アルミボトルの開栓しやすさに関する検討*

伊藤 隆一^{*1}, 山崎 光悦^{*2}, 韓 晶^{*1}

A Study on Openability of an Aluminum Beverage Bottle

Ryoichi ITOH^{*3}, Koetsu YAMAZAKI and Jing HAN^{*3} Universal Can Corporation,
1500 Suganuma, Oyama-cho, Sunto-gun, Shizuoka, 410-1392 Japan

This paper studied factors that affect consumers' feeling in fingers when unscrewing the cap to open an aluminum beverage bottle, and then investigated experimentally and numerically the size and surface shape of the cap in order to guarantee consumers' openability. Firstly, the gripping and opening way while rotating the cap by fingers was determined as the most popular opening way according to a survey of consumers. The grip force and torque were then measured simultaneously using an experimental bottle equipped with force sensors, and the relationships between the gripping force of fingers and the torque, the dimension and the gripping force of human hands were investigated. Moreover, experiments of semantic differential method were performed to study feelings in finger when pressing vertically and then moving along the surface of test pieces. It's observed that the dimensions of the surface in a wave-shape influenced the feeling in finger as well as the slip between the finger and the test piece. Finally, a finite element analysis model of finger pressing and moving along the wave-shape rigid surface was examined to evaluate numerically the discomfort and slip.

Key Words: Biomechanics, Emotion, Kansei and Embodiment, Human Engineering, Product Design

1. 緒 言

一般市場における飲料容器には、ビールに代表されるアルミ缶、缶コーヒーに代表されるスチール缶、牛乳に使用される紙パック、栄養ドリンクに使用される小形瓶、清涼飲料に使用されている PET ボトルやアルミボトルなどさまざまな容器がある。それぞれの容器には要求される機能や品質があり、金属や樹脂の成形技術、容器の耐食性や意匠性のための塗装・印刷技術など、の総合的な技術を駆使して発展を続けている⁽¹⁾⁽²⁾。アルミボトルは 2000 年ごろに PET ボトルと同様にキャップでの再栓ができるアルミ缶として上市された⁽³⁾。再栓可能なキャップが付いた容器では、材料として樹脂製やアルミニウム製のものや、飲み口が小さいものから大きいものまで多種多様な容器が存在している。消費者が飲料を飲む前の最初の動作が密封解除であり、アルミ缶やスチール缶は缶蓋に取付けられたタブと称するヒンジ部を引上げて開口し、アルミ

ボトルや PET ボトルはキャップをねじって開口する。アルミボトルのキャップは図 1 に示すように缶胴口部に成形されたねじ部にキャップが取付けられて密封性を保っている。キャップには開栓時に滑りを抑えるためのナールと称する凹凸部なども付与している。開栓時にはキャップをねじる力(以下開栓トルクと表記)を负荷するとキャップが回転を始め、その後にはたすら防止のために付与されているスカート部とキャップのねじ部を締結しているミシン目状のブリッジ部をキャップの回転に伴って破断して開栓する機構となっている⁽⁴⁾⁽⁵⁾。

近年、飲料容器では一般工業製品と同様に使いやすさに関する要求が強くなっている。アルミボトルの使

Fig. 1 An aluminum bottle with cap

* 原稿受付 2007 年 6 月 11 日。

^{*1} 正員, ユニバーサル製缶(株)商品開発部(☎ 410-1392 静岡県駿東郡小山町菅沼 1500)。^{*2} 正員, 金沢大学大学院自然科学研究科(☎ 920-1192 金沢市角間町)。

E-mail: itoh@unican.co.jp

いやすさには、開栓しやすさや飲みやすさなどがある。著者らはアルミボトルの飲みやすさの検討に感性工学手法を適用し、飲みやすさには飲み口から出てくる内容液の流量と容器の調節性が影響することなどを明らかにした⁽⁶⁾。また、口径を含むボトル諸元と開栓特性について力学的検討を行い、口径を小さくすると開栓トルクが小さくなることを初等解析等から明らかにした⁽⁵⁾。しかし、開栓時の開栓トルク値に着目した研究⁽⁷⁾⁽⁸⁾、手の大きさと締付け力に関する研究⁽⁹⁾などは見受けられるが、その他の開栓しやすさに影響を及ぼす要因の詳細な検討は見受けられない。そこで、本研究ではキャップの開栓動作を手で開栓トルクを負荷するのみならず、手でキャップを握り、滑らないように、開栓トルクを負荷するとして詳細な検討を行った。具体的には開栓時のキャップの握り方、口径・手の大きさ・開栓トルクとキャップ握り力の関係、キャップの凹凸形状と痛感・滑り性について検討を行った。これらの結果から、アルミボトルの開栓しやすさの方向性を示す。

