

# 素地・釉薬の適合予測システム設計

倉地辰幸 荒木次夫 山田義和

Design of Expert System for Porcelain Industry with Neural Network

Tatsuyuki KURACHI, Tsugio ARAKI and Yoshikazu YAMADA

ニューラルネットワークを利用して、陶磁器製造のためのエキスパートシステムを構築した。システムは、素地と釉薬各々の化学組成比と焼成温度を入力することで、最終製品の表面性状と施釉試験体の曲げ強度を出力するものである。表面性状の評価項目は、艶と貫入および融け残りの三種であり、それぞれ三段階の数値によって物性予測を実行する。また、このシステムは、釉薬の化学組成比から、その熱膨張係数を出力する。

本研究では、既知データの整合性だけでなく、未知データに対する予測性能にも配慮して、汎用性の高いモデルを構築した。また、モデル因子として原料配合比でなく、化学組成比を採用しているため、原料成分の変動が生じたり、製造業者個々の事情により他原料を使用する必要が生じても、物性予測が可能である。また、配合条件及び焼成条件から予測物性を出力するだけでなく、所望する物性や許容条件等を入力すれば、それを実現するための最適配合や最適焼成温度の提案が可能である。

## 1. 緒言

瀬戸地区の陶磁器産業は、長い歴史の中で育まれてきた技術的な蓄積を有するが、若手技術者の不足と熟練技術者層の高齢化による技術開発力及び技術蓄積の低下が懸念されている。また、時代の流れとして、陶磁器製品は低コスト大量生産の時代から、高付加価値製品を多品種少量生産し、顧客のニーズにすばやく対応できる生産体制が求められている。

以上のような状況に対応するため、階層型のニューラルネットワークを利用して、陶磁器製品設計用のエキスパートシステムを開発し、熟練技術者の技能をコンピュータに代替させるための研究を行った。階層型のニューラルネットワークとは、入力節点の集合である入力層と出力節点の集合である出力層に加えて、隠れ層と呼ばれる中間の節点集合層を持ち、入力節点から出力節点まで、すべて順方向のみに結合されて、フィードバック結合などの相互結合の形態を持たないようなタイプのニューラルネットワークである<sup>1)</sup>。

本年度は、陶磁器製品設計用エキスパートシステム開発推進事業の最終年度として、初年度研究成果の磁器素地物性予測システム<sup>2)</sup>と、2年度研究成果の磁器釉薬物性予測システム<sup>3)</sup>に、素地と釉薬の適合性予測システムを付加して、陶磁器製品設計用エキスパートシステムを完成させることを目的として研究を行った。

## 2. 実験方法

### 2.1 素地を変動させた釉見本の作成と評価

前年度の釉見本では、素地配合は重量比で蛙目粘土30、インド長石35、サラワク珪砂35に統一した。これは素地強度や白色度、鋳込み性能等から総合的に判断した1300℃焼成用の最適素地である。本年度は、素地の変動が釉性状に与える影響をモデルに導入するため、1250℃焼成については、蛙目粘土30、インド長石45、サラワク珪砂25の素地配合である1250℃焼成用の最適素地を、1325℃焼成については、蛙目粘土35、インド長石25、サラワク珪砂40の素地配合である1325℃焼成用の最適素地を採用し、昨年と同じ23種類の釉薬<sup>4)</sup>をかけて釉見本を作成した。釉薬の内訳は、石灰亜鉛釉を56種類、タルク釉を84種類、石灰釉を93種類であるが、この中で石灰亜鉛釉は低火度釉のため、1325℃焼成用の最適素地については、1300℃での焼成を実行した。なお、1275℃焼成用の最適素地は1300℃焼成用の最適素地と同じ原料配合である。

出来上がった釉見本は、艶、貫入、融け残りの程度を目視比較によってそれぞれ3段階に数値化し、釉性状データとした。データ点数は、前年度の876点に466点のデータを追加して、合計1342点となった。

