

熱帯稲作におけるアゾラの緑肥利用

——その経済的潜在力と技術確立上の制約要因——

菊池眞夫
渡辺巖

一 序

- (一) 問題の背景
- (二) 本稿の課題
- 二 水田緑肥としてのアゾラ——生物学的ポテンシャル——
 - (一) 空中窒素固定能
 - (二) 稲収量への効果
- 三 農家利用技術としてのアゾラ——フィリピン・南コタバト州の事例——
 - (一) 農家アゾラ利用の実態
- 四 制約的環境下でのアゾラ利用
 - (一) 肥料反応関数の推定——
 - (二) 緑肥としてのアゾラの効果——
 - (三) アゾラ生育の制約要因
 - (四) 制約的環境下でのアゾラの経済的収益
- 五 結 語

一 序

アゾラ (*Azolla*)、和名アカウキクサ属、は世界中の温帯、熱帯の池塘、灌漑水路、水田のような水性環境に広く分布している水生シダで、ラン藻 (*Anabaena*) との共生による空中窒素固定能を持ち、無窒素培地で速やかに増

熱帯稲作におけるアゾラの緑肥利用

殖する。一九七〇年代中葉以降一般的に生じた、有機質肥料を見直す機運の中で、この植物は、熱帯稲作に関心を持つ多くの農業技術者・研究者によって特に注目され、精力的な研究の対象になってきた。⁽¹⁾

(一) 問題の背景

一九六〇年代後半にIR8が出現して以降、水稻改良品種を基軸とする新しい稲作技術体系の普及が、アジアの開発途上諸国における農業の土地生産性向上をもたらし、これら諸国の食糧増産に大きく寄与してきたことに、今や疑問の余地はない。この新しい稲作技術体系は、近代的投入財集約的なことをもってその特徴とする。改良品種が持つ高収量ポテンシャルの実現には、アジア開発途上諸国の伝統的稲作技術体系の下でのそれとは隔絶した水準での、近代的投入財、特に化学肥料、の集約的利用が要求される。そのためこの新しい稲作技術体系は、しばしば種子・肥料技術と称せられる。この種子・肥料技術の普及と前後ないし並行して、稲作農家の肥料利用率を高めるべく、多くの途上諸国で、肥料補助金政策、あるいは、肥料を中心とする近代的投入財購入資金の供給を主眼とする、制度金融導入策が採られてきた。⁽²⁾ 種子・肥料技術の普及が食糧増産に寄与し得た背後には、一因として、これら肥料補助金政策の存在を指摘し得るであろう。

もとより、肥料補助金政策の存在は政府財政にとって圧迫要因である。⁽³⁾ さらに、化学肥料の利用増大は、その供給を輸入に頼っている場合は直接、また、国内で製造している場合でも原材料等の輸入を通して間接的に、途上諸国にとって最も希少な資源たる外貨準備を減少させることになり、これらの諸国が共通に抱えている国際収支不均衡の問題に一層の負担をかけることになる。最近の世界肥料市場における価格動向は、一九七〇年代中葉の第一次

石油危機直後の時期と比較すれば、落ち着いてはいる。しかし、化学肥料に関する交易条件は、長期的に見た場合、農業に不利に推移する蓋然性が高いように思われる。今だに高い成長率で増加しつつある人口を支えるべく、一層の食糧増産が、土地生産性の向上を通して図られねばならないとすると、それに伴って化学肥料の需要は一層拡大するであろう。これは、途上諸国政府の資源配分、外貨準備、従って経済発展一般に対する制約要因として作用するかもしれない。

有機質肥料の多くは農業内で自給されるものであり、それらを活用することで、農村における機会費用の低い資源を生産的目的に動員し、機会費用の高い化学肥料を代替し得るならば、その経済発展への貢献は極めて大きなものであろう。東アジアにおける稲作と異なり、元来有機質肥料利用の歴史に乏しい熱帯アジア稲作において、化学肥料に代替ないしそれを補完し得るものとして、有機質肥料の利用可能性が考慮されるに至った所以である。

(二) 本稿の課題

既述のように、水稻改良品種は集約的肥料投入によりはじめてその高い収量ポテンシャルを発揮するが、多くの栄養素の中で、増収にとって最も重要なものは窒素である。多くの有機質肥料源の中でアゾラが特に注目されてきた主たる理由は、その高い空中窒素固定能にある。水田緑肥として利用された場合、それだけ無機質肥料を代替する能力が高いと期待される訳である。

国際的スケールでの集約的アゾラ研究の歴史は比較的浅いが、稲作農家によるアゾラの水田緑肥としての利用自体は、中国南部とベトナム北部において古い歴史を持つ。例えば、Lin〔29〕は、六世紀に成立した中国農書『齊

民要術』に既にアゾラの記述があり、さらに一七世紀明末の多くの農書にその利用法についての説明が見られると(4)いう。また、Tuan and Thuyet〔48〕によれば、ベトナムのアゾラの緑肥利用の歴史は一一世紀にまで溯るとい(5)う。これら両国とも、アゾラの利用は革命後飛躍的に普及した。

限られた地域とはいへ、これら両国で数世紀に渡ってアゾラが水田緑肥として現実の農家に用いられてきたという事実は、それら地域に特定の条件の下で、アゾラの緑肥利用が経済的に意味ある技術であったということを確認に示している。しかしながら、この技術をそれらの地域外、特に熱帯諸国の稲作地帯に、経済的に利用可能な技術として移転させ得るか否かは明らかでない。本稿の課題は、過去一〇年間精力的に蓄積されてきた生物学的アゾラ研究をふまえて、現段階において、水田緑肥としてのアゾラ利用の経済性を評価することにある。より具体的には、熱帯稲作におけるアゾラの緑肥利用の経済的ポテンシャルを評価し、さらに、アゾラが熱帯の稲作農民に広範に利用される技術となる上で克服すべき幾つかの経済的ボトル・ネックを検出することを主要な課題とする(6)。

現在のところ、農民に実際に利用されるものとしてのアゾラ技術の実態に関する利用可能な情報は皆無に近く、本稿においてなされる経済的評価も、限られた情報の下での第一次的接近の域を出るものではない。既往のアゾラに関する生物学的研究を、水田緑肥利用の観点から展望し、あわせて、熱帯稲作農家によるアゾラ緑肥利用の実態に関する一つの資料を提供し、以てアゾラ技術完成に向けての今後の技術的・経済的研究の展開に資することが、本稿のより基本的、長期的課題である(7)。

以下、まず次章では、既往の研究の展望を通して、アゾラの水田緑肥としての生物学的ポテンシャルを確認し、次いで第三章で、フィリピン・ミンダナオ島南コタバト州のアゾラ利用農家の事例分析を行ない、現実の稲作農家

に用いられるものとしてのアゾラの経済的ポテンシャルを明らかにする。第四章では、アゾラ生育上の自然的・社会的制約要因を検討し、これら制約要因に関する幾つかの仮定の下で、アゾラ利用の経済的収益を評価する。

注(1) 本稿は、一九八二年九月二七日〜一〇月一日に国際稲研究所 (IRRI) で開かれた *Organic Matter and Rice Conference* (におうじ Kikuchi *et al.* [28]) として報告された論文を基にし、それに修正・加筆をほどこしたものである。

(2) インドネシアの BIMAS 計画「マツリゴンの Masagana 99 計画等は、その代表的なものである。

(3) フィリピンを例にとると、肥料補助のための政府財政支出は、年々一億六五〇〇万ペソ (二〇〇〇万 US ドル) のオーダーにあり、Masagana 99 計画が着手された一九七三年以降の累積で、一六億ペソに達するという (*Bulletin Today* 紙、一九八二年二月二六日)。フィリピンの政府財政支出は、一九七六〜八〇年の五カ年の平均で、総額二九五億ペソ、農林水産業関連支出一八・五億ペソである (NEDA [31]、五七七頁)。

(4) Liu のこの記述 (Liu [29]、三七五頁) の前半は何かの勘違いであろう。明刊『齊民要術』津逮秘書本の卷二水稻第十「一を糯くと、唯一それらしい所は、「沢草所生種之芒種、……芒種稲麦也。」の条であるが、この沢草を以ってアゾラとすることは出来ないであろう。また卷十、五榮果蔬菜茹非中國物産者に茗という緑肥が出てくるが、これは天野 (2)「四九五頁」によれば、野豌豆であるという。天野博士は同書同頁において、『要術』の緑肥作物についての記述を要約され、緑豆・小豆・胡麻の三作物のみがあげられており、紫雲英は記録されておらず、首稻も緑肥としては出てこない、とされている。

我々が手近に当たり得た明代の水稻作に関する資料は、王象晋『二如亭群芳譜』、宋応星『天工開物』、徐光啓『農政全書』の三つに限られるが、前二者の稲作の条には、アゾラを思わせるような緑肥利用の記述は見当たらない。『農政全書』の稲作の条も同様であるが、同書(曙海楼蔵板)卷五田制編沙田の条で、元代成立の王禎『農書』を引用した後、それに注釈して「肥積苔華、此四字弗輕誦過是糞壤法也。今浜湖人、漉取苔華以当糞壅、甚肥不可不知」とある。そこで王禎『農書』(嘉靖本)を繙くと、卷十一農器圖譜一、田制門編沙田の条に、江南の水田地帯を描写し、「内備農具、傍泊魚板、肥積落華。」と見える。この苔華に天野博士は「すいそう」とルビをふっておられる(天野[3]、三二九頁)。まだ確認はしていないが、苔様の水性緑肥でアゾラ以外の植物をあげることは難しいように思われる。例えば北京農業大学『肥料

手冊』〔8〕は、現代中国で用いられている水性緑肥としてアゾラ（中国名、紅萍、綠萍、または滿紅江）、水花生（*Alternanthera philoxeroides*）、水葫芦（*Eichornia crassipes*）、水浮蓮（*Pistia stratiotes*）の四つをあげているが、この中で最も苦華という表現に近いのはアゾラである。また、愚管の軋某の贊として引かれているこの江南水田地帯の情景には、本稿後章でフィリピンのアゾラ利用地帯として紹介する南コタバト州の水田地帯のそれと似通うものがある。『農書』農桑通訣集之三に糞壤編第八として、有機質肥料の利用法が詳述されているが、そこでは触れられず、江南の田制からんで記述されている点も示唆的である。もしこの落（苔）華がアゾラを指すものであるとすると、江南におけるその稲作緑肥としての利用の歴史は、『要術』の六世紀はともかくとして、元代以前まで溯ることになる。

- (5) 中国におけるアゾラの緑肥利用は、福建・広東西省から始まり後に浙江、江西、湖南、広西、四川の諸省に広がったという（Liu〔29〕、三七五頁）。その普及面積は、福建、広東、浙江、湖南の四省で、前期稲作面積の二割、中国全体で稲作面積の八%、あるいは一三四万ヘクタールに達する（渡辺〔13〕、四九五頁、Liu〔29〕、三七六頁）。ベトナムでも、アゾラ利用水田面積は、一九六五年で、三二万ヘクタールにのぼっている（Tuan and Thuyet〔48〕、三九五頁）。

- (6) アゾラの利用は稲作に限定されない。アゾラは家畜・魚の良好な飼料として用いられ（Buckingham *et. al.*〔20〕、Edwards〔23〕、Subudhi and Singh〔43〕、蘇北農學院〔11〕）、人間の食用にもなり（Singh〔54〕、Rains and Talley〔37〕）、また水質浄化にも用いられ得る（Rains and Talley〔37〕）。本稿におけるアゾラの経済的評価は、これらの用途を総て無視し、その水田緑肥利用に限定して行なわれる。

- (7) アゾラに関する一般的な資料文献レビューとしては、渡辺〔13〕、IRRI〔27〕がある。また、アゾラの経済的評価に関する論文としては、本稿の他に Balsacan and Roumasset〔17〕、Rosegrant〔38〕がある。但し両者共、実際に農家に用いられるものとしてのアゾラ利用に関するデータを含んでいない。

二 水田緑肥としてのアゾラ

—— 生物学的ポテンシャル ——

前節で触れたように、アゾラは温帯から熱帯にかけての水性環境に広く分布する小さな苦様の浮草の属名で、水

面上を自由に浮遊しつつ増殖する。化石種を除き、現生種として六種が知られている。⁽⁸⁾ 中国・ベトナムで緑肥として利用されてきたのは、この六種の中で *A. pinnata* およびその亜種である。⁽⁹⁾

葉は互生し、二枚の上下重なった羽片からなり、上部のものを背面羽片、下部のものを腹面羽片と呼ぶ。共生ラシ藻は、この背面羽片の裏側、基部近くにあいた小孔中に共生し、空中窒素を固定する。⁽¹⁰⁾ 葉色は、栄養条件の良い時は緑色、強光下、低温下、栄養欠乏時には紅色を呈する。

