

博士論文

「香辛料抽出物を添加した減塩パンの
 γ -アミノ酪酸および遊離アミノ酸の呈味への寄与」

2026年2月

龍谷大学大学院 農学研究科 食農科学専攻 博士後期課程

N23D001 坂本千科絵

目次

序論	1
----------	---

第 1 章

香辛料添加が減塩パン製造工程における GABA および Glu の生成・保持に及ぼす影響	3
I. 緒言	3
II. 方法	4
1. 試料の調製	4
2. 遊離アミノ酸分析	5
3. 統計解析	6
III. 結果	7
1. 香辛料添加によるパンへの影響	7
2. Control パンにおける製造工程別遊離アミノ酸の動態	9
3. 香辛料添加による製造工程別 GABA 量および Glu 量の変動	10
4. 香辛料添加による製造工程中における GABA 量および Glu 量の変化 ..	13
5. 香辛料添加による製造工程中の GABA および Glu の増減とその関連	13
IV. 考察	16
V. まとめ	18

第 2 章

香辛料添加減塩パンにおける遊離アミノ酸組成中の GABA および Glu の呈味への寄与	19
I. 緒言	19
II. 実験方法	20
1. 香辛料添加減塩パンの遊離アミノ酸含量	20
2. アミノ酸呈味モデル溶液および香辛料添加減塩パンの官能評価	21
3. 統計分析	23

Ⅲ．結果	24
1. 香辛料添加減塩パンの遊離アミノ酸量	24
2. アミノ酸呈味モデル溶液の官能評価	25
3. 香辛料添加減塩パンの官能評価	27
Ⅳ．考察	30
Ⅴ．まとめ	33
総括	34
謝辞	36
参考文献	37
主論文	42

序論

日本人の食塩摂取量は長年にわたり高水準で推移しており、高血圧や心血管疾患、脳卒中の主要なリスク因子として公衆衛生上の課題となっている。令和6年度国民健康・栄養調査によれば、成人1日あたりの食塩摂取量は男性10.5 g、女性8.9 g¹⁾であり、食事摂取基準（2025年版）²⁾が示す目標量（男性7.5 g未満、女性6.5 g未満）を依然として上回っており、実際の摂取量と目標量には乖離が存在している。特に近年、60歳以上ではパンからの食塩摂取が増加している傾向にあり³⁾、パンを減塩することは食塩総摂取量低減に寄与する有効な手段であると考えられる。

パンに含まれる食塩は、単に塩味を付与するだけでなく、グルテンの形成、酵母の発酵制御、保存性の維持など、製造過程および官能特性の維持に重要な役割を果たしており、単純な食塩の削減ではパンの食感・風味・嗜好性の低下を招きやすく、消費者の受容性を損なう可能性が高い。先行研究でも食塩の局在化⁴⁾、塩化カリウム⁵⁾、塩化マグネシウムや塩化カルシウム⁶⁾などの食塩代替物の使用、コリン（ビタミン様物質）⁷⁾の添加、香辛料のフレーバーの活用⁸⁾といった多様な減塩方法が提案されている。しかし、これらの方法のみでは従来のパンと同等の嗜好性を維持することは容易ではないため、減塩と共に嗜好性を伴う方法が必要と考えられる。

また、香辛料は調理において香りや辛味を付与する役割を担うだけでなく、抗酸化作用⁹⁾、抗炎症作用¹⁰⁾、血行促進作用¹¹⁾など多様な生理活性を持つことが知られている。また、香辛料の芳香性や刺激性は塩味を補完するという点において減塩食品の開発にも応用可能であると考えられており、実際に香辛料を添加したトマトスープにおいて減塩効果が確認された例も報告されている¹²⁾。一方で香辛料の芳香性や刺激性は食品や料理の風味に大きな影響を及ぼすため、使用量や種類によっては本来の味を損なう可能性がある。

そこで、本研究では、風味に影響を与えない少量の香辛料抽出物を用い、機能性アミノ酸の一つであるγ-アミノ酪酸（GABA）を介した減塩方法に着目した。GABAは、グルタミン酸（Glu）を基質とするグルタミン酸脱炭酸酵素（GAD）により生成され¹³⁾、生体内では血圧低下¹⁴⁾、ストレス軽減、睡眠改善¹⁵⁾など

多様な生理作用を示すことが報告されている。さらに、GABA は味覚伝達にも関与することが示唆されている。味蕾細胞には、GABA の結合によりクロライドイオン透過性を示すイオンチャネル型 GABA_A 受容体が発現していることがマウス味蕾で報告されている¹⁶⁾。ヒトを対象とした官能検査では、微量の GABA が塩味やうま味を強める対比効果や苦味を弱める抑制効果を持つことも明らかにされている¹⁷⁾。

既に、香辛料抽出物が GAD の活性を制御することが報告されており¹⁸⁾、cumin や anise の添加により食品中で GAD が活性化し GABA 生成が促進される可能性が示唆されている。実際、これらの香辛料抽出物は、小麦粉中に内在する GAD 活性を調節し、それに伴って GABA 生成が増加することが確認されている¹⁹⁾。これらの知見は、香辛料の添加によってパン中の GABA 含量を高め、GABA の呈味への作用を利用することでパン全体の味質改善が可能であることを示唆する。

また、GABA の前駆体でありうま味成分でもある Glu を減塩パンに添加すると、塩味の減少を補い嗜好性を高めることが報告されている²⁰⁾。したがって、GABA と Glu はいずれも減塩食品の味質を補ううえで重要な要素であり、適切に利用することで食塩摂取量の削減に貢献し得ると考えられる。さらに、パンには Glu や GABA 以外にも多数の遊離アミノ酸が含まれており、これらは相互に作用することで味全体の調和性やまろやかさに影響を及ぼすことも知られている²¹⁾。したがって、香辛料添加減塩パンの塩味や嗜好性の向上には、GABA や Glu といった単一成分の含量のみならず、他の遊離アミノ酸の影響も考慮する必要がある。

以上の背景を踏まえ、本研究では、香辛料添加が製パン工程における GABA および Glu の生成および保持に及ぼす影響をアミノ酸分析により明らかにすることを目的とした（第 1 章）。さらに、GABA が塩味および嗜好性に与える影響について、香辛料添加減塩パンの遊離アミノ酸組成を模したアミノ酸呈味モデル溶液（以下、アミノ酸呈味モデル溶液）ならびに実際の香辛料添加減塩パンを用い、官能評価により検証した（第 2 章）。これら二つの研究成果を統合することで、香辛料添加減塩パン中の GABA をはじめとする遊離アミノ酸が、パンの塩味や嗜好性に果たす役割を明確にすることを最終的な目的とした。

第 1 章

香辛料添加が減塩パン製造工程における GABA および Glu の生成・保持に及ぼす影響

I. 緒言

香辛料の芳香性や刺激性は塩味を補完できることはよく知られており²²⁻²⁴⁾、栄養教育においても減塩の工夫として「香辛料の香りや刺激の活用」が挙げられることが多い²⁵⁾。しかし、香辛料の芳香性や刺激性は食品や料理の風味に大きく影響するため、食品や料理本来の味を損なうことなく減塩効果を得るには香辛料の種類や使用量を詳細に検討する必要がある。そこで本研究では、風味に影響を与えない少量の香辛料抽出物を利用し、GABA を介した減塩効果に着目した。

これまでに、遊離アミノ酸はパン製造工程において変化することが報告されており²⁶⁾、さらに、全粒粉パンに cumin、anise 抽出物を添加すると GABA 量が約 2 倍に増加し、官能試験でパンの嗜好性や塩味が増すこと¹⁹⁾も明らかにされている。しかし、香辛料添加がパンの製造工程（混捏・発酵・焼成）において GABA および Glu 量にどのような影響を与えるかは十分に解明されていない。したがって、香辛料添加によるパン中の GABA および Glu の動態を製造工程別に定量的に評価し、香辛料の種類との関係性を明らかにすることは、減塩パンの機能性と嗜好性の両立を図るための重要な基盤となる。

以上を踏まえ、第 1 章では、14 種類の香辛料抽出物を用い、減塩パンの製造工程における GABA および Glu の変動を分析し、香辛料が GABA 生成促進または保持に及ぼす影響を検討することを目的とした。

II. 方法

1. 試料の調製

(1) 香辛料抽出物

香辛料は、既報¹⁸⁾において 0.8 %食塩水における塩味の感じ方に影響を与えることが明らかになっている以下の品目を用いた。anise、basil、celery、cumin、lemongrass、mace、oregano、paprika、parsley、peppermint、poppyseed（以上、株式会社大津屋商店、東京、日本）、ginger（有限会社コウベグロサーズ、神戸、日本）、yuzu peel（三笠産業株式会社、山口、日本）、perilla（ソニック株式会社、群馬、日本）を用いた。

各香辛料粉末に対して、重量比 5～10 倍重量の水を加えて攪拌後、4～6℃で一晩静置し、遠心分離（10,000 × g、5 分）を行った。得られた上清を香辛料抽出物として用いた。後述の減塩パン製造において、小麦粉 100 g あたり香辛料 0.2 %相当量となるよう添加量を調整した。

(2) 減塩食パンの製法

減塩食パンの製造には、ホームベーカリー（Panasonic SD-BMT1000 メニューNo.1 パン・ド・ミ）を使用した。パンの製造工程²⁷⁾は、混捏、発酵、焼成の 3 段階に大別される。混捏工程は、ホームベーカリー内蔵の羽を回転させて小麦粉生地を練る「ねり（20 分）」、小麦粉と水をなじませる「ねかし（25 分）」、その後にパン酵母を投入、再び「ねかし（33 分）」、「ねり（12 分）」を行う合計 90 分の工程である。続いて、温度管理下で生地を発酵させる「発酵（165 分）」、生地を焼き上げる「焼き（35 分）」が行われる。

本研究では既報²⁸⁾に基づき、小麦粉 100 g に対し 0.75 %食塩濃度としたものを 50 %減塩パン（以下、Control）とし、香辛料添加パンには、Control に小麦粉 100 g あたり 0.2 %相当となる香辛料抽出物を添加した。

使用した主な材料の配合は表 1-1 の通りである。小麦粉（日清 パン専用小麦粉、株式会社日清製粉ウェルナ、東京、日本）、ドライイースト（サフ インスタントイースト赤、日仏商事株式会社、神戸、日本）、塩（食塩、公益財団法人塩事業センター、東京、日本）、グラニュー糖（パールエース印グラニュー糖、株式会社パールエース、東京、日本）、スキムミルク（製菓・製パン用北海道産スキ

ムミルク、株式会社パイオニア企画)、無塩バター(雪印北海道バター 食塩不使用、雪印メグミルク株式会社、東京、日本)を用いた。

ホームベーカリーによる製造工程において、「ねり+ねかし」終了直後の生地を混捏ドウ、「発酵」終了時点の生地を発酵ドウ、「焼き」終了直後に型から取り出し、室温で1時間放冷したものを焼成パンと定義し、それぞれから遊離アミノ酸分析用の試料を採取した。

表 1-1 パンの配合 (ベーカース %)

材料	Control	香辛料添加
小麦粉	100.0	100.0
ドライイースト	1.2	1.2
塩	0.75	0.75
砂糖	5.0	5.0
スキムミルク	5.0	5.0
無塩バター	5.0	5.0
水	65.0	—
水+香辛料抽出物	—	65.0

