

資料

CIE 白色度式成立の経過について

内田 洋子・福田 保

A history of establishing the CIE
whiteness formula

Hiroko Uchida, Tamotu Hukuda

Otsuma Women's University

Abstract

In 1986 the CIE whiteness formula was recommended for a way of the evaluation by CIE. A history of establishing the CIE whiteness formula was described.

要旨

1986年、CIEは白色度を評価する方法としてCIE白色度式を勧告した。そこでそのCIE白色度式の成立した経過について記述したい。

1. はじめに

白色物質の白さを数量的に評価しようとする試みは古くから行われてきたが、蛍光増白剤の普及にともなって白さの評価は一段と困難性を増してきた。しかし白色度を何らかの数値で評価したいという各界からの要望には根強いものがあり、CIE測色技術委員会は白色度の順位づけや数量的表現の可能性・CIEとして推奨できる白色度式を見つけることを目的として白色度小委員会(Whiteness Subcommittee 1967~1975年)を組織して白色度の共同研究を行い、その後は白色度研究班(WTF Whiteness Task Force)が研究を進め、1986年には正式にCIE白色度式を勧告した。この方式はわが国でもJIS化が進められているので、CIE白色度式が成立した経緯を記述し、参考に供したい。

2. CIE測色技術委員会の活動

1967年、CIE Washington大会の時に測色委員会(E-1.3.1)の予備会議で、R.G.W. Huntが白色度小委員会の設立を提案し、1969年にStockholmの測色技術委員会(T.C.1.3)でその小委員会(以下委員会という)が発足した。メンバーはA. Berger(ドイツ), F. Grum(アメリカ), R. S. Hunter(アメリカ), P. Stensby(アメリカ), Å. S. Stenius(議長, スウェーデン), F. J. J. Clarke(イギリス), R. Sève(フランス), N. Justova(ソビエト), E. Ganz(スイス), T. 福田

(日本)で、1971年以降はClarkeからD.J. McCone11にかわり、R.D. Lozano(アルゼンチン)が新たに加わった。また同年B. Berglund(スウェーデン)とHunterが、1973年からはT. 印東(日本)がコンサルタントを務めた。

2.1. 委員会の経過

委員会は公式に6回開催し、それ以外にも非公式な会議を開いた。

初回は1969年に、Stockholmで行った。この委員会では白色度の視感判定を実施し、測色器で試料を測色してさまざまな白色度式に対し白色度評価を行うことを決定した。当初、実験に用いる試料は12個としたが、僅かの緑味や赤味を好む被験者が存在するので、試料の色度座標が白色点を通る黄-青軸に沿う試料だけでなく緑味や赤味を有する試料も含め、試料数を拡大することを要請した。

1971年、2回目の会議はBarcelonaで行った。共同実験の内容について次のように詳しく提案した。

(i)試料:材質について多々議論があったが、①同一材質であること ②白色空間内のどの区域でも染色可能なこと ③繊維でなく、しかもマットであること ④沢山の試料を作れること ⑤廉価であること、などを考慮して紙を用いることに決まった。大きさは7×10cmの6重にしたものとし、蛍光剤をパルプに処理した無光沢なもので、カレンダー処理のみを施すことになった。試料は

Berger が用意することを申し出た。試料数は用いる色差ステップにより変わり、もし識別いきの約2倍の色差ステップで試料を作るとすると約1000~1500個の膨大な試料数となる。そこで Berger は①無彩点 D₆₅を含む白色空間内の黄色域試料群、②無彩点を含む僅かに青味をもつ試料群、③白色空間として可能な限り青味方向の試料群、の3マイクロスペースに分類し、各マイクロスペースをそれぞれ21個、400セットを作成することを約束した。

(ii)被験者：白色度評価の経験者及び未経験者の両者を対象とする。経験者としては塗料・洗剤・紙・繊維・プラスチック業界などに携わる専門家、未経験者は主婦・会社員などとする。但し被験者数は各国最低100人で、国家・人種間の相違も調査できるように計った。各国に配布する試料の組数は以下の通りに決った。

