

食感の物性と言語表現の対応の推定

上原宏^{1,2} 持橋大地¹

¹ 総合研究大学院大学統計科学専攻 ² 立正大学 データサイエンス学部 ³ 統計数理研究所
{uehara,daichi}@ism.ac.jp

概要

レシピ共有サイトに記述される多様な食感表現は、レシピ材料の硬さ、粘り気などの違いによるところが大きい。両者の関係はこのサイトの情報だけではわからない。本研究では、材料構成と食感の物性（レオロジー）との関係を実証した調理科学研究データを収集し、それらとレシピ共有サイト上の食感表現との対応の推定を試みる。これにより様々な食感表現が、材料のどのような食感物性から知覚されるのかについて統計的なモデル化を行う。

1 はじめに

大量のレシピに記述される日本語の食感表現は約 450 種類あるとされ [1]、レシピ共有サイトにも、様々な食感の記述が見られる。各レシピの食感表現の違いは、知覚の個人差はあるものの、主にレシピの材料構成によると考えられる。調理科学の研究では、材料濃度構成の違いによる食感の違いを、食感物性（レオロジー）の測定により定量評価する実証研究が行われている ([2], [3])。しかし、食感物性が、人が知覚する食感としてどのようなものかは、限られた評価者による実証研究にとどまっている [7]。本研究では、レシピ共有サイトの食感表現と材料濃度データにもとづき、調理科学研究の食感物性データとの対応関係を推定する方法を提案し、食感表現が材料のどのような物性特徴によるものかを推定する。

次章で提案手法を述べ、3 章で適用対象のデータを説明する。続いて 4 章にてデータの解析結果および評価を記述し、5 章にて結論を述べる。

2 提案手法

本研究では、ゼラチン、寒天、アガーの 3 種類の凝固剤を用いたレシピ（以降、ゲルレシピ）を対象として、レシピ共有サイトから対象レシピを収集し、食感表現トピックと、材料濃度トピックのペア

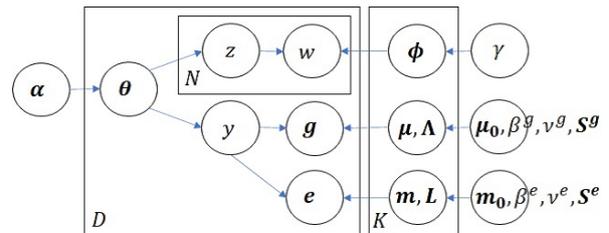


図 1 食感表現と凝固剤濃度を生成する結合トピックモデル

からなる食感トピックを結合トピックモデル [4] を用いて推定する。材料濃度トピックは調理科学の食感物性測定条件と同様なデータ形式であり、食感物性との対応付けが可能となる。以下、提案手法の詳細を述べる。

2.1 対象データの抽出

2.1.1 食感の固有表現の抽出

日本語の食感用語を網羅的に調査した“日本語テクスチャー用語体系¹⁾”を辞書として、レシピ共有サイトからレシピ毎の食感の固有表現を抽出した。

2.1.2 材料濃度ベクトルの収集

レシピ共有サイトの材料リストより、凝固剤の濃度および、エマルション²⁾の濃度を算出し、レシピ毎に凝固剤ベクトル、エマルションベクトルを収集した。なお、濃度の微小な違いが食感に大きく影響することがあるため、濃度を情報量 (-log) に変換した特徴量を用いている。

2.2 食感トピックの推定

2.2.1 生成モデル

図 1 のとおり、食感トピックは食感表現語彙の潜在トピック Z 、およびそれに対応する凝固剤の濃度ベクトルの潜在トピック Y のペアで構成する。食感表現は、 Z のもとで、 $Dir(y)$ をディリクレ事前分布

