報 文

チェダーチーズの粘弾性と香気成分から官能評価スコア を予測する品質評価モデルの開発

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 Quality Evaluation Model to Predict Sensory Scores from Measured Viscoelastic Characteristics and Aroma Components for Cheddar Cheese

Airi Morita^{1*}, Tetsuya Araki¹, Shoma Ikegami², Misako Okaue³,
Masahiro Sumi³, Reiko Ueda⁴ and Yasuyuki Sagara⁴

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

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

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

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

A quality evaluation model for Cheddar cheeses has been proposed to identify interrelationships among the database of viscoelastic parameters and aroma components obtained from instrumental measurements and both sensory evaluation and palatability scores by utilizing the combination of stepwise PLS-VIP method and ANN modeling. Viscoelastic parameters and aroma components were measured by fracture, creep, texture tests and GC-O analysis, respectively. Sensory evaluations by analytical panel and consumer palatability test were carried out by applying the selected sensory terms to evaluate the quality of Cheddar cheese. Regression equations to predict the sensory and palatability scores were determined by applying PLS analysis to the instrumental measurement data, and thus the contribution degree and direction of explanatory variables against objectives were revealed by stepwise PLS-VIP method. Results indicated that sensory and palatability scores were affected by characteristic parameters belonging to different quality attributes (viscoelastic and aromatic), and thus interrelationships among them caused by the existence of mutual effects among the quality parameters were successfully demonstrated. Finally, interrelationships among parameters were determined with high accuracy by the method, which directly applies the quality characteristic parameters selected by stepwise PLS-VIP to ANN modeling. The proposed directly coupled method is expected to be a novel and useful tool that limits the labor and time requirements involved in developing new food products instead of the repeated operations for preproduction sample designs and sensory evaluations.
(Received Mar. 30, 2015; Accepted Sep. 2, 2015)

Keywords : characteristic viscoelasticity, aroma component, sensory evaluation, stepwise PLS-VIP method, ANN modeling
キーワード : 粘弾性特性, 香気成分, 官能評価, PLS-VIP, ANN モデリング

ナチュラルチーズは欧米やオセアニア諸国では古くから
日常食として親しまれてきた乳製品であるが¹⁾, 日本人に
とってはその独特の風味や食感などのために長い間敬遠さ
れてきた典型的食品である。しかし, 現在ではピザ, ケー
キおよびワインなどの消費拡大に観られるように, 日本人

の食の西欧化に伴ってナチュラルチーズの消費量も恒常的
増加傾向を示している。例えば, 2012 年にはチーズ総消費
量の約 60% をナチュラルチーズ製品が占めるようになり,
その中でチェダーチーズはプロセスチーズ製造のための主
原料として利用されると共に, 店頭で直接購入している消

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

*連絡先 (Corresponding author), ailymorita@gmail.com

費者にも食べやすいナチュラルチーズとして親しまれている。

一般にチーズの品質はグレーディングやジャッジングと呼ばれる分析型官能評価により評価されており²⁾、チェダーチーズに対してはフレーバーに関する 17 語が標準評価用語として推奨されている³⁾。しかし、これらの用語はチーズを日常的に食べる習慣を有する欧米の研究者によって選定されてきたため、現状では日本人を対象とする官能評価にこれらの用語を直接適用することには疑問が残されてきた。他方、日本には食べ物のテクスチャを表現する用語が 445 語存在すると提唱されており、これらの用語は同一言語を日常的に使用している消費者が属する文化、社会および食生活や嗜好を反映していると説明されている⁴⁾。このような指摘を考慮すると、チーズ摂取の経験に乏しい日本人の官能評価パネルを対象とする官能評価用語は新たに選定する必要があると考えられる。

チーズの「おいしさ」に影響する主要因子は、その粘弾性や化学組成によって構成される食感、味や香り、風味といった品質属性であり、食感には機器計測により取得される粘弾性パラメータが、また、味や香りなどのフレーバーには香気成分や化学成分が寄与すると考えられてきた。そのため、これらの機器計測特性と官能評価結果との相互関係を探索する研究は数多く行われてきた^{5)~13)}。例えば、チェダーチーズに関しては、その香気成分強度と消費者嗜好度の相互関係や¹⁴⁾ 粘弾性測定値と食感に関する官能評価および嗜好度との関係をモデリングした報告がある¹⁵⁾。しかしながら、そのような研究から得た知見のみでは、ナチュラルチーズ製造の現場で日常的に行われている品質評価・管理のサポートすらできない現状にある。その要因として、これらの先行研究では香気属性と粘弾性属性をそれぞれ個別の品質評価属性として統計解析してきたことが指摘できる。従来、チーズ製造現場では官能評価における香りと食感に区別をつけることなく、総合的なおいしさ、すなわち嗜好度向上のために、経験的にその品質を微調整する技が伝承されている。もし、その職人の技が定量的に分析可能となれば、チーズ製造プロセスをより合理的に実施することができると考えられるため、国内のチーズメーカーではそのような職人技を科学的に再現するための手法の開発が緊急の課題とされている。そこで、この課題を解決するためには、従来の方法とは異なり、特定の官能評価属性に対応する機器計測パラメータのすべてを対象として、官能評価と嗜好度調査の結果との相互関係を探索し、さらにはそれらパラメータ間の相互作用を表示可能なモデリング手法の開発が必要と考えられた。

本研究の目的はチェダーチーズを対象として、a) 日本人による官能評価のための評価用語を選定して分析型官能評価と嗜好度調査を実施し、b) 機器計測で得られる粘弾性と香気特性パラメータと官能評価および嗜好度スコアとの

表 1 供試サンプルの生産国・地域、製造日および熟成期間

No.	生産国/地域	製造日	熟成期間**
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

* 日付不明 ** 単位：月

相互関係を定量的に表示できる品質評価モデルを提唱することにある。

実 験 方 法

1. 供試サンプル

標準的なチェダーチーズの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 (表 1)。また、表 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従って分析し、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-51 T, 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 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 20 kg のチーズ塊から 200 g 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、室温 20℃の試験室で測定を実施した。また、計測毎に 1 つのサンプル試片を恒温庫から取り出した後、即時に試験に供した。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

表 2 供試サンプルの化学成分組成

化学成分組成										pH
供試 サンプル	(Unit : wt%)					(Unit : mg/100 g)				
	脂肪	タンパク質	炭水化物	灰分	水分	総量				
						ミネラル	遊離アミノ酸	遊離脂肪酸	有機酸	
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

用いて 10mmφ×10mm の円柱形に成形し、香氣成分計測用試片は、20mm 程度のサイコロ状に切り分けて液体窒素を用いて凍結後ブレンダーで粉碎し、また、官能評価用試片は 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. 粘弾性試験

供試サンプルの破断、クリープおよびテクスチャ試験にはクリープメータ (Reoner RE2-33005s 型, 山電) を用いた。このクリープメータの円柱型プランジャの直径と圧縮速度は、載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 55mmφ と 0.5mm/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 200N 以下であることを確認し、これらの試験には最大荷重 200N のロードセルを用いた。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載荷条件を用いて最大荷重を設定する必要があるため¹⁶⁾、この条件を満たす載荷条件は最大荷重 3N、歪率 10% であることを確認して最大荷重 20N のロードセルを選択した。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 3 試験法により、それぞれ以下の粘弾性パラメータを得た。

(1) 破断試験

破断荷重 [N], 破断歪率 [%], 最大荷重 [N], 破断エネルギー [J/m²]

(2) クリープ試験

瞬間弾性率 E_0 [Pa], 遅延弾性率 E_I [Pa], 遅延粘性率 η_I [Pa·S] および永久粘性率 η_N [Pa·S]

(3) テクスチャ試験

最大荷重 [N], かたさ荷重 [N], かたさ応力 [N/m²], ガム性荷重 [N], ガム性応力 [N/m²], A1 エネルギー

[J/m³], A2 エネルギー [J/m³], 凝集性 [ー] および付着性 [J/m³]

