

肥料学再考

大山 卓爾

新潟大学農学部 教授

肥料は農業生産に不可欠でありながら、現在、「肥料学」は学問としてあまり高く評価されていない様に思われる。1881年から10年間、駒場農学校においてドイツ人教師オスカー・ケルネルは日本人研究者と協力して肥料試験を行い、農芸化学の初期の発展に大きな功績を残した。その後も、肥料学は、土壤肥料植物栄養分野の要として食料生産を基盤から支える学問として大学、国や地域の試験場等の主要研究課題であった。世界的にも持続的作物生産への土壤、肥料の重要性は増しており、今年オーストラリアのブリスベンで開催された世界土壤科学会議でも大きなテーマであり、資源の3つのR (reduce, reuse, recycle) の必要性が強調された。我が国では、現在、肥料学から派生した植物栄養学が、植物生理学、分子生物学などの分野も含めて大きく発展し、学生にも人気があるのに比べて、肥料学はやや地味な存在である。現在、農学部において、植物栄養学と肥料学の講義を担当していることから、本稿では「肥料学」と「肥料」の意義についてもう一度見直してみたい。第19回肥料学セミナーで、『植物栄養学からみた肥料』という課題で講演をする機会があり、宇都宮大学で肥料学を担当されておられる関本均教授とともに、季刊肥料に紹介した。

新潟大学において、肥料学は、農学部応用生物化学科学生2年生を主な対象とし、当該学科約40名、その他農業生産科学科、生産環境科学科合わせて30名程度が受講している。人文学部や教育学部の学生が聴講する時もある。本講義では、新潟にある肥料工場の工場長に非常勤講師を依頼し、講義の半分と肥料工場見学を御願ひしている。肥料工場では、港での原料の船からの積み降ろしから、リン酸肥料製造工程、製品の袋詰めなどを見学でき、学生にも好評で

ある。

講義概要では、肥料学について次の様に紹介している。「農作物を栽培するには種々の養分の供給が必要であり、土壌からの供給だけでは不足しがちである。また、農耕地では収穫物を持ち去るため土壌養分が減少して行く。土壌養分の不足を補い、作物の生育を改善して、収量や品質を高めるために土壌または植物に与えられる資材が肥料である。肥料学は、肥料に関連する諸問題を研究する科学であり幅広い内容を持つ。本講義では、大山が肥料の基礎を概説し、非常勤講師が化学肥料工業について解説する。また、肥料工場の見学を行なう。」

選択科目であることもあり、テストはしないでレポートを課している。レポートでは肥料に関する書物を読み、内容を紹介と感想を書かせている。学生には書物を自由に選ばせているため、さまざまな書籍のレポートが提出される。比較的多いのは、新潟大学農学部で出版した、「土からのラブレター」という書籍で、教員 20 名が自分の専門分野の内容紹介や農業や土に関する思いを各 10 ページ程度の短文にまとめた書籍である。また、肥料や植物栄養学について分かりやすい一般向け書籍を多数出版されている京都大学名誉教授の高橋英一先生の本も多く読まれている。特に、「肥料の来た道帰る道—環境・人口問題を考える—」（研成社）は、肥料の歴史が分かりやすく紹介されており、多数の学生に感銘を与えている。それ以外に学生が選ぶ書物は、有機農業に関する本や農業技術書など多岐にわたる。

レポートに見られる肥料に関する感想としては、「これまで土や肥料についてほとんど知らなかったし、臭いとか汚いというイメージしかなかったが、本を読んで肥料の重要性を認識した。」、「化学肥料と有機肥料を上手に使う必要がある。」、「有機農業をしている人の熱意に感動した。」などが書かれている。

肥料学は、単に自然科学だけでなく、人間の経済的営みともかかわるため、農業の歴史的発展や人口・食料・環境問題と肥料の関係を学生に考えさせる様にしてしている。以下に、肥料を軸とした農業の推移を辿ってみたい。

