

製造条件が島豆腐の物理・化学的特性および食味に与える影響

豊川哲也、金城要^{*1}、望月智代、上原真希子

島豆腐の品質向上に資することを目的として、製造条件の違いが物理・化学的特性や食味に与える影響を検討した。10の製造因子について2~4の水準を設定し製造試験と評価を行った。統計処理により、製造条件の違いが島豆腐の物理・化学的特性および食味に影響を与える製造因子を明らかにした。また、官能評価項目の不快感は化学・物理量と関係が深いことが認められた。

1 はじめに

沖縄で製造される豆腐は、沖縄県民の間では「島豆腐」の呼称で親しまれており、日本本土の豆腐とは製法や流通方法および喫食方法が異なっている。島豆腐の伝統的製造法は、大豆をすりつぶした呉（ご）を、豆乳とおからに分離した後に豆乳を地釜で加熱し、にがりや海水で凝固させる生搾り法で製造される。また、島豆腐は水晒しをせず、温かいままで流通している。

筆者らは、島豆腐と本土豆腐の物理・化学的特性について検討し、静的粘弾性に関して島豆腐が固くて弾力があること、イソフラボン総量に関しては島豆腐が多いこと、島豆腐は香り成分の減少が少ないこと等を明らかにした¹⁾。

しかしながら、こうした島豆腐の特性が製造工程のどの因子により発揮されているのかは明らかでない。また、各因子が豆腐の物理・化学的特性や官能特性に与える影響も不明確である。本研究では、島豆腐の製造工程因子が豆腐の物理・化学的特性および官能特性に与える影響を検討し、島豆腐の高品質化に資する知見を得ることを目的とした。

2 実験方法

図1に一般的な島豆腐の製造法のフローダイアグラムを示した。島豆腐の製造工程は、豆乳の調製工程、豆乳の凝固・成型工程および保蔵・流通工程に大別される。豆乳調製工程では、原料大豆を精選・洗穀し、水に一定時間浸して吸水させる。その後、加水しながら磨砕を行うと豆乳とおからの混じった呉が得られる。島豆腐では、呉を遠心分離器やスクリュープレスなどにより豆乳とおからに分離し生豆乳を調製する。続く凝固工程では、豆乳を90℃付近まで加熱し、一旦火を止め、70℃付近まで冷めた段階で凝固剤を添加すると、大豆タンパクと油脂球が凝固しはじめる。また、島豆腐では凝固剤溶液に塩を同時に添加するため塩味のついた豆腐となる。得ら

れた凝固物は、布をしいた型箱に盛り入れ重しを掛けて成型する。型箱からとりだした豆腐は、1丁で1kgほどに切り分けてポリエチレン袋に小分けして保蔵・流通している。

本研究では、表1に示す製造因子についてアスタリスクを付した水準を各因子の標準条件として設定し、各因子について2から4水準の条件で豆腐の製造を行い、得られた豆腐について硬度、pH、色彩、官能評価等について検討した。

2-1 豆腐の製造方法

2-1-1 豆乳の調製

原料大豆は、2008年産 SS240（米国ミシガン州産）、P93B82（米国オハイオ州産）、S03W4（カナダ・オンタリオ州産）およ



図1 島豆腐製造フロー

表1 製造因子と水準

製造因子	水準			
大豆品種	SS240	P93B82*	S03W4	フクユタカ
豆乳調製法	生しぼり*	煮とり	-	-
豆乳濃度	6%*	8%	10%	-
昇温速度	1.3℃/分	3℃/分*	6℃/分	-
殺菌時間	2分*	10分	30分	-
凝固温度	65℃	70℃*	75℃	-
凝固剤種類	粗製MgCl	食添用*	海水	-
		MgCl		
凝固剤濃度	1.3	2.0*	4.0	-
	g/kg(豆乳)			
成型法	直接法	排出法*	潰崩法	-
保蔵・流通法	水晒し	自然冷却*	2h保温	-

(-) は水準を設定しなかったことを示す。

*1 非常勤職員

びフクユタカ（熊本県産）を用いた。大豆を洗穀後約3倍重量の水道水を用いて15℃で15時間浸漬し吸水させた。浸漬後の大豆は吸水率約140%程度となる。浸漬後の大豆は、粉碎器（増幸産業社製、MKCA10-20JF）を用い、クリアランス0.7mmで大豆乾重量の4から4.5倍の差し水を加えながら磨砕し呉を得た。得られた呉は、遠心脱水機（岩月機械製作所製、YDK-24）でおからと豆乳に分離した。得られた豆乳のブリックスは15～16度であり、-25℃で使用時まで冷凍保管した。また、呉の一部は煮取り法の試験に供するため、固液分離せずに-25℃で冷凍保存した。煮取り法の試験に供する豆乳は呉を流水解凍し90℃で5分加熱した後、遠心脱水機で固液分離し豆乳を調製した。