3. 香氣分析機器と分析方法

(1) 香氣成分抽出

供試サンプルから香氣成分を抽出するために、SAFE 法 (solvent assisted flavor evaporation) を用いた¹⁷⁾。供試サンプルを 2.0×2.0cm 程度のサイコロ状に切り、液体窒素で凍結後、ブレンダーで粉碎した。その試料粉末に dichloromethane を 300mL 加え、内部標準物質として 3-heptanol を 20μg および 4-octanol を 1.0μg 添加した。その溶液を 8 時間浸漬させてソックスレー法により香氣を抽出した後、ろ過した (200mL)。ろ液は SAFE 装置を用いて蒸留し、香氣成分を含む留分を得て、それらを乾燥後、1.0mL まで濃縮して GC-O の検液とした¹⁸⁾。

(2) Gas Chromatography-Olfactometry (GC-O)

GC-O 分析装置は検出器 (FID) を装備したガスクロマトグラフ (6890, Agilent Technologies) およびチャームアナリシスシステム (CharmAnalysis®, DATU, NY, USA)¹⁹⁾ から構成される。分析には dichloromethane を用いた順次希釈法 (希釈率 3 倍および 9 倍) を適用し、使用したカラムは溶融シリカキャピラリーカラム DB-WAX (15m×0.32mm×0.25μm film thickness, Agilent Technologies) である。キャリアガスとして用いたヘリウムの流速は 3.2 mL/min で一定とした。オープン温度を 40℃ から毎分 6℃ で 230℃ まで昇温して 20 分間保持した。注入口温度は 225℃ で検液 1.0μL をスプリットレスの注入モードカラムに注入した。GC-O 分析は、GC-O 分析のキャリアを 10 年以上持つ十分に訓練されたスニッファー 1 名が GC 装置から流出した加湿空気とともに香氣成分を含むガスを感知することにより分析した。具体的には、スニッファーは GC 装置から流出したガスを嗅ぎ、何かの香りを感じている間はデータ記録用コンピュータのマウスをクリックし続け

ることにより香りの感知時間を記録した。その後、感知した香りをその特徴に基づき、予め選定した香調用語 14 語にそれぞれ分類した。GC-O により記録した香り活性は、チャームアナリシスシステムを通じてチャームクロマトグラムの香り成分毎の面積値を以下に示す(1)式により求め、チャームバリュー (CV, 香り強度)として記録した^{19/20)}。

$$CV = \int_{peak} F^{n-1} di \quad (1)$$

ただし、F: 希釈倍率, n: 希釈回数, di: 香りの持続時間

香気成分の同定は、マススペクトルと標準物質の GC における Kovats の Ri 値の一致により行い、該当香気成分が同定できなかった場合にはその Kovats の Ri 値と香調用語によって暫定的に unknown 成分として識別できるようにした¹⁸⁾。

4. 分析型官能評価

実際の官能評価に使用する実用官能評価用語を選定するために、まず ISO11035:19²¹⁾ および ISO22935-2/IDF99-2²²⁾ 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。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、実用評価用語を選択した。この評価は 15cm 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。さらに選定した評価用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。その結果から得られたチェダーチーズの評価属性と評価用語のキーワードおよびその定義を表 3 に示した。

実用評価用語 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 15cm の線尺度法により実施した。この評価は官能評価室内に設けたパネル用ブースの白色の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。

5. 消費者の嗜好度調査法

消費者の嗜好度、すなわち「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、事前のアンケートにより、体調、空腹度、極端なチーズの嗜好性の有無などを記録した。その結果により、消費者パネルとして不適当と考えられたパネルを除外し、体調と空腹度およびチーズの

好みに偏りがなく、分散分析において有意差の検出されなかった消費者パネルを採用した。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。

6. 統計解析法

粘弾性パラメータ、香気成分の CV、官能評価スコアおよび嗜好度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 JMP11.0 Pro (SAS Inst., co., Cary, N.C., U.S.A.) を適用して、分散分析、相関分析、因子分析、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。具体的には、ステップワイズ PLS-VIP (Variable importance in projection) により、目的変数に対する説明変数の「数」を絞り込み、また、そのプラスまたはマイナス方向の寄与度の順位を明らかにし^{14/15)}、これらの結果を ANN モデリングの学習プロセスに適用した^{23)~25)}。品質特性パラメータと官能評価スコアおよび嗜好度のデータをすべて使用してデータセットとする場合には、それぞれの繰り返し測定および評価の平均値を算出して用いた。

因子分析では、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 以上を示す因子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因子数を求めた。

PLS 回帰分析では、説明変数に品質特性パラメータ、目的変数に官能評価スコアまたは嗜好度を用いた。得られた回帰式の目的変数の予測精度は重相関係数 (R^2) によって評価した。説明変数の選択とそれらの目的変数に対する寄与度を求めるために、ステップワイズ PLS-VIP を適用し、VIP 値と回帰係数 (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を ANN モデリングにおける入力層データとして用いた。

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。また、モデルの入力層に品質特性パラメータ、出力層に官能評価スコアまたは嗜好度を適用し、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。モデリングに使用するデータの抽出法として保留法を選択した。学習データ (calibration) と検証データ (validation) は全サンプルデータの中から無作為に抽出し、その検証データ抽出確率を 0.333 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。

表 3 実用官能評価用語 38 語およびその定義

属性	種類	用語	定義
外観	色	黄色	黄色
		白色	白色
	表面	乾燥	乾いた表面
	穴	ガスホール	球状のガスによる穴
		ヒビ, 裂け目	ヒビ, 裂け目がある
	その他	ストーン	ところどころに結晶がある
香味	香り	フルーティ	フルーツの香り
		ヨーグルト臭	ジアセチルの香り
	風味	ミルク風味	乳脂肪の香り
		酪酸風味	酪酸
		醤油風味	醤油
		パン様の酵母風味	パン
		お酒様の酵母風味	日本酒
		ベジマイト様の酵母風味	ベジマイト, 酵母エキス
		ナッツ様の風味	ピーナッツ, ヘーゼルナッツなどのナッツの香り
		マッシュルーム風味	生のマッシュルームの香り
		ポテト風味	ふかしたジャガイモ
		加熱風味	加熱されたミルク
		乳酸風味	乳酸
		酢酸風味	酢酸
		ジアセチル	ジアセチルの香り
	味	甘味	基本味
		塩味	基本味
		苦味	カフェインやキニーネによる基本味
		渋味	緑茶の渋味
		エグ味	あくが強く, 喉や舌を刺激するような味
		旨味	基本味
		酸味	基本味
食感	歯	かたさ	堅固. 砕くために正常圧以上の圧力を要するかたさ
	弾力	弾力	弾力がある. 曲げたときに容易に折れない
		歯切れのよさ	かむときに抵抗が少なく, 噛み切った後歯にくっつかない
	舌	ざらつき	口の中でざらざらした感じ, 砂状, 粒状, 結晶状の粒子
		ペースト状	舌で押すとべとべとする
		なめらかさ	冷たいバター状
		ねっとり感	粘着性がありべたつく, ねちゃつく
		口溶けのよさ	口腔で溶ける速度
		粗さ	小さな穴やでこぼこ, 隙間がある
		乾燥した食感	乾燥して瑞々しさが無い

図 1 破断試験で得られた粘弾性パラメータの一例

実験結果および考察

1. 粘弾性特性

(1) 破断試験

破断試験で得られた粘弾性パラメータのうち、供試サンプルの破断荷重、破断歪率および最大荷重を図 1 にそれぞれ示した。これらの粘弾性パラメータの挙動はサンプル 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に伴い、その円柱状側面の中央部が徐々に膨らむと共に表面亀裂が生じ、破断荷重点を記録したときにその亀裂が割れ目となり試片の破断が観察された。さらに破断荷重点経過後も圧縮を継続して最大荷重点に到達したときには、試片は薄い円柱平板状に変形し、また除重した試片の表面には放射状の亀裂が複数生じていることが観察された。図 1 に示した粘弾性パラメータの傾向から、供試サンプルは歪率 20.8~61.4% の範囲内で破断を示し、歪率約 90% 以上で最大荷重値を示すことが分かった。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荷重値と最大荷重値を示し、最も硬い食感を有することが分かった。

