

# 工業高校における微細気泡技術の活用実践事例

(PBL 型授業としての取り組み)

## An actual case of use for microbubble technologies in technical high school

(Approach for Project-Based and Problem-Based Learning)

○佐藤嘉 (学校法人羽黒学園羽黒高等学校, Yoshimi SATO)

石川修一 (肴石川酒店, Syuichi ISHIKAWA)

加田謙一郎 (鶴岡高専創造工学科, Kenichiro KADA)

### 1. はじめに

泡の持つ潜在的な力については古くから知られており、これまでも工業分野などで、炭酸ガスを利用した洗浄法として広く用いられている。近年改めて注目される「マイクロバブル」(以下、MB)は、その特性(細かさや絶対量)から、粗大な泡よりも洗浄効果が高く、また人体に対しては血行促進などの活性化作用が認められる<sup>1)</sup>。これらは、各種発生装置を用いて水溶液中でMBを大量発生させ、気体を多く溶け込ませて水溶液の性質を様々に変化させることや、個々の気泡が有する電気的な刺激によってもたらされると考えられている。しかしながら、これらの現象を説明するMB関連の報告事例は少なく、応用技術があまり確立されていないのが現状であって、簡便な研究を継続的に取り組む必要性が挙げられる。

専門高校では専門学科において開設される教科の中に、課題研究という科目が含まれる。特に、工業高校においての目標を「工業に関する課題を設定し、課題の解決を図る学習を通して、専門的な知識と技術の深化、総合化を図るとともに、問題解決の能力や自発的、創造的な学習態度を育てる」<sup>2)</sup>ことと定めている。最近では、急速に変化する社会に対応する人材(財)を育てるために、「アクティブラーニング」(学修者の能動的な学修への参加を取り入れた教授・学習法の総称)<sup>3)</sup>を取り入れる教育現場も多い。その中で、専門高校における教育手法の一つとして、PBL(Project-Based Learning または Problem-Based Learning)を取り上げ、課題研究や課外活動における実践の可能性について検討する。テーマとしては、水質改善、水耕栽培、燃料の燃焼効率改善を挙げ、以下にそれぞれの概要を順に示す。

### 2. 研究概要

#### 2.1 水質改善

一般的に、湖沼などの閉鎖水域では汚濁物質が蓄積し易く、汚濁が進行すると悪臭の原因ともなり、その改善は容易でない。そこで、MBを供し水中の

溶存酸素量を高めることで、BOD(生物化学的酸素要求量)を改善し、微生物群を活性化できるものとする。これより閉鎖水域における水質改善を図る。

#### 2.2 水耕栽培

植物を育てるための「土」を必要とせず、水溶液のみによる水耕法で農作物を育てることは困難であるとされてきた。しかし最近では、高度な制御処理技術の発達に伴い植物工場などが普及し始め、内部環境を人工的に作り出すことが可能となった。温湿度、光源(LED照明等)、肥料濃度を調整することで、様々な農作物の栽培が実証され、特に葉菜類の栽培は根菜類に比べて容易であり、既に市場に出荷されている。実用化の成功例としての「トマトの木」は、一つの苗から約15000個ものトマトが収穫できる。水溶液中に常に浸漬している植物の根に、酸欠防止のためのMB技術を活用すると、植物の成長により高い効果が認められている。これには水溶液中の溶存酸素量増加に伴う微生物群の活性化や、それに伴う根への栄養源供給の増進効果、水の劣化(酸化腐敗)防止などが挙げられるが、現在栽培できる作物は限られており、解明されていない部分も多い。よって今後も様々な植物に対する調査が望まれる。簡易的な水耕栽培においてMBを活用し、種々の植物に与える影響を調査する。

#### 2.3 燃料の燃焼効率改善

エネルギー大量消費社会にある現代において、主力となる熱エネルギー源を利用した動力機関は、生み出すエネルギーの扱いやすさや利便性から、自動車や船舶、飛行機などあらゆる内燃、外燃機関として普及しており、これらは文明の目覚ましい発展に寄与し、著しい工業化の進歩に貢献してきたことは疑う余地がない。しかし機関の大半は化石燃料の燃焼を伴うために、燃焼によって生み出される大気汚染物質(PM2.5, NOxなど)の排出量規制や、京都市議定書における温室効果ガス(CO<sub>2</sub>など)削減については、取り組むべき国際的課題として急務である。元来日本はエネルギー資源が僅かでありながらもエネルギー利用の高効率化に邁進し、世界的レベルでの技術開発を牽引してきた。最近では、バイオ燃料やメタンハイドレートなど次世代燃料の開発と、そ

