◇◇◇◇ 原著論文 ◇◇◇◇

CHEDDAR チーズの粘弾性試験法に基づいた 食感評価モデルの開発

守田愛梨^{1,†}, 荒木徹也¹, 池上翔馬², 岳上美紗子³,
住 正宏³, 上田玲子⁴, 相良泰行⁴

¹ 東京大学大学院農学生命科学研究科, ² 森永乳業株式会社食品総合研究所,
³ 森永乳業株式会社応用技術センター, ⁴ 一般社団法人 食感性コミュニケーションズ

Development of Texture Evaluation Model Based on Viscoelastic Testing Methods for Cheddar Cheese

Airi MORITA^{1,†}, Tetsuya ARAKI¹, Shoma IKEGAMI², Misako OKAUE³,
Masahiro SUMI³, Reiko UEDA⁴, Yasuyuki SAGARA⁴

¹Department of Global Agricultural Sciences, Graduate School of Agricultural and Life Sciences, The University of Tokyo,
1-1-1, Yayoi, Bunkyo Ward, Tokyo 113-8657, Japan

²Food Science and Technology Institute, Morinaga Milk Industry, Co., Ltd.,
5-1-83, Higashihara, Zama, Kanagawa 252-8583, Japan

³Product Evaluation Center, Morinaga Milk Industry, Co., Ltd, 5-1-83, Higashihara, Zama, Kanagawa, 252-8583, Japan

⁴Food Kansei Communications, Corp., Toa-mansion No.103, 4-24-7, Sendagi, Bunkyo Ward, Tokyo 113-0022, Japan

Novel methodologies have been developed to predict the values of sensory evaluation score by selecting the combination of measurement methods for grouping viscoelastic parameters, and coupled PLS and ANN modeling have been presented as a quality evaluation model based on the relationship analysis between viscoelastic parameters and sensory scores for Cheddar cheese. Ten Cheddar cheeses were selected as test samples and viscoelastic characteristics of the samples were obtained by three measurement methods of fracture, creep and texture tests. Thirty-eight sensory terms including 10 terms of texture attribute were selected and then sensory evaluation using the terms as well as consumer palatability test were conducted for collecting both sensory and palatability scores, respectively. The relationships between viscoelastic parameters and texture changes in human mouth were explainable by adapting the relationships between the viscoelastic characteristics and texture in the mastication process of the force vs. time curve obtained from the two bites process of the sample, and thus selection manner for the combinations of viscoelastic measurement methods corresponding to sensory texture scores were demonstrated by comparing the accuracy of PLS regression equations. Furthermore, ANN models to predict sensory texture and palatability scores were successfully presented by applying each viscoelastic parameter obtained by the selected combinations of the measurement methods. By the modeling process proposed in this study, ANN models were operational to utilize the optimal viscoelastic measurement methods contributing to the sensory and palatability scores.

Keywords: viscoelastic parameter, texture, sensory evaluation, PLS, ANN modeling

1. 緒 言

食感とは、食品が人の口腔内において咀嚼や舌による唾液との混合などの影響を受けて状態変化したものの、

あるいはその変化の過程を知覚することによって生じる物理的刺激に由来する感覚である [1]。チーズの食感、消費者の感じるおいしさ評価に重要な因子であることが知られている [2-5]。そのため、チーズの食感をコントロールすることは、チーズの品質制御における主要因の1つであるといえる。

チーズの食感はその品質評価に大きな影響を与える因子であることから、物理的な計測によって得た粘弾性特性と官能評価スコアとの相互関連性について、多

(受付 2015 年 1 月 26 日, 受理 2015 年 5 月 25 日)

1 〒113-8657 東京都文京区弥生 1-1-1

2 〒252-8583 神奈川県座間市東原 5-1-83

3 〒252-8583 神奈川県座間市東原 5-1-83

4 〒113-0022 東京都文京区千駄木 4-24-7 トーアマンション 103

† Fax: 03-5841-5335, E-mail: ailmorita@gmail.com

くの先行研究がなされている [6-9]. とくに, 主成分分析や PLS といった多変量解析手法を使用して, 粘弾性特性と官能評価スコアを関連付ける報告が数多い [10-14].

測定機器によってチーズの食感を計測する手法として, 一般的には破断試験, クリープ試験およびテクスチャ試験が行われている. チーズの粘弾性計測項目の中で, 最も計測目標とされることの多い粘弾性特性は, 硬さもしくはその硬度である [15]. しかし, チーズの食感であるとして計測している粘弾性特性の定義やその測定条件が報告者によって異なるため, 必ずしも一般性をもつ測定結果が得られているとは限らない. また, チーズの粘弾性特性については, レオロジーの理論に基づいて研究した報告例は少ないために, チーズの粘弾性特性と官能評価スコアとの相互関連性は系統的に把握されていない. そのため, 両者の対応関係を粘弾性特性の計測原理に基づいてモデリングし, このモデルによって人のおいしさ評価に影響を及ぼす食感を粘弾性特性の値によって定量的に評価することができない現状にある.

本研究の目的は, チェダーチーズの粘弾性計測パラメータと官能評価スコアの相互関係解析に基づいて, 1) 高精度で官能評価スコアを予測する機器試験法の組み合わせを選択する方法を開発し, 2) その組み合わせを用いて PLS と ANN を併用した食感評価モデルを提唱することにある.

2. 供試サンプルと実験方法

2.1 供試サンプル

チェダーチーズの標準的な粘弾性特性に基づいて品質評価モデルを構築するためには, 市販用とプロセスチーズ原料用の両方から化学組成が均一な試料を供試

サンプルとする必要があると考えた. このため供試サンプルとして, 市販用チェダーチーズ (No.3, 9, 10) およびプロセス原料用 (No.1, 2, 4, 5, 6, 7, 8) の 10 品を選んだ. Table 1 にそれらの製造地域, 製造年月日および熟成期間を示す. また, Table 2 にこれらのサンプルの化学組成の質量パーセント濃度, ミネラル分, 遊離アミノ酸, 遊離脂肪酸, 有機酸などの総含有量および pH を示した. 供試サンプルの水分, 脂肪および蛋白質の計量分析にはそれぞれ常圧加熱乾燥, 酸アンモニア分解法および modified Dumas 法を用いた. また, 灰分量は五訂日本食品標準成分表分析マニュアルに則って分析し, 炭水化物量は化学組成の質量パーセント濃度の 100% から水分, 脂肪, 蛋白質および灰分の割合を除することによって求めた. 食塩量は Volhard 法を用いて分析し, pH の計測は粉碎した供試サンプルに pH 電極 (9625-10D probe, pH meter D-51T, HORIBA Ltd., Kyoto, Japan) を直接突き刺して行った. さらに, 遊離アミノ酸, 遊離脂肪酸およびミネラルの分析にはそれぞれニンヒドリンポストカラム発色法 (L-8900, No.2623PF, HITACHI High Technologies Co., Japan), ガスクロマトグラフィー法 (GC6890, Agilent

Table 1 Data of the test samples.

No.	Area of Production	Date of Manufacture	Aging period**
1	Oceania	2010.11.24	5
2	USA	2011.03.17	2
3	Japan	2011.07.20	4
4	Oceania	2010.12.10	6
5	Oceania	2011.02.07	4
6	Oceania	2012.03.05	0
7	USA	2011.11.17	-
8	Oceania	2011.01.-*	5
9	Japan	-	-
10	Europe	2012.03.27	5

*, Date was unknown, ** Unit ; month

Table 2 Chemical compositions of the samples.

Samples	Chemical compositions									pH
	(Unit: wt%)					(Unit: mg/100g)				
	Fat	Protein	Carbohydrate	Ash	Moisture	Total				
						minerals	Free amino acids	Free fatty acids	Organic acids	
No.1	34.8	24.0	0.9	4.0	36.3	3094.7	715.3	68.6	1422	5.3
No.2	33.4	24.1	1.7	3.6	37.2	2991.4	668.6	48.6	1397	5.2
No.3	34.6	25.5	1.5	4.1	34.3	3245.7	4269.4	176.6	1551	5.3
No.4	37.1	23.3	1.3	3.8	34.5	3103.9	2219.0	71.4	1306	5.4
No.5	37.4	23.5	0.8	3.8	34.5	3180.5	3715.1	89.5	1409	5.2
No.6	34.9	26.4	4.2	1.8	32.7	3352.6	1005.7	132.4	929	5.5
No.7	38.0	24.9	3.7	0.3	33.1	2930.7	1698.1	64.7	1557	5.3
No.8	31.0	36.2	4.0	0.9	37.9	3024.8	1160.5	84.1	1429	5.4
No.9	32.4	24.8	3.7	2.3	36.8	2811.7	1116.8	78.9	1612	5.1
No.10	34.7	24.4	3.6	1.3	36.0	2846.6	1002.4	116.2	1456	5.0