(2) クリープ試験

サンプルの弾性率 E_0 [Pa] の範囲は、436.4 (No. 2)~643.7 (No. 5) であり (図 2 (a))、同様に弾性率 E_I [Pa] (図 2 (b)) は 2070 (No. 1)~5475.9 (No. 10)、粘性率 η_1 [Pa·s] (図 2 (c)) は 1970 (No. 1)~4470 (No. 5) および粘性率 η_N [Pa·s] (図 2 (d)) は 435 (No. 2)~2080 (No. 3) をそれぞれ示した。

(3) テクスチャ試験

テクスチャプロファイルのうち、サンプルの凝集性 [ー] は 0.69 (No. 5) から 0.80 (No. 8) の範囲内にあり、サンプル間の差は顕著に観られなかった (図 3 (a))。サンプル No. 7 の付着性は最大値 149.5 [J/m²] を示し、他のサンプルよりも高い値を示した (図 3 (b))。

2. GC-O 分析による香気成分特性

GC-O 分析により、スニッファーが同定できた香気成分は 43 成分であることが分かった (表 4)。ただし、検出順位 31 と 32 の成分は分離不可能であったために、香調用語 (caramel 香) 内に寄与する成分としてチャームバリューの値を合算して示すこととし、同定された成分を 14 の香調用語にそれぞれ分類した。

3. 分析型官能評価と消費者嗜好度調査結果

分析型パネルによる評価スコアと消費者パネルによる嗜好度の平均値 (AV)、標準偏差 (SD)、分散分析、多重比較検定 (A~F 表示) などの結果をそれぞれ表 5 に示した。評価スコアおよび嗜好度の多重比較には Tukey-HSD 検定を用いてサンプルごとに A~F を付記し、重複文字でラベリングされたサンプルの組み合わせ間では有意水準 5% で差がないことを示し、また嗜好度には得点順位を示した。

香味属性に分類された評価用語「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分かった。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

図 2 クリープ試験で得られた粘弾性特性パラメータ

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た。また、嗜好度は、サンプル No.5 に対して No.2, 8, 9 がそれぞれ5%の有意水準でスコアに差があるサンプルであることがわかった。供試サンプルは、チェダーチーズ種の中でもその品質がバラエティに富むように留意して収集したが、嗜好度評価の結果からは、これらのサンプルの品質特性の差では顕著な嗜好度差を生じないことが分かった。したがって、本研究で嗜好度を目的変数に適用して得られたモデリングによって観察される品質特性と嗜好度との相互関係は、サンプル間嗜好度差の範囲内 (5.31~6.39) においてのみ適用可能であると推察された。

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評価用語と嗜好度の組み合わせが741組中90組あることが分かった。これらの組み合わせの中で、評価属性が異なる項目間で高い相関が見られた組み合わせは、例えば、外観属性「白色」- 香味「ヨーグルト臭」($R=0.91$) および食感「弾力」- 香味

図 3 供試サンプルのテクスチャプロファイルの例

表 4 GC-O 分析による香調用語, 成分およびサンプル毎のチャームバリュー

検出 順	香調用語	香気成分	Ri	Charm Value									
				No. 1	No. 2	No. 3	No. 4	No. 5	No. 6	No. 7	No. 8	No. 9	No. 10
12	acidic /cheesy	acetic acid	1430	18	0	131	20	103	0	83	14	27	78
20		butyric acid	1616	1264	1268	7504	1538	1921	1165	1284	1246	1562	2336
24		hexanoic acid	1840	77	98	354	73	25	81	45	106	86	50
38		decanoic acid*	2269	22	51	99	0	0	60	10	66	35	20
Total Acidic/cheesy				1381	1417	8088	1631	2049	1306	1422	1432	1710	2484
33	animal	p-cresol	2069	33	15	59	0	25	51	14	338	0	0
41		3-methylindole*	2458	154	146	2109	48	343	501	91	328	96	149
Total Animal				187	161	2168	48	368	552	105	666	96	149
2	buttery	diacetyl	1030	789	46	156	45	127	29	1477	48	22	48
Total Buttery				789	46	156	45	127	29	1477	48	22	48
1	cacao-like	2-/3-methylbutanal*	1027	21	16	0	893	244	63	344	48	42	166
Total Cacao-like				21	16	0	893	244	63	344	48	42	166
28	caramel	unknown12	1943	0	30	77	0	0	0	0	0	0	0
30		2,5-dimethyl-4-hydroxy-3(2H)furanone	2019	1084	6053	9094	28	650	533	621	865	8214	564
31, 32		2-ethyl-4-hydroxy-5-methyl-3(2H)furanone and 4-hydroxy-5-methyl-3(2H)furanone*	2051	2482	2135	5697	20	376	1104	530	10349	3949	170
36		4,5-dimethyl-3-hydroxy-2(5H)furanone*	2173	111	194	1030	40	210	200	341	675	108	180
Total Caramel				3677	8412	15898	88	1236	1837	1492	11889	12271	914
9	cereal	2-acetyl-1-pyrroline*	1326	0	0	0	0	0	0	22	0	0	7
22		2-acetyl-2-thiazoline	1732	0	259	236	0	0	159	24	57	36	0
Total Cereal				0	259	236	0	0	159	46	57	36	7
7	fatty /metallic	1-octen-3-one*	1298	59	75	38	9	11	16	153	47	41	135
15		unknown7	1495	529	422	201	145	277	359	964	1341	863	867
16		(E)-2-nonenal*	1521	534	1125	633	2041	293	693	894	1956	371	1401
18		unknown8	1600	0	29	0	0	103	0	47	0	0	41
23		2,4-(E,E)-decadienal*	1791	14	111	0	0	0	0	152	9	40	15
29		trans-4,5-epoxy-(E)-2-decenal*	1985	22	66	63	12	208	48	776	240	102	22
Total Fatty/ metallic				1158	1828	935	2207	892	1116	2986	3593	1417	2481
4	floral /fruity	unknown1	1076	0	0	0	29	0	0	0	151	18	0
21		phenylacetaldehyde	1626	16	18	27	18	12	8	17	19	6	17
25		geraniol*	1846	39	0	45	37	8	8	42	44	41	20
26		unknown10	1866	0	0	0	0	0	143	0	0	0	0
34		ethyl cinnamate*	2105	0	0	0	0	0	4038	23	0	0	0
37		o-aminoacetophenone*	2189	39	31	70	33	0	0	61	232	0	0
43		phenylacetic acid*	2548	0	11	105	27	0	0	23	84	0	0
Total Floral/ fruity				94	60	247	144	20	4197	166	530	65	37
5	green	unknown2	1104	13	23	26	7	21	13	0	0	0	18
10		unknown4	1367	0	0	0	0	0	0	0	13	0	89
17		2,4-(E,E)-octadienal*	1572	26	0	0	44	10	0	0	51	9	94
6		unknown3	1145	0	0	0	0	0	0	0	47	0	72
Total Green				39	23	26	51	31	13	0	111	9	273
13	milky	unknown6	1432	69	51	0	41	27	239	140	465	57	157
35		δ-decalactone	2160	126	242	274	42	14	150	132	174	227	44
39		γ-dodecalactone	2345	96	182	184	42	23	96	92	132	210	35
40		(Z)-6-dodecen-4-olide	2364	87	4887	6234	29	12	542	2253	566	4796	323
Total Milky				378	5362	6692	154	76	1027	2617	1337	5290	559
14	potato-like	methional	1439	356	1236	295	7110	871	240	347	55	265	395
Total Potato-like				356	1236	295	7110	871	240	347	55	265	395
3	sulfur	dimethyl disulfide*	1075	43	26	24	0	1948	0	60	0	0	14
8		2-methyl-3-furanthiol*	1311	0	0	36	0	0	0	0	0	0	0
11		unknown5	1424	13	5	0	0	18	0	0	0	0	0
19		unknown9	1605	12	14	29	0	0	0	0	0	0	0
Total Sulfur				68	45	89	0	1966	0	60	0	0	14
42	vanilla	vanillin*	2532	84	15	61	52	0	0	47	0	0	0
Total Vanilla				84	15	61	52	0	0	47	0	0	0
27	woody	unknown11	1934	0	14	46	0	0	10	0	19	14	14
44		3-phenylpropionic acid*	2608	20	24	131	0	105	13	0	26	10	0
Total Woody				20	38	177	0	105	23	0	45	24	14
Total aroma intensity				8252	18918	35068	12423	7985	10562	11109	19811	21247	7541

