

要 約

人を健康にする施肥

トム・W・ブルーセマ、パトリック・ヘファ、ロス・M・ウェルチ、
イスマイル・カクマック、ケビン・モラン¹

人類の大半は施肥による食料増産にその生存を依存している。

肥料は食料の質・量の両面に寄与する。

その種類・量・時期・場所について、適切な方法で適切な作物に施用すれば、
人類の健康と幸福に大きく貢献する。

1948年以来、世界保健機構（World Health Organization；以下、WHO）は人の健康を「完全な肉体的、精神的および社会的に幸福な状態であり、単に疾病または病弱が存在しないことではない」と定義している。この定義によって、人の健康管理には、医学領域以外の、ほかの多くの学問分野も含まれるようになった。ノーマン・ボーローグ博士の1970年のノーベル平和賞の受賞は、農学が人の健康にかかわるこの定義と強く関連することを示すものであった。

肥料使用の増加は単位面積当たりの収量を高めて農作物の全供給量を増やすとともに、食料の品質と必須微量元素の含量にも寄与する。肥料反応性のよい農作物の生産が増えたことで、栽培作物の組み合わせにも、人が必要とする栄養を充たす食品の組み合わせにも変化が起きている。

人は食料がないと生きてはいけない。また農業には食料生産以上の使命がある。それは人の健康を育むことであり、施肥はその使命を支える。世界の人口が急増している状況のなか、すべての人が健康で活動的な生活を全うするには、この健康を育むという点に配慮した持続可能な農業発展と施肥が必要である。今でも肥料は、人の健康に大きな役割を果たしているが、それをさらに拡充させる機会は今なお多く存在する。

本書を通じてよく使われる略語は、x～xiページ参照のこと。

1 T.W. Bruulsema is Director, Northeast North America Program, International Plant Nutrition Institute, Guelph, Ontario, Canada; e-mail: Tom.Bruulsema@ipni.net
P. Heffer is Director, Agriculture Service, International Fertilizer Industry Association, Paris, France; e-mail: pheffer@fertilizer.org
R.M. Welch is Lead Scientist, Robert W. Holley Center for Agriculture and Health at Cornell University, Ithaca, New York, USA; e-mail: rmw1@cornell.edu
I. Cakmak is Professor, Faculty of Engineering and Natural Sciences, Sabanci University, Istanbul, Turkey; e-mail: cakmak@sabanciuniv.edu
K. Moran is Director of Yara's Foliar and Micronutrient Competence Centre, Yara Pocklington (UK) Ltd, Manor Place, Pocklington, York, UK; e-mail: Kevin.Moran@yara.com

持続可能な発展には、農場における生産性や収益性という直近の重要な関心を超えて、人の栄養改善を実現する農業組織の体制づくりにまで踏み込むことが必要である。本書は、人の健康に影響する作物の品質に関する複雑な連鎖について、正しい知識の提供を目指している。肥料業界の「4R施肥推進運動（The industry's 4R Nutrient Stewardship）—適肥、適量、適期、適所に対応した肥料の施用」は、その「適切（Right）」の定義に、人の健康との関連性を含めることが必要とされている。

食料・栄養安全保障

食料安全保障：すべての人がいかなる時にも、十分、かつ安全で、栄養のある食料を物理的、社会的、経済的に入手可能であるときに達成される。栄養安全保障とは、人が健康で活動的な生活をおくるために、食料の栄養素を十分に利用吸収可能な状態を意味する（FAO, 2009）。

1961～2008年の間、世界の人口は31億人から68億人にまで増えた。同時期に世界の穀物生産は9億tから25億t（**図1**）にまで増えた。それを可能にしたのは、3,000万tから1億5,000万t以上まで増加した世界の肥料消費であった。肥料消費がなければ、世界の穀物生産量は半分に留まっていたと思われる（Erisman et al., 2008）。

地上生物圏に窒素やリンを新規投入する量を倍増することで、肥料は人類の食料確保に重要な役割を果たした。しかしすべての人に食料が行き届いた訳ではない。2009年においても、世界の人口の6分の1が、慢性的な飢餓の恐怖にさらされている。FAOによると、人類は2050年までに2005～2007年の70%増の農業生産量が必要とされる（FAO, 2012）。今後の遺伝子改良で期待される収穫増も、すべての植物栄養成分（肥料）を有機物もミネラルもできるだけ効率よく使って、収奪された肥料成分を補充できるかにかかっている。