香辛料: anise, basil, celery, cumin, ginger, lemongrass, mace, oregano, paprika, parsley, peppermint, perilla, poppy seed, yuzu peel

香辛料抽出物: 小麦粉 100 g あたり 0.2 g の香辛料に 5~10 倍量の水を加え、一晚静置後、遠心分離 (10,000 × g, 5 min, 5 °C) した上清を用いた

2. 遊離アミノ酸分析

(1) 試料の調製

約 1 g の試料 (混捏ドウ、発酵ドウ、焼成パンはパンのクラムのみ) を正確に秤量し、HEPES-Na バッファー (100 mM、pH 7.0) 3.5 mL を加え、氷上で粉砕した (Tissue-Tearor、Biospec)。その後、遠心分離 (10,000 × g、10 分) を行った。得られた上清に 60 %過塩素酸を加え、氷中で静置 (10 分) 後、再度遠心分離 (10,000 × g、10 分) を行い、タンパク質を除去して上清を回収した。さらに、上清を限外濾過 (Amicon® Ultra-0.5 フィルター、10-kDa MWCO、Millipore Sigma、6,000 × g、4 °C、10 分) し、得られたろ液をアミノ酸分析用の最終試料とした。

(2) アミノ酸標準液

アミノ酸の定量には、富士フイルム和光純薬株式会社製のアミノ酸混合標準液 H 型を使用した。本標準液には 17 種類のアミノ酸が含まれており、これに加えて本研究の分析対象である GABA、ヒドロキシプロリン、グルタミン、アスパラギン (Asn)、トリプトファン、システインをそれぞれ添加し、最終濃度が 100 $\mu\text{mol/L}$ となるよう調製した。この標準液を、各アミノ酸の保持時間に基づくピーク同定のために用いた。

(3) アミノ酸分析

遊離アミノ酸の定量には、伊藤ら²⁹⁾の方法に準じ、超高速アミノ酸分析用反応試薬キット（日立ハイテックスサイエンス社：誘導体化試薬 NBD-F）を用いて誘導体化を行い、超高速アミノ酸分析機（HITACHI La Chrom Ultra）で同定・定量した。遊離アミノ酸含量は、小麦粉 100 g 当たりの含有量 (mg) として算出した。分析は試料ごとに 3 回繰り返し測定し、平均値を算出した。

3. 統計解析

一元配置分散分析 (ANOVA) は Microsoft Excel 2018 を用いて実施した。多重比較は Tukey 検定により行い、 $p < 0.05$ の差を統計的に有意とみなした。相関分析は決定係数 (R^2) を用いて実施した。統計解析には対応のない t 検定も用いており、 $p < 0.05$ を統計的に有意とした。

III. 結果

1. 香辛料添加によるパンへの影響

香辛料に本来含まれるアミノ酸の影響を検討するため、表 1-2 に香辛料粉末に含まれる遊離アミノ酸量を示した。14 種類の香辛料のうち、*perilla* が GABA (30.5 ± 0.6 mg/100 g)、Glu (55.2 ± 1.2 mg/100 g)、総遊離アミノ酸 (630.7 ± 8.0 mg/100 g) で最も高い値を示し、*mace* は GABA、Glu が検出されず、総遊離アミノ酸が最も少ない (1.3 ± 0.3 mg/100 g) 結果であった。

パンに添加するために使用した香辛料粉末 0.2 g 中には GABA (0~0.06 mg)、Glu (0~0.11 mg)、総遊離アミノ酸量 (0~1.26 mg) が含まれているが、本研究では香辛料の水抽出物を用いたため、実際にパン中の含まれる遊離アミノ酸量に影響はないと考えられる。また、全てのパン焼成後の重量は 420 g 程度で香辛料の添加はパンの重量に影響を与えなかった。なお、添加した香辛料の量は既報²⁷⁾と同じであり、香辛料の添加による香りや外観には影響がないと判断できる。

表 1-2 香辛料粉末中の遊離アミノ酸量 (mg/100 g)

	GABA	Glu	Total free amino acids
Anise	1.8 ± 0.0	3.9 ± 3.2	189.4 ± 5.6
Basil	16.3 ± 1.2	23.6 ± 1.3	448.1 ± 7.8
Celery	7.7 ± 0.5	21.2 ± 1.7	300.0 ± 31.5
Cumin	1.2 ± 0.1	Nd	153.7 ± 1.3
Ginger	12.9 ± 1.7	45.6 ± 5.2	483.0 ± 25.7
Lemongrass	3.0 ± 0.3	1.9 ± 1.5	201.4 ± 5.9
Mace	Nd	Nd	1.3 ± 0.3
Oregano	2.2 ± 0.7	Nd	130.0 ± 22.2
Paprika	6.3 ± 0.2	11.1 ± 9.1	476.8 ± 24.7
Parsley	15.5 ± 0.6	24.8 ± 1.6	261.5 ± 7.7
Peppermint	7.0 ± 0.7	12.1 ± 1.0	233.0 ± 13.2
Perilla	30.5 ± 0.6	55.2 ± 1.2	630.7 ± 8.0
Poppy seed	0.9 ± 0.4	5.9 ± 3.0	79.9 ± 36.3
Yuzu peel	4.4 ± 0.4	6.3 ± 2.6	162.4 ± 8.9

Each value is the mean ± SD ($n = 3$)

Total free amino acids: The total of alanine, arginine, Asn, aspartic acid, cysteine, cystine, GABA, Glu, glutamine, glycine, histidine, hydroxyproline, isoleucine, leucine, lysine, methionine, phenylalanine, proline, serine, threonine, tryptophan, tyrosine, valine

Nd : not detected

2. Control パンにおける製造工程別遊離アミノ酸の動態

Control パンの製造工程中の各遊離アミノ酸の動態を表 1-3 に示した。

GABA は製造工程中において、混捏工程 (1.70 ± 0.28 mg/100 g flour) から発酵工程 (0.80 ± 0.40 mg/100 g flour)、焼成工程 (0.51 ± 0.08 mg/100 g flour) と段階的に減少した。混捏工程と焼成工程の間には有意差が認められた ($p < 0.01$)。

一方、Glu は混捏工程 (4.61 ± 1.35 mg/100 g flour) から発酵工程 (5.26 ± 0.63 mg/100 g flour) で増加し、焼成工程 (4.47 ± 0.88 mg/100 g flour) と、混捏工程とほぼ同等の量まで減少に転じた。しかし、Glu 量に有意差は認められなかった。

製造工程に伴う GABA と Glu の動態を検討するため、Fermented dough / Kneaded dough (以下、F/K 比) および Baked bread / Fermented dough の比 (以下、B/F 比) を算出した。GABA は F/K 比 0.63、B/F 比 0.48 であったのに対し、Glu はそれぞれ 1.14 および 0.85 の値を示した。

表 1-3 パンにおける製造工程中の遊離アミノ酸量 (mg/100 g flour)

Free amino acid	Kneaded dough	Fermented dough	Baked bread	F/K	B/F
GABA	1.70 ± 0.28 ^a	1.07 ± 0.13	0.51 ± 0.08 ^b	0.63	0.48
Glu	4.61 ± 1.35	5.26 ± 0.63	4.47 ± 0.88	1.14	0.85
Alanine	3.06 ± 0.96	1.27 ± 0.15	1.20 ± 0.02	0.42	0.94
Arginine	1.27 ± 0.73	2.91 ± 0.44	1.81 ± 0.26	2.30	0.62
Asparagine	11.02 ± 5.95	7.16 ± 0.60	4.61 ± 0.64	0.65	0.64
Aspartic acid	7.00 ± 2.49 ^a	0.60 ± 0.07 ^b	0.48 ± 0.11 ^b	0.09	0.80
Cysteine	0.42 ± 0.42	0.00 ± 0.00	0.00 ± 0.00	0	0
Cystine	0.27 ± 0.19	0.71 ± 0.23	0.55 ± 0.17	2.59	0.78
Glutamine	6.37 ± 3.98	3.78 ± 0.98	0.00 ± 0.00	0.59	0
Glycine	1.29 ± 0.22	1.66 ± 0.26	1.03 ± 0.17	1.28	0.62
Histidine	0.93 ± 0.41 ^b	2.63 ± 0.30 ^a	0.94 ± 0.11 ^b	2.84	0.36
Hydroxyproline	0.00 ± 0.00	0.01 ± 0.01	0.04 ± 0.04	5.82	4.30
Isoleucine	1.05 ± 0.22	0.52 ± 0.08	0.10 ± 0.05	0.49	0.18
Leucine	1.88 ± 0.52	1.75 ± 0.19	0.91 ± 0.25	0.93	0.52
Lysine	0.59 ± 0.44	1.08 ± 0.15	0.39 ± 0.12	1.82	0.36
Methionine	0.32 ± 0.21	0.53 ± 0.03	0.04 ± 0.04	1.66	0.07
Phenylalanine	1.56 ± 0.25 ^a	0.74 ± 0.09 ^b	0.02 ± 0.02 ^c	0.48	0.03
Proline	3.40 ± 0.57	4.80 ± 0.66	3.61 ± 0.25	1.41	0.75
Serine	1.21 ± 0.79	1.35 ± 0.12	0.68 ± 0.08	1.12	0.50
Threonine	1.09 ± 0.37	1.39 ± 0.20	0.78 ± 0.08	1.28	0.56
Tryptophan	2.70 ± 1.53	0.34 ± 0.19	0.15 ± 0.10	0.12	0.44
Tyrosine	1.60 ± 0.47 ^a	0.97 ± 0.14 ^b	1.17 ± 0.15 ^b	0.61	1.21
Valine	1.52 ± 0.82	1.05 ± 0.13	0.31 ± 0.04	0.69	0.30
Total	54.84 ± 21.41	41.57 ± 4.45	23.80 ± 1.38	0.76	0.43

Each value is the mean ± SD ($n = 3$)

The ANOVA between the data was evaluated using Tukey's multiple range test. The values followed by the same letter within a column are not significantly different ($p < 0.05$)

F/K: Fermented dough (mg/100g flour) / Kneaded dough (mg/100 g flour)

B/F: Baked bread (mg/100g flour) / Fermented dough (mg/100 g flour)

3. 香辛料添加による製造工程別 GABA 量および Glu 量の変動

14 種類の香辛料を添加したパンの製造工程中の GABA 量および Glu 量の変動を図 1-1 に示した。

(1) 香辛料添加による製造工程別 GABA 量の変動

1) 混捏工程

混捏工程では、香辛料添加群と Control の GABA 含有量に有意差は認められなかったが、oregano (2.49 mg/100 g flour) と perilla (2.01 mg/100 g flour) の添加により GABA 量が増加した。一方、paprika、yuzu peel、ginger は Control と

ほぼ同程度の GABA 量を示し、香辛料添加の影響は見られなかった。anise (1.03 mg/100 g flour)、basil (1.04 mg/100 g flour)、parsley (1.06 mg/100 g flour) の添加は Control に比べ GABA 量が減少した。

2) 発酵工程

発酵工程後の GABA 量は Control に比べ、paprika (1.34 mg/100 g flour)、basil (1.28 mg/100 g flour) の添加で GABA が増加した。一方、yuzu peel、oregano、peppermint の添加は Control とほぼ同程度であった。それ以外の香辛料の添加は、発酵工程中に GABA 量が Control より減少した。特に celery の添加は Control と比較して有意差を示した ($p < 0.05$)。