(一) 空中窒素固定能

アゾラの生長速度、最高生体重、窒素固定能から、アゾラ・ラン藻共生系の農業的利用へのポテンシャルを知ることが出来る。

アゾラの生長速度は普通、生体重増増日数で見られる。Becking [8] は *A. microphylla* と *A. nilotica* を除く四種について既往の試験結果に現われた増増日数を整理している。時に増増日数が二〇日近くになる *A. filiculoides* を除き、他の種の増増日数は二〜一〇日の範囲にあり、正常状態で四日、最高で三〜三・二日という平均的な数値をあげている。すなわち、開放水面においてアゾラは三〜四日毎に生体重が倍々に増える、典型的な幾何級数的増殖過程を示す。閉鎖水面において増殖する場合、密度の上昇と共に生長速度は低下する (Ashton [15])。従って閉鎖水面における最高生体重に達するまでのアゾラの生長は、ロジスティック曲線で近似出来る。

第1表は、種々の条件下でなされたアゾラ培養試験の結果報告の中から、最高生体重、窒素含量、最高生体重に達するまでに要した日数で最高生体重窒素量を除して得られる一日当たり平均窒素固定率を拾い出して纏めたもので

第1表 アゾラの窒素含有量と平均窒素固定率¹⁾

種	生育条件/生育地	最高生体量			平均 窒素固定率 (kgN/ha/日)	出 所
		乾 物 (mt/ha)	窒素含量 (kg/ha)	日数		
<i>A. filiculoides</i>	ファイトトロン 20°C(日), 18°C(夜)	3.2	126	51	2.5	渡辺 [13]
	ポット水田/日本	5.2	128	50	2.6	辻村ら [12]
	浅い池/USA	1.8	105	...	...	Talley <i>et. al.</i> [44]
	裸地水田/USA	1.7	52	35	1.5	Talley and Reins [45]
	裸地水田/USA	2.3	93	46	2.0	Talley and Reins [46]
	稲作水田/中国	3.4	142	36	3.9	利ら [10]
<i>A. mexicana</i>	池/USA	0.8	39	39	1.0	Talley <i>et. al.</i> [44]
	裸地水田/USA	1.1	38	...	...	Talley and Reins [45]
<i>A. caroliniana</i>	ファイトトロン 26°C(日), 18°C(夜)	3.2	146	41	3.6	渡辺 [13]
	稲作水田/中国	2.8	114	36	3.2	利ら [10]
<i>A. pinata</i>	ファイトトロン 26°C(日), 18°C(夜)	2.2	96	37	2.6	渡辺 [13]
	ファイトトロン 33°C(日), 25°C(夜)	1.5	33	22	1.5	渡辺 [13]
	ファイトトロン 37°C(日), 29°C(夜)	1.1	30	23	1.3	渡辺 [13]
	裸地水田/インド	2.3	104	30	3.4	Singh [42]
	裸地水田/フィリピン	1.1	48	30	1.6	渡辺 [13]
	稲作水田/フィリピン	...	73	91	0.8	Watanabe <i>et.al.</i> [52]
	稲作水田/フィリピン	...	20	7	2.9	南コタバト, 国際稲研研究員観 察
	稲作水田/ベトナム	...	25	60	0.4	Tuan and Thuyet [48]
	稲作水田/中国	...	41	18	2.3	Liu [29]
	稲作水田/中国	2.6	111	36	3.1	利ら [10]

注. 1) 渡辺 [13], 457頁第2表に加筆.

...はデータ無しあるいは不明を意味する(次表以下同様). 原典において, 数値が一定のレンジをもって報告されている場合, レンジの中央値を表示してある. 正確な数値については出所原典にあたられたい.

ある。ファイトトロン(人工気象装置)、池、裸地水田といった生育条件下でのアゾラの最高生体窒素含量は、ヘクタール当たり三〇から一四六キログラムの範囲にあり、ヘクタール・一日当たり平均窒素固定率は一・〇から三・六キログラムの範囲にある。これらの結果から、アゾラは、好条件下にあれば、三〇日間にヘクタール当たり四〇ないし六〇キログラムの窒素を固定し得る能力を持っていることが明らかである。裸地水田一ヘクタールで、飽和密度に達したアゾラは、新鮮重で一〇ないし二〇トンあり、二五ないし三〇キログラムの窒素を含んでいる⁽¹⁾。ヘクタール当たりの窒素産出量は、飽和密度に達したアゾラを収穫、あるいは土壤に鋤き込んだ後、二作目、三作目を一作目と同様に育成することにより、増加させ得る。このようにして水田一ヘクタールを通年アゾラ培養圃として利用した場合、アゾラの年間窒素固定総量は、四五〇キログラム(Watanabe *et. al.* [51])から八〇〇キログラム(Singh [42])、さらには一・二トン(利ら [9])にも達する。

アゾラを水田で稲と同時に育成する場合(稲作水田)の平均窒素固定率は、最低〇・四から最高三・九キログラムの範囲にある(第1表)。相対的にアゾラの生長にとって好適であると考えられる裸地水田等の条件下のそれと比較し、最低値は低い、最高値は逆に高い。但し、稲作水田についての最高値を含めて、高い平均窒素固定率を示す利ら[10]の試験結果は、三六日間に四回のアゾラの土壤への鋤き込みを含むものである。

第1表のファイトトロンを用いた試験結果から知られるように、アゾラの生長は気温に敏感である。また第四章で詳述されるように、気温以外にも多くの生長制約要因があり、標準的なアゾラの平均窒素固定率を確定することは難しい。しかし、稲作水田についての最低値の場合でも、アゾラは六〇日間にヘクタール当たり二五キログラムの窒素を固定する。最高値の場合鋤き込みが適宜行なわれるとすると六〇日間で、実に二三〇キログラムの窒素を

固定することになり、これだけの窒素量は稲の窒素必要量を上回るかもしれない。

以上の数字はアゾラの空中窒素固定能が極めて高いものであることを明瞭に示している。事実、アゾラの窒素固定能は、熱帯マメ科牧草のそれと比肩し得るものなのである。⁽¹²⁾

(二) 稲収量への効果

いかに多量の窒素を空中から固定し得ても、固定された窒素が土壌中で速やかに分解し、稲によって吸収可能なものとなり得ないならば、水田緑肥として無意味である。水田土壌中に鋤き込まれたアゾラの分解は急速で、その窒素効率は尿素あるいは硫酸のそれと比肩し得るか、僅かにそれより低い水準にある (Singh [42], Watanabe *et. al.* [49])。過去に報告されたアゾラ収量試験の結果を纏めた第2表により、その点を確認しよう。

無窒素区とアゾラ区の収量差はヘクタール当たり〇・四トンから一・五トンの間に分布している。面白いことに、多くの試験結果は、収量の絶対水準に係わりなく、〇・七〜一・三トンのアゾラによる収量増を記録している。アゾラ区と化学肥料区の収量水準を比較すれば、アゾラ施用の収量増大効果がヘクタール当たり三〇〜八〇キログラムの無機質窒素肥料投入のそれに匹敵するものであることが分る。また同表は、アゾラの水田土壌への鋤き込みが収量に正の効果を持つこと、鋤込回数は多いほど収量増につながることを示唆している。アゾラが水田にある期間が長ければそれだけ多くの窒素が蓄積され、土壌中に鋤き込まれることによって、アゾラが土壌中で分解され、固定された窒素が稲により吸収され易くなるからであろう。

かくて、アゾラの水田緑肥としての生物学的ポテンシャルは明らかである。その空中窒素固定能は高く、緑肥と

第2表 アゾラの稲作収量への効果

試 験 地・試 験 年	稲 (籾) 収 量 (mt/ha)			アゾラによる収量増 (mt/ha)	出 所
	無窒素区	化学肥料区 ¹⁾	ア ゾ ラ 区 ²⁾		
中国：浙江省・1964年	3.7	...	4.4 (無鋤込, 田植時) 4.4 (鋤込1回, 田植時) 4.9 (鋤込2回, 田植時) 5.0 (鋤込3回, 田植時) ... (... , ...)	0.7 0.7 1.2 1.3 0.7	Liu [29]
南部州・1975年 浙江省・1980年	4.7	5.6 (N60)	5.2 (鋤込, 田植時) 5.7 (鋤込, 田植前) 6.0 (鋤込, 田植前及び後)	0.5 1.0 1.3	Liu [29] 利ら [10]
ベトナム：1958～67年平均	2.4	...	2.8 (鋤込, 田植前)	0.4	Dao and Do [22]
インド：オリッサ州 1976年 (カリフ期) 1977年 (ラビ期)	4.9 1.7	5.5 (N40) 2.2 (N20), 3.2 (N40)	5.6 (鋤込, 田植前) 2.6 (鋤込, 田植前)	0.7 0.9	Singh [42]
タイ：1977年	2.6	2.9 (N37.5)	3.5 (鋤込, 田植前)	0.9	Sawatdee <i>et. al.</i> [40]
USA：1968年	1.3	2.8 (N40)	2.8 (鋤込, 田植後)	1.5	Rains and Talley [37]
フィリピン：国際稲研・1979～80年	4.2	5.2 (N77)	5.4 (鋤込, 田植前)	1.2	Watanabe <i>et. al.</i> [52]
アジア4カ国 ³⁾ ：1979～80年平均	2.9	3.5 (N30), 4.0 (N40)	3.6 (無鋤込, 田植前) 3.6 (鋤込, 田植時) 3.5 (鋤込, 田植後) 4.0 (鋤込, 田植前及び後)	0.7 0.7 0.6 1.1	INSFFER [25], [26]

注. 1) () 内の数字は, 化学肥料による ha 当たり窒素施用量.

2) () 内は, アゾラの水田土壌への鋤き込みの有無, 回数, およびアゾラの水田への接種時期.

3) タイ, インド, 中国, ネパールにおける2カ年の試験結果の平均値.

して無機質窒素肥料を完全に、あるいは部分的に代替することが、少なくとも生物学的には、可能である。

- 注(8) *A. ficuloides* (主要分布地、南米南部、北米西部) *A. caroliniana* (北米東部、中米) *A. mexicana* (南米北部、北米西部) *A. microphylla* (熱帯・亜熱帯アメリカ) *A. pinata* (熱帯・亜熱帯アジア、アメリカ海岸部) *A. nilotica* (ナイル上部、スーダン、中央アフリカ) の六種(渡辺[13]、四五六頁)。アゾラの分類については、例えば、Becking [18]、三四六〜三四七頁。

- (9) アゾラは我が国にも分布し、アカウキクサ (*A. imbricata*, 西南暖地に分布) とオオアカウキクサ (*A. japonica*, 中部地区に分布) として知られている。前者は *A. pinata*¹⁾ 後者は *A. ficuloides* に近いが同種のものであろう(渡辺[13]、四五五頁)。藤原ら[5]は静岡県の一篤農家がアカウキクサを緑肥として利用したことを報告しており、また辻村ら[12]も緑肥利用の観点からアゾラを取り上げている。しかし我が国においては、アゾラは一般に水田雑草として取り扱われてきたようである(安部ら[1]、松本ら[6]、沼田・吉沢[7])。

- (10) アゾラハラン藻共生系の空中窒素固定機構については、例えば Moore [9]。

- (11) *A. pinata* の場合。Singh [42]。

- (12) マメ科牧草の空中窒素固定能については、例えば Nutman [34]。

三 農家利用技術としてのアゾラ

——フィリピン・南コタバト州の事例——

既述の様にアゾラはアジアの一部では古くから緑肥として用いられてきた。しかしフィリピンでは、それは稲作農家にとって全く新奇なものである。一九七九年にミンダナオ島南コタバト州の稲作地帯で、フィリピン農業省と国際稲研究所が「アゾラ応用試行研究」という共同研究プロジェクトに着手する以前に、この国の稲作農家でアゾラを利用したことがある者は皆無に近い。⁽¹³⁾

一九七九年にこの共同研究プロジェクトの研究者達は、南コタバト州の水田地帯にバンコク系統の *A. pinata* を導入し、この地域でアゾラの繁殖が極めて良好であることを発見した。アゾラの稲作収量試験展示園がこの水田地帯に幾つか設けられ、収穫日には近在の農民達が改良普及員を通じて展示園に招待され、アゾラの効果が喧伝された。これに参加した農民達によってそれぞれの村に持ち帰られたり、普及員によって配布されたりしつつ、アゾラはこの地域一帯の水田に急速に広まり、一九八一年の第二期作作付時には、その普及面積は四千ヘクタール以上に達した。⁽¹⁴⁾

実際に農家の圃場で用いられたアゾラの緑肥としての能力を知るため、一九八二年七月この地域で簡単な農村調査を実施した。⁽¹⁵⁾ アゾラ導入前後での稲収量・生産投入財の変化等々に関する質問を含んだ質問表を用いつつ、三二戸の稲作農家に面接調査がなされた。⁽¹⁶⁾ 調査地域、調査農家についての幾つかの基本的情報が第3表に纏められている。

調査地域はかつて政府のミンダナオ植民計画の対象地であつて、その計画の下で入植者は五ヘクタールの農場を与えられた。この地域全体で見れば入植者の出身地は、フィリピンの相対的に人口稠密な地域総てが含まれるが、調査対象二村の場合、殆どの農家は一九四〇ないし五〇年代にイロイロ州から移住してきた人々、あるいはその子供の世代である。その結果、調査農家の過半は自作農ないし自小作農であり、その経営規模（平均三・二ヘクタール）も、中部ルソンや南タガログ等の相対的に古くから発展したフィリピンの米どころの稲作農家のそれと較べてかなり大きい。

調査対象村の水田は両村とも灌漑設備を持ち、一年に二作水稲が作付けられる。第一期作は六月から一〇月、第

第3表 南コタバト州の調査地・調査農家の概要

調査農家総数	32戸 (100) ¹⁾	
調査村落：タンタンガン町カブリン村	28 (88)	
バンガ町第9村	4 (12)	
土地保有形態：自作農	13 (41)	
自小作農	5 (16)	
小作農	14 (43)	
経営規模：5 ha 以上	8 (25)	
3 ~ 5 ha	5 (16)	
1 ~ 3 ha	16 (50)	
1 ha 未満	3 (9)	
(平均経営規模)	3.2 ha	
	タンタンガン町	バンガ町
灌漑システム	国家灌漑局(NIA)管理マルベル・システム	マラヤ共同灌漑システム
土壌特性 ²⁾ ：		
土壌タイプ	クレイ・ローム	サンディ・ローム
pH	7.2	5.7
磷酸肥沃度		
有効リン (Olsen P) (mg/土壌 1 kg)	57	41
磷酸吸収係数 (P ₂ O ₅ mg/土壌100 g)	1,175	690

注. 1) () 内の数字は構成比 (%).

