開缶時の指掛かり性を考慮した
飲料用アルミ缶蓋の設計*韓 晶^{*1}, 西山 貞雄^{*2}
山崎 光悦^{*3}, 伊藤 隆一^{*1}Designs of Aluminum Beverage Can Ends Considering
the Finger Accessibility When Opening CansJing HAN^{*4}, Sadao NISHIYAMA,
Koetsu YAMAZAKI and Ryoichi ITO^{*4} Technology and Development Department., Universal Can Corporation,
1500 Suganuma, Oyama-cho, Sunto-gun, Shizuoka, 410-1392 Japan

This paper introduced the finite element analyses into ergonomics designs of aluminum beverage can ends to evaluate perception of pressure applied to the human fingertip numerically and objectively. At first, experiments of indenting vertically the fingertip pulp by a probe and the tab of the can ends have been done to observe force responses and to experience feelings in the fingertip. It is found that a typical force-displacement curve can be divided into three parts according to the curve gradient. We feel a touch at the first part of the force-displacement curve, and then feel pressure and our pulse at the second part, finally feel discomfort followed by pain at the last part. The finite element analyses have been performed to simulate the tab indenting the fingertip vertically for developing the finite element model of the fingertip. It is confirmed that the simulation results agree well with the experimental observations. Moreover, a simulation of finger lifting the tab of the can end has also been performed, and discomfort in the fingertip has been evaluated numerically to present the finger accessibility of the tab. Finally, the finger accessibility comparison of two kinds of tab ring shape designs showed that the finger accessibility of the tab that may have a larger contact area with the finger is better.

Key Words: Design Engineering, Human Engineering, Numerical Analyses, Finger Accessibilities of Beverage Can Ends, Perception of Pressure Applied to Fingertip, Numerical Evaluation of Perception

1. 緒 言

飲料用アルミ容器の性能向上や生産性向上, リサイクル性向上等のために, 構造最適化手法を用いた飲料用アルミ缶およびボトルの形状寸法最適設計が行われている^{(1)~(3)}. 最適化手法の応用が盛んになってきているが, 人間と接する製品の最適設計には, 性能や生産性だけでなく, ‘人間’の因子も考慮する必要がある. 身体, 生理, 心理を考慮する人間工学⁽⁴⁾の手法を利用したユニバーサルデザイン⁽⁵⁾を考える時代になっており, 人に優しくて使いやすく, 使ったら楽しくなるような包装容器の開発が望まれている.

飲料缶蓋のタブ散乱防止のため, 図1に示すような Stay-on-Tab(SOT)蓋が採用されてからすでに十数年間が過ぎ, SOT 蓋を付けた飲料缶の開缶性など, 機

能性に関する課題は数多く解決されてきた⁽⁶⁾. その一方で, 人間生活の質が追求される現在では, 開缶時の「指掛かり性」(開缶する際の指によるタブ引上げの難易)など人間工学的設計が重視されるようになっていく. SOT 飲料缶では, 容器からははずれないタブによって開缶されるが, 痛感を伴って「開けにくい」という苦情が潜在的にあり, バリアフリー, ユニバーサルデザインを意識した改善が求められている. したがって, 指の構造や特性を理解したうえで, 「開けやすさ」, すなわち「指掛かり性」を改善することが, SOT 缶蓋のタブの設計では必要である.

アルミ缶を開缶する際, 指をタブの指掛かり部と缶蓋のパネルのすきま SBTP(Space Between Tab and Panel)に入れてタブを引上げるが, 指が SBTP に入りやすく, タブを引上げるときに指の不快感や痛みが少ないほど, 指掛かり性が良いと評価されている. SOT 缶蓋は開缶時にタブを持上げやすくするために, SBTP をより広くする方法やタブの強度をより弱くする方法が採用されているが, いずれの方法も限界がある. したがって, タブ指掛かり部の幾何形状が指掛かり性に与える影響の検討も必要である.

* 原稿受付 2007 年 1 月 31 日.

