

《総説》

農業環境と農業教育

—私の研究を振りかえって—

矢 吹 萬 寿*

本誌より原稿の依頼を受けた際に、内容は「農業環境」あるいは「農業教育」といった問題ではどうかという話であった。そのいずれも私が農業研究の道を歩み始めて以来50年間、もっとも腐心してきた課題であり、今もまだ考え続けている問題でもある。

この機会に私自身の研究の経過のあらましを振り返りながら、こうした問題についての考えを述べておくことにしたい。後輩の人たちにいくらかでも参考になるところがあれば幸甚である。

I. 農業気象環境とは

生物環境とは主体たる生物を巡るすべての自然的周辺の事象を呼んでいる。植物を例としていえば、植物は発芽した後、太陽エネルギーを得て光合成反応を行って生育し、さらに開花結実して種子を作り、種の保存を図っている。その生産過程においては物理的、化学的、生物的な諸環境との間にエネルギー、物質などの交換が行われている。従って環境といっても複雑かつ多様で定常的なものではなく、時間的、空間的にも量的、質的にも絶えず変動している。一つの環境要素の変動は生物の生活に変動を与えると共に、他の環境条件にも変動を与える。また、生物の生活の変化は環境条件にも変動を与える。このように環境条件と生物とは動的にフィードバックし合いながら生態系を織りなしてい

*やぶき かずとし、元・大阪府立大学農学部

る。ただ主体といっても漠然としており、一枚の葉か、一本の植物体か、あるいは植物群落かによって環境への見方が異なる。一枚の葉を主体とすると、隣接した葉とか枝なども環境である。また植物群落について考えると、後に詳しく述べるごとく、樹冠内の一枚の葉の大きさ、葉面積密度等の差異により樹冠内の風速、風の乱れが異なるため、群落内 CO_2 拡散速度が層流拡散的であったり、乱流拡散的となり、群落光合成速度が異なってくるという興味深い現象がみられる。

このような多様な環境要素の植物への影響をどのようにして求めるかが問題になる。従来は一つの環境要素だけを取り上げ、他の環境要素は一定条件に固定し、その環境要素単独に生物との関係を求めるのが普通だった。他の環境要素についても一つずつ別個に求め、最後にこれらを総合化してきた。しかしこの方法では他の環境要素を固定することにより、その環境要素の植物への影響を制限することになり、正しい関係は求められない。従って環境条件と生物反応の関係を複雑な系として捉え、多くの環境条件を同時に統一する方法論を確立することが先決といえよう。そのためには現場で自然状態での生物の反応をよく観察し、エネルギー、物質の交換量を測定することから始める必要がある。

こうした作物と環境条件とが複雑な系である中で、農業技術はどのような方策をとっているか、これを大雑把に分けると、(1)環境、風土に適応する作物を選択すると共に、その環境に適応する品種を作出すること（育種学）、(2)作物の生産性を安定、かつ高めるために作物の生育に適する環境（適地）をつくること（農業環境調節）、(3)これら両者の間においてエネルギー、物質を栽培目的に合うよう有効に利用するよう作物自身の機能を制御すること（栽培学）の3分野になり、これらを総合化して生産性を高めることが農業技術といえよう。

太古以来の農耕文化発達の歴史を通覧すると、その形態は変わっても、その根底はすべて環境調節技術の開発に出発している。人類が農耕技術を開発して、初めて大地にエネルギーを投入して以来、エネルギーの投入量が多いほど食料生産量は増大していった。しかし同一の環境調節技術では生産性に限界があり、エネルギー量に対する生産量の増加率は次第に低下してくる。そこで人類は次

の新たなエネルギー投入形態の環境調節技術を開発して食糧増産を図ってきた。現代の課題はさらに高能率なエネルギー投入技術を開発するかということであり、またいかなる方法により環境条件と作物生産との関係について定量的かつ再現性のある結果を得るかという点にある。

さらに重要な点は、現在取り上げられている環境要素だけで果たして充分なのか、既成概念にとらわれて他の重要な環境要素を見落としてはいないだろうかということもある。いかに精密な環境調節技術を行っても、重要な環境要素を見落としては生産性は高まらず、その結果に定量性も再現性もない。後に詳しく述べるが、私らが行った「光合成と環境条件」に関する研究において、風速が光合成速度に対して極めて重要な環境要素であることが明らかになった。従来、光合成といえばその反応が光化学反応であることから、農業の分野においても光を中心とした生理的な研究がなされてきた。ところが光合成速度に風速が大きく影響することは、葉面に出来る境界層が大気のCO₂の葉面に到達する抵抗体となり、風速が強くなると葉面境界層が薄くなり、拡散抵抗値が小さくなり、CO₂の反応量（光合成速度）が大きくなることを示す。このことは従来作物生育の基本的なものと考えられてきた「光—光合成曲線」は単にある測定条件下での値であり、その植物の特徴を示すものでもないことを意味しているといえよう。

既成概念から他の環境条件を見落としていたもう一つの例として、私らが新しく見出した根圏環境問題に触れたい。根圏環境のひとつに土壤の通気性がある。いうまでもなく、通気性を高めることは根圏のO₂濃度を高め根の呼吸速度を正常に保ち、根の活性度を高める。ところがO₂濃度がたとえ20%であっても、CO₂濃度が0.3~0.5%以上になると、光合成速度は低下する。その低下率は地温に関係し、地温が低いと低下率は大きい。