2-1-2 豆腐の調製

豆乳を流水解凍し、豆乳量の約半容の水道水を加水後φ30cmの寸胴鍋を用いて湯煎にて加温した。豆乳温度が80℃に達した時点で所定のブリックス濃度となるように加水し、さらに91℃まで加熱し所定時間保持して加熱殺菌した。豆乳をφ42cmのボウルに移し自然放冷させて所定の温度に達した時点で凝固剤を添加した。なお、凝固剤は粗製塩化マグネシウム（(株)シユアナチュラル社製、にがりS）、食品添加物用塩化マグネシウム製剤（吉川化学工業所社製、ネオエキス）および海水（沖縄県宮城島沖採取）を用いた。なお、凝固剤の添加量は食添用塩化マグネシウム製剤のマグネシウム濃度にあわせて調製した。凝固剤の添加後3分間静置し凝固を進行させ、10cm×10cm×8cmの型箱に凝固物を盛り入れ2.5kgの重しをかけて脱水した。凝固物の盛り入れと脱水を繰り返し行い成型した後、型箱から取り出し室温まで冷却した。なお、成型法に関しては凝固剤を添加した後にクンスー（湯）を分離しないで型箱につめる直接法、布をしいたザルでクンスーをくみ出す排出法、凝

固物を櫛で2-3回壊してさらにクンスーをくみ出す潰崩法を検討した。また、冷却法は自然冷却の他に4℃の冷水を用いた水晒し法と、60℃で2時間保持した後に自然冷却を行う方法を検討した。

2-2 水分

105℃恒量乾燥法²⁾により行った。

2-3 pH

突き刺し型pH電極（アズワン社製、pHSpear）を用いて、直接豆腐のpHを測定した。

2-4 色彩測定

色彩色差計（オリンパス社製CR-300）を用い、白色校正後、豆腐中央の切断面の色彩を測定した。なお、表色系は、JIS Z8729 に従いL*a*b*表色系を採用した。

2-5 破断荷重の測定

既報¹⁾に従い、豆腐硬度計（大場計器製作所社製）を用いて一辺2cmの立方体に切り出した豆腐の破断荷重を測定した。

2-6 凝集塊生成率の測定

豆乳に、にがりを添加した際に生じる凝集塊生成率を、凝集塊容積と上清容積を測定して算出した。所定の豆乳濃度、凝固温度、殺菌時間および昇温速度となるように調製した豆乳500mlに、2%塩化マグネシウム50mlを添加した。ただちに、500ml容のメスシリンダーに豆乳を移し、2時間後の凝集塊および上清容積を測定した。

2-7 官能評価

官能評価は、外観、色調、香り、うま味・甘味、こく味、不快味、硬さ、なめらかさおよび総合評価の9項目

表2 採点基準

評価項目	評価基準
外観	異物等の斑点物質がないこと。 気泡や割れがないこと。
色調	色合いが良く均一であること。白く明るい場合は良好とし、黄色っぽく暗い場合は不良とする。
香り	青臭み、酸臭及び異臭がないこと。
うま味・甘味	豆腐特有の旨み甘味があり、異味がないこと。
こく味	味の厚みや持続性があること。
不快味	苦味や酸味がないこと。
硬さ	適度に弾力があること。
なめらかさ	ざらつきがないこと

表3 採点表

官能評価採点表 (月 日)	評価者名:									
	外観	色調	香り	うま味・甘味	こく味	不快味	硬さ	なめらかさ	総合	コメント
サンプル1 (基準品)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
サンプル2										
サンプル3										
サンプル4										

表4 標準条件で調整した豆腐の諸特性の室内変動

調製日	pH	破断荷重 (g)	水分 (%)	色彩			豆腐重量 (kg)	クンスー 量(kg)
				L*	a*	b*		
10月9日	6.00	125.3	81.7	84.4	-1.0	14.5	0.76	2.14
10月13日	6.10	130.3	81.2	84.2	-1.1	14.4	0.72	1.86
10月15日	6.08	130.7	79.1	84.3	-0.9	14.9	0.64	2.14
10月16日	6.07	124.0	81.5	83.9	-0.7	14.1	0.72	2.12
10月22日	6.01	154.0	75.4	84.8	-0.8	14.3	0.70	2.00
10月23日	6.01	154.7	81.7	84.4	-0.8	14.0	0.68	1.96
10月29日	6.14	159.7	77.1	84.5	-0.8	14.4	0.70	1.94
10月30日	6.09	157.3	80.8	84.5	-0.8	13.6	0.60	2.08
平均	6.07	142.0	79.8	84.4	-0.85	14.3	0.69	2.03
標準偏差	0.04	15.7	2.4	0.3	0.1	0.4	0.05	0.11
変動係数	0.70	11.0	3.0	0.3	-15.3	2.7	7.30	5.2

