

## 磁器素地の物性予測システム設計

倉地辰幸 荒木次夫 安井克幸

Design of Property Prediction System for Porcelain Body  
with Neural Network Modeling

Tatsuyuki KURACHI, Tsugio ARAKI and Katsuyuki YASUI

階層型の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、配合条件と工程条件から磁器素地物性を推定するためのモデリング実験を行った。

長石-石英-粘土系において、磁器化範囲を均等分割して配合割合を設定し、長石については、カリ長石とソーダ長石の2系列の素地調合を行った。成形は鋳込み成形とし、成形及び乾燥特性を測定した。焼成温度は1250℃から1325℃までの4段階で行い、焼成体の曲げ強さや収縮率を測定した。

データとデータの間の未知データ空間は、ニューラルネットワークシミュレーションによりモデルを作成して連続化を図った。この連続化されたモデルによって、未知配合の物性を推定することができるようになった。また、鋳込み特性の許容レベルを設定した上で、希望する収縮率や曲げ強さを与える配合を見出すことが可能となった。

## 1. 緒言

瀬戸地区陶磁器産業は若手技術者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。こうした状況に対応し、地場陶磁器産地の新たな生産環境を整備するために、階層型のニューラルネットワークを応用した磁器素地設計システムについて研究した。

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タイプのニューラルネットワークである。<sup>1)</sup>

これを利用して、磁器素地配合及びプロセス条件から素地特性が推定でき、また逆に、与えられた拘束条件のもとで、希望レンジ内の素地特性を実現できると推測される配合及びプロセス条件を出力できるような非線形予測システムの構築を目的として研究を行った。

## 2. 実験方法

## 2.1 入力実験データの作成

長石-石英-粘土系配合磁器素地において、磁器化範囲を均等分割し、表1に示すような素地調合を設定した。調合はカリ長石系とソーダ長石系の2つの系を設定し、互いに独立した15種類の調合を行った。各原料の分析値は表2

表1 磁器素地調合表

(単位: wt%)

原料名	番号	Na1	Na2	Na3	Na4	Na5	Na6	Na7	Na8	Na9	Na10	Na11	Na12	Na13	Na14	Na15
長石		20	30	20	40	30	20	50	40	30	20	60	50	40	30	20
サラワク珪砂		60	50	50	40	40	40	30	30	30	30	20	20	20	20	20
蛙目粘土		20	20	30	20	30	40	20	30	40	50	20	30	40	50	60

表2 原料分析値

(単位: wt%)

原料名	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	TiO <sub>2</sub>	CaO	MgO	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	Ig.loss
インド長石	66.6	18.4	0.09	0.02	0.23	0.01	2.85	11.0	0.29
F N 100長石	70.6	18.2	0.15	0.08	0.57	0.02	9.12	0.13	0.55
サラワク珪砂	99.0	-	0.02	0.05	-	-	0.02	0.02	0.32
蛙目粘土	49.1	34.4	1.18	0.52	0.24	0.27	0.12	1.45	12.7

に示す。素地物性については、成形体の特性として乾燥曲げ強さと乾燥収縮を、焼成体特性としては、焼成温度を4段階に分け、それぞれ焼成体曲げ強さと焼成収縮を測定した。焼成温度は、1250℃、1275℃、1300℃、1325℃である。また、鑄込み特性を評価する試験として、流出時間変化、泥漿粘度変化、着肉厚さ変化、及び脱型時間の変化をそれぞれ測定し、更にそれらを総合的に判断しての評点付けを行った。

## 2.2 ニューラルネットワークモデルの構築

原料配合特性及び製造工程特性データ集合から物性データ集合へのデータ変換式を算出するニューラルネットワークモデルを構築した。変換式はニューロネット構造の特定と構造内部の節点間結合の全ウェイト分布により特徴づけられる。原料配合特性値は長石、石英、粘土の配合重量比とSiO<sub>2</sub>、Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、TiO<sub>2</sub>、CaO、MgO、Na<sub>2</sub>O、K<sub>2</sub>O、I.g.lossの成分重量比を設定した。また物性データとしては、乾燥曲げ強さと乾燥収縮を成形体の特性値とし