Technologies Inc., Palo Alto, Calif., U.S.A.) および ICP 発光分光分析法 (ICP-9000, shimadzu Co., Kyoto, Japan) を用いた。

供試サンプルは、まず約 20kg のチーズ塊から 200g 程度のチーズブロックを複数個切り出し、次に、それらの含水量と品温の変化による物性値変動を低減させるためにラップで覆い 5℃ の恒温庫に 15 分以上保存して試験に供した。粘弾性計測試験用サンプル試片は、金属製のくり抜き器を用いて 10 mmφ×10 mm の円柱形に成形し、官能評価用には 15mm のサイコロ状に切り出して成形し、それぞれの試験に供試した。

2.2 粘弾性試験装置と設定条件

供試サンプルの破断、クリープおよびテクスチャ試験に用いた試験装置 (山電製クリープメータ, RE2-33005s 型) の構成図を Fig. 1 に示す。この装置は粘弾性計測部、試料厚さ計、データ収録装置および制御用パーソナルコンピュータより構成されている。計測部では、試料台が一定速度で昇降して試料を圧縮すると同時に、プランジャ上部のロードセルによって荷重の経時変化を検出する機構となっている。円柱型プランジャの直径と圧縮速度は、载荷開始直後から終了時までの荷重と歪みの経時変化を記録できる条件を予備実験により確認し、圧縮後のサンプル直径よりも大きい 55 mmφ と 0.5 mm/s をそれぞれ選択した。また、破断およびテクスチャ試験に必要な最大荷重は 200 N 以下であることを確認し、これらの試験には最大荷重 200 N のロードセルを用い、試験装置のクリアランスを 5mm に設定した。クリープ試験では荷重-歪率曲線の初期に観察される線形性が保たれている範囲の载荷条件を用いて最大荷重を設定する必要があるため [16]、この条件を満たす载荷条件は最大荷重 3 N、歪率 10% であることを確認して最大荷重 20 N のロードセルを選択して用いた。また、クリープ試験の測定時間は 100 秒間とした。これらすべての試験法の測定誤差を評価するために、それぞれの試験は同一サンプルにつき 3 回以上繰り返し測定した。これらの試験法には、測定曲線から粘弾性パラメータを推算する解析ソフトが提供されている。次項以下にこれらの推算法について述べる。

Fig. 1 Schematic of viscoelastic measurement equipment.

2.3 解析モデルによるパラメータの推算法

2.3.1 破断試験

チェダーチーズを対象として得られる典型的荷重-歪率曲線を Fig. 2 に示す。この曲線から推算されるパラメータは曲線の変曲点から得られる破断荷重 (braking force) [N]、破断歪率 (braking rate) [%]、最大荷重 (Maximum force) [N] および X 軸と破断点に至る曲線で囲まれる面積から推算される破断エネルギー (energy of fracture) [J/m²] である。ここで、供試サンプルの変形挙動を歪率の変化から分析するために、その挙動特性を 4 段階 (I~IV) に分けて Fig. 2 に示す。

この曲線の初期段階 I (歪率: 0~5%) は、試片とプランジャの表面接触角度のズレやサンプル表面の微細な凹凸との部分的接触の影響を受けていると考えられた。比例段階 II (歪率: 5~10%) の曲線 b-c は直線近似できることから、試片は弾性的挙動を示すと考えられる。したがって、この段階の近似直線の荷重範囲からクリープ試験に必要な载荷荷重を算出することが可能である。構造変形段階 III (歪率: 10~50%) では、試片が圧縮されて破断点 d に至る挙動を示す。曲線 d-f で示される圧密段階 IV (歪率: 50~95%) では、破断点 d から次の変曲点 e を経て、最大荷重点 f に至る挙動を示し、破断されたチーズの圧縮がさらに進み、その圧密速度は変曲点 e 前後で急激に変化することを示している。

2.3.2 クリープ試験

クリープ測定曲線 (Fig. 3(a)) を 4 要素マックスウェル・フォークトモデル (Fig. 3(b)) で近似して得られる粘弾性パラメータは、瞬間弾性率 E_0 [Pa]、遅延弾性率 E_1 [Pa]、遅延粘性率 η_1 [Pa·S] および 永久粘性率 η_N [Pa·S] である [17]。これらのパラメータを用いてクリープ測定曲線は次式 (1) のように表わすことができる。

Fig. 2 Typical stages of sample fracture obtained from force-fracture rate curve.

Fig. 3 Creep curve and parameter estimation model.

$$\varepsilon = \sigma_x \left(\frac{1}{E_0} + \frac{1}{E_1} \left(1 - \exp\left(-\frac{E_1}{\eta_1} t\right) + \frac{1}{\eta_N} t \right) \right) \quad (1)$$

ここで ε , σ_x および t はそれぞれ歪, 载荷時の応力および時間を示す。また, その推算例として, 供試サンプル No.4 に対応する粘弾性パラメータを Fig. 3(a) に示す。

2.3.3 テクスチャ試験

サンプル試片を 2 バイト圧縮することにより得られる荷重-移動距離曲線すなわちテクスチャプロファイル曲線 (Fig. 4) から推算されるパラメータは, 1 バイト目の最大荷重 (maximum force of texture test) [N] およびそれを供試サンプルの「かたさ」を示す指標としたかたさ荷重 (hardness force) [N], 供試サンプルとプランジャの接触面の単位面積当たりの「かたさ」指標を示すかたさ応力 (hardness) [N/m^2], ガム性荷重 (gumminess force) [N], ガム性応力 (gumminess) [N/m^2], A1 エネルギー (energy of A1) [J/m^3], A2 エネルギー (energy of A2) [J/m^3], 凝集性 (cohesiveness) [-] および付着性 (adhesiveness) [J/m^3] である。

Fig. 4 Texture profile and estimation parameters.

2.4 分析型官能評価法

実際の官能評価に使用する実用語語を選定するために, 先ず ISO11035:19[18] および ISO22935-2/IDF99-2[19] に推奨された手順に従ってチェダーチーズの評価に関する 106 語の収集用語を得た。次に 13 名の分析型パネル候補者 (男性 10 名, 女性 3 名, 30~50 代) による収集用語を使用した予備官能評価により, 実用語語を選択した。この評価は 15 センチ線尺度法を用いて繰り返し 3 回行い, 得られた評価スコアに対して相関分析と分散分析を適用して用語間の類似度と認知度を算出した。さらに選定した実用語語について分析型パネルによる定義共有化作業を行い, 最終的に外観属性 6 語, 香り, 風味, 味を含む香味属性 22 語および食感属性 10 語からなる 38 語を選定した。その結果得られたチェダーチーズの評価属性と実用語語のキーワードを Table 3 に示す。

実用語語 38 語による官能評価は 10 名の分析型パネル (男性 9 名, 女性 1 名) を用い, 供試サンプルの提示順をランダム化し, 両端を固定した 0 から 15 cm の線尺度法により実施した。この評価は官能評価室内に

Table 3 Sensory attributes and terms.

Sensory attributes			
Appearance	Flavor (Odor, flavor & taste)		Texture
Terms (6)	Terms (22)		Terms (10)
Yellow	Fruity	Heating	Hardness
White	Yogurt	Lactic acid	Elasticity
Dry	Milky	Acetic acid	Crispness
Gas hole	Butyric acid	Diacetyl	Graininess
Crack	Soy sauce	Sweetness	Paste-like
Stone	Bread-like yeasty	Saltiness	Smoothness
	Alcoholic yeasty	Bitterness	Stickiness
	Vegemite-like yeasty	Astringency	Meltability
	Nuts	Harsh taste	Roughness
	Mushroom	Umami	Dried
	Potato-like	Sourness	texture
Total sensory terms: 38			

設けたパネル用ブースの白い机の上にサンプルを供試して室温および蛍光灯条件下で実施し、同一サンプルを対象にして3回の繰り返しセッションを行った。また、それぞれのセッション毎に口腔内を洗浄するために、紙コップ内の洗浄水をパネルに供給した。パネルには、フィンガーテスト、匂い嗅ぎおよびサンプルを嚥下して評価することを許可した。

2.5 消費者の嗜好度調査法

消費者の嗜好度、つまり「おいしさ」評価は、日本の一般的な家庭においてチーズ製品の購入機会が多いと考えられる30~50代の主婦59名をパネルに選定して実施した。このパネルの選定にあたっては、事前アンケートにより調査目的とは極端に異なる食嗜好を有するパネルを除外した。また、実際の調査は分析型パネルと同様の環境下において実施し、ヘドニック法による9点尺度法で評価した。

2.6 統計解析法およびANNモデリング

粘弾性パラメータおよび官能評価スコアのデータセットを対象にして、市販されている統計解析ソフト JMP10.0 Pro (SAS Inst., co., Cary, N.C., U.S.A) を適用して、主成分分析、PLS回帰分析 (Partial Least Square regression) およびニューラルネットワーク (ANN) モデリングを行った。