3) 焼成工程

焼成工程後、Control の GABA 量は大きく減少したが、basil (0.94 mg/100 g flour)、paprika (0.86 mg/100 g flour)、peppermint (0.80 mg/100 g flour)、yuzu peel (0.70 mg/100 g flour)、oregano (0.69 mg/100 g flour) の添加は焼成後に GABA 量が Control より高く、特に、paprika、peppermint、yuzu peel の添加は高い傾向を示した。一方、celery の添加は GABA 量が 0.24 mg/100 g flour と著しく低下し、Control より有意に低い結果を得た ($p < 0.05$)。mace、cumin、perilla は Control と同程度であった。

(2) 香辛料添加による製造工程別 Glu 量の変動

1) 混捏ドウ

混捏工程後の Glu 量は、Control に比べ lemongrass (7.25 mg/100 g flour) を添加した場合に顕著に高くなり、続いて ginger (6.80 mg/100 g flour)、mace (5.90 mg/100 g flour)、perilla (5.65 mg/100 g flour)、cumin (5.64 mg/100 g flour)、poppyseed (5.60 mg/100 g flour) が高い値を示した。yuzu peel (3.68 mg/100 g flour) 添加のみ Control に比べ低い値となった。

2) 発酵ドウ

発酵工程後の Glu 量は、lemongrass (7.25 mg/100 g flour) 添加のみ高い状態

を維持し、その他の香辛料を添加したパンの Glu 量は Control と同程度からやや低い結果になった。特に、celery (2.94 mg/100 g flour)、perilla (3.21 mg/100 g flour) は発酵工程で大きく減少した。

3) 焼成パン

焼成工程後の香辛料添加パンの Glu 量は、Control とほぼ同程度から低い値となった。発酵工程と同様、celery (2.07 mg/100 g flour)、perilla (2.91 mg/100 g flour) の添加は、他の香辛料添加パンよりも Glu 量が低い結果になった。

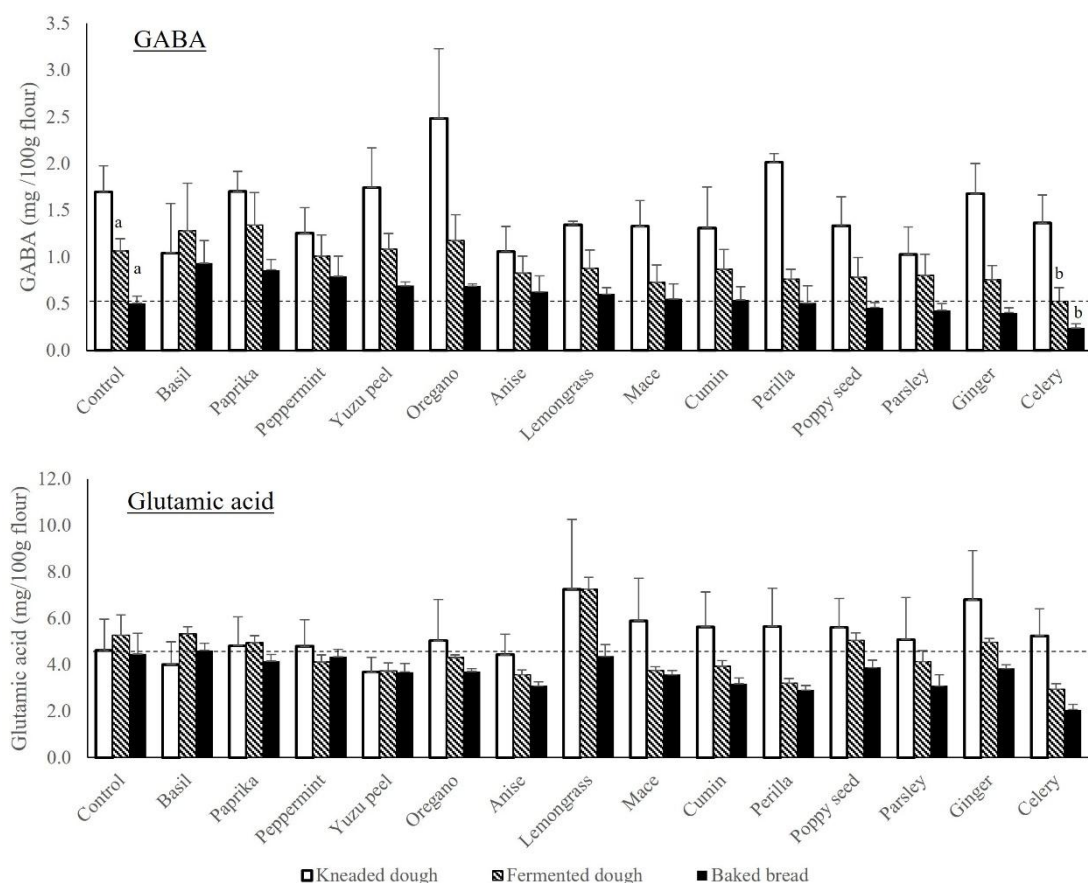


図 1-1 Changes in γ -aminobutyric acid and glutamic acid during the manufacturing process in control and spice-added bread
 GABA and glutamic acid are the mean (mg/100 g flour) $\pm$ SD ($n = 3$)
 Broken lines indicate the amounts of GABA and glutamic acid after baking the control bread; spices are ranked based on the amount of GABA after baking.
 Different lower-case letters above bars indicate a significant difference among treatments.

4. 香辛料添加による製造工程中における GABA 量および Glu 量の変化

図 1-1 より、香辛料添加によって焼成パンの GABA が Control より増加した香辛料の中でも、basil は混捏時、発酵後、焼成工程において、GABA 量の変化は少なかった。一方、paprika、peppermint、yuzu peel は、Control と同様、製造工程に伴い徐々に GABA 量が減少した。oregano は、混捏工程で GABA 量が Control より約 1.5 倍に増加しており、発酵工程において GABA 量が減少したものの、焼成後は Control より多く残存していた。celery は、発酵工程中に Control パンの GABA 量の約半分まで減少し、さらに焼成工程で Control の約半量となった。

oregano や perilla は、混捏工程の GABA 増加によって発酵、焼成工程を経ても GABA 量を保持していた。また、paprika は混捏工程では GABA 量に影響はないが、発酵工程で多く保持していたため、最終的に焼成工程で Control より多く GABA を保持する結果となった。さらに、basil では発酵工程で GABA 生成または保持されることで、焼成工程ではほとんど減少しない結果になった。

一方、Glu は Control に比べ、lemongrass、mace、cumin、perilla、poppyseed、parsley、ginger、celery では混捏工程で Control より Glu 量が多くなったにも関わらず、焼成パンの Glu 量が Control より増加した香辛料は認められなかった。香辛料の添加は焼成パンの Glu 量に影響がないことが明らかになった。

5. 香辛料添加による製造工程中の GABA および Glu の増減とその関連

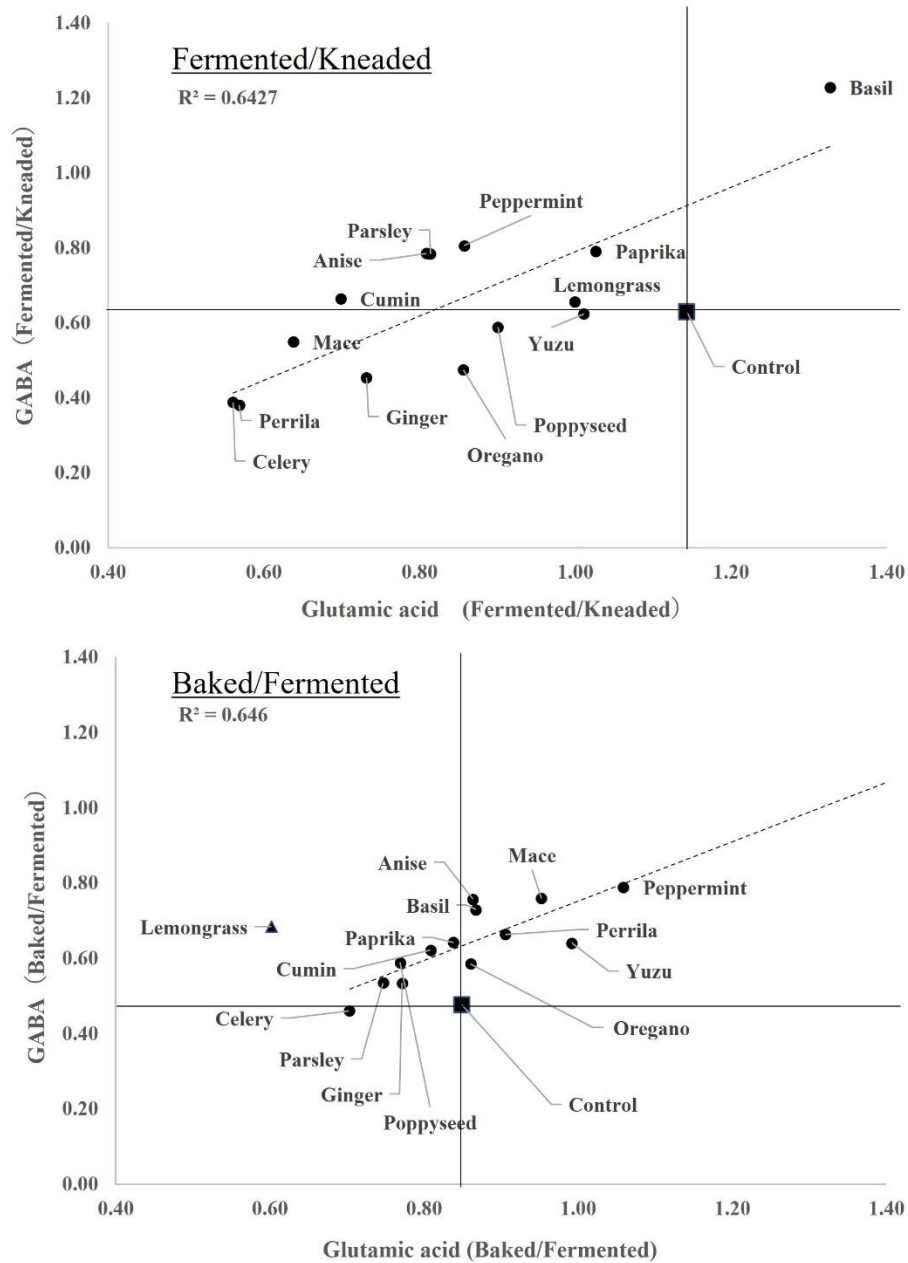
香辛料添加パンの GABA と Glu の F/K 比および B/F 比を求め、製造工程中に増減した GABA と Glu の関連を検討した（図 1-2）。

F/K 比には正の相関 ($R^2 = 0.643$) が見られ、発酵中に Glu が増える香辛料で GABA も増加していることがわかった。特に、basil は GABA と Glu の F/K 比が共に最も高く、発酵工程で GABA 生成を強く促進している可能性がある。peppermint、parsley、anise も GABA 比が高い傾向にあり、発酵中の GABA 生成が示唆された。

B/F 比では、lemongrass のみ他の香辛料とは異なる傾向が得られたため、lemongrass を外れ値とした。lemongrass 以外の 13 種類の香辛料添加パンの GABA と Glu の B/F 比の関連を検討したところ、正の相関 ($R^2 = 0.646$) を得

た。

このことは焼成工程で Glu が増加、または減少が抑制されている香辛料の添加は、パン中の GABA も保持されることを示している。中でも peppermint、yuzu peel、mace は焼成工程での Glu 量および GABA 量の減少を抑制または保持する可能性が期待された。



☒ 1-2 Association between GABA and glutamic acid changes during the manufacturing of spice-added bread. The crosshairs indicate the GABA and glutamic acid contents of the control bread.