これらの例のごとく、従来全く考慮されていなかった環境要素が、作物の生育に対して重要な役割を持っていることを考えるとき、今までの研究のあり方に問題があるように思われる。度々述べるように、既成概念を捨てて現場の自然環境の下でよく現象を観察し、その現象に対し仮説を立てて実験を行い、そ

の結果と仮説とを対比し正否を確かめることが必要であろう。もし両者が合っていると、その上にまた次の仮説を立てて実験を行い研究を展開していく。もし両者が合致しなければ、新たに仮説を立て直して実験を行う必要がある。そうすることにより研究は大きく展開していくに違いない。

ここで研究の方法論について興味深いエピソードを紹介したい。私が勤めていた大阪府立大学の遺伝・育種学講座教授に中尾佐助先生がおられた。『栽培植物の起源と農耕』（岩波新書）の著者であることはいまでもない。中尾佐助先生とは助教授時代から大変親しくさせていただいていた。先生の発想の素晴らしさに魅せられ、私らの講座に「中尾ゼミ」を開き、学生などと共に先生の話の聞かせていただいた。ただ私には先生の豊かな話題に対して対談できる能力がないので、もう一人関西地方の有名な先生も招待してお二人のご意見を研究室の教員、学生に聞かせて頂いた。私が初めて隊長になって「タイ国における各種植物の光合成の測定」に出かける前にも「探検」というテーマで中尾ゼミを開いた。この時は吉良竜夫大阪市大教授を討論者としてお願いした。その席で、私が最後に「結局探検とは一体何でしょうね」と訊ねたところ、「探検とはね、そこに無いものを見つけることだよ、そこに有るものは誰でも判る」との返事であった。禅問答のような返事だが、先生が度々世界各地を探検された経験から、次に調査に出かけられる地域について仮説を立て、いろいろと想像をして現地の像をつくれ、それと現地とを対比されてものを考えられる。それ故に無いもの、有るものが判ったに違いない。ただ先生は「在るものは誰でも判る」とお話になったが、これも仮説があってのことで、在るものが見つけられるようになるのは容易なことではないはずである。

Ⅱ. 方法論の会得

—我が師のこと—

私が農学の道を歩み始めたのは昭和20年4月である。農学の道に入ったといっても九州帝大の農業工学科に入学したというだけで、昭和20年といえば終

戦の年であり、入学時はまさに戦雲急を告げ、敗戦の色濃く、陰惨な雰囲気に満ちていた。陸軍演習場の奉仕に出かけたり、佐賀県下に疎開したりしたが、そこで赤痢が流行したので帰郷することになり、その途次広島に立ち寄り原爆に見舞われ、郷里の鳥取県で静養中に終戦を迎えるという、誠に悲惨な年であった。

当時大学は3年制であり、2回生から専攻分けがなされた。当時九大の農業工学科は、農業土木学、農業機械学、及び農業気象学の3講座から構成されていた。このいずれも耕地の環境調節工学ではあるが、全く異質の内容の3講座であり、いずれを専攻するか悩んだが、たまたま大学近くの書店で、大谷東平・高橋浩一郎共著『天気予報論』（地人書院）を立ち読みし、自分の進むべき道はこれだと直感し、農業気象学の専攻を決めた。

私は農業気象学講座教授室に鈴木清太郎先生を訪ね、入門をお願いした。その時先生は「20歳代の内に〈物の見方、考え方〉を会得しろ。そして35歳までに世界的な論文を書け、書けなければ君は只の男だ。そのためには何はともあれ、ハンダ付けと写真技術を身につけろ。また、タイプライターも練習しろ」といわれた。これが先生から私への最初の言葉であり、その日以来、先生が90歳でお亡くなりになる10日前の筆談まで、厳しく、かつ愛情のある指導を受けることになった。鈴木清太郎先生は東大の長岡半太郎・寺田寅彦先生の門下生で、卒業後は東北大の本多光太郎教授の助手を勤められ、その後旧制松山高校の教授をされていた。そして大正13年（1924）に寺田寅彦先生の薦めにより、九大の農業物理学教授として赴任された。

今日、大学教育はいかにあるべきかといろいろと議論されているが、その根本的なものは鈴木先生が私に話された「物の見方、考え方」を若いうちに会得することであると思っている。いずれの専門分野に移ろうとも、それに応じられるような基本的な考え方を身につけることは大切である。なお、同級生15名中農業気象学を専攻したのは私1人だけであった。

こうした物の見方、考え方を教えていただいた経験は中学時代にもあったように思う。私は昭和11年4月に鳥取県立倉吉中学校（現、倉吉東校）に入学し

た。立派な先生が多かった。その中の一人、博物学の安梅先生は夏休みを利用して、希望者を連れて自転車で、1年生は植物、2年生は昆虫、3年生は鉱石の採集に出かけられた。私もこれに参加し、植物や昆虫も採集はしたが、ルーペでみる鉱石の輝きに魅せられて、1年生の時から鉱石採集を主に行った。その時、安梅先生は私に「単に鉱石だけを集めても意義はない。その母岩と周辺の石の3個を1組にして集めろ」といわれた。これは単に鉱石採集だけのことでなく、学術研究の重要なひとつの方法論として、今日までの私の頭の中に生き続けている。

