

ビールの泡

作・光藤 裕之 岡山理科大学 理学部応用物理学科 教授

〒700-0005 岡山市理大町1番1号 TEL/086-252-3161 FAX/086-255-7700



備前焼コップ

ビールの泡はなぜでるのか?

まず 逆の場合を考えよう 純粋な水に細い管で空気を吹き込めば泡ができるけれども 水面に出るとすぐ消えるのはなぜか? 純粋な水のもつ大きい界面張力(表面張力)が泡の薄い膜をひきつらせて内部の気体に圧縮力を加えて泡を破壊する 界面活性剤(洗剤)を加えると、それらは水と空気の界面に集まり界面張力を小さくする 界面活性剤はごく微量であっても泡を安定化させるので シャボン玉ができるようになる。

ビールの発泡の条件:

ビール酵母は醗酵の過程でCO₂(二酸化炭素)を発生させる。

発生したCO₂をビール中に多量に溶け込ませるためには 密栓してCO₂の飽和蒸気圧より高圧の状態を保ち CO₂の沸騰を妨げておく。液面と蓋の間のわずかな空気では CO₂は与えられた温度における飽和蒸気圧に達している。

ビールは主成分の水とエタノール(エチルアルコール)の他に種々の有機物を含む それらの中の界面活性作用成分がCO₂の泡を安定化させる。

発泡核(泡形成核)を要する栓を開けるとビールの圧力は密栓時の高圧からほぼ1気圧に下がる このときビールの中のCO₂は沸騰すべき状態になる。

液体相から気体相にあるいは気体相から液体相になるような相転移が生じるためには、新しく作られる相は「核」を必要とする 液体から気体になるときの核は 容器壁上 あるいは液体内に混入した塵(微妙な固体)に付着していた極めて微妙な気体(泡だね)である ガラスは表面が比較的滑らかであるから泡だねに乏しい ガラス面にある目に見えない微細な暇(マイクロクラック)が油分で埋められていると泡だねはさらに乏しくなる そこでビール通は あらかじめ良く乾燥させたガラス容器に 空気を巻き込むようにビールを注ぐことによって泡だねを作る工夫をしている。

註1:液体には成分ごとに温度と共に増す飽和蒸気圧がある この飽和蒸気圧が外気圧より低いときには蒸発は表面から比較的ゆっくりと起

こる 温度が高くなるか 気圧が低くなった結果、飽和蒸気圧が外気圧以上になると容器の底面を含む内面で気体の小さい泡が盛んに作られ 成長しつつ壁から離れて液面から気中に出るこれが沸騰である。

註2:CO₂を水に加えると一部が炭素(H₂CO₃)水溶液を作り 他はCO₂分子として溶け込んでいる(炭素水)。

註3:大気圧が平地より低い富士山頂での水の沸点は100 以下の低い。

註4:発泡核のない清浄なる種の液体中に放射線を入射させた後 圧力を下げると放射線が通った道筋に作られていた目には見えない微小な泡だねが成長して 放射線の通路が目視可能になるであろう 脳裏に浮かんだアイデアをチェックすべくD.A.グレイザーは はじめ放射線源のそばでビールやジンジャーエールやソーダ水のピンを開けては泡のでき方を観測した。その後 最適作業物質 最適条件を調べて「泡箱」を完成させた 素粒子物理学に貢献した「泡箱の発明」によりグレイザーは1960年度のノーベル物理学賞を受けた。

註5:水蒸気(気体)から氷への相転移にも核(種結晶)が必要である 高空に水蒸気が存在し氷点下の温度であるとき 塵が結晶核になって氷粒が作られる 氷粒が融けて雨滴になる 湯水時に上空に沃化銀微粒子を撒いて降雨が試みられる 氷は自分の結晶格子定数に近い型沃化銀結晶の表面上で成長しやすいので、凍結核として最適と考えられる。

一般に一つの結晶が他の結晶の表面上にある定まった方位関係をとって成長する現象をエピタクシー(epitaxy)と呼ぶ 結晶構造と格子面間隔の似た結晶の間で起こりやすい 今日のマクロエレクトロニクス・デバイスの製作に利用させる[ギリシャ語epi(=on) + taxis(=orderly arrangement)]。

備前焼コップのビールの泡立ちが良いのはなぜか?