表5 製造条件の違いがpH、破断荷重および色彩に与える影響

	pH	破断 荷重	色彩		
			L*	a*	b*
凝固剤種類	○	×	×	×	○
豆乳調製法	○	×	×	○	○
豆乳濃度	×	○	○	×	○
凝固温度	×	○	○	○	×
成型法	×	○	○	○	×
凝固剤濃度	○	×	○	○	×
殺菌時間	○	○	○	○	×
豆品種	○	×	×	○	×
昇温速度	○	○	○	×	○
流通法	○	×	×	○	×

*)○は有意水準 $\alpha=0.05$ 以下で有意差があることをしめす。

について行った。豆腐の評価は、4名以上のパネラーで標準条件にて調製した豆腐を基準として、7段階評価を行った。採点基準表と採点表を表2および表3に示す。

2-8 統計処理

統計処理は、EXCEL(マイクロソフト社)、および EXCEL 統計(エスミ社)を使用した。

3 結果と考察

3-1 不確かさについて

表4に、標準条件で製造した豆腐の諸特性値を示す。pH、水分、L*、b*については変動係数(CV)が3%以下であった。破断荷重、豆腐重量、クンスー量について $CV < 15\%$ であった。a*は $CV > 15\%$ となり、ばらつきが大きくなった。

3-2 島豆腐の物理・化学的特性に影響を与える製造因子について

表5にpH、破断荷重および色彩に関して、各製造因

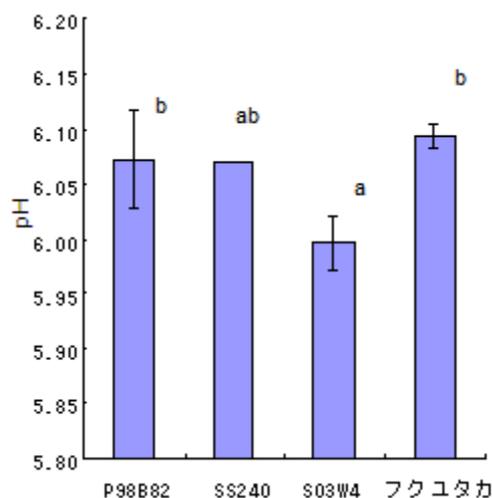


図2 品種の違いがpHに与える影響

子の分散分析を行った結果を示す。因子効果が有意水準 $\alpha=0.05$ で有意に認められた場合は○を、認められなかった場合は×で示す。効果が認められた因子については、母平均の多重比較検定を行った。

3-2-1 pHに影響を与える製造因子

pHに影響を与える製造因子について、その水準毎の測定値を図2～図8に示す。品種については、S03W4(カナダ、オンタリオ州産)が、有意に低い値を示した。豆乳調製法については、生搾り法が低値を示した。昇温速度については、昇温速度 $3\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{分}$ が低いことを認めた。殺菌時間については、時間が短い方がpHが高くなることが認められた。凝固剤については、食添用塩化マグネシウム製剤でpHが低くなることが認められた。凝固剤の濃度については、濃度が高いほど低値を示す傾向が認められた。保蔵・流通方法については、水晒し、保温をしたサンプルのpHが高いことを認めた。