2. キャップの握り力

一般的に缶胴・キャップの開栓動作(右利きの場合)は左手で缶胴を保持し、右手でキャップを握り、缶胴とキャップをねじることによって開栓する。開栓時に缶胴とキャップをねじるためには、手と缶胴・キャップとの摩擦があることによって滑らずに開栓できる。この摩擦は缶胴およびキャップを握る力(面圧)と凹凸によって決定される。この握る力は手の大きさや対象物の大きさにより力の入りやすさに違いがあるといわれているが、アルミボトル口部(キャップ)の力の入りやすさについて検討した研究は見当たらない。そこで、アルミボトルの口径を種々変更した場合のキャップ握り力の測定を行った。

2.1 キャップの握り方 ボトルの開栓動作を行う場合、消費者は種々の握り方をするといわれている。開栓時の握り方の代表的な例を図2(a)～(c)に

(a) Grip method 1 (b) Grip method 2 (c) Grip method 3

Fig. 2 Gripping postures for cap opening

示す。図2(a)は拇指と食指でキャップを挟み、図2(b)は拇指と中指でキャップを挟み、食指を添える握り方、図2(c)は掌と薬指でキャップを挟む握り方である。男子学生127名、女子学生122名によるアンケート調査を行った結果、図2(a)の握り方で約21%、図2(b)の握り方で約43%となり、この両方で約64%を占めていることがわかった。この結果より、消費者はキャップの握り方として、拇指と食指もしくは中指でキャップを挟み込む握り方が大半を占め、キャップの直径方向に挟み込む力を負荷していることがわかった。

2.2 手の大きさと握力 一般的に握りやすさや力の入りやすさには、手の大きさが関係しているといわれている。そこで、飲料容器であるアルミボトルの一般的な口径においても同様な状況にあるかを確認した。20歳代から50歳代の男性65名、女性25名を被験者とし、手の大きさと筋力を示す握力等の測定を行

Table 1 Hand and arm dimension, gripping power

	ave.	max.	min.	SD
Palm width	85.3	92	75	3.99
W_p (mm)	75.9	80	72	2.80
Plam height	99.7	110	86	5.18
H_p (mm)	92.2	103	81	5.05
First finger length L_1 (mm)	72.4	82	60	4.04
	68.6	75	60	3.89
Middle finger length L_2 (mm)	79.9	90	70	4.52
	76.2	82	71	2.95
Third finger length L_3 (mm)	73.8	87	62	4.48
	69.9	77	62	3.46
Little finger length L_l (mm)	58.4	67	50	4.41
	55.8	65	48	4.12
Thumb length L_t (mm)	62.5	73	55	3.61
	58.1	67	50	3.53
Circle length D_i (mm)	156.8	177	140	8.44
	150.0	160	135	8.19
Arm thickness L_a (mm)	271.3	320	239	17.69
	227.6	261	206	13.18
Gripping power P_a (N)	461.5	598	294	66.7
	274.4	378	147	62.4

Fig. 3 Hand dimensions

った。手の大きさの指標として、手の平幅 W_p 、手の平高さ H_p 、食指長さ L_1 、中指長さ L_2 、薬指長さ L_3 、小指長さ L_l 、拇指長さ L_t 、拇指と食指の握り内径 D_i を測定した(図3)。また、キャップ握り力には力の強さを示す握力 P_a や筋肉の太さを示す前腕最太部の周長 L_a (肘と手首間の最太部であり、以後、前腕周長と表記)も影響していると考え、この両者も測定した。各測定結果を表1に示す。表中には各諸元の平均値(ave.)、最大値(max.)、最小値(min.)、標準偏差(SD)を示しており、上段は男性の、下段は女性の計測値をそれぞれ示している。この測定結果より、男性と比較して女性の手の大きさは平均的に男性の約94%、前腕周長は約84%、握力は約60%であることがわかった。女性では手の大きさより、握力の弱さが際立つことがわかった。

2・3 口径とキャップ握り力の関係 消費者がアルミボトルの開栓を行う場合、図2に示すようにキャップを握りながらねじって開栓を行う。キャップを握る場合の挟み込み力を計測するため、キャップ部位のみを二分割してスリットを設け、そのスリット部に薄形力センサ(KISTLER社製9132B)を挟み込み、直径方向のキャップ握り力を測定する装置を製作した(キャップ部単独では回転しない機構)。このキャップ握り力とはキャップを指で握る力であり、キャップの円周上の直角方向2箇所作用する半径力である。キャップ部にはアタッチメントとしてφ28、φ33、φ38、φ43mm口径の4種類を準備し、口径ごとのキャップ握り力を測定できるようにした。口径の種類は容器コストや飲みやすさ⁽⁶⁾の観点から飲料容器で一般的なφ28～φ43mm口径の範囲で検討することとした。

