

肥効調節型肥料の新展開と肥効向上の可能性

東北大学大学院 農学研究科附属農場

農場長 三枝正彦

従来の速効性化学肥料に比べて近年開発された被覆肥料を中心とする肥効調節型肥料には次のような特長と問題点がある。①肥効が長時間持続する。②溶出が植物生育とマッチし高い施肥利用効率である。③溶脱や揮散が起こらず環境負荷が少ない。④一度にイオン強度を上げることなく低毒性である。⑤追肥省略で施用コストが軽減できる。⑥肥効が調節可能で作物による吸収過程のモデル化ができる。⑦土壌の酸性化が軽減できる⑧成分当たりの肥料価格が高いなどである^{1, 2)}。

これらの特長を活かし、従来考えられなかった種子あるいは作物根と肥料を同時に同一位置に施用する接触施肥栽培 (Co-situs application) や追肥を省略できる全量基肥栽培、水稲全量苗箱施肥不耕起移植栽培、畑作物の接触施肥不耕起直播栽培、多作一回施肥栽培などの新農法が展開されている¹⁻³⁾。表1にはその一例として各種水稲苗の全量苗箱施肥栽培を示した⁴⁾。このように肥効調節型肥料の種類と播種量、栽培法を工夫することによって本田での施肥を省略できる各種水稲苗の全量苗箱施肥栽培が可能である。この水稲の全量苗箱施肥栽培については秋田県農業試験場が開発したという多くの間違っただけ報告があるが東北大学農学部附属農場で1991年に開発したものである⁵⁾ (1995年度日本作物学会東北支部学術賞を受賞)。またこの方法で基肥施用したシグモイド型の被覆尿素肥料の利用効率は約80%と従来の速効性硫酸

の基肥利用率 (約30%) に比べて著しく高い値である。これまで肥料の利用効率の向上を中心に研究しながら、追肥の省略や環境負荷の軽減、減肥の可能性などが検討され、多くの成果が報告された。特に肥料の高い利用効率については全ての研究者が認めるところであり、環境に優しい肥料として推奨されている。ここでは緊急の課題である環境と調和した多収、高品質食糧生産を考慮し、肥効調節型肥料の新展開と更なる肥効向上の可能性について述べることにする。

1) 肥効調節型肥料の接触施用と高品質農産物の生産

1-1-a) 畑でアンモニウム態窒素を！水田で硝酸態窒素を！

肥効調節型肥料はこれまで溶出を植物の成長に合わせて制御し肥効を向上させることに主眼が置かれてきた。その結果、前述の如く被覆尿素は水田で80—90%程度、畑で60—70%程度の利用率が得られている。しかしながら、この肥料の持つ最大の長所はこのような肥料成分の利用効率の向上に加えて、目的とした肥料形態をそのまま植物に吸収利用させ農作物の質的向上が図れることである。それはこの肥料成分の溶出が植物の生育にマッチし緩効的で肥料焼けを起こさずノンストレスの接触施肥栽培が可能であることによる。図1に示されるように従来の速効性肥料は肥料焼けを回避するために、必ず間土を行う必要があり、この

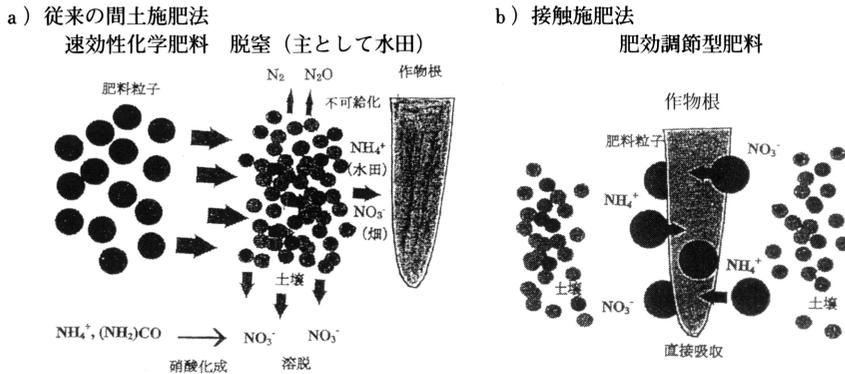
間土を経過する過程でアンモニア化成、硝酸化成、脱窒作用、不可給化 (固定や不溶化など) が働き水稲では硝酸態窒素の供給が、逆に畑作物ではアンモニウム態窒素の供給が殆ど不可能