れらを利用したバイオディーゼル車，燃料電池車（FCV），水素エンジンなどの報道が盛んに取り沙汰される．時代の流れは低燃費化，つまりはエネルギー利用における質の向上を目指すことであって，燃料と動力機関の技術開発は日々進化し続けている．今日，利用分野が多岐に渡る MB 技術は，燃料分野での応用も期待されている．低コストでサイズが任意，小型軽量化が可能な「旋回式気液せん断方式」の発生器に着目し，その使用法と各々の燃料に対する MB の影響を簡易的に調査する．

### 3. 実験方法

#### 3.1 水質改善について

閉鎖水域として，直径約 12 m，深さは約 0.4 m から，中央にかけて段階的に 1.0 m 程のすり鉢状となっている羽黒校内の池（容量：約 100 m<sup>3</sup> = 100 ton）を選定した．池には金魚などの生物が存在するが，雨水や道路からの土や砂埃などが常に混入し，生物にとっては過酷な環境下にある（図 1）．この池に，気液せん断方式（特許：第 4621796 号）を利用した MB 発生器（図 2：以下，実験ではすべて同じ方式の発生器を使用）を用いた．発生器は入水口と，水中ポンプ（40 L / min）にそれぞれ取り付け，池の中央にはろ過装置を設置した．ポンプの作動時間は 20 分おきとした．池の水を採取しての顕微鏡による観察や，PH 測定，一般飲料水質検査項目に基づく水質検査（分析）を行った．

#### 3.2 水耕栽培について

簡易水耕栽培用キット(600×450×200 mm)を作成し，ポンプ（流量：7~10 l / min）と MB 発生器を取り付け，水溶液を循環しつつ継続して MB を供給できるように工夫した．使用した水はすべて水道水とした．栽培した植物はトマト，蒟蒻とした．トマトは市販されている苗・株を購入し，蒟蒻は約 1~2 年目の種芋を用いた．水中温度計にて温度を計測し，液体肥料はホームセンター等で市販されている一般的なものを使用した．追肥は 1~2 週間に 1 回程度とし，EC（電気伝導度）メーターを用いて液肥濃度を計測した．液肥濃度は 1500~2500 μS / cm の範囲内とした．簡易 PH 測定器を用いて PH を測定した．

#### 3.3 燃料の燃焼効率改善について

実験には同型のアルコールランプ 2 つと灯油バーナーを用いた．市販のエタノール（純度 99.5 %）に発生器を用いて MB を導入した後，アルコールランプ容器に移し替えて着火し，MB 有無による燃焼状態を比較視認した．灯油バーナーの燃料には，灯油のみ，灯油+MB，灯油+水+MB の 3 種類を用いた．灯油と水の割合は，約 9:1 とした．灯油バーナーの燃焼実験において，放射温度計による温度測定を行った．



図 1 Appearance of the pond and its sediment



図 2 Gas-liquid two-phase flow whirling type microbubble generator

## 4. 実験結果および考察

### 4.1 水質改善の結果

入水口からおよそ 1 日かけて給水し，池を満水状態とした．これに伴い同型の中水ポンプを用いて攪拌作業を行った．攪拌作業を行うと同時に，水底の汚泥（堆積物）が浮き上がり，数分程で汚泥が池全体を覆いつくした．中には 100 mm 台の枯れ葉も浮上することが確認された．この現象は，入水時に供給された MB が水底の汚泥に付着し，さらに攪拌作業により半強制的に浮上を促したと推察される．浮き上がった汚泥は非常に細かく，網などで掬い上げることが困難であるため，オーバーフロー方式による除去が有効であった（図 3）．これを数回繰り返すことによって，大規模な閉鎖水域において短時間で効率的に汚泥の除去が可能となる．その後，日差しが強くなりはじめた頃に藻が大量繁殖して池の水は鮮やかな緑色を呈し，PH は約 10.5 と，高いアルカリ性を示した．緑色の状態はグリーンウォーターと呼ばれ，メダカや稚魚の生育にはよい環境であると言われる．臭気はあまり感じられないため，藍藻類よりも緑藻類（または珪藻類）が多く繁殖していると思われる．池の水は有機栄養価が少なく，無機栄養価が高いことを示している．採取した水を顕微鏡で調べたところ，細長い針状（約 10 μm）と球状（約 2~3 μm）の，主に二種類の藻が観察された．また，藻の繁殖を有効利用すれば，バイオエタノールが生成できる可能性が高い．PH が高い理由については，藻による水中の二酸化炭素（炭酸イオン）の過剰消費であることが示唆され，河川等によく確認される現象である．表 1 には水質検査結果を示す．大腸菌が検出されず，硝酸態窒素の値が極端に少ない．一般細菌は存在するものの，MB には大腸菌群などを抑制する効果があると予想され，硝酸態窒素については，藻類が取り込むことで値が少なくなったものと考えられる．この値を意図的に減らすことは難しいとされており，今後の応用が期待される．



