

農學博士三井進午君の「植物の養分吸収同化に関する生理 化學的研究」に対する授賞審査要旨

植物の栄養吸収はつぎの二つの機作が平行的に行なわれるものと考へうる。(a)は非代謝的、すなわち單純なる物理化學的吸収であつて、栄養素のイオンが植物の根の表面より、吸着または拡散によつて吸収せらるる場合、(b)は代謝的の吸収すなわち濃度の差に逆つて植物根中に栄養素の吸収すなわち集積することにある。生物学的に見れば後者はより一層重要なりと考へられるので、三井進午君は過去二十余年間多數の共同研究者らとともに後者すなわち代謝的吸収について研究を行なつたのである。

その対象たりしものは主として水稻である。本研究はその窒素・燐・カリウムその他マンガン・カルシウム・マグネシウム等の代謝的吸収の機作を解明し、水稻の栄養改善に重要な基礎を与えたものである。米は世界人口の約半数の主食物にしてその豊凶は人類の福祉に最大の關係がある。しこうしてその豊凶に大關係ある秋落現象は植物性または動物性の寄生によつて生ずるに非ず。稻の栄養障害によつて生ずるものなることはすでに知られたるところである。従つてこれを研究するは稻、さらに一般的に言へば、植物の栄養吸収を解明する一端をえらるべしといふべきである。

一、水稻の栄養吸収及び障害

稻の栄養吸収の障害は主として水田中における硫化水素の發生によつて生ずること、塩入及び三井君らの研究によ

つて明らかにせられたるところであるが、その他に水耕植木鉢試験において、青化物、アジドのごとき代謝阻害剤によつて影響せらるること一九五一年より一九六四年に至る間に三井君とその共同研究者によつて証明せられたところである。硫化水素及び硫化物が水田の作土中に生ずること、とくに老朽化した水田（地力の主軸をなす鉄が溶脱して瘦薄化したる土壤）に硫酸アンモニア、過磷酸石灰・硫酸加里等が与えらるる場合に多量に生ずることも上記の研究によつて証せられた。かくして好気性呼吸酸素のよく知られた阻害剤である硫化水素または水溶性硫化物が秋落損害の主なる原因なりと信ぜられる。

なお正酪酸はとくに緑肥または堆肥が排水悪しき水田に施された場合他の有機酸とともに生ずる。この酸は他の有機酸と比較し、とくに著しく水稲根の生長を阻害し、排水悪しき場合には秋落現象を生ずる一原因なりと考えられる。

(一) 硫化水素及び酪酸による栄養吸収の阻害に関する初期の研究 第一表（次頁参照）は硫化水素による水稲の栄養吸収の阻害を示したのである。最も驚くべきことは硫化水素による阻害は栄養素について同一でないことであつて、その阻害の程度を第一表のごとく分類しえたことである。三井君はこの実験においてさらに他の二つの模範的吸収阻害剤、すなわち青化物及びアジドをも用いた。これらは硫化水素と等しくT・C・Aサイクルの酸化段階にてカタラーゼ・パーオキシダーゼ・アスコルビン酸オキシダーゼ・ポリフェノールオキシダーゼ、チトクロームオキシダーゼ等の末端酸化酵素を阻害する既知の呼吸阻害剤中に数えられるものである。これらの模範的阻害剤を用いた場合も略硫化水素による障害と同一の結果を示し、なお酪酸については、その特異なる酵素阻害についてはまだ文献に知

られざるも同様の吸収阻害を示した。

かくのごとく、栄養素の種類によつて吸収阻害の程度が著しく異なる原因について、三井君は先に述べたごとく二つの栄養素吸収機作、すなわち非代謝的吸収と代謝的吸収の割合が栄養素によつて異なるものと考え、とくに肥料の

