This article is a technical report without peer review, and its polished and/or extended version may be published elsewhere.

第 26 回日本バーチャルリアリティ学会大会論文集（2021 年 9 月）

電気味覚による炭酸水に含まれる炭酸の変化に関する基礎検討

The Change of Carbonation Intensity in Carbonated Water by Electrical Stimulation on the Human Tongue

野村伊吹 1)，石岡光 2)，望月典樹 3)，中村壮亮 3)，小池崇文 4)
Ibuki NOMURA, Hikari ISHIOKA, Noriki MOCHIZUKI, Sousuke NAKAMURA, and Takafumi KOIKE

1) 法政大学 情報科学研究科（〒 184-8584 東京都小金井市梶野町 3-7-2, ibuki.nomura.3n@stu.hosei.ac.jp）
2) 法政大学 理工学研究科（〒 184-8584 東京都小金井市梶野町 3-7-2, hikari.ishioka.6d@stu.hosei.ac.jp）
3) 法政大学 理工学部（〒 184-8584 東京都小金井市梶野町 3-7-2, noriki.mochizuki.66, snakamura@hosei.ac.jp）
4) 法政大学 情報科学部（〒 184-8584 東京都小金井市梶野町 3-7-2, takafumi@hosei.ac.jp）

概要: 炭酸水を用いた電気味覚の実験において，炭酸水の炭酸の強さは具体的な数値で示す必要があり，本稿ではガスボリュームという単位を用いる．ガスボリュームは飲料に溶解している炭酸ガス量を表す単位であり，本稿では炭酸水の pH と温度を用いてガスボリュームを算出する方法を示した．また，舌の代わりに金属電極を用いた簡易実験装置を製作し，炭酸水に電気刺激を付加した際の，炭酸水のガスボリュームの値の変化を分析することで電気刺激による炭酸の強さの変化について検討する．これにより，炭酸水を飲む際に電気刺激を付加したとき，炭酸感が増強・抑制される機序について検討することができる．

キーワード： 電気味覚，炭酸，電気刺激

1. はじめに

炭酸飲料には，溶存炭酸ガスによる炭酸刺激が存在する．酸味や苦味といった基本味は舌表面の味細胞で受容するが，炭酸刺激は舌や口腔内に存在する三叉神経で受容し，脳に伝達する．我々は，電気味覚を用いて炭酸飲料を飲む際に感じる炭酸感を増強させる取り組みを行っている [1, 2]．電気味覚とは，舌部へ電気刺激を提示することで生じる味覚のことである．開封後の炭酸飲料に対して，電気刺激を付加し炭酸感を増強させることで時間経過によって失われる清涼感や爽快感を補完することができると考えられる．

我々の既存研究では，炭酸飲料に関する実験を行う際にソーダストリームを用いて炭酸水を生成し，ソーダストリームのプッシュ回数によって炭酸水の炭酸の強さを制御していた．しかし，ソーダストリームのプッシュ回数ではすべての実験において同じ炭酸の強さの炭酸水を作ることは困難である．そこで，実験ごとに炭酸水の炭酸の強さが変わらないよう，炭酸の強さを具体的な数値で示すことが必要である．炭酸の強さを示す単位として，ガスボリューム (以下，GV) がある．GV は，飲料中の炭酸ガスの含有量を示す単位であり，標準状態 (1 気圧，摂氏 20 度) において 1L の液体に 1L の炭酸ガスが溶けている場合を 1GV という．炭酸飲料を用いた実験において炭酸の強さが異なる試料を作成する場合，炭酸の強さの表現に GV を用いることでソーダストリームのプッシュ回数より細かく調節することができる．

本稿では，炭酸水の化学平衡について述べ，炭酸水の pH と温度から炭酸水の GV を算出する方法を提案する．また，電気刺激を付加した際の電極周辺の pH と水温を測定し，算出した GV の変化で，電気刺激提示前と提示中の炭酸の強さの変化に関して調査するため，人の代わりに金属電極を用いた簡易実験装置を製作する．本研究の学術的貢献は，炭酸水の pH と温度を測定することで GV を算出し，炭酸水の炭酸の強さを具体的な数値で示すことができたという点である．

2. 関連研究

2.1 電気味覚による味覚制御

味を感じる物質は味蕾と呼ばれる舌表面に存在する味覚受容体を活性化させ，味を伝える神経細胞を通して脳に電気信号が送られることで味を認識する．青山らは，5 種類の基本味 (酸味，塩味，苦味，甘味，うま味) を感じる電解質物質において電気刺激による味覚抑制効果を得られたことから，味覚抑制の機序として味を呈するイオンの電気泳動説を提唱した [3]．これは，電気刺激による電場の影響により，イオンが口腔内を泳動し，舌周辺のイオン濃度が変化することで味覚を制御できるという説である．

2.2 炭酸刺激の受容機序

駒井らは，炭酸水の溶存炭酸ガスが舌表面の上皮細胞に存在する炭酸脱水酵素の働きにより，水素イオンと炭酸水素イオンが生じて，刺激を受容するという説を提唱している [4]．また，辛味物質を受容する陽イオンチャネルの一つである TRPV1 は辛味成分のカプサイシンだけでなく，水素イオンのような酸によっても活性化され，ピリピリとし

© 2021 日本バーチャルリアリティ学会

た炭酸感を認識させている [5].