### 2.2 施釉試験体の曲げ強さ試験

強度面からみた素地と釉薬の適合性を評価するために、施釉試験体の曲げ強さの測定を行った。試験体素地は1300℃焼成用の最適素地と1325℃焼成用の最適素地の2種類を設定し、釉薬はインド長石、サラワク珪砂、カオリン、タルク、石灰石、亜鉛華を原料として、昨年の釉見本と同じ

石灰亜鉛釉56配合、タルク釉84配合、石灰釉93配合に加えて、 $\text{SiO}_2$ と $\text{Al}_2\text{O}_3$ がより多い領域について、タルク釉40配合と石灰釉42配合を追加設定した。

追加分のゼーゲル式を以下に示す。

タルク釉の追加、40配合

$$\left. \begin{array}{l} 0.30\text{KNaO} \\ 0.30\text{CaO} \\ 0.40\text{MgO} \end{array} \right\} \cdot x\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot y\text{SiO}_2 \quad (x=0.80\sim 0.95 \quad y=4.0\sim 9.5)$$

石灰釉の追加、42配合

$$\left. \begin{array}{l} 0.30\text{KNaO} \\ 0.70\text{CaO} \end{array} \right\} \cdot x\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot y\text{SiO}_2 \quad (x=0.80\sim 0.95 \quad y=3.5\sim 9.5)$$

焼成温度は1250°C、1275°C、1300°C、1325°Cの4段階である。ただし、石灰亜鉛釉については、低火度釉であることを考慮して、1300°Cまでの3段階にとどめた。これらの試験体について、3点曲げ試験を実行した。データ点数は1800点である。

### 2.3 ニューラルネットワークモデリング

素地と釉薬の分析値と焼成温度から表面性状と曲げ強度を出力する数学モデルを構築するため、ニューラルネットワークシミュレーションを実行した。データに適したモデル構造を探索し、未知データに対する予測性能に優れたモデルを構築した。

シミュレーションを行うための解析ソフトウェアは物性推定ソフト（アダムネット製、CAD/Chem）を使用した。

## 3. 実験結果及び考察

### 3.1 総合モデルの予測性能の最適化

釉薬成分の変動に加えて、素地成分の変動の影響も加味した表面性状予測と、製品強度の予測を可能とする総合モデルの、未知データに対する予測性能を最適化するための検証シミュレーションを行った。なお、この総合モデルにおいて、釉薬の熱膨張係数を物性値として出力できるように、熱膨張係数の予測性能最適化シミュレーションも併せて実行した。

まず、表面性状の予測性能について、前報3)に述べた検証結果を箇条書きにまとめると、以下のようになる。

- ①モデルに入力する化学分析値は、全重量に対する百分率ではなく、 $\text{Al}_2\text{O}_3$ を分母とした重量比を採用した方が、予測性能に優れる。
- ②その場合、因子として熱膨張係数を導入すると、予測性能が悪化する。
- ③収束のレベルは、モデルを構築する教師データについて、誤答が無くなる程度の、限界的に緩い収束に止めるべきである。収束をきつくすれば過剰学習となり、予測性能が悪化する。

以上の結果を踏まえて、本年度は、モデル構造を変えて

予測比較を行い、最適構造を探索した。具体的には、前年度と同じく、3種類のテストデータ、つまりあらかじめ外したデータを、残りのデータによって構築したモデルによって予測し、その誤答点数を合計し、比較するという方法で行った。テストデータは、残りのデータによって構築したモデルにとっては未知データであるため、この予測のレベルが、未知データに対する各モデル構造の適合性を示す指標となるわけである。その結果を表1に示す。