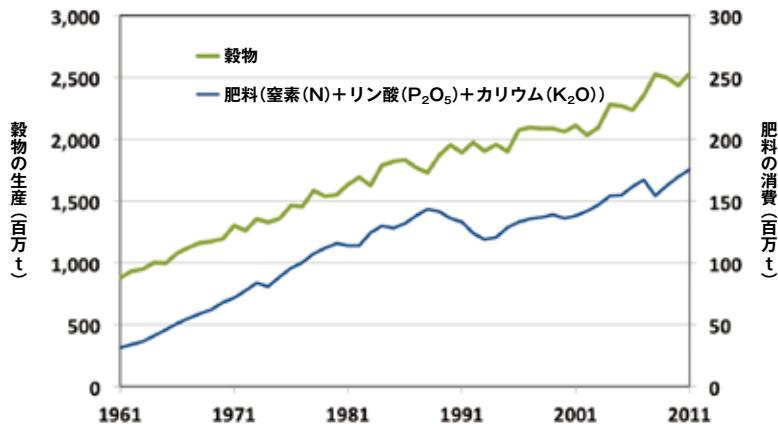


図1 世界の穀物生産と肥料の消費（1961～2011年）（FAO 2012；IFA 2012）

栄養安全保障：植物栄養成分（肥料）は収量に加えて、人が必要とする栄養素、すなわち炭水化物、タンパク質、脂肪、ビタミン、ミネラルの量や形態にも影響する。食物の健康によい成分の多くは、無機肥料の施用で増やすことができる。生産者のほとんどは収穫量を最適にする施肥をずっと行っているため、人間の健康に対する施肥の効果を見逃している。人の栄養に大切な微量元素は、食用作物への施用によって食物として供給されるべきである。

収穫量が人口増加に追い付いていないマメ類などの農産物の増収と、栄養価向上を同時に実現することは可能である。そのような作物が穀類との価格競争力を維持するには、人の健康にもっとも重要な栄養成分を含む農産物の生産者を優遇する政策が必要である。

微量元素の欠乏による栄養失調症：ある面、主食用穀物の増産で逆に拡大している。微量元素を豊富に含むマメ類に代表されるほかの作物は、緑の革命の恩恵には浴さなかった。その結果、これらの作物の価格は相対的に高値となり、栄養失調症で苦しむ世界の貧困層の口には、わずかしか届いていない。

生物学的栄養強化は、多くの人々の鉄分、ビタミンA、亜鉛の欠乏状態を適切な水準まで回復するのに大変有効である。遺伝子工学と農学的手法を用いた生物学的栄養強化には、微量元素が鍵となる。この2つの手法は相乗的、かつ補完的に作用する。

主食用作物では、遺伝子工学的手法は鉄分やビタミンAに関して効果的であり、肥料などの農学的手法は食物の亜鉛やヨウ素やセレンを増やすのに効果的である。ヨウ素とセレンの不足は植物の成長には支障ないが、亜鉛欠乏の改善は、作物と消費者のどちらにも利益がある。穀物に亜鉛とセレンを施肥すると、これら微量元素の濃度と生物学的利用能を改善することができる。微量元素の葉面散布時期は、穀物内で亜鉛などの微量元素を高めるのに特に重要である。圃場試験の結果では、生育後期に亜鉛を葉面散布することによって、早い時期の施用に比べ、穀物の亜鉛濃度が圧倒的に高くなる。とりわけ、コムギの可食部の胚乳部分でその傾向が顕著である。世界の多くの土壌で亜鉛が欠乏しており（表1）、地域差はあるが亜鉛欠乏症のリスクにさらされている住民の比率も多い（表2）。

機能的食品

カルシウム、マグネシウム、カリウム：人に必須な多量無機栄養素である。人の骨と歯におけるカルシウムの主要な役割は例外として、これらのミネラルは、人体で植物体中と同様に必須の働きをもつ。作物のカルシウム濃度は土壌中の濃度で決まる。施肥は作物の生産量を最適な状態とし、さらに人体に必要なミネラルの供給を助ける。カルシウム欠乏は、搗精された穀物やコメに偏った食習慣の国々で発症する（たとえば、バングラデシュやナイジェリア）。マグネシウムの適切な摂取量は簡単には決められないが、研究報告では、米国を含め、相当多くの成人がマグ

表1 肥料元素が欠乏している農地土壌の比率

元素	%
N	85
P	73
K	55
B	31
Cu	14
Mn	10
Mo	15
Zn	49

(世界190土壌の調査より、Sillanpaa, 1990)

表2 世界と地域における亜鉛欠乏症のリスクにさらされている人口の比率 (Hotz and Brown, 2004)

地域	欠乏者の比率 (%)
北アフリカ／東地中海	9
サブサハラアフリカ	28
ラテンアメリカ、カリブ	25
アメリカ合衆国、カナダ	10
東ヨーロッパ	16
西ヨーロッパ	11
東南アジア	33
南アジア	27
中国 (香港含む)	14
西太平洋	22
世界全体	21

ネシウムの摂取不足に陥っている。同様に、カリウムの1日当たりの推奨摂取量の定義も明確ではなく、米国で十分とされる4.7g/日以上を摂取しているのは男性でわずか10%、女性は1%未満の状態である。

