

近中四農研報
Bull.Natl.Agric.
Res.Cent.West.Reg.

BULLETIN
of THE NATIONAL AGRICULTURAL RESEARCH CENTER
for WESTERN REGION

No.8 February 2009

近畿中国四国農業研究センター 研究報告

第8号 平成21年2月



独立行政法人 農業・食品産業技術総合研究機構
近畿中国四国農業研究センター

NATIONAL AGRICULTURAL RESEARCH ORGANIZATION
NATIONAL AGRICULTURAL RESEARCH CENTER
for WESTERN REGION

近畿中国四国農業研究センター研究報告 第8号

所 長 鳥 越 洋 一

編集委員会

委 員 長 松 田 長 生

委 員 川 上 秀 和

足 立 礎

相 川 勝 弘

伏 見 昭 秀

添 野 和 雄

高 橋 佳 孝

五 味 靖 明

家 常 高

楠 田 宰

棚 田 光 雄

柴 田 昇 平

池 田 順 一

中 村 博 志

BULLETIN
of THE NATIONAL AGRICULTURAL RESEARCH CENTER
for WESTERN REGION

No. 8

Yoichi TORIGOE, Director General

EDITORIAL BOARD

Nagao MATSUTA, Chairman

Hidekazu KAWAKAMI

Ishizue ADACHI

Katsuhiro AIKAWA

Akihide FUSHIMI

Kazuo SOENO

Yoshitaka TAKAHASHI

Yasuaki GOMI

Takashi IETSUNE

Osamu KUSUDA

Mitsuo TANADA

Shohei SHIBATA

Jun-ichi IKEDA

Hiroshi NAKAMURA

近畿中国四国農業研究センター研究報告

第8号

(平成21年2月)

目 次

遊休農林地の立地環境に適合したシバ草地造成法

大谷一郎 1

温暖地向き低グルテリン酒米品種「みずほのか」の育成

飯田修一・春原嘉弘・出田 収・松下 景・前田英郎・根本 博・石井卓朗・
吉田泰二・中川宣興・坂井 真・古川幸子・水間智哉・清川良文・若井芳則 45

林床に分布する落葉層と牛ふんの上に表面播種された牧草の出芽と生育 (英文)

福田栄紀 63

四万十川の一流域における窒素, リン, 無機イオンの濃度変動および負荷流出特性

吉田正則・村上敏文・吉川省子・藤原伸介 75

養液栽培における排液再利用法の検討

笠原賢明・吉川弘恭・東出忠桐・伊吹俊彦 91

BULLETIN
of THE NATIONAL AGRICULTURAL RESEARCH CENTER
for WESTERN REGION

No. 8 February 2009

CONTENTS

Establishment of <i>Zoysia</i> Pasture in Abandoned Agricultural Lands Ichiro OTANI	1
New Low – Glutelin Brewer’s Rice Cultivar ‘Mizuhonoka’ for the Western Region Shuichi IIDA, Yoshihiro SUNOHARA, Osamu IGETA, Hideo MAEDA, Hiroshi NEMOTO, Takuro ISHII, Taiji YOSHIDA, Nobuoki NAKAGAWA, Makoto SAKAI, Sachiko FURUKAWA, Tomochika MIZUMA, Yoshifumi KIYOKAWA and Yoshinori WAKAI	45
Emergence and Growth of Temperate Forage Plants Surface-seeded on Litter Layers and Cattle Dung on the Forest Floor Eiki FUKUDA	63
Concentration Change and Effluent Load Characteristics of N, P, and Inorganic Ions in a Watershed in the Shimanto River Basin, Shikoku, Japan Masanori YOSHIDA, Toshifumi MURAKAMI, Seiko YOSHIKAWA and Shinsuke FUJIHARA.....	75
Study of a culture solution management and residue reuse technique for hydroponics based on mathematical model Yoshiaki KASAHARA, Hiroyasu YOSHIKAWA, Tadahisa HIGASHIDE and Thoshihiko IBUKI	91

遊休農林地の立地環境に適合したシバ草地造成法

大谷一郎

Key words : *Zoysia japonica* Steud., Abandoned agricultural lands, Grazing, Groundwater level, Shading, Terraced paddy fields, Litter, *Pteridium aquilinum* L.