第一表 硫化水素による稲の根の吸収阻害

阻害度の数値は培養液中に残存するイオン量より算出せるものなり

群別	イオン名	阻害度	説明
I	燐酸 $H_2PO_4^-$ カリウム K^+	170%	根より逆に培養液中に出る
II	硅酸 $Si(OH)_4$ 硫酸 SO_4^{--} 臭化水素酸 Br^-	100%	根に殆んど出入なし
III	アンモニウム NH_4^+ マンガン Mn^{++} 水 H_2O	70%	約30%だけ吸収同化せらる
IV	マグネシウム Mg^{++} カルシウム Ca^{++}	40%	約60%だけ吸収同化せらる

三大要素 N・P・K について、これら栄養素が根中を通過する代謝的吸収経路を詳細に研究したのである。

(二) 植物根中における代謝経路に關聯して N・P・K の吸収種々なる特殊酵素阻害剤の使用によつて各栄養素の吸収経路を明らかにすることをえた。また現時の生化学的技術により栄養素の吸収と直接または間接に關係する代謝物質を分離し、かつ同定することをえたのである。これらの技術は紙クロマトグラフィ、円筒クロマトグラフィ、電気泳動、放射性物質等 $32P$ ・ $14C$ の標識物質につきトレーサー法による放射能分別法である。

三井君はまず燐の代謝的吸収について研究し (a) T・C・A 廻路における酸化的燐酸化によりエネルギーに富む燐酸結合を生ずること (b) 嫌気性解糖の早期段階における一連のヘキソキナーゼによるグルコース・6・燐酸エステル、フルクトース・6・燐酸エステル、フルクトース・6・燐酸エステル、フルクトース・1・6・燐

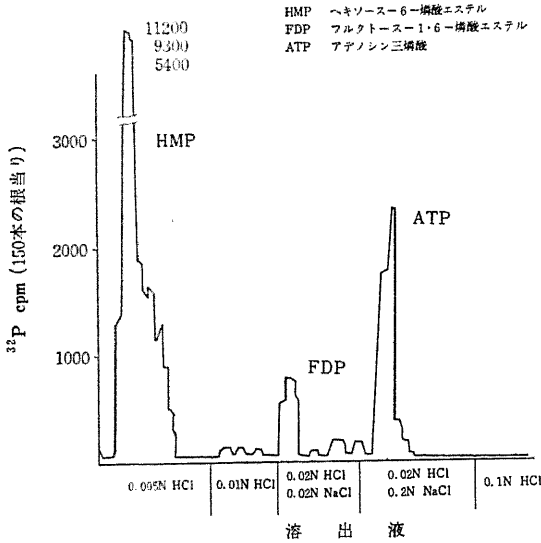
酸エステル等の糖磷酸エステルの形成を生ずることを明らかにした。これら一連の反応の生成物は円筒クロマトグラムにより分離、 ^{32}P の放射能検査により明らかにされたものであつて、その結果は第一図(次頁参照)に示すごとくである。さらに燐の植物上部に向かつての輸送は主として根部における酸溶解性の有機燐化合物の減少と関係し、とくにヘキソースモノ磷酸塩の代謝的分解に関係せるものである。かくして燐の代謝的吸収は解糖及び呼吸経路に直接関係あるものである。

カリウムの代謝的吸収に関しては、燐に用いたるとき、トレーサー技術を用いることは不可能である。これ生活せる植物に有機的カリウム化合物は知られざるが故である。従つてこの点については次の三法を用いて実験を行なつた。