IV. 考察

減塩パンの製造工程における GABA および Glu の動態から、*basil* は混捏から発酵段階で、また、発酵工程から焼成工程では、*peppermint*、*yuzu peel*、*mace* が GABA および Glu の減少が抑制または保持された。

混捏工程では、コメにおける先行研究と同様に³⁰⁾、水に接触した直後から内在性 GAD が活性化し、GABA の生成が進行すると推定された。したがって、香辛料の添加により内在性 GAD の活性が促進される場合には、混捏工程において生地中の GABA 量が増加する可能性が考えられた。しかし、本研究において混捏工程で GABA 量の増加が認められたのは、*oregano* および *perilla* を添加した場合に限られていた。また、発酵工程では、酵母の活性化に伴い GABA が窒素源として消費されるため、パン中の GABA 量は減少する傾向にある³¹⁾。しかし、*paprika*、*basil* の添加は Control より GABA 量の増加が見られた。久木ら¹⁹⁾は、小麦粉中に内在する GAD の存在がパン中の GABA 量に影響を与える可能性を示唆している。したがって、これらの香辛料は小麦粉の内在性 GAD に作用し、発酵工程における GABA の生成を促したと推定される。

一方、発酵工程における Glu の動態については 3 つの要因が考えられる。

1. 酵母の活性化による窒素源としての消費³¹⁾に伴う減少、2. GABA 生成の基質として利用される結果による減少³²⁾、3. 酵母の代謝活性低下に伴う pH 低下による内在性プロテアーゼの活性化を介したタンパク質分解による増加³³⁾である。

発酵工程で GABA が増加した *paprika* と *basil* は混捏工程から発酵工程にかけての Glu の減少は抑制されるか、Control と同様に保持された。これは、酵母の代謝活性低下により、たんぱく質分解による Glu の増加が消費を上回ったことを示唆している。

そこで、*paprika* と *basil* の F/K 比を検討した。*paprika* は Control より、GABA の生成は促進していた一方で Glu の消費も高かった。一方、*basil* は発酵工程で GABA、Glu とともに Control より保持されており、GABA 生成促進と Glu の保持の両方が期待できると考えられた。

焼成過程では、GABA は熱分解³⁴⁾される一方、Glu は比較的安定である

³⁵⁾。本研究においても、全ての香辛料添加パンのグルタミン酸含有量は Control と同等かそれ以下であり、Glu が比較的安定であることを示した。しかし、basil、paprika、peppermint、yuzu peel、oregano、anise 添加パンの GABA 量は Control を上回った。これらの香辛料添加は小麦粉由来の内因性 GAD に作用し、焼成時の GABA 含有量に影響を与えた可能性がある。

一般的にパン酵母は 55 °C 以上で不活性化される ²⁷⁾が、小麦胚芽由来 GAD の活性は 45 °C 以上でも GAD 活性の約 80 % が酵素の機能を保持すること ³⁶⁾が報告されている。また、小松ら ³⁷⁾によれば焼成工程において、パン表面の温度は急速に上昇する一方、中心部は比較的ゆるやかに加熱され、表面温度が約 100°C に達した後に中心部の加熱が開始する。同様に、本研究で用いたホームベーカリーでは、発酵工程の 35~40°C から焼成工程では約 200°C に庫内温度が急上昇した。そのため、パン中心部では酵母の不活性化より GABA 消費が停止した一方で、小麦粉内在性 GAD の酵素活性は保持されたと考えられる。本研究では、6 種類の香辛料添加によって GABA 減少の抑制・保持が確認されたことから、香辛料が焼成中に小麦粉内在性 GAD の活性化を促進し、GABA 生成を促したと考えられる。

そこで、焼成工程でコントロールより高い GABA 量を示した 6 種類の香辛料 (basil、oregano、paprika、anise、peppermint、yuzu peel) について B/F 比を検討した結果、peppermint と yuzu peel は Control と比較して、GABA、Glu の B/F 比が最も高く、GABA と Glu 両方の減少を抑制または保持する可能性が示された。さらに、mace も同様に B/F 比が高くなる傾向が見られ、焼成工程における GABA および Glu の減少を抑制または保持する可能性があることを示唆している。

これらの知見に基づき、basil、peppermint、yuzu peel、mace は、減塩パンの塩味増強と嗜好性の両方を高める可能性を持つ香辛料であると推定した。

本研究の限界は、使用した小麦粉はグルテンが多いパン専用小麦粉ではあるが、ブレンドされている小麦の品種などが明らかではないため、小麦の種類による影響があること、また、香辛料も産地や販売元によって遊離アミノ酸含量や内在性 GAD への影響が異なる可能性があることが考えられる。

本研究ではパンの塩味や嗜好性に影響するアミノ酸として GABA と Glu に

着目したが、その他のアミノ酸については評価していない。しかし、個々のアミノ酸濃度がヒトの認知閾値に達していなくても、相乗的に作用する可能性があることが指摘されている³⁰⁾。したがって、パン中に存在する複数のアミノ酸が相互作用し、総合的に塩味や嗜好性に寄与している可能性がある。そのため、個別のアミノ酸の影響だけではなく、複数のアミノ酸による相互作用がパン全体の総合的な味に対し、どのように寄与するかを検討する必要がある。

V. まとめ

本章では、14種類の香辛料抽出物を用い、減塩パンの製造工程（混捏・発酵・焼成）における GABA および Glu の変動を評価した。その結果、香辛料の種類によって GABA および Glu の動態は異なり、**basil** では発酵工程における GABA の生成または保持が認められ、**peppermint** および **yuzu peel** では焼成工程において GABA の減少が抑制される傾向が示された。一方、Glu は混捏工程で一時的に増加する香辛料が認められたものの、焼成パンにおいて **Control** を上回る増加は確認されなかった。また、製造工程中の GABA と Glu の増減には正の関連が認められ、Glu の保持または減少抑制が GABA の保持と関係する可能性が示唆された。

次章では、第 1 章で示された製造工程中の GABA および Glu の変動を基に、アミノ酸存在下における GABA の役割に着目し、これらが減塩パンの塩味特性および嗜好性にどのように関与するかを検討する。

第 2 章

香辛料添加減塩パンにおける遊離アミノ酸組成中の GABA および Glu の呈味への寄与

I. 緒言

第 1 章では、香辛料添加が減塩パンの製造工程（混捏・発酵・焼成）における GABA および Glu の生成および保持に影響を及ぼすことを明らかにした。香辛料の種類によって GABA および Glu の動態は異なり、発酵工程や焼成工程において GABA の生成促進または減少抑制が認められる香辛料が存在した。また、製造工程中の GABA と Glu の増減には正の関連が認められ、Glu の保持または減少抑制が GABA の保持と関係する可能性が示唆された。

香辛料添加減塩パンにおいて GABA および Glu はいずれもパンの味質に関与する重要な因子であると考えられる。しかし、これまでの研究は主として、GABA や Glu の量的変化のみに着目したものであり、パンのように多様な遊離アミノ酸が共存する複雑な食品系において、これらの成分が塩味や嗜好性にどのように関与するかは明らかにされていない。

そこで、第 2 章では、香辛料添加減塩パンに含まれる遊離アミノ酸組成に着目し、その中でも GABA および Glu が塩味および嗜好性に及ぼす寄与を明らかにすることを目的とした。具体的には、香辛料を添加した減塩パンの遊離アミノ酸組成を分析するとともに、その組成を再現した呈味モデル溶液および当該パンを実試料とした官能評価を行い、複雑な遊離アミノ酸組成下における GABA および Glu の役割を検討した。

II. 実験方法

1. 香辛料添加減塩パンの遊離アミノ酸含量

(1) 香辛料添加減塩パンの調製

全てのパンは、ホームベーカリー（Panasonic SD-BMT1000、メニューNo.1：パン・ド・ミ）を使用して調製した。減塩パン（以下、コントロール）は食塩濃度を通常のは半分である 0.75 %（w/w：小麦粉 100 g 当たり）に調製し、香辛料添加減塩パンは生地中添加する水の一部を香辛料抽出物に置き換え調製した（表 2-1）。焼成後、室温で 1 時間冷却し、遊離アミノ酸分析用にパンのクラムのみを採取した。パンの調製には、小麦粉（日清 パン専用小麦粉、株式会社日清製粉ウェルナ、東京、日本）、ドライイースト（サフ インスタントイースト赤、日仏商事株式会社、神戸、日本）、塩（食塩、公益財団法人塩事業センター、東京、日本）、グラニュー糖（パールエース印グラニュー糖、株式会社パールエース、東京、日本）、スキムミルク（製菓・製パン用北海道産スキムミルク、株式会社パイオニア企画、神奈川、日本）、無塩バター（雪印北海道バター 食塩不使用、雪印メグミルク株式会社、東京、日本）を用いた。香辛料は、先行研究³⁸⁾の結果からパン中の GABA 量が中程度であったアニス、クミン、レモングラス、オレガノ、メース（大津屋商店、東京、日本）の 5 種類を選定しドウに添加した。ドウに添加する香辛料抽出物は、香辛料粉末（小麦粉重量の 0.2 %）を重量の 5 倍量の水と混合、攪拌後、4～6 °C で一晩静置後、混合物を 10,000 × g、5 °C で 5 分間遠心分離し、上清を用いた。

表 2-1. パンの配合 （ベーカース %）

材料	コントロール	香辛料添加
小麦粉	100.0	100.0
ドライイースト	1.2	1.2
塩	0.75	0.75
砂糖	5.0	5.0
スキムミルク	5.0	5.0
無塩バター	5.0	5.0
水	65.0	—
水 + 香辛料抽出物	—	65.0

香辛料：アニス、クミン、レモングラス、オレガノ、メース

香辛料抽出物：小麦粉 100 g 当たり 0.2 g の香辛料に 5 倍量の水を加え、一晩静置後、遠心分離（10,000 × g, 5 min, 5 °C）した上清を用いた

(2) 香辛料添加減塩パンの遊離アミノ酸分析

1) 試料の調製

約 1 g の試料（パンのクラムのみ）を正確に秤量し、HEPES-Na バッファー（100 mM、pH 7.0）3.5 mL を加え、氷上で粉砕した（Tissue-Tearor、Biospec）。その後、遠心分離（10,000 × g、10 分）を行った。得られた上清に 60 %過塩素酸を加え、氷中で静置（10 分）後、再度遠心分離（10,000 × g、10 分）を行い、タンパク質を除去して上清を回収した。さらに、上清を限外濾過（Amicon® Ultra-0.5 フィルター、10-kDa MWCO、Millipore Sigma、6,000 × g、4 °C、10 分）し、得られたろ液を遊離アミノ酸分析用の最終試料とした。