^{*1} 正員, ユニバーサル製缶(株)技術・開発本部(〒410-1392 静岡県駿東郡小山町菅沼 1500).^{*2} ユニバーサル製缶(株).^{*3} 正員, フェロー, 金沢大学大学院自然科学研究科(〒920-1192 金沢市角間町).

E-mail: yamazaki@t.kanazawa-u.ac.jp

開缶時や缶胴を握るときの指の感覚は皮膚感覚の一つである。皮膚で感じる生理的な仕組みとしては、皮膚にある感覚受容器が外からの刺激を受け、感覚神経を通して、中枢神経系で処理されるとさまざまな感覚を引き起こすと考えられている⁽⁷⁾⁽⁸⁾。感覚受容器は3種類あり、機械受容器で触覚および圧覚を受容するが、温度受容器と侵害受容器が刺激されるときだけ、温度と痛感を感じる。指先の特性を解明するための実験や数値解析が以前から行われ、指の構造と触覚の関係を検討した研究がある^{(9)~(12)}。また、感覚受容器の密度に関する実験や手の痛点しきい値 PPT (Pain-Pressure Threshold) の測定実験がいくつかの文献で紹介されており^{(13)~(16)}、その測定結果より、女性の痛感しきい値は男性より約 30~70% 低いことがわかった。さらに、圧子の形状も感覚に影響があると報告されている⁽¹⁷⁾。しかし、指先に荷重を負荷したときの指の不快感や痛感と荷重変位曲線の関係などを検討した研究は見当たらない。

人間工学的設計の課題の一つは感覚評価法の開発である。人間工学的設計には、主観的評価法と客観的評価法がある。SD (Semantic differential method) 法で代表される質問紙調査、すなわち、アンケート調査が主観的評価法である。客観的評価法は客観的な指標、例えば、製品使用時の使用者の心電、脳電、筋電等生理指標を用いる評価法である。一方、製品試作前の設計段階での感覚の評価法として、有限要素法を利用した数値解析により得られた工学指標と関連させる方法が提案され、指に優しいホット販売用アルミ飲料ボトルの缶蓋の形状設計開発に用いた⁽¹⁸⁾。しかし、飲料缶 SOT 蓋のタブを引上げて開缶するときのように、指の不快感や痛感を数値的に評価するような研究は見当たらない。

そこで本研究では、圧縮試験機を利用して球頭ピンをヒト指先の腹に押込む実験を行い、指先の変形挙動や感覚との関係等を測定・観察する。また、実際のア

ルミ飲料缶蓋のタブによる指先への押込み実験と有限要素解析ソフトを用いた数値シミュレーションを行い、実験結果とシミュレーション結果を比較し、不快感を評価するためのヒト指の有限要素モデルの有効性を確認する。さらに、指がタブを缶蓋から引上げる際の変形シミュレーションを実施し、指の不快感や痛感を力学指標と関連させ、指掛かり性を数値的に評価する方法を提案する。さらに、提案した評価方法を用いて、指掛かり性の良いタブの形状を検討した結果についても示す。

2. 圧力を受けたヒト指先の感覚

圧力を受けたときの指先の変形特性や指先の感覚と荷重の関係を考察するために、瞬間的な (0.05 s 間隔) 荷重と変位の時間変化を記録ができる圧縮試験機を利用し、球頭ピンによる指先への押込み実験を実施した。図 2(a) に示すように、指を試験台に静置し、指先先端から付け根に向けて距離 L のところの指腹中心にピンを一定速度で押込む。ケガを避けるために、事前に移動距離上限 (押込み量上限) $H_{\max}$ あるいは押込み荷重上限 $P_{\max}$ を設定した。実験前に、安全のため電子てんびんなどを利用して、各被験者が極限痛感を感じるときの押込み力と指の変形量を記録する予察実験も実施し、 $P_{\max}$ と $H_{\max}$ 設定の参考とした。 $H_{\max}$ あるいは $P_{\max}$ に到達したら、ピンの移動を 60 秒停止させた後に除荷した。