アメリカ35組、イギリス35組、スウェーデン35組、ソビエト45組、オランダ20組、日本35組、スイス35組、ドイツ35組

(iii)試料の分光放射輝度率の測定：光源はフィルタを掛けないキセノン（短アーク）放電ランプを使用する。照明受光の条件は 0/d または d/0 で共に正反射成分も含んで測定する。測色計算は標準の光 D₆₅に対して CIE 1964補助標準観測者を使用する。また Berger が同一試料の均一性を保つために個々の試料を測定して、カナダ NRC でその絶対値の校正測定をすることに決った。

(iv)判定法：各マイクロスペースごとに一対比較を行う。またマイクロスペース間はサンプリング法を用いて評価し、両結果から全試料の白色度を評価する。

(v)観測条件：光源としては北窓日光または標準の光 D₆₅に近い光源を用いる。背景は波長 350~750nm で非選択的な N7.5~8.5の灰色であることとする。

(vi)評価方法：評価尺度は±1の2段階か±2の5段階で、タイは許さない。

以上が Barcelona における会議で主として決定した。

1972年、3回目の会議は Williamsburg において限られたメンバーだけで行った。そこでは前回決定した試料では大きすぎるとい意見が多数を占めた。さらに研究の方向性を知るために本実験の前に Round Robin Test を行うことを決定した。Round Robin Test の参加国はイギリス・フランス・ドイツ・スウェーデン・スイス・アメリカ・さらに後からアルゼンチンが加わった。Berger¹⁾ が56試料を6セット用意し、そのうち30試料を選び、10試料ずつ3つのマイクロスペースを構成した。試料は7種の染料と5種の蛍光増白剤を用いて染色とし、その大きさは6×9cmである。Fig1は試料の色度点を示したもので、3マイクロスペース（グループA, B, C）はそれぞれ10試あり、各マイクロスペースの試料番号は

グループA：1, 3, 10, 12, 16, 26, 40, 46, 50, 53

グループB：7, 8, 13, 19, 23, 27, 37, 43, 54

グループC：5, 6, 9, 15, 20, 21, 30, 35, 38, 56

である。また（ ）内の値は三刺激中のYをあらわす。

被験者の条件や観測条件などについては前回に決定したことをそのまま踏襲することとし、視感判定は一対比較法のほかに順位法とマグニチュード評価法を加えることにした。但し、一対比較法では試料をランダムに選ぶこととする。また判定結果の分析は一意性・一致性などを調査した後、スケール化・因子分析を行うことに決定した。

一方、Ganz は独自の研究を行い、以下のような発表を行った。Ganz は視感判定による白色度の順位づけが色度図上のある主波長と光源の色度点を結ぶ直線に一致することを発見し、その主波長を次式で表わした。

$$\frac{y(\lambda) - y_w}{x(\lambda) - x_w} = \frac{\sum W_i(x_w - x_i)(y_w - y_i)^2}{\sum W_i(x_w - x_i)^2}$$

ここで x_w, y_w は光源の色度座標、 $x(\lambda), y(\lambda)$ は主波長を示すスペクトル軌跡上の色度座標、 x_i, y_i は試料の色度座標、 W_i は白色度を示す。また好みの色の個人差については直線のスロープを変化させて表わした。これらのことから Ganz は白色度式にふさわしい式として、次の3種の直線タイプの白色度式を研究することを提案した。

$$W_1 = \beta \cdot B + \gamma \cdot G + \alpha \cdot A + K_1$$

$$W_2 = \lambda \cdot L + \nu \cdot b + \mu \cdot a + K_2$$

$$W_3 = \epsilon \cdot Y + \rho \cdot x + \sigma \cdot y + K_3$$

ここで B, G, A は適応するフィルターと次式による三刺激値に関連した光度計の値である。

$$X = f_{xA} \cdot A + f_{xB} \cdot B, \quad Y = G, \quad Z = f_{zB} \cdot B$$

f_{xA}, f_{xB}, f_{z} は照明と用いた標準観測者の函数、 L, a, b は Hunter の L, a, b 座標、 Y, x, y は CIE 表色系における視感反射率 Y と色度座標 x, y である。

翌1973年に4回目の会議を LeverKussen で行い、Round Robin Test の結果を次のように分析した。実験に参加した被験者数は総勢177名で、一対比較についてはサーストンの方法を用いて順位づけを行ったが因子分析も可能であること、また白さの知覚に対する個人差の範囲が見つかり、被験者が赤味好み・緑味好み・青味好み・ニュートラル好みに分類できることが判明した。さらに観察状況について光源を一定にすべきであるという意見が出たが、結論は出なかった。