2) 遊離アミノ酸分析

遊離アミノ酸の定量は、伊藤ら²⁹⁾の方法に準じ、超高速アミノ酸分析用反応試薬キット（日立ハイテクサイエンス社：誘導体化試薬 NBD-F）を用いて誘導体化を行い、超高速アミノ酸分析機（HITACHI LaChrom Ultra）で同定・定量した。アミノ酸混合標準液 H 型（富士フイルム和光純薬株式会社）を使用し、本研究の分析対象である GABA、L-ヒドロキシプロリン、L-グルタミン、Asn、L-トリプトファン、L-システインをそれぞれ添加し、最終濃度が 100 μmol/L となるよう調製した。この標準液をピーク同定に用いた。パン中の遊離アミノ酸含量は、パン 100 g 当たりの含有量（mg）として算出した。分析は試料ごとに 3 回繰り返し測定し、平均値を算出した。

2. アミノ酸呈味モデル溶液および香辛料添加減塩パンの官能評価

アミノ酸呈味モデル溶液および香辛料添加減塩パンの官能評価は、以下の 3 項目について実施した。すなわち、「パンのアミノ酸呈味モデル溶液と GABA 溶液における基本五味の比較」（表 2-2：官能評価①）、「パンのアミノ酸呈味モデル溶液に対する GABA の効果（塩味と嗜好性）」（表 2-2：官能評価②）、ならびに「香辛料添加減塩パンの評価」である。

(1) アミノ酸溶液等の調製

官能評価①および②に用いたアミノ酸溶液等の組成を表 2-2 に示す。

アミノ酸呈味モデル溶液は、香辛料添加減塩パンの遊離アミノ酸定量結果（表 2-3）に基づき、Asn、Glu、アルギニン（Arg）、アラニン（Ala）の 4 種（以下、

主要アミノ酸とする) を選択して調製した。各アミノ酸の濃度は 5 種類の香辛料添加減塩パンに含まれる遊離アミノ酸量の平均値を用い、実際のパンの遊離アミノ酸組成を模倣するよう設定した。

GABA および食塩の濃度は、それぞれ認知閾値である 2.5 mg/100 mL¹⁸⁾ および 250 mg/100mL³⁹⁾ に設定した。さらに官能評価②では、アミノ酸呈味モデル溶液における GABA の塩味及び嗜好性への影響を検討するため、GABA 濃度を閾値前後の 1.3 mg/100 mL および 5.0 mg/100 mL の 2 段階を設定した。なお、使用したアミノ酸は、いずれも食品添加物規格に適合した市販品である。また、主要アミノ酸の総和/GABA 比を算出し、アミノ酸呈味モデル溶液における GABA の相対的な寄与を示す指標として用いた。

表 2-2. 官能評価に用いたアミノ酸呈味モデル溶液の組成 (100 mL 当たりのアミノ酸量 [mg])

	官能評価①		官能評価②		
	アミノ酸 呈味モデル溶液	GABA溶液	アミノ酸 呈味モデル溶液	GABA 1.3 mg/ 100mL溶液	GABA 5.0 mg/100 mL溶液
Asn	4.0	—	4.0	4.0	4.0
Glu	3.0	—	3.0	3.0	3.0
Arg	1.0	—	1.0	1.0	1.0
Ala	1.0	—	1.0	1.0	1.0
GABA	2.5	2.5	2.5	1.3	5.0
NaCl	250.0	250.0	250.0	250.0	250.0
主要アミノ酸の総和/GABA比	3.6	—	3.6	6.9	1.8

官能評価①：パンのアミノ酸呈味モデル溶液および GABA 溶液における基本五味の比較

官能評価②：パンのアミノ酸呈味モデル溶液に対する GABA の効果（塩味と嗜好性）

アミノ酸の略語：L-Asparagine (Asn)、L-Glutamic acid (Glu)、L-Arginine (Arg)、L-Alanine (Ala)、 γ -aminobutyric acid (GABA)

「—」は未添加を示す。

主要アミノ酸の総和は、Asn、Glu、Arg、Ala の合計値とした。

(2) 香辛料添加減塩パンの調製

香辛料添加減塩パンはII.1.(1)に準じて調製を行った。

(3) 官能評価

1) 調査対象

大阪府・京都府・滋賀県の大学に在籍する大学生を対象に募集を行い、官能評価を行った。官能評価参加時に本研究の目的、個人情報保護の方法、安全管理での配慮などについて説明を行い、個人に係る情報、データ等を提供することに同意を得た。なお、本研究は、大阪国際大学短期大学部の研究倫理委員会（No.19-09）および京都文教短期大学倫理審査委員会（申請番号 [5]）の承認を得ている。

2) 官能評価の方法

官能評価①および②については、評価する前に必ず水で口をすすぐよう注意した。約 30 mL のアミノ酸溶液を口に入れ、口腔内全体でよく味わった後吐き出し、味の質を評価するよう指示をした。

官能評価①は、1 から 7 までの評価尺度（7：強い、1：味がない）を用いて平均値を算出した。官能評価②では、塩味および嗜好性について、順位法（1 位：3 点、2 位：2 点、3 位：1 点）を用いて評価し、合計点数を算出した。

官能評価③の香辛料添加減塩パンの評価は、パンのクラムのみを 2 cm 程度の角切りにし官能評価を行った。試食する前は必ず水で口をすすぎ、口腔内全体でよく味わうように指示した。試食する順番は問わないこととした。香辛料添加減塩パンの評価項目は塩味および嗜好性であり、コントロールを普通として塩味を強い・普通・弱い、嗜好性を高い・普通・低いの三段階で評価した。これらの結果を用い、塩味は塩味増強度として $\frac{([\text{濃い}] \text{ と回答した人数} - [\text{薄い}] \text{ と回答した人数})}{\text{被験者総数}} \times 100$ 、嗜好性は嗜好度として $\frac{([\text{高い}] \text{ と回答した人数} - [\text{低い}] \text{ と回答した人数})}{\text{被験者総数}} \times 100$ をそれぞれ指標として算出した。

3. 統計分析

統計解析には Microsoft Excel（Version 2018）を用いた。群間差の検討には Kruskal-Wallis 検定を用い、必要に応じて Dunn 検定（Holm 補正）による多重比較を行った。2 群間の比較には Wilcoxon の順位和検定を用いて評価した。相関解析には Pearson の積率相関係数を用いた。有意水準は全て 5 % ($p < 0.05$) とした。

Ⅲ. 結果

1. 香辛料添加減塩パンの遊離アミノ酸量

コントロールおよび 5 種類の香辛料添加減塩パンの主要アミノ酸および GABA 量を表 2-3 に示した。コントロールでは Glu の含量が最大であったのに対し、香辛料添加群では Asn の含量が最も多く、香辛料添加が遊離アミノ酸組成に影響を及ぼす可能性が示唆された。GABA 量はパン 100g あたり 0.29～0.38 mg であり、香辛料添加による有意な差は認められなかった。

表 2-3. 香辛料添加減塩パンの遊離アミノ酸量(パン 100 g 当たりの含有量[mg])

	コントロール	オレガノ	レモングラス	アニス	クミン	メース
Asn	2.11 ± 1.35	3.37 ± 0.55	3.41 ± 0.24	2.83 ± 0.28	2.74 ± 0.45	3.05 ± 0.51
Glu	2.76 ± 0.77	2.35 ± 0.30	2.62 ± 0.43	1.89 ± 0.19	2.05 ± 0.37	2.13 ± 0.14
Arg	1.04 ± 0.23	1.04 ± 0.15	0.97 ± 0.37	1.00 ± 0.17	0.82 ± 0.17	0.86 ± 0.21
Ala	0.72 ± 0.03	0.75 ± 0.07	0.71 ± 0.22	0.83 ± 0.17	0.71 ± 0.14	0.83 ± 0.10
GABA	0.31 ± 0.06	0.38 ± 0.04	0.37 ± 0.06	0.31 ± 0.20	0.31 ± 0.12	0.29 ± 0.16
その他	6.71 ± 0.24	6.96 ± 0.27	5.87 ± 1.43	6.10 ± 0.50	5.56 ± 0.65	5.99 ± 0.37
総遊離アミノ酸量	13.65 ± 1.53	14.86 ± 0.77	13.96 ± 1.86	12.95 ± 0.87	12.18 ± 1.58	13.16 ± 0.26
主要アミノ酸の総和/GABA比	21.6	19.6	21.0	21.3	20.4	23.8

値は平均 ± 標準偏差で示した (n = 3)。

群間差は Kruskal-Wallis 検定により検討し、Dunn 検定 (Holm 補正) による多重比較を行ったが、いずれの群間においても有意差は認められなかった。

その他：主要アミノ酸および GABA を除いた遊離アミノ酸の合計を示す。

2. アミノ酸呈味モデル溶液の官能評価

(1) パンのアミノ酸呈味モデル溶液と GABA 溶液の基本五味の比較

アミノ酸呈味モデル溶液と GABA 溶液の基本五味を比較した結果を図 2-1 に示した。GABA 溶液の平均ポイントは、甘味 1.4、酸味 2.5、塩味 5.7、苦味 2.0、うま味 1.9 であった。一方、アミノ酸呈味モデル溶液では、塩味の平均ポイントが 5.1 となり有意に低下した ($p < 0.05$)。

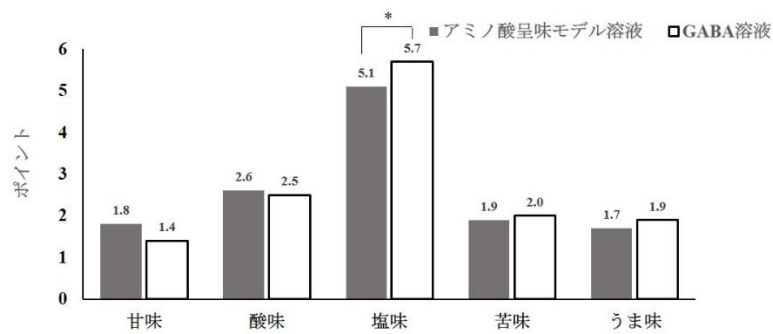


図 2-1. アミノ酸呈味モデル溶液と GABA 溶液の基本五味の比較 (n=45)
ポイント:7 点 (最も強い) ~1 点 (味が無い) の 7 段階評価に基づく平均評点
*: $p < 0.05$ Wilcoxon の順位和検定

(2) パンのアミノ酸呈味モデル溶液に対する GABA の効果（塩味と嗜好性）

図 2-2 にアミノ酸呈味モデル溶液に対する GABA の添加効果を示した。主要アミノ酸の総和/GABA 比の違いによって、塩味評価には有意な差は認められなかった。一方、嗜好性については、主要アミノ酸の総和/GABA 比が 6.9 において評価が低下し、主要アミノ酸の総和/GABA 比 1.8 との間に有意な差が認められた ($p < 0.05$)

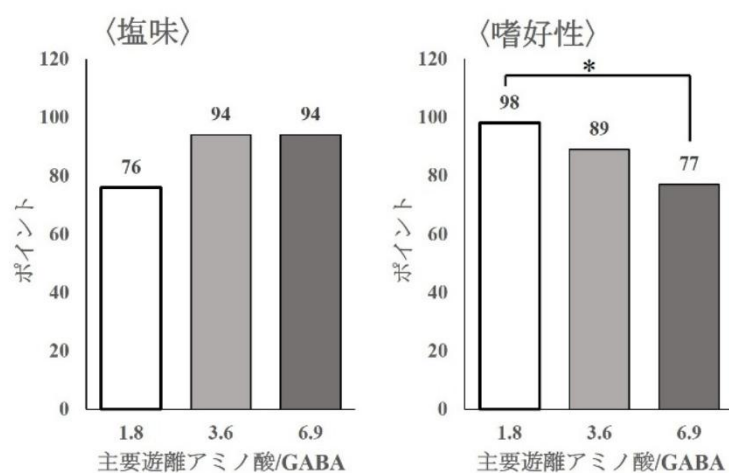


図 2-2 パンのアミノ酸呈味モデル溶液に対する GABA の効果 (n=44)