半径 $R=1.84$ mm の球頭ピン [図 2(b)] が速度 $v=1$ mm/min で指腹 ($L=8$ mm) の中心に押込んだときの荷重と時間の関係曲線、荷重と変位の関係曲線の一例を図 3 に示す。図 3(a) の荷重と時間の関係曲線より、押込み量の上限 $H_{\max}$ あるいは押込み荷重の上限 $P_{\max}$ まで荷重負荷した後、ピン押込み量 H を 60 秒間一定に保持すると、指腹の変形量は一定であるが、荷重は時間の経過とともに徐々に減少していきことがわかった。これは指腹部に応力緩和特性、いわゆる粘弾性特性があるためと考えられる。

図 3(b) の負荷荷重と指腹の押込み量の関係曲線は、図 3(c) に示すように段 1、段 2 と段 3 のこう配が異なる 3 段で近似できる。また、上横軸は指残り厚さ $T_f = T_0 - H$ である (T_0 は指腹中心の初期厚さ)。図 3(c) より、指腹に圧力を負荷すると、段 1 では、指腹の変形深さがほぼ線形に増加し、段 2 では、変形量の増加率が減少し、さらに段 3 では、変形量が再びほぼ線形に増加するが、その増加率が大幅に減少することが明らかになった。その原因は、軟組織の変形量が極限に近づくと、さらなる変形に必要な荷重が大きくな

Fig. 1 A Stay-on-Tab can end

(a) Indenting fingertip

(b) Hemisphere probe

(c) Tab of can ends

Fig. 2 Experimental setup of indenting fingertip

(a) Relationship between indenting time and load

(b) Relationship between indenting depth and load

(c) Diagram of feelings in fingertip

Fig. 3 Experimental observations of indenting fingertip

(a) Relationship between indenting time and load

(b) Relationship between indenting depth and load

Fig. 4 Observations of individual differences

り、変形の増加率は低くなるためと考えられる。

個人差を考察するために、年齢、性別が異なる3人の被験者、被験者 HS 1 (Human Subject 1, 30代女性)、HS 2 (30代男性) と HS 3 (50代男性) の指先への押込み実験結果を代表として図4に比較して示す。ピンの押込み速度は $v=1$ mm/min, 4 mm/min の場合である。実験結果より、年齢や性別が異なる被験者は指先の寸法に個人差があるが、荷重の指の変形関係曲

線の段3のこう配には有意な差がないことが判明した。この実験結果は文献(9)の実験結果と同様の傾向を示すことが確認できた。

また、図4より、ピンの押込み速度が小さいほど押込み時間が長くなり、指の深層組織の応力緩和特性により抵抗力が小さくなるため、変形-荷重関係曲線の段2の立上りがやや遅くなることがわかった。しかし、速度が変わっても変形-荷重関係曲線の段3のこう配に変化は見られなかった。

指腹に荷重を負荷したときの感覚に関しては、図3(c)の感覚関係図に示すように、どの被験者も共通して変位曲線の段1では指に接触しているものを感じ、段2では圧迫または脈拍を感じ、段3では不快感や痛みを感じる。荷重が高いほど、あるいは指厚さが薄いほど、不快感や痛感が高くなる。総荷重値が一定のときは、接触面積が小さいほど、変形が大きく指先が薄くなり、圧力が増加して痛感が高まる。後述するタブの指掛かり性解析では、開缶時の指の不快感や痛感だけに注目したいので、感覚関係図の段3だけが必要である。したがって、指を一定のヤング率をもつ弾性モデルにモデル化することができると判断した。

3. タブによる指先への押込み実験と数値シミュレーション

後述するタブの指掛かり性解析のためのヒト指先の有限要素モデルを構築するために、SOT缶の現行タブによる指先への押込み実験と数値シミュレーションを実施し、両者の結果を比較した。