Chandrashekar らは，炭酸を口腔内にふくむと水素イオンが酸味を感じる味細胞を活性化させることで，酸味を感じることを提唱した [6].

2.3 電気味覚による炭酸感制御の伝達機序に関する仮説

我々は，炭酸刺激の受容機序と電気刺激によるイオンの電気泳動説に基づいて，電気味覚を用いた飲料の炭酸感制御の伝達機序に関する仮説設定を行った [7]．炭酸水を飲む際に，炭酸水に電気刺激を付加することで炭酸水中の水素イオンが電気泳動し，舌周辺の水素イオン濃度が変化することで炭酸感を制御できるという説を提唱した．

本稿では，水素イオン濃度の変化を調査するために pH を測定することで水素イオン濃度を算出した．さらに，炭酸水の炭酸の強さを数値で示すため，pH と温度から GV を算出し，炭酸水の炭酸の強さを示した．これにより，電気刺激による GV の変化によって我々の仮説について検討することができる．

3. GV の算出

本章では，まず，炭酸水の平衡状態について述べる．次に関連研究に基づいて，炭酸水の pH と温度から GV を算出する方法について述べる．そして，炭酸水の pH および温度と GV の関係ついて検討する．

3.1 炭酸水の平衡状態

まず，二酸化炭素は水に溶けると一部が炭酸となり，以下のような気液平衡の状態に達する．

$$\mathrm{CO_2 + H_2O \rightleftharpoons H_2CO_3} \tag{1}$$

このときの平衡定数 K_H は次式のように示される．

$$K_\mathrm{H} = \frac{[\mathrm{H_2CO_3}]}{p(\mathrm{CO_2})} \tag{2}$$

K_H は摂氏 25 度のときで，$K_\mathrm{H} = 4.0\times10^{-7}\,\mathrm{mol\,L^{-1}\,Pa^{-1}}$ [8] とする．

次に炭酸水中では，舌で炭酸を受容する際に炭酸脱水酵素によって以下の化学反応が起き，化学平衡の状態が保たれている [4].

$$\mathrm{H_2CO_3 \rightleftharpoons H^+ + HCO_3{}^-} \tag{3}$$

また，空気中では式 (4) 中の $[\mathrm{H^+}]$ と $[\mathrm{HCO_3{}^-}]$ はほぼ等しいことから，式 (4) での炭酸の第一次解離平衡定数 K_1 は次式で表される [9].

$$K_1 = \frac{[\mathrm{H^+}][\mathrm{HCO_3{}^-}]}{[\mathrm{H_2CO_3}]} = \frac{[\mathrm{H^+}]^2}{[\mathrm{H_2CO_3}]} \tag{4}$$

K_1 は淡水中では水温のみに依存しており，算出手法の一つに Harned と Davis の測定 [10] がある．Harned と Davis の測定では，pK_1 (K_1 の逆数の対数) と水温 T (絶対温度) の関係は次の通りである．

$$pK_1 = 3405/T + 0.0328\,T - 14.84 \tag{5}$$

3.2 GV の算出方法

これらの計算式をもとに，まず，測定した炭酸水の pH から二酸化炭素の分圧を算出する．

K_1 の逆数の対数が pK_1 なので K_1 は次式のように示される．

$$\begin{aligned} pK_1 &= -\log K_1 \\ K_1 &= 10^{-pK_1} \end{aligned} \tag{6}$$

式 (2)$[\mathrm{H_2CO_3}] = K_\mathrm{H} \times p(\mathrm{CO_2})$ を式 (4) に代入すると，

$$[\mathrm{H^+}] = \sqrt{K_\mathrm{H} K_1\, p(\mathrm{CO_2})} \tag{7}$$

が得られるので，式変形を行い式 (8) のようにする．pH を水素イオン濃度に変換した値，平衡定数 K_H，式 (5) と式 (6) で求めた炭酸の第一次解離平衡定数 K_1 を式 (8) に代入して二酸化炭素の分圧 [Pa] を求めることができる．

$$p(\mathrm{CO_2}) = \frac{[\mathrm{H^+}]^2}{K_\mathrm{H} K_1} \tag{8}$$

次に，二酸化炭素の分圧と温度から GV を算出する式はアサヒ飲料株式会社の公開特許公報 [11] から以下の式 (9) を用いる．式 (9) 中の GV は温度が摂氏 20 度のときの GV，p は二酸化炭素の分圧 [MPa]，t は温度 (摂氏) を示す．

$$\begin{aligned} \mathrm{GV}(p,t) = (1 + 9.866\,p)\times \\ (171300 - 7129\,t + 437.8\,t^2 \\ - 46.85\,t^3 + 3.187\,t^4 - 0.1042\,t^5 \\ + 0.001286\,t^6)\times 10^{-5} \end{aligned} \tag{9}$$