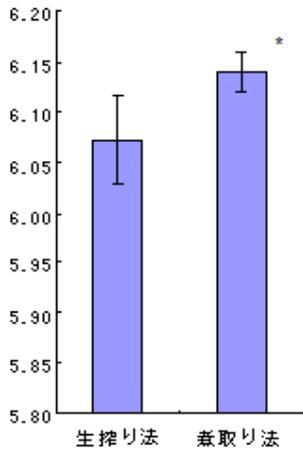


図3 豆乳調製法の違いがpHに与える影響

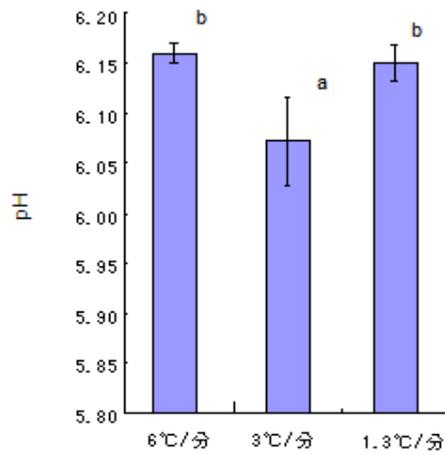


図4 昇温速度の違いがpHに与える影響

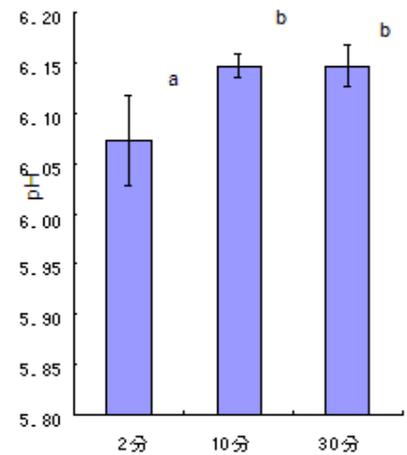


図5 殺菌時間の違いがpHに与える影響

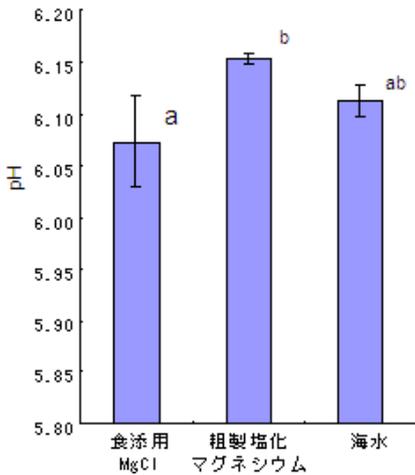


図6 凝固剤の種類がpHに与える影響

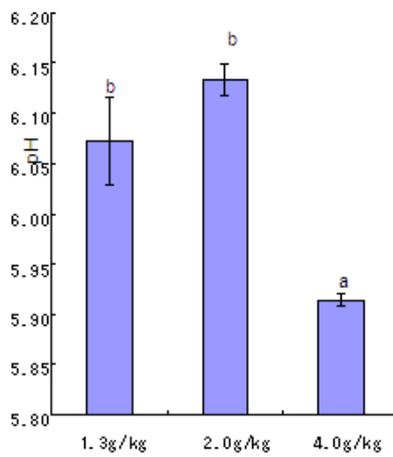


図7 凝固剤濃度の違いがpHに与える影響

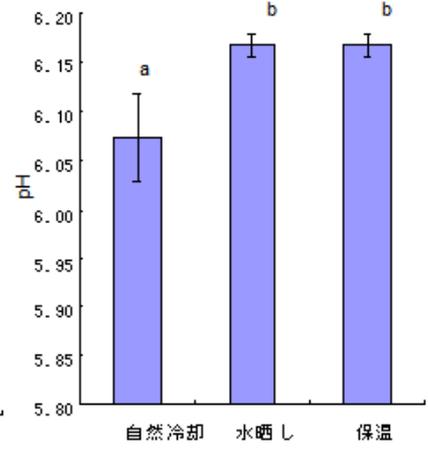


図8 保蔵・流通形態の違いがpHに与える影響

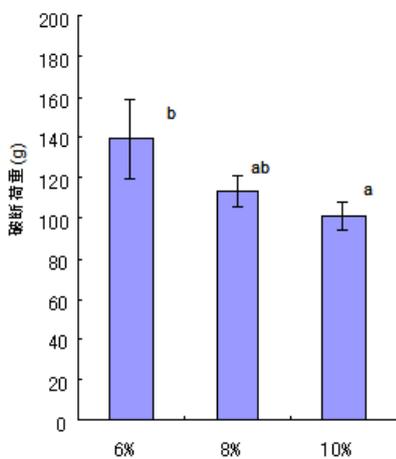


図9 豆乳濃度の違いが破断荷重に与える影響

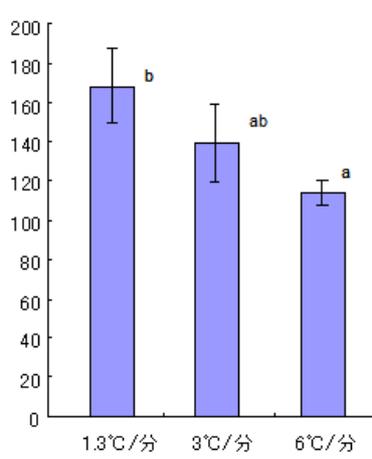


図10 昇温速度の違いが破断荷重に与える影響

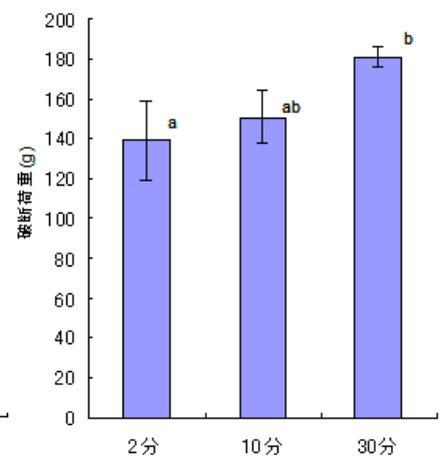


図11 殺菌時間の違いが破断荷重に与える影響

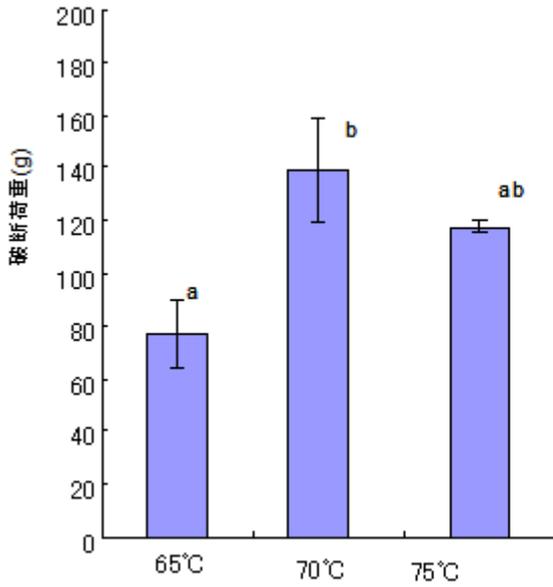