表1 モデル構造と表面性状の予測性能

TEST No.	1			2			3			集計		
データ数	各31			各19			各35			各85		
物性	G	C	R	G	C	R	G	C	R	G	C	R
JA2-FE3-HL35	10	4	3	2	4	7	10	4	7	22	12	17
JA2-FE3-HL40	7	6	7	3	4	3	8	4	7	18	14	17
JA2-FE3-HL45	5	4	4	4	6	4	10	5	9	19	15	17
JA2-FE3-HL50	7	3	6	3	4	4	8	4	7	18	11	17
JA2-FE3-HL55	8	4	9	2	4	5	6	3	10	16	11	24
JA2-FE3-HL60	5	4	7	4	6	5	7	4	7	16	14	19
JA2-FE3-HL65	8	5	9	2	7	6	8	4	8	18	16	23
JA2-FE3-HL70	8	3	9	3	5	4	10	5	8	21	13	21
JA2-FE4-HL35	8	2	8	2	6	6	7	4	9	17	12	23
JA2-FE4-HL40	9	2	8	3	4	4	10	3	9	22	9	21
JA2-FE4-HL45	6	5	8	4	4	7	10	3	9	20	12	24
JA2-FE4-HL50	5	5	7	2	5	6	9	3	6	16	13	19
JA2-FE4-HL55	7	5	7	4	4	6	9	3	11	20	12	24
JA2-FE4-HL60	7	6	8	4	4	8	10	4	8	21	14	24
JA2-FE4-HL65	8	7	9	4	5	7	10	3	8	22	15	24
JA2-FE4-HL70	6	6	8	3	6	8	9	4	10	18	16	26
JA2-FE5-HL35	8	5	7	3	3	6	10	3	6	21	11	19
JA2-FE5-HL40	5	6	9	3	5	7	9	3	6	17	14	22
JA2-FE5-HL45	9	3	4	4	4	6	10	3	6	23	10	16
JA2-FE5-HL50	5	3	4	4	3	7	4	4	6	13	10	17
JA2-FE5-HL55	7	3	6	3	3	6	9	4	8	19	10	20
JA2-FE5-HL60	7	4	4	3	6	8	9	5	8	19	15	20
JA2-FE5-HL65	9	5	5	5	7	6	8	3	7	22	15	18
JA2-FE5-HL70	6	6	5	6	7	4	9	6	6	21	19	15
JA2-FE6-HL35	6	5	6	3	6	6	7	5	8	16	16	20
JA2-FE6-HL40	6	3	5	5	4	7	9	5	9	20	12	21
JA2-FE6-HL45	4	4	7	5	4	6	10	4	4	19	12	17
JA2-FE6-HL50	10	5	4	2	4	7	6	6	10	18	15	21
JA2-FE6-HL55	6	2	4	5	3	5	6	3	5	17	8	14
JA2-FE6-HL60	6	2	7	5	2	8	7	3	4	18	7	19
JA2-FE6-HL65	7	3	5	6	4	4	6	4	4	19	11	13
JA2-FE6-HL70	8	5	9	2	6	7	9	6	8	19	17	24

表中のGが艶、Cが貫入、Rが融け残りをそれぞれ示している。そして、モデル構造の記号として、JAがデータ同士の積による非線形性の付加を意味し、FEが三角関数による非線形性の付加を意味する。JAとFEの右の数字は、その非線形性の拡張レベルを意味する。また、HLは隠れ

層を意味し、その右の数字は、隠れ層の節点数を意味する。

最も誤答の少ないモデル構造は、艶についてはJA2-FE5-HL50であり、貫入についてはJA2-FE6-HL60、融け残りについてはJA2-FE6-HL65であった。

表2 収束レベルと表面性状の予測性能

TEST No.	1			2			3			集計		
	各31			各19			各35			各85		
データ数	G	C	R	G	C	R	G	C	R	G	C	R
700収束	5	2	5	4	2	4	4	3	4	13	7	13
600収束	6	2	6	3	2	5	5	2	6	14	6	17
500収束	4	2	7	6	2	6	5	3	7	15	7	20
400収束	5	2	4	6	2	6	6	3	8	17	7	18
300収束	4	3	5	5	4	6	6	5	7	15	12	18

