

## 植物栄養学の戦後の展開

北海道大学農学部 田中 明

### I. 農業の展開と土壤肥科学

土壤肥科学は農業生産の向上を目的としているために、その変遷を考えるに当たっては、まず農業そのものの変遷からみていくべきである。

敗戦（1945年）直後には日本では食糧が極度に不足していた。それゆえ、(i) 乏しい化学肥料を有効に使って、単収を高め、米の増産を計ること、(ii) 都市の戦災者や外地からの引き揚げ者を収容して、食糧を増産するために未利用地を開拓することが土壤肥科学者の重要な研究課題であった。

米の増産については、戦争中からの塩入松三郎らの研究成果によって、水田の土壤化学が体系化され、それを背景にしつつ、(a) 窒素肥料の肥効を高めるための研究が行われ、全層施肥が普及すると同時に、水稲に対する追肥技術が確立され、その研究過程で、水稲の生育経過に関する栄養生理学上の知見が集積され、(b) 秋落対策が実施され、その研究過程で、湛水条件下に土壤中に生成・集積する硫化水素や有機酸の水稲根の生理作用、とくに養分吸収能に与える影響が研究され、また、水稲における硅酸の意義も明らかにされ、さらに(c) 戦前からの窒素肥料であった硫安に加えて、戦後の化学工業の情況変化によって、尿素や塩安が登場したために、これらの肥料を能率良く使用するために多数の研究が行われた。

一方、開拓地関係については、(a) 土壤調査が各地で実施され、その結果が開拓計画の立案に用いられたとともに、(b) 未利用地には火山灰地が多かったために、火山灰が盛んに研究された。そして火山灰は作物に対するリン酸供給力が弱く、肥料として施与した水溶性のリン酸を不溶化する力が強いことと関連して、火山灰に含まれる非晶質アルミニウム化合物の研究が行われ、また熔融リン肥が発明され、多量に使用されるようになり、さ

らに、開拓地には(c) 酸性土壌が多かったために、土壌の酸性・石灰施与の研究が行われ、また、(d) マグネシウム、マンガン、硼素などの欠乏も問題になり、微量元素に関する関心も高まった。

その後、肥料工業は順調に復興し、硫安や過リン酸石灰の生産量は1950年ごろにすでに戦前の最大生産量にまで復旧し、朝鮮戦争、サンフランシスコ講和条約の発効などを経て、日本の工業力は上昇し、尿素、塩安、さらに化成肥料の生産が加わって、窒素肥料は重要な輸出品目の一つとなった。このような資材の出回りと、技術の向上によって、戦前3 t/haを中心に上下していた水稲の全国平均単収（玄米表示）は1960年について4 t/haを越えるに至った。

かくして、日本経済はいわゆる高度成長時代を迎えたのであるが、この状況下に農林省は農業の転換を策定し、(i) 機械の導入などにより、省力的な農業を指向し、水稲などの機械多植の研究が盛んに行われ、(ii) 一方では畜産物の消費増大を念頭において草地酪農の振興が試みられ、Soil-plant-animal関係の見地から土壤肥科学的にも草地に関する研究が進められ、また、(iii) 一方では、発展途上国の食糧、とくに水田土壌の研究や米の増産に対する技術援助も日本の土壤肥科学研究者の関与するところとなった。

この間、日本では土地改良・土壌改良が盛んに行われ、また、肥料工業は設備の大型化を計るとともに、輸出の拡大に加えて、政府の政策に助けられて、価額が安定しており、肥料や農業の多量使用技術が普及し、水稲の全国平均単収は1967年には4.5 t/haを越えるに至った。そして従来との状況とは一変して米の生産過剰が問題になり、1969年には農林省は米の生産抑制のための水田作付制限・畑転換政策をとるに至ったのである。また、水稲の作付制限や消費の拡大によって蔬菜の栽培が盛んになったが、連作障害が頻発するようになった。