手の大きさ等を測定した被験者にて、このキャップ握り力測定ジグを用い、各口径のキャップ握り力を測

定した。キャップ握り力の測定では図2に示す3種類の握り方で各口径3回ずつ、力一杯握った力を測定した。各口径のキャップ握り力測定結果を図4に示す。図4において実線は男性、破線は女性のキャップ握り力(平均値)を示し、図中記号の(a)、(b)、(c)は図2に示す握り方にそれぞれ対応している。図4より、男性と女性では、女性のほうがキャップ握り力は弱く、男性の約60%のキャップ握り力であり、握力の男女差と同等比率であることがわかった。各握り方では図2(a)に示す拇指と食指でキャップを挟む握り方のキャップ握り力が最も強く、図2(b)、(c)の順に弱くなり、この傾向は男女ともに同一であった。また、検討範囲内での口径の影響として、男性は口径が大きくなるとキャップ握り力も大きくなる傾向を示し、口径が大きいほど力が入りやすい結果となった。しかし、女性の場合、口径が小さい場合はキャップ握り力が小さく力が入りづらい傾向を示すが、口径33mm以上の検討範囲内ではほぼ同等のキャップ握り力となり、力が入りやすさに影響しないことがわかった。女性被験者に口径が変わってもキャップ握り力が変わらない理由を確認したところ、ある程度の力で握ると指に痛感を覚えてそれ以上に強く握ることを止めている場合のあることがわかった。

このことより、アルミボトルのキャップでは口径が大きいほど力が入りやすい傾向を示すことがわかった。しかし、女性では、口径33から43mm間で力の入りやすさに変化はなく、キャップ握り力の上限には指の痛感が影響を与えることがわかった。これは女性のほうが痛覚に関するしきい値が低いためと考えられ

Fig. 4 Relation between maximum grip force and rim diameter

Table 2 Pearson's correlation procession

	L_a	P_a	$F_{g(a)}$	$F_{g(b)}$	$F_{g(c)}$
W_p	0.562 0.227	0.385 0.328	0.149 0.344	0.171 0.385	0.082 0.219
H_p	0.182 0.442	0.360 0.214	0.171 0.188	0.117 0.253	0.048 0.241
L_1	0.062 0.346	0.407 0.053	0.049 0.333	-0.056 0.224	0.026 -0.083
L_2	0.013 0.107	0.329 0.060	0.079 0.155	-0.034 0.150	-0.055 0.015
L_3	-0.118 0.043	0.196 0.258	-0.071 0.268	-0.179 0.206	-0.090 -0.046
L_l	-0.070 0.092	0.253 0.422	-0.025 0.315	-0.131 0.249	-0.117 -0.012
L_t	-0.020 0.343	0.314 0.047	0.229 -0.136	0.133 -0.227	0.140 -0.211
D_i	-0.121 0.183	0.275 -0.013	0.126 0.233	-0.008 0.232	0.075 0.096
L_a	-	0.374 0.056	0.291 0.009	0.334 0.053	0.080 -0.033
P_a		-	0.527 0.357	0.517 0.357	0.321 0.179

る⁽¹⁰⁾。

2.4 手の大きさとキャップ握り力の相関 2.3節で口径とキャップ握り力の関係が把握できたので、本節では手の大きさとキャップ握り力の関係を検討した結果を示す。キャップ握り力測定前に計測した手の大きさ、握力、前腕周長とキャップ握り力の関係を明確にするため各計測値間の相関を確認した。すべての口径を含めた各項目の Pearson 相関行列を表2に示す。表2には手各部の寸法と図2(a), (b), (c)に示した各握り方でのキャップ握り力をそれぞれ $F_{g(a)}$, $F_{g(b)}$, $F_{g(c)}$ として表記した。また、表中の上段は男性の、下段は女性の相関係数をそれぞれ示している。表中の相関係数として太字斜体で表記した数値は被験者の標本数にて5%の有意性検定を行い、相関ありと判定されたものである(男性検定値0.246, 女性検定値0.403)。表2より、男性では手の各寸法と前腕周長 L_a やキャップ握り力 $F_{g(a)}$, $F_{g(b)}$, $F_{g(c)}$ に相関はなく、握力 P_a に弱い相関がある。一方、女性では手の各寸法と前腕周長、キャップ握り力、握力に相関はない。また、表2は全口径を含めた相関係数であるが、口径ごとの相関有無の傾向は同様であった。これらのことから、手の大きさとキャップ握り力には相関のないことがわかった。キャップ握り力と相関のあるのは、男性では握力 P_a と前腕周長 L_a であり、握力とは強い相関、前腕周長とは弱い相関がある。このことはキャップを握るときに作用する筋肉と握力を計測するとき作用する筋肉はほぼ同一(肘と手首間における長掌筋、腕橈骨筋、浅指屈筋など)であると考えられ、筋力が強いことは筋肉が太いこととおおむね同様であることから、前腕周長にも相関があるものと考えられる。女性ではキャップ握り力と握力や前腕周長などに相関のない結果となった。本来、女性においても筋力が強いほうがキャップ握り力も強くなると考えられるが、前述した痛感によって握ることを抑制したため、相関が得られなかったと考えられる。

