

4. 水田における微細藻活用

(1) 炭酸ガス固定

これまで微細藻についてお話してきて、再度微細藻の使い方が気になってきました。今一度検討させて下さい。先に、微細藻の特長として、**種類が多いこと**、**小さいこと**、**生産性が高いこと**を取り上げました。

種類が多いことは、24,000 種もあり、色々な環境条件に応じた微細藻がいるからどんな物だって作れる主旨ですが、実際屋外大量培養ができるのは5種類だけだから、その特長と合わせ、実行可能性の有無について検討する必要があります、そのためには、残る2つの特長と組み合わせ、よっぽど優れた用途を見つける必要があるということです。

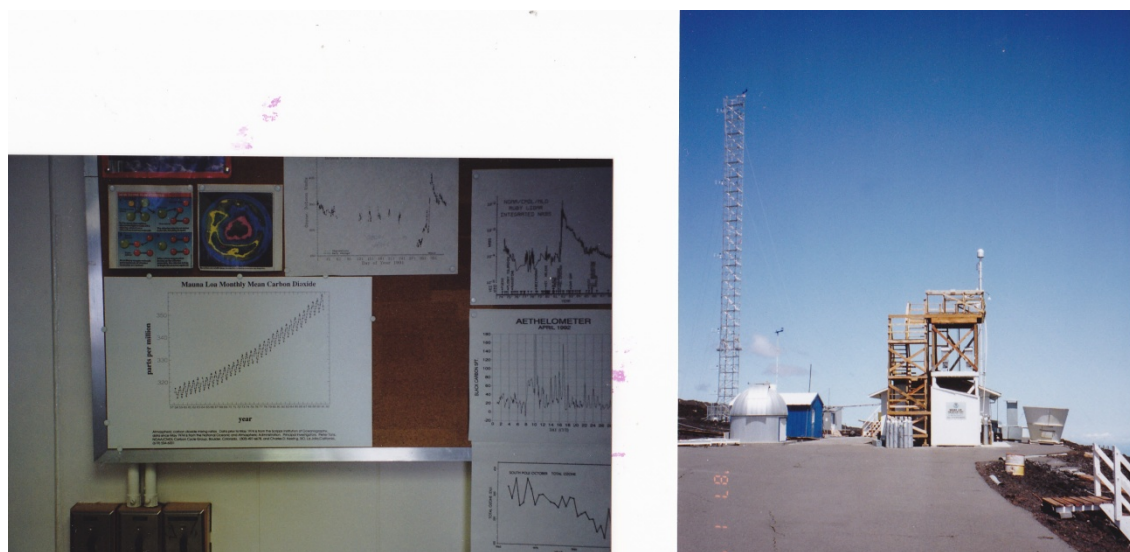
繰り返し考えて、短期・長期に次の適用が話題提供者の優先順位です。

その1: 炭酸ガス固定

その2: 抑草剤および肥料の生産

その3: マイクログリカルチャー（水田における微細藻活用農業）

仲間と二人で車を駆け、ハワイ島、標高 4,169m のマウナロア山の頂上近く、大気観測所を訪れたのは、1992 年のことでした。当時、熱心に地球温暖化の研究調査をしていました。



ハワイ島は北半球では太平洋で最も工場からの排気ガスの影響を受けにくい所で、ハワイ大学のキーリング博士が、大気中の炭酸ガス濃度を測定するのに最適な場所として選んだ場所です。

写真右のプレファブが設備の全てで、出来るだけ高い場所から大気を採取するため、30m ほどの鉄塔が建っていました。正面の小屋を入ったすぐの場所に、写真左の記録があり。炭酸ガス濃度の観測値が表示されていました。キーリングが観測を始めたのが 1955 年で、訪問当日の炭酸ガス濃度は 350ppm をわずかに超えた値だったと記憶しています。炭酸ガス濃度がのこぎりの歯のようにギザギザしているのは、北半球では、夏植物の光合成が盛んな時期に炭酸ガス濃度が低くなり、逆に冬場は炭酸ガスが消費されないで炭酸ガス濃度が高くなっているのです。

驚くのは、この後です、ハワイ訪問以来大気中の炭酸ガス濃度は 350ppm とずーっと思い込んでいたところ 2013 年になって NOAA(米海洋大気局)が、5 月 9 日、 今月 4 日までの 1 週間の平均値が 399.58ppm を記録し、9 日に 400.03ppm と観測開始以降初めて 400ppm の大台を超えたと報告しました。この 10 年でおよそ 15%増えたことになります。これから、大気中の炭酸ガス濃度は 400ppm であると言うかと思うとゾーッとします。