目 次

I 緒 言	1	IV シバを導入した遊休農林地の植生の変化	21
1 我が国における遊休農林地及びシバ草地造成研究の現状	1	1 シバを導入した耕作放棄棚田の植生及び土壌環境の変化	21
2 本研究の目的と内容	3	2 落葉広葉樹林林床へのシバの定着に及ぼす立木による庇蔭の影響	27
II シバの生育に及ぼす立地環境の影響	4	3 除草剤散布法及び刈払い法を用いたワラビ優占草地へのシバ導入法の検討	31
1 地下水位、日射条件及び斜面の方位・傾斜角度がシバの生育に及ぼす影響	4	V 総合考察	35
2 シバの生育に及ぼす林床リター量の影響	8	謝 辞	38
III シバ植生の拡大に及ぼす管理方法の影響	12	引用文献	38
1 シバ草地化の速度に及ぼす寒地型牧草の播種の影響	12	Summary	43
2 シバ草地化に及ぼす導入後の放牧管理の影響	17		

I 緒 言

1 我が国における遊休農林地及びシバ草地造成研究の現状

1) 研究の背景

近年、世界的に穀物需要が増加している。この背景には石油に代わる燃料としてトウモロコシ等の農産物を原料とするバイオ燃料の生産が増加していることが挙げられる²⁰⁾。穀物需要は飼料用を中心に依然として高く¹⁰¹⁾、世界の人口が増加している状況から、今後さらに需要が増加し、需給が逼迫する可能性がある。

我が国の畜産業に目を向けると、肉牛生産はこれまで安価な輸入飼料に強く依存してきた。しかしながら、穀物需要の逼迫にともなう輸入飼料の価格の

上昇や消費者の安全・安心な牛肉への影響から、輸入飼料に依存せず、国内の飼料資源を活用した牛肉生産への期待が高まっている。これに応じて、水田に牧草を導入し、放牧利用することによる自給飼料活用型畜産を行う農家もみられる⁹⁷⁾。

一方、中山間地域においては、過疎化及び農業就業者の高齢化が急速に進行している⁵⁵⁾。農林業では耕作放棄地や不作付け地が増加しており、2005年には耕作放棄地率（経営耕地面積と耕作放棄地を加えた面積で耕作放棄地面積を除いた値）が10.1%に高まっている¹⁰¹⁾。林地もこれまで除間伐の管理が十分に行われず、林内が暗いため下草が少なく、エロージョンが進行するといった問題が生じている²⁶⁾。耕作放棄や不作付けは、集落から遠く、傾斜や日照などの条件が不良で区画が小さい棚田等から進む傾向がある²³⁾。このような未利用あるいは管理が放棄

(平成20年5月30日受付, 平成20年9月19日受理)

カバークロップ研究近中四サブチーム

された遊休農林地を放置することは、地域の農林業のさらなる衰退につながるほか、土地及び水保全機能の低下といった問題や⁵⁵⁾、イノシシ等による獣害の頻発により農業の維持を危うくさせる⁴⁰⁾。これらの遊休農林地を有効活用するための方策として、飼料生産体系が提案されているほか⁷³⁾、草地に転換し、放牧利用する試みが一部の地域で行われている^{74, 85)}。

寒地型牧草の草地を暖地に造成したとき、盛夏期の高温と乾燥が牧草の生育を阻害するため⁵⁹⁾、植生の悪化が早期に進行しやすい。一方、我が国には永年にわたって維持され、放牧利用されてきたシバ (*Zoysia japonica* Steud.) 草地が存在する⁸⁶⁾。シバは気候、土壤環境に対する適応性が広く、適切な管理を行えば永続的に植生の維持が可能である²¹⁾。また、傾斜地に立地し機械の導入が困難な場所でもシバを導入することで放牧利用ができる。シバ草地は、寒地型牧草地と比較すると年間の利用期間が短く、シバの消化性が低いものの、肉用繁殖牛の維持に要する養分量をほぼ満たしており、妊娠末期や授乳中を除く肉用繁殖牛の飼料として適しているといわれている⁴⁴⁾。さらに、シバ草地は無施肥でも維持でき、省力的かつ低投入な管理が可能であり、景観も優れている⁹⁰⁾。