表3 モデル構造と曲げ強度の予測性能

TEST No.	1	2	3	平均
JA2-FE3-HL35	0.2033	0.1352	0.1095	0.1493
JA2-FE3-HL40	0.1427	0.0991	0.1187	0.1202
JA2-FE3-HL45	0.1434	0.1274	0.1177	0.1295
JA2-FE3-HL50	0.2824	0.0910	0.0605	0.1446
JA2-FE3-HL55	0.1900	0.0402	0.0749	0.1017
JA2-FE3-HL60	0.1461	0.1274	0.1200	0.1312
JA2-FE3-HL65	0.2726	0.0596	0.0856	0.1393
JA2-FE3-HL70	0.2089	0.1114	0.1594	0.1599
JA2-FE4-HL35	0.2058	0.1693	0.0726	0.1493
JA2-FE4-HL40	0.1510	0.0563	0.0925	0.1000
JA2-FE4-HL45	0.1408	0.0639	0.0780	0.0943
JA2-FE4-HL50	0.1640	0.1039	0.0747	0.1142
JA2-FE4-HL55	0.0841	0.1329	0.0804	0.0991
JA2-FE4-HL60	0.1838	0.0749	0.0800	0.1129
JA2-FE4-HL65	0.2006	0.1167	0.0885	0.1352
JA2-FE4-HL70	0.1995	0.0666	0.0793	0.1151
JA2-FE5-HL35	0.1949	0.1546	0.0612	0.1369
JA2-FE5-HL40	0.1959	0.0400	0.0741	0.1033
JA2-FE5-HL45	0.1457	0.1727	0.1138	0.1441
JA2-FE5-HL50	0.1604	0.0626	0.1567	0.1266
JA2-FE5-HL55	0.1585	0.1032	0.0996	0.1204
JA2-FE5-HL60	0.1333	0.0797	0.1450	0.1193
JA2-FE5-HL65	0.1559	0.0818	0.1442	0.1273
JA2-FE5-HL70	0.1516	0.0991	0.1116	0.1207
JA2-FE6-HL35	0.2220	0.0698	0.1742	0.1553
JA2-FE6-HL40	0.1443	0.0675	0.0702	0.0940
JA2-FE6-HL45	0.1699	0.0632	0.1474	0.1268
JA2-FE6-HL50	0.1667	0.0521	0.1147	0.1112
JA2-FE6-HL55	0.2664	0.1337	0.0612	0.1538
JA2-FE6-HL60	0.2220	0.1216	0.1517	0.1651
JA2-FE6-HL65	0.1737	0.0726	0.1333	0.1265
JA2-FE6-HL70	0.1669	0.1190	0.0999	0.1286

また、そのモデル構造について、収束レベルを変化させた場合の誤答点数を表2に示す。レベル数値が大きい方が収束が緩く、小さいほどきつくなる。きつい収束のモデルは、予測性能が良くないという結果になった。艶と融け残りについては700収束、貫入については600収束が最良であった。この構造を採用したモデルは、誤答率が32/255であり、未知データに対して、9割近い正解率を期待することができる。

次に、曲げ強度と熱膨張係数は連続的なデータであるため、予測性能は、実測値と予測値の差の2乗をテストデータ全てについて集計したエラーレベルによって評価するのが適切である。表3に曲げ強度についてのエラーレベルを、モデル構造ごとに計算したものを示す。また表4に熱膨張係数についてのそれを示す。