炭酸ガス問題を初めて知って以来随分時間が経ちました。今や炭酸ガス問題が存在しないとする議論はないと思います。世界は嫌気性と好気性の二つの雰囲気に分けられます。炭酸ガスは物が好気性の世界から嫌気性の世界に移動したときの姿です。自然界で好気性の代表(?)のような有機物が大気中の酸素で酸化された最後の姿が炭酸ガスです。炭酸ガスを有効利用するとか、還元するとか考える時、大規模に実施できるものは光合成しかありません。海中や地中に戻す話しは根本的な解決とは言えません。こう思って微細藻を考えたのは、1992 年のことです。その年 10 月、運転中の発電所の煙道から、実ガスを取り出し、1 年間の連続運転を始めました。苦労をしつつ 365 日の連続運転に成功しました。

発電所で化石燃料を燃やすと炭酸ガスが出ます。この炭酸ガスを排ガス中から分離するのは比較的簡単ですが、取り出した炭酸ガスの処理が大変です。光合成が炭酸ガスを削減する究極の方法だとしたら、木・草・微細藻のどれが最も効率が良いか、まずは生産性と考えてまとめたものが、前掲のバイオマスの生産性比較です。高濃度の炭酸ガスを使えること、色々な製品の生産が期待できること、生産性が高いことが微細藻を選択した理由です。

微細藻による炭酸ガス固定は、研究開発プロジェクトです。4 年間にわたった東北電力のプロジェクトの一部をご紹介します。プロジェクトを進めるに当たって考えたことは、まず、そのような運転ができるかということ、次いで、経済的に成り立つかということでした。プロジェクトのコンセプトは、発電所排ガスを用いる、海水に育つ微細藻を用いる、最終製品は固体燃料とすることでした。微細藻は数万種もいますが、実際年産 100 トンを超える規模で屋外培養できる微細藻は、現在 5 種類しかなく、微細藻の栽培は結構難しいと言ってきました。5 種類とは、古い順に、クロレラ、スピルリナ、ドナリエラ、ヘマトコッカスおよび魚介類の餌となる海産珪藻です。東北電力で用いた微細藻は松島湾で採取したテトラセルミスです。365 日の連続運転に成功しましたから、6 番目の微細藻の強力な候補ですが、東北電力のプロジェクトは小規模パイロット試験なので、もう少し大規模な試験をするまで、候補としておきましょう。炭酸ガス固定を目的にする以上大規模屋外培養が最小限の要求ですから、考えられる製品は燃料です。固体燃料を手始めにしようと思ったのです。その後、他の電力会社と、気体燃料と液体燃料の生産にも取り組みました。

微細藻屋外培養池のイメージを作って頂くために、稼働中の設備の写真を見て頂こうと思います。次頁の写真は、南インドの設備の写真です。スピルリナを生産しています。長さ 200m、面積 2,000m² の池が 26 個連なっています。

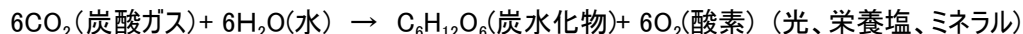


水田で微細藻を育てることがテーマですから、栽培の場として水稻と微細藻栽培を比較してみましょう。上の写真で、左側、真ん中に仕切りがあり写真奥に伸びている池がレースウェイ(Race Way)と呼んでいる培養池です。幅 10m、長さ 200m です。幅 10m の池に仕切りがあるので、手前左側 5m の水路を海水が手前から奥へ向かって流れ、突き当りで 180° 方向転換し、手前に向かって流れます。水深は 20cm 程度で、右側奥に水車(Paddle Wheel)があり、20cm/秒程度の速度で川のように流れています。微細藻の生息環境はこのようなところです。流れのある池に栄養塩を投入し、炭酸ガスを吹き込み、微細藻を栽培します。前日増殖した微細藻は培地共抜き出し、ろ過収穫し、薄くなった培地を戻し、不足した栄養塩を補給し今日の運転に入ります。水面が受光面です。この写真では池はコンクリート製で閉鎖水域です。