表1. 各種水稲苗の全量苗箱施肥法

水稲苗	葉齢	播種量	肥効調節型肥料	備考
乳苗	2.2	250	POCU _{1/3s} 100	1.5mmのロックウールマット使用
稚苗	3.2	180	POCU _s 100	POCU30の移植前表面施用
中苗	4.3	120	POCU _s 100	POCU10の移植前表面施用
成苗	6.0	80	POCU _{ss} 100	POCU10 or 30の表面施用、時に剪葉

POCU: Polyolefin coated urea, 溶出抑制期間: 1/3s→10日, s→30日, ss→40日

図1. 慣行的間土施肥法と接触施肥法 (菅野均原図)



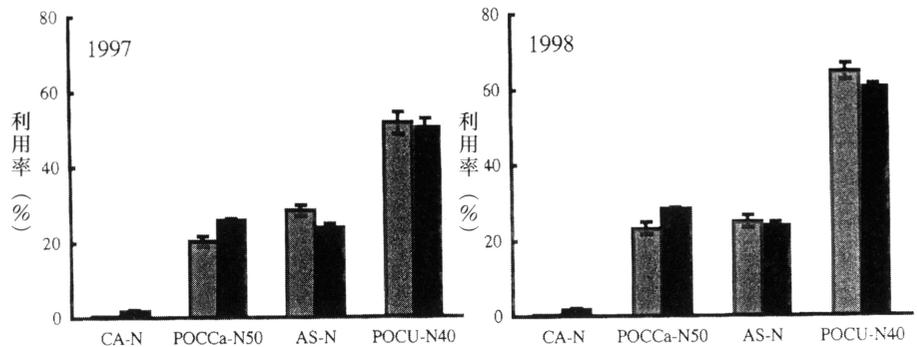
や硫酸を施用しても容易に硝酸化成しアンモニウム態窒素を供給することは極めて難しかった。ここで硫酸や第二リン酸アンモニウムを被覆した肥効調節型肥料を条施すれば、表2に示されるように圃場で栽培されたホウレンソウも蓚酸と硝酸態窒素の蓄積を軽減し、逆

であった。すなわち土壌が目的とする窒素形態の供給に大きな障壁となっている。従って、肥効調節型肥料を用いて種子あるいは作物根と肥料を同位置に施用する接触施肥栽培を行えば、土壌を介することなく目的とした肥料成分を直接的に肥料粒子から植物根に供給することができ、農作物の質的向上が期待できる。またこれまで水耕栽培で明らかにし、蓄積されてきた作物生育や収量、品質に対する異なる窒素形態の効果を実際の圃場で再現、活用できる。

例えばホウレンソウの水耕栽培ではアンモニウム栄養で蓚酸（腎臓結石の1原因物質）、硝酸態窒素（ブルーベビー症や発がん性とも関係）を低減し、逆にアスコルビン酸（ビタミンCで抗酸化作用）や糖類（旨み成分）が増大することが知られている。しかしながら酸化的な畑状態では尿素

図2. 水稻の基肥施用窒素利用率

(CA-N: 硝カル, POCCa-N50: 被覆硝カル, AS-N: 硫酸, POCU-N40: 被覆尿素)