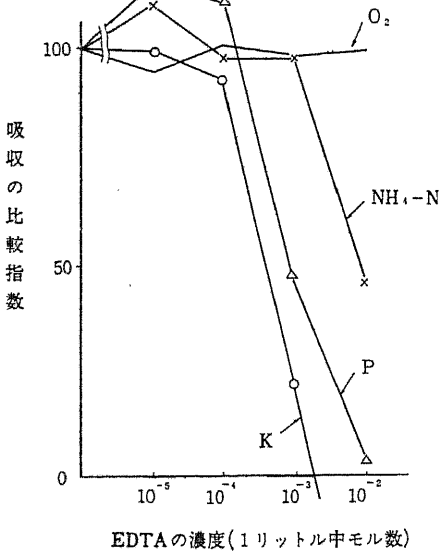
(a) EDTA(エチレンジアミン・四醋酸) このものはマグネシウムまたはカルシウムとキレートを作るために、おそらくはリボヌクレアーゼを活性化することにより、あるいは直接にリボヌクレイン酸のカルシウムまたはマグネシウムを奪うことにより、これを直接破壊する強き反応剤なりと考へうる。水稻根をEDTA処理すれば、根毛中のリボヌクレイン酸が消失し、根外に排出せられる。このことは培養液中のリボヌクレイン酸の増加と根毛中のリボヌクレイン酸果粒の減少(染色法)により確証せられたところである。EDTAの濃度高きほどリボヌクレイン酸の消失も著しきものであるが、第二図(次頁参照)に示すごとく、EDTAの濃度の増加は窒素・燐に比し、とくにカリウムの吸収に顕著なる阻害を示したものである。

(b) TCA廻路すなわちクレーブス廻路中に存する有機酸の添加はカリウムの吸収を増加せず、窒素及び燐の吸収

第一図 根浸出液の円筒クロマトグラム



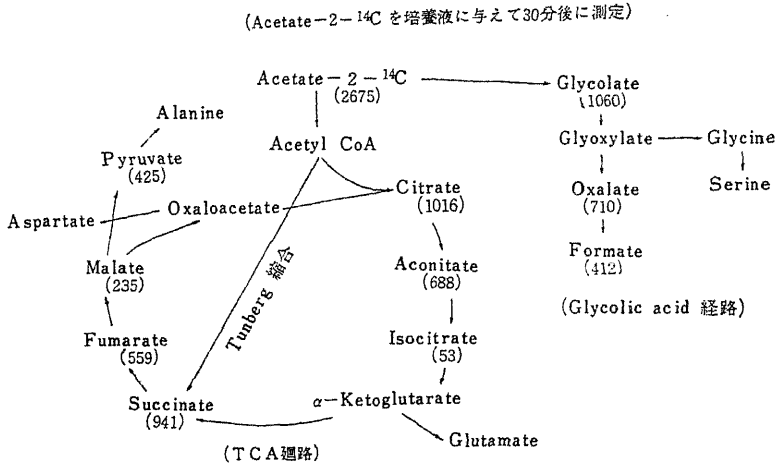
第二図 水稻根のEDTA処理によるカリウム吸収阻害



を著しく増加せしむるものである。ただしカリウムの吸収を増加せしめるには培養液中に葡萄糖を加えればよい。これ葡萄糖がリボース・五磷酸エステルに至り、これがリボヌクレイン酸のリボースを供給せるがためなりと考へる。

(c) 醋酸塩、グリコール酸塩、蓚酸塩の如きTCA廻路中には含まれず「グリコール酸径路」に含まれる酸は著しくカリウムの吸収を増加せしめる。これは、これらの酸よりプリン塩基、従つてリボヌクレイン酸の合成に必要な

第三図 水稻根中に於ける有機酸代謝とアミノ酸の生成



註 ()内の数値は比放射能cpm/μMolを示す

炭素一原子の酸、たとえば蟻酸の生ずるに帰すべきことは今日広く認められたところである。

これら三種の実験結果は、例外なく代謝的カリウム吸収とリボスクレイン酸代謝との間に特別密接なる関係あるを示すものである。かくして、リボスクレイン酸代謝の重要性は生かせる植物にとつて呼吸に劣らざるものと考へうる。

窒素の代謝的吸収に関しては、水稻のN・P・Kの栄養条件によつて水稻根中の各種アミノ酸の出現に差異ありとはいへ、グルタミン酸・グリシン・アスパラギン酸及びアラニンの出現する経路は、水稻根中に外部より¹⁴Cにて標識された醋酸塩を吸収せしめ、その有機酸代謝経路とこれらアミノ酸の生成経路を確証するをえた。結果は第三図に示すごとくである。ただしこれらアミノ酸の同定はニシヒドリン反応とラジオ、オートグラフィーによつたものである。