主成分分析では、これらのデータセット間の相互関係を分析するために、カイザー基準の固有値が1.0以上を示す主成分についてヴァリマックス回転を適用し、データセットが顕著に分類される主成分を求めた。

PLS回帰分析では、説明変数に粘弾性パラメータ、目的変数に官能評価スコアおよび嗜好度を用い、それらの目的変数を精度良く説明できるパラメータの組み合わせを探索した。得られたモデルの目的変数の予測精度は重相関係数 (R^2) で評価した。また、説明変数の選択とそれらの目的変数に対する寄与度が必要な場合にはステップワイズPLS-VIP (Variable importance in projection) 法を適用し、VIP値とモデル係数 (Weight of model; W) を閾値として用いた。この方法により特定された変数とその寄与度は、ANNモデリングにおける入力データとして用いた。

Fig. 5に3層の知覚ネットワークからなるANNモデルの構造を示す。このANNモデルは入力層 ($X_1, X_2, \dots, X_i$) と出力層 ($Y_1, Y_2, \dots, Y_k$) およびその間のノード数3の隠れ層 ($Z_1, Z_2, \dots, Z_j$) により構成される。このモデルの入力層に粘弾性パラメータ、出力層に官能評価スコアおよび嗜好度を適用し、それらの間の相互関係を解析するモデルを構築した。モデリングの過程では、最大学習回数およびそのツアー数をそれぞれ100回と設定した。また、構築したモデルが学習モデルに

過剰フィットすることを防止するためにオーバーフィットペナルティおよび収束基準をそれぞれ0.001および0.00001に設定し、構築したモデルの予測精度を評価する指標として R^2 および二乗平均平方根誤差 (RMSE) を用いた。

3. 結果および考察

3.1 粘弾性計測

3.1.1

サンプル試片の破断試験で得られた荷重-歪率曲線を Fig. 6に示す。これらの測定曲線の挙動はサンプル No.6を除いて類似した傾向を示すことが確認された。いずれのサンプルでも試片の圧縮とともにその中央部が徐々に膨らみ、その表面に亀裂が生じ、測定曲線上に破断点に相当する変曲点を示した。破断点通過後も圧縮を継続し最大荷重点に到達すると、試片が薄い円柱平板状に変形して側面の割れが観測された。また除重した試片の表面に放射状の亀裂が生じていることがわかった。破断点の最小値はサンプル No.5の荷重34.6 N、歪率20.8%であり、最大値はNo.6の104.2 N、61.4%であった。また最大荷重点の荷重と歪率は、サンプル No.2の103 N、93.8%~No.6の191.6 N、93.3%の

Fig. 5 An example of a 3-layer artificial neural network.

Fig. 6 Force-fracture rate curve of samples.

範囲にあった。特に、サンプル No.6 は他のサンプルと比較して顕著に高い破断点と最大荷重点を示し、固い食感を有することがわかった。これらの曲線の傾向から、供試サンプルは歪率 20.8~61.4% の範囲内で破断点を示し、歪率約 90% 以上で最大荷重を示すことがわかった。

3.1.2 粘弾性特性の主成分分析

粘弾性計測試験で得た粘弾性パラメータ 17 項目を、それらの類似性によって分類するために主成分分析を適用した。その結果、Table 4 に示すようにパラメータは 3 つの主成分に分類でき、その累積寄与率は 89.8% であった。粘弾性 (Viscoelasticity) パラメータの主成分を一般的主成分の表記 (PC) と区別するために VPC と表記した。

VPC1 にはテクスチャとクリープ試験のパラメータが区分された (寄与率 60.5%)。VPC2 と VPC3 には、それぞれ破断試験のパラメータとテクスチャ試験の付着性が区分され、その寄与率は 20.4% と 8.8% であった。これらの結果から、粘弾性パラメータ 17 項目は、破断試験のパラメータとその他の試験のパラメータに大別されることがわかった。

供試サンプルの粘弾性特性を明らかにするために、Fig. 7 に VPC1 と VPC2 に分類された供試サンプルの主成分得点によるポジショニングマップを示した。図中の円内に含まれる 9 サンプルの特徴は、VPC1 に含まれるテクスチャとクリープ試験のパラメータ (寄与率 60.5%) と VPC2 の破断試験パラメータの主成分得点 (寄与率 20.4%) によって説明されることがわかった。他方、円

Fig. 7 Positioning map demonstrating viscoelastic characteristics of the samples.

外にプロットされた No.6 は、VPC1 と VPC2 双方の主成分得点に影響を受ける特異なサンプルであり、Fig. 5 で示したように高い破断および最大荷重値に依存して他のサンプルと比べて固い食感を与えることがわかった。

3.2 官能評価と嗜好度の調査

3.2.1 官能評価特性の分類

実用官能評価用語 38 語の評価スコアと消費者パネルによる嗜好度の平均値、分散、標準偏差をそれぞれ Table 5 に示した。評価スコアおよび嗜好度の分散分析結果については、その有意確率 (p 値) を示し、嗜好度にはその得点順位をそれぞれ示した。

官能評価用語「パン様の酵母」($p=0.37$)、「マッシュルーム」($p=0.91$)、「ポテト」($p=0.94$) などの風味および「甘味」($p=0.06$) は、5% の有意水準でサンプル間にスコアの差がないことがわかった。その要因には、評価用語の評価対象がすべての供試サンプルに同等程度に存在する場合と評価用語のサンプル識別能力がない場合の 2 通りがあると考えられたが、分散分析の結果のみからではその判定はできなかった。そのため、これらの用語についてはサンプル差を識別できるとはいえない評価用語であると判断した。しかしながら、評価用語のサンプル識別能力と他の評価用語との相互関係は独立の事象であるため、評価用語間の相互関係に関する分析は続行可能と考えられた。

評価スコアおよび嗜好度に相関分析を適用した結果、相関係数 $|R| > 0.80$ を基準として、相関の高い組み合わせが 741 組中 90 組あった。そのうち評価属性が異なる項目間で高い相関がみられた組み合わせは 29 組であった。他方、香味属性の「ヨーグルト臭」($R=0.86$, $p < 0.05$) と「甘味」($R=0.83$, $p < 0.05$) は嗜好度と高い相関を示し、これらの用語は嗜好度に寄与する官能評価特性であることがわかった。

3.2.2 官能評価スコアの主成分分析

官能評価スコアに主成分分析を適用して得られた 6

Table 4 Three viscoelastic principal components of the samples.

Viscoelastic parameters	Test method*	VPC1	VPC2	VPC3
Maximum force of texture test	T	0.99	-0.03	0.02
hardness force	T	0.99	-0.03	0.02
hardness	T	0.99	-0.03	0.02
energy of A1	T	0.99	0.02	0.09
gumminess force	T	0.98	0.05	0.08
gumminess	T	0.98	0.05	0.08
energy of A2	T	0.97	0.11	0.16
viscosity η_N	C	0.96	-0.03	0.09
viscosity η_1	C	0.85	0.09	0.39
elasticity E_1	C	0.83	0.00	0.47
elasticity E_0	C	0.63	0.02	-0.14
cohesiveness	T	-0.60	0.48	0.36
energy of fracture	F	0.04	0.99	0.01
breaking force	F	0.29	0.91	-0.10
maximum force	F	0.11	0.85	0.12
breaking rate	F	-0.53	0.83	0.03
adhesiveness	T	0.16	0.04	0.95
Variance		10.28	3.47	1.50
Percent (%)		60.49	20.44	8.84
Cumulative percent (%)		60.49	80.93	89.76

*: T, C and F for texture, creep and fracture test, respectively.

Table 5 Evaluated scores of sensory panel and consumer palatability.