1) <https://www.naro.affrc.go.jp/org/nfri/yakudachi/terms/texture.html>

2) 牛乳、生クリーム、ヨーグルトなど分散質・分散媒が共に液体である分散系混合溶液のこと

とする多項分布 $Mult(\mathbf{W}|\phi)$ に従うとし、一方、凝固剤濃度ベクトル \mathbf{g} は、 \mathbf{Y} のもとで、 $\mathcal{N}\mathcal{W}(\beta_g, \nu_g, S_g)$ をガウスウィシャート事前分布とする正規分布 $\mathcal{N}(\mathbf{g}|\mu, \Lambda)$ に従うとする。調理科学では、凝固剤のみによる食感をベースラインとして、エマルジョンを混合した場合にどのような変化が顕れるかを実証したものが多く [3, 5, 11]。そこで、エマルジョンの濃度 \mathbf{e} については、凝固剤の潜在トピック \mathbf{Y} のもとで、 $\mathcal{N}\mathcal{W}(\beta_e, \nu_e, S_e)$ をガウスウィシャート事前分布とする正規分布 $\mathcal{N}(\mathbf{g}|\mathbf{m}, \mathbf{L})$ に従うとする。生成モデル、および生成過程を以下に示す。

生成モデル

$$p(\mathbf{W}, \mathbf{Z}, \theta, \phi, \mathbf{g}, \mathbf{y}, \mu, \Lambda, \mathbf{e}, \mathbf{L}) = \text{Dir}(\theta|\alpha) \text{Dir}(\phi|\gamma) \prod_n \text{Mult}(z_{dn}|\theta_d) \text{Mult}(w_{dn}|\theta_k, z_{dn}) \times \mathcal{N}\mathcal{W}(\mu_k, \Lambda_k|\mu_0, \beta^g, \nu^g, \mathbf{S}^g) \prod \text{Mult}(y_d|\theta_d) \mathcal{N}(\mathbf{g}_d|\mu_k, \Lambda_k, y_d) \times \mathcal{N}\mathcal{W}(\mathbf{m}_k, \mathbf{L}_k|\mathbf{m}_0, \beta^e, \nu^e, \mathbf{S}^e) \prod_d \mathcal{N}(\mathbf{e}_d|\mathbf{m}_k, \mathbf{L}_k, y_d) \quad (1)$$

生成過程

1. For $k \in 1, \dots, K$:
 - (a) $\phi_k \sim \text{Dir}(\gamma)$
 - (b) $\mu_k, \Lambda_k \sim \mathcal{N}\mathcal{W}(\mu_0^g, \beta^g, \nu^g, \mathbf{S}^g)$
 - (c) $\mathbf{m}_k, \mathbf{L}_k \sim \mathcal{N}\mathcal{W}(\mu_0^e, \beta^e, \nu^e, \mathbf{S}^e)$
2. For $d \in 1, \dots, D$:
 - (a) Draw $\theta_d \sim \text{Dir}(\alpha)$
 - (b) For $n \in 1, \dots, N_d$:
 - i. Draw $z_{dn} \sim \text{Mult}(\theta_d)$
 - ii. Draw $w_{dn} \sim \text{Mult}(\phi_{z_{dn}})$
 - (c) Draw $y_d \sim \text{Mult}(\theta_d)$
 - (d) Draw $\mathbf{g}_d \sim \mathcal{N}(\mu_{y_d}, \Lambda_{y_d})$
 - (e) Draw $\mathbf{e}_d \sim \mathcal{N}(\mathbf{m}_{y_d}, \mathbf{L}_{y_d})$

ここで、各変数は以下を意味する。

ϕ_k : トピック k 毎の食感表現語彙分布。事前分布パラメータ γ 。

μ_{y_d}, Λ_{y_d} : k 毎のゲル濃度分布。事前分布パラメータは、 $\mu_0^g, \beta^g, \nu^g, \mathbf{S}^g$

$\mathbf{m}_{y_d}, \mathbf{L}_{y_d}$: k 毎のエマルジョン濃度分布

θ_d : 文書 d (レシピ) 毎のトピック分布パラメータ。事前分布パラメータは、 α 。

z_{dn} : 食感表現語彙 w_{dn} の潜在トピック。

y_d : ゲル濃度 g_d の潜在トピック

\mathbf{g}_d : 凝固剤濃度

\mathbf{e}_d : エマルジョン濃度

2.2.2 トピックの推定

Gibbs sampling により、潜在トピック z_{dn}, y_d および、トピック毎の分布パラメータ $\phi_k, \mu_{y_d}, \Lambda_{y_d}, \mathbf{m}_{y_d}, \mathbf{L}_{y_d}$