*: GC-O 分析でのみ検出した香気成分

「酪酸風味」($R=-0.86$)のように29組あることが分かった。他方、嗜好度と高い相関を示した評価用語は、香味属性の「ヨーグルト臭」($R=0.86$)と「甘味」($R=0.83$)であったことから、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分かった。

4. 異なる品質属性間の相互関係

嗜好度は、香気属性または粘弾性属性の品質特性単独で説明されるものではないと考えられた。そのため、これらの両品質属性を同等の変数として取り扱う必要があると考えた。

そこで、粘弾性特性と香気特性間の相互相関分析を行った結果、相関係数 $|R|>0.80$ を示した組み合わせは、破断荷重と unknown10 ($R=0.89$) および ethyl cinnamate ($R=0.89$)、付着性と 2-acetyl-1-pyrroline ($R=0.87$) および trans-4,5-epoxy-(E)-2-decenal ($R=0.81$) の4組であることが分かった。破断荷重と unknown 10 および ethyl cinnamate はサンプル No. 6 において他のサンプルと比較して顕著に高い値を示した品質特性パラメータであった。同様に、付着性と 2-acetyl-1-pyrroline および trans-4,5-epoxy-(E)-2-decenal は No. 7 において顕著に高い値を示すパラメータであることが分かった。このことから、これらの相関が認められた組み合わせ以外の品質特性間ではそれらの変数の独立性が保証されたと考えた。

相互相関分析により抽出された4組の組み合わせを含む粘弾性特性17項目および香気特性43項目、すなわち品質特性パラメータ60項目をそれらの類似性によって分類するために因子分析を適用してその結果を表6に示した。この表に示すように、品質特性パラメータは6因子に分類され、累積寄与率は86.8%であった。第1因子には、テクスチャ試験とクリープ試験で得られた粘弾性パラメータと香気成分の acetic acid が分類され、最も高い寄与率22.4%を示した。第2, 4, 6因子にはそれぞれ香気成分のみが分類されたが、香調用語の類似性はGC-O分析で同定した香気成分を分類する要因ではないことが分かった。第3因子には、破断試験の粘弾性パラメータと香気成分が区分されたが、これらの成分の中には破断荷重と unknown10 および ethyl cinnamate などのように、サンプル No. 6 を特徴付ける品質特性パラメータが含まれた。また、第4因子に含まれた香気成分は p-cresol, unknown 6 などのように、ほとんどがサンプル No. 8 において特徴的に多く感知された香気成分であった。同様に、第5因子には香気成分とテクスチャ試験パラメータの付着性が区分されたが、これらは No. 7 を特徴付ける品質特性パラメータであることが分かった。そのため、第3因子はサンプル No. 6、第4因子は No. 8、第5因子は No. 7 の特徴をそれぞれ示す因子であることが分かった。これらの因子分析の結果より、粘弾性パラメータと香気成分の間には評価属性が異なるにも関わらず、高い類似度を示す組み合わせが存在することが確認

された。

(1) 因子得点によるサンプルのポジショニングマップ

因子分析により得られた結果を用いてサンプル間の品質の差異を明らかにするために、因子得点を用いたサンプルのポジショニングマップを図4, 5 および6に示した。

図4に因子1と2によるサンプルのポジショニングマップを示す。この図の円A内に示すように、ほとんどのサンプルが因子1の粘弾性パラメータによってグルーピングされることが分かった。他方、円Bで示した供試サンプル No. 3 は他のサンプルと比較して因子2の因子得点が顕著に高く、粘弾性パラメータよりも香気成分の強度によって他と識別可能なサンプルであることが分かった。

図5に因子3と4によるサンプルのポジショニングマップを示す。因子3と4の寄与率はほぼ同等であるが、円Aで示したようにサンプルはほとんど因子3の因子得点の違いによって説明可能であることが分かった。円Bで示した No. 6 は、サンプル間の粘弾性パラメータおよび官能評価の「かたさ」スコアの両方でもっとも硬いと評価されたサンプルであり、因子3の因子得点により最も高くポジショニングされた。また、円Cで示した No. 8 は因子4に含まれた香気成分が顕著に感知されるサンプルとしてポジショニングされた。

図6に因子5と6によるサンプルのポジショニングマップを示す。これらの寄与率はほぼ同等であり、円Aで示したように、サンプルは因子5と6の両方の因子得点について原点を中心として同等程度の得点を持つことが分かった。円Bで示した No. 7 は、付着性の最も高いサンプルであったが、因子5にその特徴が集約されたので他のサンプルとは異なり、因子5の正方向にポジショニングされた。

これまで述べたように、粘弾性特性と香気成分特性を同等の変数として取り扱うことにより、供試サンプルの品質ポジショニングを明らかにし、さらに、これらの因子ポジショニングマップを用いることにより、顕著な特徴を持つサンプルの存在とそれらの特徴付ける品質特性パラメータを明らかにした。

5. 品質特性と官能評価結果に基づく品質設計法

品質評価モデルの構築のためにANNの入力層に品質特性パラメータを、出力層に官能評価スコアまたは嗜好度を適用したモデリングを実施した。具体的には、ステップワイズPLS-VIPにより、目的変数に対する説明変数の「数」を絞り込み、また、目的変数に対するプラスまたはマイナス方向の寄与度の順位を明らかにし、これらの結果をANNモデリングの学習プロセスに適用する方法を試みた。従来、ANNモデリングでは、操作上の自由度が高いために、複数の機器分析で得られた大量のデータの全てを入力層に、また、出力層には分析型官能評価スコアまたは「おいしさ」のみのスコアを入力して、学習と検証によるモデリングを繰り返し、入力層のパラメータ数を絞り込む方