備前焼は人工釉を掛けないことを特徴とする。壺 瓶類など深さのある備前焼は 外表面に自然釉がかかっているが 内表面は無釉が多い。

無釉面は見た目にも手触りにも感じられるような凹凸のある粗面である 無数の微細な凹部の奥底に残る空気が泡だねとなりこれにビール中のCO₂分子が参加し泡bubble(バブル)が成長するもしこの初期段階の半径の小さい泡が容器壁から離れ周囲のすべてを液体で囲まれた孤立泡になるならば 泡は極めて強い圧縮圧力(表面圧)を受けて潰されるしかし 小さい泡が壁の凹部にある限り 凹部は毛管として働き毛管上昇を引き起こす毛管力が泡に接する液体の圧力を減じ 表面圧を緩和するから小泡は安泰である。

一方 容器壁表面の凹凸が密集しているならば 泡だねの間隔が極めて小さいので 泡の半径が小さいうちに隣接する泡同士が接触し、接合するこの泡の凝集体をfoam(フォーム)と呼ぶ 同一半径の泡と泡との接合面は球面ではなく平面になる 平面の曲率半径は無限大でありこの面の働く表面圧(曲率半径に反比例)は無限に小さくなる 従って 個々の泡の径が小さくても凝集してフォームになると安定化し 浮力が働いて壁面から遊離しても潰されにくい 液面まで浮上の途中も 泡は液中のCO₂を吸収する核として働き成長する 次々に浮上してできたフォームは累積して数cmの厚みに達するこのようにして三次元空間を最密充填する同一寸法・同一形状の要素泡は 六角形が8面 正方形が6面からなる14面体になり それらすべての面で面接触する つまり 個々の泡は球面ではなく、一泡当たり14枚の平面で囲まれた多面体になり、さらに安定性を増す。

電子顕微鏡観察によると あらかじめ粘土に含まれていた微結晶ではなく 焼成中に外向きに生長した微結晶がぎっしりと詰まって並んでいる 例えば 爪楊枝を密に束ねたものを尖端側から見るような微構造である その結果 備前焼はコップはビールの泡に次のような特徴を与える。

泡の径が揃っていて小さく 白いクリームのように見える。

泡の量が著しく多い。

泡の寿命が長い。

二度目のビールを注ぐときは 濡れてしまった内壁の微細凹所が増しているため泡の量は減る。

註6:釉薬(うわぐすり)はガラス質の膜を作る これは多孔質の素焼きの容器の表面を被って水

もれを防ぎ 絵付けにも利用される(陶器)磁器は内部の肉質部の粒間を一度融けたガラス質で埋めている(このプロセスを液相焼結と呼ぶ)ので水もれしないだけでなく半透明になる 備前焼は陶器でも磁器でもなく「焼き締め陶」に属する 高温に長時間保つ間に微細な結晶がお互いに隙間を埋めるように成長するので水もれしないものが多い 備前粘土が極めて多成分系であることが焼き締めを可能にしている「ごま」、「ごま垂れ」の他 紫蘇色 金色 銀色等で光沢をもつ備前焼は 自然釉が掛かっている。

註7:ガラス 陶器 磁気等はビールの発泡に向きな表面構造をもつ しかし ガラスコップおよびプラスチックコップの内面を紙織(サンドペーパー)で擦って粗面化すると 粗面化した領域の発泡性は画期的に増大する。

註8:泡の表面張力は泡の表面積を最小化する方向の仕事をする これに反し 毛管中の液面(メニスカス)は 最小面積すなわち管軸に直交する平面にはならないで曲面になる これは、毛管中の液体は気体だけでなく毛管壁にも接し 液面上の気体は液体だけでなく毛管壁にも接している これら三種の界面に働く向きと大きさの異なる張力の釣り合いの結果 液面は曲面になる 液面が凹であるとき 毛管内の液面上の気圧は毛管外の液面上の気圧より低い その圧力差は 液中単位面積当たりの重さ(圧力)に等しい。

註9:一般に 孤立している泡には 重力のため液面からの深さに比例して増す静水圧の他に、界面張力に比例し半径に反比例する圧力(表面圧)が加わる 半径の著しく小さい泡にかかる表面圧は普通の静水圧より桁違いに大きい。微小泡の段階で凝集できないか 毛管の保護を受けない泡は押し潰され 辛うじて生き残り大きくなり得た泡のみが浮上できる 備前焼コップに比べて ガラスコップ等の泡径は大きくかつ不均一であり 量が少なく寿命が短い。

註10:同じ半径の球を空間に充填するときには 隙間が残る 同じ寸法の立方体(例えば角砂糖)あるいは直方体(例えば定寸レンガ)の場合には 隙間なく充填できる これらは6面体であるが、界面張力は表面積の最も小さいものは 8面体の正6角形と6面体の正方形からなる14面体である 液面上に積み上げられたフォームでは 液体に接する下面と気体に接する上面を除く圧倒的多数の内部の単位泡は そのすべての面を同じ多面体で密に囲まれている この場合 隣接する泡が共有する平面膜自体の液体内の圧力と膜の両側の気体の圧力は等しく表面圧=0であり 最も弱い膜面に力が掛からないので

多面体の要素泡は安定である 一方 泡多面体の稜線の近くの表面圧 > 0であるから 泡の内部気体の対流が生じ得る この対流は泡が小さいとき気体の粘性のため抑制される。

金属の凝集エネルギーを波動関数によって計算するためのWigner-Seitzモデルにおいて 体心立方格子の単位泡は泡14面体と一致する 特定の体心原子と8個の最隣接原子および6個の第二隣接原子を結び直線を垂直に二等分する平面を作ると 体心原子は8面の6角形と6面の正方形からなる多面体で囲まれる。

備前焼の種類によって泡の状態は異なるか?