3. 開栓トルクとキャップの握り力

3.1 開栓トルクとキャップ握り力の関係 開栓時のトルクとキャップ握り力を測定するため、キャップ握り力測定ジグを手動開栓トルク測定器(日本電産シンボ社製 TNK-50 B-1)に設置し、開栓トルク測定と同時にキャップ握り力を測定した。

女性被験者で $\phi 38$ 口径ジグ、図2(a)の握り方にて測定したキャップ握り力と開栓トルクの関係の典型的な一例を図5に示す。図5より開栓トルク T_r の増加とともにキャップ握り力 F_g も大きくなり、開栓トル

クを弱めるとキャップ握り力も小さくなっていることがわかった。このようにアルミボトルのキャップを開栓する場合、消費者はキャップに開栓トルクを加えるとともに、握っている指が滑らないようにキャップ握り力を強めるよう調整していると考えられる。したがって、消費者は開栓トルクが高い場合では、ねじる力が大きいだけでなく握る力も大きくなると考えられる。

3.2 口径の影響 口径が開栓トルクとキャップ握り力の関係に与える影響を確認するため、女性被験者4名にて $\phi 28$, $\phi 33$, $\phi 38$, $\phi 43$ 口径のアタッチメントを用いて図2(a)の握り方で、それぞれ3回の測定を行った。各計測結果として得られた最大トルクと最大トルク発生時のキャップ握り力の平均値を図6に示す。図6より、口径が小さいほど被験者が負荷できるトルクは小さくなり、キャップ握り力は $\phi 33$ 口径以下の検討範囲内で小さくなることがわかった。このキャップ握り力は図4で示した、ねじらずに握るだけの傾向と同様であった。今回の計測に用いた各口径アタッチメントには滑り止めとなる凹凸を付けていないため、滑りやすい状態で被験者が負荷できるトルクを

Fig. 5 Chart of grip force and torque

Fig. 6 Relation between grip force, torque and rim diameter

得ており、摩擦が最も少ない状態で得られるトルクである。この結果を考慮すると開栓トルクの目標値は測定された最大トルクのばらつきの最小値以下にすべきと考えられる。 $\phi 28$, $\phi 33$, $\phi 38$, $\phi 43$ 口径の最小値はそれぞれ 40.8, 54.0, 61.6, 57.2 N・cm であるが、これらの値は非常に小さく、目標とするには他の課題(密封性など⁽⁵⁾)が問題となる。そこで、力の弱い女性を被験者とし、滑り止めとなる凹凸のない状態での各口径の最大トルク値以下(図6)にすることが現実的な目標になると考えられる。

開栓時にキャップが回転を始めるときのトルク T_r の釣合いは $T_r = D \cdot \mu \cdot F_g$ で示される。ここで、 D は口径、 F_t はトルク負荷時の接線力、 μ は指とキャップの見掛けの摩擦係数、 F_g はキャップ握り力である。この式における右辺が左辺より大きい場合は滑らずに開栓でき、その逆の場合は滑って開栓できないことを示している。消費者はこの滑りを回避するため、図5に示すようにキャップ握り力 F_g を調整することになる。上式と本実験結果を用いて、口径ごとに算出した摩擦係数 μ を表3に示す。この結果より、口径が小さいほど必要となる摩擦係数は大きくなる傾向を示すことがわかった。これは、口径が小さいと作用半径が小さくなるため負荷できるトルクは小さくなるが、その影響以上に力の入りやすさの影響を受けて、負荷できるキャップ握り力も小さくなるため、大きな摩擦係数が必要になるためである。

このことから、開栓トルクが図6に示す値であれば、消費者が負荷できるトルクと力の入りやすさを考慮すると、口径が大きいほど官能的に開栓しやすいと考えられる。開栓トルクが高い場合には、摩擦係数 μ を大きくするか、キャップ握り力 F_g を大きくする必要がある。しかし、力の弱い女性、高齢者、子供などでは本検討結果以上の握り力を負荷することは期待できない。そこで、摩擦を大きくすることが必要となり、2章での検討結果からキャップを握る力に痛感が影響を与えるため、凹凸形状と痛感の関係を考慮することが重要となる。