Attributes	Sensory terms	No.1		No.2		No.3		No.4		No.5		No.6		No.7		No.8		No.9		No.10		P value
		AV	SD	AV	SD	AV	SD	AV	SD	AV	SD	AV	SD	AV	SD	AV	SD	AV	SD	AV	SD	
Appearance	Yellow	9.16	1.74	3.37	1.14	7.33	1.83	9.65	2.07	9.35	1.97	9.16	1.88	5.37	1.61	9.49	2.11	3.11	0.95	10.00	1.65	<.0001**
	White	5.20	2.11	11.40	1.24	6.97	2.04	5.02	2.20	5.12	2.18	5.33	2.21	9.43	1.59	5.24	2.12	11.65	1.08	4.74	1.83	<.0001**
	Dry	3.60	2.67	3.55	2.79	5.85	3.26	4.05	2.73	6.04	3.31	3.64	2.82	4.33	3.01	4.29	2.95	3.39	2.44	4.25	2.91	0.0016*
	Gas hole	7.53	0.20	7.50	0.02	8.14	1.01	7.56	0.21	7.85	0.88	7.50	0.03	7.53	0.13	7.56	0.30	7.53	0.15	7.53	0.17	<.0001**
	Crack	7.53	0.14	7.58	0.31	10.11	1.66	7.79	0.69	9.52	1.50	7.70	0.48	7.91	0.74	7.65	0.62	7.57	0.37	7.69	0.41	<.0001**
	Stone	7.49	0.03	7.50	0.00	7.70	0.44	7.55	0.19	7.65	0.44	7.50	0.02	7.54	0.15	7.50	0.00	7.50	0.03	7.51	0.08	0.0003*
	Friuity	3.28	1.86	5.35	2.98	5.04	1.94	3.88	2.09	3.48	2.05	3.10	1.94	3.90	1.93	4.66	2.29	3.73	2.36	3.25	1.74	<.0001**
	Yogurt	2.86	1.88	3.78	1.94	2.72	1.84	2.01	0.65	2.06	0.99	2.38	1.29	3.30	1.74	2.87	1.65	3.94	2.09	2.34	1.02	<.0001**
	Milky	3.76	2.10	6.09	2.46	3.33	1.77	2.84	1.41	2.43	1.03	3.61	2.61	5.46	2.85	4.22	2.25	5.51	2.85	3.42	1.96	<.0001**
	Butyric acid	2.97	1.86	2.34	1.11	4.83	3.13	4.32	2.55	4.78	3.07	1.98	0.63	3.21	1.73	2.72	1.31	2.66	1.65	2.66	1.14	<.0001**
Flavor	Soy sauce	3.03	2.15	2.24	1.44	5.73	2.23	5.94	1.91	5.63	2.74	2.19	1.10	3.29	1.94	2.97	1.90	2.10	0.78	2.53	1.30	<.0001**
	Bread-like yeast	7.82	0.44	8.19	1.02	7.77	0.44	7.93	0.66	7.98	0.75	7.71	0.70	7.93	0.82	7.86	0.58	8.00	0.83	8.04	0.90	0.3675
	Alcoholic yeast	7.72	0.44	8.54	1.55	7.71	0.32	7.94	0.68	7.76	0.48	7.51	0.07	7.68	0.37	7.72	0.41	7.68	0.33	7.64	0.27	<.0001**
	Vegemite-like yeast	7.67	0.57	7.55	0.18	7.73	0.41	8.41	1.44	8.26	1.02	7.51	0.06	7.64	0.36	7.56	0.21	7.56	0.25	7.66	0.58	<.0001**
	Nuts	3.04	1.76	2.04	0.62	3.73	2.11	3.42	2.12	3.97	2.61	2.31	1.12	2.90	1.21	2.94	1.29	2.35	1.02	2.39	1.00	<.0001**
	Mushroom	1.93	0.64	2.10	1.14	1.87	0.75	1.95	1.04	1.93	0.92	1.87	0.87	2.07	1.12	1.86	0.88	1.90	0.71	2.21	1.34	0.9067
	Potato-like	2.42	0.88	2.30	1.06	2.40	1.04	2.58	1.14	2.65	1.47	2.36	1.55	2.33	1.19	2.39	1.33	2.60	1.43	2.23	0.95	0.9426
	Heating	1.94	1.31	1.64	0.33	1.79	0.72	2.69	2.25	2.09	1.38	1.65	0.37	1.67	0.31	1.77	0.63	1.67	0.42	1.81	0.70	0.0028*
	Lactic acid	3.80	2.30	4.48	2.37	3.69	1.81	3.48	2.16	4.23	2.32	2.20	0.88	4.55	2.28	3.73	2.02	4.80	2.61	3.47	2.39	0.0004*
	Acetic acid	2.42	1.16	2.05	0.86	3.26	1.75	2.42	1.20	2.92	1.63	1.68	0.34	2.34	0.89	2.18	0.95	2.61	1.55	2.31	1.19	<.0001**
Texture	Diacetyl	2.90	1.77	3.94	2.02	2.50	1.51	2.35	1.05	2.44	1.41	1.91	0.86	3.41	1.76	2.92	1.75	4.29	2.33	2.34	1.29	<.0001**
	Sweetness	5.15	2.38	6.19	2.35	5.46	2.36	5.01	2.40	4.30	2.26	4.68	2.23	5.73	2.53	5.42	2.05	5.57	2.69	4.47	2.44	0.0574
	Saltiness	6.17	2.52	4.89	1.89	8.61	2.14	7.49	1.37	9.41	2.01	5.85	2.67	6.11	2.00	6.16	1.90	5.66	2.52	5.86	2.31	<.0001**
	Bitterness	5.81	2.58	5.29	3.00	4.69	2.01	8.04	2.71	6.46	2.26	2.71	1.56	4.74	2.62	4.58	2.46	3.50	1.95	4.38	2.66	<.0001**
	Astringency	5.00	2.76	4.68	2.70	4.84	2.05	6.99	2.98	5.30	2.58	2.47	1.29	4.62	2.64	4.51	2.87	4.09	2.64	4.10	2.66	<.0001**
	Harsh taste	2.86	1.75	2.64	1.65	2.88	1.99	5.03	2.83	4.04	2.25	1.80	0.45	2.94	1.84	3.06	2.21	2.58	1.75	2.78	1.94	<.0001**
	Umami	5.45	2.28	3.83	1.85	9.84	2.04	7.00	1.94	7.90	2.54	3.70	2.06	5.24	1.92	5.35	2.13	4.06	1.82	4.20	2.12	<.0001**
	Soueness	5.62	2.66	5.57	3.14	5.79	2.07	5.38	2.08	5.99	2.00	3.16	1.68	6.45	2.97	5.21	2.19	6.41	3.03	5.43	2.82	<.0001**
	Hardness	6.57	1.85	5.43	1.91	8.12	1.76	6.59	1.85	7.81	2.16	11.17	1.42	7.12	1.34	6.83	1.72	8.75	2.00	6.21	1.90	<.0001**
	Elasticity	7.48	2.13	6.80	2.65	4.73	1.90	6.63	2.30	4.86	1.86	9.64	3.27	6.54	2.10	7.65	1.68	7.85	2.46	6.93	2.16	<.0001**
Palatability	Crispness	6.76	2.15	5.86	2.26	8.89	1.96	6.69	1.87	8.07	2.30	9.69	2.54	6.66	2.07	7.05	1.70	8.04	2.18	7.23	2.40	<.0001**
	Graininess	3.37	2.08	2.83	1.89	6.93	2.64	4.77	2.55	6.41	2.95	7.27	3.32	4.31	2.63	3.92	2.26	6.57	2.72	6.81	3.11	<.0001**
	Paste-like	6.17	2.63	7.93	2.43	4.09	1.83	7.18	2.68	5.33	2.69	2.40	1.21	5.57	2.44	6.55	2.47	3.91	2.01	6.02	2.82	<.0001**
	Smoothness	8.57	1.72	9.12	1.98	5.54	1.93	8.20	1.91	6.27	2.23	3.78	1.70	7.56	1.77	8.03	1.70	5.20	1.81	5.90	2.33	<.0001**
	Stickiness	7.64	2.70	8.84	1.80	5.08	2.38	8.41	1.90	6.15	2.64	3.24	1.67	6.80	2.40	7.65	1.92	4.58	2.15	5.98	2.20	<.0001**
	Meltability	7.18	1.55	6.89	2.63	7.31	2.21	7.51	1.96	7.90	2.21	4.40	2.57	7.29	1.97	6.96	1.42	6.45	2.12	6.36	2.06	<.0001**
	Roughness	3.33	2.09	3.00	1.95	7.34	3.05	4.13	2.81	6.82	2.88	5.96	3.74	3.36	2.34	3.79	2.53	5.43	2.98	5.79	2.96	<.0001**
	Dried texture	2.88	2.18	2.29	1.53	5.88	2.68	3.47	2.66	5.90	2.87	6.63	3.17	2.87	2.09	2.66	1.82	5.59	3.03	4.98	2.90	<.0001**
	Palatability	5.93	1.53	6.24	1.2179	6.02	1.8	5.61	1.5	5.31	1.71	5.51	1.88	5.97	1.39	6.27	1.52	6.39	1.22	5.75	1.53	0.0012*
	Order of palatability	6 ^{A,B***}	3 ^A	4 ^{A,B}	8 ^{A,B}	10 ^B	9 ^{A,B}	5 ^{A,B}	1 ^A	2 ^A	7 ^{A,B}	6 ^{A,B}	1 ^A	7 ^{A,B}	3 ^A	4 ^{A,B}	8 ^{A,B}	10 ^B	9 ^{A,B}	5 ^{A,B}	1 ^A	7 ^{A,B}

AV; Average, SD; Standard Deviations, *, P<0.05, **, P<0.001, *** ; There were significant differences among the means of samples not having the same letter A and B (P<0.05).

