

土壤微生物叢活性剤 Takeo-Tanisaka 液の利用による

低投入持続型農業の推進に関する研究

2022 年

吉 備 国 際 大 学 大 学 院

地域創成農学研究科

地域創成農学専攻

D711901 ・ 竹生 敏幸

目次

緒論	1
第1章 Takeo-Tanisaka 液の葉菜類の成長および土壌微生物叢に及ぼす効果	5
第1節 緒言	5
第2節 材料および方法	6
第3節 結果	9
第4節 論議	15
第5節 摘要	18
第2章 Takeo-Tanisaka 液の利用による野菜リゾクトニア病の予防	19
第1節 緒言	19
第2節 材料および方法	19
第3節 結果	22
第4節 論議	29
第5節 摘要	31

第3章 Takeo-Tanisaka 液の利用による熱帯稲作の改善	32
第1節 緒言	32
第2節 材料および方法	34
第3節 結果	43
第4節 論議	52
第5節 摘要	54
第4章 Takeo-Tanisaka 液の利用による農業用水供給湖沼の水質改善	56
第1節 緒言	56
第2節 材料および方法	57
第3節 結果	59
第4節 論議	67
第5節 摘要	68
総括	69
引用文献	72

緒 論

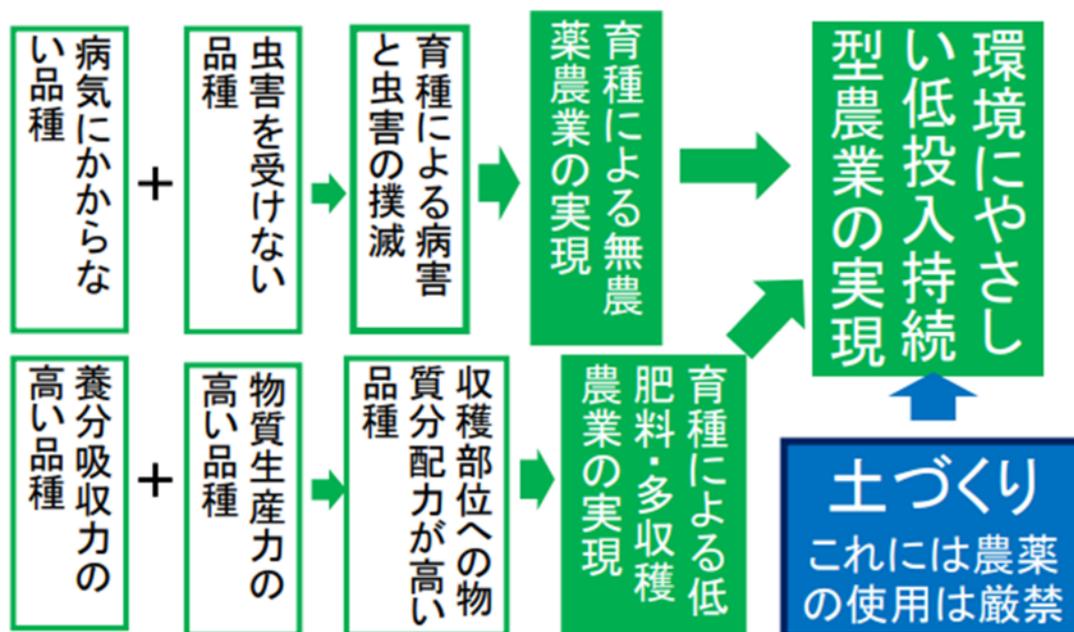
第二次世界大戦後の世界農業は、主要作物であるイネ・コムギを中心に、化学肥料の大量施与とこれに適応する短強稈多収品種の育成と栽培、さらに除草剤、殺菌剤および殺虫剤などの農薬の開発と利用によって飛躍的に発展し、今日に至っている (Aquino and Jennings 1966, Foster and Rutger 1978, 谷坂ら 1990, Tanisaka *et al.* 1994, Wang *et al.* 2009). しかし、肥料 (堆肥などの有機肥料も含めて) と農薬の大量使用は、地下水や河川水の汚染のみならず農地の疲弊をも促しており、『現行の多肥料・多農薬農業を続けるかぎり、人類の生存基盤を支える作物生産がやがてできなくなる』と危惧・指摘する声が 1980 年代の後半からヨーロッパ共同体 (EC) や米国 (USA) で大きくなり、自然生態系の力を活かした「環境と調和した農業」、すなわち化学肥料や農薬への依存度を小さくした「低投入持続型農業 (low input sustainable agriculture ; LISA)」への移行が強く謳われるようになった (嘉田 1993, 蔦谷 2003, 福島 2006).

LISA の実現・推進のためには、農耕を支える 2 つの要素、すなわち育種と栽培の 2 つの側面からのアプローチが求められる (第 諸-1 図, 谷坂 2008). 減農薬については、太陽熱や火炎による土壌消毒により土壌病害と雑草害を回避する方法が提案されているが、これらの方法は、農業用マルチシートや灯油などが必要であり、コスト高になり、確実性に欠けることから、汎用される可能性はほとんどない. したがって、減農薬の実現には、病虫害抵抗性品種を育成、栽培することがもっとも有効かつ安価な方法であると考えられる. 病虫害抵抗性品種の育成は、病虫害による収穫ロスを防ぐために古くから行われてきており、これまでに多くの作物種において多数の病虫害抵抗性遺伝子が同定され、育種に利用されてきている. なかには、イネいもち病圃場抵抗性遺伝子 *Pb1* (Hayashi *et al.* 2010) や同 *pi21* (Fukuoka *et al.* 2009), イネトビイロウンカ抵抗性遺伝子 *Bph1* (Athwal *et al.* 1971), 同 *BPH26* (Tamura *et al.* 2014) など、当該病虫害防除のために農薬散布を将来にわたって必要としない優れた遺伝子もある.

LISA の実現・推進のためのもうひとつの要素である減肥料については、高い養分吸収力、高い物質生産力および高い収穫部位への分配率をもつ品種、とりわけ高い養分吸収力をもつ品種の育

成によって達成可能であると思われる。後 2 者に関与する遺伝子は、遺伝研究が進んでいるイネにおいても同定されていないが、高い養分吸収力に関しては、イネにおいて、アンモニア態窒素濃度が上昇した水田環境でも、アンモニア態窒素の吸収を向上させる遺伝子 *actpk1* (Marcel *et al.* 2018), 主要な栄養素 (N, P₂O₅, K₂O) など複数の栄養素をバランスよく吸収し、蓄積を促進させる遺伝子 *RDD1* (Iwamoto and Tagiri 2016), 貧栄養ストレス耐性を付与する QTL (quantitative trait locus) (清水 2017) などの有望遺伝子・QTL が同定されており、遠からずそれらの育種的利用が進むと思われる。しかし、他の作物においてはこのような観点からの遺伝研究はほとんど進んでおらず、育種による減肥料の実現はなお先のことと推察される。このような状況に加えて、最近 20 年間の世界の農薬の使用量は若干減少している (FAOSTAT 2013) もの、肥料の使用量はむしろ増加しており (西尾 2002, BSI 生物科学研究所 2016, 農林水産省生産局技術普及課生産資材対策室 2021), LISA への移行はいまだほど遠い状況にある。

したがって、多くの作物の栽培において減肥料を早期に実現するためには、後者の「土づくり」に頼らざるをえない (第 緒-1 図)。この点に関して、作物と土壤微生物の関係究明 (Bonde *et al.* 1988, Akiyama *et al.* 2005, Hayashi *et al.* 2010, Higo *et al.* 2015) や各種土壤改良剤の開発などに関する研究が行われているが、LISA に資する画期的な成果は得られていない。



第 緒-1 図 育種および肥培技術の改良による低投入持続型農業実現への道

筆者は、長期にわたる多肥料・多農薬の投入によって多様性を失った土壤微生物叢を再生すれば（自然状態の多様性に戻せば）、残存する、あるいは新たに投入される多種多様な有機質や化学肥料が、植物が吸収できる小分子栄養素に分解されやすくなり、土壤が肥沃になると考え、京都大学大学院農学研究科の谷坂隆俊教授（現京都大学名誉教授、吉備国際大学教授）と土壤微生物叢の再生のための薬剤（土壤微生物叢活性化剤“Takeo-Tanisaka液”と命名、以後省略してTT液とする）を共同開発した（2006年）。

TT液は、ヒトを含めたほぼすべての生物が生命を維持するうえで必要とするアスパラギン酸、イノシン酸、グルタミン酸、ニコチン酸、チアミン、リボフラビン、ビタミンB6、タウリン、ブドウ糖、デキストリンを主成分とする水溶液である。外来微生物を利用した土壤改良材は多種類市販されているが、外来微生物の利用は、製造コストを高め、しかも、土着の土壤微生物叢を攪乱・破壊するおそれがある。このため、TT液には外来微生物をいっさい加えていない。すなわち、TT液は、生物の生命維持に必要な成分のみから成る水溶液であり、当然のことながら殺菌および殺虫作用はない。TT液の安全性については、（一般財団法人）日本食品分析センターのヒメダカを用いた96時間急性毒性試験において、調査上限濃度の10,000 mg/lでもヒメダカが致死しないことが確認されている（同センター試験報告第10048490001-01号）。また、TT液のN、P、K量は、10 mlあたりそれぞれ13 mg、0.001 mg および0.013 mgであり、使用量が2~20 ml/m²程度であることから、TT液のN、P、K増量効果はないと考えられる。

筆者と谷坂隆俊教授は、土壤微生物叢の一部を活性化すれば、土壤微生物叢の食物連鎖が回復、再生されると考えており、TT液の使用量はほんの一部の土壤微生物の餌になる程度でよいと考えている。

本研究では、滋賀県の野菜生産力検定試験圃と吉備国際大学地域創成農学研究科太陽光利用型植物工場において行った栽培実験から、TT液が、コマツナ (*Brassica rapa* var. *perviridis*)、ミズナ (*Brassica rapa* var. *nipposinica*) およびハボタンの成長および土壤微生物叢の多様化、活性化を促す効果を有すること（第1章）、および滋賀県の野菜生産力検定試験圃で行った栽培実験から、TT液が、ハウレンソウおよびニンジンの成長に大きな効果を有し、土壤伝染性病害のひとつであるリゾクトニア病の感染予防効果があること（第2章）を、それぞれ見出すとともに、熱帯アジ

アフィリピン共和国ミンダナオ島ブトゥアン市で行ったイネ (*indica* 品種) の栽培実験から、TT液が、無肥料・無殺菌剤という条件下でイネの単位面積あたり収量を大幅に増加する効果を有すること (第3章)、さらに、秋田県のヘドロが水面近くまで堆積した池の水質改善実験から、TT液が、湖沼の水質改善にも大きな効果を有すること (第4章) を、それぞれ認め、TT液がLISAの実現・推進の鍵となる「土づくり」に加えて農業用水の水質改善に有効なツールになることを明らかにした。本論文は、それらの結果をとりまとめたものである。

本文に入るに先立ち、研究の当初より本論文の完成に至るまで終始懇切丁寧な指導と激励を賜り、研究者としての礎を作っていただいた吉備国際大学大学院地域創成農学研究科教授谷坂隆俊博士、ならびに、TT液の開発から世界各地での実験遂行にあたり多大なご支援を頂いた株式会社シーティーシー前仲有典会長および同前仲伸一社長に衷心より感謝の意を表す。また、実験遂行中絶えず助言をいただいた吉備国際大学大学院地域創成農学研究科准教授桧原健一郎博士、同准教授氷見英子博士、同講師許冲博士、実験に協力いただいた佐藤勇、李玩蓉、長嶋龍斗、田中の諸兄をはじめ吉備国際大学農学部栽培・育種学分野の各位に深謝の意を表す。

第1章 Takeo-Tanisaka 液の葉菜類の成長および 土壌微生物叢に及ぼす効果

第1節 緒言

病虫害抵抗性遺伝子の探索・同定と育種的利用は、イネやコムギ、トウモロコシ、ダイズなどの主要作物において進んでおり、LISA の重要項目のひとつである「減農薬」は、今後かなり進む可能性があると考えられるが、同「減肥料」は、これを可能にする高養分吸収力遺伝子がイネで同定されている (Marcel *et al.* 2018, Iwamoto and Tagiri 2016) もの、そのほかの作物種では見出されておらず、その実現にはまだかなりの年月が必要と思われる。したがって、「減肥料」については、当面の間は「土づくり」によってその実現をはからねばならないであろう。筆者は、緒論で述べたように、長期にわたる多肥料・多農薬の投入によって多様性を失った土壌微生物叢を再生すれば土壌中に存在する有機質や化学肥料（新たに投入されるものも含む）の栄養素への分解が進み、土壌が肥沃になると考え、京都大学農学研究科谷坂隆俊教授（現京都大学名誉教授、吉備国際大学教授）と共同で 2006 年に土壌微生物叢の再生のための薬剤（土壌微生物叢活性化剤“Takeo-Tanisaka 液”と命名、以後省略して TT 液とする）を開発した。

本章では、有機質が定期的に投入されている肥沃な土壌（実験 I，供試材料：コマツナ *Brassica rapa* var. *perviridis*，ミズナ *B. rapa* var. *laciniifolia*），有機質をほとんど含まない真砂土中心の土壌（実験 II および III，同：コマツナ），および、良質の苗の生産に適した物理性や化学性をもつように製造されている市販の園芸培土（実験 III，同：コマツナ，ハボタン *B. oleracea* var. *acephala* f. *tricolor*）を用いて、TT 液の投入がコマツナ，ミズナおよびハボタンの成長に及ぼす効果、ならびに土壌微生物多様性・活性値（SMDA；材料および方法で説明）に及ぼす効果を調べ、TT 液が LISA の普及・推進に必要な肥沃な土壌をつくるツールになりうるか否かを解析した。

第2節 材料および方法

実験Ⅰ 有機質が定期的に投入されている野菜生産力検定試験圃における TT 液の投入効果の解析

植物材料としてコマツナ品種“菜々子”（タキイ種苗）とミズナ品種“京しぐれ”（タキイ種苗）の種子を供試した。2011年8月19日にタキイセル培土（タキイ種苗）を入れた72穴育苗セルトレイに播種し、同年10月4日に滋賀県の野菜生産力検定試験圃（作付けごとに有機物を投入している圃場）に定植した（株間15cm，条間25cm），タキイセル培土の成分は，N:85mg/l， P_2O_5 :90mg/l， K_2O :85mg/l および微量元素である。定植圃場では，TT液を投入するTT液投入区と投入しない対照区を設けた。両処理区とも，9月21日に8-8-8化成肥料100g/m²（N:8g， P_2O_5 :8g， K_2O :8g）を基肥として施与した。TT液投入区では，TT液5.6ml/m²を定植前日に，以後ほぼ1週間ごとに4ml/m²を11月1日まで計4回，畝の表面に散布・投入した。本研究では，実験Ⅱ，Ⅲも含めてTT液が土壌表面にむらなくいきわたるように，原液を100～1,000倍に希釈して散布・投入した。TT液投入区，対照区ともに，11月7日に収穫し，茎葉長，茎葉重，根重，葉に含まれる葉緑素量（SPAD；最長葉の3点平均）を個体ごとに測定したのち，地上部搾汁液の NO_3^- ， K^+ および Ca^{++} 濃度，ならびにBrix（糖度）を個体ごとに求めた。SPADの測定には葉緑素計（コニカミノルタ）， NO_3^- ， K^+ および Ca^{++} 濃度の測定には，それぞれ6581S複合型硝酸イオン選択性電極（堀場製作所），6582S複合型カリウムイオン選択性電極（堀場製作所）および6583S複合型カルシウムイオン選択性電極（堀場製作所）を用いた。BrixはBrix計（アタゴ）によって測定した。栽植方法は，1畝1試験区（20個体）とし，両区間の平均値の差の有意性検定はt検定によって行った。

収穫後13日（11月20日）に，コマツナTT液投入区およびコマツナ対照区それぞれの土壌をサンプリングし，これを（株）DGCテクノロジーに送付して「土壌微生物多様性・活性値；soil microbial diversification/activity value (SMDA)」（櫻本2013）の調査を委託した。SMDAとは，サンプル土壌を一定の水で薄めたものを，それぞれ異なった種類の有機物が入った95のウェルと

有機物が入っていない 1 つのウェルから成る 96 ウェル試験用プレートに入れて、ウェルごとに発色状態を一定温度で 48 時間連続（15 分間隔）測定し、これをもとにサンプル土壤に生息する微生物の種類（多様性）および各有機物が分解される速度（活性）を総合的に判断し数値化したものである（DGC テクノロジー）。数値が高いほど微生物の種類が多く、それらの活性が高いことになる。

実験 II 有機質が少ない真砂土を中心とした土壤における TT 液の投入効果の解析

植物材料としてコマツナ品種“菜々美（タキイ種苗）の種子を供試した。2020 年 10 月 14 日に、ハウス内育苗ベッドに真砂土（花崗岩が風化してできた砂状の土壤で養分をほとんど含まない）を入れ、これに 8-8-8 化成肥料を 100 g/m^2 （N: 8 g, P_2O_5 : 8 g, K_2O : 8 g）、堆肥を 100 g/m^2 （N: 約 0.7 g, P_2O_5 : 約 0.36 g, K_2O : 約 0.44 g）施与した。8-8-8 化成肥料施与量は、慣行栽培と同量である。10 月 31 日にコマツナ種子を育苗ベッドに直播し（条間 25 cm）、10 日後に株間が 15 cm になるように間引きをした後、12 月 24 日に収穫するまで栽培を続けた。形質調査は、12 月 11 日と 12 月 24 日に行い、両日とも茎葉長、株重、茎葉重、根重、および SPAD（最長葉の 3 点平均）を個体ごとに測定した。12 月 24 日にはこれら 5 形質に加えて葉数と Brix を調査した。処理区は TT 液を投入する TT 液投入区と投入しない対照区とした。TT 液投入区では、播種前の 10 月 14 日に 10 ml/m^2 、播種日の 10 月 31 日に 5 ml/m^2 、11 月 9 日に 2 ml/m^2 、12 月 2 日に 2 ml/m^2 の TT 液を育苗ベッド全面に散布・投入した。栽培は、反復 2 の乱塊法に従い、試験区当たりの個体数は 15 とした。

実験Ⅲ 市販の育苗培土を基本土壌とした場合の TT 液の投入効果の解析

植物材料としてコマツナ品種“菜々美”（タキイ種苗）とハボタン品種“フレッシュレッド”（タキイ種苗）の種子を供試した。ハボタンは、農学的には葉菜類として扱われないが、植物学的にはキャベツ (*B. Oleracea* var. *capitata*) と同種であること、および成長が速く早期に実験結果が得られることから供試した。コマツナ、ハボタンともに 2021 年 9 月 4 日に播種、9 月 24 日にハウス内育苗ベッドに定植し（コマツナ：株間 15 cm, 条間 25 cm; ハボタン：株間 30 cm, 条間 30 cm）、12 月 1 日に収穫するまで栽培を続けた。基本土壌として「タキイセル培土（タキイ種苗）：バーミキュライト = 15:1 の混合土壌（OR 土壌とする）」、「真砂土：バーミキュライト：タキイ育苗培土（タキイ種苗） = 30:2:1 の混合土壌に 8-8-8 化成肥料を 100 g/m² 投入した土壌（CH+Or 土壌とする）」および「全量タキイ育苗培土（HOr 土壌とする）」の 3 種類とし、それぞれ TT 液を投入する TT 液投入区と投入しない対照区を設けた。OR 土壌と CH+Or 土壌ではコマツナを、HOr 土壌ではハボタンを栽培した。タキイ育苗培土の成分は N: 320 mg/l, P₂O₅: 210 mg/l, K₂O: 300 mg/l および微量元素である。タキイセル培土については、実験 I の材料および方法で記した。TT 液投入区では、TT 液を定植日の 9 月 24 日に散布・投入した（5 ml/m²）。収穫後直ちに、莖葉長、株重、莖葉重および根重を個体ごとに調査した。栽培は、反復 2 の乱塊法に従い、試験区当たりの個体数は 10 とした。収穫直後に TT 液投入区にのみ TT 液を 5 ml/m² 散布・投入し、その 15 日後（12 月 16 日）に、全処理区から土壌をサンプリングして（株）DGC テクノロジーに SMDA の調査を委託した。収穫直後に TT 液を散布・投入したのは、TT 液の SMDA に対する効果を明瞭にするためである。