Table 3 Friction coefficient

Rim diameter (mm)	Friction coefficient
28	0.902
33	0.867
38	0.865
43	0.818

4. キャップの凹凸形状と痛感

3章までに口径がキャップ握り力に与える影響を確認した。キャップ握り力が大きい場合には痛感を覚えやすくなり、アルミボトルを開栓しにくいと感じる可能性がある。この痛感には加える力の大きさだけでなく、キャップに成形されているナールと称する凹凸形状の影響があると考えられるため、人の指と凹凸形状による滑りやすさと痛さの関係を検討した。

4・1 凹凸形状による官能試験 凹凸形状が滑りやすさと痛感にどのような影響があるかを確認するため、30名の女性被験者に5種類の凹凸形状を付けた平面試験片を握ってもらい、握ったときの痛さと握った状態での滑りやすさに順位付けを行う官能試験を行った。今回用いた試験片は縦30mm、横50mm、高さ20mmの樹脂製立方体の縦横平面に図7および表4に示す凹凸形状を施したものとした。表4の5種類の形状は市販飲料容器に用いられる樹脂製やアルミニウ

Table 4 Dimensions of knurled test piece

Test piece No.	Radius R_a (mm)	Pitch p (mm)	Depth d (mm)	Angle A_1, A_2 (deg)
1	0.5	2.5	0.84	45
2	0.2	2.5	1.08	45
3	0.5	2.5	0.42	45
4	0.5	5.0	1.04	45
5	0.2	1.25	0.68	30

Fig. 7 Surface shape of test pieces

Fig. 8 Experimental results of semantic differential method

ム製キャップの一般的なナール部の凹凸を模擬している。この試験では、男性より痛感のしきい値が低いとされる女性のみを被験者とし、握り方も実際のキャップを握ったときとほぼ同位置(食指の拇指側側面)が試験片の凹凸に接触するようにして評価させた。

官能試験結果から得られた痛さと滑りやすさの順位にそれぞれ点数付け(1位に2点, 2位に1点, 3位に0点, 4位に-1点, 5位に-2点)を行った。評価結果を図8に示す。図8では点数の小さいほうが痛く, 滑る表記としている。官能的に最も痛くないと感じられたのはNo.5形状であり, 痛いと感じられたのはNo.2もしくはNo.4であった。また, 滑りにくく感じられた形状はNo.2であり, 滑りやすいと感じられたのはNo.3もしくはNo.4であった。本来, キャップを開栓しやすくするためには, 図8における第1象限の右上が好ましい。今回試験した一般的な市販キャップのナール部を模擬した形状には, 痛さと滑りやすさの両方に優れた形状はなく, この両者は相反する特性になっていると考えられる。そこで, これら形状諸元の影響度を確認するため, 表5にそれぞれの Pearson 相関係数を示す。表中の相関係数として太字斜体で表記した数値は被験者の標本数で5%の有意性検定を行い, 相関ありと判定(検定値0.161)されるものであり, 痛み, 滑りやすさについては数値が大きいくほどそれぞれ痛くない, 滑らないことを示している。痛みについては形状的に深さ d , 角度 A , ピッチ p に強い相関が認められ, 指が凹凸形状に食込む量が増加すると指の痛点を刺激しやすくなるため, 痛みを感じやすくなると考えられる。また, 滑りやすさについては, ピッチ以外で相関が認められるが, 相関は弱い。傾向的には, 指に引っ掛かる個数よりも形状的な一山当たりの引っ掛かり抵抗が影響するといえる。

したがって, キャップを握る場合の痛感性や滑り性には凹凸形状の影響があることが明確となり, 凹凸形状の適正化によって開栓するときの不快感や痛みを低減できる可能性のあることがわかった。

5. 痛感性, 滑り性の解析的検討

人の触覚に関する研究は認知科学として種々の検討

Table 5 Pearson's correlation procession

	Pain	Slip
Radius R_a	-0.003	-0.291
Pitch p	-0.584	-0.067
Depth d	-0.744	0.289
Angle A	-0.733	0.264

がなされてきており, 指部の解析的検討もロボット工学などの分野で行われている⁽¹¹⁾。また, 指部の力学的特性を把握するために解析的な研究⁽¹²⁾なども行われているが, 痛感との関係を検討した研究は見受けられない。そこで, 以下に示す手法にて指部の痛感性や滑り性の解析的な検討を行った。