都市のコンクリートの建物に暮らしていると、地球は人間が支配しているような錯覚に陥る。しかしながら、生物の現存量を炭素重量（単位 10^3 Mt C）で

比較すると、地球上の植物は、1000-2000, 動物は 2, そのうちヒトは 0.14 であると推定されている。地球は植物がもっとも繁栄しており、私達ヒトも含めて動物は、一次生産者であり光合成（二酸化炭素、水、光）と窒素, リン、カリ、他の無機養分からあらゆる体構成成分を作れる植物に栄養と酸素供給などの環境の維持を全面的に依存している。一方、土壌は世界平均では 深さ 18cm にも満たない地球の薄い皮膚であるが、土壌の養分供給能と有機物分解作用により、植物生育と環境保全が維持されている。

人類は、700 万年程前にアフリカで誕生し、約 6 万年前に世界へと広がっていった。人類が農業を初めたとされる約 10,000 年前には、世界人口は約 500 万人しかいなかった。地球人口は、2000 年前（西暦 0 年）には約 3 億人、200 年前（西暦 1800 年）には 10 億人、100 年前には 16 億人と増加して来たが、20 世紀の 100 年の間に 62 億人と爆発的に増加した。21 世紀に入り 10 年が経過した。世界人口は 2010 年 10 月現在で 69 億人となり、2050 年には 91 億人を超えると予想されている。アジアには現在約 40 億人、全世界の人口の約 6 割が暮らしており、今後も増加傾向にある。増え続ける世界人口に対して、耕地面積の増加は極めて困難であり、単位面積あたりの作物収量の増加が必要であるが、同時に農地や自然環境の保全にも務める必要があり、作物生産一辺倒では生態系のバランスを維持できない。

一方、日本においては、1 万年前には、2 万人、2000 年前には、60 万人、200 年前には、3200 万人、100 年前には 4000 万人であったが、西暦 2006 年に 1 億 2774 万人でピークに達し、その後人口減少に入り、2050 年には 9000 万人にまで低下すると予測されている。食料自給率は、戦後一直線に低下を続け、先進国中最低であり、カロリーベースで 40% しかない。食料の半分以上を海外に依存するという異常な状態である。今年 10 月に新潟市で開催された第 5 回食の国際会議では、『世界各国の食の供給確保の現状報告』がなされ、東京大学の生源寺眞一教授から基調講演があった。そのなかで、「戦後日本の自給率の低下は前半の昭和の時代は、食生活の変化により、後半平成の 20 年は農業が衰退した事による。」との解析があった。また、農業の担い手の平均年齢が 65 歳と、農業従事者の世代交代が進んでいない事も日本農業の危機である。

人類が定住して農業を営みはじめて以来、土壌の肥沃度、すなわち作物生産性の維持は、持続的な農業の成立のために欠くことができない重要な課題となった。もっとも原始的な農法である「焼き畑」は、原野を焼き払い草木灰や土壌に貯えられた養分を利用して作物を栽培する農法である。2、3年で耕地の土壌養分の供給が低下したり雑草に覆われたりするため、別の場所に移動する必要がある。このため焼き畑は「移動式農法」ともいわれる。近年のコーヒーやオイルパーム生産などの商業作物生産のための大規模かつ全面的な森林伐採とは異なり、本来の焼き畑農法は森林の一部のみ利用し自然生態系による植生と地力の回復を基盤としているため持続可能な農業である。ただし、植生が回復するまでに数十年かかるため、耕地面積の10倍以上の森林面積を必要し、人口密度が低い場合にのみ成立する。近年まで、アジア、アフリカ、ラテンアメリカ等世界各地で焼き畑が行なわれ、1973年には、焼き畑の面積は世界の利用可能な面積の30%にも達し、2億5000万人が焼き畑に依存して生活していた。ラオスなど東南アジアの山岳地域では伝統的な焼き畑が行なわれて来たが、最近では人口増加により以前は40年程度あった休閑期間が短縮されほとんど休閑がなくなっている。