したがって，GV を求める算出式は温度 t (摂氏) と pH を用いて式 (10) のように示すことができる．また，式変形を行うことで GV と t から pH を算出することもできる．

$$\begin{aligned} \mathrm{GV} = \\ (1 + 2.4665\times 10^{-2\mathrm{pH} + \frac{3405}{t+273.15} + 0.0328(t+273.15) - 13.84}) \\ \times (171300 - 7129\,t + 437.8\,t^2 \\ - 46.85\,t^3 + 3.187\,t^4 - 0.1042\,t^5 \\ + 0.001286\,t^6)\times 10^{-5} \end{aligned} \tag{10}$$

3.3 結果

先に述べた計算式を用いて，炭酸水の pH と温度および GV の関係を表すグラフを図 1 と図 2 に示す．図 1 では横軸を pH，縦軸を GV としており，図 2 では横軸を GV，縦軸を pH としている．どちらの図も水温が摂氏 5 度，10 度，15 度，20 度，25 度の 5 段階の場合でのグラフを示している．グラフより，pH が小さいほど GV は大きくなるが pH5.5〜pH7.0 の間では GV の変化が小さい．また，同じ pH でも温度が低いほど GV は大きくなり，pH が小さいほど温度差による GV の差は大きくなる．したがって，実験においてソーダストリームで炭酸水を作成する際は，水の温度が低いほどより強い炭酸を作ることができるといえる．

ⓒ 2021 日本バーチャルリアリティ学会

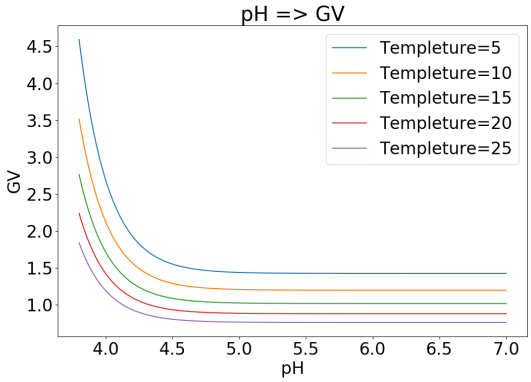

図 1: 炭酸水の pH と温度および GV の関係 (横軸：pH, 縦軸：GV)

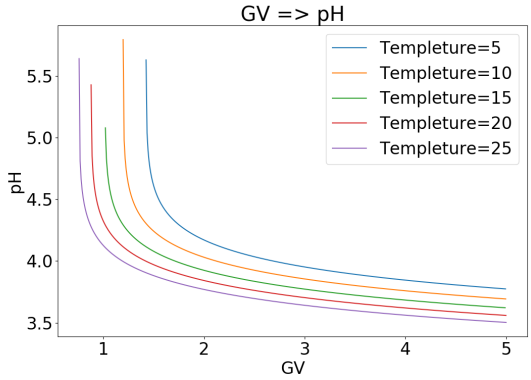

図 2: 炭酸水の pH と温度および GV の関係 (横軸：GV, 縦軸：pH)

4. 実験

本章では，炭酸水に電気刺激を提示する前と提示中における炭酸水の pH を測定し，算出した GV 値の変化を分析することで，提示前と提示中の炭酸の強さの変化に関して調査するための実験手法について述べる．

4.1 実験概要

炭酸水を飲んでいるときに口腔内における舌周辺の pH を直接測定することは困難である．そこで本実験では電気刺激を舌部に提示する方法ではなく，中学校の理科などで用いられる電気分解実験の装置を応用し，図 3 に示すように舌を金属電極に置き換えた簡易モデルを用いて行う．実験では炭酸水を飲む際に陽極電気刺激を与えた場合の口腔内の様子を再現し，舌周辺にあたる陰極側の電極周辺の pH を測定し，GV を算出する．実験で使用する炭酸水は市販の軟水にソーダストリームを使用して 500mL の水に対し炭酸ガスを注入することで作成し，注入回数を 1～4 回の計 4 種類を用意する．また，炭酸水に電気刺激を提示する前と提示後の GV に関して比較し，炭酸の強さの変化に関して検討する．