さらに 1960 年代の工業のあまりにも急速な展開は、各種の問題を社会に及ぼし、1960 年代の終りごろには水俣病、イタイイタイ病、四日市ぜんそくなどに代表される公害問題が表面化し、1970 年代には土壤肥料学研究者によっても環境保全のための多くの調査が行われ、鉱山・工場から排出される重金属 (Hg, Cd, Cr, As 等.) や農薬による土壤汚染、工業・生活排水や農地に対する施肥による水質汚濁、さらに大気汚染、また下水処理に伴う活性汚泥、食品工業廃液、畜産廃棄物 (糞尿) の肥料としての利用にも関心が向けられた。

さらに一方では社会一般の環境問題に対する関心が高まったなかで、日本農業は化学肥料のみを多量に使用し、単一作物を連作してきたために、土壤が劣化したと考える人たちが巷間に多くなり、地力に対する関心が高まった。そのため農地における物質循環の合理化や有機質肥料に関して、土壤肥料研究者の間でもいろいろの議論が行われた。

やがて、1973 年にオイルショックが起こり、またこれと連動して、リン鉱石などの輸入価額が上昇し、また米国の農産物輸出規制などにより、日本の農業の背景も一変した。すなわち、それまで永年にわたって日本の農家は農産物に対して相対的に安価な化学肥料を十分に用いて、農業資材の多投により最高可能単収を目標に作物を栽培してきたのであるが、オイルショック後、日本の肥料工業は完全に国際競争力を失い、農業は順次省資源的に転換せざるをえない状況に直面した。その意味からも作物養分の圃場内における循環を念頭においた堆肥の利用、豆科作物による窒素固定などに関心が向けられるようになった。

このような背景の下に 1975 年ごろから、文部省や農水省が中心になって、より能率的なエネルギーの生産と利用の観点から (a) 農耕用化石エネルギーの効率向上、(b) 光合成による太陽エネルギーの有効利用、(c) 根粒菌やアゾラによる窒素固定、さらに (d) 植物のバイオマス生産などに関する研究が組織的に行われるようになった。

しかし、その後、日本の貿易収支はますます不均衡の度合を強めていったために、米国を主として諸外国からより多量の農産物を輸入することを強要されるようになり、日本の農業は将来どの場面に活路を見出したら良いかを厳しく問われる状態に立ち至ったわけである。

## II. 肥料学から植物栄養学へ

Liebig (1840 年) が無機栄養素説を提唱し、Sachs (1860 年) や Knop (1860 年) が水耕培養法を確立する

に至って、植物栄養の研究が科学の一分野として認知された。しかし、その当時のこの分野における研究は、つねに土壤中の無機元素と植物の生育との関係に焦点を合わせて展開していたという意味では肥料学と称すべきものであった。

日本における肥料学は 1881 年から 11 年間駒場農学校で Kellner が肥料に関する研究を行ったことにより開始され、その後、Loew が植物体内での蛋白質の生成や植物生育に対する Mg・Ca の関係などを研究し、その門下生である鈴木梅太郎がアスパラギンに注目しつつ植物の窒素代謝の研究を行い、「肥料学原理」(1902 年) を出版したことによって、定着したといわれる。

その後わが国の土壤学者、肥料学者の数は次第に増加し、土壤肥料学会が設立され、1927 年に学会誌が発行された。この会誌の初期には、大豆粕、菜種粕、魚粕、レンゲ、堆肥、硫酸、リン酸肥料などについての肥料試験の結果が集録されている。なお、この時期に窒素固定に関する研究もかなり行われていた点が注意を引く。1930 年代になっても、窒素、リン酸、カリ質の化学肥料や、各種粕類、堆肥、緑肥などの施用に伴う肥料有効成分の土壤中での行動や肥効、また酸性土壤に石灰を施用したときの作物収量の変化など、施肥と収量とを直結させた古い肥料学的論文が主体であった。

しかし、やがて水耕法を用いて作物の各種必須元素の要求量や生育時期別の各元素の収穫物生産効率に関する研究が行われるようになり、春日井新一郎 (1939 年)、木村次郎ら (1943 年)、石塚喜明 (1932, 1947 年) などによって、その成果が総括されたことは日本の植物栄養学の体系化に寄与するところが大きい。