実際のSOT缶を開缶するときは、指をSBTPに入れ、タブを引上げる。SBTPが狭いので、指腹の押込み位置を指先から $L=2\text{ mm}$ の場合について、またタブ指掛かり部のリングの形状を現行形状の凸円弧状

Fig. 5 Comparison between simulation results and experimental ones

[図2(c)]について、指先に垂直に押込む実験を実施した。タブを円筒状樹脂に埋め込んで実験に供した。実験装置と実験方法は、前述した球頭ピンによる指腹を押込む実験と同様である。押込み速度 $v=2\text{ mm/min}$ とするときの実験結果を一例として図5に示した。

指の末梢部の構造⁽¹⁹⁾ [図6(a)]を指骨と軟組織の二つの物性値をもつソリッドに単純化し、8節点六面体ソリッド要素で要素分割した。指モデルの中心縦断面図と横断面図を図6(b)に、三次元モデル全体を図6(c)にそれぞれ示す。軟組織と指骨の物性値をそれぞれヤング率 $E=5\text{ MPa}$, 17 GPa 、ポアソン比 $\nu=0.45$, 0.30 とした。タブを剛体壁と仮定し解析に用いた。図7に示すように、指先から $L=2\text{ mm}$ の位置にタブを垂直に押込む過程を有限要素解析ソフトMSC Marcを用いてシミュレーションを行い、図5に押込

Fig. 6 Model of distal part of human finger

Fig. 7 Analysis model of indenting finger by a tab

Fig. 8 Procedures for opening SOT ends⁽²⁰⁾

Fig. 9 Mechanism of a SOT end

Fig. 10 Various postures for opening ends⁽²¹⁾

Fig. 11 Model of finger accessibility

み実験結果と比較した。上横軸は数値解析により得られた押込み量を表示し、下横軸は実験で測定した押込み量を表示した。解析結果と実験結果を比較すると、解析により得られた荷重-変位関係曲線と実験より得られた曲線は、押込みの後半がぴったり一致することがわかった。したがって、これらの結果より、不快感や痛感を評価するためのモデルとして、指先の有限要素モデルの有効性を確認できた。

4. 指掛かり性の良いタブ形状の検討

4・1 開缶挙動の説明 20年前にSOT缶蓋の発明者が作ったパンフレット⁽²⁰⁾によれば、開缶方法は図8に示すように4ステップからなる。つまり、(1)拇指でタブのノーズ部を押し、示指でタブを引上げる。(2)しっかりとタブを引き起こして、口を開け

る。(3)口が開いたら、タブを元の位置に戻す。(4)タブは缶に残す。指掛かり性はステップ1のタブをちょっとだけ引上げるときの難易度を評価する。開缶ステップ2での難易度を蓋の開缶性で通常、評価する。

図9に示すように、タブの指掛かり部を引上げると、ノーズ先端部がパネルを押し、そこが支点となつてリベットが持ち上げられ、この力によりスコアは破断し、飲み口が開けられる。

実際には消費者は爪が長い、あるいは好みで図10のようなさまざまな指姿勢で開缶するが⁽²¹⁾、タブの指掛かり部およびそれと接触する指先は共通点であり、注目すべきである。指掛かり性が良い姿勢での開缶挙動をビデオカメラで撮り、タブ形状の指掛かり性を向上させるための検討の参考とした。図11に示すように、開缶ステップ1の挙動は3段階に分解できる。

Fig. 12 Analysis model of finger accessibility of tab

(a) Model 1

(b) Model 2

Fig. 13 Finite element models of tabs

(1) タブのノーズ部を押す [図 11(a)], 押すことにより, 中央のリベット部が支点となり, 指掛かり部が少々上がるので, 指がより入りやすくなる。また, タブのノーズ部を押すことにより, タブ指掛かり部の動きも抑制できるので, タブが指の形状に沿って下へ滑り逃げることを避けられ, 指を SBTP に入れることができる。(2) 指先を SBTP に入れる [図 11(b)], 206 缶蓋(外径約 60 mm)のタブの指掛かり部と巻き締め壁端面の缶軸方向での距離および半径方向での距離を用いて計算すると, 指の初期傾斜角度は缶軸方向と約 60° になることがわかった。また, SBTP の初期値は約 2 mm である。(3) 指先でタブを引上げる [図 11(c)], タブ外縁の剛性がより高く, 変形しないので, 指掛かり部の変位は剛体回転運動であり, 回転中心はタブのノーズ部である。