そこで、遊休農林地にシバを導入し、肉用繁殖牛の放牧に活用すれば、これまで有効に利用されていなかった粗飼料資源の活用による肉用牛生産が可能になり、中山間地域の環境保全にも役立つと考えられる。これは畜産物生産に利用する穀物の多くを輸入に頼っている我が国において自給飼料資源の有効活用による肉牛生産方策になる。

しかしながら、中山間地域の遊休農林地は、立地環境や植生が多様であり、シバを導入するためには、シバの生育に及ぼす立地環境及び管理方法の影響を明らかにし、導入地の条件に適した方法でシバ草地化を図る必要がある。なお、ここでいうシバ草地化は、シバとそれ以外の草本類が混在しつつ、シバの優占度が高まり、次第にシバが優占種である草地が形成されることを意味している。

2) 既往の関連成果

これまでシバ草地の造成に関して実施された研究をシバの導入方法と立地環境及び管理方法がシバ草

地化に及ぼす影響に分けて整理した。

(1) シバの導入方法

種子による造成法として、松村ら⁴⁵⁾は、播種によるシバ草地造成における播種期と施肥の影響について検討し、夏季の高温が生育に適するため、早期に播種し、適量施肥することが必要であるとした。大口ら⁶⁵⁾は、傾斜地において簡易耕起し、播種後山羊を強放牧することにより、1年5ヶ月でシバが50%を占有し、3年後には全面を占有したと報告している。

一方、苗による造成に関しては、各種の方法が検討されており、大概ら⁶⁹⁾は、斜面に5～10cm幅のシバの切片を条植する方法で植栽を行い、施肥、掃除刈り、強放牧を行うことにより、3年後には被度が90%以上になったと報告している。高知県農林技術会議¹⁰⁰⁾では、挿し苗法により造成したところ、移植後3、4年でシバの被度が50～90%に達したとしている。川原ら³²⁾、佐竹・福住⁷⁰⁾、篠原・西岡^{75, 76)}、篠原ら⁷⁷⁾は、栄養茎を挿し苗または種子を播種し、ペーパーポットで育苗した後、移植することにより、シバ草地の短期造成が可能であることを示した。

さらに、シバ草地に放牧している放牧牛の牛糞中に含まれるシバ種子による種子散布の利用に関して研究がなされている。三田村ら⁴⁸⁾は、シバ及びシバスケが優占する草地に成牛1～0.3頭/haの放牧頭数で放牧された成牛から排泄された牛糞乾物100g中には平均5,934粒と多量のシバ種子が含まれており、稔実割合も67%と高く、排糞を利用してシバ型草地を造成することが可能であるとした。高橋ら⁸⁴⁾は、不食過繁地では多くのシバ種子が生産され、放牧牛の排糞により散布されることにより、シバ植生の拡大に貢献していることを示唆した。

導入法ではシバの初期生育に及ぼす影響を比較した研究が行われており、北原ら³⁴⁾は、播種法、播きシバ法、植えシバ法、張りシバ法について造成速度を比較している。播きシバ法及び植えシバ法は植付け初期から伸長が旺盛であるのに対して、播種法及び張りシバ法では被度の推移がS字状曲線を描き、造成速度からみると播種法は初期生育が悪く、播きシバ法が最も良好であるため、機械が導入できる平坦地では播きシバ法がよく、傾斜地では植えシ