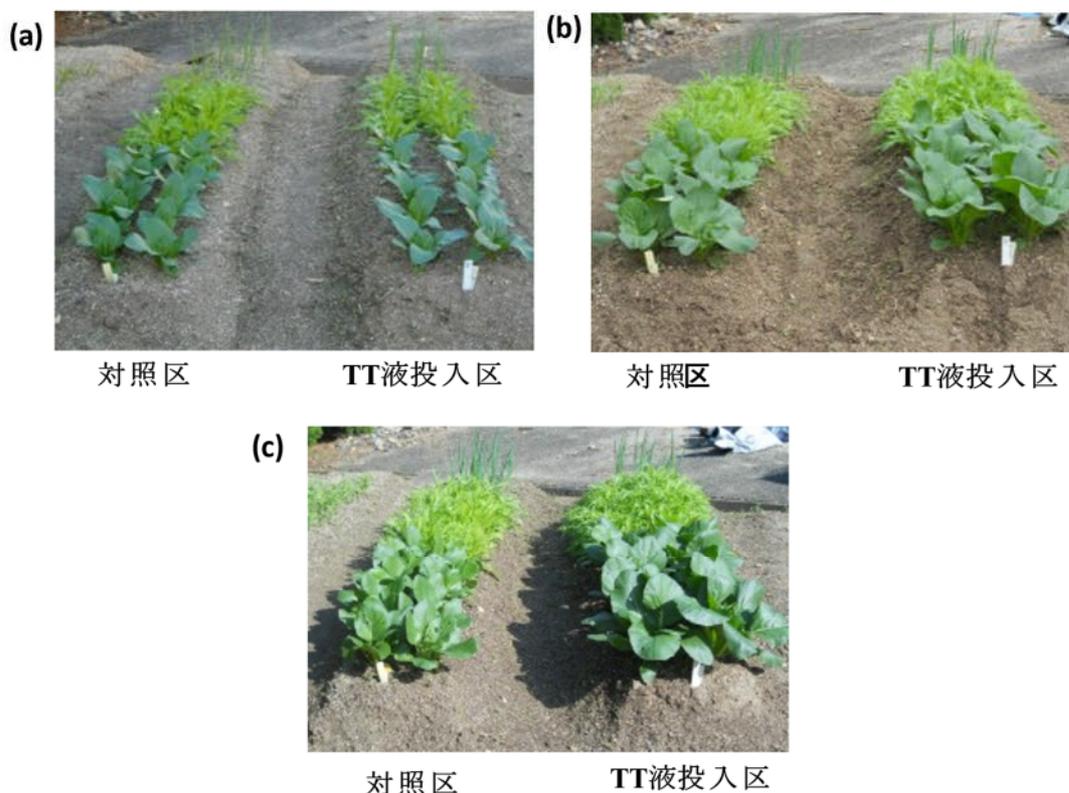
第3節 結果

実験Ⅰ 有機質が定期的に投入されている野菜生産力検定試験圃における TT 液の投入効果の解析

定植から約2週間(10月5日~10月20日)は、コマツナおよびミズナともに TT 液投入区個体より対照区個体のほうがやや生育旺盛であったが、定植後20日ごろからは、TT 液投入区個体のほうが生育旺盛になり、播種後日数を重ねるにつれその差は大きくなった(第1-1図)。コマツナおよびミズナの収穫適期(コマツナ10葉期)(播種後80日;11月7日)における TT 液投入の効果を図1-1表に示した。まず、コマツナについてみると、茎葉長および茎葉重に関しては対照区平均と TT 液投入区平均間に1%水準の、根重に関しては5%水準の有意差があり、TT 液投入区平均の対照区平均に対する比は、それぞれ1.4、2.3および1.4であった。しかし、SPAD に関しては有意差がなく、また、搾汁液中の NO_3^- 濃度に関しては TT 液投入区のほうが5%水準で有意に高い(3.5倍)こと、同 Ca^{++} 濃度および Brix に関しては1%水準で有意に低いこと(それぞれ0.4および0.5倍)、さらに、 K^+ 濃度に関しては両区間に有意差のないことが認められた。

ミズナについては、茎葉長および茎葉重で1%水準、 NO_3^- 濃度に関して5%水準の有意差があり、TT 液投入区平均の対照区平均に対する比はそれぞれ1.4、2.1および3.6であった。しかし、根重、SPAD、 K^+ 濃度、 Ca^{++} 濃度および Brix については両区間で有意差は認められなかった。

収穫後14日(11月21日)の SMDA は、対照区で1,168,306(偏差値60.6)であったのに対して、TT 液投入区では1,379,788(偏差値66.5)となり、TT 液の投入によって SMDA が向上することが明らかになった(第1-2図)。なお、SMDA に付された偏差値は、DGCテクノロジーが全国各地の生産者の依頼を受けて評価したさまざまな水田・畑地土壌の SMDA に関するビッグデータを基に算出したものである。実験Ⅰで用いた圃場は定期的に有機質が投入されている野菜の生産力検定試験用の優良圃場であり、TT 液を投入しなくてもコマツナ栽培後の土壌微生物多様性・活性値の偏差値は60.6とかなり高かったが、TT 液の投入により66.5まで向上した。



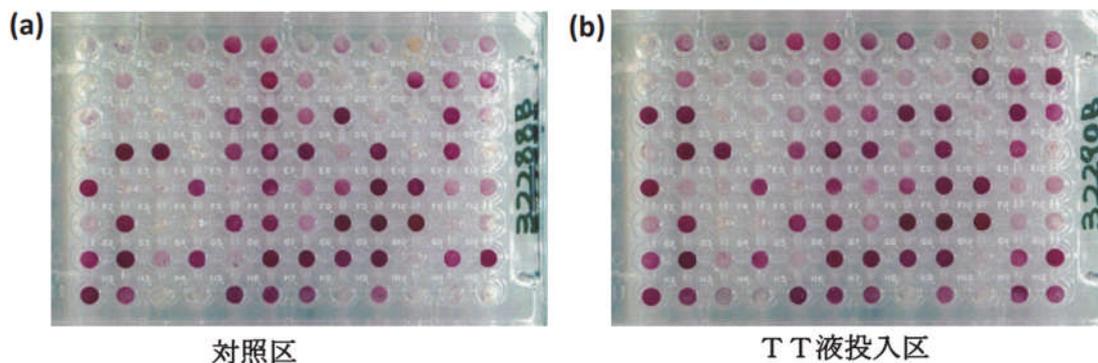
第 1-1 図 コマツナおよびミズナの成長に及ぼす TT 液投入の効果(実験 I)

(a)播種後 60 日(10 月 18 日), (b)播種後 68 日(10 月 26 日), (c)播種後 74 日(11 月 1 日).
 (a), (b), (c) いずれにおいても写真内手前がコマツナ, 奥がミズナ.

第1-1表 有機質が定期的に投入されている土壌におけるTT液投入がコマツナとミズナの成長および茎葉成分に及ぼす効果 (実験 I ; 播種後80日/11月7日)

野菜・処理区	茎葉長 (cm)	茎葉重 (g)	根重 (g)	SPAD (葉緑素値)	NO ₃ ⁻ (ppm)	K ⁺ (ppm)	Ca ⁺⁺ (ppm)	Brix
コマツナ								
対照区	24	59	16	47.2	414	4760	136	4.6
TT液投入区	33 **	138 **	22 *	53.0 ns	1450 *	4180 ns	59 **	2.3 **
ミズナ								
対照区	27	97	12	25.3	380	3740	111	3.8
TT液投入区	37 **	200 **	12 ns	27.0 ns	1366 *	4040 ns	95 ns	2.4 ns

** , * : TT液投入区平均が対照区平均に対してそれぞれ1%および5%水準で有意差があることを示す, ns : TT液投入区平均が対照区平均に対して有意差がないことを示す



第 1-2 図 コマツナ栽培後土壌の土壌微生物多様性・活性値測定プレート
(実験 I. 収穫後 14 日の 2011 年 11 月 21 日に採土).

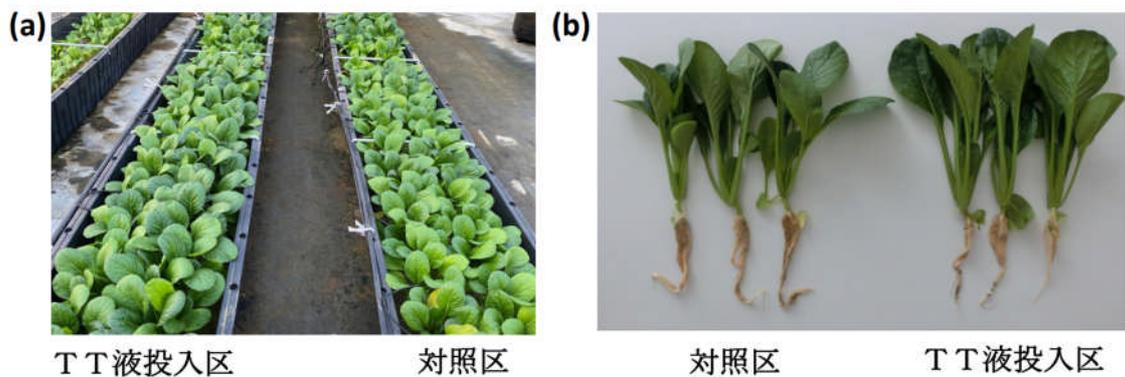
対照区の活性値：1,168,306(偏差値 60.6)

TT 液投入区の活性値：1,379,788(同 66.5)

実験 II 有機質が少ない真砂土を中心とした土壌における TT 液の投入効果の解析

有機質をほとんど含まない真砂土に、8-8-8 化成肥料を 100 g/m^2 (N: 8 g, P_2O_5 : 8 g, K_2O : 8 g), 堆肥を 100 g/m^2 (N: 約 0.7 g, P_2O_5 : 約 0.36 g, K_2O : 約 0.44 g) 投入した土壌を培土とした場合のコマツナの成長に及ぼす TT 液の効果を調べたところ、株重、茎葉重、茎葉長、根重および SPAD に関しては、播種後 41 日 (12 月 11 日) および播種後 54 日 (12 月 24 日) いずれにおいても対照区より TT 液投入区の方が有意に大きくなった (第 1-3 図. 第 1-2 表). TT 液投入区平均の対照区平均に対する比は、株重が播種後 41 日で 1.6, 54 日で 1.5, 茎葉重が 41 日で 1.7, 54 日で 1.6, 茎葉長が播種後 41 日, 54 日ともに 1.1, 根重が 41 日で 1.2, 54 日で 1.3, SPAD が播種後 41 日で 1.3, 54 日で 1.1 であった. これに対して、葉数では対照区と TT 液投入区間に有意差がなく、Brix に関しては TT 液投入区で低くなった (対照区比 0.8). このように、本実験においても調査形質に関して実験 I とほぼ同様の傾向が得られており、有機質が定期的に投入されている野菜生産力検定試験圃における効果より若干小さいものの有機質の少ない土壌においても

TT 液がコマツナの成長を促進する効果を有することが明らかになった。



第 1-3 図 有機質が少ない土壌（真砂土）におけるコマツナの成長に及ぼす TT 液投入の効果（実験Ⅱ） (a)播種後 54 日(12 月 24 日)のハウス内育苗ベッドの様子, (b)播種後 54 日(12 月 24 日)の植物体。

第1-2表 有機質をほとんど含まない真砂土中心の土壌におけるTT液の投入がコマツナの成長およびBrixに及ぼす効果（実験Ⅱ；播種後41日/12月11日, 同54日/12月24日）

調査日・処理区	茎葉長 (cm)	株重 (g)	茎葉重 (g)	根重 (g)	葉数	SPAD	Brix
12月11日							
対照区	22.7	19.8	15.2	4.6	—	38.43	—
TT液投入区	24.9 *	30.7 **	25.3 **	5.4 *	—	48.11 **	—
12月24日							
対照区	23.4	29.3	20.3	9.0	9.1	42.0	4.3
TT液投入区	26.9 *	43.9 **	31.8 **	12.0 *	10.0 ns	46.9 *	3.5 *

**,* : TT液投入区平均が対照区平均に対してそれぞれ1%および5%水準で有意差があることを示す ns : TT液投入区平均が対照区平均に対して有意差がないことを示す

実験Ⅲ 市販の育苗培土を基本土壌とした場合の TT 液の投入効果の解析

「タキイセル培土（タキイ種苗）：バーミキュライト＝15:1 の混合土壌（OR 土壌）」および「真砂土：バーミキュライト：タキイ育苗培土（タキイ種苗）＝30:2:1 の混合土壌に 8-8-8 化成肥料を

100 g/m²投入した土壌 (CH+Or 土壌)」においても、TT 液の投入によって、コマツナの株重、茎葉重、根重が1%水準で有意に大きくなることが認められた (第 1-3 表)。株重、茎葉重、根重の TT 液投入区平均の対照区平均に対する比は、前者の土壌ではそれぞれ 1.14、1.16 および 1.16、後者の土壌ではそれぞれ 1.07、1.08、1.08 あった。茎葉長に関しては、どちらの土壌においても有意差がなかった。ハボタンの調査形質は茎葉重のみであったが、これに関しても対照区と TT 液投入区間で有意差があり、TT 液投入区のほうが大きな値 (1.19 倍) を示した。

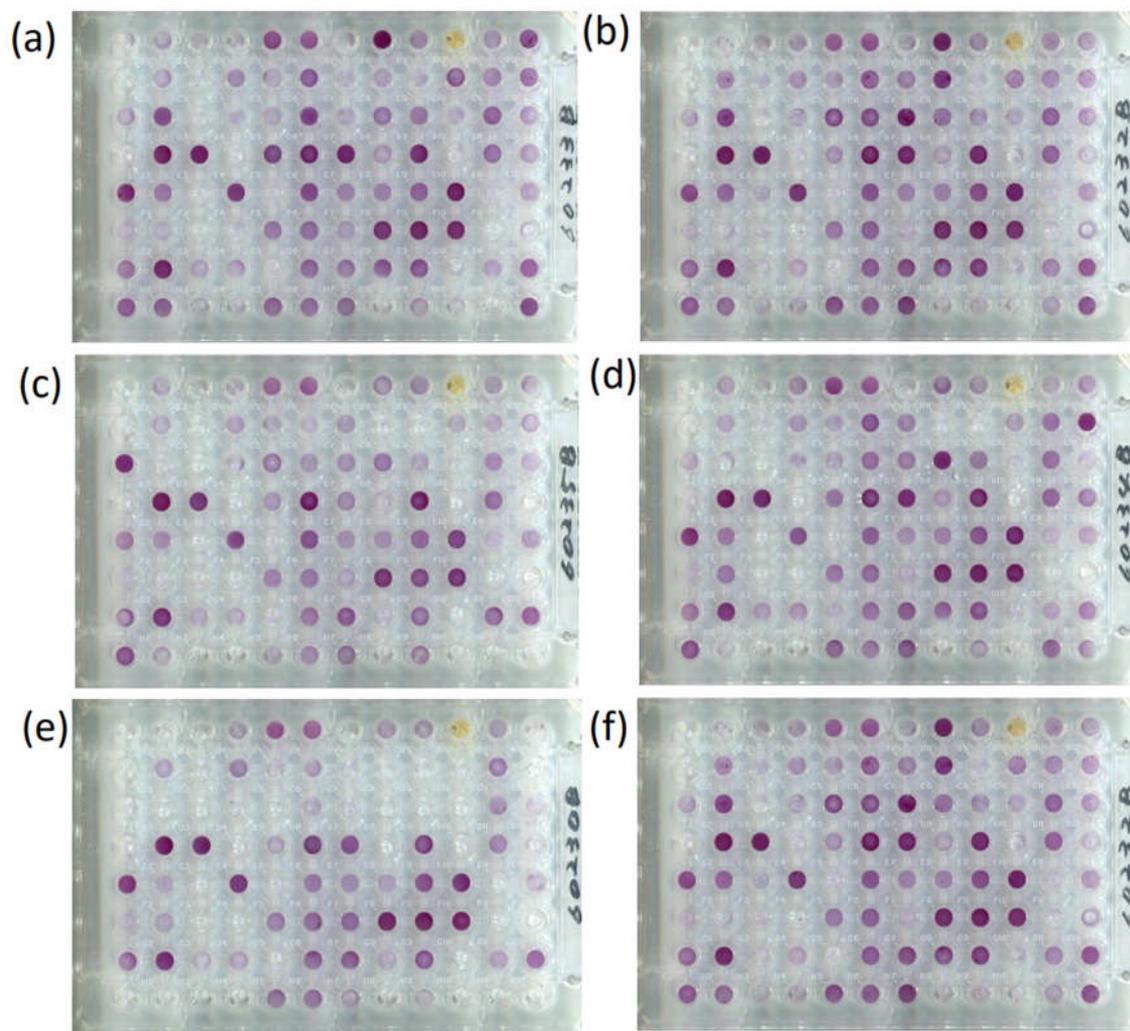
収穫後 15 日 (12 月 16 日) に、TT 液投入区および対照区それぞれの土壌をサンプリングし、SMDA を調査したところ、コマツナ栽培後の土壌では、対照(OR)区で 979,833 (偏差値 55.4)であったのに対して TT 液投入(OR)区では 1,082,448 (同 58.3)、対照(CH+ Or)区で 676,821 (同 47.1)であったのに対して TT 液投入(CH+Or)区では、925,061 (同 53.9)、さらにハボタン栽培後の土壌では、対照(HOr)区で 583,840 (同 44.5)であったのに対して TT 液投入(HOr) 区では 844,818 (同 51.7)となり、いずれの土壌を用いた場合にも、TT 液投入によって SMDA が大幅に向上することが明らかになった (第 1-4 図)。真砂土を基本土壌とした混合土壌では、対照 (CH +Or) 区の値がセル培土を基本土壌とした対照 (OR) 区よりかなり低かったが、TT 液を投入することによって対照 (OR) 区並みになったことは注目に値する。

第1-3表 良質の苗の生産に適した物理性や化学性をもつように製造されている市販の園芸培土におけるTT液投入がコマツナおよびハボタンの成長ならびに土壤微生物叢に及ぼす効果 (実験Ⅲ; 播種後88日/12月1日)

野菜・処理区 ¹⁾	植物体				土壤微生物多様性・活性値	
	茎葉長 (cm)	株重 (g)	茎葉重 (g)	根重 (g)	活性値	偏差値
コマツナ						
対照 (OR) 区	29.6 ^{a)}	119.1 ^{a)}	89.6 ^{a)}	29.5 ^{a)}	979,833	55.4
TT液投入(OR)区	29.4 ^{a)}	135.8 ^{b)}	103.6 ^{b)}	34.2 ^{b)}	1,082,448	58.3
対照(CH+Or)区	23.8 ^{b)}	71.6 ^{c)}	46.5 ^{c)}	26.9 ^{c)}	676,821	47.1
TT液投入(CH+Or)区	24.5 ^{b)}	76.3 ^{d)}	50.2 ^{d)}	29.1 ^{a)}	925,061	53.9
ハボタン						
対照(HOr)区	—	—	432	—	583,840	44.5
TT液投入(HOr)区	—	—	513 ^{**}	—	844,818	51.7

1) 処理区名は本文を参照、 2) コマツナにおける処理区平均の比較はTukey's testによって行った。異文字 (a, b, c, d) 間は1%水準で有意であることを示す。

** : TT液投入区平均が対照区平均に対して1%水準で有意差があることを示す。



第 1-4 図 コマツナおよびハボタン栽培後土壌の土壤微生物多様性・活性値測定プレート
(実験Ⅲ, 収穫後 15 日の 2021 年 12 月 16 日に採土)

(a) 対照(OR)区, (b)TT 液投入(OR)区, (c)対照(CH+Or)区, (d)TT 液投入(CH+Or)区, (e)対照(HOr)区, (f)TT 液投入(HOr)区, 各処理区における SMDA は第 1-3 表を参照