を推定する。収束判定は、perplexity、および、 ϕ_k の語彙確率の大小関係が一定になることによる。

1. 食感表現の潜在トピック z_{dn}

$$p(z_{dn} = k | \mathbf{W}, \mathbf{Z}^{-dn}, \alpha, \gamma, \mathbf{y}, \mathbf{g}, \mu, \Lambda, \mu_0^g, \beta^g, \nu^g, \mathbf{S}^g) \propto (N_{dk}^{-dn} + M_{dk} + \alpha) \frac{N_{k, w_{dn}}^{-dn} + \gamma}{N_k^{-dn} + \gamma \mathbf{V}} \quad (2)$$

ここで、各変数は以下を意味する。

N_{dk}, M_{dk} : d で k に所属する食感表現語彙数および、凝固剤ベクトルの数

N_k : k に所属する食感表現語彙の数

N_d, M_d : d の食感表現語彙の数、および凝固剤ベクトルの数 (=1)

N_{kw} : k に所属する食感表現語彙別の数

N_{dk}^{-dn} : d において、 d_n を除き k に所属する食感表現語彙の数 (以降、左上添え字 “-” は同様な除外を意味する)

2. 凝固剤濃度の潜在トピック y_d

$$p(y_d = k | \mathbf{W}, \mathbf{Z}, \alpha, \gamma, \mathbf{y}^{-d}, \mathbf{g}, \mu, \Lambda, \mu_0^g, \beta^g, \nu^g, \mathbf{S}^g) \propto \frac{N_{dk} + M_{dk}^{-d} + \alpha_k}{N_d + M_d - 1 + \sum_k \alpha_k} \times \mathcal{N}(\mathbf{e}_d | \mu_{y_d}, \Lambda_{y_d}) \quad (3)$$

3. 凝固剤濃度のトピック別分布 μ_{y_d}, Λ_{y_d}

$$p(\mu_k, \Lambda_k | \mathbf{y}, \mathbf{g}, \mu^{-k}, \Lambda^{-k}, \mu_0, \beta^g, \nu^g, \mathbf{S}^g) \propto \mathcal{N}(\mu_k | \mu_c, (\beta^g \Lambda_c)^{-1}) \mathcal{W}(\Lambda_k | \nu_c^g, \mathbf{S}_c^g) \quad (4)$$

ここで、各変数は以下を意味する。

$$(\mathbf{S}_c^g)^{-1} = (\mathbf{S}^g)^{-1} + \sum_{\mathbf{g}_d \in \text{topic } k} (\mathbf{g}_d - \bar{\mathbf{g}})(\mathbf{x}_d^g - \bar{\mathbf{g}})^T + \frac{N_k \beta^g}{N_k + \beta^g} (\bar{\mathbf{g}} - \mu_0)(\bar{\mathbf{g}} - \mu_0)^T$$

$$\bar{\mathbf{g}} = \frac{1}{N_k^g} \sum_{\mathbf{g}_d \in \text{topic } k} \mathbf{g}_d, \mu_c = \frac{N_k^g \bar{\mathbf{g}} + \beta^g \mu_0}{N_k^g + \beta^g}$$

$$\Lambda_c = (N_k^g + \beta^g) \Lambda_k, \nu_c^g = \nu^g + N_k^g$$

$\sum_{\mathbf{g}_d \in \text{topic } k}$: topic k に所属する \mathbf{g}_d のレシピ数

4. エマルジョン濃度のトピック別分布 $\mathbf{m}_{y_d}, \mathbf{L}_{y_d}$

$$p(\mathbf{m}_k, \mathbf{L}_k | \mathbf{y}, \mathbf{e}, \mathbf{m}^{-k}, \mathbf{L}^{-k}, \mathbf{m}_0, \beta^e, \nu^e, \mathbf{S}^e) \propto \mathcal{N}(\mathbf{m}_k | \mathbf{m}_c, (\beta^e \mathbf{L}_c)^{-1}) \mathcal{W}(\mathbf{L}_k | \nu_c^e, \mathbf{S}_c^e) \quad (5)$$

ここで、 $(\mathbf{S}_c^e)^{-1}$ は、式 (4) の $(\mathbf{S}_c^g)^{-1}$ で g を e とした式で表す。また、 $\sum_{\mathbf{e}_d \in \text{topic } k} = \sum_{\mathbf{g}_d \in \text{topic } k}$ である。

なお、食感表現のトピック別分布パラメータ ϕ_k 、およびレシピ毎のトピック分布パラメータ θ_d は、

表 1 調理科学の実証研究 [7-12] にもとづくゲルレシピの分析データ.