表3 調合素地の物性（カリ長石系）

測定項目 番号	乾燥曲げ強さ (MPa)	乾燥収縮 (%)	1250℃焼成			1275℃焼成			1300℃焼成			1325℃焼成		
			焼成収縮 (%)	全収縮 (%)	曲げ強さ (MPa)									
No.1	1.85	0.52	9.53	10.02	112.5	9.70	10.14	106.0	8.99	9.46	101.1	7.84	8.31	84.2
No.2	1.80	0.54	9.52	9.94	96.5	9.26	9.77	100.6	8.28	8.76	86.1	6.94	7.50	63.4
No.3	2.51	1.66	9.20	10.67	127.9	9.39	10.95	119.4	9.02	10.49	122.3	7.92	9.45	103.4
No.4	1.87	0.56	9.72	10.24	93.6	8.45	8.97	81.0	6.54	7.06	72.5	4.96	5.46	54.2
No.5	2.46	1.70	9.24	10.80	118.0	9.05	10.57	126.6	8.41	9.95	114.9	6.51	8.14	75.4
No.6	3.12	3.21	8.70	11.61	117.4	8.68	11.65	122.4	8.51	11.50	122.9	8.03	10.89	111.1
No.7	1.59	0.60	8.53	9.05	75.5	7.42	7.99	62.2	6.55	7.11	51.6	5.97	6.55	48.3
No.8	2.60	1.68	9.31	10.86	106.1	8.80	10.30	104.0	7.29	8.88	91.0	4.64	6.20	48.9
No.9	2.75	3.42	9.22	12.35	104.5	9.21	12.36	116.9	8.92	12.06	113.3	8.00	11.07	96.9
No.10	3.14	4.77	9.39	13.73	109.4	9.38	13.68	98.0	9.06	13.38	114.0	8.72	13.09	106.2
No.11	1.85	0.53	8.32	8.82	73.0	7.55	8.03	65.0	7.15	7.65	57.8	6.46	6.93	51.0
No.12	2.32	1.64	9.16	10.66	95.2	7.81	9.33	86.1	5.99	7.51	68.9	2.72	4.33	42.6
No.13	2.88	3.19	9.49	12.34	109.2	9.56	12.46	113.9	8.96	11.93	107.0	7.75	10.67	77.1
No.14	3.54	4.52	9.53	13.64	118.9	9.92	13.96	96.7	9.39	13.47	111.9	9.32	13.46	99.8
No.15	4.20	5.55	9.79	14.65	104.0	10.12	15.13	104.9	9.88	14.85	100.2	9.61	14.80	100.5

表4 調合素地の物性（ソーダ長石系）

測定項目 番号	乾燥曲げ強さ (MPa)	乾燥収縮 (%)	1250℃焼成			1275℃焼成			1300℃焼成			1325℃焼成		
			焼成収縮 (%)	全収縮 (%)	曲げ強さ (MPa)									
No.1	2.39	0.50	9.70	10.16	116.9	9.53	9.99	104.3	8.36	8.82	97.3	6.64	7.11	67.2
No.2	2.56	0.58	8.73	9.26	97.9	8.13	8.66	91.1	6.24	6.79	65.4	4.91	5.46	51.0
No.3	3.38	1.79	9.34	10.96	138.5	9.28	10.90	124.1	8.61	10.24	112.8	6.47	8.14	75.6
No.4	2.43	0.67	7.34	7.95	73.2	6.84	7.46	62.8	5.51	6.14	58.7	4.77	5.41	47.4
No.5	3.11	1.84	9.16	10.83	108.8	8.13	9.82	89.9	5.53	7.27	63.3	3.17	4.95	41.5
No.6	3.96	3.46	8.86	12.01	127.2	8.69	11.84	118.3	8.35	11.52	115.4	7.36	10.56	92.5
No.7	2.19	0.65	7.30	7.91	62.7	6.83	7.44	49.6	5.86	6.48	52.1	5.89	6.50	48.2
No.8	2.90	1.87	7.93	9.65	84.9	6.31	8.06	63.8	3.70	5.50	45.1	2.67	4.49	34.8
No.9	3.71	3.49	9.40	12.56	106.2	9.23	12.40	102.7	7.71	10.93	78.4	6.42	9.69	55.5
No.10	3.83	4.68	9.15	13.41	103.6	9.90	14.12	99.4	9.57	13.80	99.5	8.59	12.87	102.3
No.11	1.72	0.82	7.98	8.73	59.1	7.81	8.57	50.7	7.28	8.05	51.8	6.93	7.69	50.2
No.12	2.52	1.92	7.22	9.01	70.5	5.83	7.65	60.5	3.36	5.22	41.0	2.23	4.11	37.3
No.13	2.87	3.48	9.25	12.40	96.8	8.82	11.99	77.4	7.03	10.26	53.5	6.58	9.83	53.4
No.14	3.43	4.56	9.52	13.65	92.9	9.75	13.86	92.1	9.45	13.58	77.4	7.82	12.03	64.0
No.15	3.71	5.69	10.00	15.12	96.1	9.82	14.96	75.4	9.59	14.74	101.0	9.15	14.33	84.8