まとめてみると、閉鎖水域での1日の回分運転で、光合成により微細藻が増殖します。その際必要な栄養塩は濃度が朝一定になるよう補給します。光合成量は日照と、注入された炭酸ガスによって決まり、消費された水は毎朝水面計をみて補給します。一方水稻栽培は、必要な水は開放系で供給されます。1年の回分運転で、栄養塩は年間を通じて必要な時に補給されますが、系としては土壌を含む開放系で、ミネラルを含む栄養塩は過不足があっても土壌という大きなバッファがあり消費量が把握し難いシステムです。1日の生産量は日照量により決定されますが、秋の収穫で初めて年間の生産性が判るシステムです。炭酸ガスは大気中の炭酸ガスを稲の葉の葉緑素が直接吸収します

このようなシステムの違いを総合し、1年間の収穫量を1日あたりに換算し生産性評価したものが、先に提示したバイオマスの生産性比較です。微細藻、草、木の順で生産性が高くなっています。

光合成反応とは、次の反応です。



反応は左から右へと進みます。反応とは分子と分子がぶつかり合うことですから、炭酸ガスと水濃度は高い方がよく、反応物質は出来たらすぐ除去すれば反応が起こりやすくなります。特別な理由があれば別として、光や、栄養塩や、ミネラルは、多い方が反応し易い理屈です。反応のエネルギーは光ですから、日照は多い方が好都合です。炭酸ガスはどんどん供給し、反応で生産された酸素はどんどん外へ逃げていく方がよい、大気中の炭酸ガス濃度は350ppmですが、微細藻は水中に生息する訳で、発電所から出る高濃度の炭酸ガスを水の中に吹き込むことのできる反応システムは大変都合のよいシステムです。加えて微細藻は大気中の炭酸ガスが5,000ppmの時代を通じて生き残った植物ですから、生産性が高くなる理屈です。ちなみに、農業の場合ビニールハウス内の許容最高炭酸ガス濃度は1,000ppmです。

炭酸ガス固定が必要かの議論があります。この問いに対し話題提供者は、我々は何ができるかではなく、何をしなければいけないか考えるのが正しいと思っています。東北電力で微細藻を用いた炭酸ガス固定の研究開発の途中、経済試算をしましたが、色々と条件を付けて計算したエネルギー価格は、当時のエネルギー価格の約2倍でした。この計算でいくと、発電所排ガスと微細藻で作った固体燃料を例えば10%燃料に混入すれば全体として燃料価格が10%高くなるが、使用する化石燃料が10%削減できる理屈です。化石燃料は地球上の生物が数億年の時間をかけて作り上げた蓄電池のようなものです。一方微細藻で固体燃料を作るには、太陽エネルギーを用いて燃料を作る発電機です。エネルギー価格が2倍になるのは当然だと言う議論をしました。この議論は今日なお続いていると思います。

然は然りながら、微細藻から生産されたバイオマスの燃料としての利用についても十分検討の余地があると考えています。微細藻の特徴の一つに、微細藻は水中にそんなに高くない濃度で生息する為、水から微細藻を分離するのにエネルギーが必要です。

ニューヨーク州西北エリー湖に近くにジェームズタウンという小さな町に1891年に建設された小さな発電所があります。町は石炭鉱山の上にあると同時に油田もありエネルギーが町の主産業です。この発電所の改造の話が持ち上がり、微細藻による炭酸ガス固定も組み込もうとの問い合わせがあり、縷々検討しました。

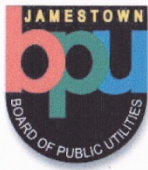
提案の骨子をまとめたのが、次のフローです。

ASU: Air Separation Unit(空気分離装置)が酸素を供給します。

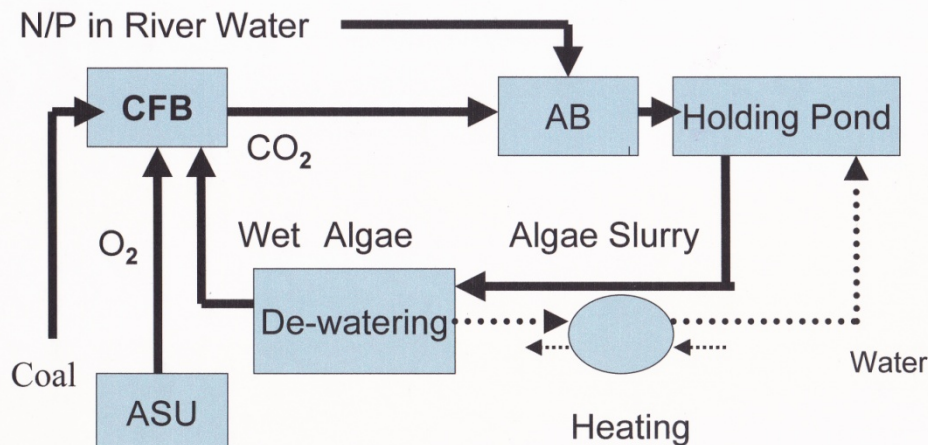
CFB: Circulating Fluidized Bed(循環流動床ボイラ)で微粉炭を酸素燃焼します。排出する炭酸ガスを循環し炉内温度を制御します。