2) 土壌標本検査結果.

二期作は一月から翌年四月を標準的作期とする。次章で詳述されるように、調査地の土壌条件はアゾラの生育に好適なものである。ある水田にアゾラが接種されたり、灌漑水流に乗って侵入したりすると、それは急速に繁殖し、五、七日の短期間に一ヘクタールの圃場を覆いつくす。この様に一ヘクタールの水田を覆ったアゾラは一回分で約一〇トンの新鮮重を持ち、これを土壌中に鋤き込むと、アゾラは新たな接種無しに一回目と同様に増殖を始める⁽¹⁷⁾。

(一) 農家アゾラ利用の実際

調査対象二村は南コタバト州のアゾラ利用水田地帯の周辺に位置しており、アゾラの導入は一九八一年初頭で、中

心部に較べて多少遅れた。一部の稲作農家が一九八一年第一期作にアゾラを利用し、同年第二期作には多くの農家がそれに追随した⁽¹⁸⁾(第4表)。南コタバトのアゾラ利用水田地帯の他の村々と同様、調査村にも水田圃場の間に、養魚用あるいは養家鴨用の池が散在し、通年水を絶やさない⁽¹⁹⁾。カブリン村の場合、一農家が先述したアゾラ展示圃から、新鮮重で約三トンのアゾラを自分の池に運び、そこをアゾラ培養地とした。村のアゾラ利用農家はこの池よりアゾラを採り、自分達の池に運んで培養地としたり、あるいは直接彼らの水田に接種した⁽²⁰⁾。全調査農家の八〇%に当たる二七戸が、このようにして一九八一年第二期作にアゾラを利用した。利用農家の平均で、その接種面積は平均経営規模の丁度半分、一・六ヘクタールであった。

水田へのアゾラ接種の主要な方法は投げ込みである。一九八一年第二期作にアゾラを利用した農家(二七戸)の八割(二三戸)がこの方法によりアゾラを水田に接種し、そのうちのさらに八割(二〇戸)は接種回数一回である。投げ込みによるアゾラ接種量は新鮮重で、ヘクタール当たり一〇キログラムから一〇〇キログラムまで区々であるが、投げ込みによる農家の平均で、ヘクタール当たり三八キログラムであった⁽²¹⁾。投げ込みの際の新鮮なアゾラの運搬にはビニール袋やザル、化学肥料の空袋等が利用されている。

二七戸のアゾラ利用農家のうち一戸は、灌漑水流により圃場へ浮流侵入し自生したアゾラを利用しており、他の三戸は、前期作(一九八一年第一期作)以来圃場に残留していたアゾラを利用している。これらの事実、この地域の自然環境がアゾラの生育に極めて好適であることを示している。すなわち、この地域においては、アゾラは栽培上の特殊な手当無しに増殖し、また温度・土壌湿度等の諸条件は、二つの作付期の間の休閑期にも裸地水田の状態下でアゾラの生存を可能にする。

第4表 調査農家（32戸）のアゾラ利用

アゾラ利用農家：	1981年 1 期作	4戸
	1981年 2 期作	27
1981年 2 期作について		
利用農家当りアゾラ接種面積		1.6ha
アゾラ培養地		池（養魚・養家鴨用）
接種方法：	投込	23戸
	前作期より残留	3
	灌漑水流により流入	1
		(27)
接種時期：	耕起前	12戸
	代掻前	3
	田植後	12
		(27)
接種回数：	1 回	20戸
	2 回	1
	3 回	2
		(23)
接種量 ¹⁾ （新鮮重，ha 当り）		38kg
接種に要した労働量 ¹⁾ （ha 当り）		2.8 人時間
水田土壌への鋤込方法		耕起・代掻による
鋤込回数 ²⁾ ：	4 回	4戸
	5 回	3
	6 回	2
	7 回	2
	8 回	2
	9 回	2
		(15)
	(平均鋤込回数)	6 回

注. 1) 投げ込みによってアゾラを接種した農家についての平均.

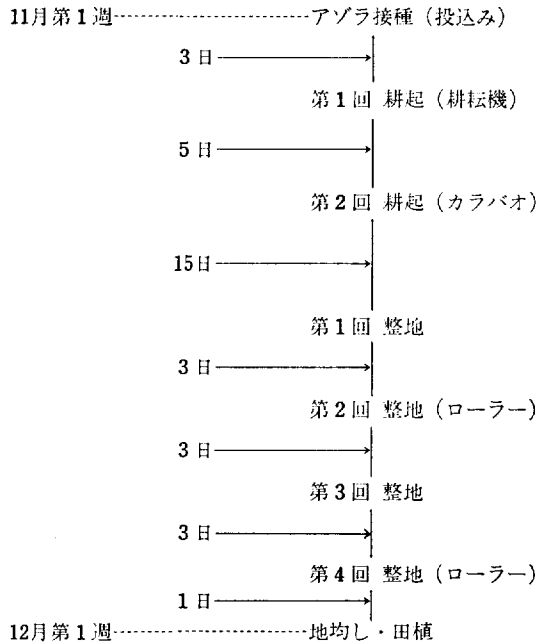
2) アゾラ接種後の耕起・代掻回数・田植え前にアゾラを接種した15戸について.

アゾラを利用するために必要とされる追加労働投入は極めて少ない。投げ込みによってアゾラを接種した農家の平均で、ヘクタール当たり僅か二・八時間である。それ以外の四戸のアゾラ利用農家については、追加労働投入は全く必要とされていない。

アゾラ利用農家二七戸中一五戸は田植え以前にアゾラを水田に接種し、残り一二戸は田植え後に接種した。この水田地帯では回転式（中耕）除草器は用いられておらず、従って田植え後にアゾラを接種した農家の場合、手除草時の足による踏み込みを除いて、アゾラの水田土壌への組織的鋤き込みはなされない。田植え前に接種された場合、土壌への鋤き込みは通常の耕起・整地作業によってなされる。アゾラの導入前後で、稲作のための土地準備の方法に基本的変化は生じていない。しかし、かなりの農家は圃場でアゾラが充分に生育する時間を与えるため、耕起・整地における個々の作業の間隔を意図的に延伸している。

この稲作地帯における通常の耕起・整地作業は以下のようなものである。まず耕起二回、うち初回は耕転機、二回目はカラバオ（水牛）による。次いで約一週間の間隔を置いて、普通のハローを用いて二〜三回の整地、そしてその間にカラバオに引かせる木製のローラーを使って浅い整地を一〜二回行なう。⁽²²⁾最後の浅い整地作業を追って地均しが行なわれ、直ちに田植え作業がつづく。アゾラ導入後もこれら作業の継起に変化は無いが、個々の作業間隔がアゾラの生育状況に応じて数日間ないし数週間延伸された（第一図）。農家は一作業を終わって次の作業に移る際、出来る限り圃場がアゾラで覆われるのを待った。アゾラ接種後の耕起・整地作業をそれぞれ一回の鋤き込みと数えると、田植え前にアゾラを接種した農家一五戸の平均で、六回のアゾラの水田土壌への鋤き込みがなされている（前出第4表）。⁽²³⁾

第1図 アゾラ接種と水田土壌への鋤き込みの標準的方法（南コタバト州，1981年第2期作）



地域の農家はヘクタール当たり約四・五トンの収量を得ている。⁽²⁴⁾

これと対照的に、幾つかの要素の投入水準および費用水準はアゾラ利用の有無によって有意に異なる（第6表）。この差は特にアゾラ鋤込区とアゾラ未利用区を比較した場合に著しい。

最も重要な差は、予期される通り、無機質窒素投入水準と肥料費用水準に現われている。アゾラ鋤込区とアゾラ未利用区の比較で、アゾラ利用農家は平均ヘクタール当たり一八キログラム以上無機質窒素投入量を削減しており、

(二) アゾラ導入と水稻収量・生産要素投入の変化

一九八〇、八一年の四作について、アゾラ利用区・未利用区別に調査農家のヘクタール当たり水稻収量を纏めたものが第5表である。一部の圃場がトウングロ病に侵され低収量を記録したアゾラ未利用区一九八一年二期作を除いて、ヘクタール当たり水稻平均収量は、各作期間、アゾラ利用・未利用区間で、統計的に有意な差を示さない。作期、アゾラ利用の有無に係わらず、通常作期において調査

第5表 調査農家の水稻収量 (1980, 1981年)

	観 察 数	水稻収量 (ha 当たり)		
		収 量 ³⁾ (mt)	標準偏差 (mt)	変動係数 (%)
アゾラ未利用区				
1980年 1 期作	26	4.50 a	1.06	24
2 期作	27	4.29 a	1.23	29
1981年 1 期作	31	4.20 a	1.14	27
2 期作	18	3.47 b	1.16	33
アゾラ利用区				
1981年 1 期作 (鋤込区) ¹⁾	2	5.92 a	1.56	26
2 期作 (無鋤込区) ²⁾	12	4.54 a	1.42	31
2 期作 (鋤込区) ¹⁾	15	4.59 a	1.17	26

注. 1) 耕起・代掻きにより、アゾラが水田土壌に鋤き込まれた水田

2) 田植え後にアゾラが接種され、土壌への主要な鋤き込みを伴わなかった水田.

3) 同一のアルファベットが表示された収量間では、統計的に有意な差無し.

これが肥料費の約一四〇ペソの節約をもたらしている。⁽²⁵⁾ 一九八一年第二期作にアゾラを鋤き込んだ調査農家一五戸のうち二戸は、一部経営地に全く化学肥料を施さず、ヘクタール当たり五・五トンという高収量を得ている。彼らは、南コタバト州のアゾラ利用稲作農家全体の中で、決して例外的な存在ではない。当然のことであるが、化学肥料投入量の減少は、肥料散布に要する労働投入の有意な減少を伴っている。この肥料散布労働投入の減少は、アゾラ利用のため追加的に必要とされる労働投入とほぼ見合っている。

総てのアゾラ利用農家は、アゾラ利用の長所として、無機質窒素の節約に加えて、アゾラに雑草抑制作用があることを報告している。⁽²⁶⁾ その効果はアゾラ鋤込区の除草労働投入および除草剤費用がアゾラ未利用区よりも有意に低いという点に現われている。

以上のアゾラ利用に関連した費用低減は、アゾラ無鋤込区については全く観察されない。水稻収量の面におけると同様、要素投入水準においても、アゾラ無鋤込区はアゾラ

第6表 アゾラ利用と ha 当たり要素投入および費用の変化
(水稻2期作について)¹⁾

		1981年2期作		1980年 2期作	差 ²⁾		
		アゾラ 鋤込区 (1)	アゾラ 無鋤込区 (2)	アゾラ 未利用区 (3)	(1)-(3)	(2)-(3)	(1)-(2)
観察数		15	12	26			
経常財投入：							
N	(kg)	24.0	35.7	42.5	-18.5***	-6.8	-11.7*
P	(kg)	6.6	14.3	11.7	-5.1**	2.6	-7.7*
K	(kg)	3.1	7.8	7.2	-4.1*	0.6	-4.7*
肥料費計	(ペソ)	225	348	362	-137***	-14	-123**
除草剤費	(ペソ)	56	75	81	-25*	-6	-19**
農薬費計	(ペソ)	359	421	390	-31	31	-62
経常財費計 ³⁾	(ペソ)	713	918	887	-174**	31	-205*
資本用役費用計 ⁴⁾	(ペソ)	726	787	727	-1	60	-61
労働投入：							
除草	(人時間)	45	65	78	-33**	-13	-20*
肥料散布	(人時間)	5	5	7	-2*	-2	0
アゾラ接種	(人時間)	3	3	0	3***	3***	0
労働投入計 ⁵⁾	(人時間)	588	613	601	-13	12	-25
労働費用計 ⁵⁾	(ペソ)	1,571	1,616	1,564	7	52	-45

注. 1) 費用は1981年価格で評価されている。市場価格で評価された自給投入財費用を含む。

2) ***, **, * を伴った差は、それぞれ1%, 5%, 10%の有意水準で統計的に有意。

3) 種子、肥料、農薬の和。

4) 水牛、トラクター、脱穀機用役の計。

5) 耕起から脱穀までの総ての作業を含む。

未利用区と平均値において全く有意な差が無い。⁽²⁷⁾
 以上見たように、アゾラ鋤込区とアゾラ未利用区を比較すると、水稻収量水準には差が無く、無機質窒素投入水準には有意な差がある。ところが、アゾラ鋤込区内部の変動を鋤込回数との関連で見ると、この関係が逆転する(第7表)。ヘクタール当たり水稻収量は、鋤込回数が多ければ多い程有意に高く、逆に無機質窒素投入水準は、各鋤込回数階層間で有意に異ならない。これは前掲第2表で見た既

第7表 アゾラの水田土壌への鋤き込みと水稻収量の関係 (1981年2期作)¹⁾

鋤込回数	観 察 数	水稻収量 (mt/ha)	無機質窒素 肥 料 投 入 (kg/ha)	差 ²⁾		
				4～5回	6～7回	8～9回
4～5回	7	3.60 (0.75)	29.3 (17.4)	— —	1.32 t *** —11.3kg	2.40 t *** —8.6kg
6～7回	4	4.92 (0.17)	18.0 (7.3)		—	1.08 t ***
8～9回	4	6.00 (0.39)	20.8 (21.7)		—	2.8kg —
計/平均	15	4.59 (1.17)	24.0 (16.4)			—

注. 1) () 内の数字は標準偏差.