第4節 論議

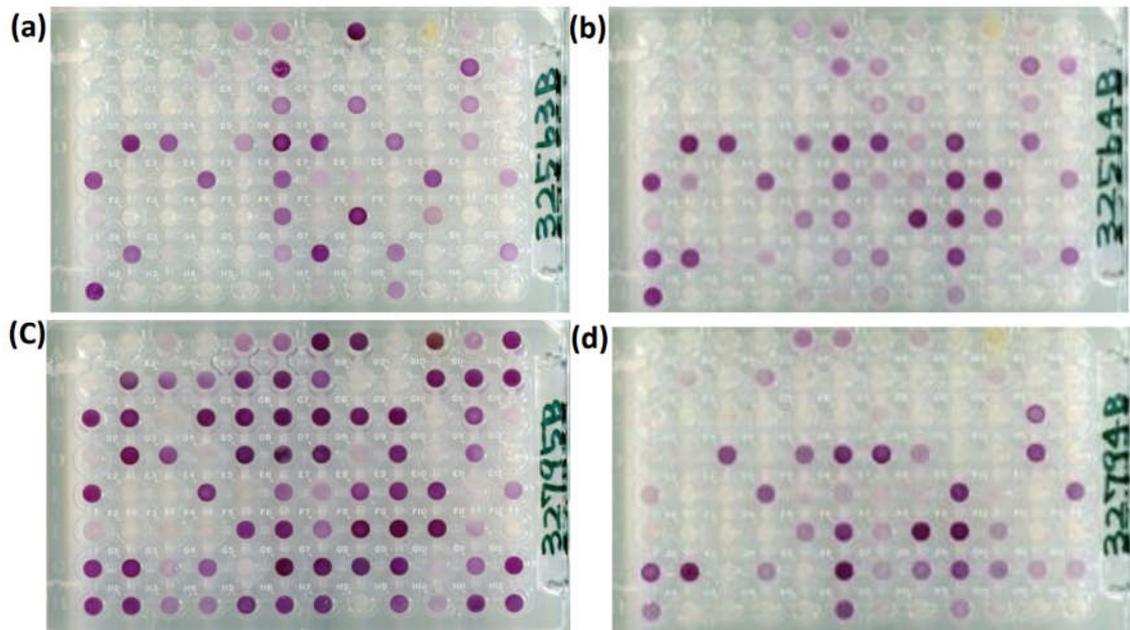
病虫害抵抗性品種の育成は、LISA の実現・推進にとって重要な課題となっており、これに資する有用遺伝子の探索と同定に関する研究は種々の作物において行われている。これまでに、イネいもち病圃場抵抗性遺伝子 *Pb1*(Hayashi *et al.* 2010), 同 *Pi21* (Fukuoka *et al.* 2009), イネトビイロウンカ抵抗性遺伝子 *BPH26* (Tamura *et al.* 2014)など優れた病虫害抵抗性遺伝子が多数同定されており、これらの利用による農薬使用量の大幅な削減が期待されている。一方、肥料の削減のためには、養分吸収能の高い品種の育成が有効であり、イネやシロイヌナズナにおいてこれに関与する遺伝子の探索と同定が進められている。このなかで、筆者が注目している遺伝子は、既述の、水田環境でもアンモニア態窒素の吸収を向上させるイネ遺伝子 *actpk1* (Marcel *et al.* 2018) , 主要な栄養素（窒素, リン酸, カリウム）を含む複数の栄養素をバランスよく吸収し、蓄積を促進させるイネ遺伝子 *RDD1* (Iwamoto and Tagiri 2016), 貧栄養ストレス耐性を付与するイネ QTL (清水 2017) である。これら遺伝子の育種的利用は、着実に進むものと推察されるが、それら遺伝子や病虫害抵抗性遺伝子を複数もつ品種の育成には相当に長い年月が必要であり、その間にも土壌の疲弊が一層深刻化する可能性が高い。したがって、LISA を実現・推進するためには、土壌を肥沃にし、減肥料を可能にする栽培技術の開発を急ぐ必要がある。本研究では、TT 液が LISA の実現・推進のためのツールとして使えると考え、TT 液の植物の成長および土壌微生物叢に及ぼす効果を解析した。

その結果、有機質が定期的に投入されている肥沃な土壌(実験 I ; 供試材料コマツナ, ミズナ), 有機質を少量しか含まない真砂土中心の土壌 (実験 II, III ; 供試材料コマツナ), および良質の苗の生産に適した物理性や化学性をもつように製造されている市販の園芸培土 (実験 III ; 供試材料コマツナ, ハボタン) いずれにおいても、TT 液の投入により植物体の成長が旺盛になることが確認された (第 1-1, 1-3 図, 第 1-1, 1-2, 1-3 表)。すなわち、TT 液は土壌の種類に関係なく、植物の成長を旺盛にする効果を有することが明らかになった。TT 液には、N, P, K が含有されており、それによって対照区より TT 液投入区で成長が促進されたのではないかとする指摘がある

かもしれない。しかし、実験Ⅰ、実験Ⅱおよび実験Ⅲにおける播種から収穫までの TT 液の総投入量は、それぞれ 21.6 ml/m² (5 回に分けて投入)、19 ml/m² (4 回に分けて投入) および 5 ml/m² (1 回のみ) であり、いずれの実験においても投入した TT 液に含まれる N、P、K は極少量である。葉や茎の成長にもっとも関係する N 量を具体的に示すと、実験Ⅰで投入した TT 液 21.6 ml 中に含まれる N は 28.1 mg (P : 0.002 mg, K : 0.028 mg)、実験Ⅱで投入した TT 液 19 ml 中に含まれる N は 24.7 mg、実験Ⅲで投入した TT 液 5 ml 中に含まれる N は 6.5 mg であり、TT 液に含まれていた N が植物の成長に影響を与えるほどの量でないことが理解できる。さらに、TT 液の投入によって SMDA が増加した (第 1-2, 1-4 図, 第 1-3 表) ことから、TT 液の投入によるコマツナ、ミズナおよびハボタンの成長促進は、TT 液に含まれている N の直接効果ではなく、TT 液投入によって土壤微生物叢が多様化し、多種多様の有機質が分解され植物が吸収しやすい N 化合物の量が増えたことによる結果であると考えられる。

筆者と谷坂隆俊教授は、本実験に加え、2011 年の東北大震災において津波の大被害を受けた宮城県山元町の塩害ダイズ圃場において、TT 液投入によって土壤微生物多様性・活性値が大幅に大きくなることを認めている。第 1-5 図から明らかなように、TT 液不投入区では 7 月 24 日の SMDA が 676,419 (偏差値 47.0) と、6 月 5 日の値 705,443 (同 47.8) より小さかったが、TT 液投入区 (2,000 ml/10a) では投入後の 7 月 24 日の値が 1,388,387 (同 66.7) と、投入前の 6 月 5 日の値 630,065 (同 45.8) の 2 倍以上大きかった。山元町の試験では、TT 液投入区、不投入区ともに播種前に除草剤「ラウンドアップマックスロード」を散布した。しかし、TT 液投入区で得られた結果は、除草剤が TT 液の効果に大きな影響を及ぼさないこと、すなわち TT 液は「ラウンドアップマックスロード」との併用が可能であることを示している。実検Ⅰにおいて TT 液の投入によってコマツナとミズナの茎葉搾汁液中の NO₃⁻濃度が有意に増加し、SPAD も有意差がなかったものやや増加したこと (第 1-1 表)、およびコマツナのみを用いた実検Ⅱにおいて SPAD が有意に増加した (第 1-2 表) ことは、TT 液の投入によって土壤中の有機質や化学肥料の分解が進んで土壤中に NO₃⁻が増え、これを吸収した植物体の NO₃⁻濃度が高くなったこと、および NO₃⁻から NO₂⁻、NH₄⁺への還元反応のパイプが太くなり、グルタミン、グルタミン酸が多く生合成されることによってグルタミン酸から 15 の酵素反応を経て生合成される葉緑素の量が多くなったことを示していると

考えられる。一方、実験 I では、コマツナにおいて Ca^{++} 濃度と Brix が有意に低下し、ミズナにおいては有意差がなかったものの低下傾向が認められた（第 1-1 表）。このことは、TT 液の投入によってコマツナ、ミズナともに茎葉重が 2 倍以上大きくなったことと関係しているのではないかと考えられるが、この点に関してはさらなる検証が必要である。



第 1-5 図 TT 液投入による宮城県山元町の津波被害ダイズ圃場の土壤微生物多様性・活性値の向上（2012 年）

(a)TT 液投入圃場における投入前(6 月 5 日)の活性値: 630,065 (偏差値 45.8), (b)TT 液不投入圃場における 6 月 5 日の活性値: 705,443 (同 47.8). (C)TT 液投入圃場における投入後(7 月 24 日)の活性値: 1,388,387(同 66.7). (d)TT 液不投入圃場における 7 月 24 日の活性値: 676,419(同 47.0).

以上のように、TT 液が土壤微生物叢を多様化・活性化させ土壌を肥沃にし、植物の成長を促進することが明らかになったことから、TT 液は LISA の有効なツールになると考えられる。しかし、本研究では、慣行農業で生産され市場に並べられている野菜とそんな色のない野菜を生産するために、肥料をどこまで減らせるのかは検証されていない。また、イネやコムギなどの主要作物において現在の収量水準を下げることなくどこまで施肥量を減らせるのかも明らかにされていない。これらは、LISA の早期実践が求められる今日、TT 液の適切な使用量の決定とあわせて、早急に

解決しなければならない課題であろう。さらに、低投入持続型農業の推進には、農薬と肥料の削減のほか、労力、費用といったコストの削減も重要である。TT液の利用によって化学肥料の購入量とその費用をどこまで減らせるのかも重要な課題になると思われる。なお、著者らは、これまでの研究から、TT液は作物の土壌感染性の病気を予防する効果を有しており（第2章で詳述）、土壌細菌が原因の連作障害を予防できること、河川や湖沼の水質改善にも大きな効果を有する（湖沼については第4章で詳述）ことを確認している。

第5節 摘要

環境汚染や農地の疲弊を促す多肥・多農薬農業から脱却し、人類の持続的発展を保証する低投入持続型農業(low input sustainable agriculture; LISA)を実現・推進するためには、病虫害抵抗性と高い養分吸収力をもつ品種の育成ならびに肥料の多量投入を必要としない肥沃な土壌を作る画期的栽培技術の開発が必要である。本研究では、著者の竹生と谷坂教授が開発した土壌微生物叢活性剤“Takeo-Tanisaka 液”（TT液）の葉菜類の成長および土壌微生物多様性・活性値（soil microbial diversification/activity value；SMDA）に及ぼす効果を調べ、TT液がLISAの普及・推進に必要な肥沃な土壌をつくるツールになりうるか否かを検討した。その結果、有機質が定期的に投入されている土壌（供試材料：コマツナ、ミズナ）、有機質をほとんど含まない真砂土中心の土壌（同：コマツナ）、および、良質の苗の生産に適した物理性や化学性をもつように製造されている市販の園芸培土（同：コマツナ、ハボタン）のいずれにおいても、TT液の投入によって植物体の成長が旺盛になり、SMDAも大きくなったことから、TT液には、土壌微生物叢を多様化・活性化する力、すなわち多種多様な有機質や化学肥料の分解を促して土壌を肥沃にする力があり、したがって、TT液はLISAの実現・推進にあたって有効なツールになる可能性が高いと結論した。

第2章 Takeo-Tanisaka 液の利用による野菜リゾクトニア病の予防

第1節 緒論

前章において、TT 液は、コマツナ、ミズナおよびハボタンの成長と土壤微生物叢の多様化、活性化に大きな効果を有することを明らかにした。本章では、ニンジン (*Dacus carota*) およびホウレンソウ (*Spinacia oleracea*) においても同様の効果がみられるかどうかをまず調査した。しかし、この時、ニンジン、ホウレンソウともに、リゾクトニア病 (高温多湿時に発生するリゾクトニア菌 *Rhizoctonia solani* によって誘発される土壤伝染性病害) が TT 液不投入区 (慣行区) で発生、蔓延したのに対して、TT 液投入区ではまったく観察されなかったことから、TT 液はリゾクトニア病の予防効果があると考え、これを確認するために、同じ場所で再びホウレンソウ栽培を行い、TT 液が LISA の普及・推進に必要な肥沃な土壤をつくるほか、リゾクトニアに代表される土壤伝染性病害を予防するツールになりうるか否かを解析した。

第2節 材料および方法

植物材料：ニンジン品種「向陽二号」(タキイ種苗) とホウレンソウ品種「オーライ」(タキイ種苗) の種子を供試した。

栽培試験：栽培試験は、滋賀県湖南市の圃場において、3回、すなわちニンジン作期1 (試験I)、ホウレンソウ作期1 (試験II) およびホウレンソウ作期2 (試験III) に分けて行った (第2-1表)。3試験いずれにおいても2つの南北畝 (hill) を使用し、3試験共通で一方の畝を対照区、他方を

TT 液投入区とした。各畝を南北に 2 等分し、北側をニンジン栽培用とし、南側をホウレンソウ栽培用とした。ニンジン栽培試験区（試験Ⅰ）における前作野菜はコマツナ、ホウレンソウ栽培試験区（試験Ⅱ）における前作野菜はミズナであった。前作では、どちらの野菜も生育はごく正常で、病害の発生は認められなかった。全試験を通して、1 畝 2 条（20 個体/条）、畝間 40 cm、畝幅 45 cm、条間 20 cm、株間 10 cmとした。試験Ⅰのニンジン、ⅡのホウレンソウおよびⅢのホウレンソウの栽培期間は、それぞれ 2012 年 7 月 31 日（播種）～11 月 6 日（収穫）、8 月 27 日（播種）～10 月 2 日（収穫）および 10 月 2 日（播種）～10 月 29 日とした。試験Ⅲでは、リゾクトニア病が発生、蔓延した試験Ⅱの対照区と同じ場所に設けた対照区にのみ、播種直後に殺菌剤を灌注処理した。それにもかかわらず、対照区ではリゾクトニア病が発生、蔓延したため、10 月 29 日に試験Ⅲの栽培を中止した。各試験における TT 液の散布・投入日と量、基肥、追肥、形質調査日等を第 1 表に示した。

第2-1表 試験Ⅰ，ⅡおよびⅢの作業行程（2012年）

作業行程 ¹⁾	実施日 (月日)	備考
TT液投入(8 ml/m ² , 畝全面処理)	5. 22	試験Ⅰ，ⅡのTT液投入区（予定） に投入
TT液投入(8 ml/m ² , 畝全面処理)	6. 01	同上
施肥（基肥）*	7. 30	試験Ⅰ，Ⅱの全処理区に投入
TT液投入(5.7 ml/m ² , 畝全面処理)	7. 30	試験Ⅰ，ⅡのTT液投入区に投入
Dc 播種(直播)(試験Ⅰ)	7. 31	前作:コマツナ(慣行施肥、正常 な生育)
Dc TT液投入(5.7 ml/m ² , 畝全面処理)	8. 17	試験ⅡのTT液投入区に投入
So 播種(直播)(試験Ⅱ)	8. 27	前作:ミズナ(慣行施肥、正常 な生育)
DcとSo TT液投入(2.8ml/m ² , 畝全面処理)	8. 27	試験Ⅰ，ⅡのTT液投入区に投入
Dc 間引き	9. 03	
Dc 間引き苗形質調査	9. 03	
DcとSo TT液投入(2.8ml/m ² , 畝全面処理)	9. 10	試験Ⅰ，ⅡのTT液投入区に投入
Dc 追肥**	9. 21	試験Ⅱの対照区, TT液投入区の 両方に投入
土壌分析***	9. 24	試験Ⅱの対照区およびTT液投入 区の土壌
DcとSo TT液投入(2.8ml/m ² , 畝全面処理)	9. 24	試験Ⅰ，ⅡのTT液投入区に投入
So 収穫個体の形質調査(試験Ⅱ)	10. 02	
So 播種(直播)(試験Ⅲ)	10. 02	
So 播種後殺菌剤灌注	10. 02	試験Ⅲの対照区に灌注
So TT液投入(2.8ml/m ² , 畝全面処理)	10. 09	試験Ⅱ，ⅢのTT液投入区に投入
So 栽培土壌の土壌分析***	10. 24	試験Ⅲの対照区およびTT液投 入区の土壌
So 栽培中止(試験Ⅲ)	10. 29	
Dc 収穫個体の形質調査(試験Ⅰ)	11. 06	奇形根個体は調査から除外

1) Dc: ニンジン(*Daucus carota*), So: ホウレンソウ(*Spinacia oleracea*)

*: 8-8-8 化成肥料 100 g/m², 苦土石灰 150 g/m²

** : 15-15-12 化成肥料 50 g/m²

***: 試験区当り3箇所から土壌を採取, 風乾し, 乾土と水の比が1:5になるように純水を加えて土壌養液をつくり, ECおよびpHを測定した.

形質調査：試験Ⅰでは、播種後 98 日に、草丈、根長、根重、最大根径および茎葉重、ならびに根搾汁液の糖度(Brix)、NO₃⁻濃度、K⁺濃度および Ca⁺⁺濃度を、

それぞれ Brix 計（アタゴ）、6581S 複合型硝酸イオン選択性電極（堀場製作所）、6582S 複合型カリウムイオン選択性電極（堀場製作所）および 6583S 複合型カルシウムイオン選択性電極（堀場製作所）を用いて測定し、試験Ⅱでは、播種後 36 日に茎葉長、根長、茎葉重、根重を測定した。播種後 27 日に栽培を中止した試験Ⅲでは、形質調査は行わなかった。

土壌調査：試験ⅡおよびⅢのハウレンソウ栽培試験区を対象に 1 区あたり 3 カ所から採取した土壌を混合、風乾したあと、乾土と水の比が 1：5 になるように純水を加えて土壌養液をつくり、それぞれ電気伝導率計 ES-71T（堀場製作所）および pH 計 LAQUA（堀場製作所）を用いて電気伝導度 EC および pH を測定した。

第 3 節 結果

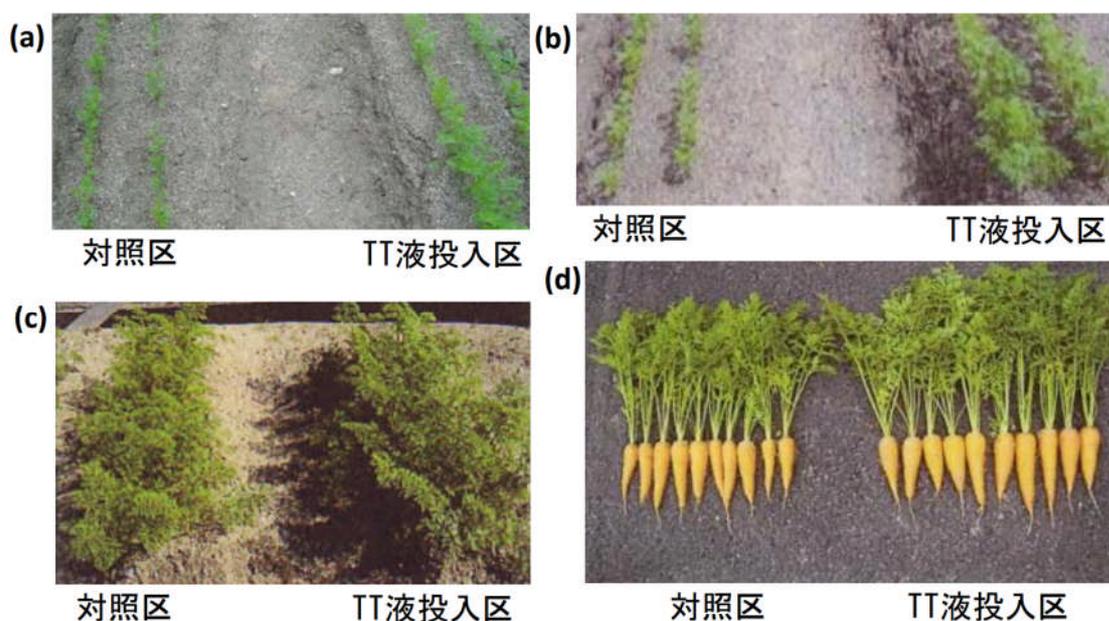
試験Ⅰ

試験Ⅰにおけるニンジンの生育（7 月 31 日播種、11 月 6 日収穫）は、播種後約 1 カ月ごろから、対照区より TT 液投入区のほうで旺盛となり、この関係は収穫日まで続いた（第 2-1 図）。播種後 34 日の間引き苗の調査では、草丈、根長および根重いずれにおいても TT 液投入区平均と対照区平均との間に 1%水準の有意差があり、TT 液投入区の方が草丈で 1.5 倍、根長で 1.3 倍、根重で 3.0 倍大きい値を示した（第 2-2 表）。

播種後 98 日に、形質調査のために全個体を抜き取ったところ、対照区にはリゾクトニア病が発生しており、これが原因とみなせる奇形根（分岐根）個体が多数存在する（36 個体中 16 個体；