にアスコルビン酸を増加させることが可能となった⁶⁻⁸⁾。

これに対して水田土壌中では還元状態で水稻が生育するので酸素を含有する硝酸態窒素の供給が水稻の生育収量に有効とする報告があるが実際の水田では脱窒が起こり難しい。そこで硝酸カルシウムを被覆した肥効調節型肥料（被覆硝カル）を作成し、速効性の硝カル、硫酸および被覆尿素と肥効を検討した結果が図2である。硝カルの元肥施用では脱窒により2%以下の利用率であるのに対して、被覆硝カルでは速効性硫酸とほぼ同程度の25%程度と著しく利用率が向上した。しかしながら、被覆尿素的60%前後の利用率と較べるとまだ半分以下の利用率であり、生育初期から根と肥料の接触面積を更に増大させる工夫が必要である。

表2. ホウレンソウの硝酸、蓚酸、アスコルビン酸含量

施肥形態	硝酸含量 mg/kg FW	全蓚酸含量 mg/g DW	水溶液蓚酸 mg/g DW	不溶性蓚酸 mg/g DW	不溶性蓚酸 割合 (%)	アスコルビン酸 mg/100gFW
AS	1933 ^a	69.1 ^a	64.7 ^a	4.4 ^c	6.1 ^b	44 ^b
POCU	153 ^b	71.8 ^a	54.4 ^{ab}	17.4 ^a	24.0 ^b	55 ^a
POCU-Dd	51 ^b	34.4 ^c	29.8 ^c	10.6 ^b	31.1 ^a	51 ^a
POC-DAP	126 ^b	54.5 ^b	48.7 ^b	5.8 ^{bc}	10.5 ^{cb}	56 ^a
POC-AS	181 ^b	50.4 ^b	41.3 ^b	9.1 ^{bc}	17.8 ^{bc}	57 ^a

AS: 硫酸 POCU: 被覆尿素 POCU-Dd: ジシアンジアミド入り被覆尿素
POC-DAP: 被覆二リン酸 POC-AS: 被覆硫酸
異なる英小文字は5%水準で有意差あり

このように肥効調節型肥料を用いて種子や作物根との接触施肥を行えば、酸化的畑土壌でアンモニウム態窒素を、還元的水田での硝酸態窒素の供給が可能となり、農作物の収量、品質を大きく改善することが期待される。また脱窒や流亡、不溶化が起きやすい土壌では接触施肥で著しく基肥窒素利用率も向上するものと思われる。

1—b) 不可給化しやすい元素の直接供給

土壌の介在を少なくすることによって改善される栄養状態としては、この他にも土壌中で不可給化し易い元素の直接供給である。例えば、アルカリ土壌では鉄が不可給化しやすく、鉄があるにも拘わらず、多くの作物が鉄欠乏で生育が阻害されている。このようなアルカリ水田土壌で、微量元素を含む被覆肥料「ロングトータル」や「マイクロロング」を水稻根に接触施用すると水稻生育が著しく改善される事を最近明らかにした。また東北大学農学研究科の和田暢子・南條正巳氏は昨年の新農法研究会で細根の多いアブラナ科作物へのリンの接触施肥はイネ科のトウモロコシより著しく利用率を高める事を報告している。

2) 接触施肥の問題点と対策

接触施肥の成否は肥料粒子と作物根の接触面積をできる限り大きくして土壌の介在を最小限にすることである。肥料と作物根の接触面積を増やす方法としては、根毛や細根の多い作物（例えば、アブラナ科作物）や根量の多い品種の選択（水稻では穂重型より穂数型）、根毛増大遺伝子 (rol—a, b, c) を導入した形質転換植物の作出、根毛増大