AB: Algae Biofixation(微細藻によるバイオ固定)で炭酸ガスを微細藻に変換します。

De-watering: 微細藻スラリーを脱水し湿潤微細藻を循環燃焼します。



Design 21: System Design



このシステムの自慢は、湿潤微細藻の燃焼です。微細藻の特徴の一つは水の中で生育し、低濃度であることです。そのため生産性は高いのですが大量の水を取り扱う必要があり、水から微細藻を切り離すところで相当するエネルギーが必要です。自然界では、生産された微細藻はそのまま動物プランクトンの餌となるので、分離のためのエネルギーを必要としません。上のシステムでは、微細藻を湿潤状態で燃焼し少しでもエネルギー使用を減らそうとしています。同じように、光合成で炭酸ガスを使用するとき、空気中で燃焼すると、大量の窒素を含む排ガスから炭酸ガスを分離するのにエネルギーを必要とします。空気中の酸素を使うのではなく、酸素を使って燃焼すると、初めに 1 回酸素を分離しておく、その後の分離は必要ない理屈です。空気中の窒素は燃焼温度を下げる役割を持っていますが、酸素で燃焼し、燃焼温度は炭酸ガスと水蒸気とからなる排ガスを使うと逆に燃焼温度を自由に選べる利点があります。将来もっと高温度に耐え得る金属が発明された時、もっと高温の蒸気が使ええる可能性があります。

BPU(Board of Public Utilities)向けに考えたシステムです。アメリカでの試験装置受注の一手手前で政権が変わり、予算が付かずプロジェクトが推進できなくなりました。2009 年のことです。開発要素が多いプロジェクトですが、湿潤微細藻を燃やす良い方法だと考えています。

1990 年代微細藻による炭酸ガス固定を始めた時、目的は発電所排ガスから分離した炭酸ガスを処理する方法を見つけることでした。燃料の生産は開発すべき課題はあるものの可能性のある話です。日本で実施場合土地はどうするかとの議論がありますが、休耕田は候補地の一つであると思います。

このシステムで 90 万ヘクタールある休耕田を用いて固定できる炭酸ガス量は、微細藻の生産性を $30\text{g}/\text{m}^2/\text{日}$ とすると、年間 0.99 億トンとなります(マイクロアグリカルチャーの推進、前掲)。この値は 2011 年の我が国の炭酸ガス放出量が 13 億 700 万トン(環境省 HP より)と比べ小さい値ではないと思います。

微細藻の研究を始めてから、日本や東南アジアで水田を何度も訪問しました。アジアでの感想は棚田は日本固有のものかと思っていたら、インドネシアにも中国にもあるんだと知ったことでしたが、日本での感想はそれとは大きく異なり、小さな村でも、高い所に水源が在り、上水道・下水道があり、全ての水田に水が配分されることへの驚きでした。微細藻の池は写真でもご覧頂いたように、水は命であり取水設備を持ちマニフォールドを持ち全ての池に供給されます。ここでは、前日収穫し、水位の減り分だけ補給します。補給量は原則として一日の蒸発量の補給で収穫の際微細藻と一緒に抜き出した水は微細藻をろ過した後池へ戻されます。この点で微細藻と水田とで大きな差異は有りません。

微細藻の設備を建設する際、実際問題として取水設備にはお金もかかるし大変重要なところです。水田と微細藻と比べて、大きな違いは、水田では昔から使ってきて完備したインフラであり、微細藻では、今から苦労して建設しなければならないところです。長くなりましたが、水田と微細藻培養はいずれも水を使う栽培だということです。江戸時代から営々と築いてきた水田です。話題提供者は、休耕田と言わず、湖水と追わず、水環境を最大に活かすべきとの意見です。