4.2 タブの指掛かり性解析モデル 上述の開缶ステップ 1 での挙動の有限要素解析モデルを図 12 に示す。タブ・ノーズ部を押すシミュレーションを省略し, タブのリベット周辺の節点を完全拘束した。指先モデルの初期傾斜角度は 60° , タブモデルとの缶軸方向での相対距離は 2 mm とした。指先モデルの下端エッジ節点群に強制変位を与えて, 指でタブを持上げる動作のシミュレーションを実施した。荷重履歴としては, 節点群が前方へ約 0.5 mm 進行してから, 前方へ移動しながら上方へ移動する回転に相当する強制変位を与えた。

アルミ製タブを 4 節点シェル要素で分割し, 肉厚は 0.330 mm と設定した。タブの材料定数としてヤング率 $E=70$ GPa, ポアソン比 $\nu=0.33$, 初期降伏応力 $\sigma=260$ MPa とし, 実験から得た応力-ひずみ関係を与えた。

指の不快感・痛みを指がタブを引上げるときの接触垂直応力の最大値で評価し, 接触応力が小さいほど, 痛感が弱く, 指掛かり性が良いと判定することにした。

Fig. 14 Simulation result of lifting tab

4.3 タブ形状の指掛かり性への影響 タブの指掛かり部のリングの形状として, 凸円弧形状 [図 13(a), Model 1], と凹円弧形状 [図 13(b), Model 2] の二つの形状モデルを用いて指掛かり性解析を実施した。タブ Model 2 のリング形状は指腹形状と対応している。二つのタブモデルのリング中心点のタブ長手方向の長さ, およびリング部の断面形状は同じである。

タブを約 $H_1=2.5$ mm まで引上げると, 十分なタブ下すきまができ (図 14), タブを持直すことができる。したがって, タブの上昇量 $H_1=2.5$ mm 時の指先端の変形および接触応力の分布を図 15(a), (b) に示す。タブ Model 1 では指が凸円弧の中心周辺と接触し, 応力集中が発生している。また, タブモデルを $H_1=2.5$ mm まで引上げるとき, 指先端とタブの接触面積, 指の相当弾性ひずみの最大値, および指の接触応力の最大値を図 16 で比較する。図 16 より, 指でタブが持上げられるとき, 凹円弧状のタブ Model 2 において指腹部の接触面積はより広く, ひずみの最大値と接触応力の最大値がより低いことがわかった。タブとの接触面積が大きいと, 接触部全体が引上げ荷重を分担するので, 接触応力がより小さくなる。したがって, タブを引上げる場合, Model 2 のようにタブが指と接触する面積が大きいほど, 指の不快感や痛感がより弱いいため, 指掛かり性に優れていると判定できる。

Fig. 15 Contact normal stress distributions of finger models

Fig. 16 Comparison of two tab models

5. ま と め

球頭ピンによる指先への押込み実験を実施し、荷重-変位曲線より痛感の発生、進展を考察した。また、タブによる指先の押込み実験と数値シミュレーションを行って、タブ指掛かり性解析用の有限要素モデルの有効性を確認した。さらに、指でアルミ飲料缶のタブを引上げる挙動の数値シミュレーションを実施し、指の不快感や痛感を力学指標と関連させ、指掛かり性を数値的に評価し、具体的な二つのタブ形状の指掛かり性について検討した。その結果より、指と接触面積が大きい形状をもつタブの指掛かり性がより良いことがわかった。