表4 モデル構造と熱膨張係数の予測性能

TEST No.	1	2	3	平均
JA2-FE3-HL35	0.0245	0.2176	0.0897	0.1106
JA2-FE3-HL40	0.0328	0.1768	0.0737	0.0944
JA2-FE3-HL45	0.0770	0.0797	0.0411	0.0659
JA2-FE3-HL50	0.0249	1.9759	0.0271	0.6759
JA2-FE3-HL55	0.0201	0.1383	0.0377	0.0654
JA2-FE3-HL60	0.0605	0.1663	0.0442	0.0904
JA2-FE3-HL65	0.0300	0.1112	0.0442	0.0618
JA2-FE3-HL70	0.0337	0.1670	0.0293	0.0767
JA2-FE4-HL35	0.0752	0.2192	0.0844	0.1262
JA2-FE4-HL40	0.0835	0.2738	0.0362	0.1311
JA2-FE4-HL45	0.0576	0.2236	0.0656	0.1156
JA2-FE4-HL50	0.0716	0.2330	0.0491	0.1179
JA2-FE4-HL55	0.0403	0.1049	0.0571	0.0674
JA2-FE4-HL60	0.0660	0.2670	0.0779	0.1370
JA2-FE4-HL65	0.0716	0.2556	0.0500	0.1257
JA2-FE4-HL70	0.0414	0.1001	0.0679	0.0698
JA2-FE5-HL35	0.0481	0.1414	0.0357	0.0751
JA2-FE5-HL40	0.0491	0.1618	0.0658	0.0922
JA2-FE5-HL45	0.0651	0.0616	0.0401	0.0556
JA2-FE5-HL50	0.0473	0.2791	0.0561	0.1275
JA2-FE5-HL55	0.0349	0.1602	0.0694	0.0882
JA2-FE5-HL60	0.0665	0.1890	0.0779	0.1111
JA2-FE5-HL65	0.0895	0.2667	0.0563	0.1375
JA2-FE5-HL70	0.0491	0.2225	0.0790	0.1169
JA2-FE6-HL35	0.0624	0.1413	0.0431	0.0822
JA2-FE6-HL40	0.0587	0.1712	0.0477	0.0925
JA2-FE6-HL45	0.0258	0.2531	0.0327	0.1039
JA2-FE6-HL50	0.0505	0.1584	0.0333	0.0807
JA2-FE6-HL55	0.0495	0.2187	0.0298	0.0993
JA2-FE6-HL60	0.0519	0.1556	0.0333	0.0803
JA2-FE6-HL65	0.0553	0.3353	0.0442	0.1449
JA2-FE6-HL70	0.0620	0.2121	0.0389	0.1044