つの主成分とその因子負荷量および寄与率を Table 6 に示す。この表では粘弾性の VPC と区別して官能評価 (Sensory evaluation) スコアの主成分を SPC と表記した。

SPC1 には主に外観属性と香味属性の評価用語が含まれたが、いずれも前述した評価用語の相関分析において異なる評価属性の項目であるにも関わらず高い相関を示す組み合わせが含まれていた。他方、SPC2 には食感属性用語のみが含まれており、いずれの用語間においても相関が高いことを確認した。SPC3 には $|R| > 0.60$ ($p < 0.05$) の相関をもつ外観属性の「白色」、「黄色」と香味属性の用語が複数含まれた。これらの評価用語はチェダーチーズなどの乳製品のおいしさに寄与する用語であることが知られている [20–22]。SPC4 には、「加

熱風味」、「ポテト風味」、「エグ味」($p < 0.0001$) および「苦味」のように、チーズのディフェクト、すなわち欠味や不快な風味として認識される用語が含まれた [23–27]。SPC5 および SPC6 に含まれた「マッシュルーム」と「パン様の酵母」風味、および「お酒様の酵母風味」と「フルーティ」の間には $R = 0.67 \sim 0.70$ の相関がある評価用語がそれぞれ含まれることがわかった。

これらの主成分分析結果より、官能評価用語はその評価属性に関わらず区分することが可能であることがわかり、それら主成分の共通点を基にそれぞれ SPC1「外観と味」、SPC2「食感」、SPC3「乳製品のおいしさに関与する基本特性」、SPC4「ディフェクト」、SPC5「マッシュルームとパン様の酵母風味」および SPC6「お酒様の酵母風味とフルーティ」とラベリングした。これら 6

Table 6 Principal components obtained from sensory scores and the label of principal components.

Label of principal components	Sensory attribute	Sensory terms	SPC1	SPC2	SPC3	SPC4	SPC5	SPC6
Appearance and acceptable tastes	Appearance	Stone	0.96					
		Gas hole	0.95					
		Crack	0.94					
		Dry	0.92					
	Flavor	Umami	0.92					
		Acetic acid	0.89					
		Butyric acid	0.86					
		Saltiness	0.83					
		Nuts	0.80					
		Soy sauce	0.76					
	Texture	Meltability	0.64					
		Elasticity	−0.91					
Rehological properties	Texture	Smoothness		0.97				
		Stickiness		0.95				
		Paste-like		0.90				
		Roughness	−0.79					
		Hardness	−0.86					
		Crispness	−0.89					
		Graininess	−0.91					
		Dried texture	−0.95					
Basic properties contributing to palatability of dairy products	Appearance	White			0.96			
		Diacetyl			0.94			
		Yogurt			0.90			
	Flavor	Lactic acid			0.81			
		Milky			0.80			
		Sweetness			0.75			
		Soureness			0.61			
	Appearance	Yellow			−0.96			
Flavors act as defects	Flavor	Vegemite-like yeasty				0.85		
		Heating				0.83		
		Potato-like				0.83		
		Harsh taste				0.81		
		Bitterness				0.70		
		Astringency				0.68		
Mushroom and bread-like yeasty	Flavor	Mushroom					0.89	
		Bread-like yeasty					0.75	
Alcoholic yeasty and fruity	Flavor	Alcoholic yeasty						0.63
		Friuty						0.59
Variance percent (%)			10.83	9.32	7.35	5.51	2.48	1.49
			28.51	24.54	19.34	14.49	6.52	3.92
Cumulative percent (%)			28.51	53.05	72.39	86.88	93.40	97.32

つの主成分は予め分類した官能評価属性とは異なる評価対象属性に分類されたが、これは官能評価では人の五感コミュニケーションを介して評価したスコアを提供したことを示していると推察した。通常、官能評価ではパネルに対して評価属性に分類した用語について独立に評価する訓練を実施しているが、個々の用語について完全に独立した用語としてみなすには限界があり、すでに評価パネリスト個人の潜在意識下で構成されている官能評価属性および用語間の相関を排除することは困難であると考えられた。したがって、KJ法などを利用して整理して設定された評価属性および用語を用いて官能評価を行い、そのスコアを主成分分析することにより、パネリストがすでに保有している独自の官能評価体系を抽出することが可能であると考えられ、その抽出された官能評価体系を採用することにより、個人の五感コミュニケーション効果を含めた官能評価法を創出する可能性が残されていると考えられた。

官能評価スコアの主成分分析から分類された新たな官能評価属性に基づいて、SPC1と2およびSPC3と4の主成分得点による供試サンプルのポジショニングマップをそれぞれFig. 8(a)および(b)に示し、またこれらのサンプルの嗜好度とその順位をTable 7に示す。

Fig. 8(a)に示すように、官能評価用語の主成分得点に影響を受けるサンプルはグループA、B、Cに分けら

Table 7 Palatability scores and ranking.

Sample	Palatability	
	Score	Ranking
No.1	5.93	6
No.2	6.24	3
No.3	6.02	4
No.4	5.61	8
No.5	5.31	10
No.6	5.51	9
No.7	5.97	5
No.8	6.27	2
No.9	6.39	1
No.10	5.75	7

れることがわかった。グループAはSPC1の主成分得点に影響を受け、食感属性用語の影響を受けるサンプルはグループBとCに分けられた。Fig. 8(b)のポジショニングマップに示すように、大部分のサンプルがグループAに含まれ、SPC3の評価用語に影響を受けるサンプルであることがわかった。サンプルNo. 9はこの平面の第一象限にプロットされ、Table 7で示されるように最高の嗜好度順位にあることがわかった。逆に、第4象限にプロットされたサンプルNo.4と5は、グループAに比べても低い嗜好度順位を示した。これらのポジショニングマップから、嗜好度順位に影響を及ぼす主成分はSPC3とSPC4であることがわかった。したがって、SPC3を「乳製品のおいしさに関与する基本特性」、またSPC4を不快な風味すなわち「ディフェクト」とラベリングしたことには妥当性があると考えた。これらの結果を嗜好度に寄与する主成分得点の観点から評価すると、Fig. 8(b)に示したSPC3の貢献度が最も高く、(a)に示したSPC1と2の示す貢献度よりも強いことがわかった。したがって、SPC3に含まれる評価スコアの嗜好度への貢献度は、例えばSPC1の主成分得点の上位4位までを占める外観属性用語よりも高いことがわかった。

Fig. 8 Positioning map by sensory characteristics of the samples.

3.3 咀嚼過程における食感と粘弾性計測特性との対応関係

Table 6の主成分分析結果に示すように、SPC2に含まれる食感属性の評価用語は、機器計測で得られる粘弾性パラメータと高い相関を示すことが予測された。そこで、粘弾性パラメータと食感用語スコアをデータベースとして両者の対応関係を咀嚼回数に基づいて整理することとした。Fig. 9に典型的な2バイト咀嚼による荷重経時変化曲線と粘弾性試験法の対応関係を示した。この曲線にしたがって人が感じる食感を図中の(1)、(2)、(3)の3段階に分類すると、3つの試験法は(1')クリープ、(2')破断、(3')テクスチャ試験に相当すると考えられた。ここで、クリープ試験では破断試験で得られる荷重-歪率曲線の初期段階に出現する線形近似直

Typical force vs. time curve measured during two bites

- (1) Small deformation shortly after first touch of sample
- (2) Large deformation until first bite
- (3) Large deformation until second bite

Instrumental test

- (1') Creep test (2') Fracture test (3') Texture test

Fig. 9 Typical force vs. time curve measured during two bites comparing with creep, fracture and texture tests.

線の範囲, すなわちサンプルが弾性的挙動を示す範囲の最大荷重を載荷荷重として用いた. さらに両試験法で得られるパラメータの定義も一致することから, クリープ試験および破断試験で得られた粘弾性パラメータはデータ解析においては同一の試験カテゴリーで得られるパラメータとして扱えると考えられた. 他方, テクスチャ試験パラメータは2バイトによる荷重経時変化曲線から推算されるパラメータであり, その定義はこれまで述べた2つの試験法のそれとは異なる. そのため, この試験法で得られるパラメータはデータ解析でも単独に取り扱う必要があると考えた. これらの考察に基づいて, Fig. 9 に示した人の口腔内で感じる食感変化と粘弾性試験法との対応関係を時系列的に説明可能であると考えられた.

この考え方に従って, 粘弾性パラメータと食感評価スコアとの相互関連性を明らかにするためには, その評価スコアが Fig. 9 の曲線中のどの段階で生じたのかを明確にし, その段階に対応する粘弾性試験法を選択する必要があると考えた. その手順を説明するためのフローチャートを考案して Fig. 10 に示す. この図に示すように, サンプル試片を3つの試験法(図中の IC, IF および IT)に供し, これらの試験法の異なる変形条件下で得られる粘弾性パラメータを測定し, それらの中から官能評価(図中の SA, SC)スコアに対応するパラメータを選択することによって, 粘弾性特性と食感との対応関係を明らかにする. ここで選択したパラメータの組み合わせによっては PLS-VIP による変数選択を行い, これらの変数を入力とする ANN モデリングを行う. この手順に従って機器計測パラメータと評価スコアとの相互関連性を明らかにするモデルを構築するこ

とにより, 官能評価スコアの予測に最適なパラメータの組み合わせを求めることができ, 機器計測による物性と官能評価で得たデータを適切に比較検討できるようになると考えた. そこで, 次節からはこのフローチャートに従って供試サンプルの粘弾性パラメータと食感評価スコアおよび嗜好度の相互関連性について考察した.