大学の実験は1学期に1課題で、最初は「広水面の蒸発量」であった。近くに大きい防火用水槽があったから、それを用いて測定しろというわけである。1日の総蒸発量はもちろん日変化も測定するために、測定装置をあれこれと苦労して製作し、1学期間毎日測定して報告書を提出した。ある日教授室へ来るよう連絡があった。「君の実験報告を読んだ。蒸発量は日射量との相関が最も高いとしている。私もそうだろうとは思いますが、現在のところそのような考え方はない」といわれ蒸発理論を丁寧に説明された。未だ駆け出しの一学生は何も知らず、そんなものかと思いつつ退出した。

それには後日談があり、昭和26年（1951）頃のことだったと思う。私は農林省農事試験場に就職しており、鈴木先生は定年後、千葉県柏市にある気象庁の気象大学校に勤務されていた。さる日先生より自宅を訪ねるよう連絡を受けた。何事かとお訪ねしたところ、先生の前の机に『英国王立気象学会誌（QJRM）』が置かれてある。「君、誠に残念なことをした。君が学生実験で広水面の蒸発量は日射量との相関が最も高いと報告していたが、あのときもっと真剣に考えるべきだった。この『QJRM』にPenmanなる男が日射量から蒸発量を求める熱収支式を提案している」といって嘆かれた。その時先生の科学者としての純粋な姿勢にひじょうに感激した。

卒業論文研究の課題は「雷雲の電気分布」で農学とは全く関係のないものであった。福岡管区気象台に雷雲の電気分布が測定できる立派な電位計があったので、それを使って雷雲の電気分布を測定しろ、ということであった。電位計

だけで雷雲の電気分布が測定できるものではなく、集電装置として直径30cm、高さ約120cmの水槽を作り、下部にパイプを取り付け、水を噴出するようにしなければならない。これには農学部の実験工場の協力をえたが、空中電位傾度は大きいが電流は小さいので、水槽の台との絶縁に苦勞した。これを農学部図書館の屋上に設置したが、観測に入ると12時間毎に水槽の水を補給しなければならないのが、当時身体の弱かった身にはつらかった。結果は従来の報告とは異なるものであったが、既成概念にとらわれた論文に纏めたことは今もなお反省をしている。

農業工学科ということもあってか、工学部での講義が多かった。整数論・微分方程式・函数論、物理学、量子力学、力学、流体力学（2年間）、電気工学等が記憶にある。これらの教科のうち理解できたものはほとんどなかったが、このような世界があるのかと視野が広がったことが最大の収穫であった。直接専門に関係する講義でなくても、基本的な講義は「物の見方、考え方」を会得するのに寄与するものと考えられる。農学科だからといって植物生理面だけが強調されてはならないように思う。

Ⅲ. 現場での方法論の会得

鈴木清太郎先生は昭和22年（1947）9月に定年退職された。教授が退官されるときは後任教授が講座編成を容易にするため、研究室全員を転出させる習慣となっていた。ところがさる日、農業工学科主任の田町教授から私に卒業後は助手に残って研究室の留守番をするよう依頼された。一方、私には2つの農業専門学校から採用したい旨の要請があった。そこで保証人であった理学部長の松浦新之助先生を訪ねた。ところが開口一番、「教授のいない研究室に一人居残ってどうなるのだ。若い時は一瞬たりとも疎かにしてはならない。農林省の農事試験場で鍛えてもらえ」といわれ、さらに加えて「留学する機会があっても今すぐには留学するな。一仕事をして物が見えるようになってからしろ」といわれた。

昭和23年3月(1948)大学を卒業し、松浦先生の言葉に従い、農事試験場(後に農林技術研究所)農業気象部に奉職した。時の場長は「農の哲学」を語られる盛永俊太郎先生であった。先生からはしばしば「農学論」の話聞く機会があり、今後いかに生きるか農学はいかにあるべきかなどを教えられた5年半であった。「変温発芽の研究」では、先生がかつて研究された時に集めておられた文献別刷りを全部戴くなど、種々ご指導いただいた。就職後しばらくして研究室長に九大の講師をしておられた三原義秋先生(後に千葉大教授)が着任され、私が直接の研究助手を勤めることになった。これにより三原先生から、現場における帰納的な方法論について厳しく指導を受けることになり、わが人生にとって貴重な研修期となった。研究対象は当時のこととて生産現場の環境調節であったが、前述のごとくひとつの仮説の上に研究を展開するよう具体的な指導を受けた。その代表的なものを1~2述べたい。

(a) 雨滴と土壤侵食に関する研究

畑地の土壤侵食は雨滴が土壤面を叩きつけることから始まる。従って先ず降雨の雨滴構成を求め、各雨滴の落下速度から降雨の落下エネルギーを求める必要があるとし、降雨中の任意の時間、雨をガラス板に受けて、これをエオジンが塗布されている濾紙に吸収させてその斑痕から雨滴の一つ一つの大きさを求め(m)、その落下速度(V)から $\frac{1}{2}mV^2$ を計算し、雨滴の採集時間とから、単位時間の降雨が土壤面を叩きつけるエネルギーを求めた。豪雨から細雨までそれぞれの降雨について、雨滴構成から落下エネルギーの経過など、約6万粒について採集して計算した。