図12 凝固温度の違いが破断荷重に与える影響

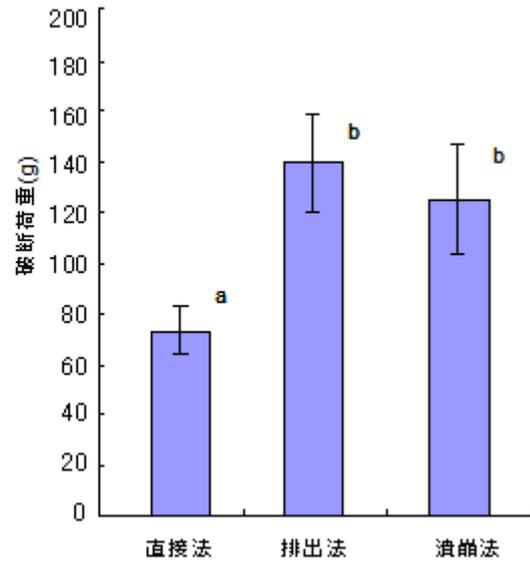


図13 成型法の違いが破断荷重に与える影響

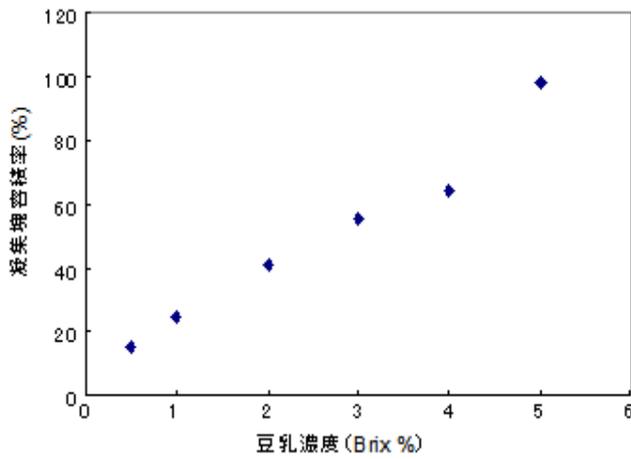


図14 豆乳濃度が凝集塊容積に与える影響

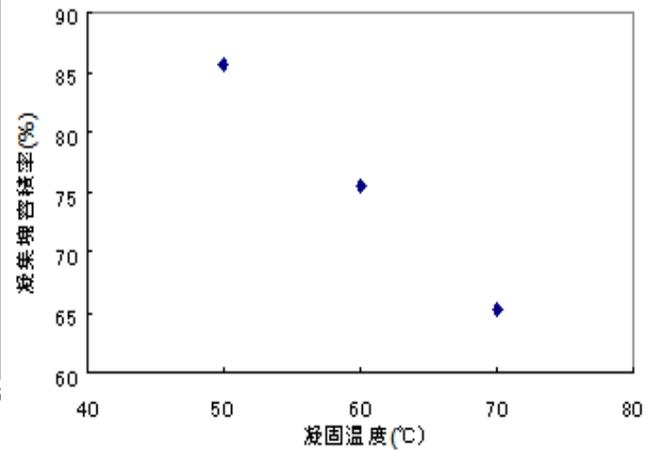


図15 凝固温度が凝集塊容積に与える影響

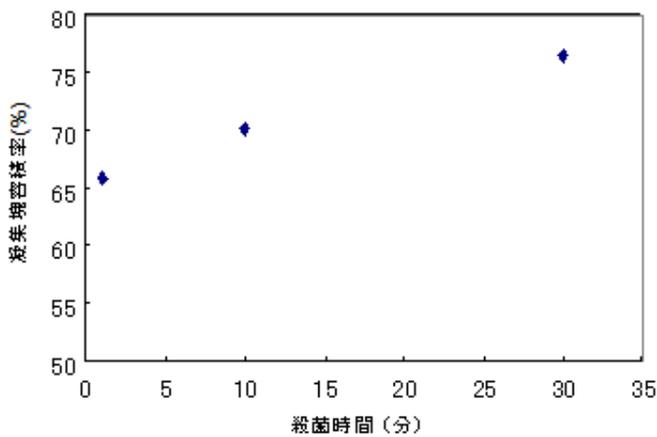


図16 殺菌時間が凝集塊容積に与える影響

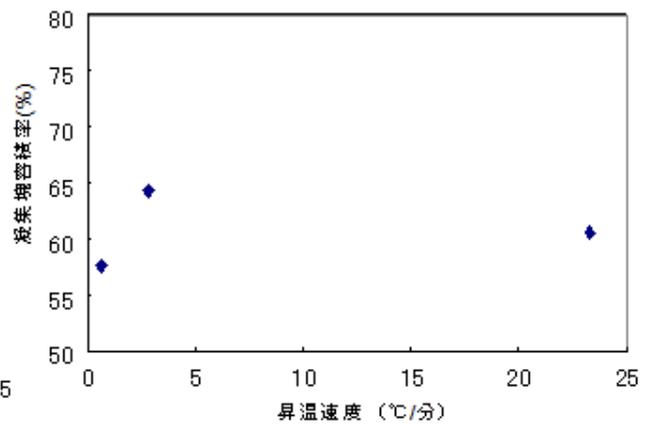


図17 昇温速度が凝集塊容積に与える影響

3-2-2 破断荷重に影響を与える製造因子

破断荷重に影響を与える製造因子について、その水準毎の測定値を図9～図13に示す。豆乳濃度について、濃度が高くなるほど破断荷重は低下することが認められた。昇温速度については、速度が大きいほど破断荷重が低下すること、殺菌時間については、時間が長いほど硬い豆腐となることが認められた。凝固温度については、65℃で破断荷重が低値を示すことが認められた。成型法に関しては、クンスーをくみ出さない方法の直接法が柔らかい豆腐となることが明らかとなった。