人々が定住して農業を営むようになると、肥沃度の維持は極めて深刻な問題となった。西欧では、主に畑作と牧畜が営まれていたが、畑作では連作障害回避と地力維持のため、畑を二分し作付けと休閑を交互に繰り返す「二圃式農法」が行なわれた。これは、休閑による自然の養分回復を期待したものであるが、それでも養分は減少し、徐々に収量が低下した。やがて、畑を三つに区分し、コムギ、ライムギなどの冬穀物、オオムギ、エンバク、ソラマメ、エンドウなどの夏穀物と休閑地を組み合わせる「三圃式農法」が確立した。三圃式農法は、耕地の周りに村落共有の永久放牧地をもち、畜産排泄物を利用して耕地の地力維持を図った。その後、さらに、「穀草式農法」が採用され、1800年頃からイギリスのノーフォーク地方で始まった、「輪栽式農法」（ノーフォーク農法）が普及した。これは、圃場を四分割し、冬穀物、夏穀物、根菜類（飼料用カブ）、マメ科牧草を植えて輪作した。畑で飼料を生産する様になり、共同放牧地と休閑地をなくした。この農法により飼料が十分に確保され、家畜の冬季舎飼が可

能になった。同時に、家畜糞尿からの堆きゅう肥生産量が飛躍的に増加し、耕地の肥沃度の維持が可能となった。また、空中窒素固定を行なうマメ科牧草の栽培により地力が増加した。輪栽式農法の普及により、コムギの収量は1750年に1t/haであったものが、1850年には1.7t/haに増加した。

水田稲作を中心とするアジアでは事情は全く異なる。通常、畑作物では連作障害が起こるのに対し、水田稲作は例外的に連作が可能である。フィリピンのルソン島北部のバナウェにある世界遺産のライステラス（棚田）では、2000年もの間稲が連作されていることは有名である。水田稲作では、湛水により土壌病原菌の繁殖が抑えられる事から連作障害が起こりにくいこと、ランソウや窒素固定細菌や灌漑水からの養分供給があることなどから、連作が可能であり、無肥料でもある程度の収量が確保できる。しかしながら、水田においても収量を維持するためには、持ち出した養分の補給が必要であり、我が国でも花咲翁さんの説話にあるように灰の肥料効果や、桃太郎のおじいさんが山へ柴刈りに行く話の様に村落共同の山林（入会地）から草葉を集めて肥料として利用するなど、農民のたゆまぬ努力により田畑の肥沃度が維持された。特に、人糞尿を肥料として利用し、養分の耕地→作物→食物→人→排泄物→耕地の循環がなされていたことは我が国の大きな特徴といえる。江戸時代には、人糞尿が商品として流通し大切な肥料として役立っただけでなく、人口百万を抱える当時世界一の大都市の衛生状態を良好に保つのに大きく貢献した。これは同時代のヨーロッパにおいて、パリの道路に人糞尿が投げ捨てられたり、テムズ川がし尿により黄色く汚染されるなどの不衛生な状態に陥り、しばしば、コレラやペスト等の大流行を引き起こしたことと比べられる。日本の人糞尿を利用した農業は、植物の無機栄養説を確立したドイツの農芸化学者リービヒからも絶賛された。

近代、鉱物肥料、化学肥料の利用は大きく農業を変えた。リービヒによる無機栄養説の確立により、それまで長く信じられていた有機栄養説が覆された。植物は何を栄養としているかについて、アリストテレスは、「土壌中にある成分が植物体を構成する。」と考えた。その後、植物の栄養について、パリシーの「灰説」、バンヘルモントの「水説」、ウッドワードの「土説」、ワーレリウスの「腐

植説」などが提案された。農学者のテアは、自らの農場でノーフォーク農法を実践するとともに農業教育を行ない、講義の記録を「合理的農業原理」として著し、農業技術から農業経営まであらゆる分野の農学の発展に寄与したが、テアも植物の栄養は腐植であると考えていた。この「腐植説」は、農民にとっても堆きゅう肥などの有機物が地力の維持に不可欠であり、有機物の投入により作物の生育収量があがるという実体験から、万人が納得しやすい説であり長い間疑う事なく信じられて来た。