2) 上段水稻収量の級間差(t), 下段窒素肥料投入の級間差(kg). 有意水準については前表に同じ.

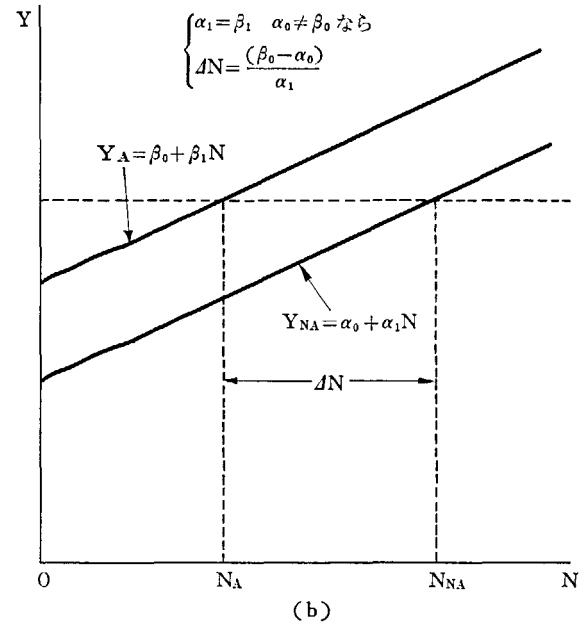
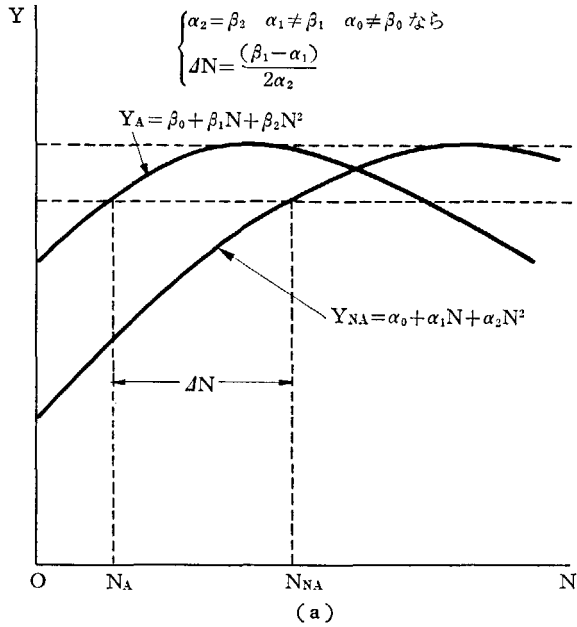
往の収量試験結果と整合的で、アゾラの水田土壌への鋤き込みが、より多くの窒素固定を可能にし、固定された窒素を稲に吸収され易くし、結果として収量増大をもたらす上で不可欠のものであることを示唆している。

(三) 緑肥としてのアゾラの効果——肥料反応関数の推定——

前節における調査資料の分析は、アゾラの利用により、一方で水稻収量を以前と同様の水準に維持しつつ、無機質窒素肥料を削減し得ることを明らかにした。またアゾラの水田土壌への鋤き込みが水稻収量と正の相関を持っていることも示唆された。しかし、これらの結果は、生物学的試験とは異なり、要因がコントロールされていない農家調査資料を用いて得られたものである。農家の収量水準は、無機質窒素あるいはアゾラによって供給された有機質窒素投入水準だけではなく、他の多くの要因に依存している。本節では、肥料反応関数を推定することにより、緑肥としてのアゾラの効果を経験的に確認しよう。

もしアゾラが事実稲に有機質肥料を供給する緑肥であるなら、その効果は第二図のように示されるであろう。図において、YとNはそれ

第2図 アゾラによる有機質窒素供給の肥料反応関数への効果



それヘクタール当たり水稻収量と無機質窒素投入水準である。窒素以外の他の投入要素は一定の水準にコントロールされていると仮定する。図のパネルaは、肥料反応関数の形状として、通常用いられる二次式を仮定している。もしアゾラが一定量の有機質窒素を稲に供給するとすれば、その水田への施用は、アゾラ未利用時の肥料反応関数 (Y_{NA}) を左方にシフトさせるであろう。この左方シフトは、 Y_{NA} の最大値を変更させぬような平行移動であるかもしれない。それはアゾラ利用前と後の肥料反応関数を推定することにより統計的に検定し得る。もし平行移動であれば、無機質肥料を代替した、あるいはそれに追加された有機質肥料の量 (L_N) は推定されたパラメータより容易に算定される。

農家は、最大収量が得られる窒素投入水準よりはるかに低い水準で現実の無機質窒素投入を行なっているかもしれない。もしそうであれば、肥料反応関数は、一次式によって最もよく近似されるかもしれない(パネルb)。この場合にも、二次式の場合と同様にして、アゾラ利用による関数のシフトを統計的に検定し、アゾラによる窒素供給量を推定することが出来る。

肥料反応関数の推定結果は第8表に纏められている。⁽²⁸⁾ 回帰式Iは、 N^2 を除いて他の総ての変数の係数が有意に零と異なっており、アゾラ未利用時の肥料反応関数は線型で、それがアゾラの利用により、関数の形状変化を伴いつつ、左方にシフトしたことを示しているように見える。しかしこの関係は、無機質窒素以外の投入要素を無視したことから生じた見せかけのものである。他の要素投入水準 (C) を考慮すると⁽²⁹⁾ (回帰式II)、 C とアゾラ鋤込回数 (I) を除いて、総ての変数の係数が有意でなくなってしまう。

N について線型の回帰式IIIのあてはめはF統計量を大きく改善する。同一の関数型をアゾラ無鋤込区を除きアゾ

第8表 肥料反応関数の推定¹⁾

	$n = 53^{2)}$			$n = 43^{3)}$
	I	II	III	IV
N	49.1*** (3.01) ⁴⁾	9.32 (0.62)	15.2*** (2.62)	13.0** (2.16)
N ²	0.153 (-0.75)	0.112 (0.17)		
D	676*** (2.03)	195 (0.69)	181 (0.65)	
I	346*** (3.61)	151** (1.77)	122** (1.90)	135** (2.10)
N・I	-30.2*** (-4.05)	-5.47 (-0.72)	-1.33 (-0.57)	-1.06 (-0.46)
N ² ・I	0.563*** (3.90)	0.101 (0.70)		
C		1.03*** (5.21)	1.14*** (7.21)	1.09*** (6.78)
切片	2,738	838	546	773
R ²	0.539	0.712	0.699	0.688
F値	8.96	15.9	21.8	21.0

注. 1) 推定式の一般型は次の通り.

$$Y = \alpha_0 + \gamma_0 D + \gamma_1 I + (\alpha_1 + \gamma_1 I) N + (\alpha_2 + \gamma_2 I) N^2 + \alpha_3 C + u$$

ここで Y=水稻収量 (kg/ha), N=無機質窒素肥料投入 (kg/ha),
C=購入肥料費および地代を除く稲作生産費(支払いおよび帰属)合計
(ペソ/ha), D=アゾラ利用区ダミー, I=アゾラの水田土壌への鋤込回
数, u=攪乱項, α_i および γ_i =推定されるべきパラメータ.

- 2) アゾラ未利用区, アゾラ利用無鋤込区, アゾラ利用鋤込区の総てについ
てのデータをプール.
3) アゾラ未利用区とアゾラ利用鋤込区についてのデータをプール.
4) () 内の数字はt値.

ラ未利用区とアゾラ鋤込区のみをプールしたデータに当てはめてもほぼ同様の結果が得られる(回帰式IV)。これらの推定結果から我々は、アゾラ未利用時の肥料反応関数は線型で良く近似され、アゾラの施用はその左方への平行移動を結果した、という判断を得る。回帰式IIIでアゾラ・ダミーは零と有意に異ならず、鋤き込みを伴わないアゾラの水面散布は有意な水稻増収効果を持たないという、前節の平均値の分析による結論を支持している。

アゾラが、稲に吸収可能な形で供給した有機質窒素量(4N)は、回帰式Ⅲより、ヘクタール当たり総量四八キログラム、あるいは、アゾラの水田土壌への鋤き込み一回につき八キログラムと推定される。⁽³⁰⁾アゾラ鋤込区とアゾラ未利用区の比較で、アゾラ利用農家はヘクタール当たり一八・五キログラムの無機質窒素肥料を節約したのであるが(前出第6表)、彼らは、アゾラ導入以前に投入していた四二・五キログラム全部を節約したとしても、なおかつ以前と同じ、あるいはそれ以上の水準の水稲収量を得ることが出来たと推定されるわけである。アゾラのこの高い窒素固定能を考慮すれば、調査地域の多くの農家が、アゾラのみを用いつつ、ヘクタール当たり五・六トンという高い水稲収量を達成し得たことは異とするにあたらない。

(四) アゾラの経済的収益

前節で得られたデータを用いて、調査地域におけるアゾラ利用の経済的収益を評価してみよう。

二種類の異なった経済的収益の推定値が、第9表に示されている。収益上限値は、アゾラは、肥料反応関数より推定されるように、ヘクタール当たり五〇キログラムの有機質窒素を供給し、同量の購入無機質窒素肥料を代替し得る、また、アゾラ利用に伴い、除草剤、除草労働、肥料散布労働の節減が、前出第6表に報告されている水準でなされる、という仮定に基づいて算出されている。収益下限値は、農家により実際に節減された購入無機質窒素肥料、ヘクタール当たり一九キログラム、のみを、アゾラ利用の収益と仮定している。水田へのアゾラの接種に必要とされる追加的労働投入量、ヘクタール当たり三時間、は両方共通に仮定される。

一九八一年価格で評価し、アゾラ利用の収益推定上限値はヘクタール当たり三七〇ペソ、下限値の場合でも、約

第9表 南コタバト州調査地域におけるアゾラ利用による費用節約
(1シーズン・1ha 当たり)¹⁾

	上 限		下 限	
	量	価 額 (ペソ)	量	価 額 (ペソ)
1. 無機質窒素肥料節約 ²⁾	50kg	275	19kg	105
2. 除草剤節約	—	25		
3. 除草労働節約 ³⁾	33人時間	63		
4. 化学肥料投下労働節約 ³⁾	7人時間	13		
5. アゾラ接種労働追加 ³⁾	3人時間	6	3人時間	6
6. 純収益(純費用節約)		370		99
(1+2)/経常財費用総額 ⁴⁾ (%)		34		12
6/地代を除く生産費総額 ⁵⁾ (%)		12		3
6/産出量価値額 ⁶⁾ (%)		5		2

注. 1) 上限, 下限についての仮定は本文を見よ. 価格は総て, 調査地域における1981年第2期作時のもの.

2) 窒素価格=5.5ペソ/kg N.

3) 賃金率=1.9ペソ/時間.

4) 第6表より, 1980年2期作について.

5) 第6表より, 経常財, 資本用役, 労働の計.

6) 4.5t/ha の水稲収量と 1.53ペソ/kg の米価に基づき算出.