バ法が無難であるとした。

(2) 立地環境及び管理方法がシバ草地化に及ぼす影響

放牧管理とシバ草地への遷移との関係について、小山³⁹⁾は、寒地型牧草地を少量施肥条件下で強放牧を行うと土壤中の窒素量が少なく、糞尿還元量の少ない場所からシバが侵入し、シバ型草地に移行したと報告している。山本ら^{94,95,96)}は、ススキ型草地が放牧によりシバ型草地へ遷移する速さを検討し、シバは主として放牧圧に依存して優占度を高めたと報告している。小迫ら³⁸⁾は、シバ草地造成時の放牧強度の影響について検討し、シバ草地を造成するには強度の放牧圧での連続放牧が必要であるとした。

シバ造成と立地環境に関する研究として、三田村ら⁴⁹⁾は、シバ実生の成長に及ぼす温度の影響について検討し、シバの成長は昼温29℃、夜温24℃で良好であり、温度の低下とともに減少することから、播種法によるシバ造成では夏までに発芽、定着させ、高温期に分げつ及びほふく茎を伸長させることが望ましいことを示した。また、シバ造成時の土壤硬度、土壤改良資材、肥料の影響について検討し、シバの幼植物の成長は土壤硬度に影響されず、土壤改良資材や肥料を施用すると他草種が繁茂し、初期生育の遅いシバ幼植物が抑圧されるため、著しく貧栄養的土壤環境でない限り、土壤改良資材や肥料を施用する必要がないと結論している⁵⁰⁾。鎌田²⁸⁾もシバ型草地造成時に窒素の施用量が増加すると、雑草の優占度が増加し、シバの優占度が低下するため、造成当初は施肥をしないほうがよいとした。

林地におけるシバ造成に関する研究として、三田村ら⁵¹⁾は、落葉広葉樹林伐採跡のミヤコザサ群落の攪乱方法と散布した牛糞に混入したシバ種子の定着及び植生遷移に及ぼす影響について検討し、ササ型草地からシバ型草地を造成するには、物理的あるいは家畜により攪乱して二次遷移系列に出現するヒメジョオンが侵入してからシバを播種し、定着期は禁放し、その後無施肥で放牧利用することが必要であると報告している。また、三田村ら⁵³⁾は、落葉広葉樹伐採跡地において、シバとオーチャードグラスの混生草地を造成する方法について検討した。シ

バの定着及び成長は裸地、無施肥条件で良好であり、シバとオーチャードグラスの混生草地を造成するにはリターを部分的に除去して、無施肥で両草種を秋播きすることが有効であると報告している。さらに、小川ら^{61, 62)}は、この混生草地について施肥量と植生の変化との関係について検討し、播種翌年から無施肥で放牧利用を続けると2年目以降約120AUD/ha (Animal unit day, 体重500kg換算)の牧養力が得られ、3年目にシバとオーチャードグラスの混生草地が成立すると報告している。福田ら⁹⁾は、アカマツ林伐採跡地のリター層の除去と踏圧がシバ等の発芽に及ぼす影響について検討し、播種前のリター層除去及び播種後の踏圧はシバ等の種子の出芽を促進したと報告している。

さらに、傾斜地でのシバの生育に関しては、庄司⁸¹⁾は、斜面の傾斜度が高まるにつれてほふく茎は上方から下方に伸長するものが多くなると報告している。また、加納ら³⁰⁾は、シバ型草地は、緩傾斜地に多く、方位は南東から南西向きの斜面に多く分布していたと報告している。

2 本研究の目的と内容

本研究では、中山間地域の遊休農林地のなかで、棚田跡地、落葉広葉樹林及びワラビの優占地を研究対象地として取り上げた。放棄された棚田は、畦畔法面の崩壊が進み、旧田面はヨシ、ススキ等が密生して荒廃景観を呈している²²⁾。落葉広葉樹林は、山間の棚田や畑に隣接していることが多く、これまで薪炭林等として利用されてきたが管理や利用の放棄が増加している^{5, 24)}。ワラビは、放牧牛が多量に採食すると中毒を起こす有毒草であり、野草地において広く分布し、草地の生産力を低下させる要因になっている⁷⁸⁾。これらの場所をシバ草地に転換するに当たって問題となる立地環境やその後の管理方法について、シバの生育ならびにシバ植生の優占化への影響を検討し、実際場面において、シバ草地へ転換する方法を実証、検討し、経年的な植生の変化を調査した。なお、本研究ではシバの導入法として張りシバ法及びペーパーポット苗の移植を用いた。その理由としては、両方法は斜面における定着が比較的優れており、また、既存植生との競合条件下における生育が良好であるためである。播種法は種子が