一方土壤侵食の実験については、長方形の箱をつくり、これに土を詰め、表面流去水量(流亡土壤も含む)及び浸透水量が測定できるようにした装置を数個つくり、傾斜角を変えて降雨にさらした。さらにこれと同じものをもう1セットつくりそれぞれに土壤面1cm上に45メッシュの金網を2枚張り、雨滴を噴霧状として降雨の落下エネルギーをほとんど零として土壤面に降らせ、両者を比較することとした。

降雨が始まると直接雨に叩かせる区では、最初雨水は浸透するが、しばらくすると降雨によって表土が叩きつけられるため緻密となり、雨水浸透量は少なくなると共に、表面流去水量は多くなり、その流去水の掃く流力により土壤侵食がおこり、表土は流亡する。表面土壤が流亡すると再び浸透水量が多くなり、表面流去水量が少なくなって土壤は流亡しなくなる。このような現象が繰り返されることになる。

一方、金網を張った区では、雨滴は直接土壤面に落下せず霧状になるから、常に浸透するため、土壤流亡はおこらない。

以下の研究過程については述べないが、この研究は典型的な帰納的な方法論とってよからう。

(b) 水田水温の上昇法に関する研究

東北地方では水田の灌漑水温が低いため、温水路とか温水田を用い水温を上昇させている。より効率的な水温上昇法はないものかということからこの研究を始めた。そこで先ず小型の水田模型をつくり、その太陽エネルギー収支を測定するため、太陽エネルギーの水面反射率の日変化の測定から始めた。蒸発量の測定は精密を要することから、倍率の低い顕微鏡を用い、水面の位置を測定したが、日出後、水温や地温が温まり始めると膨張して水面が上昇するという予期しない現象にぶつかり、蒸発量は求まらない。考えれば当然のことであるが、膨張率などから修正し、1日の水田熱収支の経過を求めた。その結果太陽エネルギーを最も多く消費するのは蒸発のための気化熱であり、入射エネルギーの50%以上もあることが判った。

次の段階はそれでは蒸発を防止すれば水温はより高く上昇するだろうということになる。水面に油を撒くと蒸発は止まり直ちに水温は上昇する。そこでどのような油がよいか、ということになる。いかなる油がよいか検索しているうちにドコサノールという人工高級アルコールは単分子膜で蒸発を防止できることが判り、東大とかお茶の水女子大に専門家を訪ねた。ちょうどその頃、私は大阪府立浪速大学に転任した。その後三原先生によりドコサノールの合成は成

功された。三原先生はこの研究過程で、高所にある大きいダムとか湖の夏季水温は気温よりも低く、湖面上で凝結がおこっていることを見出しておられる。いわれてみれば「コロンブスの卵」であるが、やはり現場での観察力の問題といえよう。

(c) 保温折衷苗代の被覆材

戦後の日本稲作技術で特記すべきことのひとつは、保温折衷苗代の開発普及ではないかと思う。一農家の発想から生まれ、関係者の努力により完成し、播種期を早め、稲作が安定化した。この被覆材である油紙の光透過率を高めるには、どのような油を塗布すればよいかと本省から研究依頼があった。これについては物理学の教えるところで、紙の繊維の屈折率に近い屈折率の油を塗布すればよい。そこで各種の油を購入し、屈折率を測定した。

その後直ぐビニルフィルムが出現した。当時ビニルフィルムは風呂敷か雨合羽に使われるだけであった。その時も油紙の代用にならないかと本省より申し入れがあり、これを手がけることになった。農林省では各会社からフィルムの提供を受け、都道府県の農事試験場に試験を依頼した。油紙より容易なことを考えたところ、予想に反し、極めて面倒であった。種子は発芽しないか、発芽しても「転び苗」となり成長しない。苗床を気密性の高いフィルムで覆うため、酸素不足になるためというのが大方の意見であったが、1～2のフィルムで健全に生育しているのもあり、生育不良の原因はフィルムが太陽光により分解して塩素ガス等を出すためだろうと考えた。これに注目してくれたのが三菱モンスアントでフィルムに使用されている可塑剤、安定剤の種類と発芽の関係、あるいはフィルムの煮沸水液と発芽率などを生理部の中山治彦技官に協力を依頼して調べ、可逆剤、安定剤の種類を選択した。さらに長野県農試の蓼科試験地で3年間実地試験を行った。

これがもとで、ビニルトンネル、ビニルハウスへと発展すると共に、育苗も電熱育苗器に発展して、任意の時期に育苗が出来るようになり、それが田植機へと発展していった。

こうした現場での研究の修練を重ねていたところ、大阪府立浪速大学（現大阪府立大学）の農環境学講座の西内光先生から研究所に割愛の要請が来た。昭和28年（1953）10月に浪速大学に赴任したのだが、大学は学科の壁もなく、専門の異なる先生方とも自由に交換できて新たな物の見方、考え方を教わることができて私の第二の研究人生が始まった。

IV. CO₂ との出会い

—光合成研究の歴史—

大学卒業以来、上述のごとく農業環境調節技術の問題をとりあげて、栽培者側からの要求に応じられる環境条件づくりを仕事としてきた。しかしそこには作物との関係については全く考えられていなかった。ところが昭和35年（1960）8月より1ヶ年英国 Rothamsted 試験場に留学し、そこでCO₂ との出会いがあり、作物を栽培することとなり、わが研究人生も大きく転換することとなった。