3.4 食感評価スコアの予測に最適な粘弾性特性の探索法

フローチャート (Fig. 10) に示した試験法と官能評価によって, 食感評価スコアの予測に最適な試験法の組み合わせを PLS 回帰分析により探索した. 3.3 で述べたように, 説明変数としたパラメータのうち, テクスチャ試験で得られたパラメータは独自の試験カテゴリーで得られたパラメータとして扱い, 他の2つの試験法で得られたパラメータと区分して取り扱った. これら2つの試験カテゴリーに分類したパラメータを PLS 回帰分析の説明変数とし, 目的変数の食感評価スコアを予測する回帰式を求めた. これらの中で最も高い予測精度を示す回帰式のパラメータの組み合わせを選択し, ANN モデリングによりパラメータ群と評価スコアとの相互関係を予測した.

このようにして得られた ANN モデルは, 粘弾性パラメータおよび食感評価スコア間の非線形関係やパラメータ間のシナジー効果を応答曲面により表示することが可能である. さらに, モデルに適用するパラメータの値を増減させることにより, 現在実施されている粘弾性計測と官能評価などの結果を数値シミュレーションできると考えた.

Fig. 10 Procedure to construct optimal ANN model by using PLS as a selection indicator.

3.4.1 食感評価と対応する粘弾性試験法の組み合わせ

Table 8 に食感属性 10 語の評価スコアに関する PLS 回帰式の予測精度一覧を示す。それぞれの評価スコアについて、1) ~3) に試験法を単独で使した場合、4) ~6) に組み合わせた場合を口腔内での食感経時変化 (Fig. 9) に従って示す。

食感評価スコアは、複数の試験法を組み合わせで使した場合に最も高い予測精度を示す傾向が認められた。これらの試験法の組み合わせ方法について、まず、回帰式の予測精度、次に粘弾性パラメータが同一の試験カテゴリーで得られたパラメータとして取り扱える組み合わせである可能性、最終的に、他の組み合わせ法との予測精度の差の有意性の 3 つの基準に基づいて判断し、Fig. 10 に示すような煩雑な解析手順、すなわち PLS-VIP による変数選択の必要がなく、最も高い食感評価スコアの予測精度を得られる組み合わせ法を求め、それらを a) ~c) に分類して述べた。

a) すべての試験法の組み合わせ

「ざらつき」、「なめらかさ」および「乾燥した食感」は、すべての試験法で得られたパラメータを使用した場合に最も予測精度が高く ($R^2=0.89, 0.99$ および 0.96)、これらの食感に対しては、供試サンプルの初期圧縮で生ずる微小変形とその後の咀嚼による大変形に関係するパラメータが複合的に作用していると考えられた。

b) 任意に選んだ試験法の組み合わせ

「かたさ」、「弾力」、「菌切れのよさ」、「ねっとり感」および「ペースト状」では、2~3 種の試験法を任意に組み合わせれば、 $R^2=0.96\sim0.99$ の範囲で高精度の予測が可能であることがわかった。すなわち、これらの評価スコアの予測にはパラメータの種類を厳選するよりも、少なくとも 2 つの試験法を組み合わせることにより高い予測精度を得られることがわかった。例えば、「かたさ」と「弾力」は 4) もしくは 5) の組み合わせで最も高い予測精度を示した。これは 2) の場合の予測精度 $R^2=0.94$ がクリープとテクスチャ試験をそれぞれ単独で使した場合の $R^2=0.28\sim0.44$ と比較して顕著に高く、破断試験のパラメータの重要性がわかった。他方、「菌切れのよさ」、「ねっとり感」および「ペースト状」の評価スコアは、いずれも単独試験 1) の場合の予測精度が、同様に 2) と 3) を使用した場合と比べて顕著に低いことから、この 3 語の予測精度に対するクリープ試験の重要性は低いと考えられた。

c) テクスチャ試験の単独使用

これまでの試験法の組み合わせでその予測精度について言及できなかった「口溶けのはやさ」と「粗さ」は、テクスチャ試験を単独で使した場合に、それぞれ $R^2=0.82\sim0.87$ の範囲で高い予測精度を示したが、これはどちらの用語についても咀嚼の繰り返しによる試片の

Table 8 Prediction accuracy of the PLS regressions.

Test methods of parameters	Number of parameters	Objective sensory terms	Number of PLS factor	Degree of conformance**			Test methods of parameters	Number of parameters	Objective sensory terms	Number of PLS factor	Degree of conformance**		
				R ²	(R ²)*	RMSE					R ²	(R ²)*	RMSE
1) Creep	4		1	0.28	0.19	0.78	1) Creep	4		1	0.63	0.59	0.88
2) Fracture	4		2	0.94	0.93	0.42	2) Fracture	4		2	0.82	0.79	0.71
3) Texture	9		1	0.44	0.37	0.85	3) Texture	9		1	0.63	0.58	0.89
4) Creep and fracture	8	Hardness	4	0.96	0.95	0.35	4) Creep and fracture	8	Smoothness	1	0.92	0.91	0.50
5) Fracture and texture	13		4	0.96	0.95	0.35	5) Fracture and texture	13		2	0.91	0.90	0.53
6) Creep, fracture and texture	17		2	0.90	0.89	0.36	6) Creep, fracture and texture	17		2	0.99	0.99	0.39
1) Creep	4		***	-	-	-	1) Creep	4		1	0.56	0.51	0.94
2) Fracture	4		1	0.79	0.77	0.61	2) Fracture	4		2	0.81	0.78	0.75
3) Texture	9		-	-	-	-	3) Texture	9		3	0.86	0.84	0.66
4) Creep and fracture	8	Elasticity	1	0.86	0.84	0.53	4) Creep and fracture	8	Stickiness	6	0.99	0.99	0.18
5) Fracture and texture	13		5	0.97	0.96	0.28	5) Fracture and texture	13		8	0.99	0.99	0.03
6) Creep, fracture and texture	17		2	0.92	0.91	0.41	6) Creep, fracture and texture	17		8	0.99	0.99	0.02
1) Creep	4		3	0.57	0.51	0.61	1) Creep	4		-	-	-	-
2) Fracture	4		2	0.87	0.86	0.49	2) Fracture	4		1	0.69	0.65	0.48
3) Texture	9		3	0.82	0.80	0.47	3) Texture	9		4	0.82	0.80	0.40
4) Creep and fracture	8	Crispness	4	0.97	0.97	0.20	4) Creep and fracture	8	Meltability	1	0.71	0.67	0.47
5) Fracture and texture	13		3	0.94	0.93	0.30	5) Fracture and texture	13		2	0.81	0.78	0.41
6) Creep, fracture and texture	17		4	0.97	0.97	0.20	6) Creep, fracture and texture	17		2	0.81	0.78	0.41
1) Creep	4		1	0.74	0.71	0.77	1) Creep	4		1	0.68	0.64	0.78
2) Fracture	4		3	0.75	0.72	0.76	2) Fracture	4		-	-	-	-
3) Texture	9		1	0.68	0.64	0.82	3) Texture	9		3	0.87	0.85	0.56
4) Creep and fracture	8	Graininess	1	0.87	0.85	0.60	4) Creep and fracture	8	Roughness	1	0.72	0.68	0.75
5) Fracture and texture	13		1	0.76	0.73	0.75	5) Fracture and texture	13		1	0.73	0.69	0.74
6) Creep, fracture and texture	17		2	0.89	0.87	0.56	6) Creep, fracture and texture	17		1	0.76	0.73	0.71
1) Creep	4		1	0.44	0.37	0.87	1) Creep	4		1	0.67	0.63	0.81
2) Fracture	4		2	0.85	0.83	0.63	2) Fracture	4		3	0.79	0.76	0.71
3) Texture	9		3	0.78	0.76	0.72	3) Texture	9		1	0.73	0.69	0.77
4) Creep and fracture	8	Paste-like	3	0.96	0.96	0.33	4) Creep and fracture	8	Dried texture	2	0.89	0.87	0.55
5) Fracture and texture	13		2	0.90	0.88	0.54	5) Fracture and texture	13		1	0.81	0.78	0.69
6) Creep, fracture and texture	17		2	0.90	0.89	0.52	6) Creep, fracture and texture	17		3	0.96	0.95	0.35

*: R² adjusted for the degrees of freedom. **: +++, ++ and + mean the best, second and third of conformance, respectively. ***: unable to construct PLS model.