表7 白色度 (1300℃ 無釉 還元焼成)

原料	番号	Na1	Na2	Na3	Na4	Na5	Na6	Na7	Na8	Na9	Na10	Na11	Na12	Na13	Na14	Na15
インド長石系		69.7	70.6	66.6	74.0	66.4	63.2	72.3	67.6	65.6	60.9	63.1	70.8	62.4	61.8	58.0
FN100長石系		65.5	65.5	62.5	65.2	65.6	59.8	63.4	64.6	61.8	57.3	63.1	65.4	63.7	58.6	52.7

表8 焼成温度固定モデルのテストエラーレベル

model type	曲げ強さ				焼成収縮				全収縮			
	1250℃	1275℃	1300℃	1325℃	1250℃	1275℃	1300℃	1325℃	1250℃	1275℃	1300℃	1325℃
Linear	6.641	10.55	9.838	12.13	12.06	10.25	12.41	17.66	1.871	3.336	5.859	8.646
HL08	3.149	10.21	1.446	3.846	7.477	7.459	3.990	12.26	1.562	2.916	4.033	4.271
HL09	3.586	12.30	3.348	2.263	14.08	7.861	2.824	10.84	1.348	3.416	3.843	4.104
HL10	4.080	9.818	2.072	2.205	9.047	7.457	3.419	11.82	1.085	2.700	4.616	5.191
HL11	5.038	12.19	3.655	2.838	10.43	7.253	1.972	10.12	2.567	3.293	4.509	4.175
HL12	3.320	14.17	1.225	2.354	11.89	4.957	4.027	8.792	0.984	2.758	3.709	5.647
HL13	2.483	12.64	3.874	2.666	12.90	5.014	3.561	8.379	0.999	3.163	3.696	6.677
HL14	4.486	13.85	2.882	2.112	11.75	7.426	3.340	7.316	1.009	3.068	3.484	3.570
HL15	2.646	10.47	1.786	3.963	8.400	7.091	3.844	7.845	1.179	3.197	3.681	3.697
FE1-HL05	4.537	5.866	3.669	1.642	10.10	3.583	3.417	4.566	1.514	2.596	2.709	2.924
FE1-HL06	3.316	4.807	4.158	1.493	11.37	3.965	3.201	4.493	1.303	2.022	2.163	2.563
FE1-HL07	2.727	5.870	3.602	1.582	10.66	4.230	2.561	4.804	1.778	2.472	2.112	2.977
FE1-HL08	2.542	4.596	3.904	1.608	10.59	4.629	2.903	4.450	1.372	2.015	1.825	1.766
FE1-HL09	2.510	6.085	3.456	1.608	8.504	3.942	2.293	4.662	1.342	1.831	1.924	1.796
FE1-HL10	2.617	6.357	3.062	1.412	7.987	4.073	3.073	4.100	1.455	1.976	1.896	2.358
FE1-HL11	2.492	5.178	3.654	1.488	7.808	3.925	2.301	4.323	1.370	1.975	1.852	1.809
FE1-HL12	2.828	5.785	3.750	1.667	9.509	3.922	2.223	3.865	1.532	2.125	1.963	2.244
JA2-HL05	3.979	6.072	4.227	2.218	7.583	5.445	6.045	9.907	1.372	0.972	3.131	3.400
JA2-HL06	3.481	7.574	2.234	2.533	7.460	5.709	4.756	4.905	1.513	0.933	2.598	2.154
JA2-HL07	3.108	7.527	3.131	2.830	7.854	5.645	5.248	5.345	1.194	0.725	2.132	2.445
JA2-HL08	2.578	7.161	2.605	1.986	6.407	7.588	2.778	4.178	1.241	0.877	2.276	2.676
JA2-HL09	3.671	7.428	3.662	2.382	8.351	4.629	5.351	7.043	1.597	0.850	2.041	2.906
JA2-HL10	3.090	8.294	2.384	2.392	8.032	5.120	3.751	3.785	1.259	0.740	1.787	2.482
JA2-HL11	3.050	8.053	3.144	2.564	7.642	4.322	3.275	4.133	1.196	0.908	1.869	2.576
JA2-HL12	3.171	7.624	3.580	2.256	6.635	4.228	3.187	4.879	1.557	0.960	2.072	2.245
minimum	2.483	4.596	1.225	1.412	6.407	3.583	1.972	3.785	0.984	0.725	1.787	1.766