頻度 44%) ことが視認された (第 2-2 図)。これに対して, TT 液投入区ではリゾクトニア病の発生は認められず, 奇形根個体の出現頻度は通常栽培でもみられる 7.5% (40 個体中 3 個体) であった。対照区におけるリゾクトニア病の発生は, 同一畝南側のハウレンソウ対照区で発生したリゾクトニア病の土壌伝染によると考えられた。

播種後 98 日におけるニンジンの形質調査は, 奇形根個体を除外し正常根個体についてのみ行った。根長では両区間に有意差はなかったが, 草丈, 根重, 最大根径および茎葉重に関しては 1%水準で有意差があり, TT 液投入区の方が草丈で 1.1 倍, 根重で 1.4 倍, 最大根径で 1.2 倍, 茎葉重で 1.4 倍大きかった (第 2-2 表)。しかし, 根長, 根搾汁液の Brix, NO_3^- , K^+ および Ca^{++} 濃度に関しては, TT 液投入の効果が認められなかった (第 2-3 表)。



第 2-1 図 ニンジンの生育に及ぼす TT 液投入効果(試験 I ; 2012 年)

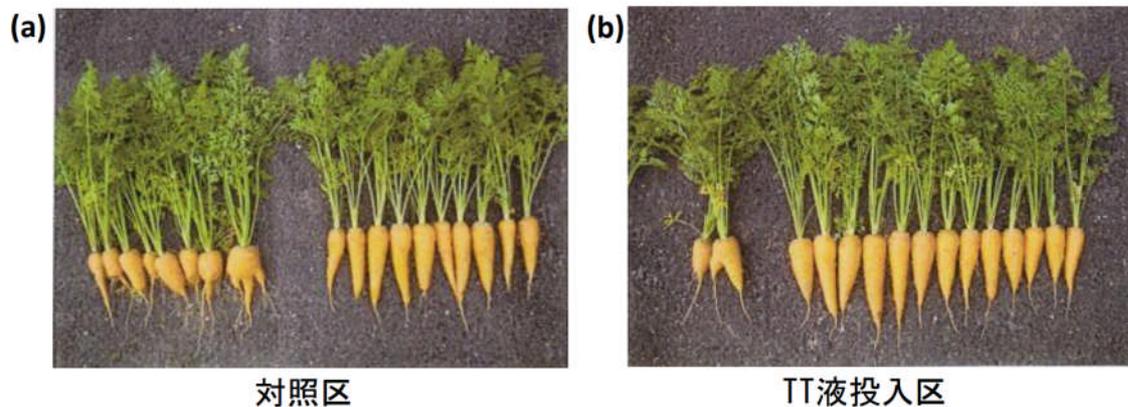
- (a) 播種後 30 日(8 月 30 日), (b) 播種後 34 日(9 月 3 日), (c) 播種後 70 日(10 月 9 日), (d) 播種後 98 日(11 月 6 日)
 (a)~(d)いずれにおいても TT 液投入区における生育が旺盛であることがわかる

第2-2表 ニンジンの成長に及ぼすTT液投入の効果（試験 I ; 2012年）

処理区	草丈(cm)	根長(cm)	根重(g)	最大根径(cm)	茎葉重(g)
播種後34日					
対照区	9.6±2.4	4.2±1.5	0.3±0.2	—	—
TT液投入区	14.4±3.3 **	5.6±1.5 **	0.9±0.6 **	—	—
播種後98日					
対照区	32.8±1.4	13.4±1.3	75±22	3.6±0.5	16±3
TT液投入区	36.5±1.4 **	13.3±2.3 ^{ns}	104±26 **	4.2±0.3 **	22±8 **

播種:7月31日、間引き苗調査:9月3日（播種後34日）、収穫個体調査（奇形根個体を除く）:11月6日（播種後98日）

**、* : TT液投入区の平均値が対照区の平均値に対して危険率1%および5%で有意に大きいことを示す。



第 2-2 図 試験 I（2012 年）の 収穫時（播種後 98 日）に確認されたリゾクトニア病に起因する分岐根（奇形根）個体

(a)対照区, (b)TT 液投入区

対照区における分岐根個体の出現は 36 個体中 16 個体であったのに対して, TT 液投入区では 40 個体中 3 個体のみであった

第2-3表 ニンジン根搾汁液の成分（試験 I ; 2012年）

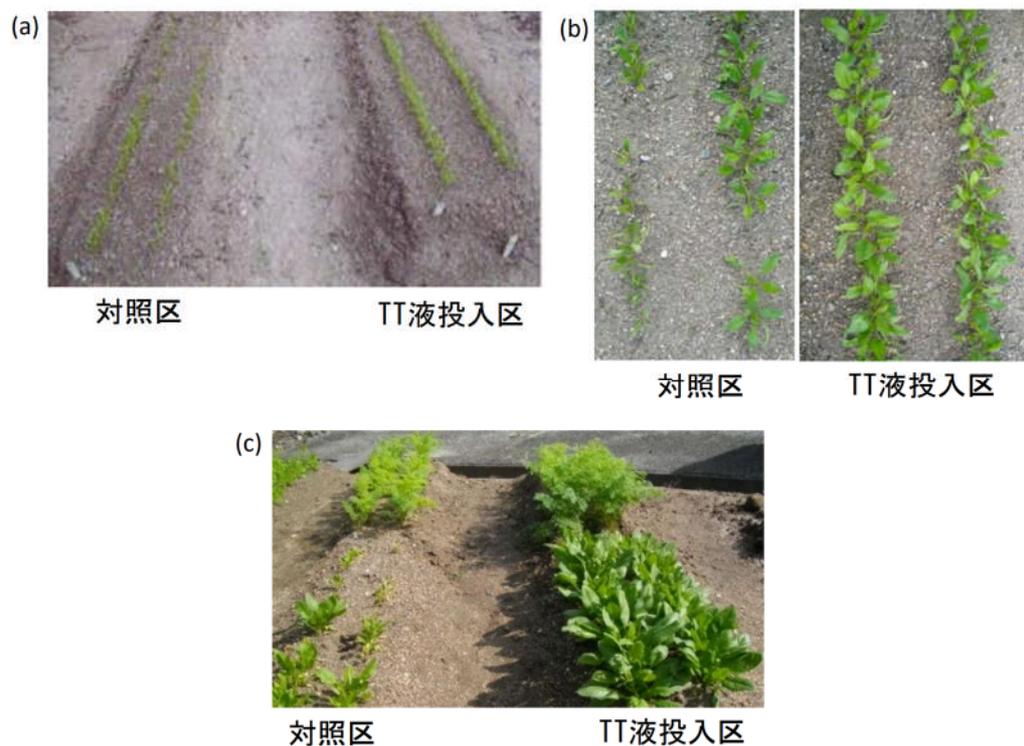
処理区	Brix	NO ₃ ⁻ (ppm)	K ⁺ (ppm)	Ca ⁺⁺ (ppm)
対照区	7.4±0.4	662± 61	2140±207	15±4
TT液投入区	6.5±0.8	676±200	2220± 84	12±1

測定日：収穫日(11月6日)，測定項目すべてに関して平均値の有意な処理区間差異は認められなかった。

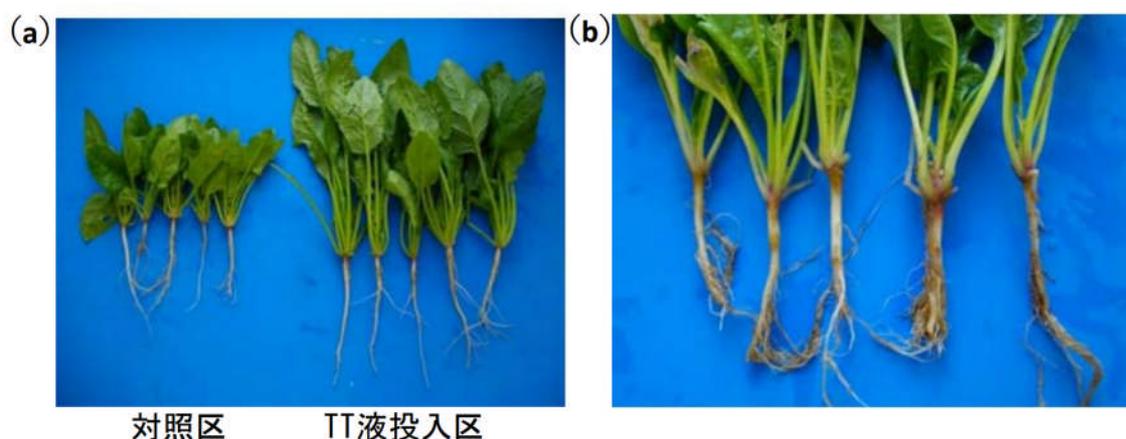
試験 II

試験 II におけるホウレンソウの生育（8月27日播種，10月2日収穫）は，播種後7日ごろから対照区より TT 液投入区のほうで旺盛となり，この関係は収穫日まで変わらなかった（第 2-3 図）。播種後 10 日になると，高温多湿条件で起こりやすいリゾクトニア病が対照区で発生し，時間の経過とともに病状が悪化する個体および枯死する個体が増加した。これに対して，TT 液投入区では

出芽から収穫日（播種後 36 日）までリゾクトニア病の発生はまったく観察されなかった。収穫日において生残個体の形質値を調査したところ，対照区ではリゾクトニア病大発生の影響が顕著であった（第 2-4 図）こともあり，調査した 4 形質すべてに関して TT 液投入区より 1%水準で有意に小さく，草丈，根長および根重では，TT 液投入区の 0.5 倍，茎葉重では 0.2 倍であった（第 2-4 表）。対照区畝と TT 投入区畝の間隔は約 40 cm と狭く，対照区畝から TT 液投入区畝へリゾクトニア病が伝染する可能性があったが，これを示す病徴はまったく観察されなかった。土壌分析の結果，EC と pH に関して，対照区と TT 液投入区間に有意差は認められなかった（第 2-5 表）。このことから，TT 液は EC と pH に影響を及ぼさないと考えられた。



第 2-3 図 試験Ⅱ（2012 年）におけるホウレンソウの生育に及ぼす TT 液投入の効果
 (a)播種後 14 日(9 月 10 日), (b)播種後 17 日(9 月 13 日), (c)播種後 29 日(9 月 25 日) (a),
 (b), (c)いずれにおいても対照区でリゾクトニア病が発生している



第 2-4 図 試験Ⅱ（2012 年）における播種後 36 日（10 月 2 日）のホウレンソウの草姿
 (a)対照区に発生したリゾクトニア病に起因する生育障害
 (b)対照区に発生した根の褐変

第2-4表 ホウレンソウの成長に及ぼすTT液投入の効果 (試験Ⅱ ; 2012年)

処理区	茎葉長 (cm)	根長 (cm)	茎葉重 (g)	根重 (g)
対照区	12.2±3.2	6.7±2.8	5.0±5.0	1.0±0.0
TT液投入区	24.2±3.5 **	13.5±2.4 **	26.0±10.0 **	2.0±1.0 **

播種日 : 8月27日、調査日 : 10月2日 (播種後36日)

** : TT液投入区の平均値が対照区の平均値に対して1%水準で有意に大きいことを示す.

第2-5表 ホウレンソウ栽培土壌の物理・化学特性に及ぼすTT液投入の効果
(試験Ⅱ, Ⅲ ; 2012年)

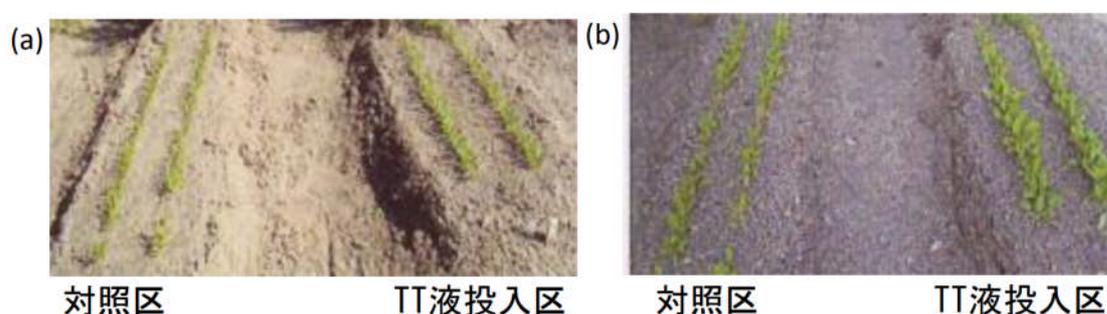
処理区	試験Ⅱ (9月24日)		試験Ⅲ (10月24日)	
	EC (mS/cm)	pH	EC (mS/cm)	pH
対照区	0.11	7.3	0.21	7.1
TT液投入区	0.11	7.4	0.24	7.0

測定項目すべてに関して平均値の有意な処理区間差異は認められなかった.

試験Ⅲ

対照区では、前作のハウレンソウ栽培においてリゾクトニア病が発生、蔓延したことから、播種後すぐに殺菌剤の灌注処理を行った。しかしそれにもかかわらず、出芽間もないころから、リゾクトニア病による顕著な生育抑制が観察され、枯死する個体も日ごとに多くなった(第 2-5 図)。このため、播種後 27 日で試験Ⅲの栽培を中止することにした。対照区とは異なり、TT 液投入区では、リゾクトニア病の発生はなく、栽培を中止するまですべての個体が健全な生育を示した。このことから、TT 液はリゾクトニア病の土壌感染を防ぐ効果を有していることが確認された。

土壌分析の結果、試験Ⅱと同様に、EC および pH に関して対照区と TT 投入区間に有意差は認められなかった(第 2-5 表)。



第 2-5 図 試験Ⅲ (2012 年) におけるハウレンソウの草姿

(a) 播種後 13 日(10 月 15 日), (b) 播種後 27 日(10 月 29 日)

(a),(b)いずれにおいても対照区より TT 液投入区のほうが生育旺盛であることがわかる。対照区の生育異常は、リゾクトニア病による。

第4節 論議

第1章において、サンプル土壌に生息する微生物の種類の多少（多様性）および各種有機物を分解する速度（活性）を総合的に数値化した土壌微生物多様性・活性値（DGCテクノロジー；櫻本 2013）の大小とコマツナ、ミズナおよびハボタンの成長との間に正の相関があったことから、畑地に TT 液を投入すると、土壌微生物叢の多様化と活性化が進み、これによって、土壌中に栄養素が増え、植物の生育が旺盛になると結論した。本研究では、土壌微生物多様性・活性値を測定していないが、TT 液の投入によってニンジンおよびハウレンソウの成長が旺盛になることが認められ（第 2-1 図、第 2-2 表、第 2-2 表）、TT 液は茎葉を利用する葉菜類に加えて地下部を利用する根菜類の商業栽培にも有効であることが明らかになった。

試験 I および II では、前作においてコマツナを栽培した場所にニンジンの試験区（試験 I の対照区、TT 液投入区）、同じくミズナを栽培した場所にハウレンソウの試験区（試験 II の対照区、TT 液投入区）を設けた。前作においてはこれら試験区と同じ場所で栽培したミズナおよびコマツナには病気の発生がみられず、生育は正常であったが、試験 II（ハウレンソウ）の対照区で土壌伝染性病害であるリゾクトニア病が発生した（第 2-3 図、第 2-4 図）。このリゾクトニア病は同一畝に設定された試験 I の対照区（ニンジン）にまで伝播したが、40 cm 程度しか離れていない隣接畝に設定された試験 I の TT 液投入区（ハウレンソウ）には伝播しなかった。加えて、試験 II と同じ場所を用いて行った試験 III では、前作（試験 II ハウレンソウ）でリゾクトニア病が多発した対照区において、殺菌剤を播種後直ちに灌注処理したにもかかわらず、生育初期の段階からリゾクトニア病による生育障害が認められ、一方、対照区から 40 cm ほどしか離れていない TT 液投入区においては殺菌剤処理を行わなかったにもかかわらず、リゾクトニア病の発生は認められなかった（第 2-5 図）。これらの結果と第 1 章の結果をあわせると、TT 液は、土壌微生物叢を多様化、活性化することによって、侵入した病原菌が大量増殖できない土壌環境をつくっていると推察された。

この点に関して、土壌伝染性病害の発生が土壌の肥沃度と関係のあること、および病原菌の発

育と増殖が土壤微生物叢の構造と関係していること、すなわち、土壤中の微生物叢のバランスがくずれると、栽培中の作物を好む病原菌が増殖しやすくなり、この菌に侵された土壤伝染性病害が発生、拡大すると報告されている (Dobbs and Hinson 1953, Dobbs and Gash 1965, De Boer *et al.* 2003, Bonilla *et al.* 2012, 櫻本 2013). したがって、TT 液は、土壤微生物叢を多様化、活性化して、病原菌 (本研究の場合はリゾクトニア菌) が優占できない土壤をつくり、土壤伝染性病害の拡大を抑制するものと推察される.

また、同じ作物を同じ場所で続けて栽培するとその作物に寄生する (その作物を好む) 病原菌の土壤中の密度が高まり、連作障害が誘発されると考えられている (堀 1986). 本研究の結果、TT 液には、土壤微生物叢を多様化、活性化することによって、病原菌の優占を防ぐ効果のあることが示唆された. したがって、TT 液は、連作障害の予防にも利用できると推察される.

以上の推論を証明するためには、土壤微生物叢の構造を明らかにする必要がある. しかし、土壤細菌の多くの菌株がまだ同定されておらず、また同定されていても種の概念を少し変更しなければならぬ菌株もあって、土壤微生物叢の構造を明らかにすることは難しい (Loc 2015). 次世代シーケンサーの性能向上が急速に進む今日、これを利用した土壤微生物の同定がある程度進む可能性もあるが、完全解明にはまだ多くの年月が必要であると思われる. いずれにしても、本章の結果と第 1 章の結果を考えあわせると、TT 液の投入によって肥料と農薬の投入量を削減できることは明らかであり、TT 液は LISA の推進に有効なツールの一つになるとと思われる. 今後は、TT 液の利用によって化学肥料と農薬をどこまで削減可能かを明らかにしたい.