Ganz^{2),3)} は前回の続きとして、色相の好みの主波長は470nmで、この直線とのずれの角度 ϕ が色相の好みを特性づけ、 $\lambda d = 470\text{nm}$ を色相の好みの基準線とすると、赤味好みは約+90°・緑味好みは約-90°の方向へ角度 ϕ がずれることを報告した。

その他、Round Robin Test 以外の実験が必要であるという提案があった。

同年7月にイギリスの York で5回目の会議があった。ここで Ganz は Round Robin Test のうち136一対比較の結果、色相の好みの角度 ϕ_F は赤味好み $\phi = +67^\circ$ 、緑味好み $\phi = -66^\circ$ 、ニュートラル好み $\phi = 0^\circ$ で

あったことを発表した。また Grum は光源の影響についてマクベス蛍光ランプと昼光下では評価結果が異なることを指摘した。

その他の単独研究の発表の後、今までの経緯を1975年の CIE London 大会で報告することが決定した。

その後、1974年に委員会の議長である Stenius は下記の質問状を Berger, Grum, Lozano, McConnell, Sève, Ganz に送付し、メンバーの見解を得た。

(i)委員会では委員会内で行なってきた実験研究のみを推奨するのか？(数値は人数を示す)

yes 3 no 4

(ii)白色度を研究するにあたり、下記の4項目を推奨するべきかどうか？

a. 白色度の視感判定における実験条件

yes 6 no 1

b. 白色度の計量心理学的評価

yes 5 no 2

c. 白色度の測定器

yes 7 no 0

d. 変数の選択と用い方

yes 7 no 0

(iii)光源は標準の光 D_{65} と一致するものでなければいけないのか？

yes 7 no 0

(iv)標準の光 D_{65} に近似する光源を得るのは困難であるが、使用した光源の特性を明確にする必要はあるか？

yes 6 no 1

(v)照度は定めるべきか？

yes 6 no 1

(vi)その最低限度はどの位か？

1000 lx以上 2 800~1000 lx 1 500 lx 2

(vii)試料の周囲の明度 V の許容範囲を与えるべきか？与えたとしたらどの位がよいか？

yes 6 ($V \approx 8$) no 1

(viii)試料の大きさはどの位がよいか？

10×10cm 1

(ix)白さの評価に対し、計量心理学的スケーリングでなく非計量法を用いてもよいか？

yes 4 no 3

(x)CIE表色系の1931標準観測者と1964補助標準観測者のどちらを用いるべきか？

両方 4 1964補助標準観測者 3

(xi)どのような白色度式と変数が推奨されればよいか？

未定 7

(xii)Round Robin Test の結果に真憑性があるか？

yes 2 no 4

1975年の CIE London 大会で、T.C.1.3 白色度小委員会は6回目の会議を開いた。そこでは次のように委員会の経過報告を行った。⁴⁾ なお () 内は報告者であ

る。

(i)使用した試料と測定値について (Berger)

(ii)一対比較法と順位法による視感判定の結果 (Stenius)⁵⁾

(iii)視感判定の評価 (Ganz)

(iv)白色度の評価 (Grum)

(v)白色度の計量心理学的研究 (Lozano)⁷⁾

(vi)白色度の知覚的評価における方法的研究 (Berglund, Stenius)⁶⁾

(vii)機器の詳細と白色度の測定評価 (Ganz)⁸⁾

(viii)白色度の文献調査 (Sève)

(ix)白色度式と視感判定の相関 (Ganz)¹⁶⁾

(x)将来の活動

などについてそれぞれが発表した後、(i)~(ix)までのレポートは“die Farbe”に公表^{1),5),6),7),16)}することが決定した。

また会議では蛍光試料の白色度評価における視感判定と機器測色の再現性は光源の分光分布に依存し、標準の光 D_{65} に一致する光源で実験を行わないことが白色度評価の不一致の主因であるという意見が多数を支配し、技術進歩に期待がかけられた。

その後、委員会は一応解散することが決定し、白色度式が確定するまで暫定的に白色度研究班(以下WTF)として存続することになった。

2.2 WTFの活動

1977年 Troy で WTF 初の委員会を開き⁹⁾, Brockes が議長に就任した。また将来のプログラムに次の3項目を掲げた。

(i)実験試料の準備

(ii)実験評価の種類

a. 間接法とスケーリング法

b. 直接法

c. 多次元的スケーリング法 (TORSCA)