同じ粘土をもちいても焼成胞に依存して 焼き上がり方がかなり異なるのが備前焼の特徴である。内壁に自然釉が掛からぬことは勿論であるが、微結晶群の形成の工夫によって違いがでる 電子顕微鏡観察によると 微結晶の大きさは200nm~500nmの範囲 焼き方によって異なる。400nmより小さい粒子群は可視光を散乱しないので黒く見える 200nmクラスの微結晶粒が密に詰まっていて 微小泡からなるフォームを多量に作る備前焼を『玉備前』と称する。

註11:可視光は波長が400~700nmの電磁波である 物体が反射した可視光が目に入ったとき我々はその物体が見えることになる 物体が可視領域の光を反射しないとときその物体は見えないのであるが周囲とのコントラストにより黒く見える 微粒子による光の散乱(無秩序な反射)の波長は粒子の大きさに依存する たばこの燃え先から立ち上がる煙りが紫色なのは粒子が小さいためであり 吸い口側から出る煙が白いのは 紫煙のび粒子が核になって水蒸気が凝縮して成長して大きくなった粒子がすべての可視光を散乱するためである 例えば 触媒活性を増すために超微粒子にした白金(プラチナ)は黒いので「白金黒」といって「黒金」とは言わない)。

註12:物質Aと物質Bが反応して物質Dが作られるとき 物質Cが共存することによって同じ温度における反応速度が桁違いに増す しかし 物質Cは反応の前後で不変である“魔法の杖”のような物質を触媒(catalyst)と呼ぶ。

備前焼はビールを美味しくするか?

「気が抜ける」とはビール ウィスキー 炭酸飲料等が本来の香りや味を失うことを言う 香りや味は協同作用して相乗効果をもたらすようである 炭酸飲料CO₂を圧入して作られ、清涼感を与

える効果をもつ 酒類はエタノールその他の気化成分を含む 口内で気化する成分は香りや味を良くする働きを有するようである 確かに泡の消えたビールは味気ないのである 発泡能力が高く泡の寿命の長い備前焼コップはビールを美味しくすると言えよう 現段階では「美味しさ」という感覚は生理学の対象であり「複雑系の営みである感覚」の物理学過程を議論することは難しい しかし「美味しさ」と現象論的に対応関係をもつ要素物理量を調べることはできる。

まず 備前焼コップ特有の発泡性が挙げられる この発泡性能には上述した接触プロセスの他に ビールの界面張力を無接触でさえも更に小さくする備前焼の能力を加えねばならない。すなわち界面張力に比例する表面圧が減少すると泡の安定性は一層増すのである。この能力は目下のところ 物理学的に「未知の場(Unknown Field:U場と略す)」の作用によると考えられ 今後解明されねばならない。

次に 発泡性能の余効に属する温度要因が挙げられる CO₂の沸騰気化(発泡)が著しく活発であるため ビールは気化熱を奪われる 注いで約1分後の温度は 備前焼コップ中がガラスコップ中よりの1~2 低いのである 味覚は温度にも関係し 5 程度が美味しいとされ コップもあらかじめ冷蔵庫に入れて用いることが推奨されている この方法では冷蔵庫から出した直後にコップが結露するので 泡だねが犠牲になり発泡能力が低くなる コップに蓋をして冷蔵庫に入れ ビールを注ぐ直前に蓋を取る心遣いが有益であろう。

さらにU場は ビールに含まれるエタノール アミノ酸類 糖類および炭酸の水和を高め熟成を加速し「まろやかさ」を増す このことは ウィスキーやブランデーについては例外なく好まれるがビールのスパイシーさを弱める おそらくビール独特の刺激性と「まろやかさ」とのバランスが大切なのであろう。

註13:磁場も容器の外から作用されるだけで水または水溶液の性質に変化を引き起こす 水または水溶液に対するU場の効果は磁場の効果に類似して 目下のところ 両者の効果は区別できない U場も磁場も水の網目構造を乱し、網目に“ほころび”個所を作る その個所は電気的に中性ではなくイオン化するから 電離度が増す 弱電解質としての水の解離は 平衡定数で与えられる状態より先増す すなわち場の作用は水を励起させ 分子運動の摩擦係数を減少させるから 界面張力および粘性率が減少し、熱伝導度および拡散係数が増大する 酒類のような水溶液中の分子の易動度(動き易さ)が増すとエタノールの水和が加速され熟成期間が短縮される。