また、珪酸の植物に対する効果や、植物の窒素源としての  $\text{NH}_4\text{-N}$  と  $\text{NO}_3\text{-N}$  の比較、肥料としての硫酸塩と塩化物の比較、農薬の使用や鉱毒などとの関連で Cu, Pb, As などの作物に対する害作用、水田に硫酸を施用したときに発生する硫化水素による水稻の障害 (大杉繁、川口桂三郎, 1939 年) など研究対象の幅が次第に拡大し、肥料三要素の施用が水稻の葉の光合成能に及ぼす影響を調べる (三井進午, 1938 年) など、無機元素の効果をたんに収量と直結させるのではなく、施肥と収量の相互関係を植物生理学的に解明する方向を示しつつ、1945 年に敗戦を迎えた。

筆者は 1947 年に大学を卒業したが、その当時主要な大学の農芸化学科には土壤学講座とともに肥料学講座があった。北海道大学では土壤肥料学講座 (官制上は農芸化学第一講座) のみであった。いずれにしても、その当時大学においては植物栄養学という学問は認知されてい

なかったわけである。ただし、農林省の農業技術研究所では、1950年に作物栄養科が設置された。また筆者の学生時代には紙不足のために教科書が不足しており、川島祿郎「肥料学」(1929初版, 1948第8版)、松木五樓「総合肥料学」(1939初版, 1947第3版)、三須英雄「肥料学」(1942)などを苦勞して入手したが、これらの内容は各種粕類、緑肥、人畜糞尿などの特性・肥効や堆肥の製法などの記述にほとんどの頁が使われており、文字通り肥料学の教科書で、植物栄養学とは縁遠いものであった。そして、その後、E. Truog 編の *Mineral Nutrition of Plant* (1953) や J. Bonner 著の *Plant Biochemistry* (1952) などを入手するに及んで、肥料学から植物栄養学へと時代が移り変わりつつあることを感じたものである。

筆者が大学院に入り、土壤肥料学会に出席し始めたのは、学会そのものが戦後再建されて間もないころで、京都大学の奥田 東、東京大学の三井進午、東北大学の藤原彰夫などの大先生方もまだお若く活発で、直属上司の北海道大学の石塚喜明先生はいうに及ばず、これらの諸先生から、研究発表に対して、種々ご教示・ご批評を受け、また、農業技術研究所の高橋治助科長などからもご意見を聞けたことなど思い出が多い。

また、筆者の大学卒業当時は、分析法が未発達であったのに加えて、物資および研究費が乏しく、ひどく研究がやりにくい時代であった。しかし、その後順次状況が改善されていき、新しい分析法の開発、予算の増額が、研究の進展にどれほど役立つかを身をもって体験した。

最も手近な例をあげると、カリの分析は塩化白金が入手困難なために亜硝酸コバルト法によっていたが、やがて炎光分析法が教室に入り、より少量の試料で、より早く、より正確に定量ができるようになり、昔苦勞して分析したことがばかしくなるほどであった。カルシウムの定量も硝酸カルシウムとして沈殿し、過マンガン酸カリで滴定していたが、やがて EDTA 法となり、1960年代後半になって原子吸光法に変わり、それまでとは問題にならないほど簡単に定量できるようになった。そして、原子吸光法が一般化したことによって植物と関係のある広範な元素が迅速に定量できるようになり、微量要素や有害重金属の研究が著しく促進された。そして最近では、走査電顕と連動させたX線分析装置が開発され、無機元素研究の新分野が開けつつある。

なお、微量要素の研究に関連しては、もっと手近な問題点として、戦後次第にわれわれが購入する試薬の純度が高まり、さらに蒸留水に代って脱塩水が使用されるようになったことが重要な意味を持っていた。

同位元素が手近なものとして利用できるようになったことも研究の進展に大いに役立った。放射性同位元素としては、 $^{32}\text{P}$  や  $^{45}\text{Ca}$  がよく使われたが、とくに  $^{14}\text{C}$  は多方面の研究目的のために使われた。なお、 $^{14}\text{C}$  使用と関連しては、光合成能測定のために空気中の  $\text{CO}_2$  濃度測定用の赤外線ガス分析機が安価に出回ったことも研究の進展に大いに助けになった。一方、安定同位元素である  $^{15}\text{N}$  が1950年ごろからすでに利用され始めたが、通常の実験室では分析ができなかったために一般には使用されなかったが、1970年代に入って熊沢喜久雄が開発した発光分析法が一般化し、 $^{15}\text{N}$  の使用が飛躍的に普及した。さらに窒素代謝の研究に関連してはペーパークロマトグラフィが一般に使用されるようになり、さらにアミノ酸分析機が出回ったことや、窒素固定の研究にアセチレン還元法が開発されたことも重要な意味を持っていた。