(2) 抑草剤および肥料の製造

少し前のことですが、埼玉県の水田でオオアカウキクサとヘマトコッカス栽培の試験をしました。仲間とマイクロアグリカルチャーと称して、研究会を行っていた時の話です。



試験に使用した水田は写真のようなところで、小さな箱は、微細藻を試作するためのものです。夫々オオアカウキクサとヘマトコッカスを栽培しています。

研究会のテーマの一つに、抑草剤と肥料がありました。まずは抑草剤ですが、雑草の成育を抑える方法の一つに紙マルチというのがあり、田植え前に水田に紙を敷き、雑草の成育を抑制するのですが、紙の代わりに、田植え前に水面にオオアカウキクサを成育させ、次いで田植えし、オオアカウキクサはそのまま鋤

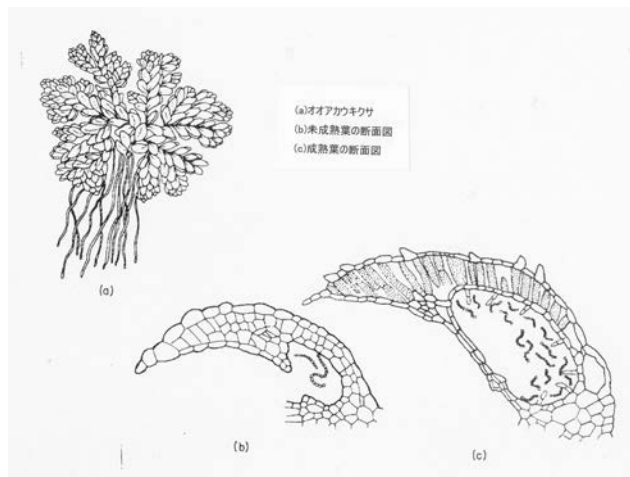
きこんで肥料にしようという作戦です。水田の右手後方の水面の8割くらいオオアカウキクサが覆っています。稲は既に植えられており、雑草は生えていません。この時は田植え時期にはまだ早く、稲はまばらです。田植えというのは苗代である程度まで成長した稲を水田に植え付け、雑草の成長が追いつく前に、稲を先に大きくする作戦です。



十分検討に値するものだと思っています。

オオアカウキクサが肥料として利用できることはよく知られた話です。

上の写真のオオアカウキクサについて説明させていただきます。オオアカウキクサは肥料になる植物として知られていますが、実はこの肥料は微細藻、藍藻アナベナとオオアカウキクサとの共生によるものです。



オオアカウキクサ (Azolla) は小型のシダ類の一属で池や緩やかな流れの水面に浮いています (図 a)。水平に伸びた茎に沿って多数に葉が重なり合い、分枝節から根が水中へ水平に垂れています。葉は無色の薄い膜で水面に接する下部小葉と、空洞を含み、そこに藍藻アナベナを包みこんでいる肉厚で緑色の上部小葉からなっています。この空洞ははじめ葉の下層部のくぼみですが (図 b)、しだいにヘリの細胞が成長して封じ込められます (図 c)。空洞の内側は、粘質物とアカウキクサの表面の毛が占有しており、その毛の細胞のいくつかには特徴的な微細構造があり、アナベナとオオアカウキクサとの間の代謝産物の交換機能を果たすらしい。アナベナは共生体の現存量の約 15% を占め、オオアカウキクサの窒素要求量のすべ

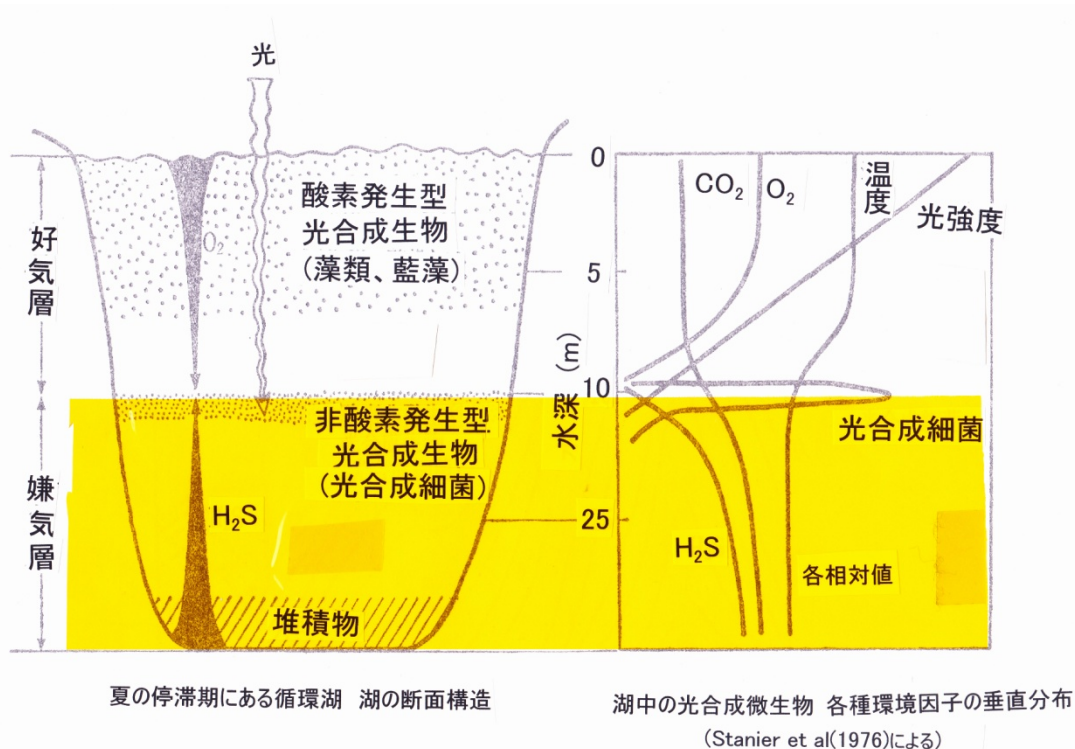
てをアナベナの窒素固定でまかなえるということです。(藻類の生理生態学より)