ホルモン入り肥料粒子の作成、根成長に対するストレス要因の除去などが考えられる。

前述の如く、接触施肥は施肥養分の利用率を向上させると共に、土壌を介さず目的とした施肥養分、施肥形態を肥料粒子から直接作物根に供給できるという画期的な施肥方法である。しかしながら、現在普及している肥効調節型肥料はアニオンを含まない被覆尿素であり、局所に大量施用するとアンモニア障害、アンモニアの揮散ロスが生じるといふ大きな問題点がある。例えば、表3は異なる施肥法における施肥部のEC、各作物の出芽率および生育を示したものである⁹⁾。耐肥性の高いデントコーンではECの極めて大きい速効性肥料の接触施肥を除いては被覆尿素的接触施肥でもほぼ速効性の全層施肥区と同様な出芽率と生育を示した。これに対してスイートコーンは肥料塩濃度に対する耐性が低く、速効性の全層施肥区でも約60%の出芽率である。これに対して、被覆尿素的全層区の出芽率はこれとほぼ同等であるが、被覆尿素的接触施用区では33%、速効性接触区では7%と著しく低い値である。速効性肥料区のEC値に比較して被覆尿素区の出芽率が相対的に低いのは被覆尿素では対抗アニオンが無いため塩類障害の他に、アンモニア障害が発生したと思われる。このような問題を解決するには、耐肥性（イオンストレス耐性）の強い作物、品種の選抜（例えばスイートコーンよりデントコーン）、肥料資材としてアンモニウム塩（リン酸アンモニウム、硫酸アンモニウム、塩化アンモニウム）の利用、

ウレアーゼ活性（アンモニア化）の抑制、根との接触面積を増やし肥料尿素的を直接吸収させるなどが考えられる。

3) 温度下降期の施肥養分の供給

温度下降期に栽培される作物（白菜、キャベツなどの秋野菜、麦類）は温度が低下するに従い、N要求量が大きくなる。また蒸発散量が少なく、養分溶脱に対

表3. 異なる施肥法における施肥部のECと各作物の生育

施肥法	施肥部のEC ds/m	出芽率 %	地上部乾物重 g/個体	根の総乾物重 g/個体
デントコーン				
RAF全層	0.49	100	1.4	2.2
RAF接触	6.5	19	0	0
CAF全層	0.23	100	0.99	2.2
CAF接触	0.45	100	1.3	1.7
スイートコーン				
RAF全層	0.49	59	0.40	0.56
RAF接触	6.5	7	0	0
CAF全層	0.23	61	0.39	0.55
CAF接触	0.45	33	0.42	0.44

RAF：速効性肥料，CAF：肥効調節型肥料

する降雨の影響が極めて大きいという問題がある。養分溶脱を防ぐには肥効調節型肥料の導入が有効であるが、市販の被覆尿素を中心とする肥効調節型肥料は肥料成分の溶出が温度レスポンス型であり温度下降期の作物栽培には不適切である。この問題を解決するには数種の溶出抑制期間が長く、逆に溶出期間が著しく短いシグモイド型肥料の組み合わせ¹⁰⁾や温度反応性の無い緩効性肥料(例えばpH反応性や難溶解性肥料)の開発などが重要である。このことは一定温度下で生育期間の長いトマトやイチゴ、ナスなどの栽培にも共通する問題といえる。

4) 消費者の栄養面, 必要性から考えた肥料の開発

放牧地での速効性肥料の利用は施肥直後の牧草生産量を著しく高めるが、その後の生産量が減少するので必要以上の放牧面積の確保,あるいは逆に放牧頭数の削減が必要となる。すなわち放牧草地では家畜は毎日一定量の餌を必要とするため、放牧期間を通してできるだけ等量溶出あるいは家畜が成長する放牧後半で溶出が増大する施肥法で、単位時間当たり草生産量を平均化あるいは尻上がりとすることが重要である。このためには溶出が直線型あるいはシグモイド型の肥効調節型肥料の導入が極めて有効である¹¹⁾。また東北地方に多く見られる急傾斜草地では危険な施肥回数削減あるいは、肥料成分による環境負荷の軽減、ラジコンヘリーでの空中散布などの観点からも、軽量で肥効が持続する被覆肥料の施用が有効である。また肥効調節型肥料の導入は従来問題であった施肥直後の牧草の硝酸集積を抑制し、家畜の硝酸中毒を回避できることが明らかになっている。