第5節 摘要

低投入持続型農業(low input sustainable agriculture; LISA)を推進するためには、病虫害抵抗性品種や高養分吸収性品種の開発に加えて、土壤微生物の力を借りた健康な土壌づくりが不可欠である。第1章で、TT液が、土壤微生物叢を多様化、活性化して土壌中に大量の栄養素を生み出し、そこに生育する葉菜類の成長を著しく旺盛にすることを示した。本研究では、ホウレンソウとニンジンの成長に及ぼすTT液の効果を検証するなかで、TT液の投入が、それら野菜の成長を促進する効果のほか、高温多湿時に多発する土壤伝染性病害“リゾクトニア病”の発生を抑制する効果を有することを明らかにした。これらの結果は、TT液がLISAの推進に有効なツールとなる可能性のあることを示している。

第 3 章 Takeo-Tanisaka 液の利用による熱帯稲作の改善

第 1 節 緒言

第 1 章および第 2 章において、TT 液が、減肥料と減農薬（土壌伝染性病害に対する予防薬が低減）、すなわち、LISA の実現・推進に有効なツールになることを示した。しかし、この知見は、わが国近畿・東北地方の圃場で得られた成績に基づくものであり、他の地域、とくに病虫害の多発が避けられず農業生産には向いていない熱帯地域（夏秋 2013）においても、同様の結果が得られるかどうかは不明である。そこで、本章では、まず、フィリピン共和国が、世界第 8 位（2005-2016：FAOSTAT）のコメの生産国であり（第 3-1 表、3-2 表）、第二次世界大戦後の熱帯アジアにおける食料危機を回避させ、緑の革命の立役者となった肥料反応性大の半矮性強稈超多収イネ（*Oryza sativa* L.）品種「IR8」を育成した機関「国際イネ研究所（International Rice Research Institute；IRRI，1960 年に米国ロックフェラー財団及びフォード財団の基金によって設立、首都マニラ近郊のラグナ州ロスバニョス（Los Banos）」と、日本の政府開発援助（ODA）で設立されたフィリピンイネ研究所（Philippine Rice Research Institute；PhilRice）を置いているにも関わらず、イネの単位面積当たり籾収量が 3.6～3.9 トン/ha（玄米収量に換算すると 2.9～3.1 トン/ha）とアジア諸国のなかでも低く（第 3-1 表）、コメの輸入大国となっていること（第 3-2 表）に注目し、フィリピン共和国における慣行稲作をフィリピン南部の島ミンダナオ島の民間水田で実践して低収量の原因を探るとともに、熱帯稲作における TT 液の効果について解析した（試験 I）。その結果、フィリピン共和国における稲作の低収量は、多くの熱帯諸国でみられる洪水、干ばつといった自然災害や、灌漑設備等圃場設備の未整備、激しい病虫害、獣害などによることが明らかになった一方で、TT 液を投入し、化学肥料を少量にすると、病虫害と干害が軽減され、収量が向上することが明らかになった。

第3-1表 2011年における世界のコメの生産国上位11国（資料：FAOSTAT）

国別順位	国名	生産量 (粍収量：万トン)	作付面積 (万ha)
1	中国	20,267	2969
2	インド	15,570	4378
3	インドネシア	6,574	1068
4	バングラ	5,063	1152
5	ベトナム	4,233	747
6	タイ	3,459	972
7	ミャンマー	3,280	692
8	フィリピン	1,668	465
9	ブラジル	1,348	237
10	カンボジア	878	256
11	日本	840 *	157

*：日本の生産量は玄米収量

第3-2表 フィリピン共和国におけるコメ生産量及び輸入量（2005-2016）

単位：1,000トン

年次	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016
生産量	14,603	15,327	16,240	16,816	16,266	15,772	16,684	18,033	18,439	18,968	18,150	17,827
輸入量	1,822	1,716	1,806	2,432	1,775	2,378	706	1,008	399	1,079	1,100	450
輸入量順位	①	①	①	①	①	①	⑭	⑩	⑳	②	②	⑬
輸入割合	12%	11%	11%	14%	11%	15%	4%	6%	2%	6%	6%	3%

資料：FAOSTAT

このことをフィリピンイネ研究所アグサン支所（1989年8月に設立）に伝えたところ、同所主催の稲作コンペティション（収量の大小を競う）への参加要請があり、これに応じて2014年6月～2015年10月の期間（12月～5月：乾季、6月～11月；雨季）にわたってコンペティションに参加し、TT液を使用し、肥料を少量にする稲作技術が熱帯稲作において、バイエル社(Bayer AG；ドイツのノルトライン＝ヴェストファーレン州レーヴァークーゼンに本部を置く)等の巨大な種

苗・化学・製薬会社（多国籍企業）が提案する稲作技術と同等あるいはそれ以上の収穫量をもたらせるかどうかを検証した（試験Ⅱ）。

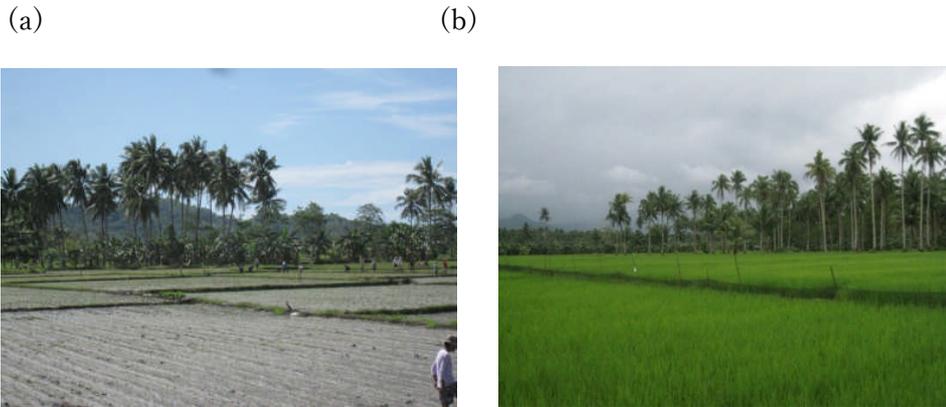
本章は、上記試験ⅠおよびⅡの結果について取りまとめたものである。

第2節 材料および方法

試験Ⅰ 民間水田圃場における栽培試験

2013年の雨季（6月上旬から12月中旬）に、フィリピン共和国ミンダナオ島北アグサン州ブトゥアン市（Butuan 北緯8度57分）の民間水田（使用面積：242,369 m²）（第3-1図）を借用して、フィリピン共和国の稲作におけるTT液の投入効果を調査した。供試イネ品種は、フィリピンミンダナオ島の主要品種「RC240」とした。「RC240」はインディカ（*indica*）の純系（固定型）品種である。

6月23日に試験水田を耕起すると同時に、「TT液を投入する処理区圃場」には、TT液2 ml/m²が圃場全面にいきわたるように100倍に希釈して散布・投入した。さらに、育苗箱に苗床用土（現地の土と籾くん炭を10：3の割合で混ぜたもの）を入れ、育苗の準備をした。7月3日に比重選（水選：比重>1.0）を行い、選んだ種子を7月14日に育苗箱に播いた。同日から2、3日をかけて本田の代掻きを行い、「TT液を投入する処理区圃場」に再びTT液2 ml/m²を100倍に希釈して散布・投入した。定植は8月28日に行った。なお、ミンダナオ島では、直播栽培が一般的である。しかし、ここでは移植栽培とした。



第 3-1 図 試験 I で使用した試験圃場 (a) と試験圃場周辺の風景(b)

TT 液の効果を検証するために、つぎの 5 処理区を設けた。反復は 2~4, 処理区配置は完全無作為化法に従った。1 プロットあたりの面積は平均約 3,000 m²であった。なお、現地の慣行栽培では、基肥として、14-14-14 化成肥料が 14kg/10a 施与されている。

- ① 「TT 液+無肥料」区
- ② 「TT 液+ 14-14-14 化成肥料 5kg/10a」区
- ③ 「TT 液+ 14-14-14 化成肥料 10kg/10a」区
- ④ 「有機肥料」区
- ⑤ 「14-14-14 化成肥料 5kg/10a」区

収穫は、11 月 22 日から 12 月 10 日にかけて行い、収穫後、1 プロットあたりの籾収量を調査した。日本では、コメの収穫量を玄米重で表しているが、他の多くの国では籾収量で表すことが多く、これにならってここでは籾収量とした。籾収量と玄米収量との関係は、玄米収量 \doteq 籾収量 \times 0.80 である。

試験Ⅱ フィリピンイネ研究所アグサン支所における栽培試験

フィリピンイネ研究所アグサン支所 (PhilRice Agusan) (第 3-2 図) 主催の稲作コンペティションに 3 期 (作期Ⅰ;2014 年 6 月~2014 年 10 月, 作期Ⅱ:2014 年 12 月~2015 年 4 月, 作期Ⅲ;2015 年 6 月~2015 年 10 月) 連続して参加し, 試験Ⅰで認められた TT 液の効果について検証した. このコンペティションでは, 供試イネ品種や肥培管理技術に制限がなく, 単に収量の多少について競われているが, 毎回多くの品種や資材の有効性が調べられている.

作期Ⅰ, Ⅱ, Ⅲ共通事項

【供試イネ品種】

試験Ⅰと同様に, ミンダナオ島の主要品種「RC240」を供試した. 他の参加チーム (巨大多国籍企業) は, 一代雑種 (ハイブリッド) 品種を使用した.

【播種】

種子 125g/育苗箱を育苗箱 (30 cm × 60 cm × 3 cm) に播いた. 育苗培土には, 川岸の土 (シルト) と籾くん炭を 10:3 の割合で混ぜたものを用いた. 播種後直ちに TT 液 4 ml/育苗箱を 50 倍に希釈して (200 ml) 育苗箱全面に散布した. 本田への定植は播種後 25 日 (作期Ⅱのみ 27 日) に行った. 定植直前 (1~2 日前) に, イネの害虫であるコブノメイガ, ニカメイチュウ, イネツトムシに効果のあるネライストキシン系殺虫剤 (有効成分カルタップ塩酸塩 4%) を 20g/育苗箱育苗箱全体に散布した. メーカー推奨使用量は, 80~100g/育苗箱であったが, 減農薬の観点から 20g/育苗箱とした.

【本田と本田の管理】

3 作期とも, 同一の水田 (面積は $95\text{m} \times 21\text{m} = 1995\text{m}^2$) を用いた. この水田は, 用水路と排水路を完備しているが, 雨が降らないときには用水路が渇水して乾燥したり, 大雨のときには排水路から逆流する水で完全に水没したりするため, 試験にあたっては, 水の管理に重点をおいた. また, 水田の背面には森, 周囲には草叢があり, 害虫とネズミの害が深刻になると考えられた. そこで, これら被害を軽減するために, 水田周辺の草叢の刈り取りを徹底して行った.

【施肥と TT 液の散布・投入，栽植密度】

本田への施肥は，基肥，追肥ともにゼロとした。栽植は，密度 30 cm×15 cm の 1 株 5 本苗とし，使用水田全体を 1 プロットとした。TT 液は，耕起時の本田に 1 回，代掻時の本田に 1 回，各 2 ml/m² を 50 倍に希釈して (20,000 ml/水田) 散布・投入した。定植は，作期 I では，播種後 25 日，作期 II では同 27 日，作期 III では同 25 日に行った。収穫は，作期 I では定植後 102 日 (播種後 127 日)，作期 II では同 102 日 (同 129 日)，作期 III では同 100 日 (同 125 日) であった (第 3-3 表・第 3-4 表・第 3-5 表)。

【収穫と収量調査】

コメの籾収量や玄米収量は，種子の水分率を 14% に調整して測定する。本研究では，収穫当日にすべての収穫個体を脱穀し，全栽培面積 1,995m² におけるトータル籾収量 (A) を測定すると同時に，平均種子水分率 (B) を算出した。その後，(A) を種子水分率 14% に換算したときの値 (C) を求め，(C) を栽培面積で除して 1 m² あたり籾収量を算出するという方法を用いた。平均種子水分率は，水田 5 カ所からそれぞれ無作為にサンプリングした種子 100 粒について，それぞれ 3 回繰り返し測定して得られたデータの平均値である。



図 3-2 フィリピンイネ研究所管理棟

作期 I (2014年6月～同年10月)

作期 I における作業工程は第 3-3 表に示すとおりである。試験水田には、前作のラトゥーン（ひこばえ）の茎葉が茂っていたため、これを刈り取る作業をまず行った（第 3-3 図）。刈りとった茎葉はすき込んで有機質源とした。また、前作の脱穀藁のかたまりもあったので、これを水田全体にちりばめた。試験圃場は水管理が難しい土地であったため、畦と水門を作り湛水や排水ができるようにした（第 3-4 図）。

第 3-5 図に育苗の様子、第 3-6 図に耕起時の TT 液の散布・投入の様子および代掻きの様子を示した。

第3-3表 作期 I における作業工程 (2014年)

作業工程	実施日 (月日)
圃場整備：刈り込み，畦作り（圃場面積：1,995m ² ）	6.10
圃場整備：耕起	6.11
苗床用培土作り（計 260 l；現地の土200 lと籾くん炭60 lの混合培土）	6.11
苗箱準備：育用土作成30cm×60cm×3cm 40箱	
本田に1回目のTT液投入（全面処理，2 ml/m ² ）	6.11
籾水選（品種：RC240）	6.11
播種（苗箱：計40箱，播種量：125 g/箱×40 箱=5 kg）	6.12
苗箱にTT液投入（4 ml/苗箱，500倍希釈液200 mlを苗箱全面処理）	6.12
圃場整備：代掻き	6.19
本田に2回目のTT液投入（2 ml/m ² ）	6.19
苗箱にネライストキシシン系殺虫剤散布（20 g/苗箱）	7.05
定植（株間：30cm×15cm、1株5本植）	7.07
収穫	10.17



第 3-3 図 作期 I における前作イネのラトゥーン刈り込みの様子

(a)



(b)



第 3-4 図 畦と水門を作っている様子 (a) と完成した畔と水門 (b)



第 3-5 図 育苗箱を用いた育苗の様子

(a)



(b)



第 3-6 図 耕起時に TT 液を散布する様子 (a) および代掻きの様子 (b)

作期 II (2014 年 12 月～2015 年 4 月)

作期 II における作業工程を第 3-4 表に示した。作期 I では、前作の脱穀稲藁が水田圃場に放置されていた (第 3-7 図) ため、これを全体にまき広げて耕起した。しかし、その脱穀稲藁で増殖したとみられる、いもち病菌による葉いもち病が発生したため、作期 II では、脱穀稲藁入を水田圃場から取り除いて耕起した (第 3-8 図)。



第 3-7 図 作期 I の前作の脱穀後に積まれた脱穀稲藁

周囲のイネは収穫後に再生されたラトウーン (ひこばえ) が成長したものである

第3-4表 作期Ⅱにおける作業工程（2014～2015年）

作業工程	実施日 (月日)
圃場整備：刈り込み，畦整備，耕起（圃場面積：1995m ² ） 本田に1回目のTT液投入（全面処理，2 ml/m ² ） 育苗用培土作り（計 260 l；現地の土200 lと籾くん炭60 lの混合培土）	12.09
苗箱準備：育苗土作成30cm×60cm×3cm 40箱 籾水選（品種：RC240）	12.18
播種（苗箱：計40箱，播種量：125 g/箱×40 箱=5 kg） 苗箱にTT液投入（4 ml/苗箱，500倍希釈液200 mlを苗箱全面処理）	12.19
圃場整備：代掻き 本田に2回目のTT液投入（2 ml/m ² ）	12.23
苗箱にネライストキシシン系殺虫剤散布（20g/苗箱）	1.14
定植（株間：30cm×15cm、1株5本植）	1.15
収穫	4.27



第 3-8 図 作期Ⅱ定植前の圃場整備の様子
前作の脱穀藁を廃棄したあとで耕起した

作期Ⅲ（2015年6月～2015年10月）

作期Ⅲにおける作業工程を第3-5表に、代掻きの様子を第3-9図に、それぞれ示した。第3-9図より、日本における代掻きと違って水田の水量が少ないことが分かる。意識的に水を少なくしているのではなく、水が十分量ないからである。これが天水に頼る途上国農業の実態である。

第3-5表 作期Ⅲにおける作業工程（2015年）

作業工程	実施日 (月日)
圃場整備：刈り込み、畦整備（圃場面積：1995m ² ）	6.22
育苗用培土作り（計260 l；現地の土200 lと籾くん炭60 lの混合培土）	6.22
苗箱準備：育苗土作成30cm×60cm×3cm 40箱	6.23
籾水選 RC240	6.23
播種（苗箱：計40箱，播種量：125 g/箱×40箱=5 kg）	6.25
苗箱にTT液散布（4 ml/苗箱，500倍希釈液200 mlを苗箱全面処理）	6.25
圃場整備：耕起	7.02
本田に1回目のTT液投入（全面処理，2 ml/m ² ）	7.02
圃場整備：代掻き	7.18
本田に2回目のTT液投入（2 ml/m ² ）	7.18
苗箱にネライストキシン系殺虫剤散布 20g/箱	7.19
定植（株間：30cm×15cm、1株5本植）	7.20
出穂	9.28
収穫	10.28



第3-9図 作期Ⅲにおける代掻きの様子（7月18日）

日本の水田と比べて代掻き時の水量が少ないことが分かる

第3節 結果

試験Ⅰ 民間水田における栽培試験

ミンダナオ島の民間水田において5つの処理区を設定、現地の主要栽培品種「RC240」を大規模栽培して籾収量を調査したところ、すべての処理区間組合せ（ ${}_5C_2=10$ 通り）で1%水準で有意な差が認められ、さらに、処理区間順序が「TT液＋無肥料」>「TT液＋14-14-14化成肥料 5kg/10a」>「TT液＋14-14-14化成肥料 10kg/10a」>「14-14-14化成肥料 5kg/10a」>「有機肥料」であることが認められた（第3-6表）。処理区間の比較のなかで、とくに注目される点は、①「TT液＋無肥料」が2番目に高い収量であった「TT液＋14-14-14化成肥料 5kg/10a」および3番目に高い収量であった「TT液＋14-14-14化成肥料 5kg/10a」のそれぞれ1.12倍および1.52倍の籾収量を示したこと、②「TT液＋14-14-14化成肥料 5kg/10a」が化成肥料を2倍投与した「14-14-14化成肥料 5kg/10a」の1.36倍の籾収量を示したこと、③「TT液＋14-14-14化成肥料 5kg/10a」が「14-14-14化成肥料 5kg/10a」の1.85倍の籾収量を示したことである。

稲作期間中、雨が降らず水田に細いひび割れが生じた（第3-10図）。その程度は、TT液無使用区で顕著であった。また、病害や虫害がいたるところで観察された（第3-11図、第3-12図、第3-13図）が、被害状況の数値化が不可能であったため、視認によって病虫害の程度を推定したところ、籾収量が低かった「有機肥料」および「14-14-14化成肥料 5kg/10a」では病虫害の発生がとくに多く、ついで、「TT液＋14-14-14化成肥料 10kg/10a」、「TT液＋14-14-14化成肥料 5kg/10a」、「TT液＋無肥料」の順であった。すなわち、TT液を使用したうえで、肥料を少なくすれば（なしがベスト）、病虫害が減少することが明らかになった。栽培期間中に観察された病害は、いもち病、もん枯れ病（第3-11図、3-12図）、ツングロなどであった。また、害虫は、ニカメイチュウ、クモヘリカメムシ、イナゴ、イネヨトウ、ツマグロヨコバイ、ウンカなど多種多様であった（第3-13図）。

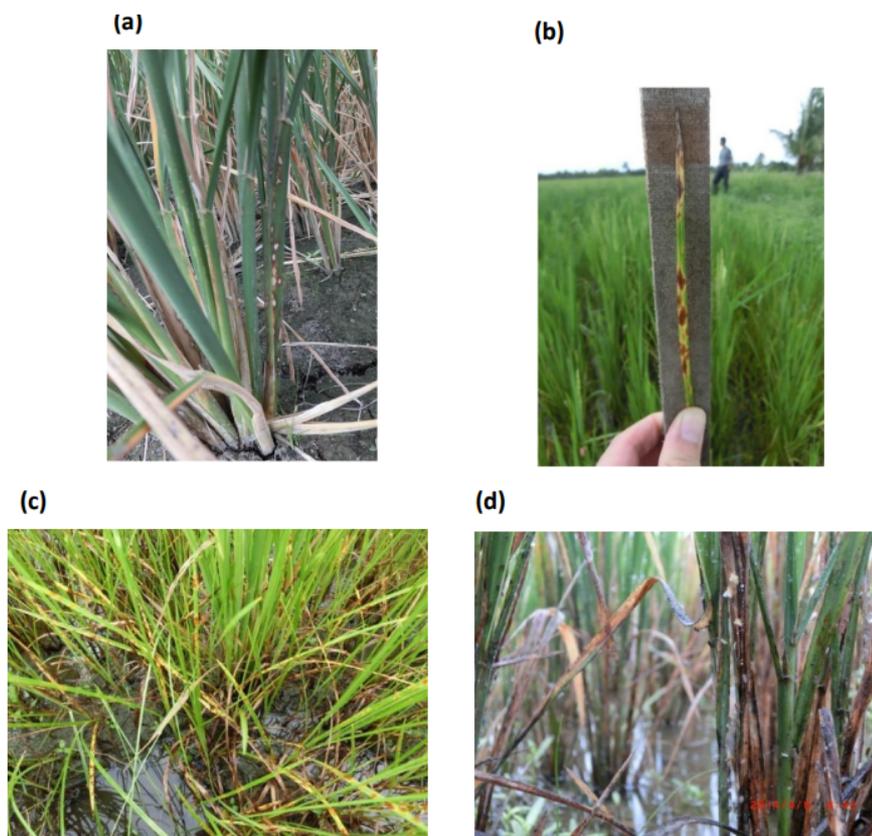
第3-6表 熱帯（ミンダナオ島ブトゥアン市）の慣行稲作における
TT液投入効果の検証（2013年7月～12月）

処理区	平均 籾収量/ha	単位トン
TT液投入 + 無肥料	4.130 ^a	
TT液投入 + 14-14-14化成肥料 5kg/10a	3.690 ^b	
TT液投入 + 14-14-14化成肥料 10kg/10a	2.716 ^c	
有機肥料	1.250 ^d	
14-14-14化成肥料 5kg/10a	1.995 ^e	