図3 Appearance of floating sludge immediately after stirring, sludge removal by overflow

表1 Results of water quality analysis

検査項目	検査結果	単位	基準値	検査方法
一般細菌	$3.1 \times 10^2$	CFU/mL	100 以下	標準寒天培地法
大腸菌	検出せず	-	検出されないこと	特定酵素基質培地法
亜硝酸態窒素	0.004 未満	mg/L	0.04 以下	イオンクロマトグラフ法
硝酸態窒素及び亜硝酸態窒素	0.1 未満	mg/L	10 以下	イオンクロマトグラフ法
塩化物イオン	10	mg/L	200 以下	イオンクロマトグラフ法
有機物(TOC)の量	21	mg/L	3 以下	全有機炭素計測定法

#### 4.2 水耕栽培の結果

購入したトマトの苗の脇芽を摘み、水溶液中につけておいた根の状態を図4に示す。1週間もすると根が10cmほど伸び、花房が開き成長することが確認された。受粉して実をつけた状態から2ヶ月程で収穫ができるようになる。またこの間のPHを測定すると、5.5~6.0の酸性傾向を示す(使用した水道水のPHは7.0~7.2)。トマトは根から有機酸(根酸)を分泌して必要な元素を取り込みやすくし、有害な物質を無毒化するとされている。このため水溶液が酸性を示したと考えられる。

図5に蒟蒻の成長過程を示す。種芋の花茎(中央部)底部より根の伸長が見られる。4週間ほどで花茎が成長し始めて60cm程度になると、花茎内部の葉が開き、2ヶ月程で最盛期をむかえる(全長1m30cm)。気温が10℃前後となってくると、同時に葉が黄色に染まり茎が倒伏する。この時期に蒟蒻の主成分であるマンナンが葉茎から種芋に移動すると言われている。水溶液中の種芋を取り出すと、茎の反対側に白桃色の新芽や、別の種芋には生子(きご:新しい種芋)が出来ており(図6)、これらは水溶液中でも十分に成長を促進させることができると考えられる。蒟蒻芋自体は水に弱く、水はけの悪い土壌を嫌うとされているが、今回の水溶液中での成長は特異であり、一つの要因としてMBを供給したことによる溶存酸素量の増加が関係していると思われる。しかし現状では、種芋の大きさが投入時と同等であることや歩留まりを考慮すると、通常のエアレーションなどでの比較実験も必要であり、今後はECメーターによる液肥濃度の微調整、PH調整、水温管理などを徹底していくことにより、多年草である蒟蒻芋が短期間で栽培できる可能性が示唆される。

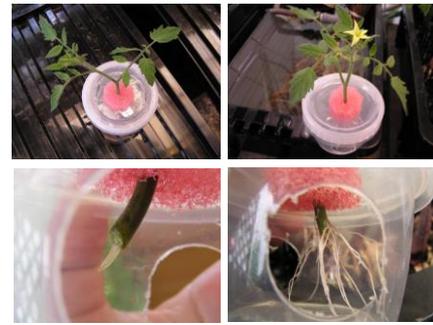


図4 Left pictures: picked lateral bud, Right pictures: state after one week



図5 Growth process of konjac



図6 Appearance of grown konjac

#### 4.3 燃料の燃焼効率改善について

図7では、アルコールランプの燃焼実験において、左側はMBを導入したもの、右側は通常のエタノールでの燃焼状態を示す。MB入りでは炎が大きく、燃焼に明らかな差が見られる。炎の大きさは芯材の形状や太さに依存し、毛細管現象による燃料の供給量が関係する。今回は同型の芯材を使用しているため、MB(空気)の有無が炎の大きさに直接影響し、燃焼状態の改善に寄与していると考えられる。また炎の大きさが大小に時折変化したが、これは予め導入したMBが芯材を通過する際にろ過されるためである。つまりは、燃料とMBを混合した瞬間に燃焼させたほうが、完全燃焼により近い状態を生み出せる可能性が高い。図8に、MB発生器を用いて灯油と水を混合攪拌した状態を示す。白い乳化層ができおり、水と油が混在している状態を表す。これより短時間でエマルジョン(乳化)燃料の生成が可能であることが示唆される。図9に各種燃料における、灯油バーナーでの燃焼比較実験の結果を示す。火炎色の違いはほとんど見られないが、中央のMB入り燃料が、フレーム(炎)の勢いがよく柱の大きさも太く短い。右に示すエマルジョン燃料では、他の燃料と同等に着火が可能であり、フレーム外炎には水蒸気爆発燃焼特有の火花が確認された。放射温度計にて比較すると、相対的にMB入り燃料が2~3割ほ