1960年8月6日にロンドンから北へ約60kmのハーペンテンという小さな美しい町にある Rothamsted 試験場に到着した。この日から英国の農学がいかに確固とした足取りで進められているかという驚きと共に、日本の農学の底の浅さに反省させられる1年となった。試験場に到着すると早速に物理部の農場に案内された。そこで先ず最初に驚いたことは、ケール畑の横に観測小屋があり、今までに全く耳にしたこともなかった赤外線ガス分析装置が、カチン、カチンと音を立てながらケール畑内の垂直5点のCO₂濃度を連続測定し、ケール畑の群落光合成速度を連続記録しているのである。当時日本では赤外線ガス分析装置は製造されていないばかりか、何れの大学も持っていない（1962年度に名古屋大学と大阪府立大学が輸入することになったが）。漸く始まった単葉の光合成速度の測定も、化学分析法によるものであった。

私は土壌呼吸速度を測定し、Dr. Monteithの空気力学的方法による群落光合成速度の測定と共に、圃場のCO₂に関する資料を漁った。ところが1800年代からの文献が非常に多く所蔵されており、当時からの大気中のCO₂濃度の資

料もあった。またこの時初めてCO₂ enrichmentなる語を知った。後に日本に帰ってからCO₂ enrichmentが炭酸肥料と訳されていることを知ったが、これこそ農業環境調節工学の本質的なものであり、日本に帰ったら是非研究を行いたいと考えると共に、光合成に特別の関心を持つようになった。

帰国後、炭酸ガス施肥（以後このように呼ぶ）の実験を開始したところ、土壤肥料学講座の原田正夫教授から大正14年刊の籙木徳二著『炭酸肥料講座』（文久社書房）をいただいた。CO₂ enrichmentが「炭酸肥料」と訳され、大正年間に既に出版されていたことを知り、非常に驚いた。それと共に Parceval によって1800年に炭酸肥料のことが発表されているにもかかわらず、日本の教科書に全く記載されていない点について奇異の感と疑問を持った。

籙木先生はこの書を出版される前に2年間ドイツに留学され、この炭酸肥料なる農耕技術のあることを知り、文献を纏められたのが本書であり、引用文献数は実に120編に及んでいる。そして「著者はこの問題に関し、深く実験研究する機会を得ざりしを憾む。これを外国での学術上の論争として看過ごしてはならない。CO₂ 施肥する事に依って、耕作物の増産を企て得る事実などを思い合わず時に、植物体の半ば近くを構成する炭素の給源たる炭酸に就いて或種の考察が加へられなければならない筈である。然るに植物生理学、農業肥料科学が産まれて数十年の長き間、此問題が不問に附せられて居った事は寧ろ不思議に思う。実に最近の炭酸ガス肥料問題は此所に胚胎するのである」と述べられており、私の今日の嘆きは既に70年前に籙木先生によって発せられていたのである。

余談になるが、京大前総長井村裕夫先生が学士会会報、819号、1988—Ⅱに「ベルツの日記」の一部を紹介されている。ベルツはドイツより明治9年6月に来日、東京医学校（現東大医学部）にて内科医科学を教えた。ベルツは在日25周年記念講演を行っており、「科学は樹木のようなものであり、われわれ外人教師は日本人にこの樹の育て方を教えに日本に来たが、日本人は樹を育てようとはせず、果実をもぎ採る事だけを考えている」と日記に残されているということである。今日の日本人もなお、文献だ、情報だ、インターネットだと、また

コンピューターだ、モデルだといたずらに強調して、「樹を育てること」をしていないのではなかろうか、そんなことを考えている。

V. 風速との出会い

—複雑な系としての作物環境—

昭和36年（1961）8月に帰国し、早速に蔬菜学講座の今津正教授を研究代表者をお願いし、織田弥三郎君らと共にCO₂施肥実験に入った。

さて、どのような装置でCO₂施肥実験を行ったらよいのか全く判らない。とにかく幅1 m、長さ1.5m、深さ50cmの礫耕水槽をつくり、その上に高さ80cmのビニルフィルム張りの枠を置いた育成装置をつくった。装置の長い方の側からCO₂濃度を異にした空気を送り込み、反対側で出るようにして、その換気率は1分間に1回とした。従って平均風速は2.5cm/secとなる。このような育成箱を5基つくり、ビニルハウス内に設置した。

その実験結果であるが、驚異的というか、常識では判断できないほどの結果であった。例えばフダンソウについていえば、乾物量への効果は、夏季では3000ppm区は対照区（普通の空気：約300ppm）に対し約5倍、冬季の実験では6000ppm区で約2.7倍であった。またコカブについては9000ppm区は対照区に対し、全量で約7.3倍、葉量で3.3倍、であり、特に根量では18.6倍という増収を得た。

1963年度の園芸学会で上記結果を発表したが、千葉大園芸学部藤井研究室でも同じ会でCO₂施肥の研究発表をされた。双方ともCO₂施用の効果はあるとしたが、千葉大の方は私たち程の効果はなかった。この両者の違いについて多数の質問を受けたが、双方とも答えることができない。ただたんにCO₂濃度だけの調節結果であり、両者を比較する基準がない。そこで他の環境要素が調節できる植物育成装置を用いて実験する必要を感じ、文部省の科学研究費の交付を受け植物育成装置の戸外用4基、人工光源付1基を設置した。人工光源付のものは、温度、湿度の調節はもちろん、床面で6万ルクスという高照度の