表 5 分析型パネルによる評価スコアと

評価 属性	官能評価用語	No. 1			No. 2			No. 3			No. 4		
		AV	SD		AV	SD		AV	SD		AV	SD	
外観	黄色	9.16	1.74	A	3.37	1.14	D	7.33	1.83	B	9.65	2.07	A
	白色	5.20	2.11	D	11.40	1.24	A	6.97	2.04	C	5.02	2.20	D
	乾燥	3.60	2.67	BC	3.55	2.79	BC	5.85	3.26	AB	4.05	2.73	ABC
	ガスホール	7.53	0.20	B	7.50	0.02	B	8.14	1.01	A	7.56	0.21	B
	ヒビ, 裂け目	7.53	0.14	B	7.58	0.31	B	10.11	1.66	A	7.79	0.69	B
	ストーン	7.49	0.03	B	7.50	0.00	B	7.70	0.44	A	7.55	0.19	B
香味	フルーティ	3.28	1.86	BC	5.35	2.98	A	5.04	1.94	AB	3.88	2.09	ABC
	ヨーグルト臭	2.86	1.88	AB	3.78	1.94	A	2.72	1.84	AB	2.01	0.65	B
	ミルク風味	3.76	2.10	BCD	6.09	2.46	A	3.33	1.77	D	2.84	1.41	D
	酪酸風味	2.97	1.86	BC	2.34	1.11	C	4.83	3.13	A	4.32	2.55	ABC
	醤油風味	3.03	2.15	B	2.24	1.44	B	5.73	2.23	A	5.94	1.91	A
	パン様の酵母風味	7.82	0.44	A	8.19	1.02	A	7.77	0.44	A	7.93	0.66	A
	お酒様の酵母風味	7.72	0.44	B	8.54	1.55	A	7.71	0.32	B	7.94	0.68	B
	ベジマイト様の酵母風味	7.67	0.57	C	7.55	0.18	C	7.73	0.41	BC	8.41	1.44	A
	ナッツ様の風味	3.04	1.76	ABC	2.04	0.62	C	3.73	2.11	A	3.42	2.12	AB
	マッシュルーム風味	1.93	0.64	A	2.10	1.14	A	1.87	0.75	A	1.95	1.04	A
	ポテト風味	2.42	0.88	A	2.30	1.06	A	2.40	1.04	A	2.58	1.14	A
	加熱風味	1.94	1.31	AB	1.64	0.33	B	1.79	0.72	B	2.69	2.25	A
	乳酸風味	3.80	2.30	AB	4.48	2.37	A	3.69	1.81	AB	3.48	2.16	AB
	酢酸風味	2.42	1.16	ABC	2.05	0.86	BC	3.26	1.75	A	2.42	1.20	ABC
	ジアセチル風味	2.90	1.77	BCD	3.94	2.02	AB	2.50	1.51	CD	2.35	1.05	CD
	甘味	5.15	2.38	A	6.19	2.35	A	5.46	2.36	A	5.01	2.40	A
	塩味	6.17	2.52	CD	4.89	1.89	D	8.61	2.14	AB	7.49	1.37	BC
	苦味	5.81	2.58	BC	5.29	3.00	BCD	4.69	2.01	BCDE	8.04	2.71	A
	渋味	5.00	2.76	AB	4.68	2.70	B	4.84	2.05	AB	6.99	2.98	A
	エグ味	2.86	1.75	BC	2.64	1.65	BC	2.88	1.99	BC	5.03	2.83	A
	旨味	5.45	2.28	CD	3.83	1.85	DE	9.84	2.04	A	7.00	1.94	BC
	酸味	5.62	2.66	A	5.57	3.14	A	5.79	2.07	A	5.38	2.08	A
食感	かたさ	6.57	1.85	DEF	5.43	1.91	F	8.12	1.76	BC	6.59	1.85	DEF
	弾力	7.48	2.13	B	6.80	2.65	B	4.73	1.90	D	6.63	2.30	BC
	歯切れのよさ	6.76	2.15	CD	5.86	2.26	D	8.89	1.96	AB	6.69	1.87	CD
	ざらつき	3.37	2.08	C	2.83	1.89	C	6.93	2.64	A	4.77	2.55	BC
	ペースト状	6.17	2.63	AB	7.93	2.43	A	4.09	1.83	CD	7.18	2.68	AB
	なめらかさ	8.57	1.72	AB	9.12	1.98	A	5.54	1.93	D	8.20	1.91	AB
	ねっとり感	7.64	2.70	ABC	8.84	1.80	A	5.08	2.38	DE	8.41	1.90	AB
	口どけのはやさ	7.18	1.55	A	6.89	2.63	A	7.31	2.21	A	7.51	1.96	A
	粗さ	3.33	2.09	CD	3.00	1.95	D	7.34	3.05	A	4.13	2.81	BCD
	乾燥した食感	2.88	2.18	C	2.29	1.53	C	5.88	2.68	A	3.47	2.66	BC
嗜好度	嗜好度 (おいしさ)	5.93	1.53		6.24	1.21	79	6.02	1.8		5.61	1.5	
	嗜好度順位	6 ^A B***			3 ^A			4 ^A B			8 ^A B		

AV, 平均; SD, 標準偏差; *, $P < 0.05$; **, $P < 0.0001$; ***, Tukey-HSD 検定による比較を行い, 同じ文字を持たな

消費者パネルによる嗜好度の分散分析結果

No. 5			No. 6			No. 7			No. 8			No. 9			No. 10			分散分析の P 値
AV	SD		AV	SD		AV	SD		AV	SD		AV	SD		AV	SD		
9.35	1.97	A	9.16	1.88	A	5.37	1.61	C	9.49	2.11	A	3.11	0.95	D	10.00	1.65	A	<.0001**
5.12	2.18	D	5.33	2.21	D	9.43	1.59	B	5.24	2.12	D	11.65	1.08	A	4.74	1.83	D	<.0001**
6.04	3.31	A	3.64	2.82	BC	4.33	3.01	ABC	4.29	2.95	ABC	3.39	2.44	C	4.25	2.91	ABC	0.0016*
7.85	0.88	AB	7.50	0.03	B	7.53	0.13	B	7.56	0.30	B	7.53	0.15	B	7.53	0.17	B	<.0001**
9.52	1.50	A	7.70	0.48	B	7.91	0.74	B	7.65	0.62	B	7.57	0.37	B	7.69	0.41	B	<.0001**
7.65	0.44	AB	7.50	0.02	B	7.54	0.15	B	7.50	0.00	B	7.50	0.03	B	7.51	0.08	B	0.0003*
3.48	2.05	BC	3.10	1.94	C	3.90	1.93	ABC	4.66	2.29	ABC	3.73	2.36	ABC	3.25	1.74	BC	<.0001**
2.06	0.99	B	2.38	1.29	B	3.30	1.74	A	2.87	1.65	AB	3.94	2.09	A	2.34	1.02	B	<.0001**
2.43	1.03	D	3.61	2.61	CD	5.46	2.85	ABC	4.22	2.25	BCD	5.51	2.85	ABC	3.42	1.96	D	<.0001**
4.78	3.07	A	1.98	0.63	C	3.21	1.73	ABC	2.72	1.31	BC	2.66	1.65	C	2.66	1.14	C	<.0001**
5.63	2.74	A	2.19	1.10	B	3.29	1.94	B	2.97	1.90	B	2.10	0.78	B	2.53	1.30	B	<.0001**
7.98	0.75	A	7.71	0.70	A	7.93	0.82	A	7.86	0.58	A	8.00	0.83	A	8.04	0.90	A	0.3675
7.76	0.48	B	7.51	0.07	B	7.68	0.37	B	7.72	0.41	B	7.68	0.33	B	7.64	0.27	B	<.0001**
8.26	1.02	AB	7.51	0.06	C	7.64	0.36	C	7.56	0.21	C	7.56	0.25	C	7.66	0.58	C	<.0001**
3.97	2.61	A	2.31	1.12	BC	2.90	1.21	ABC	2.94	1.29	ABC	2.35	1.02	BC	2.39	1.00	BC	<.0001**
1.93	0.92	A	1.87	0.87	A	2.07	1.12	A	1.86	0.88	A	1.90	0.71	A	2.21	1.34	A	0.9067
2.65	1.47	A	2.36	1.55	A	2.33	1.19	A	2.39	1.33	A	2.60	1.43	A	2.23	0.95	A	0.9426
2.09	1.38	AB	1.65	0.37	B	1.67	0.31	B	1.77	0.63	B	1.67	0.42	B	1.81	0.70	B	0.0028*
4.23	2.32	A	2.20	0.88	B	4.55	2.28	A	3.73	2.02	AB	4.80	2.61	A	3.47	2.39	AB	0.0004*
2.92	1.63	AB	1.68	0.34	C	2.34	0.89	ABC	2.18	0.95	BC	2.61	1.55	ABC	2.31	1.19	ABC	<.0001**
2.44	1.41	CD	1.91	0.86	D	3.41	1.76	ABC	2.92	1.75	BCD	4.29	2.33	A	2.34	1.29	CD	<.0001**
4.30	2.26	A	4.68	2.23	A	5.73	2.53	A	5.42	2.05	A	5.57	2.69	A	4.47	2.44	A	0.0574
9.41	2.01	A	5.85	2.67	CD	6.11	2.00	CD	6.16	1.90	CD	5.66	2.52	D	5.86	2.31	CD	<.0001**
6.46	2.26	AB	2.71	1.56	E	4.74	2.62	BCDE	4.58	2.46	BCDE	3.50	1.95	DE	4.38	2.66	CDE	<.0001**
5.30	2.58	AB	2.47	1.29	C	4.62	2.64	BC	4.51	2.87	BC	4.09	2.64	BC	4.10	2.66	BC	<.0001**
4.04	2.25	AB	1.80	0.45	C	2.94	1.84	BC	3.06	2.21	BC	2.58	1.75	BC	2.78	1.94	BC	<.0001**
7.90	2.54	B	3.70	2.06	E	5.24	1.92	CDE	5.35	2.13	CDE	4.06	1.82	DE	4.20	2.12	DE	<.0001**
5.99	2.00	A	3.16	1.68	B	6.45	2.97	A	5.21	2.19	AB	6.41	3.03	A	5.43	2.82	A	<.0001**
7.81	2.16	BCD	11.17	1.42	A	7.12	1.34	CDE	6.83	1.72	CDEF	8.75	2.00	B	6.21	1.90	EF	<.0001**
4.86	1.86	CD	9.64	3.27	A	6.54	2.10	BC	7.65	1.68	B	7.85	2.46	ABC	6.93	2.16	B	<.0001**
8.07	2.30	ABC	9.69	2.54	A	6.66	2.07	CD	7.05	1.70	CD	8.04	2.18	ABC	7.23	2.40	BCD	<.0001**
6.41	2.95	AB	7.27	3.32	A	4.31	2.63	C	3.92	2.26	C	6.57	2.72	ABC	6.81	3.11	AB	<.0001**
5.33	2.69	BC	2.40	1.21	D	5.57	2.44	BC	6.55	2.47	AB	3.91	2.01	CD	6.02	2.82	AB	<.0001**
6.27	2.23	CD	3.78	1.70	E	7.56	1.77	BC	8.03	1.70	AB	5.20	1.81	DE	5.90	2.33	CD	<.0001**
6.15	2.64	CD	3.24	1.67	E	6.80	2.40	BC	7.65	1.92	ABC	4.58	2.15	DE	5.98	2.20	CD	<.0001**
7.90	2.21	A	4.40	2.57	B	7.29	1.97	A	6.96	1.42	A	6.45	2.12	A	6.36	2.06	A	<.0001**
6.82	2.88	A	5.96	3.74	AB	3.36	2.34	CD	3.79	2.53	BCD	5.43	2.98	ABC	5.79	2.96	AB	<.0001**
5.90	2.87	A	6.63	3.17	A	2.87	2.09	C	2.66	1.82	C	5.59	3.03	A	4.98	2.90	AB	<.0001**
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*
10 ^B			9 ^{AB}			5 ^{AB}			2 ^A			1 ^A			7 ^{AB}			