処理平均の比較は、Tukey's testによって行った。異文字（a,b,c,d,e）間は1%水準で有意差のあることを示す。



第 3-10 図 TT 液不投入区において多く観察された渇水による生育不良
（枯死個体，白葉枯個体が観察される）

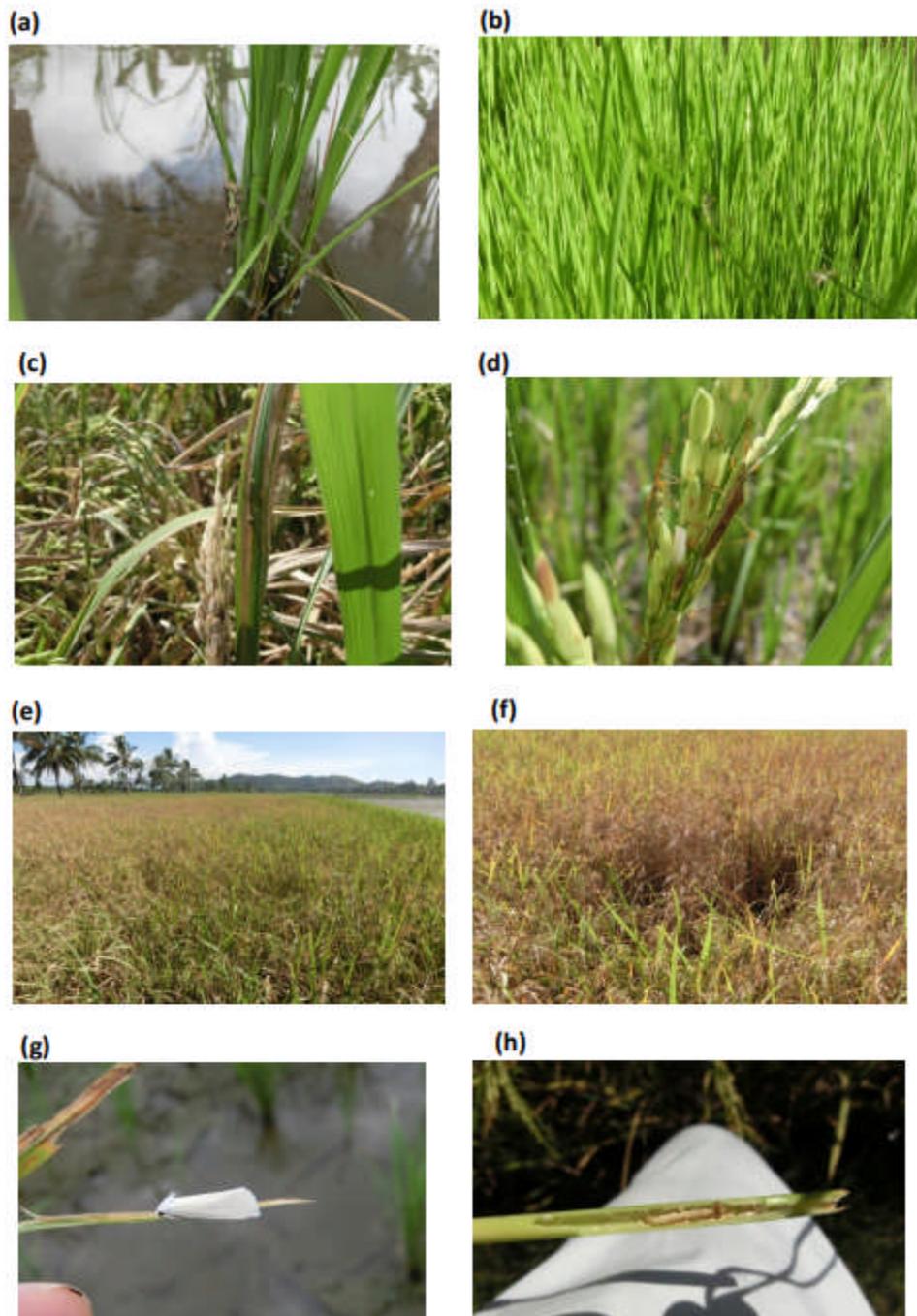


第 3-11 図 試験 I で観察されたいもち病と紋枯れ病

(a), (b), (c)葉いもち病（多肥料区の洪水被害地域に発生）：TT 投入区でも葉いもち病が発生したが、葉色と成長は正常であった。（d）紋枯れ病：多肥料区で多く発生した。



第 3-12 図 大雨で生じた洪水被害(a)と洪水後に発生したいもち病(b)



第 3-13 図 試験 I において観察された虫害

- (a) イナゴによる被害. (b)育苗床に発生した大量のクモヘリカメムシ.
(c)クモヘリカメムシ (*Leptocoris chinensis*) による食害. (d)クモヘリカメムシ.
(e). (f)イネヨトウ (*Sesamia inferens*) による食害 (多肥料ほど被害が大きい).
(g)イネヨトウ成虫. (h)イネヨトウ幼虫

以上の結果を踏まえ、フィリピンイネ研究所アグサン支所における稲作コンペティションでは、TT液を用い、これに無肥料、水の徹底管理、試験圃場周囲の草刈、最小限の殺虫剤使用という条件で挑戦することにした。

試験Ⅱ フィリピンイネ研究所アグサン支所における栽培実験

作期1（雨季：2014年6月～同年10月）

定植後11日（7月18日）に表層剥離が生じた（第3-14図a）が、翌7月19日には消滅した（第3-14図b）。その後、イネは順調に成長した（第3-14図c,d）が、定植後38日（8月14日）に、葉いもち病の発生が確認された（第3-14図e,f,g）。そこで、各水門を開けて排水し、3日間流水を止めたのち、排水後4日に入水かけ流し、同5日に湛水、同6日に排水、その後3日間は流水止、同9日に入水かけ流し、同10日に湛水という、排水から湛水までの作業サイクルをくりかえし行った。このサイクルを始めてから13日後（8月27日）には、葉いもち病の症状が消滅し（第3-14図h）。いたるところにイネ害虫の天敵であるクモの生息が確認されるようになった。

この5日サイクルの水管理（水入→湛水→排水→そのまま→そのまま→水入・・・）を出穂まで続け、出穂後はサイクルを、水入→排水→そのまま→そのまま→水入とし、収穫前1週間までつづけた。サイクルの途中で降雨により湛水した場合はサイクルをリセットし、排水からサイクルをつづけた。この期間、イネは順調に生育し、病虫害の発生もみられなかった（第3-14図i,j,k）。

(a)



(b)



(c)



(d)



(e)



(f)



(g)

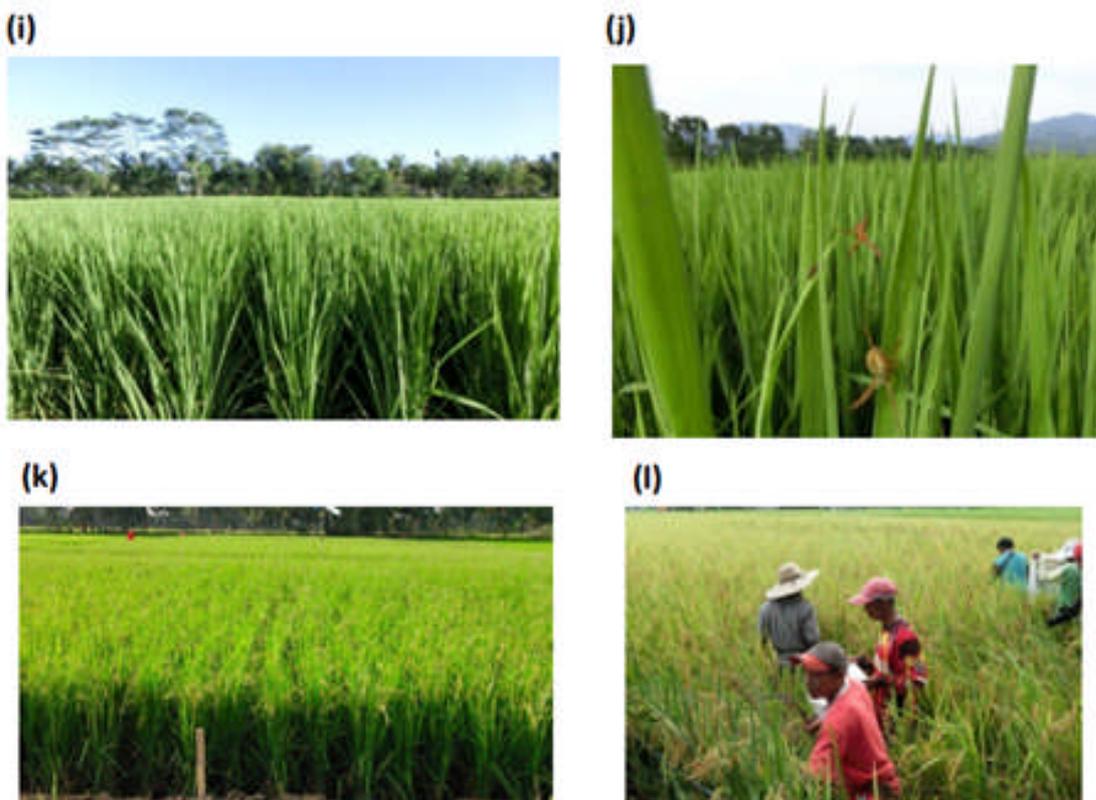


(h)



(第 3-14 図 次ページにつづく)

(第 3-14 図 前ページからのつづき)



第 3-14 図 試験 I 作期 I における定植から収穫までの様子

- (a)定植後 11 日 (7 月 18 日) 表層剥離が出現, (b)定植後 12 日 (7 月 19 日) 表層剥離が解消,
(c)定植後 16 日 (7 月 23 日), (d)定植後 37 日 (8 月 13 日),
(e)(f)(g)定植後 38 日 (8 月 14 日) 葉いもち病の発生確認,
(h)定植後 51 日 (対策 13 日後, 8 月 27 日),
(i)(j)定植後 65 日 (9 月 11 日) いたるところにクモの生息を確認,
(k)定植後 81 日 (9 月 26 日), (l)定植後 102 日 (10 月 17 日) 収穫

定植後 102 日 (10 月 17 日) に、全個体を収穫 (第 3-14 図 l)、脱穀し、籾収量を測定したところ。全栽培面積 1,995m²のトータル籾収量は 1,441.2kg (種子水分率 17.20%.) であった。コメの収量は、種子水分率を 14~14.5% に調整して測定する。したがって、1,441.2kg を種子水分率 14% の場合に換算すると 1,387.6kg となり、1 ha あたり籾収量は、6.95 トン/ha と計算された。この値はこの地域における「RC240」の単位面積あたり籾収量 2.5~3.0 トン/ha (PhilRice

Agusan) の 2.31~2.78 倍, フィリピン共和国の平均単位面積あたり籾収量 3.6~3.9 トン/ha

(FAOSTAT 2005-2015) の 1.78~1.93 倍であった。このことから、ここで採用した TT 液の利用による肥培管理が熱帯稲作において有効であることが明らかになった。

作期Ⅱ (乾季: 2014 年 12 月~2015 年 4 月)

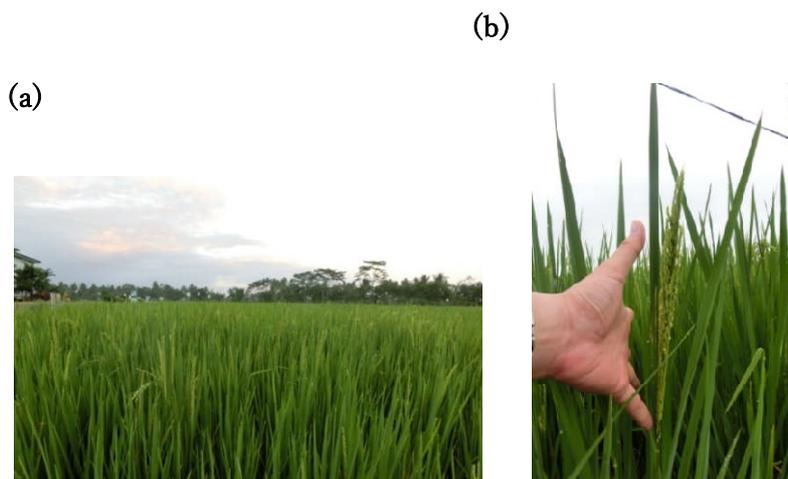
作期Ⅱにおいては作期Ⅰで発生した表層剥離がまったくみられなかった。第 3-15 図は、試験水田の水の様子を示したものである。これより試験水田 (左側) のほうが干涉地 (右側: 試験水田と同じ土壌をもち同じ水が溜められている) より水面に透明感があることがわかる。また、作期Ⅰではいもち病の発生が確認できたが、Ⅱ期は収穫まで病気の発生がなかった。作期Ⅱにおいても作期Ⅰで成功した水管理サイクルを採用した。

イネは播種後 95 日前後でほぼ半数の個体の出穂が観察された (第 3-16 図)。この播種後到達日数は雨季の作期Ⅰと同じであった。

このように、作期Ⅱ (乾季) においては、イネの成長は全生育期間を通じてきわめて順調で、全栽培面積における籾収量は、1,560.6kg (種子水分率: 18.34%) であった。種子水分率を 14% の場合に換算すると、1,481.8kg となり、1 ha あたりの籾収量は 7.43 トン/ha にもなった。この 7.42 トン/ha は作期Ⅰの 1.07 倍であり、かつ、フィリピンイネ研究所アグサン支所管内の歴代最高値であった。



第 3-15 図 TT 液投入圃場 (左) と TT 液非投入の干涉圃場 (右) の水面の様子



第 3-16 図 試験Ⅱ作期Ⅱにおける出穂の様子
(a)出穂の様子（定植後 71 日，3 月 27 日），(b)出穂の様子（定植後 73 日，3 月 29 日）

作期Ⅲ（雨季：2015 年 6 月～同年 10 月）

作期Ⅲにおいても表層剥離はまったくみられなかった。このことは、作期Ⅰと作期Ⅱに投入した TT 液の土壌の団粒化効果によると推察された。また、イネは順調に生育し病虫害は発生しなかった（第 3-17 図）。播種後出穂日数は作期ⅠおよびⅡとおなじ約 95 日であった。作期Ⅲにおいても作期Ⅰと同様の水管理サイクルを採用した。

作期Ⅲ（雨季）の全栽培面積における籾収量は、1,535.5kg（種子水分含有率：18.60%）であった。種子水分率を 14%の場合に換算すると、籾収量は 1,453.4kg となり、1ha あたりの籾収量は 7.29 トン/ha になった。この単位面積当たり収量は、作期Ⅰ，作期Ⅱに続き参加チームのなかで首位であった。

このように、3 作期連続して単位面積あたり籾収量約 7 トン/ha という結果をおさめることができたことは、採用した肥培管理法が熱帯稲作に適していることを示している。

第 3-17 図 試験Ⅱ作期Ⅲにおける定植日から登熟までのイネの様子

(a)定植 (7月20日), (b)(c) 定植後24日 (8月13日),
(d) 登熟の様子 (定植後84, 10月12日)

(a)



(b)



(c)



(d)



第 4 節 論 議

民間水田 24 ha を用いた大規模実験によって、熱帯稲作の低収量が、従来指摘されていたように、多種多様な病虫害と獣害の多発、用水路や排水路等の未整備に不適切な水管理、自然災害（渇水、出水、台風など）などに起因することが明確になった。しかし、設定した5つの処理区間で、籾収量と病虫害の発生度合いに関して大きな差異が認められた。すなわち、籾収量に関しては、5処理区のなかで、「TT液+無肥料」が最も高く、ついで「TT液+14-14-14化成肥料 5kg/10a」>「TT液+14-14-14化成肥料 10kg/10a」>14-14-14化成肥料 5kg/10a>「有機肥料」の順となり（第3-6表）、病虫害の発生に関しては施肥量の多い処理区ほど多いことが認められた。したがって、熱帯稲作の安定多収化には、TT液の投入と減肥料が必須であると考えられた。

TT 液を投入した水田では、渇水時に生じる土のひび割れが少なかった。TT 液には土壤微生物叢を多様化し、活性化する効果があり（第 1 章）、この効果が土壌を団粒化し保水力が高めることを筆者は秋田県大潟村の水田を用いて確認している（未発表）。したがって、TT 液投入区で渇水時のひび割れが少なかったことは、TT 液の投入効果であると考えられる。

参加要請されたフィリピンイネ研究所アグサン支所稲作コンペティションでは、民間水田における結果に基づいて、病虫害とネズミの食害を防止するための対策（TT 液の投入、無肥料、無殺菌剤、最小限の殺虫剤）と、水管理を徹底して行った。その結果、3 期連続して 1 等賞を獲得するとともに、3 期平均で籾収量 7.22 トン/ha を達成することができた。この値は、「結果」で示したように、この地域における「RC240」の単位面積あたり籾収量 2.5~3.0 トン/ha (PhilRice Agusan) を 2.4~2.9 倍、フィリピン共和国の平均単位面積あたり籾収量 3.6~3.9 トン/ha (FAOSTAT 2005-2015) を 1.9~2.0 倍上という大きな値であった。このことから、ここで採用した TT 液の利用による肥培管理が熱帯稲作において有効であることが明らかになった。

稲作コンペティションには、既述のように、バイエル社も参加していた。バイエル社に限らず参加企業は、いずれも、自社製のハイブリッドライス、農薬、肥料を使用した。筆者らは、ハイブリッドライスではなくこれより収量ポテンシャルの低い現地の固定型品種を用い、TT 液と最小限の殺虫剤を使用したものの、肥料と殺菌剤はいっさい使わなかった。それにもかかわらず、3 作期連続で 1 等賞を獲得したことは、設定した肥培管理法が優れていたことを示している。

緑の革命以降の熱帯地域においても、多肥料・多農薬稲作が行われており、土壤微生物叢の多様性喪失による水田の疲弊が進んでいる(大塚 1995)。高収量を目指した現行の多肥料稲作では、試験 I の民間水田における結果が示すように、病原菌、病原ウイルスおよび害虫の大量増殖が避けられず、大量の農薬を使わざるをえない。農薬（特に殺菌剤）の使用量が増えると、土壤微生物叢の多様性と活性が低下する。土壤微生物叢の多様性と活性が低下すると、土中にイネが吸収できる小分子栄養素が不足するようになり、これを補おうとすると肥料の使用量が増える。肥料の使用量が増えると、農薬の使用量がまた増える。現行の稲作は、このような負のスパイラルに陥っており、これから脱出するためには、根本原因である多肥料をやめ少肥料にすることである。本研究の成果は、TT 液の利用によって減肥料が可能になること、さらに減農薬も可能になること

を明確に示している。熱帯は、元来、土壌微生物の多様性に富んでいる地域である (Tedersoo *et al.* 2014)。温帯地域より TT 液の有効性は大きい可能性がある。TT 液の積極的利用を薦めたい。

【参考】

筆者らが参加した稲作コンペティションにおいてバイエル社が供試したハイブリッド品種は Bigante Plus であった。公開されたバイエル社の資料をみると、7 種類の肥料を 8 回 (N:9.6g/m² K:10.1g/m² K:4.1g/m²)、ホウ素剤、2 種類の除草剤を 2 回、12 種の殺虫剤を 13 回、殺菌剤を 1 回使用していた。

第 5 節 摘要

病虫害が多発するため農業生産に適していない熱帯地域で、安定多収稲作を実現するための方策を見出すために、国際稲研究所やフィリピンイネ研究所を配しているにも関わらず、アジア諸国の中でイネの単位面積あたり収量が低いフィリピン共和国の稲作に注目し、同国ミンダナオ島ブトゥアン市の民間水田 24 ha を借用して TT 液の利用による安定多収稲作が実現できるかどうかを検証した。その結果、フィリピンのイネの低い単位面積あたり収量は、病虫害と獣害（とくにネズミの食害）の多発と灌漑設備の未整備、さらに自然災害による品種の収量ポテンシャルの引き出しを抑制していることに起因すること、および TT 液の投入が減肥料と減農薬を可能にすることが判明した。この知見をもとに、フィリピンイネ研究所アグサン支所で年 2 回開催されている稲作コンペティション（収量だけを競う）に参加し、TT 液と最小限の殺虫剤を使用するものの、化学肥料と殺菌剤を一切使わず、試験水田周辺の草叢の草刈りと水田の水管理を徹底して行ったところ、自社製の多収ハイブリッド品種（筆者らはミンダナオ島の固定型栽培品種「RC240」を使用）や肥料、農薬を用いてコンペティションに参加したバイエル社等の巨大種苗・化学・製