炭水化物、タンパク質、脂質：窒素を穀物に施用すると、収量に加え、タンパク質も増加する。コメでは、窒素は収量を大幅に増やすものの、タンパク質の量はわずかに増える程度である。窒素はタンパク質の品質に関して、ほかのタンパク質よりも制限アミノ酸であるリジン〔訳註：リシンとリジンは同意。本書ではリジンとする〕を多く含むグルテリンの濃度を高める。トウモロコシやコムギでは、最適収量に必要な量以上の窒素の施用でタンパク質が増加する場合もある。しかし、必須アミノ酸であるリジン濃度が低いため、栄養価の改善は制限される。例外は、品種改良された高タンパク質トウモロコシ〔訳註：QPM; Quality Protein Maize〕である。この品種では、窒素を多用するとリジンの濃度が高くなる。ジャガイモは、窒素がデンプンとタンパク質の濃度を増やし、リン、カリウム、硫黄がタンパク質生物価〔訳註：タンパク質の栄養価を示す指標で、体内に吸収された窒素量のうち、体内に蓄えられた量の百分比で表す〕を高める。収穫を抑制する栄養欠乏状態が緩和されると脂質の量は増えるが、作物の脂質組成は施肥量の影響を受けにくい。

窒素の最適施用（適肥、適量、適期、適所）の管理手段により、健康によいタンパク質、脂質、炭水化物の生成を助ける肥料の働きがよりよく発揮される。窒素の利用効率を高める遺伝子改良では、穀物タンパク質の量と質に対する効果に注意を払うことが必要になる。その一方で、収穫前の葉面散布や緩効性肥料を用いた施肥管理は、余剰窒素による損耗（ロス）を最小に抑え、タンパク質の合成に有効な窒素を増やし得る。

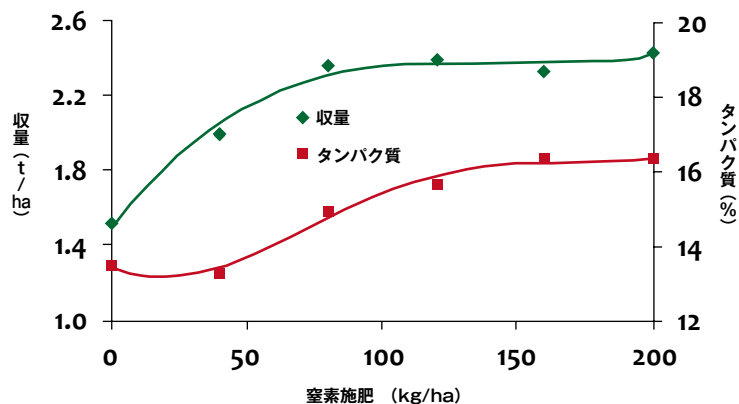


図2 窒素施肥に応答したコムギの収量とタンパク質

果物と野菜の健康機能品質：多くの科学的証拠によって、妥当な施肥管理は果物と野菜の生産性と市場価値を上げるばかりか、人の健康増進という特性を高めることが明らかになった。窒素の施用で、カロテノイド（ビタミンA前駆体）の濃度は高まるが、ビタミンCの濃度は減少する。カリウムと硫黄の葉面散布はマスクメロンの甘味、食感、色度、ビタミンC、 β -カロテンや葉酸成分を高めた。ピンクグレープフルーツでは、カリウムの葉面追肥で β -カロテンとビタミンCの濃度が高まった。バナナでのいくつかの研究で、カリウム成分と果物の品質尺度である糖度やアスコルビン酸（ビタミンC）との正の相関関係、果実酸度との負の相関関係が報告されている。

ビタミン類に対する効果に加え、肥料は作物の機能性（健康増進）成分の濃度にも効果があることが明らかとなっている。カナダのオンタリオ州のカリウム欠乏土壌で栽培されたダイズは、カリウムの施用によりイソフラボンの濃度が13%高くなった。カリウムはグレープフルーツやトマトのリコピン濃度を高めるといった試験結果も報告されている。

ブロッコリーとダイズは、人の食事にカルシウムとマグネシウムを供給する植物の代表例である。やせた酸性土壌でこれらの作物を栽培する際は、苦土石灰の施用によりこの重要なミネラルの濃度を上げることができる。

一般的に窒素の施用で抗酸化物質のルテインと β -カロテンの濃度を高めることができる。これらの成分は、ビタミンA、C、Eとともに、失明原因のひとつとなる老人性黄斑変性症の発症を抑える効果がある。

リスク軽減

植物病害：銅欠乏の穀物において、麦角病 (*Claviceps* sp.) による汚染は食品安全問題の一例であるが、この病気は銅入り肥料の施用で抑制できる。植物病原菌は無機栄養素を固定したり、競