(iii)白色度式の提案

併せて試料の色度図内での分布配置と判定方法について討議し、最も有用な白色度式を得ることを再確認した。

1978年9月、Brockes は「白色度式の研究に対し提案される第一草案⁹⁾」をWTFメンバーに配布した。その中で白色度式の基本として $BGA, X/X_0 \cdot Y/Y_0 \cdot Z/Z_0, Y_{xy}$ 型の3タイプをあげ、このうち Y_{xy} 型の直線式を推奨することを報告した。

1979年1月、WTFは会議を開き、Brockes が次のような第2草案¹⁰⁾をメンバーに発表した。それは白色度の視感判定を混乱させる大きな要因は①蛍光増白物質のそれぞれ異なる励起を惹き起こす光源の相違、②被験者の個人差・職種差・地域差であることを改めて確認した後、白色度式は色味や蛍光にあまり差がない白色試料に対して、同じ機器で測定を行って白色度を算出した時の比較に用いるべきであるとした。従って色味のある試料

は視感判定の差を導くので、個々の被験者の色相の好みに応じて係数が変えられる白色度式が必要であるとした。そこで白さの範囲を次のように考えた。

$$Y > 70, W > 40, -6 < T < 6$$

ここで Y は視感反射率, W は白色度, T は色味である。また複雑な式ではそれらの変数が正確に評価されないことなども考慮に入れて, Ganz が提案する次式を白色度式に推奨した。

$$W = Y + a(x - x_n) + b(y - y_n)$$

ここで x_n, y_n は標準の光 D_{65} 下の完全拡散反射面の色度座標, a, b の数値は, ニュートラル好みに対しては $a = -800, b = -1700$, 緑味好みに対しては $a = -1700, b = -900$, 赤味好みに対しては $a = 800, b = -3000$ とした。また色味 (ティント T) を表わす量として次式を用いることを提案した。

$$T = -c(x - x_n) + d(y - y_n)$$

ここで c, d の数値は C I E 1931 標準観測者に対しては $c = 1000, d = 700$, C I E 1964 補助標準観測者に対しては $c = 900, d = 800$ とした。

このように白色度式を直線型にするという Brockes の提案に対し, 会議の席上, Grum, Brockes, Ganz が賛成を, また Stenius が反対の意を表明した。

さらに Hunt (当時 T. C. 1.3 委員長) は上記の白色度式の色味 T の範囲を狭くすることを提案した。

2.3 直線型白色度式

1979年, CIE Kyoto 大会では Brockes の代りに Ganz が W T F の報告を行い, なぜ直線式を提案したかについて次のように詳述している。^{11), 12)}

被験者のもつ色相の好みに対応できる白色度式をつくるために, 2つの解決方法を委員会で論じた。1つは個々の被験者の等白色度線を捜して平均等白色度線を見つけること, 2つめは多くの被験者の判定を直接平均してから等白色度線を作成することである。しかし前者は膨大な実験データを必要とするため実際には無理なので, 2つめの方法から得られる平均被験者と最もよく相関する最適変数を求め, そのような変数をもち且つ数学的構造の格好のよい白色度式を提案したい。こうして得られる白色度式は青—黄色方向に散らばる試料に対して高い相関を持つと考えられるが, 残念ながら W T F では十分な実験結果がないので等白色度線の信頼性は低く, 好まれる最高の白の周辺の楕円体を基礎とした平均白色度式を提案することはできなかった。従って十分な実験的背景をもつ楕円体の軸の長さや方向及び最高の白というものを定義することもできない。しかし, もし個々の最適な等白色度線で大変明るく, しかも青を中心とした細い楕円体で青—黄色方向に長軸を持つならば, 直線式の形にすることは可能である。また楕円体を赤—緑方向に変化させることもできる。そこで被験者の結果を平均すると巾広い楕円体となるが, 直線として近似することができ, これが白色度式を直線式として提案できる理由であ

ると Ganz は説明した。なお, 赤・緑味好みに対応する白色度式は二者間の選択として与えられるが, 現実に必要なとされるかどうかは今後の課題であることも付け加えた。