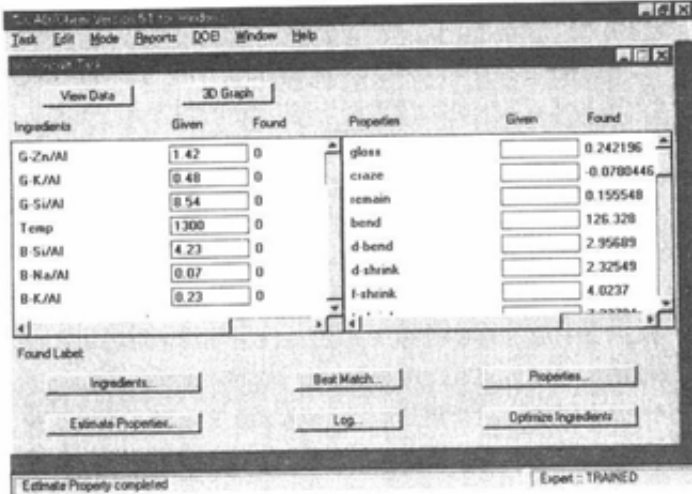


図1 物性予測画面

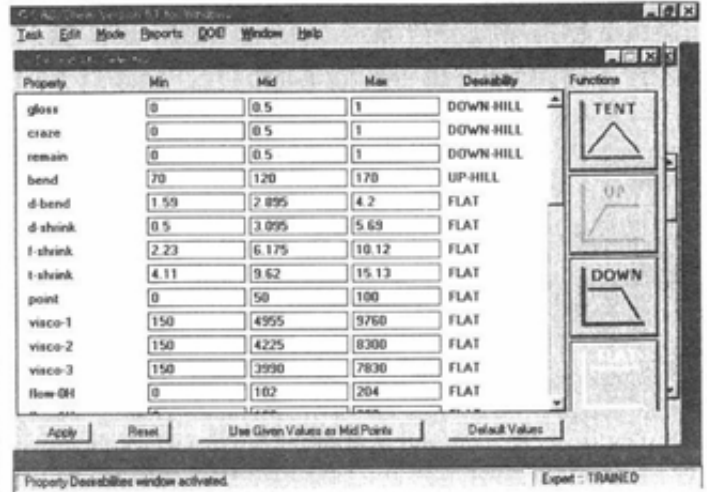


図4 所望物性入力画面

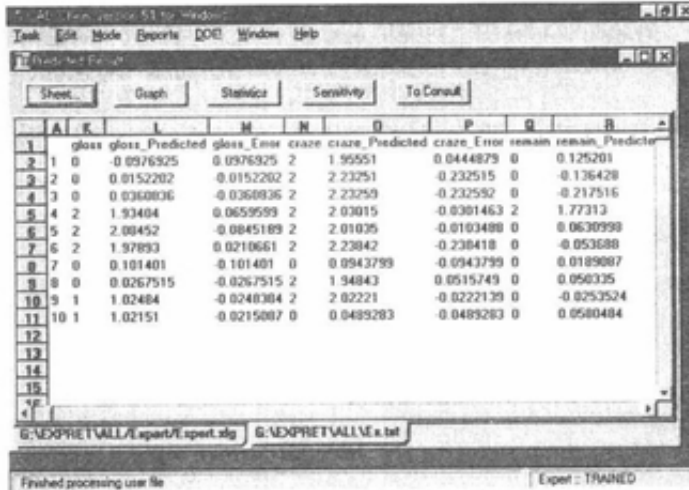


図2 一括予測画面

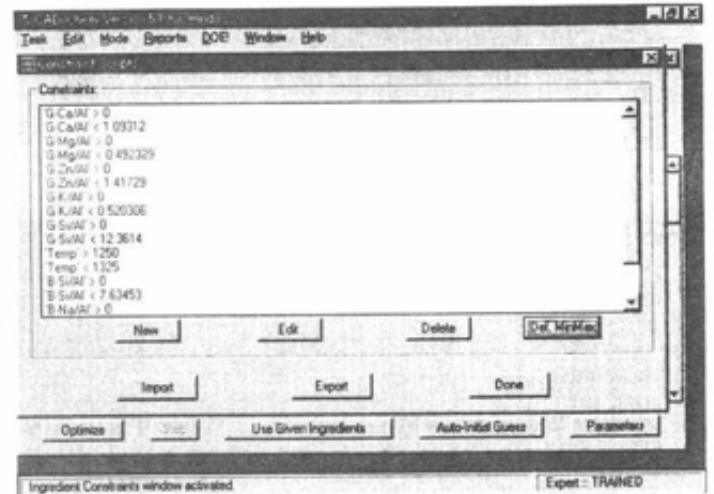


図5 拘束条件設定画面

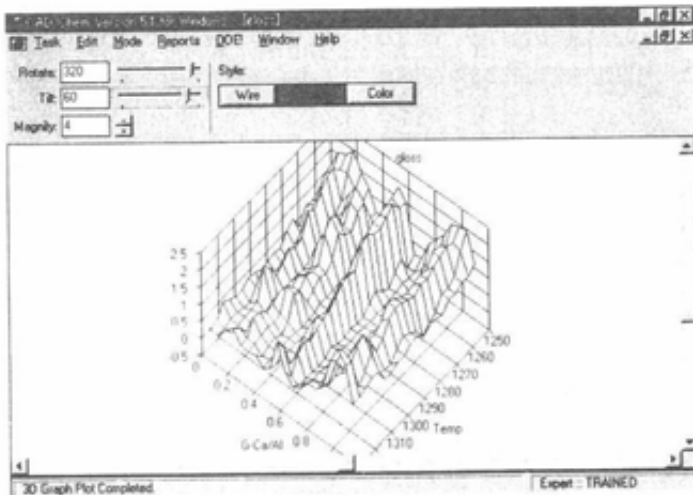


図3 三次元プロット画面

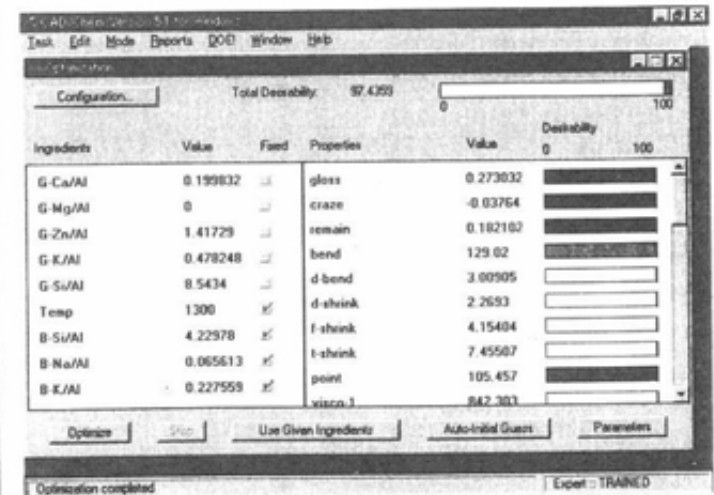


図6 最適設計画面

3回のテストエラーの平均が最も小さいものを最適モデル構造とした。曲げ強度については、JA2-FE6-HL40が最適モデル構造であり、熱膨張係数については、JA2-FE5-HL45が最適モデル構造であるとの結果を得た。最後に、これらの最適モデル構造によって、全データを使ったモデルを構築した。

### 3.2 システム構成

システムは基本的に二つの機能を持つ。一つは調合条件と焼成条件から予測される釉薬の物性を算出する機能であり、もう一つは所望物性と拘束条件から最適な調合条件と焼成条件を出力する機能である。図1に物性予測画面を示す。左側のIngredientsのGivenに因子データを入力すると右側のPropertiesのFoundに予測値が出力される。物性予測はこのように一配合ごとに行うこともできるし、図2に示すように、テキストファイルを通して一括に行うこともできる。また、図3に示すような三次元グラフによる視覚化も可能である。

次いで最適配合出力であるが、図4に示すのが所望物性入力画面であり、図5に示すのが拘束条件設定画面である。この二つの条件を入力した後、図6の最適設計画面において最適配合が計算され、左側のIngredientsのValue欄に結果が表示される。また、その最適配合条件における物性値は、右側のPropertiesのValue欄に示される。最適配合出力は計算初期値近傍から探索し始め、最初に条件を満たしたところで終了する。