合して植物性食品のミネラル量を減少させ、栄養品質と安全性を劣化させる。ほかにも多くの植物病害は、作物の栄養状態に影響することが知られるが、食の安全にかかわる植物病害を抑制する最適な栄養管理については、知見が不足している。

作物の栄養管理は、植物病害とその抑制に深くかかわる。栄養管理によって植物病害を減らすには、次の方策がある：

- マンガン吸収効果の高い品種の開発
- 各肥料要素の適量施用により要素間のバランスをとること
- 作物に適した肥料の形態の選択（たとえば、硝酸とアンモニア、塩化物と硫化物）
- 植物の吸収と生育に最適な窒素施用のタイミング
- 耕起、輪作による土壌微生物の総合的管理



農法：有機農業生産者の施肥方針は、ほかの生産者と異なる。この違いは食品の健康増進効果により影響があるのだろうか？ 有機農法では肥料供給源の制約により、増え続ける世界の人口をまかなうことはできない。また有機農業システムは反芻動物と飼料作物の栄養循環に大きく依存しているため、有機食品の生産物比率は健康的な食生活が必要とするものと合っていない。偏った食事内容は、ヒトの必須栄養素の供給不足や特定成分の過剰摂取で、健康問題を引き起こす可能性がある。



麦角病が発生しやすい土壌では銅の施肥が効果的である（写真右は硫酸銅の結晶）

窒素供給の違いに植物が生理的に反応すると、生産される食品の成分には少し変化が生じる。有機農法でビタミンCは増えるが、ビタミンA、B群やタンパク質、硝酸塩は減少する。慣行農法で栽培された食料の高濃度の硝酸塩は、危険ではなく人の健康に有益である。有機農業の支持者は食品の品質に関心が高いが、(世界的規模での)食料供給と食品構成(食事内容)に注目して考えることが、人の健康にはもっとも重要である。

放射性物質の汚染対策：チェルノブイリや福島での原子炉事故の例にあるように、土壌が放射性核種で汚染された時、人の健康を守るには、植物への吸収を抑制するのが最大の目標となる。ベラルーシのゴメル地方の土壌における研究では、カリウムを施用したところ、それが肥料由来でも土壌由来でも、土壌中での交換性カリウム増加にともない、作物中の放射性セシウム137 (^{137}Cs) とストロンチウム90 (^{90}Sr) が減少した。これらの放射性核種は、窒素・リン肥料とドロマイトを施肥することでも、濃度が下がった。放射能汚染地域で人々の生活を改善するためには、復興の過程からの地域住民の参画と自己開発も重要である。

要約

以上、人類の健康にかかわる作物の特性の改善に、肥料が重要な役割を果たしていることを示した。

肥料が食料安全保障や栄養安全保障の促進に果たす重要な役割を考えると、施肥効果を最適化するための研究投資は、なお一層重要となる。適肥・適量・適期・適所を実現する「4R施肥推進運動(4R Nutrient Stewardship)」を支援する研究が求められる。肥料業界が推進するこの構想、つまり人の健康維持に重要な経済、社会、環境保全のすべてで持続可能性を達成するには、この「適切(Right)」が重要な要素となる。人類が真に必要とする栄養素を備えたよりよいバランスの食料生産に向けて、農業システムの適正な戦略転換とあわせて、農学研究と普及における「4R」に力点を置いた活動は、肥料施用に伴う効果を高め弊害の最小化を図るものである。

参考文献

- Erismann, J.W., M.A. Sutton, J. Galloway, Z. Klimont, and W. Winiwarter. 2008. How a century of ammonia synthesis changed the world. *Nature Geoscience* 1:636-639.
- FAO. 2012. <http://faostat.fao.org/site/339/default.aspx> and <http://www.fao.org/worldfoodsituation/wfs-home/csdb/en/>. Verified April 2012.
- FAO. 2009. The State of Food Insecurity in the World 2009. Food and Agriculture Organization of the United Nations. <http://www.fao.org/docrep/012/i0876e/i0876e00.HTM>



適切な植物の栄養素を適量、適期、適所に施肥することで作物の品質を改善できる

Hotz, C. and K.H. Brown. 2004. International Zinc Nutrition Consultative Group (IZiNCG), technical document no. 1: Assessment of the risk of zinc deficiency in populations and options for its control. Food Nutr Bull 25(1): S94-204.

IFA. 2012. International Fertilizer Industry Association statistics. [Online]. Available at <http://www.fertilizer.org/ifa/Home-Page/STATISTICS> (verified 27 April 2010).

Sillanpaa, M. 1990. Micronutrient assessment at the country level: A global study. FAO Soils Bulletin 63. Food and Agricultural Organization of the United Nations, Rome.