一〇〇ペソの費用節約が保証される。特に注目すべきは、その経常財費用節約への貢献の大きさで、下限値で、アゾラ未利用時の経常財費用総額の一二%、上限値の場合は三四%に達する。すなわち、アゾラの導入は、然らざれば農外に流出した経常財費の一部を、農業部門内に留め、そこで分配すべき所得の増大を結果したわけである。緑肥としてのアゾラの経済的ポテンシャルは、南コタバト州の水田地帯において、遺憾無く発揮されたといえよう。⁽³⁾

注(13) 我々が知る限りで唯一の例外は、パンパンガ州フロリダブランカの篤農ロレンゾ・ホセ氏である。彼は一九七九年以前に *A. pinata* を入手し、アゾラの緑肥利用の可能性・問題点を追及されており、また彼の手から何人かの篤農の手にアゾラが渡されている。因に、このホセ氏は連続植連続収穫方式 (*continuous planting-continuous harvesting system*) と呼ばれる土地利用効率を最大限に高める稲栽培方式を考案

創始した人である。また、ルソン島北部山岳部水田地帯は気温冷涼でアゾラの成育に適していると考えられるが、アジア学院三浦照男氏の觀察によれば、この地域の稲作農家でアゾラを水田に鋤き込んでいる者があるという。但し、積極的にその増殖を試みるということはないとのこと（筆者らとの口頭情報交換による）。

(14) 農業省南コタバト州事務所職員の推定による。

(15) この地域は、一九八一年の一期作、二期作と連続して、激烈なトウングロ病の被害を受け、その結果多くの農家が極めて低い水稻収量（しばしば収量ゼロ）を経験した。このトウングロ病による影響を避けるため、我々の調査は比較的その被害が軽微であった二つの村で実施された。これら二村は南コタバトのアゾラ利用地域の周辺部に位置している。ここで生ずる一つの疑問は、急速なアゾラの普及とトウングロ病の発生に因果関係があるのか、ということであるが、アグロノミストをはじめとして多くの専門家のこれに対する答えは絶て否定的なものであった。

(16) 所与の時間的制約の下では、この地域のアゾラ利用農家の母集団を確定することは不可能であった。農業省地方事務所もその資料は押さえていない。従って正確な意味で標本農家の無作為抽出を行なうことは不可能である。しかし我々の標本は、調査村の農家の誰でも面接可能な者に対し無作為に調査を実施した、という意味で無作為抽出に従っている。

(17) 国際稲研究所南コタバト駐在研究員、同地改良普及員の觀察測定による。なお、注(23)、(30)を参照のこと。

(18) カブリン村の場合、一九八一年第二期作で、村内全農家（二〇〇戸弱）の四三％が、その水田の全部あるいは一部に、意識のないし無意識的（隣接圃場あるいは灌漑水路からの侵入による）にアゾラを利用した。

(19) この、水田の間に農家の建物と、アゾラを満々と湛えた養魚池が散在する光景が、王禎『農書』にある「傍泊魚叔、肥漬落華」という江南の敍景と近似性を感じさせるのである。

(20) この農家がアゾラ展示圃からアゾラを得るのも、村の農家が彼のアゾラ培養地からアゾラを採取するのも無料で、いかなる意味でも支払いはなされていない。すなわちこの地域ではアゾラは、その運搬を別にして、完全な自由財であった。

(21) このアゾラ接種量は、各国のアゾラ利用地域における勧告接種量水準に比し著しく少ない。水田ヘクター当たり勧告接種量はベトナム二・五トトン（Tuan and Thuyet [48]、四〇一頁）、インド二・四トトン（CRRI [21]、一頁）、中国三・七五トトン以上（蘇北農學院 [11]、一二四頁）という水準にある。

(22) この木製のローラーはイロンゴでバゴン（*pagdong*）と呼ばれるが、『齊民要術』稲作の条で「用陸軸施十遍」とあ

る陸軸、また王禎『農書』の農器図譜集之二に図解されている「礮磗」の類と全く同一物である。この種のローラーが整地作業に用いられるのは、フィリピンの主要稲作地帯である中部ルソン、南タガログにおいては、極めて稀で、我々の知る限りイロイロ州周辺、およびそこからの入植者の多い南コタバト州の稲作地帯に限られる。

- (23) 調査農家の多くは、耕起・整地作業の過程で、完全に圃場を覆いつくしているアゾラを何度も土壌に鋤き込んだと報告しているが、それぞれの鋤込時にアゾラがどの程度の厚さで圃場を覆っていたかを、面接調査を通して確定することは不可能であった。従って、土壌中に鋤き込まれたアゾラの総新鮮重ないし乾物重を知ることが出来ない。本節後段において議論される肥料反応関数の推定結果から得られる、アゾラによる窒素固定量推定値から判断すると、平均的にいって、ヘクタール当たり新鮮重約二五トンのアゾラが土壌中に鋤き込まれたと考えられる。なお注(30)を参照されたい。

- (24) このヘクタール当たり平均四・五トンという水稻収量水準は、フィリピンの代表的稲作地帯である中部ルソンや南タガログの灌漑条件の良い地域の水準に比肩するものである。特にこの収量水準が、これらの地域と較べて三〇〜四〇%低い無機質窒素投入水準の下で実現されている(第6表)という事実は、南コタバト州水田地帯の土地肥沃度の高さを示唆している。

- (25) フィリピンの稲作地帯で通常流通している化学肥料は、窒素質肥料の場合硫酸、尿素といった単肥があるが、磷酸・加里肥料の場合、単肥は少なく、14—14—14、12—12—12、16—26—0といった三要素含有率を持つ複合肥料が用いられている。特に14—14—14が尿素、硫酸と併用されることが最も多い。第6表で、アゾラ鋤込区とアゾラ未利用区とを比較すると、磷酸・加里も前者の方が少なくなっているが、これは窒素肥料を調節する際、単肥だけでなく複合肥料の施用量も減少せられたことによる。また、この地域では15—15—30—2という含有率(最後の項は亜鉛である)を持つ液体肥料が用いられているが、その普及はまだ一部の農家に限られている。

- (26) アゾラの雑草抑制作用は、それが水田圃場の灌漑水面をビッシリと覆いつくすところから生ずる。調査農家が、アゾラによって抑制されたと報告した主要な水田雑草は以下の通り。Gabi-gabi (*Monochoria vaginalis*), Sorghum-sorghum (*Echinochloa crusgalli*), Sirao-sirao (*Prinbristylis littoralis*), Apat-apat (*Marsilea crenata*), Palay-palay (*Echinochloa species*)。アゾラの雑草抑制効果は多くの研究に報告されている(Rains and Talley [55], Bremer [61], Nguyen [63], Ngo [32])。

(27) 要素投入水準における有意な差として確認され得る変化以外に、アゾラ利用に関連した変化ではあるが、平均として生産費用水準の差に現われない幾つかの変化が一部のアゾラ利用農家によって報告されている。第一に、短い苗を仕立てる乾式苗代法 (*drylog*)、あるいは直播方式をとる場合、アゾラが圃場平面をマットの様に覆い、苗あるいは種子がその下になってしまい、成長が阻害される、ということがある。これを避けるため、一部の農家は苗仕立法を乾式から従来の湿式 (*puñla*) に戻した。苗仕立に要する労働量は湿式の方がはるかに多いが、この変化は、同じ時期に、この問題を知らずに湿式から乾式に変更した農家があったため、相殺された (苗代準備、苗抜き、田植えに要した労働時間は、アゾラ鋤込区とアゾラ未利用区で有意な差が無い)。

第二に、一部の農家は苗栽植間隔を従来の $18 \times 15 \text{ cm}$ から $25 \times 25 \text{ cm}$ に変更した。より広い栽植間隔は、より多くの日照が水面に到達するので、アゾラの生長にとって望ましい (渡辺 [13])。しかし、この変化が、どれだけ現実にアゾラの生育に影響したか、調査資料からは不明である。

この地域の田植えは正条植 (並木植) で、これは水田に木・竹製の熊手状の用具で条をつけて行なわれる。アゾラがマットの様に圃場表面を覆うため、この条が見えず田植えに難渋するという (小さな) 不満も、利用農家によってしばしば挙げられるものである。その他にはアゾラ導入に伴う稲作農法上の変化は報告されていない。

(28) 推定は通常の最小自乗法による。推定に当たって、トウングロ病の被害を受けて収量が、他と較べて著しく低い圃場のデータは除外した。N以外の肥料養分、すなわち、P・K・Zn、およびこれらとD、Iとの交差項、例えばP・I、K・Dは、総て、総ての回帰式において、有意なパラメーターを与えず、どの回帰式からもオミットされている。

(29) 肥料以外の費用 (C) を労働、資本、肥料以外の経常財の三つに分けても、回帰分析の結果は同様である。

(30) アゾラによる窒素固定量は、 $(y/a) \times 6$ で求められる。ここで、零と有意差のないアゾラ・ダミーの係数は無視されている。また、アゾラ鋤込回数は平均六回である (第4表)。

かく肥料反応関数から推定されたアゾラによる窒素固定量は、渡辺 (未発表) による温室実験の結果と符合している。実験において、南コタバト州の水田地帯 (コナダール町マグサイサイ村) より採取された土壌に、 1.95 g/m^2 の事で接種されたアゾラは、二八日間で $500 \sim 870 \text{ g/m}^2$ に増殖した。これより、アゾラの生体重増日数は $26 \sim 298 \text{ g}$ と計算される。我々の調査データは、調査地域において、平均接種量 40 kg/ha のアゾラが、三〇日間に、 $25 \sim 30 \text{ ml/ha}$ に増殖

したことを示している。ここで、アゾラ新鮮重 $25\sim30\text{mt/ha}$ は、アゾラ新鮮重 100g 当たり 0.2g の窒素含有量（調査地域で採取されたアゾラの無機栄養含有量分析の結果による）を仮定し、 50kg/ha （回帰式Ⅲより） $\sim 60\text{kg/ha}$ （回帰式Ⅳより）の窒素固定量から逆算されたものである。これらの数値より、調査地域のアゾラ生体重増日数は $3.23\sim 3.24$ と計算される。この推定値は、実験により得られた倍増日数の極めて狭い範囲内にある。

(31) もし仮に、アゾラがフィリピン国内の総ての灌漑された水田（約一五〇万ヘクタール、Palaeopac (35)）に導入可能であるとすると、経済的収益総額は、この収益推定下限を仮定して、一作当たり約一億五千万ペソ、年二作可能とすれば三億ペソに達する。これは注（3）で紹介したフィリピン政府の一年当たり肥料補助金支出額とほぼ等しいが、それを上回るものである。このことから、アゾラ利用の経済的ポテンシャルの大きさが知られよう。これはまた逆に、フィリピン政府にとっての肥料補助金支出の負担の程度を表わしている。国際稲研究所が本格的なアゾラ研究に着手し、そのことがフィリピン政府当局者に知られて以来、マルコス大統領は毎朝執務室に現われるヤタンコ農業大臣を呼び、アゾラ研究の進捗状況を質すことをもって日課とした、という逸話はこの間の事情を物語っている。

四 制約的環境下でのアゾラ利用

南コタバト州のアゾラ利用農家の事例分析は、水田緑肥としてのアゾラの生物学的ポテンシャルが、現実には稲作農家に利用され、正の収益をもたらす経済的技術として実現され得るものであることを明らかにした。そこでは、アゾラは殆ど追加的投入無しに活発に生育し、高率で空中窒素を固定する。かかる条件下で、アゾラ利用が正の経済的収益を持つことは自明のことで、特に経済的分析を行なうまでもない。

もし、アゾラがフィリピンや他の途上諸国の稲作地帯に、南コタバトにおけると同様の容易さで導入され得るなら、それによる経済的収益の総額は膨大なものであらう。しかし、アゾラは多くの制約要因下で生育するものであ

り、多くの地域において、その導入は、南コタバト州におけるようには容易ではない。本章では、アゾラの生育を制約する自然的・社会的環境要因について検討し、より一般的条件下におけるアゾラ利用の経済的評価を試みよう。

(一) アゾラ生育の制約要因

水田およびその他培地におけるアゾラの生育を規定する主要な自然的・社会的要因が第10表に纏められている。以下、一つずつ順を追って検討していくが、これら諸要因は、単独で作用するだけでなく、複雑な相互関係を持ちつつ、アゾラの生育に影響を与えるという点に留意しておく必要がある。⁽³²⁾

気温 Peters *et. al.* [36] は、アゾラを一定の温度下で生育させる時、*A. filiculoides* を除いて、約三〇度（摂氏、以下同様）が最適気温であると報告している。*A. filiculoides* の場合は二五度前後が最適気温となる。

A. pinata は、圃場条件下⁽³³⁾、一四～四〇度で生育可能である（Singh [42]）。最適気温は、他の環境条件に依存するが、大体一六～三〇度の範囲にある。この最適気温の範囲外では、アゾラの成長は遅滞し、その窒素固定活動は低減する。一〇度以下、あるいは四〇度以上という温度条件の下では、アゾラは容易に死滅する。

A. pinata は広く熱帯にも分布しているが、比較的冷涼な温度を好む。ベトナム北部では、その生育は、平均気温一七度を記録する一月に最も活発である。インドのバラナシでは、七月から十二月にかけて生育するが、最も暑い四～六月の夏期には池から消滅してしまう（Gopal [24]）。南部中国においては、その成長は二～五月期に最も活発である。Watanabe *et. al.* [51] は、フィリピンにおけるその生育は、月平均気温が三二度を越える四月、五月に最低であると報告している。アゾラのこの特性は、熱帯におけるその利用と栄養繁殖体の周年維持管理にと