これまでの肥料の開発は主として作物の吸収利用という側面を重視し開発されてきた。しかしながら最近では生産物の収量のみならず、生産物の供給時期や品質の問題も重要な課題となっている。例えば、数年前に行われた米国農学会におけるシンポジウムのトピックスの1つに「消費者である人や動物の栄養を考えた農作物の栽培と施肥設計」というのがあった。植物と動物では必須元素が異なるのをはじめ、同一必須元素でも要求量が著しく異なる。そこで植物にとっては生育、収

量に多少マイナスに働く施用量でも農作物に蓄積させ、人や家畜が自然にこれら食物から養分を摂取できるようにする施肥設計の重要性である。例えば、I, Co, Si, Na, Seなどは動物や人間に必須であっても高等植物には必須ではないので、家畜に対してこれまでは不足する地域では鉍塩や経口投与が必要であった。しかしこれらの元素は摂りすぎると有害になるものもあり植物を介して自然に摂取することが重要である。なかでもIは大陸内部で不足しており、Coは根粒菌に必須、Se, Coは家畜に不可欠で放牧地において特に重要視されている。これら成分は微量であり単体施肥が難しいので他の成分と混和し施肥する事が重要である。微量元素の肥効調節型肥料は極めて効率的に環境負荷を軽減(Cu)することが¹²⁾、また前述の如く接触施用でアルカリ土壌におけるFeの不溶化防止に有効である。

5) 表面施肥に適した肥効調節型肥料の開発

開発当初の樹脂被覆肥料は土壌中での分解が極めて遅く、残存樹脂殻を環境問題とする声が大きく、現在では多くの被覆肥料が光崩壊性、あるいは光崩壊性と生分解性併用型に移行している。肥効調節型肥料の基肥1回施用は省力、低コストで極めて有効でありこれら肥料は成分の利用効率、残存殻の処理という点からも極めて環境に優しい肥料である。しかしながら、収量、品質を考慮し細かい施肥管理を行うためには追肥としての表面施用が、また牧草や果樹、アスパラガスなどの永年作物では必然的に表面施用とならざるを得ない。したがって現在の光崩壊性を主体とする被覆肥料はこのような表面施用には不向きの場合がある。土壌表面では光崩壊性ではなく生分解性の被覆肥料の開発が不可欠である。また土壌表面は乾湿や寒暖の差が大きくそれらを考慮した肥料の開発が重要である。肥料溶出には基本的には土壌水分と温度が関係しており、乾燥しやすくまた高温になりやすい土壌表面環境を考慮した肥料の開発が特に重要と思われる。

6) 「肥効調節型肥料で減肥」は適策か?

多くの試験研究で肥効調節型肥料の高い利用率が明らかになり、従来の速効性肥料の施肥設計に対して減肥の可能性が各地域農業試験場の重要課

題として考えられてきた。しかしながらこれは果たして賢明な技術であっただろうか？確かに環境負荷、肥料代の一部軽減としては有効であったといえるが肥効調節型肥料の本来の利点を活用した新農法の可能性をつぶしてこなかったであろうか？被覆肥料を主体とする肥効調節型肥料の最大の長所は肥料焼けを起こさず、土壌を介さず、肥料粒子から直接に目的とする成分を作物の要求量に応じて供給できることである。これらの利点を活用すればもっと高収量、高品質の農作物の生産が可能であると思われる。また米の生産過剰に伴う生産調整に関心が集まり、減肥による環境負荷の軽減や低窒素高品質米生産に固執したとも言える。肥効調節型肥料の適正施用は倒伏や発病限界を引き上げ、多収、高品質栽培を可能にする。肥効調節型被覆肥料には堆肥の養分供給効果が期待され、適正な施肥管理を行えば多収、高品質水稻栽培が期待できる。