ど高い温度を示す。エマルジョン燃料では灯油のみの場合と同等かそれよりも低い温度を示した。図 10 に当量比と燃焼温度の関係を示す<sup>4)</sup>。燃焼において、温度が高いと完全燃焼しやすい状態となるが NO<sub>x</sub> の生成につながる。一方で燃料が多く酸素が少ない不完全燃焼下では煤が発生する。MB（空気）を導入したことで燃焼が促進され、さらに水を混ぜることは、燃料の絶対量を抑えられることによる CO<sub>2</sub> 削減と、さらには完全燃焼時の温度を低下させることで、PM<sub>2.5</sub>、NO<sub>x</sub> などの大気汚染物質の大幅な削減が見込まれる。さらに MB 発生器自体をエンジン周りのインジェクターとして応用すれば、従来の燃焼設計に拘らない新手法での、より最適な混合気を生み出せる可能性がある。発生器の構造上、燃料の噴射とともに気体（空気）の供給や調整が可能であるため、EGR や高過給などの各システムとの組み合わせやダウンサイジングで、従来よりも遥かに低燃費化が進むと予想される。ディーゼル・直噴エンジンとの相性がよく、既存のエンジンではノッキング防止として燃料を薄くするなどの対策が必要である。バイフューエル車、ロータリーエンジンなどへの応用も考えられる。低コストで作製が可能なことから、すべての内燃・外燃機関への応用が期待されることを言及するに留める。



図 7 Comparison of the combustion state of alcohol lamp



図 8 Emulsification of kerosene and water by use of the microbubble generator



図 9 Temperature measurement results of flame by kerosene burner (Left pictures: kerosene (302 °C), Center pictures: kerosene + MB (385 °C), Right pictures: kerosene + water + MB (257 °C))

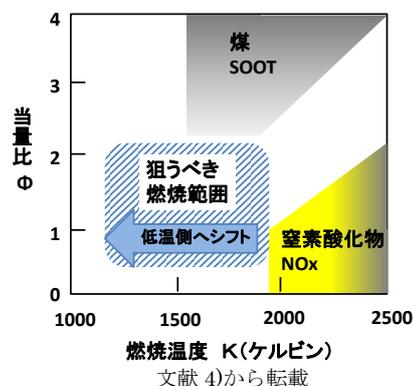


図 10 Relationship between fuel equivalence ratio and combustion temperature  
文献 4)から転載

## 5. おわりに

PBL 型授業の一環として MB を用いた各種テーマ、水質改善、水耕栽培、燃料の燃焼効率改善について、以下の知見を得た。

(1) 閉鎖水域における水質改善については、入水において MB を満たし、これを攪拌すると汚泥を浮上させ、大規模な閉鎖水域においても同様に、オーバーフローによる汚泥の除去が可能となる。

(2) MB を活用した水耕栽培において各種植物の成長が確認された。今後は水温、液肥濃度、PH 等の管理が必要となる。種々の植物に適している状態（環境）を保つことにより、さらなる成長の効率化と短期間での栽培が可能となることが示唆された。

(3) MB を導入した各種燃料において、燃焼効率の改善が見られた。また、油と水を混合したエマルジョン燃料が生成可能であり、これらは燃焼時に完全燃焼温度を下げることから、燃焼に伴う PM<sub>2.5</sub>、NO<sub>x</sub> などの大気汚染物質を減らすことができる可能性がある。

このような実践型 PBL の実施により、生徒自らが課題を整理し解決する手段を考え、チームで協力して実験ができる能力を身に付けることができると期待される。特に MB 技術に関しては、様々な簡便的なテーマを設けやすく、今回は地元高専と私立高校がタイアップし共同研究を行った事例である。効果的なマッチングを行うことで、学生を主体とした発表の機会や社会実践の場を増やすことができる。また、地元企業と連携することで、具体的な PBL としての地域貢献や地方創生の活力になればと考える。理科離れの進む教育現場への活用を推奨するとともに、より効果的な PBL 型授業を追究していきたい。

## 参考文献

- 1) 大成博文：マイクロバブルのすべて、日本実業出版社(2006)、181-202.
- 2) 文部科学省：高等学校学習指導要領(2009)、166.
- 3) 文部科学省：中央教育審議会、第 82 回総会答申(2012)、3-4、9.
- 4) 畑村耕一：最新！自動車エンジン技術がわかる本、ナツメ社(2014)、52-53.