かくのごとく窒素の代謝的吸収は間接的に呼吸経路と関連せるため、第一表(四七頁参照)に示すごとく呼吸阻害剤に

第二表 水稻根中の有機酸の存在比

酒石酸	三・九
TCA廻路中の有機酸	二八・七
グリコール酸 有機酸中の 有機酸	一・五 一・三 五・四
不明の有機酸	八・五
醋酸	五〇・七
計	一〇〇・〇

よる吸収阻害の程度が甚しからざりしものと考えうる。

一、稲の根より酸素分泌の機作

稲の根が酸化的能力を有することは、水生植物の特徴の一つとしてすでに確定されたところである。かくて稲の根はその勢力範囲が酸化されるに伴つて栄養を吸収することは、陸生植物の根が還元力を有することと正反対の現象である。しかしながら、この酸化力の基礎となる生物的機作についてはさらに研究を要するところである。稲の根中に存する各種有機酸のクロマトグラフィ

による分析は第二表に示すごとくである。これによれば、TCA廻路に含まれる酸の他に醋酸がグリコール酸・蔞酸・蟻酸に伴つて多量に存することは、三井君をしてここに「グリコール酸経路」の存することを想起せしめたのである。(第三図、前頁参照)。この経路は¹⁴Cにて標識された醋酸を用いて確認せられたものであつて、グリコール酸経路における醋酸の比放射能は最初の醋酸の酸化が進むにつれて逐次減少を示した。第三図(前頁参照)はまた、稲の根の中において、一般の生物にて報告せられたと同様にTCA廻路の存することを明瞭に示すものである。ただしTCA廻路にて各化合物の比放射能の減少よりすればアセチル・コエンチムAよりコハク酸に至る近道すなわちTumberg縮合の存することも想像せしめる。

グリコール酸が順次酸化される際に放出されるエネルギーは、TCA廻路におけるごとくATP(アデノシン・三

磷酸)として貯蔵せらるることがない。この一見「放漫なる呼吸」において放出せらるるエネルギーは過酸化水素の形成に用いらるるものであつて、後者は、カタラーゼの存在において容易に水と酸素に分解する。パーオキシダーゼの一部も同じ作用を行ないうる。稲の根におけるカタラーゼ及びパーオキシダーゼの分布は第三表に示すごとくである。

第三表 水稻根のカタラーゼ及び

パーオキシダーゼ活性

根の部分	※カタラーゼ		※パーオキシダーゼ	
	※活力	割合	※活力	割合
先端	〇・二五	一〇〇	六七・七	一〇〇
中央	〇・二二	四九	一〇七・三	一五九
基部	〇・二二	四九	一〇七・三	一五九

※ 乾燥粗酵素一ミリグラム当りの反応速度定数
 ※ 乾燥粗酵素一ミリグラム当りのプロプロガリンmg但しプロプロガリンはピロガロールの酸化生成物

さらに、この仮説的経路を支持すべき酵素的研究によれば、グリコール酸化酵素はモノ・フラビン・ヌクレオチッドがコエンチムとして存する場合に最も強くグリコール酸をグリオキシル酸に酸化する。この酵素の欠除は一般に高等植物の根においてはすでに長く承認せられたところであるが、三井君はこの酵素を小麦の根中には発見することをえざりしも稲の根中には存することを示した。同時に稲の根中にはカタラーゼ及びパーオキシダーゼが多く存在することを考え合わせれば、グリコール酸経路が稲の根の酸素分泌に対する最も可能性ある経路なること確立せられたりとするも可といふべきである。稲

の根の勢力範囲(根圏)の酸化も最も旺盛に行なわれる部位はその先端部、すなわち伸長部、生長帯、根冠のごとき細胞にて充滿し、また根毛の発生旺盛なる部分である。これより上の皮層細胞間には大きな空間が存在し、先端部の入口迄はガス状酸素を輸送しうる。