リービヒにより、「化学の農業および生理学への応用」が出版され、科学論争としては、植物の栄養素としての腐植説が克服され、「植物は、光合成と無機栄養だけで生育できる。」という「無機栄養説」が確立された。また、リービヒは、「作物は肥料としてあたえた養分量の増加に比例して増収するが、一つの養分でも不足すると他のすべての養分があっても作物の生育は制限される」という「最小養分律」を唱えた。

当時、ヨーロッパでは、リン酸等養分の不足する土地が多く、骨粉が肥料として珍重された。当初はシェフィールドの刃物工場の製造工程で刀やナイフの柄として使った骨や角の削りかすが肥料として使われたが、その供給量はわずかであった。原料不足のため、墓場から人骨を掘り出したというおどろおどろしい伝説もある。その後、イギリスのルイスとギルバートは、1843年に過リン酸石灰の製造を開始し、はじめて化学肥料が大規模に製造販売された。リン鉱石は、そのままでは、溶けにくく効果が出にくいため、酸で処理する事によりリン酸肥料の溶解性を向上させた。二人は世界初の農業試験場であるロザムステッド農業試験場の創設者としても有名である。

19世紀初頭、フンボルトの新大陸の探検で、ペルーからグアノがヨーロッパへもたらされた。グアノは、ペルー語で「肥やし」を意味し、ペルーではインカ時代から肥料として使われていた。グアノは、海鳥の排泄物や遺骸が堆積して化石化したもので、肥料成分としてリンと窒素を含む。また、同時期に、チリのアタカマ沙漠でチリ硝石が発見され、鉱物窒素肥料として世界に輸出された。長年、チリの硝石貿易は輸出総額の半分以上を占めた。今年、チリ銅山の落盤で、33名の鉱夫達が地中深く生き埋めになり幸い奇跡的に全員が無事救出

されたが、鉍物輸出は古くからチリの経済を支えて来たといえる。また、同時期、ドイツのシュタッスフルトでカリ鉍床が発見されカリ塩が肥料として利用されるようになった。

19世紀末、人口が増加する中、チリ硝石等の肥料資源の枯渇が予想され、イギリス学術協会のウィリアム・クルックス会長が、「空中窒素から肥料を作る事が急務である。」との演説を行った。硝酸塩は、火薬の原料でもある事から、軍事上も極めて重要な戦略物資であった。

あまり知られていないが、工業的窒素固定の最初の成功は、1901年にドイツのフランクによりカルシウムカーバイドに窒素を付加して石灰窒素肥料が作られたことによる。石灰窒素は、カルシウムシアナミドを主成分とする肥料で、現在でも100年前とそれほど変わらない製法で製造されている。我が国でも新潟県青海町において、電気化学工業が現地で生産される石灰石と自前の水力発電施設を使って石灰窒素肥料の製造を続けている。石灰窒素は、土壌中で尿素を経てアンモニアになり植物に利用される。一方、土壌中で一部が重合してジシアンジアミドとなり、アンモニアが硝酸に酸化される過程（硝酸化成）を抑制する作用をもつ。硝化抑制効果により、アンモニアは負電荷をもつ土壌粒子表面に吸着固定され、硝酸の流亡を防ぐ事が出来る。また、毒性があることから使用には注意が必要であるが、一方、殺菌作用や植物生育を調節する効果など面白い副次的な効果もある。また、石灰窒素は悪酔いを引き起こすため、アルコール中毒の治療薬としても使われている。

その後、ドイツでハーバーとボッシュにより、高温、高压条件で、触媒を工夫し、窒素ガスと水素ガスからアンモニアを合成する製造に成功した。1913年に、オッパウに大規模な工場を建設し肥料製品の出荷を開始した。これにより、エネルギーさえあれば、空気から窒素肥料を無尽蔵に製造する事が可能になり、その後の作物収量増加による20世紀の人口増加を支えられる事となった。しかしながら、一方で、アンモニアと硝酸製造の成功が、ドイツに第一次大戦を決意させる誘因になったという歴史の影の面もある。今年出版された「大気を変える錬金術、ハーバー、ボッシュと化学の世紀」に詳しく紹介されているが、二人ともに優れた科学者、技術者であり、20世紀の世界の食料供給に大きな貢