7に示す。

### 3.2 モデリング

各モデル構造の未知データ予測性能は、テストエラーレベルによって評価した。焼成温度固定モデルについて、各焼成温度ごとの曲げ強さ、焼成収縮、全収縮のテストエラーレベルを表8に示す。同時に、焼成温度を固定しないモデル、つまり焼成温度をプロセス条件の一つに組み込んでしまうようなモデルも可能であり、この焼成温度可変モデルのテストエラーレベルを表9に示す。モデルの利用価値という点では、焼成温度固定モデルは、1250℃、1275℃、1300℃、1325℃以外の焼成温度については予測ができないため、自由に焼成温度を設定して予測できる焼成温度可変モデルの意義は大きい。表中で、Linearは重回帰モデルを

示す。また、表9のmodel typeの中に、焼成温度固定モデルと示したものは、焼成温度固定モデルのエラーを集積して、可変モデルのレンジでエラーレベルを計算したものである。この値は、焼成収縮及び全収縮については、それぞれ1.671と0.950であり、焼成温度可変モデルの最低値である0.685と0.357の方が優れている。つまり、焼成収縮及び全収縮については、焼成温度を4段階に変えた実験データ群が、お互いに補足し合うことで、より優れたモデルの構築に成功しているわけである。ところが、焼成曲げ強さについては、焼成温度固定モデルのエラーレベルが1.380であり、最低値となっている。ここで、焼成温度可変モデルのエラーレベル最低値は、FE2-HL11で1.560であるが、JA3-HL15でも1.606であり、大差ない結果である。つまり、焼成曲げ強さについて、焼成温度可変モデルを選択する場

表9 焼成温度可変モデルのテストエラーレベル

model type	焼成曲げ	焼成収縮	全収縮	model type	焼成曲げ	焼成収縮	全収縮
Linear	5.309	6.428	3.406	焼成温度固定モデル	1.380	1.671	0.950
JA2-HL09	2.739	0.873	0.543	FE1-HL06	3.746	1.213	0.561
JA2-HL10	2.634	0.800	0.606	FE1-HL07	2.142	1.398	0.489
JA2-HL11	1.827	0.975	0.472	FE1-HL08	2.297	1.034	0.694
JA2-HL12	2.847	0.803	0.698	FE1-HL09	2.099	0.863	0.447
JA2-HL13	2.358	0.822	0.568	FE1-HL10	1.914	0.938	0.497
JA2-HL14	2.257	0.842	0.681	FE1-HL11	1.824	0.878	0.516
JA2-HL15	2.588	0.685	0.566	FE1-HL12	2.035	0.899	0.465
JA2-minimum	1.827	0.685	0.472	FE1-minimum	1.824	0.863	0.447
JA3-HL09	2.026	0.760	0.433	FE2-HL06	2.713	1.062	0.608
JA3-HL10	1.630	0.803	0.614	FE2-HL07	2.313	1.070	0.522
JA3-HL11	1.826	0.819	0.626	FE2-HL08	2.783	1.125	0.552
JA3-HL12	1.678	0.816	0.357	FE2-HL09	1.982	0.835	0.704
JA3-HL13	2.045	0.916	0.469	FE2-HL10	2.064	1.131	0.543
JA3-HL14	2.133	0.760	0.535	FE2-HL11	1.560	1.011	0.630
JA3-HL15	1.606	0.935	0.463	FE2-HL12	1.726	0.882	0.534
JA3-minimum	1.606	0.760	0.357	FE2-minimum	1.560	0.835	0.522
JA-minimum	1.606	0.685	0.357	FE-minimum	1.560	0.835	0.447

合には、機械的に可変モデル中で最も低いエラーレベルを示すFE2-HL11を採用するのではなく、むしろ焼成温度固定モデルの予測を目標として、できるだけそれに近い予測をするモデルを採用すべきである。これはFE系列とJA系列とではモデルの基本構造が異なるため、エラーレベルが僅差の場合には、より慎重な選択が求められるからである。そこで、未実験データ領域について、焼成温度固定モデルの予測値と焼成温度可変モデルの予測値を比較プロットしたものをFE2-HL11については図1に、JA3-HL15に