主要アミノ酸の総和/GABA 比と塩味および嗜好性の関係を示した。

主要アミノ酸の総和/GABA 比 3.6 はアミノ酸呈味モデル溶液に相当する。

塩味 (ポイント): 最も塩味を強く感じたものから順に 3 点、2 点、1 点を付与し、その合計点数とした。

嗜好性 (ポイント): 最も好ましいと感じたものから順に 3 点、2 点、1 点を付与し、その合計点数とした。

統計解析には Kruskal-Wallis 検定を用い、事後比較には Dunn 検定 (Holm 法補正) を用いた。

* : $p < 0.05$

3. 香辛料添加減塩パンの官能評価

(1) 香辛料添加減塩パンの官能評価結果

香辛料添加減塩パンの塩味増強度および嗜好度を表 2-4 に示す。塩味増強度は正と負の値の両方が認められた一方、嗜好度はいずれの条件においても負の値を示した。

表 2-4. 香辛料添加減塩パンの官能検査結果 (n = 43)

	塩味増強度 (%)	嗜好度 (%)
オレガノ	39.5	-11.6
レモングラス	-20.9	- 9.3
アニス	-53.5	-27.9
クミン	- 4.7	- 9.3
メース	-32.6	-23.3

塩味増強度 (%) : ([濃い] と回答した人数 - [薄い] と回答した人数) ÷ 被験者総数 × 100

嗜好度 (%) : ([高い] と回答した人数 - [低い] と回答した人数) ÷ 被験者総数 × 100

(2) 香辛料添加減塩パンにおける遊離アミノ酸量と塩味増強度および嗜好度の相関

香辛料添加減塩パンにおける遊離アミノ酸量と塩味増強度および嗜好度との関連を検討するため、Pearson の積率相関係数を用いて相関解析を行った。(n = 5)。

塩味増強度は、総遊離アミノ酸量 (r = 0.594) および主要アミノ酸の総和 (r = 0.430) との間に中等度の正の相関を示した。個別の遊離アミノ酸では、GABA と強い正の相関 (r = 0.666) を示した。また、Asn (r = 0.480) および Glu (r = 0.435) でも正の相関が認められた。

嗜好度は主要アミノ酸の総和 (r = 0.417) と中等度の正の相関を示した。個別の遊離アミノ酸では、GABA (r = 0.631) および Glu (r = 0.676) は強い正の相関が認められた。なお、Ala は塩味増強度および嗜好度のいずれにおいても負の相関を示した (それぞれ r = -0.554、r = -0.969)。

表 2-5. 香辛料添加減塩パンにおける遊離アミノ酸量と塩味増強度および嗜好度の相関

	総遊離 アミノ酸	主要アミノ酸 の総和	Asn	Glu	Arg	Ala	GABA
塩味増強度	0.594	0.430	0.480	0.435	0.239	-0.554	0.666
嗜好度	0.255	0.417	0.414	0.675	-0.092	-0.969	0.631

相関係数は Pearson の積率相関係数を用いて算出した。
本相関解析は n =5 と少数例であるため、探索的に実施した。
主要アミノ酸の総和は Asn、Glu、Arg、Ala の合計値とした。

(3) 香辛料添加減塩パン中の GABA の役割ー主要アミノ酸の総和/GABA 比と塩味増強度および嗜好度ー

図 2-3 に、主要アミノ酸の総和/GABA 比と塩味増強度および嗜好度の関係を示した。主要アミノ酸の総和/GABA 比は、塩味増強度 ($r = -0.653$) および嗜好度 ($r = -0.612$) との間に中等度の負の相関を示した。

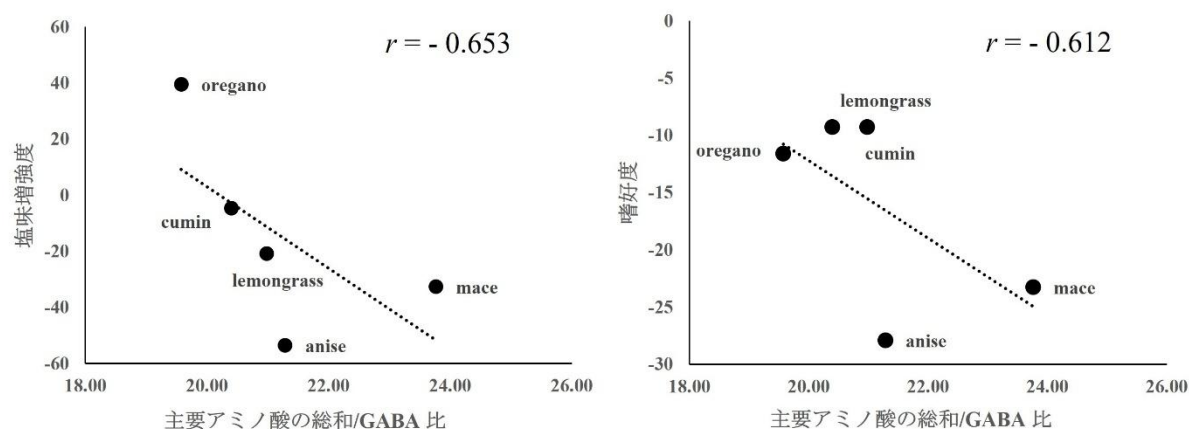


図 2-3 香辛料添加減塩パン中の GABA の役割

ー主要アミノ酸の総和/GABA 比と塩味増強度および嗜好度ー

塩味増強度 : ([濃い] と回答した人数 - [薄い] と回答した人数) ÷ 被験者総数 × 100

嗜好度 : ([高い] と回答した人数 - [低い] と回答した人数) ÷ 被験者総数 × 100

(4) 香辛料添加減塩パン中の Glu の役割－主要アミノ酸の総和/Glu の比と塩味増強度および嗜好度－

図 2-4 に、主要アミノ酸の総和/Glu 比と塩味増強度および嗜好度の関係を示した。主要アミノ酸の総和/Glu 比は、塩味増強度と弱い負の相関を示した ($r = -0.378$)。一方、嗜好度とは強い負の相関を示した ($r = -0.867$)

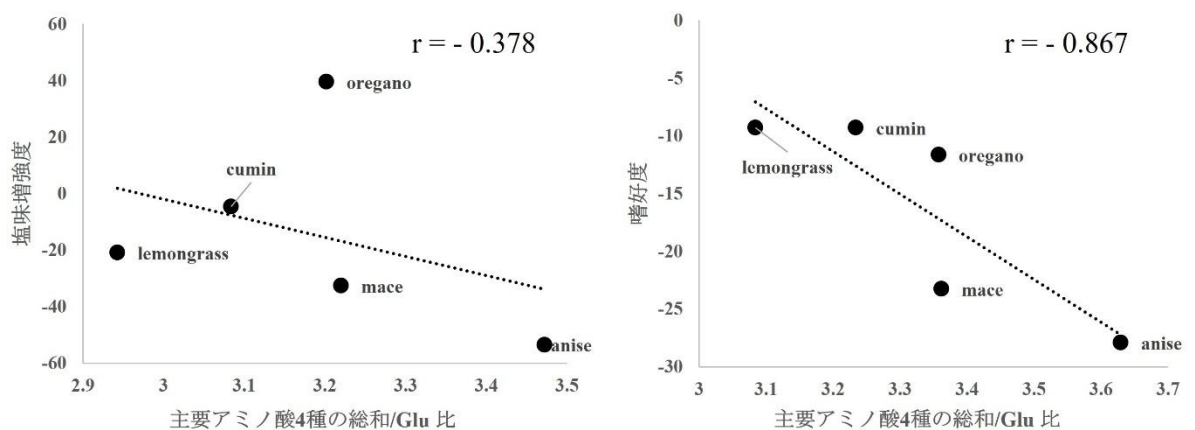


図 2-4 香辛料添加減塩パン中の Glu の役割
－主要アミノ酸の総和/Glu 比と塩味増強度および嗜好度－

塩味増強度：(「濃い」と回答した人数－「薄い」と回答した人数)÷被験者総数×100

嗜好度：(「高い」と回答した人数－「低い」と回答した人数)÷被験者総数×100

IV. 考察

本研究は、香辛料を微量添加することで小麦粉中の GAD 活性が制御され、うま味成分である Glu を基質として GABA が生成されるという一連の反応に着目したものである。この反応系において、Glu と GABA は独立した呈味成分ではなく、代謝的に連続した関係にある成分であり、その相対的な存在比がパンの呈味形成に影響を及ぼす可能性が考えられる。

そこで、最初に主要アミノ酸の総和/GABA 比を指標として用い、GABA の相対的な寄与を評価した。その結果、香辛料添加減塩パンの主要アミノ酸の総和/GABA 比は塩味増強度および嗜好度の双方と負の相関を示し、GABA は主要アミノ酸が多く存在する条件下においても、相対的に高い割合で存在することで塩味および嗜好性に寄与する可能性が示された。これは、GABA が単独で強い呈味を示すのではなく、他のアミノ酸との相互作用を通じて味覚を修飾する成分であることを支持する結果と考えられた。

次に、Glu は GABA の前駆体であると同時に、うま味成分として塩味を補完・増強することが知られている。本研究において、香辛料添加減塩パンの主要アミノ酸の総和/Glu 比が特に嗜好度と強い負の相関を示したことは、Glu が主要アミノ酸の一つとして存在するだけでなく、その相対的な割合が全体の呈味バランスを規定する重要な因子であることを示している。すなわち、香辛料添加によって Glu から GABA への変換が進行する過程において、両成分の比が変化することが、減塩条件下における塩味および嗜好性の形成に関与している可能性が示唆された。

これらの結果に基づき、GABA および Glu と他の遊離アミノ酸との相対的關係について、呈味モデル溶液および実際のパンを用いて検討を行った。GABA は単独ではわずかな酸味があるが、直接呈味を付与しないと考えられる¹⁸⁾が、GABA 溶液の方が塩味は強く、アミノ酸呈味モデル溶液の方が低く評価された。また、アミノ酸呈味モデル溶液において、主要アミノ酸の総和/GABA 比を変化させたところ、GABA の相対的割合が高い場合に塩味が低下する傾向を示し、嗜好性については GABA の相対的割合が高い場合に高くなる傾向を示した。

一方、香辛料添加減塩パンにおいては、主要アミノ酸の総和/GABA 比と、塩味増強度および嗜好度の両方で中等度の負の相関を示した。塩味増強度はアミ

ノ酸呈味モデル溶液と異なる傾向を示し、GABA の相対的割合が高い場合に塩味の評価が高くなる傾向を示した。先行研究では、GABA と NaCl を共存させたモデル系において、GABA の添加量が低濃度域では塩味を緩和する一方、高濃度域では塩味が増強される傾向を示すことが報告されている⁴⁰⁾。本研究では、NaCl に加え、主要アミノ酸も共存している条件下で、主要アミノ酸に対する GABA の相対的割合が高い場合に塩味を強く感じる傾向が示された。しかし、嗜好性については、呈味モデル溶液と香辛料添加減塩パンにおいて異なる傾向を示し、GABA 比に応じて連続的に変動する可能性が考えられた。この相違は、呈味モデル溶液では香気や食感といった要因を排除した単純系であるのに対し、実際のパンではパン特有の香気や食感などの要因が呈味に影響を及ぼしているためと考えられる。すなわち、GABA の嗜好性への関与は、成分組成のみから説明できるものではなく、他の感覚要因が共存する中で現れる可能性が示唆された。これらより、香辛料添加減塩パンにおいて、GABA は主要アミノ酸との相対的關係を通じて塩味や嗜好性に寄与するという役割を形成していると考えられた。