献をしてノーベル賞も受賞したが、一方、二人ともユダヤ人でありながらナチスへの協力を余儀なくされる等、晩年は不幸であった。また、ハーバーとボッシュにより作られた肥料工場は、肥料製造だけでなく、化学コンビナートの原型となり、20世紀の化学工業時代の基礎を作った。

20世紀、化学肥料、化学農薬の使用、農業機械の使用と農地基盤整備等の近代化により、農業はその生産性を大きく向上させた。1900年と2000年の日本の農業を比べてみよう。耕地面積は、1900年510万ha(田280万ha、畑230万ha)、2000年487万ha(田266万ha、畑221万ha)とあまり変わらない。総人口は、1900年4,400万人に対し、2000年12,702万人と3倍近く増加しているが、全勤労者に対する農業従事者割合は、1900年の60% (1,500万人/2,400万人) から4.5% (286万人/6,353万人) に大きく減少した。100年前までは、有機肥料、人力を主体にした農業であったが、現代農業では、機械、肥料、農薬などを用いて単位面積あたり収量を画期的に増加させ、また、労働生産性も飛躍的に高めた。特に化学肥料の利用と緑の革命で使われたイネ品種IR8のように多肥栽培に適する品種育成により、単位面積あたりの収量は飛躍的に増加した。2009年のヨーロッパの小麦収量は、平均5.4t/haで、ドイツでは、7.8t/ha、フランスでは、7.4t/haに達している。また、水稻収量は、アジア全体で、4.3t/ha、日本6.5t/ha、中国6.6t/ha、インド3.0t/haと画期的に増加している。今や中国をはじめ東南アジアの国々でも化学肥料を大量に使用し、増え続ける人口を養うため作物の増収をめざしている。

化学肥料は速効性があり、窒素、リン、カリなどの養分の自由な供給のコントロールが可能であるという利点がある。また、化学肥料はコンパクトであるため、粗大で重たい堆肥など有機物の施用よりも労働が軽減される。しかしながら、一方で、過剰または不適切な化学肥料の使用や、有機物を圃場に施用循環しなくなったことにより農地の地力の低下がおこった。更に、土が固くなる、塩類集積、土壌生物の変化等、土壌の物理性、化学性、生物性の劣悪化が進行した。また、窒素肥料の過剰投与は、硝酸による地下水汚染や河川や湖沼の富栄養化、亜酸化窒素による地球温暖化の促進等、農業による環境汚染問題の原因となった。また、し尿や家畜糞尿、食品廃棄物等多量の有機物が農業に循環

利用されず、下水処理や焼却処分等、新たにエネルギーを消費し環境に負荷を与えている。

このような化学肥料にのみ依存する農業への反省ならびに、消費者からの安全安心な食物の要望から有機農業への期待が高まって来た。しかしながら、有機農業（特に完全無農薬、無化学肥料による有機栽培）は多大な労力を必要とし農家に大きな負担となり、作物の収量や品質が不安定であるため、100年前のように、すべての食料生産を有機農業で賄う事は不可能であろう。化学肥料と有機物の循環利用を促進して、環境保全型の農業をめざすことが現実的であろう。土壌肥料学会において、このような観点から一般向けにパンフレット「肥料をかしこく使おう！豊かで安全な食料の生産のために」を出版し、学会ホームページにも掲載している。

肥料についても、一般に、基肥窒素の利用率は10%程度しかなく、大部分が流亡や脱窒によりロスしている。施肥形態（緩効性窒素肥料、被覆肥料、石灰窒素、有機質肥料）、施肥位置（深層施肥、側条施肥、全層施肥など）、施肥時期（基肥、追肥）など、作物別、地域別、土壌別にきめ細かく検討し、効率的な肥料の利用を図る必要がある。