大変形を計測したテクスチャ試験のパラメータとの親和性が最も高くなったためであると考えられた。とくに「口溶けのはやさ」は、試験法の組み合わせ 5) および 6) の場合でも $R^2=0.81$ を示しており、テクスチャ試験単独で計測した場合と複数の試験法を組み合わせた場合との差は視られず、計測作業の簡素化のためにはテクスチャ試験のみを選択できると考えられた。

これまで述べた PLS 回帰式の予測精度に関する考察から、上記 a) で述べたすべての試験法の組み合わせを採用した場合にはテクスチャ試験のパラメータが混在するため ANN モデリングの入力パラメータを PLS-VIP 法で選択する必要があると考えられた。他方、b) の組み合わせ法の中で、クリープ試験と破断試験の組み合わせを用いると直接 PLS-VIP 法を適用せずに ANN モデリングが可能となることがわかった。

3.4.2 クリープ試験と破断試験の組み合わせによる食感の ANN モデリング

Table 8 において「かたさ」スコアの予測に適する試験法の組み合わせは、回帰式の予測精度が $R^2=0.96$ を示した 4) と 5) の組み合わせであった。ここで、Fig. 10 に従うと、データ解析において同一の試験カテゴリー内のパラメータであると考えられた 4) クリープ試験と破断試験を組み合わせる方法であれば、これらの試験法で得られるパラメータは直接 ANN モデリングの入力データとして使用できるため、これらの粘弾性パラメータの組み合わせが最適であると判断した。その典型例として「かたさ」スコアを予測するために、クリープ試験と破断試験で得られるパラメータ（パラメータ数：8）を ANN の入力層に適用し、「かたさ」スコアを出力層とした ANN モデリングを実施した。モデルの構築にあたっては、学習セットに対するオーバーフィットペナルティを 0.001 に設定し、モデリング毎に出力される決定係数を用いてモデルの安定を確認した。

その結果、得られた ANN モデルでシミュレートした破断試験とクリープ試験のパラメータの例として、それぞれ破断荷重と弾性率 E_1 および「かたさ」スコアの関係を選択して応答曲面 ABCD を Fig. 11 に示した。このモデルの予測精度は $R^2c=0.96$ および $R^2v=0.83$ であり、底面座標の両パラメータの値が高くなるにつれて「かたさ」スコアも高く評価される傾向を示した。また、この応答曲面の範囲内においては破断荷重が 105 N、弾性率 E_1 が 45×10^5 Pa のとき「かたさ」スコアの極大点 (LMP: Local Maximum Point) 7.65 を示した。ここで、Fig. 3 で示したように弾性率 E_1 は 4 要素モデルの遅延変形部のバネに相当することから、供試サンプルの食感における「かたさ」は弾性率 E_1 に相当するバネの硬さに相関を示すと考えられた。

両試験法の計測方法より、これらの粘弾性パラメータの定義は同一であるため、このモデルによって「か

Fig. 11 Responded curved surface of the relationship among fracture force, elasticity E_1 and sensory score of 'hardness' obtained by ANN modeling (LMP: Local maximum point).

たさ」スコアを破断荷重と弾性率 E_1 の値の操作によってコントロールできる可能性を示した。

3.4.3 すべての試験法のパラメータによる食感の ANN モデリング

PLS-VIP による変数選択が必要な試験法の組み合わせにより得られる「なめらかさ」スコアのモデリングについて述べる。PLS-VIP を変数選択に使用する場合には、 $VIP > 1.0$ を示す説明変数の選択が一般的に行われている [28-30] が、本研究では JMP10.0Pro のデフォルトとして推奨されている $VIP \geq 0.80$ および $W = \pm 0.1$ を閾値として採用した。

ステップワイズ PLS-VIP 法を目的変数「なめらかさ」のスコアに適用した結果、Fig. 12 に示すように、第 3

Fig. 12 Viscoelastic parameters contributing to sensory term 'smoothness' obtained by 3rd trial of stepwise PLS-VIP.

試行時に 12 個のパラメータが「なめらかさ」に影響を及ぼすパラメータとして選択され、それらの寄与度の順位が明らかになった。このような変数選択の結果から、「なめらかさ」スコアには破断荷重と破断エネルギーのように供試サンプルの破断試験から得られるパラメータとともにガム性荷重および応力のようなテクスチャ試験から得られるパラメータが寄与することがわかった。

変数選択で得られた 12 個のパラメータを ANN の入力層に適用し、それらのパラメータと「なめらかさ」スコア間の非線形モデルを構築したところ、その予測精度 $R^2c=0.98$ および $R^2v=0.93$ が達成された。構築したモデルのうち、試験カテゴリーの異なる粘弾性パラメータの組み合わせの例として、破断試験とテクスチャ試験のパラメータからそれぞれ破断荷重、かたさ荷重および「なめらかさ」スコアを選び、その相互関係を示す応答曲面を Fig. 13 に示す。得られたモデルの解釈を行うために、テクスチャ試験のパラメータを他の試験法のパラメータと同様に独立変数とみなすと、この応答曲面では破断荷重 30 N、かたさ荷重 4.5 N のときに点 B が「なめらかさ」の極大スコア 7.73 を示すことがわかった。このように PLS-VIP の適用法については、テクスチャ試験のパラメータを単独で使用することは可能であるが、定義の異なる他の試験カテゴリーからそれぞれ得られたパラメータと組み合わせて予測する場合には、その利用法に留意する必要があると考えられた。

以上の考察から、PLS-VIP を使って ANN モデルを

構築する場合には、シミュレーションのパラメータ選択に同一の試験カテゴリーの中から得られたパラメータを使用する必要があると考えられた。

3.5 粘弾性特性によって嗜好度を予測するモデルの構築

チェダーチーズの品質評価において、その食感から嗜好度を予測することが可能となれば、消費者に好まれる粘弾性特性をもつ製品を設計することが可能になると考えられた。そこで、3.4 項に述べた手法を用いて嗜好度の ANN モデルの構築を試みた。

3.5.1 粘弾性特性と嗜好度間の相互関係予測モデル

これまでに述べた考察により、テクスチャ試験から得られる 9 個のパラメータ数は、クリープ試験および破断試験でそれぞれ得られるパラメータ数 4 個よりも多く、また、これらのパラメータの独立性による制約を考えると、嗜好度のモデリングにはテクスチャ試験のパラメータのみを使用することが最適であると考えた。

この条件に従って、ANN モデルの入力層にテクスチャ試験で得られた 9 個のパラメータ、出力層に嗜好度を適用した結果、その予測精度は $R^2c=0.93$ および $R^2v=0.83$ を達成した。構築したモデルのうち、付着性、凝集性および嗜好度の相互関係を示した応答曲面を Fig. 14 に示す。この応答曲面の範囲内において、嗜好度は付着性 20 [J/m³] および凝集性 0.68 のとき極大点 B = 7.48 を示すことがわかった。テクスチャ試験から得られた粘弾性パラメータと嗜好度の相互関係は、曲面のいずれの断面から観察しても非線形関係にあること

Fig. 13 Response curved surface of the relationship among fracture and hardness force as well as sensory score of 'smoothness' obtained by ANN modeling.

Fig. 14 Response curved surface of the relationship among adhesiveness, cohesiveness and palatability obtained by ANN modeling.

がわかった。また、この応答曲面はモデルの構築のために使用した9個すべてのパラメータの間に存在するシナジー効果を総合的に評価した結果を示していると考えられた。したがって、このような方法で構築したANNモデルから得られた応答曲面によって、消費者の嗜好度を粘弾性計測パラメータの数値によってシミュレーションすることが可能であると考えられた。

4. 結 論

チェダーチーズの粘弾性計測パラメータと官能評価スコアの相互関係解析に基づいて、高精度で官能評価スコアを予測する機器試験法の組み合わせを選択する方法およびPLS解析法とANNモデリングを併用して品質と嗜好度を評価するモデルを提唱した。

供試サンプルとして市販用およびプロセスチーズ原料用のチェダーチーズ10品を選定し、それらの粘弾性特性に関して、破断、クリープおよびテクスチャの3試験法により粘弾性パラメータを取得した。他方、外観、香味および食感属性の用語からなる官能評価用語38語を選定し、それらを使用した分析型官能評価と消費者嗜好度調査を実施して官能評価スコアおよび嗜好度を得た。粘弾性パラメータの試験法の原理に基づき、破断とクリープ試験を同一試験カテゴリーで得られた粘弾性パラメータとして扱い、他方、テクスチャ試験は単独試験法として前者の試験法とは区別してデータ解析に供する必要があることを示した。官能評価により得られた評価スコアの主成分分析の結果、評価用語はその評価属性に関わらず分類できることがわかり、これらは人の五感コミュニケーションを介して得られた官能評価の結果を示していると考えられた。