豆乳濃度が低い場合、凝集塊が小さくなるため水を抱き込む割合が低く硬い豆腐になる³⁾といわれている。そこで、豆乳濃度、凝固温度、殺菌時間および昇温速度の違いが凝集塊の大きさに与える影響を検討するため、凝集塊と上清の容積の比を測定し、凝集塊容積率を求めた(図14-17)。豆乳濃度の減少に伴い、容積率は線形的に減少している。これは、豆乳濃度に依存して生じる凝集塊の量が小さくなるだけで、凝集塊の大きさは変化しないことを示している。このことは、豆腐の破断荷重が単純に水分の抱き込みではなく、豆腐の内部構造に依存していることを示唆している。なお、5%以上の豆乳濃度では凝集塊と上清の分離は認められなかった。

殺菌時間については、殺菌時間の増加とともに凝集塊容積率と破断荷重はともに大きくなり、凝集塊の大きさが破断荷重に関与している可能性が示唆された。

3-2-3 色彩に影響を与える製造因子

色彩に関しては、様々な因子が有意な影響を与えることが明らかとなった。しかし、標準条件との違いを色差(ΔE^*ab)として計算すると、その値はすべて1.5より小さくなった。色差値はNBS単位(米国標準局)で次のとおりに感覚的に表現される。0～0.5では「微かに」、0.5～1.5では「僅かに」、1.5～3.5では「関知するほど」、3.0～6.0では「目だって」、6.0～12.0では「大いに」、12以上では「非常に」と表現される。すなわち、今回の試験では、豆腐の色は離して並べればほとんど気づかず、一般には同じ色だと思われるほどの違いであった。