文 献

- (1) Yamazaki, K. et al., Optimum Design of Aluminum Beverage Can Ends Using Structural Optimization Techniques, *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series A*, Vol. 72, No. 723 (2006), pp. 1662-1667.
- (2) Han, J. et al., Bottom Shape Optimization of Two-piece Aluminum Beverage Bottle by Multilevel Optimization Method, *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series A*, Vol. 71, No. 701 (2005), pp. 43-50.
- (3) Han, J. et al., Optimization of the Crushing Characteristics of Triangulated Aluminum Beverage Cans, *Structural and Multidisciplinary Optimization*, Vol. 28, No. 1 (2004), pp. 47-54.
- (4) Okubo, T. ed., *An Encyclopedia of Ergonomics*, (2005), pp. 2-46, Maruzen Co. Ltd.
- (5) Textbook for Universal Design, *Nikkei Design*, (2005).
- (6) Nishiyama, S., Development and Future Subjects of Aluminum Beverage Cans, *Packpia*, Vol. 2 (2001), pp. 10-15.
- (7) Mountcastle, V. B., Sensory Receptors and Neural Encoding: Introduction to Sensory Processes, *Medical physiology*, 14th ed., (1980), p. 327, The CV Mosby Co., St Louis.
- (8) Johansson, R. S. and Vallbo, A. B., Tactile Sensory Coding in the Glabrous Skin of the Human Hand, *Trends in Neurosciences*, Vol. 6 (1983), pp. 27-32.
- (9) Serina, E. R. et al., Force Response of the Fingertip Pulp to Repeated Compression—Effects of Loading Rate, Loading Angle and Anthropometry, *Journal of Biomechanics*, Vol. 30, No. 10 (1997), pp. 1035-1040.
- (10) Srinivasan, M. and Dandekar, K., An Investigation of the Mechanics of Tactile Sense Using Two-Dimensional Models of the Primate Fingertip, *Transactions of the American Society of Mechanical Engineers, Journal of Biomechanical Engineering*, Vol. 118 (1996), pp. 48-55.
- (11) Maeno, T. et al., 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.
- (12) Serina, E. R. et al., A Structural Model of the Forced Compression of the Fingertip Pulp, *Journal of Biomechanics*, Vol. 31 (1998), pp. 639-646.
- (13) Johansson, R. S. and Vallbo, A. B., Tactile Sensibility in the Human Hand: Relative and Absolute Densities of Four Types of Mechanoreceptive Units in Glabrous Skin, *The Journal of Physiology*, Vol. 286 (1979), pp. 283-300.
- (14) Fransson-Hall, C. and Kilbom, A., Sensitivity of the Hand to Surface Pressure, *Applied Ergonomics*, Vol. 24 (1993), pp. 181-189.
- (15) Johansson, L. et al., Perception of Surface Pressure Applied to the Hand, *Ergonomics*, Vol. 42, No. 10 (1999), pp. 1274-1282.
- (16) Brennum, J. et al., Measurements of Human Pressure-pain Threshold on Fingers and Toes, *Pain*, Vol. 38 (1989), pp. 211-217.
- (17) Goodwin, A. W. and Wheat, H. E., Magnitude Estimation of Contact Force When Objects with Different Shapes are Applied Passively to the Fingerpad,

- Somatosensory and Motor Research*, Vol. 19, No. 4 (1992), pp. 339-344.
- (18) Han, J. et al., Multi-Objective Optimization of a Two-Piece Aluminum Beverage Bottle Considering Tactile Sensation of Heat and Embossing Formability, *Structural and Multidisciplinary Optimization*, Vol. 32, No. 2 (2006), pp. 141-151.
- (19) Netter, H. F., *Atlas of Human Anatomy*, 3rd ed., Japanese Version, (2004), p. 454, Nankodo Co. Ltd.
- (20) Reynolds Aluminum Can Division, *Stay-on-Tab Pamphlet*, (1984), Reynolds Metals Company.
- (21) Han, J. et al., Questionnaire Results and Analyses on Ergonomics Designs of Beverage Containers, *Technical reports*, (2005, 2006), Universal Can Corporation.
-