いものの間には5%水準で有意な差があることを示す。

表 6 品質特性の因子負荷量とその累積寄与率

品質属性*	品質特性パラメータ	因子 1	因子 2	因子 3	因子 4	因子 5	因子 6
粘弾性	A1 エネルギー [J/m ³]	0.97					
	A2 エネルギー [J/m ³]	0.96					
	ガム性荷重 [N]	0.96					
	ガム性応力 [Pa]	0.96					
	TPA 最大荷重 [N]	0.96					
	かたさ荷重 [N]	0.96					
	かたさ応力 [N/m ²]	0.96					
	粘性率 η_N [Pa·s]	0.94					
	粘性率 η_I [Pa·s]	0.93					
	弾性率 E_I [Pa]	0.91					
香気	acetic acid (acidic/cheesy)	0.66					
粘弾性	弾性率 E_O [Pa]	0.65					
	凝集性	-0.49					
香気	hexanoic acid (acidic/cheesy)		0.96				
	2-methyl-3-furanthiol (sulfur)		0.92				
	butyric acid (acidic/cheesy)		0.88				
	unknown12 (caramel)		0.88				
	phenylacetic acid (floral/fruity)		0.86				
	unknown11 (woody)		0.86				
	3-methylindole (animal)		0.86				
	4,5-dimethyl-3-hydroxy-2(5H)furanone (caramel)		0.84				
	unknown9 (sulfur)		0.79				
	phenylacetaldehyde (floral/fruity)		0.78				
	decanoic acid (acidic/cheesy)		0.72				
	(Z)-6-dodecen-4-olide (milky)		0.62				
	2,5-dimethyl-4-hydroxy-3(2H)furanone (caramel)		0.59				
	geraniol (floral/fruity)		0.51				
粘弾性	破断エネルギー [J/m ³]			0.91			
	最大荷重 [N]			0.88			
	破断荷重 [N]			0.85			
	破断歪率 [%]			0.75			
香気	ethyl cinnamate (floral/fruity)			0.72			
	unknown10 (floral/fruity)			0.72			
	3-phenylpropionic acid (woody)			-0.52			
	dimethyl disulfide (sulfur)			-0.65			
	unknown5 (sulfur)			-0.67			
	unknown8 (fatty/metallic)			-0.71			
香気	p-cresol (animal)				0.84		
	unknown6 (milky)				0.84		
	unknown1 (floral/fruity)				0.80		
	unknown7 (fatty/metallic)				0.78		
	2-ethyl-4-hydroxy-5-methyl-3(2H)furanone + 4-hydroxy-5-methyl-3(2H)furanone (caramel)				0.71		
	unknown3 (green)				0.71		
	o-aminoacetophenone (floral/fruity)				0.70		
	vanillin (vanilla)				-0.56		
香気	2-acetyl-1-pyrroline (cereal)					0.95	
	1-octen-3-one (fatty/metallic)					0.85	
	trans-4,5-epoxy-(E)-2-decenal (fatty/metallic)					0.85	
	2,4-(E,E)-decadienal (green)					0.82	
	diacetyl (buttery)					0.80	
粘弾性	付着性 [J/m ³]					0.79	
香気	unknown2 (green)					-0.45	
香気	γ -dodecalactone (milky)						0.72
	δ -decalactone (milky)						0.72
	2-acetyl-2-thiazoline (cereal)						0.62
	unknown4 (green)						-0.45
	(E)-2-nonenal (fatty/metallic)						-0.61
	methional (potato-like)						-0.64
	2,4-(E,E)-octadienal (fatty/metallic))						-0.70
	2-/3-methylbutanal (cacao-like)						-0.78
分散		13.45	12.25	7.12	7.06	6.30	5.91
寄与率		22.42	20.42	11.86	11.76	10.51	9.85
累積寄与率		22.42	42.84	54.70	66.46	76.97	86.82

*、粘弾性は粘弾性パラメータ；香気は香気成分パラメータをそれぞれ示す。

図 4 因子 1 と 2 によるポジショニングマップ

図 5 因子 3 と 4 によるポジショニングマップ

法が採られてきた。しかし、この方法では学習と検証プロセスを繰り返すモデリングにより予測精度が低下する場合が多く、ANN モデルを創る阻害要因となっていた。さらには、ANN 自身は変数選択機能を持っておらず、入力層に適用するパラメータの変数選択法として主成分分析や因子分析が適用されてきた^{23)~25)}。そのため、学習と検証プロセスを経て得られた ANN モデルは、パラメータの主成分または主要因子と出力層変数との相互関係を示すことになり、入力層に入力した主成分に含まれるパラメータと出力層パラメータ間の相互関係を厳密に示すことができないとも指摘されてきた。本研究では、従来の方法では困難であると考えられてきた 2 つのカテゴリー・データ、つまり「粘弾性特性」と「香気特性」を入力層とし、官能評価スコアを目的変数とした ANN モデルの構築を試みた。しかし、

上述したように従来の方法ではカテゴリーが異なる入力データと解析設定条件が多いために恣意性が高く、また、入力層と出力層の因果関係も不明瞭となることが予測された。そこで、これらの問題を解決する手法として PLS-VIP と ANN を直列に組み合わせて用いる方法を考案した。この手法により、本来 ANN モデルの持つ柔軟なフィッティング機能が有効利用できることになり、複数のカテゴリー・データを含むデータセットを取り扱う場合に有用な方法であると考えた。すなわち、PLS と ANN は単独ではそれぞれ異なる機能を有しているが、双方の機能を直列に「組み合わせる」ことにより、それぞれ単独で利用する場合とは異なる別の新しい機能を有するモデリング手法として利用できるものと考えた。また、粘弾性特性と香気成分特性は PLS 回帰分析を適用するにあたって、その尺度化お

図 6 因子 5 と 6 によるポジショニングマップ

図 7 香味属性「酢酸風味」に寄与した品質特性の寄与度 (VIP) とその寄与方向 (W)