4.2 実験手法

用意した炭酸水を簡易実験装置に投入し，舌周辺にあたる陰極側に唾液を少量投入する．これは，唾液に含まれる

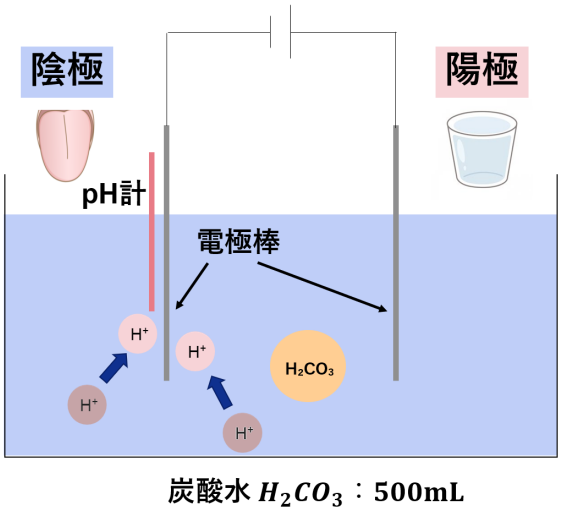

図 3: 簡易実験装置

炭酸脱水酵素により，舌部周辺における炭酸の受容を再現するために行う．また，あらかじめ炭酸水の温度を摂氏 15 度一定のもとで電気刺激提示前の pH を測定する．

実験では炭酸水に陽極電気刺激を付加し，温度を一定に保った状態で電気刺激提示中の pH を測定する．そして，電気刺激提示前と提示中のそれぞれの pH の測定値を GV に変換し，比較を行う．

5. まとめ

本論文では，炭酸水に溶解している炭酸ガス量を示す GV を炭酸水の pH と温度を用いて算出した．また，舌を金属電極に置き換えた簡易実験装置について述べた．今後は，簡易実験装置を用いて炭酸水に陽極電気刺激を付加した際の GV の変化を分析する．電気刺激による炭酸水の炭酸の強さの変化について調査し，電気味覚による炭酸感増強の伝達機序の仮説について検討する．

参考文献

[1] 野村伊吹，小池崇文，“電気味覚による炭酸飲料の刺激増幅に関する基礎検討”，情報処理学会第 82 回全国大会論文集，Vol. 4，pp. 567-568，2020.

[2] Jumpei Kanayama, Ibuki Nomura, Noriki Mochizuki, Takafumi Koike, and Sousuke Nakamura, “Basic Evaluation of Carbonate Stimulus Amplification and Taste Change Using AC Electric Stimulation,” SII’21, 2021.

[3] Kazuma Aoyama, Kenta Sakurai, Satoru Sakurai, Makoto Mizukami, Taro Maeda, and Hideyuki Ando, “Galvanic Tongue Stimulation Inhibits Five Basic Tastes Induced by Aqueous Electrolyte Solutions,” *Frontiers in Psychology*, Vol.8, Article No. 2112, 2017.

[4] 駒井三千夫，井上貴詞，長田和実，“口腔・鼻腔の三叉神経を介した刺激性物質の受容機構”，におい・かおり環境学会誌，Vol. 37，Issue 6，pp. 408-416，2006.

© 2021 日本バーチャルリアリティ学会

[5] 駒井三千夫，“微量栄養素の新規機能の解明に関する研究”, 日本栄養・食糧学会誌，Vol. 68，No. 6，pp. 259-264，2015.

[6] Jayaram Chandrashekar, David Yarmolinsky, Lars von Buchholtz, Yuki Oka, William Sly, Nicholas J. P. Ryba, and Charles S. Zuker, “ The Taste of Carbonation”, *Science*, Vol. 326, Issue 5951, pp. 443-445, 2009.

[7] 野村伊吹，金山純平，望月典樹，中村壮亮，小池崇文，“電気味覚による飲料の炭酸感増強に関する伝達機序の仮説設定と検証実験の検討”，第 26 回香り・味と生体情報研究会報告，2021.

[8] J. アンドリュース他，地球環境化学入門，シュプリンガーフェアラーク，1997.

[9] 猿橋勝子，“天然水中の物質代謝の研究 (第 2 報) 水中の炭酸物質の平衡濃度比について”，日本化学雑誌，Vol. 76, Issue 11, pp. 1294-1308, 1955.

[10] H. S. Harned, and R. Davis, “The Ionization Constant of Carbonic Acid in Water and the Solubility of Carbon Dioxide in Water and Aqueous Salt Solutions from 0 to 50°,” J. Am. Chem. Soc., Vol. 65, No. 10, pp. 2030-2037, 1943.

[11] アサヒ飲料株式会社，容器入り炭酸飲料のガスボリューム算出方法及び算出装置，特開 2018-179915，2018-11-15.

ⓒ 2021 日本バーチャルリアリティ学会