7) 速効性肥料と肥効調節型肥料の相乗効果の 解明

生育ステージや作目によっては代謝に必要な量以上の窒素が必要な場合がある。例えば一般に生育初期のスタータとしての窒素施用量は作物の吸収量をはるかに超えている。分ゲツや栄養成長、麦や牧草のスプリングフラッシュの維持には吸収量以上の栄養分が必要、野菜の栄養診断は汁液の硝酸態窒素含量で行われるが硝酸態窒素は液胞の浸透圧維持にも関係しているであろうか？野菜の葉

色などの品質保持には幾分過剰な窒素が必要などこれらの生理現象維持に速効性肥料と肥効調節型肥料の組み合わせ（相乗効果）が有効な場面が考えられる。

この一例として多収獲日本一の米作技術が上げられる。この栽培技術は表4に示されるように土づくりを基本としており、主な土壌改良資材の1つとして堆肥の大量施用(1.3-3.0t/10a)が共通している。またいずれの篤農家も水稻の初期生育確保に基肥重点施肥(6.7-11.3kgN/10a)を行っており、追肥は現在よりはるかに少なく(0-1.7kgN/10a)、水稻の後期窒素栄養は大量施用の堆肥由来窒素に期待している。その結果多収獲にも拘わらず、玄米の窒素生産効率が60-80kg/kgNと極めて高く、結果的に超多収、高品質（低窒素米）水稻栽培を行っている。ここで堆肥の窒素供給様式は肥効調節型肥料で代替可能であり、化学肥料と肥効調節型被覆肥料の併用で水稻の超多収、高品質栽培が再現できるものと思われる。

速効性肥料と短期溶出肥効調節型肥料は基本的に異なる。速効性肥料は過剰になると容易に肥料焼けを起こすが短期溶出型肥効調節型肥料は肥料焼けや養分ストレスを起こさず、化学肥料と併用すれば両者の問題点を相互補完する安全な追肥技術の開発が期待できる。

8) 低投入持続型農業と農耕地における生物多 様性

耕地生態系は人間が食料を効率よく生産するた

表4. 東北地域における多収獲事例の施肥量と土づくり

入賞 年次	氏名	収獲	基N	追N	堆肥	土づくり	地力収量※ 玄米生産効率		地力由来割合 玄米生産効率	
							60kg	70kg	60kg	70kg
27 29	丹 民蔵	987	8.6	0	1.5t	深耕、客土、排水、 リン酸多用	833	806	85	82
28	佐藤 源助	813	11.3	0	1.3t	暗渠、客土	610	576	75	71
30	寺立 幸太郎	826	9.6	0.4	2.3t	暗渠、客土	639	608	77	74
31	佐藤 陸	823	6.7	0	1.5t	暗渠、客土、深耕	702	682	85	83
32	菅原 市之助	764	8.3	1.7	1.5t	暗渠、客土	554	518	73	68
33	谷口 三之助	880	8.0	0.8	1.7t	暗渠、客土	707	678	80	77
34	加藤 金吉	959	7.5	tr.	3.0t	暗渠、客土	824	801	86	84
35	工藤 雄一	1055	10.7	0	2.3t	暗渠、客土、深耕	862	830	82	79

地方依存収量の計算方法：基肥N利用率30%，追肥N利用率60%，玄米生産効率60kgあるいは70kg/1kgN，堆肥は地力と仮定して計算

めに造った人為生態系であり、人間が生活する上での必要不可欠な生態系である。人口調節が難しい現在、この農耕地生態系を古典的な農法に戻すことは生産効率を低下させ、結果的に自然生態系をさらに農地に転換することが必要となる。それゆえ、耕地生態系の生産効率を上げることは自然生態系を守ることでもある。したがって低投入持続型農業でなく、多収・高品質を目指した最大効率最少汚染農法 (MEMPA :Maximum, Efficiency, Minimum Pollution Agriculture)こそが、今最も必要とされている農法と思われる。この意味では肥効調節型肥料を用いた多収、高品質栽培が重要である。持続型農業は環境負荷の軽減のみが強調される場合が多いが、その前に農家経営の持続がなければ農地が荒廃し、地球環境は守れない。