第 10 表 アブラ生育に対する自然的・社会的制約要因¹⁾

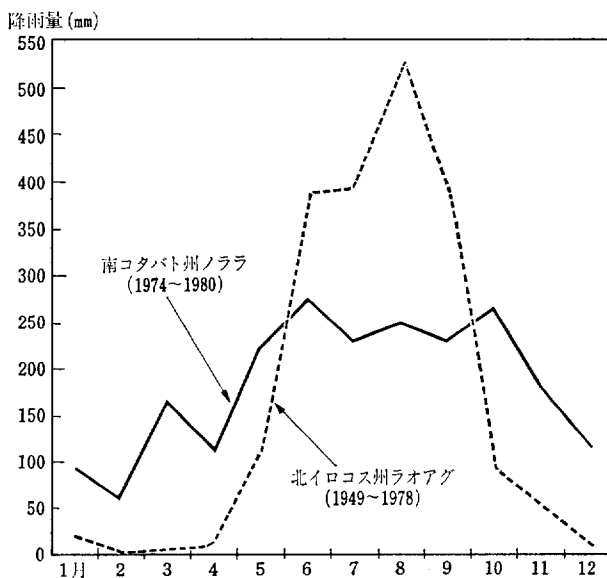
	最 適 水 準	出 所
1. 気 温		
インド	24~35°C (日)/17~28°C (夜)	CRRI [21]
中国	10~35°C (25°C 最適)	蘇北農学院 [11]
ベトナム	16~17°C (最適); 15~38°C (20°C 最適)	Becking [18]; Tuan and Thuyet [48]
フィリピン	23~30°C (27°C 最適)	Watanabe <i>et. al.</i> [52]
2. 日照量	熱帯乾期日照量 (100klx 以上) の50%; 20~50klx (最適)	Watanabe [50]; 北京農業大学 [8]
3. 水分条件	相対湿度60%以上 (85~90%最適)	蘇北農学院 [11]
4. 土壌 pH	pH 4.5~7.5; pH 6~8; pH 6.5~7.5 (最適)	Tuan and Thuyet [48]; CRRI [21]; 北京農業大学 [8]
5. 土壌磷酸肥沃度		
有効リン (Olsen P)	土壌 1 kg 当り 50mg 以上	渡辺 (未発表)
磷酸吸収係数	土壌 100 g 当り 1,000mg P ₂ O ₅ 以下	渡辺 (未発表)
6. 水管理	田面水深 3~5 cm, 高温時 1 cm	渡辺 [13]
7. 病虫害	—	
8. 必要労働投入	...	

注: 1) データは主として *A. pinnata* に関するものである。

つて問題となる⁽³⁾。

日照量 日照量がアブラの生育に与える影響については多くの異見があり、研究者の間で一致をみていないが、あまりに強い日照はアブラの生育にマイナスに作用するようである (Becking [18], Ashton [15])。北京農業大

第3図 降雨量月別パターン（フィリピン
南コタバト州および北イロコス州）



資料：国際稲研究所多毛作部より。

学〔8〕は、日照量が八万燭光を越えるとアゾラの生育が抑制されるとしている。

水分条件

アゾラは水性植物であるから、当然高い相対湿度を要求する。これはアゾラの生体繁殖体の周年維持管理にとって問題となる場合がある。南コタバト州のアゾラ利用地帯の場合、一年に月間降雨量が五〇ミリ以下になる月はない（第三図）。農家は一年を通

して養魚池等でアゾラを繁殖させることが出来、また、アゾラは水田圃場で一〜三カ月に渡る休閑乾燥期を越えて生存可能である。しかし、年間五カ月連続して降雨量が殆どゼロという北部ルソン地域のように、年間降雨量の月別分布に大きな偏りがあるところでは、乾期中のアゾラの生体維持に困難を生じる可能性が強い。

土壌 pH Singh〔41〕は、土壌 pH が五・

五から七の間にある時、アゾラの生育が活発であると報告している。Ashton and Walmsley〔16〕の研究では、アゾラは pH が一〇でも生長したという。pH が三・三・五といった酸性土壌ではアゾラは生育出来ずに死滅する (Singh

[42])。

土壤磷酸肥沃度

水性環境にあつて、アゾラは浮遊しつつ主として水から栄養を摂取する。水深がごく浅い場合には根が土に接し、そこから養分を取る。アゾラの無機成分含量は過剰吸収等により大きく変動するが、欠乏しない水準で、ほぼ次の様な乾物量百分比を持つ。 $N:4\sim5$, $P:0.5$, $K:1\sim2$, $Ca:0.5$, $Mg:0.5$, $Fe:0.1$ (渡辺 [13])。

土壌ないし田水の磷酸含量は、通常アゾラの要求量を満たさない。土壤磷酸の状態が、有効リンと磷酸吸収係数の両方とも最適範囲外にある場合、アゾラの良好な生育を支えるため、磷酸肥料を与える必要がある (Watanabe *et. al.* [15])。この点においても南コタバトの土壤条件はアゾラの生育に適している (前出第3表参照)。⁽³⁵⁾

水管理

田面水の深さは三、五センチメートルぐらいに保つ必要がある。アゾラに栄養欠乏が生じた時には、水深を三センチメートル以下にし、根が土壌から養分を吸収出来るようにする。アゾラの土壌への鋤き込み時には数日前に水を落としておくと、鋤き込みが容易となる。

病虫害

アゾラにとって虫害は深刻なものになり得る。高温時は昆虫の世代期間が短くなるので、特に気温三〇度を越す夏期に虫害はより深刻である。最も被害の大きい害虫は鱗翅類の *Pyralis*, *Nymphula* 属である (蘇北農学院 [11], Thuyet and Tuan [47])。夏期高温時には糸状菌による被害も出る (Sasi *et. al.* [36])。病虫害発生時あるいはそれ以前に薬剤防除を行なう必要がある。この点においてもまた南コタバトの条件は理想的なものであった。一九八一年第二期作まで、調査地ではアゾラの病虫害は発生せず、そのための薬剤散布は全く必要とされなかった。

必要労働量

アゾラの生体維持管理および水田への接種に要する追加的労働必要量についてのデータは極めて乏しい。我々の知る限り、前者については皆無、後者については前章で報告された南コタバト州の農家調査の結果があるだけである。

必要労働量は、アゾラを生育させる環境条件、増殖方法、運搬に用いられる用具等に大きく依存するであろう。

しかし、アゾラは水生植物であり、その接種用生体は新鮮であることを要するから、接種必要量次第ではかなりの労働量を要する可能性がある。各国で勧告されているヘクター当たり標準接種量は二・五トン（前節注(21)）で、南コタバトの例と較べて比較を絶した水準にある。中国やベトナムでは、水田を小区画に区切って徐々にアゾラの増殖を図る半飽和法とでもいべき方法が勧められているが（蘇北農學院〔11〕）、これは、風害対策であると共に省力化を目的としているよう⁽³⁶⁾。用いられる環境条件によっては、必要労働量の水準は、アゾラ利用に対する強い制約として作用するであろう。

(二) 制約条件下でのアゾラの経済的収益

緑肥としてのアゾラのポテンシャルは大きい、しかし、農家によるその現実的利用を制約している要因も数多い。前節で挙げた八項目の制約要因は、程度の多少によって境界は動くが、コントロールの可能性によって三つのグループに大別し得るであろう。まず第一は、通常の条件下では人為的コントロールが不可能なもので、気温、日照量、降雨量等の自然環境的制約要因がそれである。水管理や土壌酸性度の様な第二のグループの制約要因は、人為的に克服可能であるが、そのためには灌漑開発事業、土質改善事業等、個々の農家経営の枠を越えた公共的対応が必要

とされるかもしれない。制約要因の第三のグループは、農家経営の枠内でコントロール可能なもので、土壌養分の欠乏、病虫害、労働投入といった要因がこれに含まれよう。

アゾラ利用の経済的収益は、どの制約要因が作用しているかに依存し、地域によって大きく異なるであろう。従って、これら地域的に大きく異なる制約要因を特定化することなしに一般的な条件下でのアゾラの経済的収益を評価することは不可能である。ここでは、農業経営の枠内でアゾラを生育させることが可能である、という仮定の下でアゾラ利用の経済的収益の評価を試みよう。この仮定は、第一、第二グループに属する要因は満足されており、制約要因として作用していないと想定していることを意味している。それに加えて、農家にとってアゾラが既に利用可能であり、自らの培養・接種のために用い得る、という状況を仮定する。これは、アゾラ開発に要した試験研究費、農家利用のためのその大量増殖および利用地域への配布等に要した費用を総て無視する、ということの意味する。かかる限定的仮定の下でなされるアゾラの経済的収益の評価は、一つの例証としての域を大きく出るものではないと得ない。しかし、この試みから、アゾラを経済的に利用可能な技術となすに当たって障害となり得る幾つかの要因についての示唆が得られるであろう。

経済的収益を推定するに当たって、まずアゾラを生育させるのに必要とされる投入要素の水準と、それら要素の価格を決定しておかねばならない。農家によりコントロール可能とされた三つの要因について見ていこう。

磷酸肥料

アゾラ生育のために磷酸肥料が必要とされることは広く認められている。第11表は幾つかの国における、アゾラのための磷酸肥料施用勧告水準を纏めたものである。勧告水準はヘクタール当たり四〜二五キログラムという大きな範囲の中にある。また、これら勧告水準の幾つかは、現実のアゾラ利用農家を対象としたものでは

第11表 各国において勧められているアゾラ生育のための
 磷酸肥料および農薬の施用水準

	施 用 水 準	出 所
磷酸肥料		
インド	4~25 P ₂ O ₅ kg/ha	Singh [42]
中国	7~12	蘇北農学院 [11]
ベトナム	5~10	Tuan and Thuyet [48]
USA	5~15	Rains and Talley [37]
フィリピン (国際稲研)	7.5	Watanabe <i>et. al.</i> [51]
農薬 (Carbofuran)		
インド	2~3 kg a.i./ha あるいは 0.1~1g/接種用アゾラ1kg	CRRI [21]
中国	4~5 kg/ha	Liu [29]
フィリピン (国際稲研)	3~4 kg a.i./ha	渡辺 [13]

なく、実験を行なう科学者を対象としたものである。

幸い、Watanabe *et. al.* [51] は磷酸肥料がアゾラの生長に及ぼす影響を詳細に研究している。それによると、磷酸肥料の施用水準 (P) とアゾラによって固定された窒素量 (N) との間には、明瞭な二次式的関係が認められる。そこに報告されているデータを利用して回帰分析を行なえば次式を得る。

$$N = 14.3 + 1.82P - 0.0389P^2$$

$$(7.28) \quad (-5.14)$$

$$R^2 = 0.930, \quad n = 9$$

ここで、NとP (但しPはP₂O₅) の単位はヘクタール当たりキログラム、カッコ内の数字はt値である。自由度は小さいが、曲線のフィットは良く、係数の有意水準も充分高い。切片は一四・三キログラムと推定され、磷酸肥料を加えない場合に、アゾラが固定し得るヘクタール当たり窒素量を示している。この切片は、土壌中の磷酸状態により上下するであろう。本節の分析では、右式を仮定することにした。

さて、価格体系として一九八〇年国際市場価格と一九八一年フィリピン農家庭先価格の二つを仮定してみよう。⁽³⁷⁾すると右式より、

Pの最適投入水準は、国際市場価格体系下ではヘクタール当たり一二キログラム、フィリピン価格体系の下では同五キログラムと算出される⁽³⁸⁾。

農業（病虫害管理）

アゾラの病虫害は農業散布によりコントロールし得る。農業散布量、その頻度等は、病虫害の発生とその程度に依存し、一概に最適量を決定することは出来ない。これも必ずしも農家を対象とするものではないが、科学者が勧めるアゾラのための標準農業散布率の幾つかが第11表に示されている。これを参考にしつつ、ここでは二つのケースを想定しよう。ケースⅠでは、接種用アゾラ一キログラムにつき一グラムの率でカーボフュランを混ぜ合わせるることによって、アゾラの病虫害をコントロール出来る、と仮定する。ヘクタール当たりアゾラ接種量を二トンと仮定すると、ヘクタール当たりカーボフュラン必要量は製品重 (Furadan 3G) で二キログラム、成分量換算 (P.G.) で六〇グラムである。ケースⅡは、アゾラの病虫害をコントロールするためにはヘクタール当たり成分量二キログラムのカーボフュランを散布することが必要である、と仮定する。

労働投入

既述の様にアゾラ利用に伴って生じる追加的労働投入量についての情報は極めて貧困である。また、それは地地的条件や接種量の多少、運搬方法の差異等に依存して変化するであろう。ここでは、アゾラの生産と利用に要する労働量を、ヘクタール当たり五人日であると仮定する。この必要労働量は、アゾラ接種量をヘクタール当たり二トンとし、南コタバト州調査より得られたデータを単純に適用して導出されたものである⁽³⁹⁾。

追加的労働投入はその機会費用によって評価さるべきであるが、それは地域によって大きく異なり、また同一地域内でも農閑期と農繁期とは異なる。もしアゾラが就業機会が不足している地域に導入される場合、あるいはアゾラのための必要労働が、労働力が遊休している農閑期に生じる場合には、追加的労働量がたとえ大きくても、そ