さらに三井君は多数の作物根についてグリコール酸酸化酵素の活力を比較研究して、この酵素は水生植物すなわち水稲、陸稻、稗等の根には判然として存在するに反し、オーチャードグラス、チモシイ、ルセルン、ラヂノクローバー及び大麦のごとき陸生植物には存せざることを明らかにした。

かくして健康なる水稲根はこの生理化学的機作に基づいてその根の勢力範囲を酸化し、硫化水素・酪酸等の還元的有害物を酸化することにより、これを無毒化しつつ養分吸収を正常に行なうものと考えうる。

三、結論

以上説明したごとく本研究は植物とくに水稲の窒素・燐・カリウムの代謝的吸収の機作を生理化学的に明らかにしたものであつて、作物の施肥理論の確立に寄与するとともに、水稲秋落の改善に貢献するところ少なからざるものがある。また植物の代謝的吸収はこれに関係せる植物根中の酵素作用に関係するところ多く、これら酵素の阻害物質は栄養素の吸収を阻害するので、これを逆に酵素の作用を促進すべき物質は肥料中の栄養素の吸収をも促進するであろう。従つて将来の化学肥料の研究はかかる物質を発見する方向にも努力すべきものと考ええる。

以上三井君の研究は独創的にして植物とくに水稲根の養分吸収機作に関し、幾多の新しき知見を加えたるものである。これに対し国内においては、その一部に対し昭和三十一年仁科記念賞、昭和三十五年日本農学会賞を授与せられた。また国外における評価もきわめて高く、すでに三井君はこの研究により、国連国際食糧農業機構 (FAO) の国際講習会に一九五二年及び一九五四年の二回講師として招聘せられ、また一九五六年国連国際科学教育文化機構 (UNESCO)、一九六三年国際稻作研究所 (IRRI) よりそれぞれ招聘講演者として海外に赴いた他、インド・セイ

ロン・インゲンキント・フリスピン・フリスカ・中共・白米・モローロップ諸國等を主として稻作栄養改善の調査、助
 誦のために出張し、その結果を國際的に高く評価せられたる。この
 中興の著書及び論文目録

- 1) Mitsui, S., S. Aso, and K. Kumazawa (1951): Dynamic studies on the nutrient uptake by crop plants. Part 1. The nutrient uptake of rice roots as influenced by hydrogen sulfide. J. Sci., Soil and Manure, Japan, 22 (1), 46-52.
- 2) Mitsui, S., K. Kumazawa, and T. Ishiwara (1953): Do. Part 7. The effect of butyric acid and respiration inhibitors such as H₂S, NaCN and NaN₃ on the nutrient uptake by rice plants. Ibid., 24, 45-50.
- 3) Mitsui, S., S. Aso, K. Kumazawa, and T. Ishiwara (1954): The nutrient up-take of rice plants as influenced by hydrogen sulfide and butyric acid abundantly evolving under waterlogged soil conditions. Trans. Fifth Internat. Congr. Soil Sci., 2, 364-368.
- 4) Mitsui, S., S. Aso, and K. Ishizuka (1957): Dynamic studies on nutrient uptake by crop plants. Part 14. Intake and transformation H₃³²PO₄ in the root of wheat seedlings. Soil and Plant Food, 3 (2), 65-69.
- 5) Mitsui, S., and H. Hirata (1959): Dynamic studies on nutrient uptake by crop plants. Part 21. The significance of carbohydrate metabolism on potassium uptake by rice plants. J. Sci., Soil and Manure, Japan, 30 (6), 263-268.
- 6) Mitsui, S., K. Kumazawa, and N. Mukai (1959): Do. Part 22. The growth of rice plants on poorly drained soil as affected by the accumulation of volatile organic acids. Ibid., 30 (7), 345-348.
- 7) Mitsui, S. (1960): Inorganic nutrition, fertilization and soil amelioration for lowland rice. 4th ed.