オオアカウキクサを活用した農業をマイクロアグリカルチャーとして次の項でご紹介します。

(3) マイクロアグリカルチャー

ここまで書いて、農業と微細藻との深い関係を再認識しています。もともと、農業と微細藻とは深い関係にあるのですが、水耕栽培になるとなおのことです。本当は微細藻というより、微細藻を含む微細生物というのが正しいと思うのですが、話題提供者が関わってきた微細藻を中心とした微細生物を含む農業について話しを進めることにします。

下图は夏の停滞期における循環湖の断面構造です。(光合成細菌、培風館より)



微細藻(上図で藻類・藍藻)の活動範囲は好気層ですが、直ぐ下の嫌気層に光合成細菌が住み、 CO_2 、 O_2 、温度、水深他多くの条件が、変化する環境下にあります。

マイクロアグリカルチャーとは 2001 年に発足した研究会で命名した概念で、水田における微細藻活用農業です。具体的ターゲットは次の通りです。

その1: 水田で栽培する微細藻を2種類選択し、水田での栽培方法を研究する。

その2: 対象微細藻は窒素固定藍藻と高付加価値微細藻

先の「夏の停滞期における循環湖の断面構造」を水田に当てはめると、水田の湛水部分は好気層で土壌より下の部分は嫌気層です。ここで微細藻の立場から好気層を見ると、ここは藻類、藍藻の生き

る場です。深さは湖とは異なり 10cm 程度ですが、CO₂、O₂、光の濃度変化、温度変化などは同じ傾向を示します。光合成の場合は若干異なり、水稻は栄養塩と水は水中から摂取しますが、光合成そのものは空気中に出た葉で行います。栄養塩は稲の根は土壌中にあるので、栄養塩の摂取は嫌気層から摂取するというのが適当かも知れません。あるいは厳密な区分など必要ないのかも知れません。

考えてみれば稲だって日中は光合成で炭水化物を生産して、O₂を出し、夜間は呼吸をして CO₂ を放出する訳だから、嫌気層と好気層とか極めて近接していることは間違いありません。埼玉県でヘマトコッカスを栽培した時の経験ですが、前日まで青々としていた栽培槽が翌日見ると無色透明になったことがあります。よく見ると、ヘマトコッカスがすべてワムシに変わっていたのです。自然界で藻類・藍藻の住む嫌気層は動物プランクトンにとっても格好の住処です。農薬を使わない水田は、豊年エビ、どじょう、蛙、ボウフラにとっても格好の住処です。気が付けば、空にトンボが飛び、ツバメも飛んでいます。微細藻が食物連鎖の一次生産者であってみれば、当たり前のことです。

初めに戻り、光合成の栄養塩の窒素から始まり、食物連鎖のピラミッドの全ての生物を包含する生物群を考慮し、我々が必要とする食料生産を最大にすることがマイクロアグリカルチャーの目的だと考えるのが正しいと思います。もう一度夏の停滞期における循環湖の断面構造をご覧ください。嫌気層と好気層との境に光合成細菌が突出して高いところがあります。このような条件の所はきっと大変面白いところに違いありません。