(a) ゲル素材の濃度別食感物性

データ	凝固剤			食感物性 (RU) ^a		
	ゼラチン	寒天	アガー	硬さ	凝集性	粘着性
1	0.018	0	0	0.20	0.6	0.1
2	0.02	0	0	0.3	0.59	0.04
3	0.025	0	0	0.72	0.17	0.57
4	0.03	0	0	2.78	0.31	0.42
5	0.03	0	0.03	3.01	0.35	12.6
6	0	0.008	0	2.2	0.12	0
7	0	0.01	0	3.5	0.1	0
8	0	0.012	0	5.0	0.8	0
8	0	0.02	0	5.67	0.03	0
10	0	0	0.008	1.0	0.48	0
11	0	0	0.01	1.5	0.33	0.01
12	0	0	0.012	2.7	0.28	0.02
13	0	0	0.03	2.21	0.20	1.95

(b) ゲル (ゼラチン)・エマルジョン混合レシピの食感物性. 機器固有の測定単位は Rheology Unit (RU) に統一した. (生ク=生クリーム)

レシピ	凝固剤		エマルジョン				食感物性 (RU)		
	ゼラチン	砂糖	卵白	卵黄	生ク	牛乳	硬さ	凝集性	粘着性
ババロア	0.025	0	0	0.08	0.2	0.4	3.86	0.809	0.095
ミルクゼリー	0.025	0.032	0	0	0	0.787	1.83	0.27	0.44

以下により求める.

$$\phi_{kv} = \frac{N_{kv} + \gamma}{N_k + \gamma V}, \quad \theta_{dk} = \frac{N_{dk} + M_{dk}}{N_d + M_d + \sum \alpha} \quad (6)$$

2.3 食感トピックと食感物性との対応推定

調理科学の食感物性実証での凝固剤濃度条件と、上記の凝固剤濃度トピックとの KL 情報量から、食感物性と食感表現トピックを対応付ける. なお、エマルジョン濃度のトピックは、対応を推定したトピック中での食感のバリエーションを分析する際に用いる. 詳細は、分析結果と評価にて述べる.

3 データ

3.1 ゲルレシピの収集

レシピ投稿サイト Cookpad³⁾より、タイトル、要約、および作り手によるレビュー (つくれば) に食感固有表現が出現するゲルレシピ約 10,000 件を抽出した. 更に、3 種類の凝固剤のいずれかを含み、かつ材料リストの量表記に欠測等がないものを抽出した結果、対象データ数は約 3,000 となった.

3) <https://cookpad.com/>

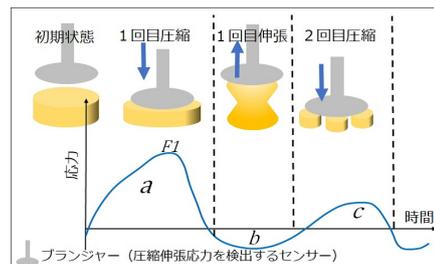


図 2 食感物性測定機器の動作イメージ.

3.2 調理科学実証データの収集

材料と濃度の異なるゲルレシピに関する食感物性の測定結果を、調理科学実証研究から抽出した [7-12]. 表 1(a) は、3 種類の凝固剤について異なる濃度条件での測定結果を、表 1(b) は、ゼラチンに異なる濃度のエマルジョンを混合した場合の測定結果である. いずれも材料濃度条件とそれに対応する食感物性値を示している. ここで物性値とは、人の咀嚼を模した測定器具 (図 2) により食品サンプルから検出される以下の 3 種類の応力 (レオロジー) 特徴量である.

硬さ: 1 回目の圧縮時に検出される最大応力 (図 2 の F1), 最初の咀嚼時に感じる硬さに相当する.