敗戦より1960年ごろまでの土壤肥料学会内における植物栄養学関係の研究の動向をみると、その当時米の増産が急務であったために水稲が試験作物となった例が多かった。そして秋落による根腐れとも関連して、根の養分吸収の機作に関する研究が開始され、いろいろの側面から精力的な研究が進められ、根に関する多くの生理化学的知見が集積し、その結果を三井進午が「植物の養分吸収同化に関する生理化学的研究」として集約したことは、この時代の研究の一つの大きな成果であった。また、作物の増収に関係の深い窒素について多方面から研究が行われたが、たとえば水稲に対する窒素追肥の要否を葉中のアスパラギンの存否で判定する方法(尾崎 清)が提案された。

さらに、作物の収穫物はその作物の発芽から収穫までの全生育経過を通じての所産であり、単収向上のためには、生育に伴う各種物質、とくに窒素化合物・糖・でん粉の作物体内における集積また茎葉から子実への転流経過を明らかにする必要があるとの考えのもとに精力的な調査が行われ、水稲の生育経過に伴う物質集積に及ぼす窒素施肥の影響(高橋治助, 村山 登ら, 1955)が明らかにされ、また、石塚喜明と筆者は一方では水稲個体は多数の葉で構成されているとする見方と他方では実際圃場では個体が群落を構成しているという見方から研究を進め、高い技術レベルにおいては、作物収量の制限要因は太陽エネルギーであり、太陽エネルギーの利用効率の向上が単収向上の道であると考えた。

いずれにしても、この時期に肥料学から植物生理学・植物生化学へと研究の視点が移り変っていき、研究対象の捉え方も、個体レベルから、器官、組織、細胞レベル

へと向ったが、他方では個体レベルから個体集団(群落)へと向い、群落と環境との関連で問題を捉えようとする視点も生れた。

このような視点の変化は関連学会の動きとも連動していた。すなわち、1959年に植物生理学会が設立された。また、作物学の研究者たちが分析機械の発達に助けられつつ植物生理学・生態学の色強い研究を指向し、主として水稻を対象にいわゆる“耐肥性”や“生理病”の研究に成果をあげるに至って土壤肥科学者の意識も変化せざるをえなかったわけである。

すなわち、土壤肥科学会では1954年から *Soil and Plant Food* の誌名で欧文誌を発行していたが、1961年には誌名を *Soil Science and Plant Nutrition* と改名し、さらに1965年ごろには各大学で肥科学講座を改名して、東京大学では植物栄養学・肥科学としたし、北海道大学ではそれまで土壤肥科学講座であったものを土壤学講座と作物栄養学講座に分離した。かくして、植物栄養学は大学においても認知されることになったのである。

### III. 植物栄養学の現状と将来

1970年代に入ってから、日本の農業的背景は急速に変化し、たんに高い単収をあげるためだけの集約的農業技術が必ずしも求められなくなり、さらに、社会の農学に対する要求も多様化し、植物栄養学は、(i)植物生化学、(ii)植物無機栄養学、(iii)作物栄養学へと分極化していった。

(i) 植物生化学：植物の必須元素が植物の生育にどのようなかかわり合いを持っているかを明らかにするためには、各元素の生化学的役割を明らかにしなければならない。ある必須元素の多少が作物収量にどんな影響を与えるかを単純に調査するより、その元素の生体内における役割を求めたほうがより本質的であり、もしその役割が明らかになれば、作物の制御が容易になるはずである。この明解なる理由から植物栄養学者のなかに植物生化学的な研究を行う人たちがいることは当然である。そして、その人たちにとっては、土壤肥科学会より植物生理学会で研究成果を発表したほうが、反響もあり、有益な助言も得られ有利である。そして、その積み重ねの結果として、有能な研究者が少なからず土壤肥科学会を去り、再び帰って来なかった。これは土壤肥科学会にとっては一時的には損失であったかもしれないが、長期的には植物栄養学に寄与するところも大きいと考えたい。

