではありません。あくまでも参考イメージとしてご覧ください。
6. 色調見本に添えられている文字 M は金属(Metal) 光沢色を、文字 P は真珠(Pearl) 光沢色を、文字 F は蛍光(fluorescence)色を意味します。

一般的な分類	色調	顔料名・一般名・呼称	化合物名・成分	C.I. No.	C.I. Name	既存化学物質番号	CAS No.
二酸化チタン		酸化チタン	二酸化チタン	77891	Pigment White 6	1-558	13463-67-7
炭酸カルシウム、 クレー、タルク		沈降性炭酸カルシウム	炭酸カルシウム	77220	Pigment White 18	1-122	471-34-1
		重質炭酸カルシウム	炭酸カルシウム	77220	Pigment White 18	—	471-34-1

一般的な分類	色調	顔料名・一般名・呼称	化合物名・成分	C.I. No.	C.I. Name	既存化学物質番号	CAS No.
炭酸カルシウム、クレー、タルク		クレー（カオリン）	含水珪酸アルミニウム	77005	Pigment White 19	—	1332-58-7
		タルク	含水珪酸マグネシウム	77718	Pigment White 26	—	14807-96-6
		沈降性硫酸バリウム	硫酸バリウム	77120	Pigment White 21	1-89	7727-43-7
		バライト粉	硫酸バリウム	77120	Pigment White 22	1-89	7727-43-7
ホワイトカーボン		シリカ粉	含水珪酸	77811	Pigment White 27	1-548	7631-86-9
		珪酸カルシウム	含水珪酸カルシウム	77230	Pigment White 28	1-194	1344-95-2
		珪酸アルミニウム	含水珪酸アルミニウム	77005	Pigment White 19	1-26	12141-46-7
パール系顔料		オキシ塩化ビスマス	オキシ塩化ビスマス	77163	Pigment White 14	1-95	7787-59-9
		塩基性炭酸鉛（鉛白）	塩基性炭酸鉛	77597	Pigment White 1	1-148	1319-46-6
		酸化チタン被覆雲母	二酸化チタン／アルミノ珪酸塩	77019／77891	Pigment White 6／ Pigment White 20	1-558	12001-26-2 13463-67-7
金属粉顔料		アルミニウム粉	アルミニウム	77000	Pigment Metal 1	—	7429-90-5
		銅粉	銅	77400	Pigment Metal 2	—	7440-50-8
		真鍮粉	銅・亜鉛	—	—	—	7440-50-8 7440-66-6

一般的な分類	色調	顔料名・一般名・呼称	化合物名・成分	C.I. No.	C.I. Name	既存化学物質番号	CAS No.
金属粉顔料		金粉	金	77480	Pigment Metal 3	—	7440-57-5
		鉛粉	鉛	77575	Pigment Metal 4	—	7439-92-1
		錫粉	錫	77860	Pigment Metal 5	—	7440-31-5
		亜鉛粉	亜鉛	77945	Pigment Metal 6	—	7440-66-6
		ニッケル粉	ニッケル	—	—	—	7440-02-0
酸化亜鉛		ステンレス粉	鉄・クロム・ニッケル・モリブデン・マンガン・珪素	—	—	—	—
		酸化亜鉛	酸化亜鉛	77947	Pigment White 4	1-561	1314-13-2
		硫化亜鉛	硫化亜鉛	77975	Pigment White 7	1-572	1314-98-3
		リトポン	硫化亜鉛／硫酸バリウム	77115	Pigment White 5	1-572 1-89	1314-98-3 7727-43-7
		カドミウムイエロー（緑味）	硫化カドミウム・硫化亜鉛	77205	Pigment Yellow 35	5-5162	12442-27-2
カドミウム系顔料		カドミウムリトポンイエロー（緑味）	硫化カドミウム・硫化亜鉛／硫酸バリウム	77205:1	Pigment Yellow 35:1	5-5162 1-89	12442-27-2 7727-43-7
		カドミウムイエロー	硫化カドミウム	77199	Pigment Yellow 37	5-5162	1306-23-6
		カドミウムリトポンイエロー	硫化カドミウム／硫酸バリウム	77199:1	Pigment Yellow 37:1	5-5162 1-89	1306-23-6 7727-43-7
							