よび中心化を行い、統計解析において同質のデータとして取り扱えるように事前処理を行った。

(1) 品質特性パラメータと官能評価スコアの相互関係

PLS 回帰分析の説明変数に粘弾性パラメータ 17 項目と香気成分の CV データ 43 項目からなる品質特性、目的変数に評価用語 38 語のスコアを適用した結果、外観属性の「ヒビ、裂け目」、「ストーン」、香味属性の「酢酸風味」、「苦味」、食感属性の「かたさ」、「ねっとり感」、「口どけのよさ」および「ペースト状」について、決定係数 (R^2) = 0.99, 0.88, 0.75, 0.97, 0.99, 0.84, 0.99 および 0.82 を示す回帰式がそれぞれ得られた。これらのうち、目的変数を「酢酸風味」とし、説明変数にステップワイズ PLS-VIP を適用した典型例を

示した (図 7)。説明変数を絞り込むためには、一般的には $VIP > 1.0$ が閾値として用いられているが^{26)~28)}、本研究では JMP11.0Pro のデフォルトとして推奨されている $VIP \geq 0.80$ および $W = \pm 0.1$ を採用した。

ステップワイズ PLS-VIP を 7 回試行した結果、図 7 に示すように 14 項目の品質特性パラメータが「酢酸風味」に影響を及ぼすパラメータとして選択され、それらの目的変数に対する寄与順位およびその方向が明らかになった。このような変数選択の結果から、「酢酸風味」スコアには acetic acid などの香気成分のほかにも破断歪率などの粘弾性パラメータも寄与することが分かった。

「酢酸風味」スコアは香味属性であるため、香気成分の

CV との間に強い相互関係を持つことが予測された。そこで、変数選択により得られた 14 項目の品質特性パラメータを ANN の入力層に適用して、それらのパラメータと「酢酸風味」スコア間の関係を示すモデルを構築した。このような方法を用いて得られた ANN モデルのうち、サンプル 10 品の「酢酸風味」スコアの上限值（サンプル No. 3, 4.83）と下限値（サンプル No. 6, 1.98）の範囲を示すモデルを選択し、その範囲内におけるモデルの端部をそれぞれ A, B, C として、香気成分 acetic acid, butyric acid および「酢酸風味」スコアの相互関係を応答曲面 ABC-LMP（Local Maxi-

図 8 ANN モデリングにおける acetic acid と butyric acid および香味属性「酢酸風味」スコアの相互関係

mum Point；極大値）として図 8 に示した。このモデルの予測精度は $R^2c(\text{calibration})=0.98$ および $R^2v(\text{validation})=0.93$ であった。この応答曲面では、acetic acid 140 [-], butyric acid 1000 [-] となったときに評価スコアは LMP 3.32 を示すことが分かった。

このように、ステップワイズ PLS-VIP による変数選択により香味属性の評価スコアは香気特性だけではなく粘弾性特性の品質パラメータとも高い相互関係があることが分かった。同様に、食感属性の「かたさ」、「ねっとり感」および「ペースト状」スコアについても双方の品質特性との相互関係があることが明らかになった。すなわち、評価属性の異なる品質特性パラメータと官能評価スコアであっても、それらの間には重要な相互関係が生じている場合があることが確認され、それらの相互関係を ANN モデリングにより表示することが可能となった。そこで、次項では、同様の手法を用いて、品質特性パラメータと嗜好度の相互関係を予測するモデルの構築を試みた。

(2) 品質特性パラメータと嗜好度の相互関係

PLS 回帰分析の説明変数に品質特性 60 項目、目的変数に嗜好度を適用した結果、潜在因子数を 4 つ持ち、 $R^2c=0.99$ ($R^2v=0.99$) を示す回帰式を得た。その回帰式にステップワイズ PLS-VIP を適用して 6 回の変数選択試行を行った結果、図 9 に示すように 14 項目の品質特性パラメータが嗜好度に影響を及ぼすパラメータとして選択され、それらの目的変数に対する寄与順位およびその方向が明らかになった。このときの PLS 回帰式は潜在因子数を 6 つ持ち、その予測精度は $R^2c=0.99$ ($R^2v=0.99$), RMSE=0.006 を示

図 9 嗜好度に寄与した品質特性の寄与度 (VIP) とその寄与方向 (W)

した。この結果から、嗜好度には粘弾性パラメータよりも香気成分の CV の方が高い寄与を示すパラメータ数が多いことが分かった。つまり、嗜好度の評価には、サンプルの食感よりも味や香りや風味といったフレーバーとして識別される項目が重視される傾向にあると考えられた。このような傾向は、Drake ら (2008) が示したマイルドチェダーチーズでの分析型官能評価と消費者調査との相互関係解析に関する研究でも指摘されており、チーズの味と香りを含めたフレーバーと表面色が一部の消費者層の嗜好度に影響を及ぼすことが分かっている²⁹⁾。他方、官能評価の食感評価スコアと嗜好度間には相関が認められなかったものの、消費者はチーズの食感の差を明確に区別して評価したことから、スコアに有意差の生じない程度の範囲内で、食感は嗜好度に影響を及ぼす可能性があると考えられている。これらのことから、本研究で得られた PLS-VIP の結果には一定の妥当性があると考えられ、チェダーチーズの嗜好度に寄与する品質特性として、その粘弾性と香気成分強度のパラメータが適切であったことがわかった。

図 9 において VIP の上位を占めた香気成分は γ -dodecalactone, δ -decalactone および (Z)-6-dodecen-4-olide の 3 種であり、いずれも香調用語の milky 香を持つ成分であることが分かった。また、嗜好度に対して正の寄与を示す香気成分は、milky 香、caramel 香であり、sulfur 香と acidic/cheesy 香は負の寄与を示した。さらに、香気成分の unknown 7 と unknown 8 は、共に fatty/metallic 香の成分であるが、嗜好度への寄与の方向では unknown 7 が正、unknown 8 が負の方向に寄与した。これらの寄与方向はステップワイズ PLS-VIP の試行を繰り返すことによって変化することが観察された。これは、変数選択される品質特性パラメータ数が徐々に減少し、それに伴ってこれらのパラメータ間の相互関係も変化したためであると考えられた。他方、この過程で嗜好度への寄与を示した粘弾性パラメータのうち、凝集性は口腔内におけるサンプルの「まとまり感」を示す指標であった。したがって、嗜好度と凝集性において高い寄与関係が観られることから、嗜好度評価を行う際には食感の観点からは口腔内での「まとまり感」が重視されることが考えられた。

続いて ANN において、ステップワイズ PLS-VIP で嗜好度に対して寄与が高いとして変数選択された品質特性 14 パラメータを入力層とし、嗜好度を出力層に適用して 4 つのモデルを構築した結果、それらモデリングの平均予測精度が $R^2c=0.99$ (すべて 0.99), $RMSEc=0.02$ (0.0005~0.04) および $R^2v=0.98$ (0.98~0.99), $RMSEv=0.02$ (0.01~0.03) を示す安定したモデルの構築が可能となることが分かった。

このように、粘弾性パラメータと香気成分のように異なる属性に関する品質特性パラメータからであっても、ステップワイズ PLS-VIP によって嗜好度が高く寄与するパ

ラメータを選択することができ、それら VIP 値の高い品質特性パラメータを ANN の入力層に適用することによって嗜好度を高精度で予測可能であることが分かった。このことによって、チェダーチーズについて複数の品質属性が存在する場合であっても、それらの品質属性の機器計測を適切に行えば、嗜好度を予測し、事前にそのおいしさを制御するための個々の品質特性パラメータを特定してモデル化することが可能となった。

要 約

チェダーチーズを対象として、ステップワイズ PLS-VIP と ANN を直列に組み合わせた解析手法を提唱して、機器計測で得られた粘弾性パラメータと香気成分をデータベースとした品質特性パラメータと分析型官能評価スコアまたは嗜好度との相互関係を応答曲面で表示可能な品質評価モデルを構築した。

まず、食感に関する品質特性として、破断、クリープおよびテクスチャの 3 試験法により 17 項目の粘弾性パラメータを測定した。次に、フレーバーに関する品質特性として、GC-O 分析により 43 項目の香気成分を同定した。他方、日本人によるチェダーチーズ評価のための官能評価用語 38 語を選定し、これらを用いた分析型パネルによる官能評価および消費者による嗜好度調査を実施した。