被覆尿素は、速効性の尿素を樹脂膜で包む事により、尿素の流出速度を制御できる肥効調節型肥料である。水稻栽培では、被覆肥料を苗箱に全量入れる事により、田植え後の追肥を省略できる。また、筆者らの研究では、ダイズ栽培において、被覆尿素や、石灰窒素を深層（地表下20cm）に施用することにより、子実の収量、品質の向上が得られた。また、この施肥法は、地表部近くに多く着生する根粒の窒素固定を阻害せず、促進することが確認された。これらの施肥法は、肥料利用率が40%-60%と極めて高く、環境への負荷も小さいことが確認されている。

また、今後は緑肥の利用や根粒菌や菌根菌等の微生物を利用したバイオ肥料の利用の促進も環境保全型農業の確立に重要である。文部科学省の事業として行なわれているアジア原子力フォーラム（FNCA）のバイオ肥料プロジェクトは、アジアのバイオ肥料の利用を推進している。アジア各国でも、バイオ肥料の利用による化学肥料や化学農薬の低減をめざしている。根粒菌や菌根菌の利

用はすでに多くの国で行なわれている。フィリピンや中国では、作物の根の生育を促進し、肥料の減量が可能なアズスピリウム菌接種剤が大量に生産配布され使用されている。また、土壌やリン鉱石中の溶けにくいリンを溶かして植物に供給するリン溶解菌や、植物の病原菌の感染をおさえる拮抗菌の利用も広がりつつある。かつては日本の各地で田圃にレンゲが広がる風景が見られたが、現在はほとんどみられない。しかしながら、ヘアリーベッチ等のようなマメ科植物や水生シダ植物のアゾラなどによる緑肥は、肥料に匹敵する窒素を供給できるため改めてその活用に期待が集まっている。

現在、地球人口は増加し続けているにもかかわらず、耕地面積の増大は期待できない。また、人間活動による地球の温暖化（気候の暴走）や塩類土壌、地下水の枯渇、酸性雨などがさらに農業生産を脅かしている。このような状態において、50年後、100年後の、人類に食料を供給すると同時に、自然環境も保全するには、限られた耕地で作物の安定多収と地力の維持を行なう必要がある。そのためには、有機物の循環と化学肥料の合理的な利用をめざしてさらなる研究と技術開発が必要である。肥料学は過去の学問ではなく、これからの人類の食料生産、環境保全、資源利用に深くかかわる極めて重要な農学の一分野である。

参考にした文献

熊澤喜久雄著：改訂増補 植物栄養学大要、養賢堂、1995年

大山卓爾：新潟大学農学部における植物栄養学・肥料学の教育と研究、季刊肥料, 86号、31-41 (2000)

関本均：肥料学の多面的機能、季刊肥料、86号、42-53 (2000)

五十嵐太郎編：土からのラブレター、新潟日報事業社、1997年

高橋英一著：肥料の来た道帰る道—環境・人口問題を考える—、研成社、1991年

久馬一剛著：食料生産と環境、持続的農業を考える。化学同人、1997年

福田雅夫他著：微生物からのメッセージ、21 世紀に活かす道：産学社、2001 年

相川哲夫訳：アルブレヒト・テア著、合理的農業の原理、農文協、2007 年

吉田武彦訳解題：リービヒ、化学の農業および生理学への応用（北海道大学出版社）2007 年

トーマス・ヘイガー著、渡会圭子訳、白川英樹解説：大気を変える錬金術、ハーバー、ボッシュと化学の世紀、みすず書房 2010 年

日本石灰窒素工業会編：石灰窒素 100 年技術の歩み、2001 年

大山卓爾・ティワリカウサル・高橋能彦：ダイズ、二つの問題点をクリアした二つの方法、深層施肥と根粒菌接種、現代農業、別冊。2009 年 7 月

肥料をかしこく使おう！豊かで安全な食料の生産のために：日本土壌肥料学会ホームページ <http://www.soc.nii.ac.jp/jssspn/kashikoihiryo.pdf>

バイオ肥料プロジェクトホームページ:

<http://www.fnca.mext.go.jp/bf/introduction.html>