5・1 解析モデル 痛感を解析的に検討するには指の構造を理解する必要がある。指は表層から表皮, 真皮, 皮下組織, 指骨で構成され, 表皮はさらに表層から角質層, 顆粒層, 有棘層, 基底層がある。指内には各種刺激の受容体として, 機械的刺激を受容するメルケル細胞, 振動や軽い接触を受容するマイスナー小体, 大きな圧力や早い振動を受容するパチニ小体, 変化の遅い機械的刺激を受容するルフィニ終末, 温感覚や痛覚を受容する自由神経終末が内在していることが知られている⁽¹²⁾。

本解析では凹凸形状と痛感および滑り性に関する定性的な方向性を確認することを目的に簡略化したモデル構成とした。詳細な検討をするには三次元解析が必要であるが, 指の機械的材料特性に異質性がないと仮定すれば計算コストを考慮して図9に示す平面ひずみ状態にモデル化できると考えた。このモデルでは指部を弾性体, 凹凸形状部を剛体とした。指部の有限要素分割は, キャップを握ったときの接触長さが約30 mmであること, 表皮と真皮部に存在する自由神経終末の変形を再現できるように人の痛点数(約200個/cm²)を参考⁽¹³⁾として, 幅方向に428分割した(モデル幅は29.96 mm)。皮下組織は変形が小さいため幅方向に107分割した。要素分割数は, 表皮で2140個, 真皮で3424個, 皮下組織で1712個とした。一般的な解析では凹凸のある剛体接触部で発生する応力やひずみで評価を行うが, 本解析では痛覚を受容す

Fig. 9 Numerical analysis model

る自由神経終末の存在する表皮(角質層厚さを0.2 mmとして除く)と真皮部の応力状態で評価することを特徴とし、表皮、真皮、皮下組織、指骨にそれぞれの機械的特性を与えた。それぞれの特性値は著者らが指の圧縮試験から得た弾性体としての特性値⁽¹⁴⁾と前野らの研究⁽¹²⁾で人新鮮死体から得た表皮、真皮、皮下組織の弾性率比を用いて表6に示す値とした。また、解析では摩擦をクーロン摩擦とし、静摩擦係数0.735、動摩擦係数0.70⁽¹⁵⁾とした。解析にははん用有限要素コードMSC-MARCを用い、指の厚さ方向の変位を同一化した皮下組織の上部から分布荷重を負荷した後、凹凸形状のある剛体を凹凸の1ピッチ分移動させる解析を行った。

5・2 解析の妥当性検討 解析手法や評価方法の妥当性を確認するため、まず4章の検討において痛感で大きく差異(図8)のあったNo.4とNo.5形状および凹凸のない平坦形状について解析を行った。皮下組織上部からの分布荷重はNo.4形状において、実際の指の食込み量がほぼ同等となる負荷(2.9 MPa)とした。各形状モデルにおいて1ピッチ分移動させるときに凹凸形状を付与した剛体を受ける滑り抵抗力を図10に示す。図10では横軸をピッチとし、縦軸には平坦形状の場合の滑り抵抗 F_f との比で表記している。図10より、No.4とNo.5モデルにおいて、両者の滑り抵抗が平坦形状の約7倍から8倍になっており、平坦形状より滑り抵抗の大きいことが再現できて

いる。さらに、両形状共に滑り抵抗力比の最大値はほぼ同様であり、図8に示す官能評価においてもNo.4とNo.5は滑り性がほぼ同等であることと合致している。

次に各形状での痛感を検討するため、図9に示す解析モデルにて指内の発生応力を確認した。応力分布の一例と形状諸元を図11に示す。この応力分布から凹凸形状に接触している指表層で応力が高く、隣接形状の影響を受けて表層より内部で応力が干渉する部位が存在していることがわかる。指表層の角質層には痛みを受容する自由神経終末がないため、接触部の最大応力では痛感を検討できない。そこで、自由神経終末の存在する表皮(角質層を除く)と真皮に発生する最大相当応力 σ_{max} を用い、境界条件の影響を受けないようにモデル幅の中心部1/3領域で評価した。最大相当応力とピッチの関係を図12に示す。図12では横軸に移動ピッチ、縦軸に平坦形状でのミーゼス最大相当応力 σ_f との比を表記している。図12より、No.4形状では平坦形状の約60倍、No.5形状では約26倍の応力となっている。このことは、凹凸形状があることによって、指の変形が大きくなり痛覚を感じやすくなることが再現できている。また、図8に示す官能評価においてもNo.4形状は痛いと感じるが、No.5形状は最も痛くないとする評価を受けていることと合致している。したがって、本解析は簡略化したモデルではある