粘弾性と香気成分をデータセットとした PLS 回帰分析を用いて、官能評価用語 38 語のうち 8 語の評価スコアを高精度で予測する回帰式を得た。さらに変数選択のためにステップワイズ PLS-VIP を実施し、回帰式の目的変数とした官能評価スコアと嗜好度に対する寄与度の高い品質特性パラメータを特定し、その寄与順位と寄与方向を明らかにした。その結果、品質特性パラメータと官能評価スコアおよび嗜好度の間の相互関係には、粘弾性パラメータと香味属性の官能評価スコアのように異なる評価属性であっても、高い VIP 値、すなわち高い重要度を示す場合があることが確認され、それらを ANN の入力層に直接適用することによって品質特性パラメータと官能評価スコアおよび嗜好度を高精度で予測するモデリングが構築可能となった。

このステップワイズ PLS-VIP と ANN を直列に組み合わせたモデリング手法によって、複数の品質属性をデータセットとする場合でも、それらを区別することなく品質パラメータから官能評価スコアまたは嗜好度との相互関係を高精度で予測し、また、官能評価スコアまたは嗜好度に影響を及ぼす品質パラメータを特定して数値シミュレーションにより、これらを制御することが可能となった。そのためこのモデリング手法には、従来、サンプルの試作と官能評価を反復して実施されてきた新商品開発の労力や時間を軽減する効果が期待されている。

文 献

- 1) Lee, C.-H., Lactic acid fermented foods and their benefits in Asia. *Food Control*, **8**, 259-269 (1997).
- 2) Bodyfelt, F.W., Tobias, J. and Trout, G.M., *The sensory evaluation of dairy products*. New York, NY, pp. 339-342 (1988).
- 3) Drake, M.A., McIngvale, S.C., Gerard, P.D., Cadwallader, K. R. and Civille, G.V., Development of a descriptive language for cheddar cheese. *J. Food Sci.*, **66**, 1422-1427 (2001).
- 4) 早川文代, 井奥加奈, 阿久澤さゆり, 齋藤昌義, 西成勝好, 山野善正, 神山かおる, 日本語テクスチャー用語の収集, 日本食品科学工学会誌, **52**, 337-346 (2005).
- 5) Lee, B.H., Laleye, L.C., Simard, R.E., Holley, R.A., Emmons, D. B. and Giroux, R.N., Influence of homofermentative lactobacilli on physicochemical and sensory properties of cheddar cheese. *J. Food Sci.*, **55**, 386-390 (1990).
- 6) Lebecque, A., Laguet A., Devaux, M.F. and Dufour, E., Delineation of the texture of salers cheese by sensory analysis and physical methods. *Lait*, **81**, 609-624 (2001).
- 7) Coker, C.J., Crawford, R.A., Johnston, K.A., Singh, H. and Creamer, L.K., 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).
- 8) Whetstine, M.E.C., Cadwallader, K. R. and Drake, M. A., Characterization of aroma compounds responsible for the rosy/floral flavor in cheddar cheese. *J. Agric. Food Chem.*, **53**, 3126-3132 (2005).
- 9) Whetstine, M.E.C., Drake, M.A., Nelson, B.K. and Barbano, D.M., Flavor profiles of full-fat and reduced-fat cheese and cheese fat made from aged cheddar with the fat removed using a novel process. *J. Dairy Sci.*, **89**, 505-517 (2006).
- 10) Foegeding, E.A. and Drake, M.A., Invited review : sensory and mechanical properties of cheese texture. *J. Dairy Sci.*, **90**, 1611-1624 (2007).
- 11) Kim, M.K., Drake, S.L. and Drake, M.A., Evaluation of key flavor compounds in reduced- and full-fat cheddar cheese using sensory studies on model systems. *J. Sens. Stud.*, **26**, 278-290 (2011).
- 12) Thomsen, M., Martin, C., Mercier, F., Tournayre, P., Berdagué, J.-L., Thomas-Danguin, T. and Guichard, E., Investigating semi-hard cheese aroma : Relationship between sensory profiles and gas chromatography-olfactometry data. *Int. Dairy J.*, **26**, 41-49 (2012).
- 13) Stokes, J.R., Boehm, M.W. and Baier, S.K., Oral processing, texture and mouthfeel : From rheology to tribology and beyond. *Curr. Opin. Colloid Interface Sci.*, **18**, 349-359 (2013).
- 14) Morita, A., Araki, T., Ikegami, S., Okaue, M., Sumi, M., Ueda, R. and Sagara, Y., Coupled stepwise PLS-VIP and ANN modeling for identifying and ranking aroma components contributing to the palatability of cheddar cheese. *J. Food Sci. Technol. Res.*, **21**, 175-186 (2015).
- 15) 守田愛梨, 荒木徹也, 池上翔馬, 岳上美紗子, 住 正宏, 上田玲子, 相良泰行, チェダー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, 日本食品工学会誌, **16**, 185-200 (2015).
- 16) Shibata, M., Araki, T. and Sagara, Y., Development of specified protocols and methodology in the application of food kansei model for the optimal design of danish pastry. *J. Food Sci. Technol. Res.*, **14**, 367-376 (2008).
- 17) Engel, W., Bahr, W. and Schieberle, P., Solvent assisted flavour evaporation – a new and versatile technique for the careful and direct isolation of aroma compounds from complex food matrices. *Eur. Food Res. Technol.*, **209**, 237-241 (1999).
- 18) Onishi, M., Inoue, M., Araki, T., Iwabuchi, H. and Sagara, Y., Odorant transfer characteristics of white bread during baking. *Biosci. Biotechnol. Biochem.*, **75**, 261-267 (2011).
- 19) Acree, T.E., Barnard, J. and Cunningham, D.G., A procedure for the sensory analysis of gas chromatographic effluents. *Food Chem.*, **14**, 273-286 (1984).
- 20) 秋山正行, 片倉友義, 渡邊武俊, 今吉有理子, 池田三知男, 市橋信夫, 大西正展, 岩渕久克, ゲーブルトップ紙容器種によるチルドグレープ紅茶飲料の香気透過性の相違, 日本食品科学工学会誌, **59**, 76-83 (2012).
- 21) ISO 11035 : 1994 (International Organization for Standardization), Sensory analysis- Identification and selection of descriptors for establishing a sensory profile by a multi-dimensional approach. (1994).
- 22) 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).
- 23) Ikeda, G., Nagai, H. and Sagara, Y., Development of food kansei model and its application for designing tastes and flavors of green tea beverage. *J. Food Sci. Technol. Res.*, **10**, 396-404 (2004).
- 24) Michishita, T., Akiyama, M., Hirano, Y., Ikeda, M., Sagara, Y. and Araki, T., Gas Chromatography/Olfactometry and electronic nose analyses of retronasal aroma of espresso and correlation with sensory evaluation by an Artificial Neural Network. *J. Food Sci.*, **75**, s477-489 (2010).
- 25) Kono, S., Kawamura, I., Yamagami, S., Araki, T. and Sagara, Y., Optimum storage temperature of frozen cooked rice predicted by ice crystal measurement, sensory evaluation and artificial neural network. *International Journal of Refrigeration*, **56**, 165-172 (2015).
- 26) Dunn, W.J., Wold, S., Edlund, U., Hellberg, S. and Gasteiger, J., 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).
- 27) Chong I.-G. and Jun, C.-H., Performance of some variable selection methods when multicollinearity is present. *Chemom. Intell. Lab. Syst.*, **78**, 103-112 (2005).
- 28) Jun, C.-H., Use of partial least squares regression for variable selection and quality prediction, in “2009 International Conference on Computers & Industrial Engineering”, pp. 1302-1307 (2009).
- 29) Drake, S.L., Gerard, P.D. and Drake, M.A., Consumer preferences for mild Cheddar cheese flavors. *J. Food Sci.*, **73**, s449-455 (2008).

(平成 27 年 3 月 30 日受付, 平成 27 年 9 月 2 日受理)