の費用は無視し得る程小さいかもしれない。正確な労働の機会費用を得ることは容易なことではないが、ここでは二つの異なった水準を仮定し、その効果を検討しよう。第一は労働の機会費用が低いケースで、インドの農業賃金率でそれが測れると仮定する（ケースⅢ）。第二は労働の機会費用が高いケースで、台湾の農業賃金率を仮定する（ケースⅣ）。一九八一年フィリピン価格体系については、その平均農業賃金率を仮定しよう。

以上の準備の下で、二つの価格体系について推定されたアゾラの経済的収益は第12表に纏められている。

まず、アゾラ生育のために必要とされる磷酸肥料投入は、それ自体としてはアゾラ導入の大きな障害とはならないであろう。前節で仮定されたアゾラ固定窒素量に対する磷酸肥料反応関数の下で、純窒素肥料節約（第三行目）は、どちらの価格体系についても、ヘクタール当たり約一〇USドルに達する。これらの推定値は、南コタバト州におけるアゾラの経済的収益下限推定値とほぼ同じ水準にある。

アゾラに対する病虫害の存在は、アゾラの導入に対する深刻な障害となる可能性が大きい。もし、農業の低率散布（ケースⅠ）でアゾラの病虫害を防除出来るなら、ヘクタール当たり七ドル前後の純収益が残される（第五行目）。しかし常に防除に高率散布（ケースⅡ）が必要とされるならば、それがアゾラの経済的収益性に与える影響は壊滅的で、巨大な損失となる（第七行目）。窒素肥料節約によってもたらされた純収益をもって購入し得るカーボフュランの量は、国際市場価格体系の下で僅か成分量二六三グラム（製品重 Furadan 3G で九キログラム）にすぎない（第八行目）。それ以上の農業利用は経済的損失をもたらす⁽⁴⁰⁾。

以上の結果は、アゾラの病虫害のより有効な防除法確立の重要性を示唆している。農業価格の大幅な低下ということも含めて、より有効な防除法の確立なしには、病虫害の多発が予想される熱帯稲作地域において、アゾラは決

第12表 より一般的な条件の下での水稲作緑肥としてのアゾラ利用の経済的収益

	1980年国際市場価格 ¹⁾			1981年フィリピン価格 ²⁾		
	ha 当たり 投 入 量	単 価 (USドル)	ha 当たり 価 額 (USドル)	ha 当たり 投 入 量	単 価 (USドル)	ha 当たり 価 額 (USドル)
1. 窒素 (N) 肥料節約 ³⁾	30kg	0.50/kg	15.00	22kg	0.64/kg	14.08
2. アゾラへの磷酸 (P_2O_5) 肥料投入 ⁴⁾	12kg	0.42/kg	5.28	5kg	0.89/kg	4.45
3. 純収益 (1-2) (A)			9.72			9.63
4. アゾラへの農業投入: ケース I = 低率散布 ⁵⁾	60g a.i.	37/kg a.i.	2.22	60g a.i.	46/kg a.i.	2.76
5. 純収益 (3-4)			7.50			6.82
6. アゾラへの農業投入: ケース II = 高率散布 ⁶⁾	2 kg a.i.	37/kg a.i.	74.00	2 kg a.i.	46/kg a.i.	92.00
7. 純収益 (3-6)			-64.28			-83.67
8. 農業投入可能上限 ⁷⁾	263 g a.i.			209 g a.i.		
9. アゾラへの労働投入: ケース III = 低賃金 ⁸⁾	5 人日	0.63/人日	3.15	5 人日	1.87/人日 ¹¹⁾	9.35
10. 純収益 (3-9)			6.57			0.28
11. アゾラへの労働投入: ケース IV = 高賃金 ⁹⁾	5 人日	14.58/人日	72.90			
12. 純収益 (3-11)			-63.18			
13. 賃金率可能上限 ¹⁰⁾		1.94/人日			1.93/人日	

注. 1) 賃金を除いて, アジアに最も近い積出港における F. O. B. 価格. データは肥料価格については Palacpac [35], 農業は国際稲研持田氏より.

2) 農家支払価格, データの出所は上に同じ.

3) 最適磷酸肥料投入によりアゾラより得られる窒素量, 尿素価格により評価.

4) Nと P_2O_5 の所与の相対価格の下での最適磷酸投入, 過磷酸石灰価格で評価.

5) 60 g a.i. (製品 2 kg) のカーボフュランを 1 ha へ接種するアゾラ 2 トンに混ぜることで, アゾラの病虫害をコントロール可能と仮定.

6) アゾラの病虫害をコントロールするのに, ha 当たり 2 kg a.i. (製品 67kg) のカーボフュランの散布が必要と仮定.

7) 純収益 (A)/カーボフュランの価格.

8) インドにおける農業賃金率を仮定. データは Palacpac [35].

9) 台湾における農業賃金率を仮定. データ同上.

10) 純収益 (A)/5 人日.

11) フィリピンの農業賃金率. データは Palacpac [35].

して経済的に利用可能な技術にはなり得ないであろう。⁽⁴⁾

アゾラを水田緑肥として経済的に利用可能な技術となすためには、収益の絶対的な水準が確保されるだけでなく、相対的な安定性をも実現しなければならない。生物学的な窒素固定機構に依存する以上、アゾラの利用が自然環境的要因の影響を受けることは避け難いが、その影響を一定の枠内に押え得なければ、連年継続的に利用し得る安定的な技術にはなり得ない。⁽⁴²⁾ この面からも有効なアゾラの病虫害防除法確立は不可欠である。

第12表の三、五、七行目の推定値は、労働の機会費用がゼロという仮定の下でのアゾラの経済的収益を表わすものと理解し得る。労働の機会費用が正であっても、その水準がインドの農業賃金率で測られるような低いものであるれば(ケースⅢ)、アゾラの経済的収益はそれ程大きな削減は受けない(国際市場価格体系第一〇行目)。しかし、もし機会費用が台湾の農業賃金率で測られるような高い水準にあるとすると(ケースⅣ)、アゾラ導入の経済的誘因は全く失われるであろう(国際市場価格第一二行目)。かかる経済的環境下では農家によるアゾラ利用はあり得ない。

ヘクタール当たり五人日のアゾラのための労働必要量を仮定し、農業の場合と同様にして賃金率可能上限を求めると、一人日当たり約二USドルとなる(第一三行目)。労働の機会費用がこれ以上であれば、窒素節約により得られる純収益が失われてしまう。フィリピンの農業賃金率はこの賃金率可能上限に近づいている。見方を変えて、労働の機会費用がインドの農業賃金率で測られる低い水準にある場合、純窒素節約額の範囲内でアゾラのために用いる労働日数上限を求めれば、ヘクタール当たり一人日となる。アゾラのための必要労働投入がこれ以内であれば、アゾラの利用は正の収益をもたらし、農家にとってそれを導入する誘因が存在することになる。逆に、機会

費用が台湾の農業貸金率並みに高ければ、労働日数上限は僅か〇・七人日である。

労働に関してなされた以上の推定は例証の域を出るものではないが、これらの結果からアゾラの利用可能性について幾つかの示唆が得られよう。まず、アゾラは、インド、バングラデシュ、インドネシアのように農業貸金率が相対的に低く、農村における雇用拡大が強く必要とされている諸国において、大きな経済的ポテンシャルを持ち得るのである。反対に、台湾や韓国のように農業貸金率が既に高く、かつそれが上昇しつつある諸国においては、アゾラが経済的技術として受容される余地が極めて乏しいことも、また明白である。

フィリピンのように、農村における貸金率が貸金率可能上限に近い水準にある諸国・水田地帯の場合、アゾラ利用の経済性評価は微妙なものとなる。かかる地域において正確な経済的評価をなすためには、正確な労働の社会的機会費用を確定することが必須である。また、かかる状況下ではアゾラ利用の社会的収益と農家の私的収益に乖離が生ずる可能性があることにも留意する必要がある。唯一つ言えることは、アゾラをかかる地域にも導入可能な技術とするためには、遊休している農閑期の労働力を活用し得るようなものとしてアゾラ技術を設計することが基本的に重要となるということである。

以上で、より一般的環境の下でのアゾラ利用の経済的評価を終える。言うまでもなく、本節でなされたアゾラの経済的収益の推定は、一定の価格体系の下でなされたものであり、価格体系が変化すればこれら推定値も調整されねばならない。将来窒素肥料の価格が他の価格に対して相対的に騰貴すれば、アゾラの経済的収益は増大し、その利用可能性が拡大されるであろう。逆は逆である。

(注32) 自然的環境要因が、相互関係を持ちつつ、アゾラの生育に影響を与える点については、例えば、Tuan and Thuyet

[48]、刘ら[4]等。

(33) 例えば、日照量が多ければ、最適温度は高くなる (Talley and Rains [46]、Ahmed [14])。

(34) 南部中国におけるアゾラ利用上の問題点の一つは、栄養繁殖体をどう越冬させるかということ、どう越冬させるかということがある。例えば蘇北農学院[11]。またその水田緑肥としての利用は早稲において最も著しい。

(35) また、注(25)、(28)も参照されたい。

(36) アゾラは浮遊水草であるから、強い風が吹くと圃場の片隅に吹き寄せられてしまい、田面全体での均一な生育が防げられ、結果として窒素の偏在という問題を生じる。

(37) 価格については第12表とその注を参照のこと。

(38) P の最適投入水準の導出は $(\partial N/\partial P) = P_p/P_n$ による。但しここで P_p と P_n はそれぞれ P と N の価格である。

(39) 第4表より一人一日(八時間)当たりのアゾラ運搬量は約一〇〇キログラム。半飽和法等で接種量の半量一トンを運ぶとして一〇人日の労働投入増。第6表よりアゾラによる労働節約ヘクタール当たり約五人日。これらよりアゾラ導入による純労働投入増ヘクタール当たり五人日。

(40) 第12表で、現実にはアゾラを緑肥として利用している中国における勧告農薬散布水準が、ヘクタール当たりカーボフュロン四〜五キログラムである点に注意を喚起したい。これは成分量一二〇〜一五〇グラムであり、第12表で示された損益分岐農薬量以下である。

(41) 既述のように、南コタバト州のアゾラ利用地帯は一九八一年第二期作までは病虫害の発生皆無であった。しかし、一九八二年八月以降この地域でアゾラの虫害が広がり始め、多くの地点でアゾラの生育が以前より困難になり、この地域における継続的アゾラ利用が危ぶまれている。少なくとも第9表で示されたアゾラの経済的収益は大きく下方修正されねばならないであろう。

(42) 不確実性を伴う技術の経済的収益は、その技術の平均的収益に危険確率を乗じたものとして評価されよう。稲作生産自体、自然的環境要因の変動からくる不確実性から逃れられておらず、またそれに従事している小農は一般的に危険回避の傾向を強く持っていることに留意されねばならない。

五 結 語

以上本稿では既往の研究の整理と農家調査資料に基づき、水田緑肥としてのアゾラの生物学的並びに経済的利用可能性を検討した。主要な知見は以下のごとく要約されよう。

(イ) 水田緑肥としてのアゾラの生物学的ポテンシャルは大きい。水田一ヘクタールを覆うアゾラは二〇〜三〇キログラムの有機質窒素を含む。アゾラの周年耕作による窒素生産量はヘクタール年当たり一トン以上にも達し得る。水稲と同時に耕作する場合でも、アゾラによる窒素供給量は水稲一作ヘクタール当たり二〇〜二〇〇キログラムで分布する。かく固定された有機質窒素が無機質窒素とは同じ効率を持つことは、既往のアゾラを用いた水稲収量試験結果から確認される。

(ロ) 熱帯稲作におけるアゾラ利用の経済的ポテンシャルは大きい。アゾラの生育に好適な環境条件を備えたフィリピン・ミンダナオ島南コタパト州の水田地帯の事例は、農家によって用いられたアゾラが、ヘクタール当たり五〇キログラムの無機質窒素を代替し、経常財費の三割以上の節約を可能とするものであったことを示している。

(ハ) しかし、アゾラの生物学的・経済的ポテンシャルの実現は、多くの自然的・社会的要因によって制約されており、現状においてアゾラは熱帯稲作にとって確立された技術と言うには程遠い。多くの制約要因の中で、農家レベルでコントロール可能なものは、土壤磷酸肥沃度、アゾラの病虫害、アゾラに係わる労働投入の三つである。

第一の要因は磷酸質化学肥料の施用により克服出来、現在の肥料価格体系の下では、アゾラ導入への大きな障害とはならないであろう。第二の要因たるアゾラの病虫害の存在は、昆虫の世代交代の早い熱帯において、アゾラ利

用への致命的障害となり得る。現行の農業およびその価格を前提とすると、アゾラの病虫害防除をカーボフェラン成分量二〇〇グラム以内でなし得なければ、アゾラの緑肥利用は経済的に無意味となる。第三の要因労働必要量も予想以上に大きな制約要因となり得る。現行価格体系の下で農業賃金率（労働の機会費用）が一日当たり二USドルの近傍にある国・地域では、アゾラに要する労働量の多少が、その利用より生ずる経済的収益の正負を規定するのである。