業会社（多国籍企業）に3期連続して勝つことができた。このコンペティションでの平均籾収量7.22トン/haは、この地域における「RC240」の単位面積あたり籾収量2.5～3.0トン/ha（PhilRice Agusan）を2.4～2.9倍、フィリピン共和国の平均単位面積あたり籾収量3.6～3.9ton/ha（FAOSTAT 2005-2015）を1.9～2.0倍上という大きな値であった。このことから、ここで採用したTT液の利用による肥培管理が熱帯稲作においても有効であること、したがって、TT液は熱帯農業においてもLISAの実現・推進に利用できることが明らかになった。

第4章 Takeo-Tanisaka 液の利用による農業用 供給湖沼の水質改善

第1節 緒言

日本には、農業用水を確保供給するために水を貯え、取水設備を備えた人工の池、すなわち、ため池が十数万～20万あると推定されている。しかし、これらため池の多くは、農業排水などを通じて流入する環境負荷物質（窒素やリンなど）の蓄積による水質悪化（現象的にはヘドロの堆積やアオコの大発生など）が避けられず（平松・鈴木 2007）、これを改善すべく池干しを行って池底のヘドロを乾燥・酸化させ、栄養塩類の溶出を抑制するとともに、ヘドロを肥料として利用してきた。しかし、近年、担い手の減少・高齢化が進んで池干しが行われなくなり、ため池の水質悪化が大きな社会問題となっている。池の水質を改善する方法として、池干しのほか、①凝集剤をまいて水中に浮遊している有機物を凝集させ池の底に沈殿させる方法、②ろ過により有機物や浮遊粒子を処理する方法、③外来の微生物を使い有機物およびヘドロを処理する方法が開発されている。しかし、①の方法では、透明度が速やかに一時的に向上するが、池の底に沈殿した有機物がヘドロとして堆積するため、生物の生活環境がよくなるわけではなく、根本的な解決にはならず、また、②の方法では、ろ過装置が必要であり、初期のみならずその後の費用もばく大になり問題が多く、③の方法では、一時的な効果は期待できるが、持続的な水質改善は望めず、加えて、現存する微生物を殺してしまうため自然環境を変えてしまう問題の多い方法である。

湖沼（池を含む）や河川は、もともと、自ら水をきれいにする自浄能力を有している。すなわち、自然は、水中や底質に棲む多種多様な微生物の力を借りて水質悪化の原因となる有機物を分解し水質の悪化を防いでいるのである。しかし、近年、湖沼や河川に流入する窒素やリンなどの水質汚濁物質の量が、自浄能力では対処できないほど増えており、何らかの方策を講じないかぎり、水質の悪化は進む一方になると思われる。筆者は、TT液の投入によって水中および底質中の微生物叢を多様化、活性化すれば、水中に浮遊する有機物と底質に溜まったヘドロが分解され、

水質が改善されると考え、これを実証する研究に取り組んだ。TT液によるため池の水質改善ができれば、労力やコストがかさむ池干しが不要になるであろう。

本章では、微生物や藻類などの力を借りて水を浄化するいわゆるラグーン処理方式の下水処理施設として掘削されたが、処理能力を大きく超えたヘドロが分厚く堆積したまま放置されたきわめて汚いラグーンを用いて、TT液の投入によってヘドロが分解され、水質が改善されるか否かを検証した。

第2節 材料および方法

【試験に用いた池】

秋田県のある農村の下水処理装置として使用されていた、面積 3,100 m²・貯水量 4,000 m³ のラグーン（名称：第2ラグーン）を当該村の許可を得て用いた。このラグーンは、放置されてから30年以上も経過していたにもかかわらず、依然として、ヘドロが水面近くまで堆積し、その一部が木耳状の黒い塊や泡沫になって浮遊し、悪臭が漂う状態にあった。悪臭は、風向きによっては池から100m程度離れた地点でも感じるひどさであった。第2ラグーンがここまで汚れた原因は、水中および底質中の微生物叢の多様性と活性が失われて自然浄化能が低下し、ヘドロが分解されず堆積続けていたことによると考え、TT液を投入することにした。

【TT液の投入】

TT液の投入量は、十数回にわたる筆者の予備実験から、池の水量に対して6~15 ppm濃度になる程度でよいことが分かっている。また、投入は1回だけでもよいが、ある程度の水質改善後に投入するとさらに効果が高まることも明らかにされている。このため、第2ラグーンの水質改善にあたっては、2010年5月10日から12日の3日間に初回分としてTT液 32,000 ml (24,000 ml + 4,000 ml + 4,000 ml, 投入量が多く3日に分けて行った)を投入した。その後、同年5月

26日と同年6月9日にそれぞれ12,000 ml および4,000 ml を追加投入した。これら3回の散布・投入量は計48,000 ml (池の貯水量に対し12 ppm に相当する量) であった。翌年の2011年には、2010年の1回目の散布・投入日(5月10日)より1日だけ早い5月9日に24,000 ml を投入した。それ以降は、TT液を投入せず、水質測定と経過観察を行った。TT液は、ゴムボートの上から池の水面全体にいきわたるように散布、投入した。

【水質調査】

水質調査は、TT液投入直前の2010年5月10日～2012年12月の間の5月上旬(5月8日から10日)、7月上旬(7月3日から7日)、12月上旬(12月6日または7日)に実施した。

池の水質は、季節・天候・時間・水温などにより変化し、また場所によっても異なるため、水質分析に供した池水は、同じ場所(水深も含めて)から同じ時刻に同じ採水方法で同じ採水者が採取した。水質検査はつぎの7項目について行った。ただし、不溶解成分の影響を排除した溶解性化学的酸素要求量(D-COD)については2010年7月上旬から測定することにした。

- ① 水素イオン濃度 (pH)
- ② 生物化学的酸素要求量 (BOD) : 微生物が20°Cの水中に存在する有機物を酸化分解するとき使用される体積あたり酸素量。BODは、通常、5日後の値を用いるためBOD₅とする場合が多い。
- ③ 化学的酸素要求量 (COD) : 過マンガン酸カリウムが対象の物質を酸化するときの酸素量。単にCOD_{Mn}と書く場合が多い。有機物だけではなく、亜硝酸や亜硫酸、二価の鉄などもCOD_{Mn}として測定される。
- ④ 浮遊物質 (SS) : 水中に懸濁している不溶解性物質のことで、2 mm のふるいを通過し1 μm の濾過材上に残留する物質と定義される。不溶解性物質には、懸濁粒子、微生物、藻類などが含まれる。SSの量は、水の濁り、透明度などの外観に大きな影響をあたえる。季節により微生物や藻類およびそれらの遺骸により大きく増減することがあるが、年間を通してSSの量が少なくなることは湖沼の水質改善浄が進んだことを示す。

- ⑤ 全窒素：水中に存在する種々の形態の窒素化合物の全体の量.
- ⑥ 全燐：水中に存在する種々の形態の燐化合物の全体の量.
- ⑦ 透視度：水の透き通りの度合いを示すもので、水層を通して底に置いた標識板の二重線が初めて明らかに見分けられるときの水層の高さで表す.

水質検査は、厚生労働省登録水質検査登録機関である（公益財団法人）秋田県総合保険事業団児桜検査センターに委託した。この機関での水質検査は、日本工業規格の工場排水試験方法 JIS K 0102 に準じて行っている。

第3節 結果

TT 液の投入による第 2 ラグーンの外観の変化を第 4-1 図に示した。TT 液の投入前に水中に浮揚していた木耳状のヘドロと水面に漂っていた泡は、6 月 9 日にはほとんどみられなかった。この変化は、透視度と SS の値に反映されていた（第 4-1 表）。しかし、6 月下旬になると、底質のヘドロの分解が始まり分解されてできた大量の小さな無機の窒素化合物が水中に浮上するとともに、これを栄養素として吸収した藻類が増殖し、6 月 23 日には透視度は 14cm まで下がり、池水も濁ってみえた（第 4-1 図(c), (d)）が、7 月 7 日の透視度は 20cm（第 4-1 図(e)）、7 月 22 日は 24cm、8 月 10 日に 35cm と上昇し、9 月 8 日には 46cm になり（第 4-1 図(f), (g), (h)）、水質が改善したようにみえた。透視度が 46cm まで上がったのち、6 月の下旬ほどではないが、10 月上旬に底質のヘドロの分解が起き、透視度は下がった。池水の栄養が不足すると底質のヘドロを分解させ栄養を供給しているかのような営みを感じた。透視度と SS は、その後、翌年の 12 月ま

で大きな変化がなく、横ばい状態が続いた。翌年 12 月以降は、わずかな季節間変動はあったが、透視度は高くなり、SS は低くなった。TT 液投入前 1 時間に 6.5 cm であった透視度が、2011 年 12 月 7 日、2012 年 5 月 8 日および 12 月 6 日には 50 cm 透視度計の測定上限の 50 cm を超えるまで透明度が高くなったこと、および TT 液投入前 1 時間に 40.0 mg/l であった SS が、2011 年 12 月 7 日、2012 年 5 月 8 日、2012 年 12 月 6 日に、それぞれ 2.5 mg/l、5.8 mg/l および 6.8 mg/l ときわめて低くなった。透視度の変化については第 4-2 図からも明らかである。

生物化学的酸素要求量 (BOD) は、河川に含まれる有機物の代表的な汚染指数として使われている。BOD は、季節による変動があるが、TT 液投入年の値に対する翌年および翌々年の同月同旬の値の割合をみると、5 月上旬では翌年が 20%、翌々年が 22%、7 月上旬では翌年が 36%、翌々年が 40%、12 月上旬では、翌年が 12%、翌々年が 26%であった。このように、BOD は処理当年より翌年および翌々年のほうが明らかに低くなった。

化学的酸素要求量 COD は、湖沼における汚染指数として使われているが、COD で表される有機物の性状の多くは溶解性であり、その多くが難分解有機物である。水質改善の進行の判断には、難分解有機物の分解つまり COD の低下が重要である。しかし、COD は、採水に含まれる浮遊物質中の不溶解成分の量に影響されるため、その影響を排除した溶解性化学的酸素要求量 (溶解性 COD) を 2010 年 7 月 7 日の調査から測定項目として追加した。COD も溶解性 COD も、翌年からかなり低くなっており、TT 液投入年の値に対する翌年および翌々年の同月同旬の値の割合をみると、5 月上旬では翌年が 57%、翌々年が 47%、7 月上旬では翌年が 55%、翌々年が 53%、12 月上旬では翌年が 43%、翌々年が 46%であった。溶解性 COD は、7 月上旬で翌年が 76%、翌々年が 62%、12 月上旬で翌年が 52%、翌々年が 71%であった。このように、COD も溶解性 COD も処理当年より翌年および翌々年のほうが明らかに低くなった。

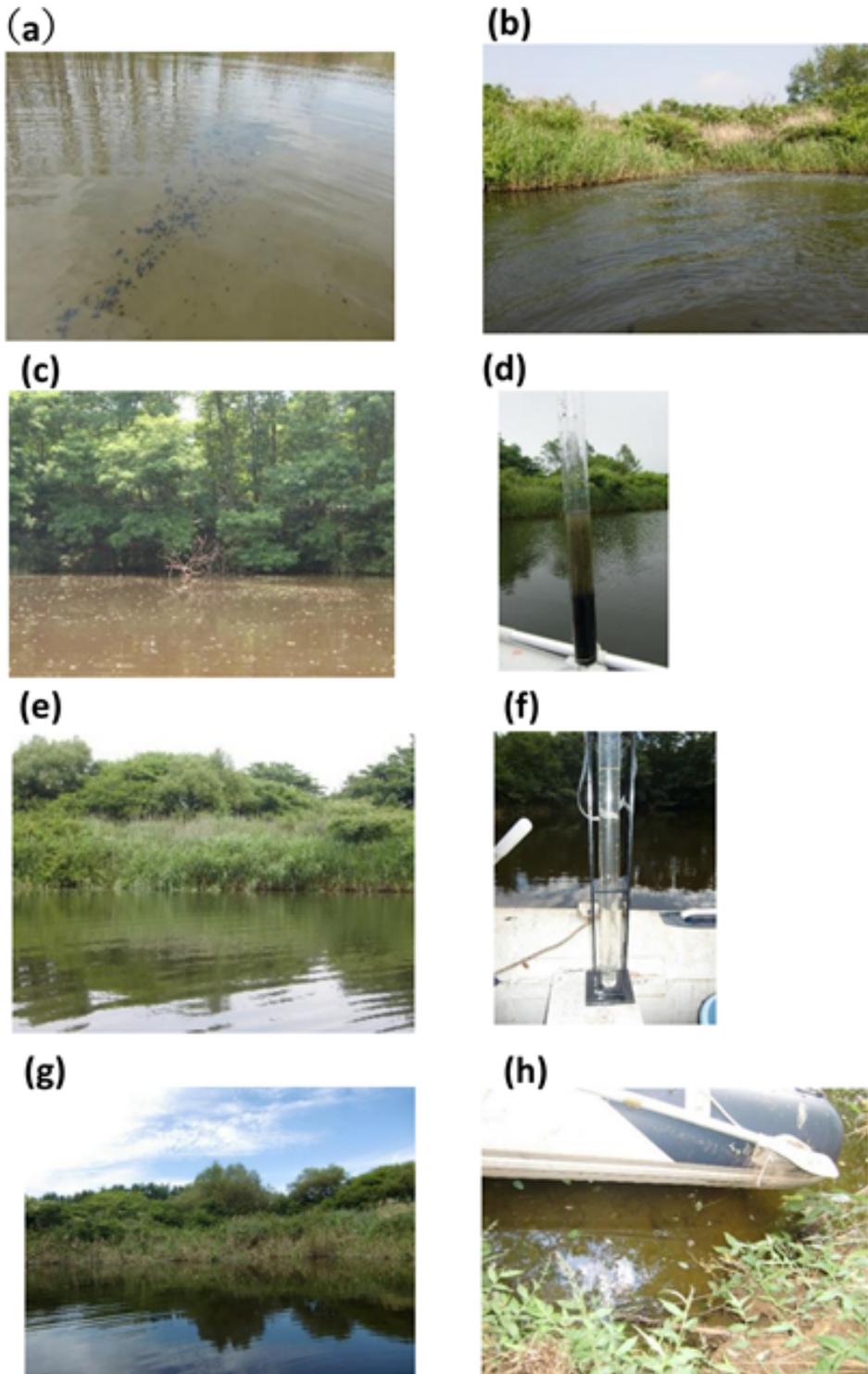
全リンについて、TT 液投入年の値に対する翌年および翌々年の同月同旬の値の割合をみると、5 月上旬では翌年が 61%、翌々年が 56%、7 月上旬では 90%、翌々年で 157%、12 月上旬では翌年が 133%、翌々年が 96%のとなった。全窒素について TT 液投入年の値に対する翌年および翌々年の同月同旬の値の割合をみると、5 月上旬では翌年が 46%、翌々年が 42%、7 月上旬では翌年が 67%、翌々年が 75%、12 月上旬で翌年が 98%、翌々年で 100%であった。全リンも全

窒素も TT 液の投入によって一時的に低下したが、高くなる場合もあり、他の指標ほど大きな TT 液投入効果はみられなかった。

以上の結果は、5 月上旬および 7 月上旬の第 2 ラグーンの様子を写真にした第 4-3 図および第 4-4 図からもうかがえる。

そのほか、水素イオン濃度(pH)については、季節による変動が若干認められるものの、年次による変動はほとんど認められなかった。したがって、TT 液は池水の pH に影響を及ぼさないと考えられた。土壌の pH も TT 液の投入のよって変化がみられなかった。これらのことから、TT 液は pH に影響を与えないことが示唆された。

以上のように、TT 液の投入によって第 2 ラグーンが目に見えて明確にきれいになり、さらに、水質を表す指標がすべて改善されたことから、TT 液には湖沼の水質を改善する力があることが明らかになった。

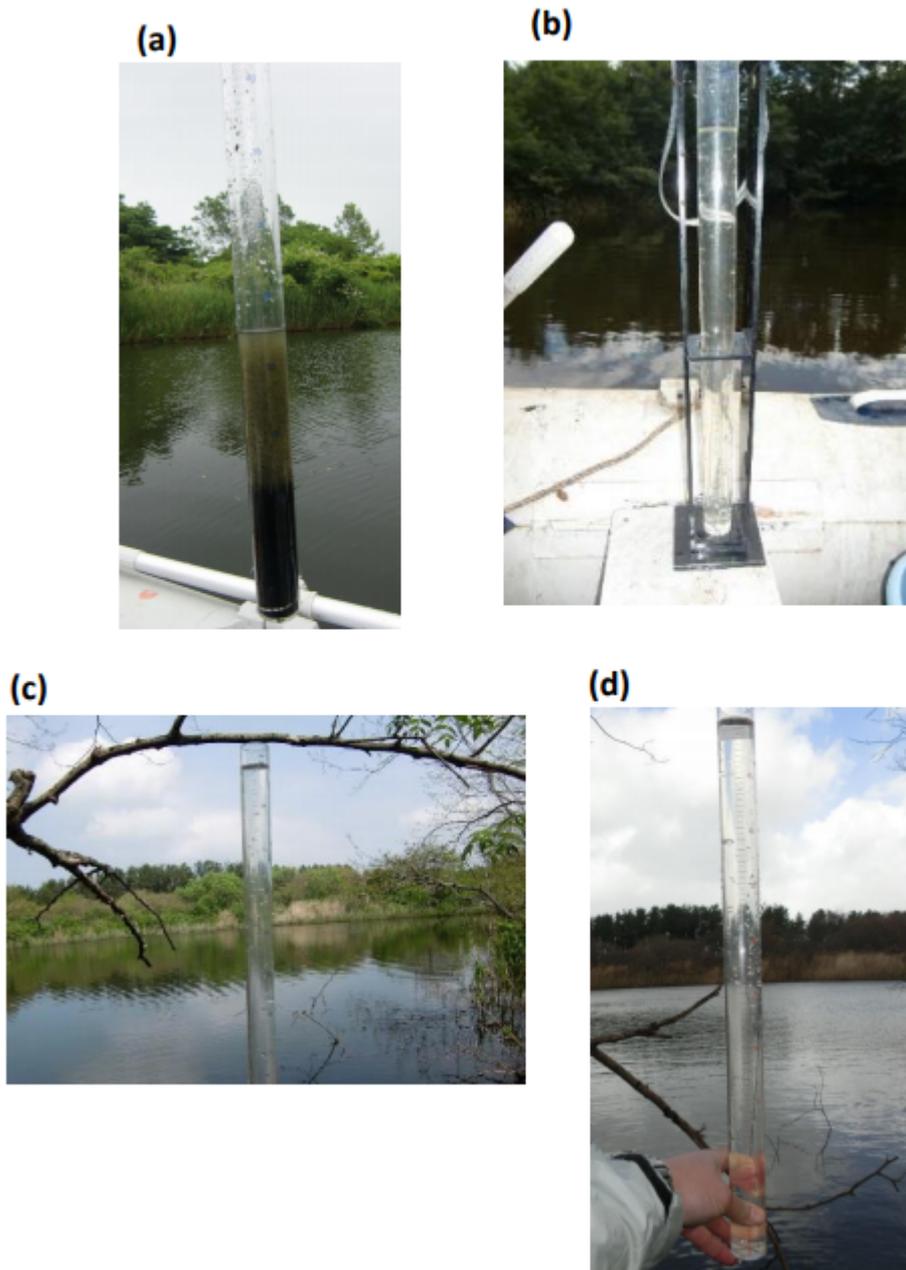


第 4-1 図 TT 液の投入による第 2 ラグーンの変化 (2010 年)
 (a)TT 液投入 1 時間前 (透視度 : 6.5 cm), (b) 6 月 9 日 (透視度 : 30 cm),
 (c)(d)6 月 23 日 (透視度 14 cm), (e)7 月 7 日 (透視度 20 cm),
 (f)(g)(h)9 月 8 日 (透視度 46cm)

第4-1表 TT液投入後の第2ラグーンの水質の変化（TT液投入日：2010年5月10日・11日・12日・26日・27日、2011年5月9日）

採水日 調査項目*	5月上旬			7月上旬			12月上旬		
	2010年 (5月10日)	2011年 (5月9日)	2012年 (5月8日)	2010年 (7月7日)	2011年 (7月5日)	2012年 (7月3日)	2010年 (12月7日)	2011年 (12月7日)	2012年 (12月6日)
天気	晴	晴	晴	晴	晴	晴	曇	雨	晴
気温	16.5°C	15.0°C	22.6°C	27.4°C	21.1°C	27.6°C	7.0°C	8°C	5°C
水温	20.0°C	16.4°C	19.2°C	29.2°C	25.6°C	26.6°C	7.8°C	5.0°C	6.4°C
pH	9.4	9.0	9.1	9.3	7.8	8.7	7.5	7.7	7.6
透視度(cm)	6.5	19.5	>50.0	20.0	13.0	16.0	13.0	>50.0	>50.0
SS(mg/l)	40.0	16.0	5.8	31.0	19.0	20.0	31.0	2.5	6.8
BOD(mg/l)	13.0	7.8	2.9	21.0	7.5	8.5	20.0	2.3	5.1
COD(mg/l)	30.0	17.0	14.0	38.0	21.0	20.0	35.0	15.0	16.0
溶解性COD(mg/l)	—	11.0	11.0	21.0	16.0	13.0	21.0	11.0	15.0
全磷(mg/l)	1.8	1.1	1.0	2.1	1.9	3.3	0.9	1.2	0.86
全窒素(mg/l)	2.4	1.1	1.0	2.4	1.6	1.8	5.2	5.1	5.2

*：調査項目については本文を参照



第 4-2 図 TT 液投入後の透明度の変化

(a) : TT 液投入後 44 日 (2010 年 6 月 23 日), (b) : TT 液投入後 121 日 (2010 年 9 月 8 日),
(c) : TT 液投入後 2 年後 (2012 年 5 月 8 日), (d) : TT 液投入後 2 年 7 カ月 (2012 年 12 月 6 日)

(a-1)



(a-2)



(b-1)



(b-2)



(c-1)



(c-2)



第 4-3 図 TT 液投入直後 (2010 年 5 月 10 日) から 1 および 2 年後の第 2 ラグーンの様子.