この Ganz の報告に加えて, 上記白色度式と視感判定の相関が $r = 0.8 \sim 0.99$ という非常に高い相関を示した結果があるという報告もあった。¹³⁾

また会議では白色度研究を続行するかどうかについて非公式の投票があり, 賛成15・反対1で続行することが決まった。

1980年, Brockes は上記の白色度式の適用範囲を次のように狭くしたいことをメンバーに報告した。¹³⁾

$$40 < W < 5Y - 280, -3 < T_W < +3$$

2.4 C I E 白色度式の誕生

1981年, AIC Berlin 大会中に関係グループにより論議がかわされ, “白色度の評価”として推奨できる最終報告を W T F 委員会に提出した¹⁴⁾。その内容は, 白色度式 W 及び W_{10} , 色味については T_W 及び $T_{W,10}$ を C I E として勧告する。いずれも標準の光 D_{65} の下で評価する試料の白色度比較に用いることを目的とする。但し, 白色度式は白と呼ばれる試料に対してのみ用い, 色や蛍光の強い試料に対しては不適當である。また試料の測定は同時に且つ同じ機器で行なわなければならない。そして白色度が与える値は絶対値ではなく, 相対値であることを付け加えておく。以下に白色度式を紹介すると,

$$W = Y + 800(x_n - x) + 1700(y_n - y)$$

$$W_{10} = Y_{10} + 800(x_{n,10} - x_{10}) + 1700(y_{n,10} - y_{10})$$

$$T_W = 1000(x_n - x) - 650(y_n - y)$$

$$T_{W,10} = 900(x_{n,10} - x_{10}) - 650(y_{n,10} - y_{10})$$

ここで Y は試料の三刺激値の一つ Y , x, y は試料の色度座標, x_n, y_n は完全拡散反射面の色度座標で C I E 1931 標準観測者に対しては $x_n = 0.3127, y_n = 0.3290$, また Y_{10}, x_{10}, y_{10} は C I E 1964 補助標準観測者に対する同様の値で $x_{n,10} = 0.3138, y_{n,10} = 0.3310$, T_W 及び $T_{W,10}$ はそれぞれ色味を表わす量である。

但し, 次の条項を付記している。

(i) W 及び W_{10} のより高い値, より大きい方が白色度が大きい。 T_W 及び $T_{W,10}$ のより大きい正の値は緑味の強いことを示し, より高い負の値は赤味の強いことを示す。完全拡散反射面に対して W 及び W_{10} は 100 となる。また T_W 及び $T_{W,10}$ は 0 となる。