物性予測のための入力データは、原料配合と原料分析値から計算する必要があるし、最適設計による出力データを原料配合に換算する操作も必要であるが、各種表計算ソフト形式での計算シートを作成してあるので、フロッピーによる提供が可能である。

## 4. 結 論

陶磁器製品設計用のエキスパートシステムについて研究し、以下の特徴を有するシステムを構築した。

- (1) 施釉表面性状予測については、釉薬及び素地の成分比と焼成温度を入力して、艶、貫入、融け残りの程度をそれぞれ3段階の数値によって出力させる形式とし、素地と釉薬の適合性を考慮した釉面性状予測を可能とした。
- (2) 素地と釉薬の適合性を強度面から評価するため、釉薬及び素地の成分比と焼成温度から、施釉試験体の曲げ強度を予測できるようにした。
- (3) このシステムは他に、初年度の素地についての各物性と、2年度の釉薬の熱膨張係数を、同じ一つのモデルから出力可能とした。
- (4) モデル構築のためのデータは不連続であるが、ニューラルネットワークを利用したシミュレーションにより、データとデータ間の未知データ空間を連続化した。このシミュレーションでは、既知データの整合性だけでなく、未知データに対する予測性能にも注意を払い、汎用性の高いモデルを構築した。また、モデル因子として原料配合比でなく、元素酸化物重量比を採用しているため、原料成分の変動が生じたり、製造業者個々の事情により他原料を使用する必要が生じてても、物性予測が可能である。
- (5) システムは、素地配合条件と釉薬配合条件及び焼成温度から予測物性を出力するだけでなく、所望物性や許容条件等を入力すれば、それを実現するための最適配合や最適焼成温度の提案が可能である。

## 文 献

- 1) CAD/Chem User's Manual, AI WARE Inc.(1997) P.59
- 2) 倉地辰幸, 荒木次夫, 安井克幸, 愛知県瀬戸窯業技術センター報告, 27, 1-6 (1998)
- 3) 倉地辰幸, 荒木次夫, 加藤正樹, 安井克幸, 愛知県瀬戸窯業技術センター報告, 28, 1-5 (1999)