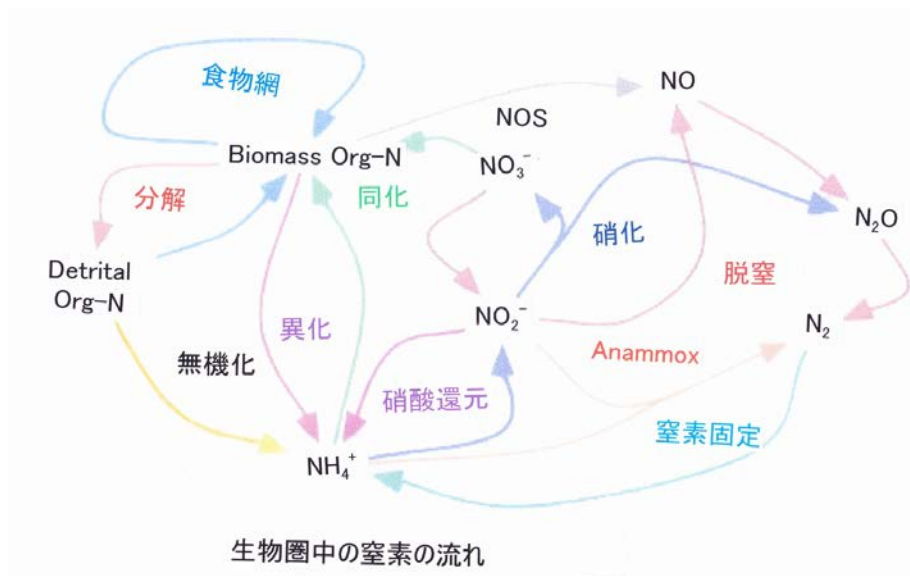
まずは、水稻と、肥料と、抑草剤とを考えてマイクロアグリカルチャーを始め、副産物として、綺麗な水や、どじょうや、つばめの住む自然を享受しようと考えました。炭酸ガスの固定も大変重要な副産物です。

生物界の窒素の流れと、モデル水田プランを添付し、話を終えることにします。

次ページの図は嫌気層と好気層の間での窒素の挙動を示します。(東京大学大気環境研究所海洋化学部門 HP より引用) 机の上に金魚鉢を置き数ミリ束ねた炭素繊維を入れしばらくすると、炭素繊維の周りで嫌気層と好気層が現れます。中心の一本の炭素繊維の周りの粘液質の生物フィルムが形成されその表面は好気層ですが、生物フィルムの中に酸素濃度の変化が現れ、炭素繊維の表面は、嫌気性です。薄い生物フィルムの中で、窒素は下の図のあらゆる形態をとることができます。かつて化学工学を学んだ話題提供者からすれば、広大な東京湾で、酸欠の海、青潮が発生しあさが死ぬなど随分理解しにくいことでしたが、自然界でこのような事象は日常茶飯事のようにです。ご存じなかった方のために、Anammox(Anaerobic Ammonium Oxidation)とは嫌気性アンモニア酸化反応です。通常好気条件下でアンモニア酸化細菌・亜硝酸酸化細菌がアンモニアを硝化し、嫌気条件下で脱窒細菌が N₂O を N₂にまで脱窒します。