人工光源を取り付けた。これは当時としては日本最高のものであった。育成装置は閉鎖系であるから、CO₂ 調節装置を必要とするが、当時日本では製造されておらず、熱伝導方式のガス測定ブロックを用い、CO₂ 調節装置を開発した。

こうして当時としては最先端のグロスチャンバーを用いてのCO₂ 施用実験であり、その成果を大いに期待した。供試材料として、先に用いたフダンソウであったが、発芽後葉に「小皺」が出来て生長が悪い。人工光源の光質によるものとも考えたが、そうでもない。中尾佐助先生にも加わっていただきあれこれと検討して、温湿度調節のためにチャンバー内の空気を循環させるが、その流速が強すぎるのではないかということになり、風速を弱めてみた。一見正常な生育になったが、よく観察すると「生育ムラ」がある。これは光強度のムラかと考え光強度分布を測定したが、そうではなくてこれも風速ムラによるものであることが判った。風速が作物生育に大きく関与しており、風速は生育の重要な制限因子であることが浮上してきたわけである。従来、風速といえば強風害などが問題になったが、ここでは弱風が生育を支配していたわけで、それでは一体正常な生育とは何かということになった。ここで葉面境界層が浮上してくるが、この問題は後述することとする。それと同時に大きな問題は、ファイトロンとかグロスチャンバーを用いて行っている実験結果は一体何を意味しているか、その結果を用いて結論を出すとき大きな誤りをおかすことにもなりうるという結論に達した。温度とか湿度を調節するといっても、風を上から吹き下ろしたり、床から吹き上げたりして、風というものは環境要素としては考えられておらず、前記のような実験結果をきたしたわけで、何はともあれ、風速と植物生長との関係を明らかにすることが最重要な問題として浮上してきた。

VI. 光合成速度を支配する葉面境界層

作物の生育や光合成速度が風速によって影響されることが判ると同時に私の頭に浮かんだことは、葉面境界層である。1954年に水面からの蒸発量を測定する方法として、水面上に出来る表面境界層の厚さから求めようと考えたことが

あった。表面境界層とは物体に風が吹くと空気はその面との摩擦によってその面上に風速の遅い気層が出来る。これを境界層と呼び、主風速の0.99までの気層をもって表面境界層の厚さと定義している。葉の場合は当然ながら葉の両面に出来る。一般の表面境界層は面の風上側一前縁から風下に行くにつれて厚くなり、風速と共に薄くなる。大気条件、表面の状態により、境界層は層流状態になったり、乱流状態になる。葉の場合は風が葉面に平行に吹いたり、或角度を持ったり、風にそよぐ場合などがあって葉面境界層は葉の両面によって複雑に形が異なる。その構造によって物質（CO₂、水蒸気、熱等）の拡散係数が異なってくる。水面での蒸発量の測定には、面上に出来る層流境界層の厚さが測定できれば、水蒸気の分子拡散係数から計算することができる。

境界層の厚さを測定するにはシュリーレン写真機を用いればよいが当時手元になかったので、農学部内の研究室を訪ねたところ、農芸化学の米沢研究室に設備されていた。しかしこれはコロイド化学用で、私らの研究にはこれを改造する必要があり諦めざるを得なかった。ところが幸いに、米沢教授よりシュリーレン写真機を用いた一連の研究は終わったので譲ってもよいとの連絡を受けた。早速に譲り受けて葉面境界層の測定を始めた。普通では葉面境界層を目で見ることができないが、シュリーレン写真機ではこれを撮ることができる。風が葉面に平行に吹いた場合、角度を持った場合における境界層の形が具体的に目で見ることができる。そうすると色々なことが想像され、仮説が生まれてくる。別の幸運は学内食堂で訪れた。同じテーブルで食事をとっていた相手が航空工学科の西岡氏（現在教授）で、低風速での表面境界層の研究を行っているとの話、それでは葉面境界層の内部構造を解明してほしいと協力を求めた。彼は小さな風洞をつくと共に、葉面に出来る薄い境界層の気流の構造を測定するために直径2ミクロン、長さ3ミリの熱線風速計を自作して測定した。主流が層流の場合、あるいは乱流の場合の境界層内の流れの構造が明らかになるとともに、風向に対して葉が角度を持つ場合については葉の先端からできる境界層内の渦の長さは、主流が乱流の場合は層流の場合よりも短いことなど、種々の現象が明らかになった。葉と風との関係は非常に複雑で、風が葉面に平行に

吹くことはごく稀で、角度を持つか、多くの場合は風に揺れている。これを解析するためには、上記の方法では不十分であった。ちょうどその時、航空工学科を卒業した原菌芳信君が我が研究室に研究生として入り、引き続き大学院へと進学した。そこで循環型の水槽をつくり、任意の波動も起こせるようにした。循環水の垂直な一つの断面を電気分解して気泡をつくり、流れを可視化して写真撮り、葉面境界層の実態が明らかにされるようにした。これにより葉が揺れる場合についても写真に撮れた。こうして葉面境界層が明らかにされると、光合成速度について、上述のごとく、色々と仮説が生まれてくる。即ち、収量を多く穫るには小さい葉がよく葉幅も狭い程よいなどと考えていたところ、東北大の角田重三郎教授らが水稻多収穫品種の葉幅は狭いことを報告された。