3-2-4 水分

水分は、すべてのサンプルの平均値で80.2%、標準偏差2.37%、変動係数0.03%となり、サンプル間で顕著な違いは認められなかった。また、水分と破断強度について単相関分析をおこなったところ、決定係数 $R^2 = 0.001$ となり破断強度と水分の相関は低いことが認められた。サンプル間で水分の差が認められないことから、製造条

件の違いによる破断荷重の差は、豆腐の組織構造に起因することが示唆された。

3-3 官能評価

官能評価は、「試験体の評価は標準条件で製造した豆腐の評価に等しい」との帰無仮説で母平均の検定を行った。表6に検定結果を示す。有意水準 $\alpha = 0.05$ で仮説を棄却できた場合は評価の平均値を、棄却できなかった場合はブランクで示す。

大豆品種ではS03W4を用いた場合に、うま味・甘味および総合評価の項目で評価が高くなった。評価コメントとして、「複雑な味がする」、「大豆の味が強い」、「ボディ感がある」といったものがあつた。

煮取り法では、色調、香り、うま味・甘味、こく味および総合評価で低い評価となった。評価コメントとして、「色調が赤っぽく暗い」、「豆の香りが弱く、青臭い」、「ざらつく」、「甘味がない」などがあつた。

豆乳濃度では、8%で、「うま味・甘味」および「こく味」で評価が高くなり、「前半はあつさりしているが、後半にうま味を強く感じる」、「口に入れたときに甘味があり、後味を強い」等のコメントがあつた。一方、10%では、色調、うま味・甘味、不快味および滑らかさで、評価が低くなった。コメントとして、「異味あり」、「塩味、苦味が強い」、「渋い」、「黄色が強い」などがよせられた。

昇温速度に関しては、1.3℃/分で硬さの評価が低くなった。また、昇温速度6℃/分では、香りに関して低い評価となり、「香りがあまりない」、「わずかに酸っぱいような香り」、「堅いだけで弾力がない」という評価であつた。

殺菌時間に関しては標準条件で調製した豆腐と違いは認められなかった。

凝固温度に関しては、65℃で硬さおよび総合評価で低い評価となり、「モジャモジャする」、「キメが粗く硬い」、「舌に残るざらつき」などの評価となった。

凝固剤種類については、粗製塩化マグネシウムを用いた場合に、うま味・甘味、滑らかさおよび総合評価で評価が低くなった。コメントとして、「淡泊」、「あつさりしすぎ」、「ぼそぼそ感」等のコメントがあつた。海水を使った場合は、香り、うま味・甘味、こく味、滑らかさおよび総合評価で評価が低くなり、「香り弱い」、「水っぽい」、「全体的に味が薄く、香りが弱い」などのコメントがあつた。

塩化マグネシウム濃度に関しては、1.3g/kg(豆乳)で硬さの評価が低くなった。

表6 製造条件の違いが官能評価に与える影響

製造因子・水準	外観	色調	香り	うま味	こく味	不快味	硬さ	滑らかさ	総合 甘味
大豆品種・SS240									
大豆品種・S03W4				1					1
大豆品種・フクユタカ									
豆乳調製法・煮取り	-1.5	-1.2	-1.0	-1.0					-1.3
豆乳濃度・8%				0.6	0.6				
豆乳濃度・10%	-0.9		-0.7			-0.9		-0.6	-0.9
昇温速度・1.3℃/分							-1		
昇温速度・6℃/分			-1						
殺菌時間・10分									
殺菌時間・30分									
凝固温度・65℃							-0.8		-0.8
凝固温度・75℃									
凝固剤種類・粗製MgCl				-0.4				-0.6	-0.7
凝固剤種類・海水			-0.6	-1.1	-0.4			-0.9	-1.1
食添用MgCl濃度・1.3g/kg							-1.0		
食添用MgCl濃度・4g/kg									
成型法・直接法							-0.8		-0.7
成型法・潰崩法									
保蔵・流通・水晒し									
保蔵・流通・2h保温									

*) 数字は標準を0とした際の官能評価の数値を示す。標準品と比較して、非常に良好(+2)、良い(+1)、変わらない(0)、悪い(-1)、非常に悪い(-2)