Table 6 Mechanical properties of finger finite element model

	Young's modulus (MPa)	Poisson's ratio ⁽¹²⁾
Subcutaneous fat tissue	5.0	0.48
Dermis	12.5	0.48
Epidermis	20.0	0.48

Fig. 10 Force ratio-pitch curve

Fig. 11 Distribution of stress

Fig. 12 Stress ratio-pitch curve

Table 7 Dimensions and results of numerical models

Model	Radius R_a (mm)	Pitch p (mm)	Depth d (mm)	Angle A_1 (deg)	Angle A_2 (deg)	Deformation d_r (mm)	Force ratio F/F_f	Stress ratio σ_{max}/σ_f
M1	0.5	5.0	1.04	45	45	1.04	7.43	67.22
M2	0.2	1.25	0.68	30	30	0.19	8.46	27.18
M3	0.5	3.0	1.04	45	45	0.51	8.11	40.01
M4	0.5	7.0	1.04	45	45	1.04	9.81	66.16
M5	0.5	5.0	0.52	45	45	0.52	4.26	38.21
M6	0.2	1.25	0.39	30	60	0.18	6.00	23.37
M7	0.2	1.25	0.39	60	30	0.18	6.74	25.01
M8	0.5	1.25	0.48	30	30	0.14	3.16	16.04

Table 8 Pearson's correlation procession

	Deformation d_r (mm)	Force ratio F/F_f	Stress ratio σ_{max}/σ_f
Radius R_a	0.64	-0.12	0.54
Pitch p	0.93	0.38	0.90
Depth d	0.82	0.69	0.84
Angle A_1	0.33	0.24	0.36
Angle A_2	0.33	0.10	0.32

が、指肉の引っ掛かりで表現される滑り性と自由神経終末付近の変形からくる痛みを応力で評価したものが官能評価結果とほぼ一致し、解析モデルと評価方法は妥当であることが確認できた。

5.3 凹凸形状の影響 解析の妥当性が確認できたため、凹凸形状が滑り抵抗力や発生応力に与える影響を確認した。表7に対象とした解析モデルの凹凸形状諸元および解析から得られた指肉の食込み量 d_r 、滑り抵抗力比 F/F_f 、最大相当応力比 σ_{max}/σ_f を示す。表7のモデル形状は実際の飲料用キャップのナール部に採用できる形状を考慮し(成形性など)、さらに、凹凸の左右角度の影響を確認するための形状を選定した。解析モデル M1 と M2 は表3で示した実験モデル No. 4, No. 5 形状に相当している。表8にそれぞれの Pearson 相関係数を示す。表中の相関係数として太字斜体で表記した数値は解析値から5%の有意性検定を行い、相関ありと判定(検定値 0.69)されるものである。この結果より、指肉の食込み量 d_r と応力比 σ_{max}/σ_f にはピッチと深さが大きく影響し、滑り抵抗力比 F/F_f には凹凸深さの影響することがわかった。発生応力は凹凸のピッチが小さいと指肉が凹凸に食込む変形が小さくなるため発生応力も小さく、結果的に自由神経終末の刺激が少なく、痛感は少なくなると考えられる。指の滑り抵抗は凹凸の深いほうが指の食込み量が大きくなることによって見掛けの滑り抵抗が大きくなると考えられる。

一般的に指の痛感には形状の鋭さが大きく影響すると考えられるが、本研究結果では凹凸形状の先端半径

R_a よりも凹凸のピッチ p や深さ d による指の変形の影響が大きいことがわかった。指の痛感を少なくするためには凹凸形状のピッチを小さくすることが好ましく、ピッチを小さくできない場合には凹凸深さを浅くすることが効果的である。また、指の滑り抵抗を大きくするには凹凸を深くすることが効果的であるが、凹凸深さを深くすると指の発生応力も高くなり痛感が大きくなるため、この両者の適正化が重要であることがわかった。凹凸形状と痛感性および滑り性については、官能評価で得られた結果(表5)と解析結果(表8)では相関の強さが多少異なる結果となったが、官能評価結果としての痛さや滑りやすさの順位、影響度が大きいと考えられる凹凸のピッチと深さについては本解析と同様な結果が得られているので、設計改善のために示唆される方向性は十分に信頼できる。なお、詳細な形状効果は多変量解析手法などを用いることによって明確になる可能性があるが、今後の課題とする。

6. 結 言

本研究では飲料用アルミボトルの開栓しやすさを検討するため、開栓しやすさに及ぼす主要因を①キャップの握り力、②キャップの開栓トルク、③指とキャップの滑り性の三つと考えた。これらの要因を確認するため、開栓時のキャップの握り方、口径・手の大きさ・開栓トルクとキャップ握り力の関係、キャップの凹凸形状と痛感・滑り性について検討を行い、以下の知見を得た。