(a-1). (a-2) : TT 液投入 1 時間前の第 2 ラグーン(2010 年 5 月 10 日)

(b-1). (b-2) : TT 液投入後 1 年の第 2 ラグーン (2011 年 5 月 9 日)

(c-1). (c-2) : TT 液投入後 2 年の第 2 ラグーン (2012 年 5 月 8 日)

(a-1)



(a-2)



(b-1)



(b-2)



(c-1)



(c-2)



第 4-4 図 TT 液投入後 7 カ月 (2010 年 12 月 7 日) から 1 年 7 カ月および 2 年 7 カ月後の第 2 ラグーンの様子。

- (a-1). (a-2) : TT 液投入直前の第 2 ラグーン (2010 年 12 月 7 日)
(b-1). (b-2) : TT 液投入後 1 年の第 2 ラグーン (2011 年 12 月 7 日)
(c-1). (c-2) : TT 液投入後 2 年の第 2 ラグーン (2012 年 12 月 6 日)

第4節 論議

本研究では、TT液が汚れた池水を改善する効果を有しているか否かを、秋田県のある農村で下水処理場として使用されていたが、下水処理場の設置によって使用されなくなり汚れたまま放棄されていた池を用いて検証した。その結果、TT液の投入効果はきわめて大きく、わずか数カ月で水面近くまで堆積し、池の汚れの原因となっていたヘドロが分解されて消滅し、翌年12月には第2ラグーンは高原の湖のようにきれいな水を湛えるようになった。これは、TT液の投入により、水中および底質に棲む微生物の叢が多様になり、活性を取り戻したために、汚濁物質が大量に流れ込まないかぎり、改善された水質は半永久的に維持される可能性が高い。

緒言で記述したように、汚れた池の水質改善法は、いくつか提案され実行されているが、どの方法にも問題点があってほとんど汎用されていない。このようななか、湖沼の水質の保全を図るために湖沼水質保全基本方針を定めた湖沼水質保全特別措置法（1985年に施行）が2006年に改正された。改正の趣旨については、『施行から20年以上経過した現在においても、湖沼の水質について顕著な改善傾向がみられない状況にある。（中略）また、水生植物を利用した湖水及び湖沼流入河川の浄化については、一定の水質改善効果があることが定量的に分かってきており、計画の施策体系の中での位置づけを明確にしていく必要がある。』と記されている。この法改正が契機となり、生態系の作用に着目した自然の浄化能が見直されるようになった。

TT液の投入は、上記法改正の趣旨にそった水質改善法であろう。この方法は、水中と湖沼の底質の微生物叢に刺激を与え、失われた叢の多様性と活性を回復させ、もともと自然界が有する浄化能を回復させて水質改善を行う方法である。

日本以外にも、湖沼・河川の汚染・汚濁が問題になっている国は多い。TT液を用いた水質改善法は世界中の湖沼と河川の水質改善に寄与すると推察される。現在、世界のエビ養殖池の約1/3が汚染・汚濁により放棄されたままの状態にある。これは、多収穫を目指した餌の大量投与、これに伴う水質の悪化、さらにこれに伴う病気の多発、これに対処するための殺菌剤の大量投与、これによる水中および底質の微生物叢の多様性・活性の低下、多収穫を目指した餌の大量投与、水質のさらなる悪化という負のスパイラルによるものである。TT液はこの負のスパイラルを断

ち切ることができる資材である。

第5節 摘要

水面近くまでヘドロが堆積し、その一部が木耳状の黒い塊や泡沫になって浮遊し、悪臭を放つ秋田県のあるラグーン（面積 3,100 m²、貯水量 4,000 m³）を用いて、TT 液の投入が湖沼や池の水質改善の有効な方法になるか否かを検討した。2010 年 5 月 10 日から 12 日の 3 日間に初回分として TT 液 32,000 ml（24,000 ml + 4,000 ml + 4,000 ml、投入量が多く 3 日に分けて行った）を投入した。その後、同年 5 月 26 日と同年 6 月 9 日にそれぞれ 12,000 ml および 4,000 ml を追加投入した。これら 3 回の散布・投入量は計 48,000 ml（池の貯水量に対し 12 ppm に相当する量）であった。翌年の 2011 年には、2010 年の 1 回目の散布・投入日（5 月 10 日）より 1 日だけ早い 5 月 9 日に 24,000 ml を投入した。それ以降は、TT 液を投入せず、水質測定と経過観察を行った。TT 液の投入後、2010 年の 6 月には、池のヘドロの分解が進んで水質が目に見えてきれいになり、翌年 5 月にはヘドロがなくなって池の底が見えるようになった。水質を表す浮遊物質（SS）、生物化学的酸素要求量（BOD）、科学的酸素要求量（COD）、溶解性 COD の値も、2010 年 6 月 9 日の処理後 1 カ月で急速に低くなり、その後は上下変動を繰り返しながらもさらに値が下る傾向が認められ、処理翌年と処理翌々年の値は、処理当年の同日の値より顕著に低くなった。このことから、TT 液はため池など汚れた湖沼の水質改善に有効な資材であると結論した。

総括

環境汚染や農地の疲弊を促す多肥・多農薬農業から脱却し、人類の持続的発展を保障する低投入持続型農業(low input sustainable agriculture; LISA)を実現・推進するためには、病虫害抵抗性と高い養分吸収力をもつ品種の育成のほか、肥料の大量投入を必要としない肥沃な土壌を作る画期的技術の開発が必要である。本研究では、著者の竹生と谷坂隆俊博士が共同開発した土壌微生物叢活性化剤“Takeo-Tanisaka 液”(TT 液)が、葉菜類の成長およびイネの籾収量に及ぼす効果、ならびに土壌微生物叢の多様化、活性化に及ぼす効果、さらに湖沼の水質改善に及ぼす効果について解析し、TT 液が LISA の実現・推進に有効なツールになるか否かを検討した。

まず、有機質が定期的に投入されている土壌、有機質をほとんど含まない真砂土中心の土壌、および良質の苗の生産に適した物理性や化学性をもつように製造されている市販の園芸培土における TT 液の効果を解析したところ、TT 液は、土壌微生物叢を多様化、活性化して多種多様な有機質や化学肥料の分解を促して土壌を肥沃にし、コマツナ、ミズナ、ハボタンの成長を旺盛にすること、すなわち、TT 液は土壌作りに効果があり、減肥料を可能にすることが示された。

つぎに、ハウレンソウとニンジンを用いて TT 液の効果について検証実験を行ったところ、TT 液の投入が高温多湿時に多発する土壌伝染性病害“リゾクトニア病”の発生を抑制することが明らかになった。すなわち、TT 液は減肥料のみならず減農薬をも可能にすることが明らかになった。したがって、TT 液は LISA の実現・推進の有効なツールになると考えられた。

ついで、アジア諸国の中でもイネの単位面積あたり収量が低いフィリピン共和国において、民間水田 24 ha (ミンダナオ島ブトゥアン市)を借用して、TT 液の熱帯稲作に及ぼす効果を検証したところ、TT 液を投入し、かつ施肥量をゼロにすれば、病虫害と干害が顕著に減少し籾収量が高くなることが明らかになった。この結果を受けて、フィリピンイネ研究所アグサン支所主催の籾収量を競う稲作コンペティションに、TT 液と最小限の殺虫剤だけを使用し、肥料と殺菌剤を使用しない、ただし害虫や病原菌、ネズミの発生源となる試験水田周辺の草叢の草刈りと水田の水管理を徹底して行う、という肥培管理条件で臨んだところ、収量ポテンシャルの低いミンダナオ島

の固定型イネ品種「RC240」を使ったにもかかわらず、自社製の多収ハイブリッド品種や肥料、農薬を用いてコンペティションに参加したバイエル社等の巨大種苗・化学・製薬会社（多国籍企業）に、参加した3期すべてで勝つことができた。筆者のグループが達成したこのコンペティションでの平均収量 7.22 トン/ha は、この地域における「RC240」の単位面積あたり収量 2.5～3.0 トン/ha (PhilRice Agusan) の 2.4～2.9 倍、フィリピン共和国の平均単位面積あたり収量 3.6～3.9ton/ha(FAOSTAT2005-2015)の 1.9～2.0 倍であった。したがって、上記コンペティション採用した「TT 液の利用による肥培管理技術」は熱帯稲作においてもきわめて有効であること、すなわち、TT 液は熱帯農業においても LISA の実現・推進に有効なツールになると考えられた。

最後に、ヘドロが堆積し、その一部が水面近くで木耳状の黒い塊や泡沫になって浮遊し、悪臭漂うラグーン（面積 3100 平方メートル、貯水量 4000 立方メートル）を用いて、TT 液の投入が湖沼の水質改善の有効な方法になるか否かを検討した。2010 年 5 月 10 日から 12 日に、まず、32,000 ml を投入し、ついで同年 5 月 26 日および 6 月 9 日にそれぞれ 12,000ml および 4,000ml , 合計 48,000 ml（池の貯水量に対して 12 ppm に相当）の TT 液を投入し、翌年の同時期、5 月 9 日に前年の半分の量にあたる 24,000ml を 1 回散布した。2010 年の 6 月には池のヘドロの分解が進んで水質が目に見えてきれいになり、翌年 5 月にはヘドロがなくなって池の底がみえるようになった。水質を表す浮遊物質質(SS)、生物化学的酸素要求量(BOD)、化学的酸素要求量(COD)、溶解性 COD、全磷および全窒素の値も、2010 年 6 月 9 日の処理後 1 カ月で急速に低くなり、その後は上下変動を繰り返しながらもさらに下る傾向が認められ、処理翌年と処理翌々年の値は、処理当年の同日の値より顕著に低くなった。このことから、TT 液は、ため池など汚れた湖沼の微生物叢を多様化、活性化し、水質を改善するのではないかと考えられた。

以上のように、TT 液は、土壌微生物叢の多様化と活性化を促し、土壌を肥沃にすることによって、温帯のみならず熱帯農業においても減農薬、減肥料を可能にすること、および、汚れた湖沼の水質改善にも有効であることから、TT 液は、LISA のみならず人類の持続的発展を支える農業に供する用水の保全にも有効な資材になると結論した。

わが国農林水産省は、2021 年 5 月 12 日に食料・農林水産業の生産力向上と持続性の両立をイノベーションで実現する「みどりの食料システム戦略」を策定した。そのなかで、2050 年までに、

化学農薬の使用量（リスク換算）を 50%低減，輸入原料や化石燃料を原料とした化学肥料の使用量を 30%低減し，有機農業の取組み面積の割合を 25%（100 万 ha）に拡大すること目標に掲げている．土壤微生物叢の多様性失われた現代の農地で有機農業が農業の持続性に寄与する可能性は高くはないが，それでもわが国においても，肥料（有機肥料を含む）と農薬の大量使用に依存する現代農業から脱却し，自然生態系の力を借りた「環境と調和した農業」の薦めは，「低投入持続型農業（low input sustainable agriculture；LISA）」が政策的にも希求されていることを示している．

本研究の結果，TT 液は，土壤微生物叢の多様化と活性化を促し，土壤を豊かにすることによって，温帯のみならず熱帯農業においても減農薬，減肥料を可能にすることを見出すとともに，同じ原理で農業用水の水質保全に効果的であることを明らかにした．これらのことから，TT 液は，LISA のみならず人類の持続的発展を支える農業用水の保全にも有効な資材になると結論する．

引用文献

- Akiyama, K., K. Matsuzaki and H. Hayashi (2005) Plant sesquiterpenes induce hyphal branching in arbuscular mycorrhizal fungi. *Nature* 435: 824-827.
- Aquino, R. C. and P. R. Jennings (1966) Inheritance of semidwarfism in an indica rice variety. *Crop Sci.* 6: 551-554.
- Athwal, D.S., Oathak, M.D., Bacalangco, E.H. and Pura, C.D. (1971) Genetics of resistance to brown planthoppers and green leafhoppers in *Oryza sativa* L. *Crop Sci.* 11: 747-750.
- Bonde, T.A., J. Schnurer and T. Rosswall (1988) Microbial biomass as a fraction of potentially mineralizable nitrogen in soils from long-term field experiments. *Soil. Biol. Biochem.* 20: 447-452.
- Bonilla, N., Gutierrez-Barranquero, J.A., De Vincente, A. and Cazorla, F.M (2012) Enhancing soil quality and plant health through suppressive organic amendments. *Diversity* 4: 475 – 491.
- BSI 生物科学研究所 (2016) 「化学肥料業界資料」世界肥料需給の中期展望レポート (2015～2020 年) FAO ほか資料
- De Boer, W., Verheggen, P., Klein Gunnewiek, P.J.A., Kowalchuk, G.A. and van Veen, J.A. (2003) Microbial community composition affects soil fungistasis. *Appl. Environ. Microbiol.* 69: 835-844.
- Dobbs, G.C. and Hinson, W.H. (1953) A widespread fungistasis in soil. *Nature* 172: 197-199.
- Dobbs, G.C. and Gash, M.J. (1965) Microbial and residual mycostasis in soils. *Nature* 207: 1354-1356.
- Flor, H.H. (1956) The complementary genic systems in flax and flax rust. *Adv. Genet.* 8: 29-54.
- Flor, H.H. (1971) Current status of the gene-for-gene theory concept. *Annu. Rev. Phytopathol.* 9: 275-296.
- Foster, K. and J. N. Rutger (1978) Inheritance of semidwarfism in rice. *Oryza sativa* L. *Genetics* 88: 559-574.

Fukuoka, S., N. Saka, H. Koga, K. Ono, T. Shimizu, K. Ebana, N. Hayashi, A. Takahashi, H. Hirochika, K. Okuno and M. Yano (2009) Loss of function of a proline-containing protein confers durable disease resistance in rice. *Science* 325: 998-1001.

福島宏和 (2006) 過剰な窒素肥料が及ぼす環境負荷の低減に向けて—地下水汚染と農作物中の硝酸塩の低減. *科学技術動向* 2006年12月号: 11-21.

Hayashi, T., M. Banba, Y. Shimoda, H. Kouchi, M. Hayashi and H. Imaizumi-Anraku (2010) A dominant function of CCaMK in intracellular accommodation of bacterial and fungal endosymbionts. *Plant J.* 63: 141-154.

Hayashi, N., H. Inoue, T. Kato, T. Funao, M. Shirota, T. Shimizu, H. Kanamori, H. Yamane, Y. Hayano-Saito, T. Matsumoto, M. Yano and H. Takatsuji (2010) Durable panicle blast-resistance gene *Pb1* encodes an atypical CC-NBS-LRR protein and was generated by acquiring a promoter through local genome duplication. *Plant J.* 64: 498-510.

Higo, M., K. Isobe, Y. Matsuda, M. Ichida and Y. Torigoe (2015) Influence of sowing season and host crop identity on the community structure of arbuscular mycorrhizal fungi colonizing roots of two different gramineous and leguminous crop species. *Advances in Microbiology* 5: 107-116.

平松 研・鈴木裕久 (2007) リンと窒素の動態に着目した池干しの影響評価実験. *農業農村工学会論文集* 250: 65~72.

堀 兼明(1986) 野菜連作障害対策のための土壌微生物相改善に関する研究. *日本土壌肥料学雑誌* 57(3): 231-232.

Iwamoto, M. and A. Tagiri (2016) MicroRNA-targeted transcription factor gene *RDD1* promotes nutrient ion uptake and accumulation in rice. *Plant J.* 85: 466-477.

嘉田良平 (1993) 環境保全型農業の課題と方向. *日本農薬学会誌* 18: S201-S203.

Loc, Corie (2015) Mining the microbial dark matter. *Nature* 522. pages270–273.

Marcel, P. B., M. Obara, A. Taniai, Y. Sawa, J. Ishizawa, H. Yoshida, N. Tomita, T. Yamanaka, Y. Ishizuka, S. Kudo, A. Yoshinari, S. Takeuchi, S. Kojima, T. Yamaya and T. Hayakawa (2018) Lack of ACTPK1, an STY kinase, enhances ammonium uptake and use, and promotes growth of rice seedlings under sufficient external ammonium. *Plant J.* 93: 992–1006.

西尾道徳 (2002) 日本における化学肥料消費の動向と問題点. 日本土壌肥科学雑誌 73: 219-225.

農林水産省生産局技術普及課生産資材対策室 (2021) 世界の肥料の消費量の動向. 「肥料をめぐる情勢」.

大塚 紘雄 (1995) わが国における土壌劣化現象. 環境科学会誌 8(1):103-110.

櫻本直美 (2013) 土壌の生物性評価法「土壌微生物多様性・活性値」について. 計測と制御 52: 679-683.

清水顕史 (2017) 貧栄養ストレス耐性イネ品種開発のためのゲノム解析. 科学研究費補助金基盤研究(C)報告書.

武田和義 (1993) 植物遺伝育種学. 裳華房 (東京) .

Tamura, Y., M. Hattori, H. Yoshioka, M. Yoshioka, A. Takahashi, J. Wu, N. Sentoku and H. Yasui (2014) Map-based cloning and characterization of a brown planthopper resistance gene *BPH26* from *Oryza sativa* L. ssp. *indica* cultivar ADR52. Scientific Reports 4: 5872

谷坂隆俊 (2008) 人類の生存基盤を支える品種改良. 「生物資源から考える 21 世紀の農学 第 1 巻 作物生産の未来を拓く」. 山末祐二編集. 京都大学出版会 : 91-129.

Tanisaka, T., N. Takemori, T. Yabu, H. Egashira, Y. Okumoto and H. Yamagata (1994) Two useful semidwarfing genes in a short-culm mutant line HS90 of rice (*Oryza sativa* L.). Breed. Sci. 44: 397-403.

谷坂隆俊・富田因則・山縣弘忠 (1990) 水稻品種コシヒカリの半矮突然変異系統北陸 100 号および関東 79 号の半矮性に関する遺伝子分析—人為突然変異の利用に関する育種学的研究 XVIII. 育種学雑誌 40: 103-117.

Tedersoo, L., M. Bahram, S. Põlme, U. Kõljalg, N. S. Yorou ほか 53 名 (2014) Global diversity and geography of soil fungi. Science 346: 1256688(1-10).

蔦谷栄一 (2003) アメリカにおける環境保全型農業への取組動向 —— IPM からみたアメリカ農業. 農林金融 56(3): 146-165.

Wang, J., T. Nakazaki, S. Chen, W. Chen, H. Saito, T. Tsukiyama, Y. Okumoto, Z. Xu and T. Tanisaka (2009) Identification and characterization of the erect-pose panicle gene *EP* conferring high grain yield in rice (*Oryza sativa* L.). Theor. Appl. Genet. 119: 85-91.