9) 循環型農業、有機農業はオールマイティか？

生物性廃棄物に由来する年間窒素排出量は日本全体の窒素施用量の3倍程度（このうち畜産排泄物は1.4倍程度）にも及ぶといわれる。この意味ではこれら生物性廃棄物をコンポスト化しても農地に全て還元すると養分過多となり循環型農業は成立しない。循環型農業は基本的には地域循環であり日本のように自給率40%程度では輸入生産物によるN, Pの過多で極めて難しい。すなわち我が国の農作物の自給率を飛躍的に向上させ、輸入量を削減しなければこの問題は解決しない。循環型農業、有機農業の美名の下に、堆厩肥を必要量以上に農地に還元することは慎むべきである。耕種農家にとっては畜産業も他産業であり、農地をゴミ捨て場とするような生物性有機物の農地還元は厳に慎むべきである。もちろん有機性廃棄物をコンポスト化し有効利用できる場面では積極的に農地還元すべきであり、前述の米作日本一の栽培技術のように化学肥料との併用を考えるべきである。

10) 兼業農業者のための肥料や栽培技術の開発

我が国農業者の約9割、生産量の約8割は兼業農業者に由来する。これまでの栽培技術はこの1割の専業農業者をターゲットにして主として開発されてきた。専業農業者のみならず兼業農業者の立場や実態を考慮した栽培技術や肥料の開発が重要である。たとえば、肥効調節型肥料を用いた全量苗箱施肥不耕起栽培、元肥全量施肥栽培、肥効

調節型肥料による追肥体系の確立など簡便かつ容易な技術の開発が必要である。さらに、主婦や老人、子供達にとって「安全」で環境に「優しい」肥料とそれを用いた平易な栽培管理技術の確立も重要であり、そのためには肥効調節型肥料の果たす役割は極めて大きい。

肥料は作物の生育に不足する養分を効率的に補給するものである。なかでも肥効調節型肥料は極めて環境に優しく、先端的かつ効率的な生産手段である。それゆえ、肥効調節型肥料は近未来に予想される世界の食糧不足に対処するための最も有効かつ実用的な生産手段の1つと言える。肥効調節型肥料を積極的に活用し、最大効率最少汚染農業を行い多収、高品質栽培を行うことが今後の食糧確保に特に重要である。

引用文献

- 1) Saigusa M.,: 1999 Nitrogen Nutrition and Plant Growth. pp305-335. Oxford & IBH Publishing Co. PVT. LTD New Delhi.
- 2) Tian X., and Saigusa M.: 2002, Tohoku J. Agric. Res. 52,39-55.
- 3) 三枝正彦：2002，肥料時報，406号，30 - 35
- 4) 三枝正彦：2001，日作紀，70,別1,274-275
- 5) 佐藤徳雄・渋谷暁一：1991,日作東北支部報，34,15-16
- 6) Ombodi,A., Miyoshi S. and Saigusa M.:1999, Tohoku J. Agric. Res. 49, 101 - 109.
- 7) Ombodi A., Kosuge S.and Saigusa M., :2000 J. Plant Nutr. 23, 1495-1504.
- 8) 建部雅子ら.:1996,土肥誌 67,147 - 154
- 9) 二瓶直登・伊藤豊彰・三枝正彦，1998，川渡農場報告，14号，11-18.
- 10) 小菅佐代子・渋谷暁一・三枝正彦，2000，川渡農場報告，16号，9 - 11.
- 11) 三枝正彦・瀧 典明・渋谷暁一：2001，日本草地学会誌，47，151 - 156，184 - 190.
- 12) .Saigusa M., Tosaki A., Ito T., and Shibuya K.: 1997, Plant Nutrition for Sustainable Food Production and Environment, pp 655- 656. Kluwer Academic Publisher, Japan