Yokendo Press, Tokyo, p. 21.

- 8) Mitui, S., and K. Ishizuka (1960) : Dynamic studies on the nutrient uptake by crop plants. Part 24, On the mechanism of uptake and translocation of $H_3^{32}PO_4$ in the roots of wheat seedlings. Soil and Plant Food, 6 (1), 7-15.
- 9) Mitsui, S., and K. Kumazawa (1961) : Do. Part 33. On the amino acids and other nitrogenous compounds in rice roots grown under different nutritional conditions. J. Sci., Soil and Manure, Japan, 33 (2), 57-59.
- 10) Mitsui, S., and H. Hirata (1961 a) : Do. Part 28. Interrelationship between potassium uptake and metabolism of rice plants, especially in relation to nitrogen and phosphorus uptake. Soil Sci. Plant Nutr., 32 (5), 177-82.
- 11) Mitsui, S., and H. Hirata (1961 b) : Do. Part 29. Specific inhibition of potassium uptake of rice by EDTA treatment. J. Sci., Soil and Manure, Japan, 32 (11), 527-532.
- 12) Mitsui, S., K. Kumazawa, and M. Ueda (1961) : Do. Part 32. Organic acid content of rice roots under different nutritional conditions. Ibid., 32 (1), 11-14.
- 13) Mitsui, S., K. Kumazawa, J. Yazaki, H. Hirata, and K. Ishizuka (1962) : Dynamic aspects of N, P, K uptake and oxygen secretion in relation to the metabolic pathways within the plant roots. Soil Sci. Plant Nutr., 8 (2), 25-30.
- 14) Mitsui, S. : Dynamic aspects of nutrient uptake. The Mineral Nutrition of Rice Plants, 53-62, 1964, John Hopkins Press, Baltimore.
- 15) 三井進午 / 天正清・作物の養分吸収に関する動的研究 (第三報) 土肥誌 22, 301-307 (昭和二十六年)
- 16) 三井進午 / 熊沢喜久雄・同上 (第五報) 土肥誌 22, 131-135 (昭和二十七年)

- 17) 三井進午、熊沢喜久雄・同上(第九報) 土肥誌 26, 241-244 (昭和三〇年)
- 18) 三井進午、中川正男、馬場昂、天正清、熊沢喜久雄・同上(第一〇報) 土肥誌 26, 498-501(昭和三〇年)
- 19) 三井進午、天正清、栗原淳・同上(第一二報) 土肥誌 27, 59-62 (昭和三一年)
- 20) 三井進午、麻生末雄、石塚皓造・同上(第一四報) 土肥誌 28, 262-264 (昭和三二年)
- 21) 三井進午、熊沢喜久雄・同上(第一五報) 土肥誌 28, 265-268 (昭和三二年)
- 22) 三井進午、熊沢喜久雄・同上(第一八報) 土肥誌 29, 187-192 (昭和三三年)
- 23) 三井進午、熊沢喜久雄、向井登・同上(第二二報) 土肥誌 30, 345-348 (昭和三四年)
- 24) 三井進午、上田実・同上(第二四報) 土肥誌 30, 487-491 (昭和三四年)
- 25) 三井進午、天正清、坂間久之祐・同上(第二八報) 土肥誌 31, 265-267 (昭和三五年)
- 26) 三井進午、熊沢喜久雄・同上(第三五報) 土肥誌 32, 367-370 (昭和三六年)
- 27) 三井進午、熊沢喜久雄・同上(第三六報) 土肥誌 32, 433-439 (昭和三六年)
- 28) 三井進午、平田熙・同上(第三九報) 土肥誌 32, 537-532 (昭和三六年)
- 29) 三井進午、上田実・作物の養分吸収に関する動的研究(第五一報)、植物栄養の化学的制御に関する研究(第一報) 土肥誌 35, 409-412 (昭和三九年)