アゾラを熱帯稲作で利用可能な水田緑肥技術として確立していく上で重要な将来的研究課題は以上の検討から自ずと明らかであろう。一般的にいつて、より劣悪な環境条件下で生育し得るアゾラ品種系統の発見・選択と、劣悪環境下でアゾラを生育せしめる農法の確立が必要とされている。現在利用可能なアゾラ品種系統を前提とすれば、特に、

- (い) アゾラ病虫害の有効な防除法の確立が急務であろう。本稿では言及されなかったが、水稻自体の病虫害防除と統合的にアゾラの病虫害を防除する可能性を含めて検討が進められるべきであろう。
- (ろ) 次いで、アゾラの生産・接種・鋤き込みに関する農法を、既存の稲作生産における労働利用のピークと重複を避けつつ、遊休労働力の活用が図れるように、設計する必要がある。
- (は) 種々の土壌タイプについて、より効率的な磷酸肥料の施用法を明らかにし、アゾラの有機質窒素生産性向上を図ることも勿論劣らぬ重要性を持つ。

〔付記〕 本稿は多くの方々の協力の上に成り立っている。元国際稲研究所稲作専門家の L. D. Haws 氏からはアゾラに関する熱帯稲作におけるアゾラの緑肥利用

する多くの情報を与えられた。フィリピン農業省コロナダール地方事務所の D. Nicolas, F. Tambo 両氏、同農業経済局タ
ンタガン農業改良普及所の D. Fugalidad 嬢、調査村の村長 A. Gamboa, R. Buenacosa 両氏、前村長 Z. Cataluña 氏
をはじめとする調査農家の方々からは、南コタバト州における調査に際して大きな助力と協力を得た。B. Baldostaman, R.
Necesarion, J. Nicolas 諸氏と C. Opeña 嬢は調査の実施・データの取り纏めを手伝ってくれた。本研究所田嶋俊雄氏から
は中国における多くのアゾラ関係文献の教示を受け、また池上彰英氏からはそれら文献の理解に助力を得た。国際稲研究所の
持田作氏は我々に農薬に関する知識を教示下さっただけでなく、原稿に含まれていた誤りをも指摘して頂いた。以上総ての方
々に、ここに記して感謝の意を表したい。もとより、本稿中にまだ含まれているかもしれない誤りについての責任は筆者らに
ある。

〔引用文献〕

- 〔1〕 安部五一・中川清・児玉三郎「オオアカウキクサの被害と防除」『日本作物学会北陸会報』第二号、一九六六年、五一
～五四頁。
- 〔2〕 天野元之助「後魏の賈思勰『齊民要術』の研究」、『中国の科学と科学者』、一九七八年三月、三六九～五七〇頁。
- 〔3〕 天野元之助『中国農業史研究・増補版』（御茶の水書房、一九七九年）。
- 〔4〕 刘中柱・林沧・任祖淦・林家鏗「紅萍若干生理特性初步研究」、『中国農業科学』、一九七九年、第二期、六三～七〇頁。
- 〔5〕 藤原彰夫・坪井一郎・吉田文武「アカウキクサの遊離窒素固定作用について（予報）」、『農学』第二一卷、昭和二十二年、
三六一～三六三頁。
- 〔6〕 松本久夫・田中礼義・平田修治・工藤洋男「除草剤によるアカウキクサの防除試験」、『九州農業研究』第三六号、一九六
八年、八三頁。

- [7] 沼田真・吉沢良人編『日本原色雑草図鑑』(全国農村教育協会、一九六八年)。
- [8] 北京農業大学『肥料手冊』(北京、農業出版社、一九七九年)。
- [9] 利卓榮・祖守先・毛美飛・F. A. Lumpkin 「八個綠萍種在農業上的利用研究——I、八個綠萍種的農業利用性質研究」(『中國農業科學』、一九八二年、第一期)、一九〇二七頁。
- [10] 利卓榮・祖守先・毛美飛・F. A. Lumpkin 「八個綠萍種在農業上的利用研究——II、八個綠萍種在稻田養殖与利用技術的研究」(『中國農業科學』、一九八二年、第二期)、七二一七七頁。
- [11] 蘇北農學院『水生作物的栽培』(上海人民出版社、一九七一年)。
- [12] 辻村克良・池田典生・塚本和雄「水田綠肥アカウキクサについて」(『日本土壤肥料學雜誌』第三八卷第七号、一九五七年)、二七五〜二七八頁。
- [13] 渡辺敏「アカウキクサリウソウ藻の共生による生物的窒素固定とその利用」(『日本土壤肥料學雜誌』第五二卷第五号、一九八一年)、四五五〜四六四頁。
- [14] Ahmed, G., "Effect of Light Intensity and Temperature on the Growth of *Azolla filiculoides*", *J. Indian Bot.*, Vol. 20, 1941, pp. 213-226.
- [15] Ashton, P. J., "Effect of Some Environmental Factors on the Growth of *Azolla filiculoides*", in *Orange River Progress Report*, South Africa: Inst. for Environmental Sci., Univ. of O.F.S. Bloemfontein, 1974, pp. 124-138.
- [16] Ashton, P. J. and R. D. Walmsley, "The Aquatic Fern *Azolla* and its *Anabaena* Symbiont", *Endeavour*, Vol. 35, 1976, pp. 39-43.
- [17] Balisacan, A. and J. Roumasset, *An Economic Assessment of Biological Nitrogen Fixation Technology: The Case of Azolla in the Philippines*, Honolulu: Resource Systems Institute and East-West Center, Working Paper
綠萍稻作におけるアゾラの綠肥利用

WP-82-21, Dec. 1982.

- [18] Becking, J. H., "Environmental Requirements of *Azolla* for Use in Tropical Rice Production", in *Nitrogen and Rice*, Los Baños, IRRI, 1979, pp. 345-373.
- [19] Braemer, P., "La Culture des *Azolla* au Tonkin", *Rev. de Botanique Applique et d' Agriculture Coloniale*, Vol. 7, 1927, pp. 815-819.
- [20] Buckingham, K., S. W. Ela, J. G. Morris and C. R. Goldman, "Nutritative Value of Nitrogen-fixing Aquatic Fern *Azolla filiculoides*", *J. Agric. Food Chem.*, 26, 1978, pp. 1230-1234.
- [21] CRRRI (Central Rice Research Institute, India), *Rice Research News*, Vol. 8, No. 2, Cuttack, India, June 1978.
- [22] Dao, T. T. and A. Do, "A Few Ideas on Equating Different Kinds of Nitrogenous Fertilizer with Pure Nitrogen", *Agric. Sci. Technol. Vietnam*, No. 93, 1970, pp. 168-174 (in Vietnamese).
- [23] Edwards, D. J., "Weed Preference and Growth of Young Grass Carp in New Zealand", *N. Z. J. Mar. Freshwater Res.* 8, 1974, pp. 341-350.
- [24] Gopal, B., "Contribution of *Azolla pinnata* R. Br. to the Productivity of Temporary Ponds at Varanasi", *Trop. Ecol.*, Vol. 8, 1967, pp. 126-129.
- [25] INSFFER, *Report on the First Trials of Azolla Use to Rice*, Los Baños: IRRI, 1979.
- [26] INSFFER, *Report on the Second Trials of Azolla Use to Rice*, Los Baños: IRRI, 1980.
- [27] IRRI, *International Bibliography on Azolla*, Los Baños: IRRI Library, 1979.
- [28] Kikuchi, M., I. Watanabe and L. D. Haws, "Economic Evaluation of *Azolla* Use in Rice Production", a paper

- presented in the *Organic Matter and Rice* Conference held at the International Rice Research Institute, Sept. 27-Oct. 1, 1982.
- [8] Liu, C. C., "Use of *Azolla* in Rice Production in China", in *Nitrogen and Rice*, Los Baños: IRRI, 1979, pp. 375-394.
- [9] Moore, A. W., "Azolla: Biology and Agronomic Significance", *Bot. Rev.*, Vol. 35, 1969, pp. 17-34.
- [10] National Economic and Development Authority, the Government of the Philippines, *Philippine Statistical Yearbook 1982*, Manila, 1983.
- [11] Ngo, G. D., "The Effect of *Azolla pinnata* R. Br. on Rice Growth", a BIOTROP report presented at the 2nd Indonesian Weed Sci. Conf., 1973.
- [12] Nguyen, C. T., "The *Azolla* Plant Cultivated for Use as a Green Manure", *Bull. Econ. Indochina*, Vol. 33, 1930, pp. 335-350 (in French).
- [13] Nutman, P. S., "IBP Field Experiments on Nitrogen Fixation by Nodulated Legumes", in P. S. Nutman ed., *Symbiotic Nitrogen Fixation*, Cambridge: Cambridge Univ. Press, 1976, pp. 211-237.
- [14] Palacpac, A. C., *World Rice Statistics*, Los Baños: Dept. of Agric. Econ., IRRI, 1982.
- [15] Peters, G. A., R. E. Toia, Jr., W. R. Evans, D. K. Christ, B. C. Mayne and R. E. Poole, "Characterization and Comparisons of Five N_2 -fixing *Azolla-Anabaena* Associations: I. Optimization on Growth Conditions for Biomass Increase and N Content in a Controlled Environment", *Plant Cell Env.*, Vol. 3, 1980, pp. 261-269.
- [16] Rains, D. W. and S. N. Talley, "Use of *Azolla* in North America", in *Nitrogen and Rice*, Los Baños: IRRI, 1979, pp. 419-433.

- [8] Rosegrant, M., "Azolla and Water: Assessment of the Economic Benefits of Intercropping *Azolla* and Rice Under Different Water Regimes in the Philippines", (a draft), Washington D.C.: IFPRI, Dec. 1982.
- [8] Sasi, P. S., K. I. Wilson and N. K. Sasidharan, "Incidence of *Rhizoctonia solani* on *Azolla pinnata*", *Curr. Sci.* Vol. 48, 1979, pp. 216-217.
- [9] Sawatdee, P., W. Seetanum, C. Chermisiri, C. Kanareugsa and J. Takahashi, "Effect of *Azolla* as a Green Manure Crop on Rice Yield in Northeastern Thailand", *Int. Rice Res. Newsletter*, Vol. 2, No. 3, 1978, p. 10.
- [7] Singh, P. K., "Multiplication and Utilization of Fern *Azolla* Containing Nitrogen Fixing Algae Symbiont as Green Manure in Rice Cultivation", *Proc. Indian Acad. Sci.*, No. 2, 1977, pp. 175-200.
- [9] Singh, P. K., "Use of *Azolla* in Rice Production in India", in *Nitrogen and Rice*, Los Baños: IRRI, 1979, pp. 407-418.
- [9] Subudhi, B. P. R. and P. K. Singh, "Nutritive Value of the Water Fern *Azolla pinnata* for Chicks", *Poult. Sci.*, 57, 1978, pp. 378-380.
- [4] Talley, S. N., B. J. Talley and D. W. Rains, "Nitrogen Fixation by *Azolla* in Rice Fields", in A. Hollander et. al. ed., *Genetic Engineering in Nitrogen Fixation*, New York: Plenum Press, 1977, pp. 259-281.
- [9] Talley, S. N. and C. W. Rains, "*Azolla* as a Nitrogen Source for Temperate Rice", in W. E. Newton and W. H. Orme-Johnson ed., *Nitrogen Fixation*, Vol. 2, Baltimore: Univ. Park Press, 1980, pp. 311-320.
- [9] Talley, S. N. and D. W. Rains, "*Azolla filiculoides* as a Fallow Season Green Manure for Rice in a Temperate Climate", *Agron. J.*, Vol. 72, 1980, pp. 11-18.
- [7] Thuyet, T. Q. and D. T. Tuan, "*Azolla*: A Green Manure", *Agric. Problem (Vietnam)*, Vol. 38, 1973, pp. 119-

- [48] Tuan, D. T. and T. Q. Thuyet, "Use of *Azolla* in Rice Production in Vietnam", in *Nitrogen and Rice*, Los Baños: IRRI, 1979, pp. 395-405.
- [49] Watanabe, I., C. R. Espinas, N. S. Berja and B. V. Alimagno, *Utilization of the Azolla-Anabaena Complex as Nitrogen Fertilizer for Rice*, IRRI Research Paper Series No. 11, Los Baños: IRRI, 1977.
- [50] Watanabe, I., "Azolla and Its Use in Lowland Rice Culture" 『土壌肥料』 第110巻 1号(1979) 1~10頁
- [51] Watanabe, I., N. S. Berja and D. C. del Rosario, "Growth of *Azolla* in Paddy Field as Affected by Phosphorus Fertilizer", *Soil Sci. Plant Nutr.*, Vol. 26, No. 2, 1980, pp. 301-307.
- [52] Watanabe, I., K. Z. Bai, N. S. Berja, C. R. Espinas, O. Ito and B. P. R. Subudhi, *The Azolla-Anabaena Complex and Its Use in Rice Culture*, IRRI Research Paper Series No. 69, Los Baños: IRRI, 1981.

(研究員)

(国際稲研究所土壌微生物部部長)