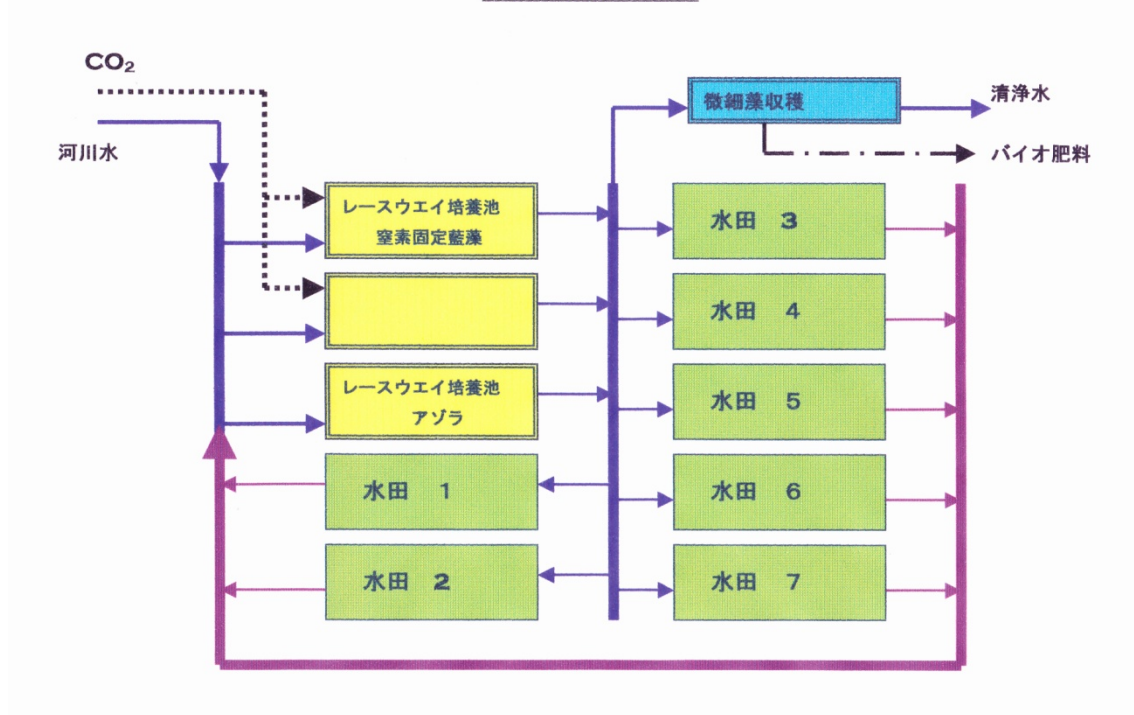
モデル水田プランは、第 6 回 Greenhouse Gas Control Technology(2002,Kyoto)での話題提供者の発表からの引用です。当時の計算書を見ると、次の数値が出てきました。

玄米の生産性:	1.4g/m ² /日
アゾラ(オオアカウキクサ)の生産性:	0.3gN/m ² /日
肥料必要量(Nとして):	0.03gN/m ² /日



米の生産過剰で、水田の30%が休耕田となっています。水田は構造改革で30mx100mが標準となっています。30mx100mはレースウェイ(Race Way)としても格好の形状です。3ヘクタールの水田を10区画とし、7区画を水稻用とし、残りの3区画を微細藻用に割り当てたものです。肥料用には1区画を割り当てれば十分です。もはや化学肥料は不要です。先に、90万ヘクタールでおよそ1億トンの炭酸ガスが固定できると述べましたが、休耕田のみならず、水稻を生産した後の水田で微細藻を栽培したらどれほどの炭酸ガスが固定できるか、検討してみたいと思います。

モデル水田プラン



このモデルで黄色の部分と、青色の部分が微細藻活躍の場です。緑色の水田で水稻を生産しますが、排水はマニにフォールドに集め、黄色の微細藻培養池に循環します。循環水に含まれる残留栄養塩によって窒素固定藍藻や、アゾラを栽培します。用途記載のない池は、高付加価値微細藻だって生産できます。黄色の池は、残留栄養塩を使用しますので、排水処理設備の役割も果たします。青色の収穫設備は微細藻収穫池ですが、ここからの排水は魚が住めるようなら最高です。微細藻による排水処理設備は現在アメリカに 5,000 基稼働しています。別の機会に微細藻による排水処理設備の話題提供をさせていただく機会があるかも知れません。

水稻が必要とする窒素量は、アゾラが供給する窒素量の 1/10 ですから、上述の水田モデルで水田 1 区画分で十分です。抑草剤の必要ありません。

先に、微細藻で何ができるか考えましたが、お気付きのように、微細藻には大きく2つの役割があります。一つは、健康食品を生産するなど、直接生産された微細藻を使う役割、もう一つは、海洋での微細藻のごとき人間活動の結果排出された汚染物質や、大気中に排出された炭酸ガスを炭水化物に変えることです。樹木・草本・微細藻を比較し最大の生産量を誇る微細藻がいかに地球にとって重要か、地球温暖化による異常気象が連日起こる昨今、何が本当に重要か考える時だと痛感しております。

参考文献

1. 除草剤を使わないイネづくり、民間稲作研究所編、農文社
2. 藻類の生理生態学、基礎微生物学 9,培風館
3. SAJINF70,内部資料
4. 光合成細菌、学会出版センター
5. Yoshi のブログ 2012-2-25
6. Y.Ikuta, MICROAGROCULTURE--:BIOFIXATION OF CO₂ USING NITROGEN-FIXING MICROALGAE IN RICE FIELDS
7. Y.Ikuta, J.Weissman, J.Benemann, CARBONDIOXIDE UTILIZATION-MICROALGAE BIOFIXATION, Technology Vol75, 2000