凝集性: 1 回目の圧縮時の総応力に対する 2 回目圧縮時の総応力の割合 (図 2 の c/a). 凝集性の小ささは、飲み込みやすさ、もろさに相当する.

粘着性: 1 回目の伸張時に検出される負の総応力 (図 2 b).

4 データ分析結果と評価

4.1 食感トピックと食感物性との対応推定

表 2 に食感表現トピック推定結果および、調理科学実証データ (表 1(a)(b)) との対応推定結果を示す. 凝固剤, 食感表現語彙は、それぞれ濃度, 語彙分布確率の降順に小数点 3 位の値を持つものまで表記した. 各食感表現語彙には、日本語テキスト用体系による類型を () 内に付記した. 対応データ欄には、提案手法により対応付けた、表 1(a)(b) の各データ番号および料理名を示した.

例えば、トピック 8 の食感表現語彙は、変形しやすさを意味する“ふるふる”となっており、対応付けられたデータ 1,2 は比較的低濃度のゼラチンで、食感物性上の硬さは比較的小さい (表 1(a)), これに対して、トピック 3 では、“硬い”、“むちむち”のよう

表2 食感表現トピックの検出結果と調理科学レシピとの対応

Topic	凝固剤	食感表現語彙	レシピ数	対応データ (表1)
7	gelain:0.005	柔らかい (変形しやすさ):0.877 ほわっ (凝集の小ささ):0.123	73	
4	gelain:0.007	軽い (変形しやすさ):0.93 ふっくら (凝集の小ささ):0.07	74	
0	gelain:0.012	もちもち (噛みごたえ):1.0	152	
8	gelain:0.014	ふるふる (変形しやすさ):1.0	300	1,2
3	gelain:0.054	硬い (噛みごたえ):0.307 むちむち (噛みごたえ):0.245 ぐちゃっ (変形しやすさ):0.129 ぼったり (凝集の小ささ):0.089 ぶるんぶるん (噛みごたえ):0.062 ぼそぼそ (凝集の小ささ):0.06 ぼてっ (凝集の小ささ):0.055 シャクシャク (破碎):0.029 ぶるぶる (噛みごたえ):0.022	38	3,4, パバロア, ミルクゼリー
5	agar(0.009) gelain(0.009)	ぷるぷる (変形しやすさ):1.0	1046	5
2	agar(0.016)	ねっとり (粘りとぬめり):0.445 ぷりっ (変形しやすさ):0.255 もったり (凝集の小ささ):0.21 ほろほろ (凝集の小ささ):0.08 ねっちり (粘りとぬめり):0.01	62	10,11,12,13
6	gelain:0.003 kanten:0.002	ふわふわ (凝集の小ささ):1.0	1200	
1	kanten:0.004	ゆるゆる (変形しやすさ):0.487 べちゃっ (粘りとぬめり):0.432 ふかふか (凝集の小ささ):0.027 ぶりっ (噛みごたえ):0.027 弾力がある (噛みごたえ):0.026	60	
9	kanten:0.021	どっしり (破碎):0.27 ぷにぷに (変形しやすさ):0.1 くたっ (変形しやすさ):0.074 ぶりんぶりん (噛みごたえ):0.069 コリッ (噛みごたえ):0.064 だらだら (変形しやすさ):0.057 からっ (破碎):0.055 はじける (変形しやすさ):0.055 重い (破碎):0.054	31	6,7,8,9

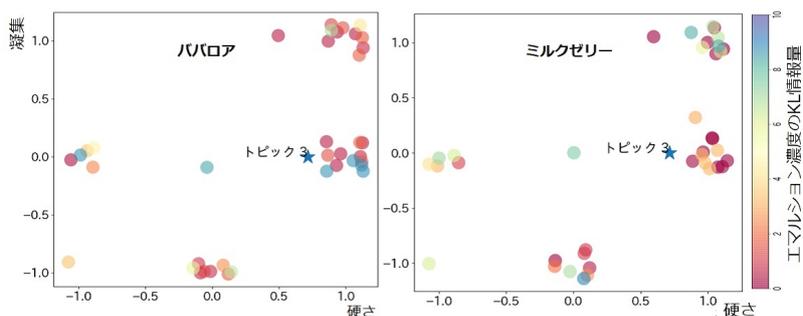


図3 パバロア・ミルクゼリー調理科学レシピと投稿レシピとのエマルション濃度別食感特徴

な噛みごたえに関する語彙および凝集の小ささを意味する“ぼったり”が上位に出現する。対応データ3,4は比較的高濃度のゼラチンで、食感物性上の硬さは比較的大きく、凝集性は比較的小さい(表1(a))。このように食感トピックは、調理科学にもとづく食感物性特徴から整合的に説明できることを示している。