供試サンプルの2バイト咀嚼による荷重経時変化曲線に咀嚼過程における食感と粘弾性計測特性を対応させることにより、粘弾性パラメータと人の口腔内で感じる食感変化との相互関係を時系列的に説明可能と考えた。また、この相互対応関係に基づき、官能評価スコアが荷重経時変化曲線中のどの段階で生じる食感であるのかを明確にし、咀嚼段階に対応する最適な粘弾性試験法を選択するためのフローチャートを提示した。このフローチャートに従って、PLS回帰分析の予測精度を比較することによって食感評価スコアに対応する粘弾性パラメータを選択し、食感評価スコアに対応する粘弾性試験法の組み合わせ法が3つに場合分けできることを示した。

咀嚼過程における食感と対応付けして区分した粘弾性試験法によって得られた粘弾性パラメータから食感評価スコアを予測する新しい解析法として、PLS回帰分析法とANNモデリングを融合して利用する方法を提唱した。この方法の導入によって、食感評価スコアの

予測に最も寄与する粘弾性試験法の組み合わせを選択してANNモデルを操作することが可能となった。また、現在実施されている粘弾性計測と官能評価作業に代わって、粘弾性パラメータの数値シミュレーションが可能となった。

引 用 文 献

- 1) E. A. Foegeding, M. A. Drake; Invited review: sensory and mechanical properties of cheese texture. *J. Dairy Sci.*, **90**, 1611-1624, (2007).
- 2) M. M. AK, S. Gunasekaran; Stress-strain curve analysis of cheddar cheese under uniaxial compression. *J. Food Sci.*, **57**, 1078-1081, (1992).
- 3) D. Jaros, W. Ginzinger, E. Tschager, H. K. Mayer, H. Rohm; Effects of water addition on composition and fracture properties of Emmental cheese. *Lait*, **4**, 467-477, (1997).
- 4) C. Bugaud, S. Buchin, J.-B. Coulon, A. Hauwuy, D. Dupont; Influence of the nature of alpine pastures on plasmin activity, fatty acid and volatile compound composition of milk. *Lait*, **81**, 401-414, (2001).
- 5) C. Bugaud, S. Buchin, Y. Noel, L. Tessier, S. Pochet, B. Martin, J. F. Chamba; Relationships between Abondance cheese texture, its composition and that of milk produced by cows grazing different types of pastures. *Lait*, **81**, 593-607, (2001).
- 6) B. H. Lee, L. C. Laleye, R. E. Simard, R. A. Holley, D. B. Emmons, R. N. Giroux; Influence of homofermentative lactobacilli on physicochemical and sensory properties of cheddar cheese. *J. Food Sci.*, **55**, 386-390, (1990).
- 7) A. Lebecque, A. Laguet, M. F. Devaux, E. Dufour; Delineation of the texture of salers cheese by sensory analysis and physical methods. *Lait*, **81**, 609-624, (2001).
- 8) C. J. Coker, R. A. Crawford, K. A. Johnston, H. Singh, L. K. Creamer; Towards the classification of cheese variety and maturity on the basis of statistical analysis of proteolysis data—a review. *Int. Dairy J.*, **15**, 631-643, (2005).
- 9) J. R. Stokes, M. W. Boehm, S. K. Baier; Oral processing, texture and mouthfeel: From rheology to tribology and beyond. *Curr. Opin. Colloid Interface Sci.*, **18**, 349-359, (2013).
- 10) G. Hough, A. N. Califano, N. C. Bertola, A. E. Bevilacqua, E. Martinez, M. J. Vega, N. E. Zaritzky; Partial least squares correlations between sensory and instrumental measurements of flavor and texture for Reggiano grating cheese. *Food Qual. Prefer.*, **7**, 47-53, (1996).
- 11) M. A. Drake, P. D. Gerard, V. D. Truong, C. R. Daubert; Relationship between instrumental and sensory measurements of cheese texture. *J. Texture Stud.*, **30**, 451-476, (1999).

- 12) K. Adhikari, H. Heymann, H. E. Huff; Textural characteristics of lowfat, fullfat and smoked cheeses: sensory and instrumental approaches. *Food Qual. Prefer.*, **14**, 211-218, (2003).
- 13) G. Donadini, M. D. Fumi, L. Vanonill, S. Porretta; Hedonic response to cheese in preschoolers. *J. Sens. Stud.*, **27**, 176-187, (2012).
- 14) H. Ochi, H. Naito, K. Iwatsuki, T. Bamba, E. Fukusaki; Metabolomics-based component profiling of hard and semi-hard natural cheeses with gas chromatography/time-of-flight-mass spectrometry, and its application to sensory predictive modeling. *J. Biosci. Bioeng.*, **113**, 751-758, (2012).
- 15) H. Wium, K. B. Qvist, M. Gross; Uniaxial compression of UF-feta cheese related to sensory texture analysis. *J. Texture Stud.*, **28**, 455-476, (1997).
- 16) M. Shibata, T. Araki, Y. Sagara; Development of specified protocols and methodology in the application of food kansei model for the optimal design of danish pastry. *Food Sci. Technol. Res.*, **14**, 367-376, (2008).
- 17) Y. Sagara, "Kansei measuring methods for mechanical properties and texture of foods" (in Japanese). *Nippon Shokuhin Kagaku Kogaku Kaishi*, **56**, 501-512, (2009).
- 18) ISO 11035:1994 (International Organization for Standardization), Sensory analysis- Identification and selection of descriptors for establishing a sensory profile by a multidimensional approach. 1994.
- 19) ISO22935-2-IDF99-2 (International Organization for Standardization/International Dairy Federation), Milk and milk products-Sensory analysis-Part 2: Recommended methods for sensory evaluation. 2009.
- 20) S. L. Drake, P. D. Geraed, M. A. Drake; Consumer preferences for mild cheddar cheese flavors. I. *Food Sci.*, **73**, 449-455, (2008)
- 21) M. Hori, K. Horiguti, S. Sawayama; "Sensory evaluation of commercial yogurt" (in Japanese). *JJSE*, **14**, 40-45, (2010).
- 22) S. Fujikawa, S. Kawamura; "Taste evaluation of drinking milk by physicochemical properties and sensory determinations" (in Japanese). *Journal of JSAM*, **75**, 37-44, (2013).
- 23) L. Lemieux, R. Puchades, R. E. Simardre; Size-exclusion HPLC separation of bitter and astringent fractions from cheddar cheese made with added lactobacillus strains to accelerate ripening. *J. Food Sci.*, **54**, 234-237, (1989).
- 24) L. Lemieux, R. E. Simard; Astringency, a textural defect in dairy products. *Lait*, **74**, 217-240, (1994).
- 25) T. K. Singh, M. A. Drake, K. R. Cadwallader; Flavor of cheddar cheese: a chemical and sensory perspective. *Compr. Rev. Food Sci. Food Saf.*, **2**, 166-189, (2003).
- 26) M. E. Morgan; The chemistry of some microbially induced flavor defects in milk and dairy foods. *Biotechnol. Bioeng.*, **18**, 953-965, (1976).
- 27) F. W. Bodyfelt, J. Tobias, G. M. Trout; The sensory evaluation of dairy products. New York, NY., 339-342, 1988.
- 28) W. J. Dunn, S. Wold, U. Edlund, S. Hellberg, J. Gasteiger; Multivariate structure-activity relationships between data from a battery of biological tests and an ensemble of structure descriptors: The PLS method. *Quant. Struct. Relationships*, **3**, 131-137, (1984).
- 29) I.-G. Chong, C.-H. Jun; Performance of some variable selection methods when multicollinearity is present. *Chemom. Intell. Lab. Syst.*, **78**, 103-112, (2005).
- 30) C.-H. Jun; Use of partial least squares regression for variable selection and quality prediction. in 2009 International Conference on Computers & Industrial Engineering, 1302-1307, 2009.

要 旨

チェダーチーズの粘弾性計測パラメータと官能評価スコアの相互関係解析に基づいて、高精度で官能評価スコアを予測する機器試験法の組み合わせを選択する方法およびPLS解析法とANNモデリングを併用して品質と嗜好度を評価するモデルを提唱した。供試サンプルとしてチェダーチーズ10品を選定し、破断、クリープおよびテクスチャの3試験法により粘弾性パラメータを取得した。他方、食感属性用語10語を含む官能評価用語38語を選定し、それらを使用した分析型官能評価と消費者嗜好度調査を実施して官能評価スコアおよび嗜好度を得た。供試サンプルの2バイト咀嚼による荷重経時変化曲線に基づいて食感と粘弾性計測特性との時系列的対応関係を解釈し、口腔内で感じる食感変化を粘弾性試験法の組み合わせによって良好に予測する方法を提示した。この方法ではPLS回帰分析の予測精度の比較によって食感評価スコアと良好な対応を示す粘弾性試験法の組み合わせを特定した。さらには、それぞれの試験法の組み合わせで得られた粘弾性パラメータを適用して食感評価スコアおよび嗜好度を予測するANNモデルを構築した。この方法の導入によって、食感評価スコアの予測に最も寄与する粘弾性試験法の組み合わせを選択してANNモデルを操作することが可能となった。