については図2に示す。この2つの図から明らかなように、JA3-HL15の方が焼成温度固定モデルに近い予測をするため、焼成曲げ強さについての焼成温度可変モデルの構造はJA3-HL15を採用した。このように、焼成収縮や全収縮に比べて焼成曲げ強さの予測が安定しない理由としては、実験データのバラツキの影響が考えられる。図3から図5に、焼成曲げ強さ、焼成収縮及び全収縮の全実験データと各々の平均値のプロットを示す。これらの図から、焼成曲げ強さのバラツキが際立って大きいことが分かる。つまり、教

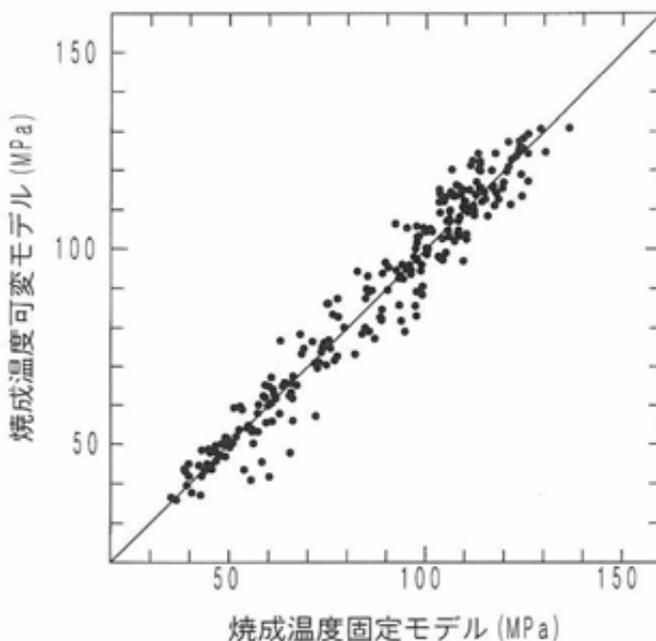


図1 未知データ予測比較(FE2-HL11)

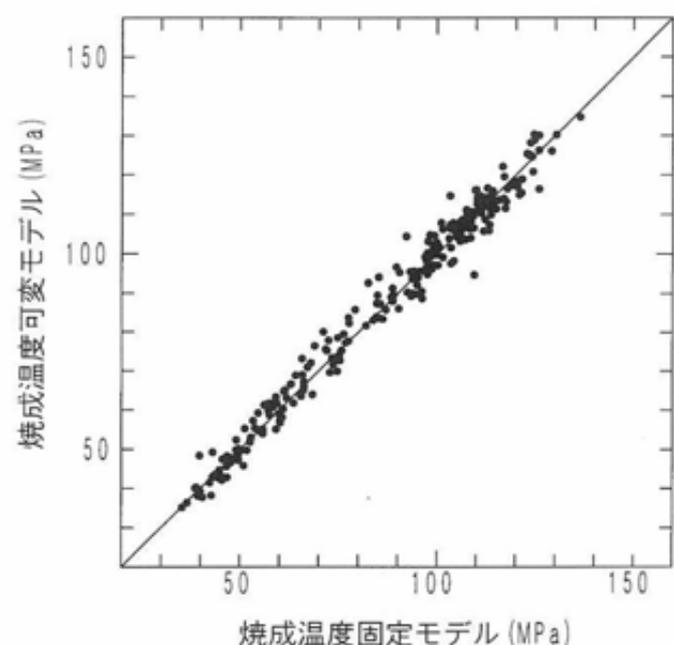


図2 未知データ予測比較(JA3-HL15)