(ii) 強い色味試料に対して白色度式は用いられない。その範囲は

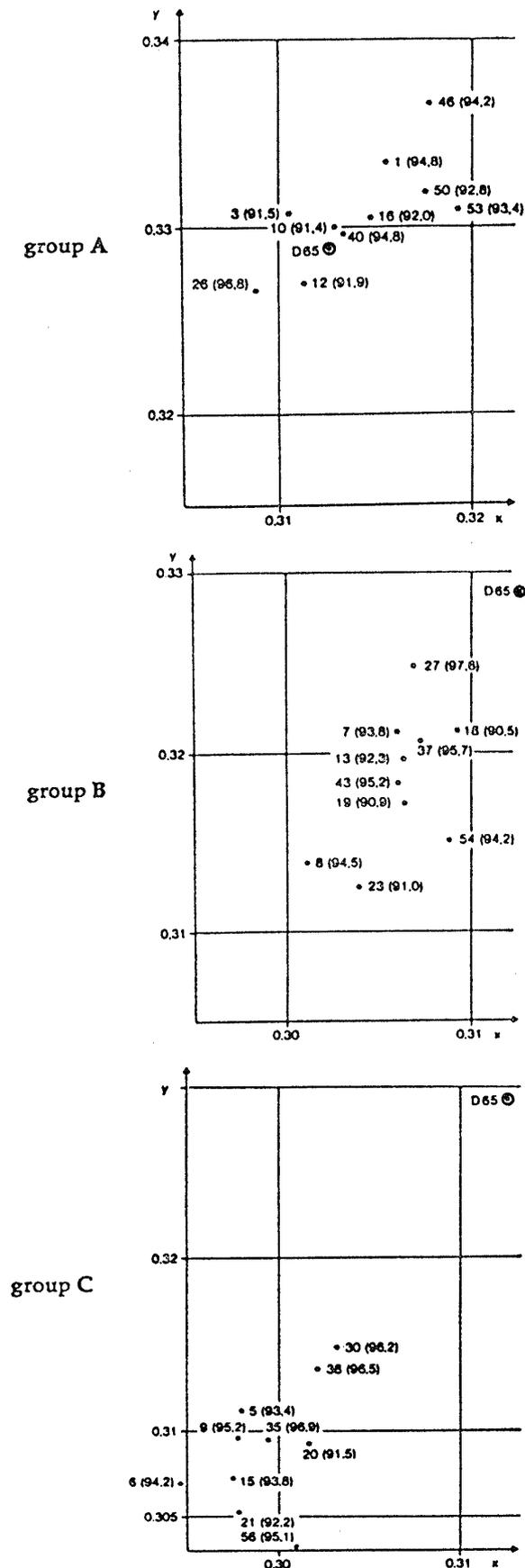
$$40 < W, W_{10} < 5Y - 280,$$

$$-3 < T_W, T_{W,10} < +3$$

である。

(iii) 色味の式は x, y と x_{10}, y_{10} の色度図中の主波長 466 nm の線にはほぼ平行に走る直線である。

(iv) W, W_{10} また $T_W, T_{W,10}$ の等差は常に白色度の等知覚差を示さない。なぜならば, こうした知覚的屬性をも



ち均等に相関する白色度及び色味の測定はさらに複雑な式でなければならず、現状では不可能である。

会議では上記の草案について賛否を図り、賛成20・反対3でCIE白色度式として勧告することが内定した。その後、1986年のCIE Publicationで正式な公表を行った¹⁵⁾。

参考文献

- 1) A. Berger : Description of Sample Used and their Colorimetric Measurement, *Farbe*, 26 (1977) 7~16
- 2) E. Ganz : Whiteness Measurement, *Journal of color & Appearance*, 1, (1972) 33~41
- 3) E. Ganz : Whiteness : photometric specification and colorimetric evaluation, *Appl Optics*, 15, (1976) 2039~2058
- 4) Minute of Meeting of CIE T.C. 1.3 (Colorimetry) 9, Sept. 1975 at London
- 5) Å. S. Stenius : Result of the Visual Assessment of the Whiteness Samples by Pair Comparison and Ranking, *Farbe*, 26, (1977) 63-104
- 6) B. Berglund and Å. S. Stenius : A Methodological Study on the Evaluation of Perceptual Whiteness, *Farbe*, 26, (1977) 17-46
- 7) M. L. Fago and R. D. Lozano : A Psychophysical Study of Whiteness, *Farbe*, 26, (1977) 47-61
- 8) Circular CIE T.C. 1.3/7 (1977)
- 9) Circular CIE T.C. 1.3/9 (1978)
- 10) Circular CIE T.C. 1.3/10 (1979)
- 11) Proceedings 19th Session, Kyoto, (1979)
- 12) Brockes : Report by chairman of WTF (1979)
- 13) Circular CIE T.C. 1.3/15 (1980)
- 14) Circular CIE T.C. 1.3/18 (1982)
- 15) CIE : "Colorimetry, 2nd Ed.2", Publication CIE No.15.2 (1986) Central Bureau of the CIE, Vienna
- 16) R. Sève : A Bibliography on Whiteness, *Farbe*, 26, (1977) 89~103

図表

Fig1: 試料の色度点 (A. Berger 著 "Description of sample"¹⁾より)

(受付: 昭和63年4月15日)

Fig1: 試料の色度点 (A. Berger 著 "Description of sample"¹⁾より)



うちだ ひろこ
内田洋子

昭和24年12月28日生
昭和60年3月
大妻女子大学大学院修士課程家政
学研究科被服学専攻修了
大妻女子大学家政学部講師
山梨大学教育学部講師
日本色彩学会，国際服飾学会所属



ふくだ たもつ
福田保

大正12年5月14日生
昭和22年9月
大阪帝国大学工学部精密工学科卒
工業技術院大阪工業技術試験所及
び中国工業技術試験所長を経て，
現在
大妻女子大学家政学部教授
日本色彩学会，照明学会，応用物
理学会家政学会，国際服飾学会所
属
工学博士（昭和36年）
現在，服飾におけるカラーアピア
ランスの研究に従事