葉面境界層は風下に行くにつれて厚くなるから、葉長が長いほど、光合成速度は小さくなることが判った。即ち、同一葉でも風向に対して横に置くか縦に置くかによっても異なることが判った。そこで同じ葉を用い、小さな長さの異なるアクリルの箱をつくり、葉の両面に被せ、同化箱のように風を通して光合成速度を求めると、箱の長い方が平均光合成速度は小さくなった。これをさらに簡単な方法で確かめるため、濾紙を同一面積ではあるが幅とか長さなどを色々と形を変えたものをつくり、その濾紙の蒸発量を測定すると、風向方向の幅が狭いほど蒸発量が多いことが容易に確かめられた。このように風と葉との関係によって光合成速度が異なることは葉面の位置により光合成速度の分布ができていたことが推定される。しかしこれをいかにして求めるかが次の問題であった。ある日、原菌君ら大学院生数人がわが家で欲談をしていた時、「小学生の植物図鑑にも大変立派な内容が書かれているよ」といって息子が小学生のとき使った図鑑を持ち出してあれこれ雑談しているうちに、光合成の項の所で、光合成反応を見る方法としてヨウ素反応を用いることが書かれている。その瞬間「これだ」と興奮した。というのはデンプン葉を用いてヨウ素反応を求めれば、葉面の光合成速度の分布が求まると考えたからである。発想というものは思いがけないときにおこるもので、デンプンに対するヨウ素反応の発色から光合成反応を知ることは最も幼稚ともいえる方法で、誰でも知っていることであ

る。早速デンプン葉であるインゲン葉を用い、無風状態、風を葉面に平行に吹かせ多場合、角度を持った場合などについて葉面の発色パターンから葉面の光合成速度の分布を定性的ではあるが、微細な点まで知ることができた。

VII. 大気から葉緑体への CO₂ の拡散

風が吹くと葉面に境界層ができて、その厚さや構造により、光合成量が支配されることを述べてきたが、大気中の CO₂ がどのような経路で葉緑素に到るかという問題については、1900年ごろから取り上げられていた。経路には拡散に対する抵抗があるとして、電気のオームの法則を適用し、まず気孔を中心とした抵抗を考え、ついで葉の外部および葉肉の抵抗が加えられてきた。このような考え方は「光合成のガス拡散抵抗理論」と呼ばれ、光合成を「反応量」という視点で考えようとするものである。

私が葉面境界層に注目して実験を行っていた1964年頃だが、極めて興味深い論文に出合った。それは京大の郡場寛先生が紙で葉の形をつくり、その下方から線香を燃やしてその煙の流れから蒸散の状況を観察されているものであった。それは何と1938年（『植物及動物』6：11）のことである。

葉面境界層は単に CO₂ 拡散量についてだけでなく、熱伝達量や蒸散量にも影響を及ぼしている。従って葉内水分含有量に関与し、それが気孔開度（抵抗）とか葉肉抵抗値にも変動を与え、この面からも光合成量に影響を与えることとなる。例えば低湿度の下で風速を高めていくと、光合成量は次第に多くなるが、ある風速から低下しはじめる。あるいはまた光強度は蒸散量を増し、強光の下では葉内水分量は減少する。ある風速以下になると光強度の低い場合の方が光合成量が多くなる。このように葉緑体への CO₂ 拡散量は、その経路が複雑な系で組立てられている。それを一応整理したものが拡散抵抗理論といえよう。

さらにまた、自然環境下においては、葉は風向に対してある角度を持ち（迎え角）、風に揺れるのが普通の状態である。それにより葉面境界層の形、構造は複雑に変化して拡散抵抗も異なり、光合成量も変動する。いろいろな条件の

下で光合成量を測定してみると迎え角は約 20° 、揺れの周期は大略2サイクルの時に最高値を示した。揺れる場合は静止葉の約40%も多かった。そこで温室内で、キュウリを1列に並べて植え、これをヒモで連結して、その一端から1サイクルで揺らして栽培したところ、揺らぎ始めて1週間後にはその効果が現れ始め、生育は促進され収穫も早まり収量も多かった。

従来、農業環境とか生物環境といえば、作物なり植物の機能促進の立場から考えられてきたが、上述の事例のごとく、純物理的な機構により、光合成量の増加なり生育を促進する機能があることを強調したい。

Ⅷ. 複雑な群落光合成量と風速との関係

前章までは光合成量と環境との関係の基本的な考え方として、単葉についての結果を述べてきたが、現場ではそれが自然植生であれ、栽培植生であれすべて群落状態である。かつて国際生物事業計画（IBP）が行われ、私もこれに参加したが、さらに吉良竜夫先生の薦めによりマレーシアのパソ熱帯雨林に出かけた。そこで熱帯林の生態に魅せられた大阪府大、大阪市大、兵庫医大の者達が調査隊を組み、タイ国の熱帯モンスーン地帯の各種植生の群落光合成量の測定に出かけた。