成型法では、直接法で硬さの評価が低くなり、「柔らかく水っぽい」、「ねっとり感」等のコメントがあった。
保蔵・流通の違いは認められなかった。

3-4 物理・化学的特性と官能評価

物理・化学特性と官能特性の関係を明らかにするため、官能評価の各項目を目的変数とし、pH、水分、破断荷重を説明変数として重回帰分析をおこなった。重回帰分析は、説明変数の選択を増減法にて、F値の設定を2とした。重回帰分析の結果、不快味に関しては、重回帰式の精度を示す自由度修正済み決定係数が0.517、分散分析のp値は0.002となり十分な精度の回帰式を得ることができた。重回帰式を表7に示す。重回帰式中の偏回帰係数は説明変数の目的変数に対する影響力を示し、標準偏回帰係数は説明変数の重要性を示す。偏回帰係数では

表7 不快味の重回帰式

説明変数名	偏回帰係数	標準偏回帰 係数	P値
破断荷重	0.0059	0.4381	0.0178
水分	0.1737	0.4923	0.0078
pH	1.8098	0.3401	0.0597
定数項	-25.954		

pHの係数が大きかったが、そのp値は0.059と十分小さいものではなかった。一方、破断荷重と水分のp値は $p < 0.05$ となり、両変数で不快味を説明できると考えられる。豆腐の破断荷重は、大豆由来のカルシウムイオン⁴⁾やフィチン酸⁵⁾等の関与が報告されている。また、豆腐の不快味に関しては、大豆由来のサポニンやイソフラボン等⁶⁾の関与が報告されている。マグネシウムイオンはにがりの成分として豆腐の硬さに大きく関与している⁷⁾ことが報告されているが、フィチン酸、サポニンやイソフラボンが破断荷重に与える影響については不明である。本実験系では、豆腐の破断荷重は豆腐カードの微細構造が大きく関与していることが示唆されており、重回帰式における水分の影響はこうした微細構造を反映しているものと考えられる。

4 まとめ

島豆腐の物理・化学的特性および官能特性に影響を与える因子を明らかにするために、10の製造因子について検討した。

pHに関しては7つの因子が、破断荷重については5つの因子が影響を与えることが明らかとなった。官能評価では、6因子が影響を与えることを明らかにした。

pH と官能評価の関係では、特に明確な関係は認められなかった。

硬さに関して、官能評価と破断荷重の関係では、破断荷重がおおよそ 140g 程度が良好との判断であった。この値より、高くても低くても評価は低くなった。

官能評価では、豆乳調製法、豆乳濃度および凝固剤の種類が多く項目で標準品との間に違いをもたらすことが認められた。

官能評価項目の不快味は物理・化学量と関係が深いことが認められた。

謝辞

本研究にあたり、製造工程に関して御教授をいただきました長堂豆腐様、赤野豆腐様、一力食品様に感謝いたします。

本研究は、平成 21 年度沖縄地域イノベーション創出共同体形成事業 研究開発環境支援事業の成果の一部です。

参考文献

- 1) 豊川、上原、望月、世嘉良、玉村、比嘉、沖縄豆腐と日本豆腐の物理的・化学的特性比較、平成 20 年度沖縄県工業技術センター研究報告
- 2) 新・食品分析法、株式会社 光琳
- 3) 豆腐、仁藤齊、農文協
- 4) Kyoko SAIO, Makoto KAMIYA and Tokuji WATANABE, Food Processing Characteristics of Soybean 11S and 7S Proteins, Agric. Biol. Chem., 33,(1969)
- 5) Takahiro ISHIGURO, Tomotada ONO, Takahiro WADA, Chigen TSUKAMOTO and Yuhi KONO Changes in Soybean Phytate Content as a Result of Field Growing Conditions and Influence on Tofu Texture, Bioscience, Biotechnology, and Biochemistry, Vol. 70 (2006), No. 4 pp.874-880
- 6) 大久保一良、大豆の DMF 成分と豆腐等の食品加工におけるその挙動、日本食品工業学会誌、Vol. 35, No.12, 866-874(1988)
- 7) 岑 友里恵, 村上 香織, 東 敬子, 吉原 志保, 福永 公寿, 佐伯 隆, 澤野 悦雄、豆腐製造における各種凝固剤の特性の比較、Vol. 52, No3, (2005)

編 集 沖縄県工業技術センター

発 行 沖縄県工業技術センター

〒904-2234 沖縄県うるま市字州崎 12 番 2

T E L (098)929-0111

F A X (098)929-0115

U R L <https://www.pref.okinawa.lg.jp/site/shoko/kogyo/>

著作物の一部および全部を転載・翻訳される場合は、当センターにご連絡ください。