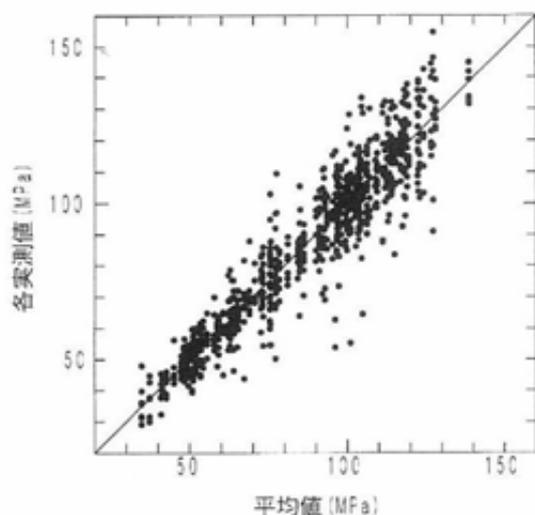


図3 焼成曲げ強さ

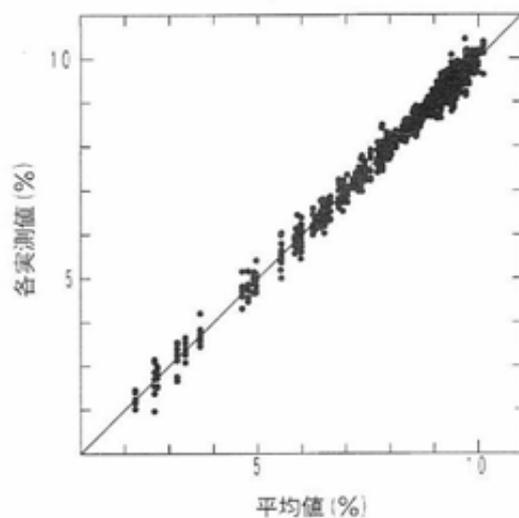


図4 焼成収縮

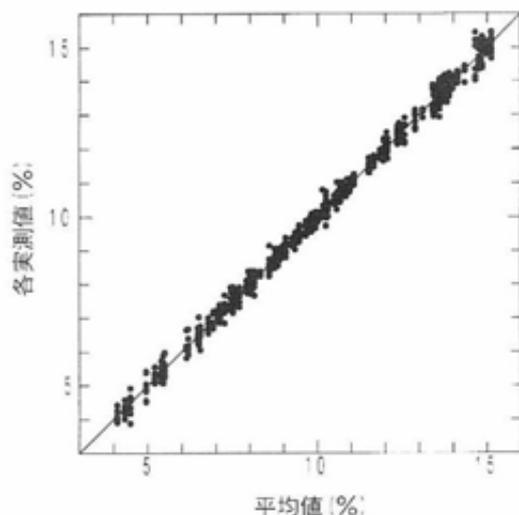


図5 全収縮

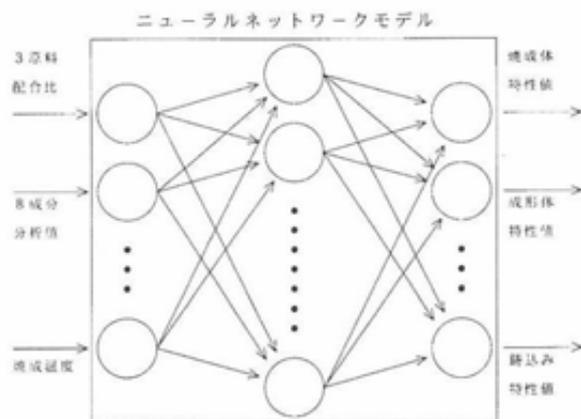


図6 モデルによる物性予測

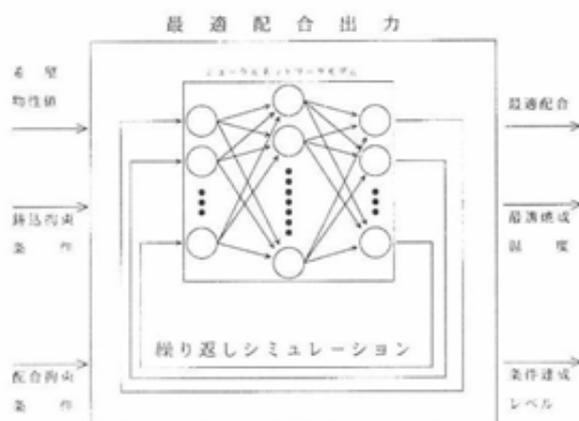


図7 最適配合出力

師データとして平均値を採用しても、そこには相対的に大きな揺らぎが内在する結果となり、モデルの安定性が損なわれていることが推測される。これは、モデル構築とエラーレベル算出の基礎である教師データの許容レンジの問題である。

図6と図7に、構築されたニューラルネットワークモデルの物性推定と最適配合出力の模式図を示した。

#### 4. 結論

本研究により、以下の結論を得た。

- (1) 適切なモデル構造を決定するためには、教師データから外したテストデータの推測結果を集積してエラーレベルを算出し、比較することが最も有効であった。
- (2) モデルが未知データを推測する能力は、物性値の許容レンジに依存する。測定データの広がり可能な限りタイトな物性を入力することにより目的とする材料物性を的確に予測することができる。

#### 文献

- 1) CAD/Chem User's Manual, AI WARE Inc.(1997) P.59