人間工学的視点からアルミボトルの開栓性を良好にするには、口径によって力の入りやすさ・負荷できるトルクが異なるため、口径ごとの適正開栓トルク以下に開栓トルクを設計・設定することが重要である。実際の開栓トルクが女性(力の弱い)の負荷できる最大のトルクと同等と仮定した場合、口径と最大握り力(力の入りやすさ)との関係から、口径が大きいほど開栓しやすくなることが明確となった。実際の開栓トルク

が女性の負荷できる最大トルクより大きい場合、開栓はしづらくなる。開栓トルクが大きい場合や開栓トルク低減以外で効果的に開栓しやすくするためには、キャップ握り時の指痛感を低減させるために凹凸形状のピッチを小さく、深さを浅くすること、指の滑りを抑制するために凹凸形状の深さを深くすることが有効であることが明確となった。ただし、凹凸形状の深さは、痛感を低減することと滑りを抑制することに対して相反する特性となるため、両者の設計的な適正化が今後の課題となる。

文 献

- (1) Nishiyama, S., Development and Future Subjects of Aluminum Beverage Cans (in Japanese), *Packpia*, Vol. 45, No. 2 (2001), pp. 10-15.
- (2) Itou, T., Tsujimoto, K. and Ohkoshi, T., Development and Commercialization of Resealable Aluminum Beverage Containers, *The Journal of Japan Institute of Light Metals*, Vol. 52, No. 2 (2002), pp. 82-87.
- (3) Ohashi, I., Tamura, S. and Matsumasa, H., Development of "DAKARA" Aluminum Bottle Can, *Japan Packaging Institute Journal*, Vol. 38, No. 9 (2000), pp. 868-875.
- (4) Itoh, R., Aluminum Bottles Born from the Aluminum Can Technology in Responding to the 21st Century Market Needs (in Japanese), *Packpia*, Vol. 47, No. 6 (2003), pp. 16-19.
- (5) Itoh, R., Yamazaki, K., Nishiyama, S., Han, J. and Hanabusa, Y., A Study on the Opening Characteristic of an Aluminum Bottle and Effects of the Dimensions of the Bottle, *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series C*, Vol. 73, No. 729 (2007), pp. 280-287.
- (6) Yamazaki, K., Chihara, T., Itoh, R. and Yamada, M., A Study on Evaluation Method of Drinking Ease for Aluminum Bottle Cans, *Proceedings of the 16th Design & System Conference of the Japan Society of Mechanical Engineers*, No. 06-33 (2006), pp. 29-32.
- (7) Sheik, N. I. and Chong, H. L., Modelling Wrist-twisting Strength of Elderly, *Ergonomics*, Vol. 31, No. 12 (1988), pp. 1807-1819.
- (8) Hidaka, M., Tanaka, Y. and Watanabe, A., Time Course of Removal Torque of Cap in Child Resistant Package, *Journal of the Nippon Hospital Pharmacists Association*, Vol. 21, No. 2 (1995), pp. 124-130.
- (9) Endo, A. and Sawashima, H., Design of Bottle Cap Based on Ergonomic Standpoint of Measurement, *Japan Packaging Institute Journal*, Vol. 44, No. 3 (2006), pp. 212-218.
- (10) Bernnum, J., Kjeldsen, M., Jensen, K. and Staehelin Jensen, T., Measurements of Human Pressure-pain Thresholds on Fingers and Toes, *Pain*, Vol. 38 (1989), pp. 211-217.
- (11) Murakami, K. and Hasegawa, T., Novel Fingertip Equipped with Soft Skin and Hard Nail for Dexterous Multi-fingered Robotic Manipulation, *Journal of the Robotics of Japan*, Vol. 22, No. 5 (2004), pp. 616-624.
- (12) Maeno, T., Kobayashi, K. and Yamazaki, N., Relationship between Structure of Finger Tissue and Location of Tactile Receptors, *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series C*, Vol. 63, No. 607 (1997), pp. 881-888.
- (13) Oshima, M., *Encyclopedia of Ergonomics* (in Japanese), (2005), p. 24, Maruzen.
- (14) Han, J., Nishiyama, S., Itoh, R., Shinguryo, T. and Yamazaki, K., Design of New Aluminum Easy Open End with Improved Finger Access, *Proceedings of the Mechanical Engineering Congress*, No. 05-1 (2005-9), pp. 31-32.
- (15) Yamaba, K., Kono, H. and Ozaki, S., Physical Characteristics of a Human Finger (in Japanese), *Journal of the Society of Biomechanisms*, No. 3 (1975), pp. 27-36.