(ii) 植物無機栄養学：(a) 公害との関連で問題となる元素(例：Hg, Cd, Cr等)、(b) これまで農業上の重要性が見落されていた元素(例：欠乏—水稻のZn,

S, 小麦のCu; 過剰—水稻のI等)、(c) 従来から問題が指摘されていたが研究が不十分であった元素(例：酸性土壌のAl等)などについて、定量法を含めた研究手段の進歩とともに社会情勢の変化にもなる問題の発生に対応して、研究対象を見出し、問題を解決していく方向である。この方向の調査研究は将来ともに要望されていくことであろう。とくにわが国の研究者が発展途上国とかかわり合いを深めるに従って、より研究の間口が広がると予測される。このことと関連して一例をあげると、著者は吉田昌一(故人)と初めてパキスタンで水稻の亜鉛欠乏を発見した(1969)が、その経験で日本の稲を見直すことによって、日本でも亜鉛欠乏が発生していたことを確認し、発展途上国の援助が自国のためにも役立つということを痛感した。

植物無機栄養学の研究では、(a) 土壌中での元素の挙動の解明が必要で、その意味で土壌化学との連係で問題が解決される可能性が大きく、(b) より本質的な研究を進めようとするそれぞれの元素についての生化学的研究が必要になることに留意すべきである。

(iii) 作物栄養学：たとえば、日本では米の生産が過剰であるから稲の単収向上を計る必要はないと考えないで、単収を高めて、余った農地を稲作以外に活用すると考える。一方、発展途上国では食用作物の単収増が急務である。また、化石エネルギーが不足したときにそれをバイオマスで補うためには植物の乾物生産の増強が必要となる。このように考えてみると、従来と同様に、栽培法、とくに施肥法を適正化して作物の太陽エネルギー利用効率を高めて、単収を向上するための技術を開発するために作物栄養学が必要である。作物栄養学においては、(a) 光合成・呼吸・乾物生産、さらに、窒素固定も含めて、これらの相互関係の解明、さらにいわゆる source-sink 関係の解明が必要であり、また、(b) それらの自然環境的(土壌・水・光・温度)・人為的(無機栄養・水・生理活性物質)・遺伝的制御が必要であり、(c) 最終的には多くの研究成果を作物栽培技術として組み立てなければならない。(a) では植物生化学や植物生理学が、(b) では気象学・土壌学、肥料製造学・有機化学・育種学などが、そして、(c) では栽培学や農業工学が必然的にかかわり合いを持つことになってくる。しかし、こう考えてくると作物栄養学と作物学とどこが違うのかと問われても返答に窮することになってしまう。

以上、現在の植物栄養学の3つの流れと、それぞれの流れが、将来発展するためにかかわり合いを持つことになる学問分野を例記してみた。すなわち、植物栄養学は

農学の各分野がともに追求している目的達成のための一翼を担っているわけであって、植物栄養学だけを取り出してその進むべき方向を述べるということはあまり意味のないことである。また、植物栄養学自体のなかにも基礎的な研究と実際技術に直結している研究があるわけである。

筆者はすでに 40 年近く土壌肥料学会の会員として活動してきたが、農芸化学会とは、ほとんど会費を払うだけの会員にすぎず、両学会の関係は必ずしも密接であっ

たとはいえなかったと思っている。一方、1930 年代には恩師の石塚喜明先生の水耕培養で得た実験結果の報告が農芸化学会誌に掲載されているのをみると、両学会が遠い存在となっていたことが不思議に感じられる。しかし、この 10 年ぐらい、農芸化学会の会員方が主体となった研究組織に土壌肥料学会の植物栄養学関係者も加わる機会がぼつぼつ出てくるようになり、農芸化学会が身近な存在となった気がして、将来両学会がさらに協力の度を深めていくことを期待している。