湿潤季では各植生ともに光合成量は風速に比例して増加し、風速を増すと次第に日射量に比例するようになり、日本の各種植生と同様な傾向を示した。

乾燥季になると、大気湿度とともに土壤水分含量も低下して「しおれ係数」以下になるために、光合成量は非常に少なくなった。その典型ともいえる熱帯乾燥常緑樹林では、日射量が $0.25\text{cal}/\text{cm}^2/\text{min}$ 以上になると光合成量は減少し、日中は呼吸量の方が多くなる。しかも風速が高いほど光合成量は少なくなり、湿潤季とは逆になることを確かめた。

次に興味ある問題は、湿潤季における光合成量と風速との関係が植生によって異なることである。即ち、水田とサトウキビ畑では、 CO_2 が乱流拡散で葉面に達しており、熱帯乾燥常緑樹林では層流拡散であることである。樹高32mも

ある乾燥常緑樹林が層流拡散とは常識では考えられないことであるが、葉面積指数が6.0もあり、葉が樹冠部に集中し、樹林内の風速が1 m/sec 以下であることによるものと考えられる。これに対し、水田とかサトウキビ畑の葉面積指数はそれぞれ1.3および2.2であり、またともに葉は細長く風が吹くと前後左右に揺れ動き、葉面境界層は薄く、大気乱流拡散の効果が大きいものと考えられた。この点は栽植密度の問題にとって極めて重要であり、特に温室内の風速とか、前述の如き強制的な揺れを起こすなど、種々の対策が考えられるところで、研究分野の領域を越えて英知を出し合うべき今後の課題ではなからうか。

IX. 第三の科学としての農学

盛永俊太郎先生は「農学は当初から総合性の最も高い生物社会の研究を本領として課せられていたものであるが、事実において、近年までは殆どが要素的、解析的研究に終始した憾みがある」（『私と農学』、1985、農文協）と述べられ、また「私は農学を農の角度からみた極めて広い生物全体を包括する生態学であると考えています。生態学は応用を目的とする学問ではありませんが、関係の学問であるがために何かを応用しようとする場合にも欠くことの出来ない学問だと思います」（九大農学部創立50周年記念講演集、1971）と話されている。

柏祐賢先生（京大名譽教授、京都産業大学前学長）はさらに積極的に「農学、工学、医学などの諸科学と自然科学および文化科学とを対比、考究すると農学、工学などは情報の理論と組立の理論とを基礎とするもので、自然科学と文化科学などとは異なるところの独自の第三の科学領域に属する学問である」とし、さらに「農学は自然の生物界を媒介とする人為の目的的な営為体系に他ならず、それは決して単なる〈在る〉世界ではなく、〈作る〉過程的秩序である」とされている（『農学原論』、1962、養賢堂）。

こうした諸先生のご意見は、従来われわれが農学を一般の自然科学と考え、分析的、解析的な方法論によって研究を行っていることに対する直接的な批判であり、さらに今日では多くが現場を離れて研究室が中心となり、自然現象の

観察から遠ざかり、農業本来の姿を見失いつつあるのではないかと問いかけてられているようにも考えられる。やはり度々述べたごとく、現場で現象を観察し、自らが新しい資料を作ることをまず考えるべきではなからうか。物理学は演繹の最たるものと思ってきたが、ノーベル賞学者朝永振一郎先生は『物理学とは何だろうか』（岩波新書、1975）の中で「物理学とは、われわれを取り囲む自然界に生起するものの現象—ただし主として無生物に関するもの—に存在する法則を、観察事実によりどこを求めつつ追求すること」と述べておられる。生物生産を対象とする農学こそ現場での観察事実に拠り所を求めなくて、何の成果が期待できるであろうか。農学こそ「帰納」の最たるものといってよく、「第三の科学」という認識のもと、今後農学独自の研究方法を確立すべきものとする。

自然現象を複雑な系として捉える必要性を、早くから説かれた科学者がいる。その一人は寺田寅彦博士である。先生の科学論は今もなお出版されているので多くは触れないが、その随筆の中で興味深い話題は「金平糖の角」についてである。今日金平糖をみかけなくなったが、1547年フランシスコ・ザビエルと共に日本にもたらされた南蛮菓子である。金平糖は直径約1.5mの底の平らな鍋を少し傾けてゆっくり回転させ、底から温めながら、芥子の実を核として砂糖液を振りかけてつくる。出来上がるのに1週間もかかるという。それはともかく、平らな鍋を回転しながらつくるにもかかわらず、マーブルのように丸くはならないで角が生えてくる。しかも角の数が28~30本と、ほぼ等しいという。まさに複雑な系であり、未だ解かれていない。

寺田寅彦先生によると、「普通の理は安定系、平衡系、静止系であるが、金平糖は不安定の理、不均衡の理、運動的進行の理」とし、さらに生物については、「生物はすべて不安定な生命体である。理外の理に支配されているが、よくよく研究すればすべて動的の真理であって、理外でも何でもない。これからの学問も思想もこの方向で動いていくものである」と述べられている。こうした複雑な系の現象について、最近極めて興味深い本に接する機会を得たのは田口義弘氏著『砂時計の七不思議』（中公新書、1995）である。詳しい紹介を略

しておくが、その中で「日常生活の中に新しい物理の萌芽」があると述べられるが、農学もまた農業現場にこそ問題の萌芽があることで共通しよう。

いずれにしても農学は複雑な系の現象を対象にする学問であるが、その方法論の確立に向けて農業研究も農業教育も今後に期待するところが非常に大きいように思う。