また、Glu は香辛料添加減塩パンにおいて、味の基盤となる役割を持つことが示された。香辛料添加減塩パンの官能評価の結果、Glu の量と塩味増強度、嗜好度の両方で正の相関を示し、Glu 量はパンの呈味形成に寄与していることが示された。しかし、主要アミノ酸の総和/Glu 比と嗜好性と相関はさらに高く、Glu も主要アミノ酸との相対關係を通じて嗜好性に寄与していることが示された。つまり、Glu は単独でもパンに呈味を付与する成分として機能し、アミノ酸共存下の条件でもパン全体の味に大きく寄与していることが示された。本研究の結果は、Glu が NaCl と共存することで味の基盤を形成するという報告⁴¹⁾や、低濃度の Glu が複雑な食品系において嗜好性増強作用を示すとする知見⁴²⁾とも合致している。

これらの知見より、香辛料添加減塩パンにおいて、遊離アミノ酸の量ではなくその遊離アミノ酸組成のバランスが呈味に影響することが明らかになった。減塩食品の呈味は単一成分の量によって規定されるものではなく、複数の呈味成分が共存する条件下で形成される味環境の中で決定されることが報告されている^{43,44)}。しかし、主要アミノ酸と GABA および Glu との相対的關係に着目

し、それらが塩味および嗜好性にどのように関与するかを具体的に示した報告はこれまでにほとんどみられない。

特に、GABA については味蕾細胞における受容体発現や神経調節作用が報告されているものの⁴⁵⁾、実際の食品系において、他の呈味成分との関係性の中で塩味や嗜好性にどのように関与するかは十分に検討されていない。本研究の結果は、GABA が塩味や嗜好性の知覚を修飾するとした先行研究^{45,46)}を、実際の食品系において支持するものである。

なお、香辛料は GABA の生成量を単純に増加させる因子ではなく、GABA の生成過程に関与することで、GABA が塩味や嗜好性に関与し、間接的に呈味に影響している可能性が考えられた。

先行研究において、香辛料抽出物が小麦粉中の GAD 活性に作用し、Glu から GABA への生成過程を制御し得ることが報告されているが^{17,18)}、香辛料による GAD 活性への作用は GABA の生成量や生成タイミングに影響を及ぼすものの、生成量そのものは直接呈味に反映されるのではないことが本研究で明らかになった。このことから、香辛料は Glu から GABA 生成という一連の反応に関与することで、GABA の相対的割合が呈味に関与し得る状況を形成し、減塩パンの塩味や嗜好性に影響を及ぼしていると考えられる。

以上をまとめると、香辛料添加減塩パンにおいて、Glu が味の基盤、GABA が主要アミノ酸との相対的關係を通じて塩味、嗜好性に関与、香辛料は GABA の生成過程を制御することで間接的に呈味に寄与すると考えられた。これらの知見は、減塩条件下における呈味を単一成分の量の増減だけで捉えるのではなく、成分間のバランスとして設計する必要性を示すものであり、今後の減塩食品開発において重要な視点を提供するものである。

本研究の限界として、香気成分や食感など他の感覚要因については検討していない点が挙げられる。しかしながら、これらの要因を除外したことにより、複数のアミノ酸が共存する条件下における GABA の呈味への関与を、相対的な関係性として評価することが可能となった。今後は、香辛料による GABA の生成・保持制御と最終的な遊離アミノ酸組成比との関係に着目し、香気や食感を含む実際の食品条件下において、減塩食品の呈味設計への応用可能性を検討する必要がある。

V. まとめ

本章では、アミノ酸呈味モデル溶液および実際の香辛料添加減塩パンを用いた官能評価を実施した分析の結果、香辛料添加は遊離アミノ酸の組成バランスに変化を与えたが、GABAの絶対量については有意な差は認められなかった。しかし、官能評価および相関解析により、塩味増強度および嗜好度は、各成分の絶対量よりも主要遊離アミノ酸の総和に対するGABA比およびGlu比という相対的な指標と強い関連を示すことが明らかとなった。

具体的には、Gluは「味の基盤」を形成して嗜好性を規定する重要な因子であり、GABAは他のアミノ酸との相互作用を通じて「味の知覚を修飾・調整する役割を担っていることが示唆された。また、香辛料は味を直接付与するのではなく、製造工程中のアミノ酸動態に影響を及ぼすことで、呈味に関与し得るアミノ酸組成のバランスを調整する因子として機能していると考えられた。

以上の知見は、減塩食品の呈味設計において、単一成分の増減という従来の視点に加え、「遊離アミノ酸組成のバランス」に着目することの有用性を提示するものである。

総括

本研究は、日本人の食塩摂取量が依然として高く、特にパン類からの摂取増加が課題となっている現状を踏まえ、パンの減塩化と嗜好性の維持を両立させる新たな手法を提示することを目的とした。単純な食塩の削減はパンの風味や食感を損なうが、本研究では微量の香辛料抽出物を用いることで、小麦粉中の内在性酵素活性を制御し、機能性成分である GABA およびうま味成分である Glu の動態を調整するという独自のアプローチを検討した。

第 1 章では、14 種類の香辛料抽出物が減塩パンの製造工程における GABA および Glu の変動に及ぼす影響を評価した。分析の結果、香辛料の種類によってこれら成分の動態は異なり、特に Basil は発酵工程において GABA の生成または保持を強く促進し、Peppermint および Yuzu peel、Mace は焼成工程において GABA および Glu の減少を抑制する傾向が認められた。これは、香辛料が小麦粉に含まれる GAD 活性に作用し、製造プロセスを通じてアミノ酸組成を修飾していることを示唆している。また、製造工程中の GABA と Glu の増減には正の相関が認められ、前駆体である Glu の保持が GABA の保持と密接に関連していることが明らかとなった。

第 2 章では、第 1 章の知見を基に、実際の減塩パンに含まれる複雑な遊離アミノ酸組成が、塩味知覚および嗜好性に及ぼす影響を解析した。本研究の重要な発見は、パンの呈味特性が GABA や Glu の絶対量ではなく、主要な遊離アミノ酸 (Asn, Glu, Arg, Ala) の総和に対する GABA および Glu の相対的な比率によって規定されることを示した点にある。具体的な役割として、Glu は「味の基盤」を形成して嗜好性を左右し、GABA は他のアミノ酸と共存する条件下で、その相対比に応じて塩味知覚や嗜好性を調整・修飾する「味の修飾」の役割を担っていることが示された。

これら二つの章の成果を統合し、第 1 章で有望とされた香辛料を第 2 章の指標主要アミノ酸の総和/GABA 比および主要アミノ酸の総和/Glu 比で再評価したところ、特に Basil と Peppermint が、美味しさを損なわずに減塩できる可能性が高いと考えられる。Basil は発酵工程で GABA 生成を強く促進し、Peppermint は焼成工程で GABA と Glu の両方の減少を抑制することで、最終的な焼成パンにおいて高い主要アミノ酸/GABA 比と十分に維持された主要ア

ミノ酸/Glu 比の両立を実現している。このように、香辛料は単に特定の味を付与する因子ではなく、GABA の主要遊離アミノ酸との相対的比率の変化に影響し、間接的に呈味に影響すると考えられた。

本研究の意義は、香辛料を用いた減塩手法を、従来の「香気や刺激による代替」から、遊離アミノ酸の相対的バランスに着目した呈味設計という理論へと拡張した点にある。今後は、本研究で除外した香気成分や食感との相互作用についても統合的に解析を進めることで、本研究で提示した「アミノ酸組成バランス」という考え方が、パン類のみならず多様な減塩食品の開発における基盤技術として広く応用されることが期待される。

本論文は、香辛料がパン製造工程におけるアミノ酸動態を制御し、その結果として生じる成分間のバランスの変化が減塩パンの味質を改善することを明らかにした。成分の量からバランスへという視点の転換は、持続可能な減塩社会の実現に向けた有効な戦略となることが期待される。

謝辞

本研究の遂行にあたり、多大なるご指導とご鞭撻を賜りました、龍谷大学の上田由喜子教授に、深く感謝の意を表します。また、副指導教員としての的確なご助言をいただきました榊田哲哉教授に、心より御礼申し上げます。

本研究を進める上で、大阪国際大学短期大学部教授 久木久美子先生、奈良女子大学名誉教授 植野洋志先生ならびに大阪大学大学院医学系研究科 助教 村井稔幸先生には、専門的な見地から貴重なご助言をいただきました。ここに深く感謝いたします。

また、官能評価にご協力いただいた大阪国際大学短期大学部、龍谷大学、京都文教短期大学の学生諸氏に厚く御礼申し上げます。

最後に、本研究を温かく見守って下さいました龍谷大学農学研究科の先生方、健康行動科学研究室の学生および卒業生の皆様、ならびに研究を支えてくださったすべての関係者の皆様に、心より感謝申し上げます。

参考文献

- 1) 厚生労働省：令和 6 年国民健康・栄養調査の概要，
<https://www.mhlw.go.jp/content/10900000/001603146.pdf> (2026 年 1 月 9 日参照) (2025)
- 2) 厚生労働省：日本人の食事摂取基準(2025 年版)，
<https://www.mhlw.go.jp/content/10904750/001316585.pdf> (2025 年 12 月 15 日参照)(2024)
- 3) 農林水産省農産局：米の消費及び生産の近年の動向について，
<https://www.maff.go.jp/j/council/seisaku/syokuryo/240827/attach/pdf/240827-3.pdf>(2025 年 12 月 15 日参照) (2024)
- 4) Katharina Konitzer, Tabea Pflaum, Pedro Oliveira, Elke Arendt, Peter Koehler and Thomas Hofmann : Kinetics of Sodium Release from Wheat Bread Crumb as Affected by Sodium Distribution, *J. Agric. Food Chem.*, 61, 10659–10669 (2013)
- 5) 高野 博幸, 宮崎 祐一, 日野 明寛, 朝来 莊一, 田中 康夫: 製パンにおける食塩量の低減と塩化カリウム代替の影響 パンにおける食塩代替品の利用に関する研究(第 1 報), 日本食品科学工学会誌, Vol.43, No.5, 610–616 (1996).
- 6) Reißner, A.-M, Wendt, J., Zahn, S., Rohm, H.: Sodium-chloride reduction by substitution with potassium, calcium and magnesium salts in wheat bread, *LWT*, 108, 153–159 (2019)
- 7) Crucean, D., Debucquet, G., Rannou, C., le-Bail, A., le-Bail, P.: Vitamin B4 as a salt substitute in bread: A challenging and successful new strategy. Sensory perception and acceptability by French consumers, *Appetite*, 134, 17–25 (2019)
- 8) Maheshwari HM, Prabhavathi SN, Rajesh Devisetti and Jamuna Prakash: Determining Efficacy of Monosodium Glutamate for Salt Reduction in Plain and Spiced ‘Poories’ Through Sensory Responses, *J Exp Food Chem*, 3, 3, 1000129 (2017)
- 9) Kyoji Yoshino, Naoki Higashi, Kunimasa Koga: Antioxidant and Antiinflammatory Activities of Oregano Extract, *Journal of Health Science*, 52, 2, 169-173 (2006)
- 10) Albadawi D.A.I., Ravishankar D., Vallance T.M., Patel K, Osborn H.M.I., Vaiyapuri S, Impacts of Commonly Used Edible Plants on the Modulation of