4.2 エマルション混合レシピの食感表現と物性特徴

同一食感トピック3に所属するパバロア、ミルクゼリーの調理科学データ(表1(b))の食感のバリエーションの特徴を図3に示す。これは、トピック3に所属する38個のゲルレシピ(表2レシピ数)を、それぞれに出現する硬さ、および凝集を意味する語彙頻度をもとに平面上にプロットし、更にエマルション濃度のパバロア、ミルクゼリーに対する類似度(KL情報量)で色分けしたものである。濃い赤色ほ

ど類似度が高いことを示す。パバロアと類似するゲルレシピは、より硬くかつ凝集性が高い領域に集中する一方、ミルクゼリーでは、硬いが、凝集性は平均的な領域に集中する。これらバリエーションの特徴は、パバロア、ミルクゼリーおよびレシピ3の物性特徴(表1)と一致性を示している。

5 結論

本研究では、レシピ共有サイトから推定した食感表現特徴が、材料物性からどのように説明できるかを分析するため、結合トピックモデルを用いてレシピ共有サイトの言語データと調理科学実証データとの架橋を試みた。推定結果は、食感表現トピックと、対応する食感物性特徴の一致性を示した。これは提案手法が、食感の言語表現から食感の物性の予測、もしくはその逆の予測を可能にすることを示している。

参考文献

- [1] 早川文代, “現代日本人の食感表現,” 日本家政学会誌, Vol. 60, No.1 pp.69-72, 2009. Other Food Attributes,” Food Technology, Vol.17, pp.74-77, 1963.
- [2] T.Farjania, and A.Madadloub, “An overview on preparation of emulsion-filled gels and emulsion particulate gels,” Trends in Food Science & Technology, Vol.86, pp.85-94, 2019.
- [3] 川端 晶子, 澤山 茂, “低メトキシルペクチンを用いたババロアのテクスチャーについて,” 栄養と食糧, Vol.27, pp.55-63, 1974.
- [4] D.Mimno, H.M.Wallach, J.Naradowsky, D.A.Smith, and A.McCallum, “Polylingual topic models,” EMNLP '09, Vol.2, pp.880-889, 2009.
- [5] 茂木 美智子, “ゼリー食品のテクスチャーについて,” 調理科学, Vol.1, pp.28-35, 1975.
- [6] D.Mimno, H.M.Wallach, J.Naradowsky, D.A.Smith, and A.McCallum, “Polylingual topic models,” EMNLP '09, Vol.2, pp.880-889, 2009.
- [7] 鈴野 弘子, 澤山 茂, 川端 晶子, “愛玉子ゲルのテクスチャープロフィール,” 日本家政学会誌, Vol.43, pp.525-531, 1992.
- [8] F.Kawamura, and S.Takayanagi, “Properties of Gelatin Gel and Sol Mixed with Whipped Cream,” Science of cookery, Vol.13, pp. 284-288, 1980.
- [9] 大村 公仁子, 赤羽 ひろ, 中浜 信子, “寒天ゲルの破断特性について,” 家政学会誌, Vol.29, pp.22-27, 1978.
- [10] 栗本 公恵, 森高 初恵, 藤井 恵子, 大越 ひろ, 中濱 信子, “ κ -カラギーナン-ゼラチン混合ゲルの熱および力学特性,” 日本家政学会誌, Vol.48, pp.885-892, 1997.
- [11] 河村 フジ子, 中島 茂代, 幸野 礼子, “エマルジョン混合ゼラチンゾルとゲルの特性について,” 家政学会誌, Vol.29, pp.356-361, 1978.
- [12] 村山 篤子, “カラギーナンゼリー,” 調理科学, Vol.25, pp.353-359, 1992.