- Platelet Function, *Int. J. Mol. Sci.*, 23, 605 (2022)
- 11) Ludy, M.-J., Moore, G., E., Mattes, R. D.: The Effects of Capsaicin and Capsiate on Energy Balance: Critical Review and Meta-analyses of Studies in Humans, *Chem. Senses.*, 37, 103–121 (2012)
 - 12) Sameer Khalil Ghawi, Ian Rowland, Lisa Methven: Enhancing consumer liking of low salt tomato soup over repeated exposure by herb and spice seasonings, *Appetite*, 81, 20–29 (2014)
 - 13) Ida Bagus Agung Yogeswara, Suppasil Maneerat, Dietmar Haltrich: Glutamate Decarboxylase from Lactic Acid Bacteria—A Key Enzyme in GABA Synthesis, *Microorganisms*, 8, 1923 (2020)
 - 14) Masayuki Kimura, Kazuhito Hayakawa and Hiroshi Sansawa: Involvement of γ -Aminobutyric Acid (GABA) B Receptors in the Hypotensive Effect of Systemically Administered GABA in Spontaneously Hypertensive Rats, *Jpn. J. Pharmacol.*, 89, 388–394 (2002)
 - 15) 梶本修身, 平田洋, 中川聡史, 梶本佳孝, 早川和仁, 木村雅行: GABA 含有はっ酵乳製品の正常高値血圧者に対する降圧効果, *食科工誌*, 51, 79–86 (2004)
 - 16) M. R. Starostik, M. R. Rebello, K. A. Cotter, A. Kulik and K. F. Medler : Expression of GABAergic Receptors in Mouse Taste Receptor Cells, *PLOS ONE*, 5, 10,e13639(2010)
 - 17) Hisaki K, Wada K, Shinohara K, Nakamura Y, Ueno H. Contribution of GABA to taste sensation evaluated by taste test and effect of compounds in spices on the activity of GABA synthetic enzyme. *Jpn J Taste Smell Res.* 2007;14: 435-438.
 - 18) Kumiko Hisaki, Kaori Hamano, Hiroshi Ueno: Screening and Identification of Food Extracts that Are Useful for Reducing Salt Intake -An Approach from a GABA-synthesizing Enzyme-, *J. Biol. Macromol.*, 14, 3–14 (2014)
 - 19) Kumiko Hisaki, Chikae Sakamoto, Hina Matsui, Hiroshi Ueno and Yukiko Ueda: Contribution of Gamma-Aminobutyric Amino Acid and Free Amino Acids to Low-Salt Whole-Wheat Bread through the Addition of Spice Extracts—An Approach Based on Taste Quality, *Foods*, 13, 1900 (2024)

- 20) Aubrey N Dunteman, Soo-Yeun Lee: Characterizing the effect of sodium reduction and monosodium glutamate supplementation on white and multigrain breads, *J Food Sci*, 88, 3 ,1128-1143 (2023)
- 21) Kawai M, Sekine-Hayakawa Y, Okiyama A, Ninomiya Y.: Gustatory sensation of (L)- and (D)-amino acids in humans, *Amino Acids*, 43, 6, 2349-2358 (2012)
- 22) Masataka Narukawa, Sho Sasaki, Tatsuo Watanabe: Effect of Capsaicin on Salt Taste Sensitivity in Humans, *Food Sci. Technol. Res.*, 17 (2), 167–170 (2011)
- 23) Qiang Li, Yuanting Cui, Rongbing Jin, Hongmei Lang, Hao Yu, Fang Sun, Chengkang He, Tianyi Ma, Yingsha Li, Xunmei Zhou, Daoyan Liu, Hongbo Jia, Xiaowei Chen, Zhiming Zhu: Enjoyment of Spicy Flavor Enhances Central Salty-Taste Perception and Reduces Salt Intake and Blood Pressure, *Hypertension*, 70, 6, 1291-1299 (2017)
- 24) Toshiyuki Kohri, Reina Kira, Chiho Myojin, Masako Kwanishi, Hiroyuki Tomotake: Enhancing Effects of Herbs on the Salty Taste Perception of Saline, *J of Nutr Sci Vitaminol.*, 66, 4, 325-330 (2020)
- 25) 宮本恵宏:特定保健指導の対象とならない非肥満の心血管疾患危険因子保有者に対する生活習慣改善指導ガイドライン．厚生労働科学研究費補助金 疾病・障害対策研究分野循環器疾患・糖尿病等生活習慣病対策総合研究 「非肥満者に対する保健指導方法の開発に関する研究」，平成 27～29 年度 総合研究報告書 (2018)
- 26) Benedito de Barber C, Prieto JA, Collar C.: Reversed-phase high-performance liquid chromatography analysis of changes in free amino acids during wheat bread dough fermentation, *Cereal Chem*, 66, 283–288, (1989)
- 27) 梶原慶春,木村万紀子: 科学でわかるパンの「なぜ？」Q&A で理解するパン作りのコツと技術,株式会社柴田書店 (2024)
- 28) 坂本千科絵, 深田茉莉絵, 久木久美子, 植野洋志, 上田由喜子, 増田俊哉: 味覚情報伝達への影響が期待される香辛料を用いた料理への減塩効果および添加香辛料の探索方法, 日本食育学会誌, 12, 2, 147-155(2018)
- 29) Ito H, Kikuzaki H, Ueno H.: Effects of cooking methods on free amino acid contents in vegetables, *J Nutr Sci Vitaminol*, 65, 264–271(2019)

- 30) Saikusa T, Horino T, Mori Y. : Accumulation of γ -aminobutyric acid (GABA) in the rice germ during water soaking, *Biosci Biotechnol Biochem*, 58, 2291–2292. (1994)
- 31) Lamberts L, Joye IJ, Beliën T, Delcour JA, Dynamics of γ -aminobutyric acid in wheat flour bread making, *Food Chem*, 130, 896–901(2012)
- 32) Benedito de Barber C, Prieto JA, Collar C., Reversed-phase high-performance liquid chromatography analysis of changes in free amino acids during wheat bread dough fermentation, *Cereal Chem*, 66, 283–288(1989)
- 33) Hu, L., Li, Y., Huang, X., Du, C., Huang, D., & Tao, X.: Effect of Co Fermentation with *Lactobacillus plantarum* HLJ and Yeast on Wheat Protein Characteristics in Sourdough and Crackers, *Foods*, 12, 555(2023)
- 34) Toyozumi, T., Kosugi, T., Toyama, Y., Nakajima, T., Effects of high-temperature cooking on the gamma-aminobutyric acid content and antioxidant capacity of germinated brown rice (*Oryza sativa* L.), *CyTA – J. Food*, 19, 360-369 (2021)
- 35) Zhu, R.-G., Xiao, H.-Y., Zhou, Z., Yin, M., Xiao, H., Hu, C., Wei, G., Liu, C.: Thermal degradation of 18 amino acids during pyrolytic processes, *Sci. Rep.*, 14, 29192 (2024)
- 36) Takigawa S, Ohsasa T, Suzuki T, Matsuura Endo C, Hashimoto N, Saito K, Yamauchi H, Noda T. : Effective production of γ -aminobutyric acid using wheat germ, *J Jpn Soc Food Sci Technol*, 56, 114–117(2009)
- 37) Komatsu M, Yamada S, Takano T.: Measurement of Dough Effective Thermal Conductivity using Integrated Thermocouple under Bread Baking Process, *Netsu Bussei*, 20, 4, 179-185(2006)
- 38) Chikae Sakamoto, Mi-Young Bae, Toshiyuki Murai, Kumiko Hisaki, Hiroshi Ueno, Yukiko Ueda, Influence of spices on the variation in gamma-aminobutyric and glutamic acids during low-salt bread production, *J. Biol. Macromol.*, 26, 1 (2026)

- 39) Christie L. Harman, John B. Hallagan, and the FEMA Science Committee
Sensory Data Task Force, Sensory Testing for Flavorings with Modifying
Properties, 67,11(2013)
- 40) Chun J.-Y., Kim B., Lee J. G., Cho H.-Y., Min S.-G., Choi M.-J., Effects of
NaCl Replacement with Gamma-Aminobutyric acid (GABA) on the Quality
Characteristics and Sensorial Properties of Model Meat Products, *Korean J. Food
Sci. An.*, **34**, 552-557. (2014)
- 41) Ji-Yeon Chun, Byong-Soo Kim, Jung-Gyu Lee, Hyung-Yong Cho, Sang-Gi Min,
Mi-Jung Choi, Effect of NaCl/Monosodium Glutamate (MSG) Mixture on the
Sensorial Properties and Quality Characteristics of Model Meat Products, *Korean
J. Food Sci. An.*, **34**, 576~581 (2014)
- 42) Takashi Yamamoto and Chizuko Inui-Yamamoto, The flavor-enhancing action of
glutamate and its mechanism involving the notion of kokumi, *npj Science of
Food* , **7**, 3 (2023)
- 43) Djin Gie Liem, Fatemeh Miremadi and Russell S. J. Keast, Reducing Sodium in
Foods: The Effect on Flavor, nutrients, **3**, 694-711(2011)
- 44) G. Lawrence, C. Salles, C. Septier, J. Busch, T. Thomas-Danguin, Odour–taste
interactions: A way to enhance saltiness in low-salt content solutions, *Food
Quality and Preference*, **20**, 241–248(2009)
- 45) Gennady Dvoryanchikov, Yijen A. Huang, Rene Barro-Soria, Nirupa Chaudhari,
and Stephen D. Roper, GABA, Its Receptors, and GABAergic Inhibition in Mouse
Taste Buds, *The Journal of Neuroscience*, **31**, 15, 5782–5791(2011)
- 46) Russell S.J. Keast, Paul A.S. Breslin, An overview of binary taste–taste
interactions, *Food Quality and Preference*, **14**, 111–124(2002)

主論文

- 1) Chikae Sakamoto, Mi-Young Bae, Toshiyuki Murai, Kumiko Hisaki, Hiroshi Ueno, Yukiko Ueda: Influence of spices on the variation in gamma-aminobutyric and glutamic acids during low-salt bread production, *Journal of Biological Macromolecules*, vol.26, No.1 (2026)
- 2) 坂本千科絵、久木久美子、植野洋志、上田由喜子：香辛料添加減塩パンにおける遊離アミノ酸組成中の GABA および Glu の呈味への寄与，食品・臨床栄養，(投稿中)
- 3) Kumiko Hisaki, Chikae Sakamoto, Hina Matsui, Hiroshi Ueno and Yukiko Ueda: Contribution of Gamma-Aminobutyric Amino Acid and Free Amino Acids to Low-Salt Whole-Wheat Bread through the Addition of Spice Extracts—An Approach Based on Taste Quality, *Foods*, 13, 1900 (2024)