高価であるとともに⁴⁸⁾、初期生育が遅く、既存植生との共存条件では競合に弱いこと⁵⁰⁾、撒きシバ法は機械が導入できる場所でないと利用が難しいこと³⁴⁾、牛糞に混入したシバ種子の利用はシバが部分的に定着した場所からの広がりには有効であるが、シバ草地の造成に必要な量を入手することが困難であること³⁴⁾から本研究では見送った。

「Ⅱ シバの生育に及ぼす立地環境の影響」では、棚田跡地で問題になると考えられる地下水位の高さ、林床への導入で問題になる庇蔭割合、傾斜地への導入に際して影響があると考えられる斜面の方位・傾斜角度の影響及び林床にシバを導入する場合に想定される地表面のリター量の影響について明らかにした。

「Ⅲ シバ植生の拡大に及ぼす管理方法の影響」では、植生の現存量が少ない場所を放牧を続けながらシバ草地化することを想定し、造成初期の放牧牛の飼料不足を補うため、シバ苗の植付け時に寒地型牧草も同時に播種し、牧草を先行して定着・繁茂させ、その後徐々にシバを定着・繁茂させる方法を検討した。続いて、シバ苗移植後の管理として放牧がシバ植生の優占化に及ぼす影響について、刈取管理との比較において明らかにした。

「Ⅳ シバを導入した遊休農林地の植生の変化」では、上記で得られた知見を活かしながら耕作放棄棚田、間伐した落葉広葉樹林の林床及びワラビ優占地にシバを導入し、放牧管理を行いつつ、シバ定着域の拡大の推移について調査を行い、各条件におけるシバの導入法について考察を行った。

最後に、「Ⅴ 総合討論」では得られた結果をとりまとめて総合考察を行った。

Ⅱ シバの生育に及ぼす立地環境の影響

1 地下水位、日射条件及び斜面の方位・傾斜角度がシバの生育に及ぼす影響

耕作放棄棚田にシバを導入して放牧地として利用するには土壤の過湿がシバの生育を阻害する要因になると考えられる。休耕中の棚田は、上位の地点は湿田的になり、下位は乾田的になるとの報告³⁾がある。また、斜面に立地する落葉広葉樹林では、斜面の崩壊を防ぐ観点から、樹木の皆伐は避けて間伐

して明るくなった林床にシバを導入することが望ましい。シバは庇蔭に弱いといわれていることから¹⁹⁾、シバの生育に必要な日射の強度を明らかにする必要がある。さらに谷間では、日照時間が短いことも考慮する必要がある。シバは系統により、耐寒性に差異があることが報告されているが³³⁾、これまで過湿土壤や庇蔭条件下での生育について、シバの系統間差を含めて取り上げた報告例はほとんど見当たらない。

一方、傾斜地にシバを導入する場合には、斜面の方位や傾斜角度によって日射条件が異なり、地温や土壤の理化学的性質にも違いが生じる可能性があることから^{8, 82)}、シバの生育もこれらの影響が強及ぶことが予想される。

そこで本節では、地下水位及び日射条件の違いがシバの生育に及ぼす影響を系統間差を含めて明らかにするとともに、生育する斜面の方位及び傾斜角度がシバの生育に及ぼす影響を検討した。

1) 材料及び方法

(1) 試験1 地下水位試験

試験は中国農業試験場畜産部（現近畿中国四国農業研究センター大田研究拠点、島根県大田市）で実施した。1995年4月4日に赤黄色土と黒ボク土を約6mm目のふるいにかけて後、内径13.3cm、長さ25cmの塩化ビニール製ポットに充填した。各ポットには中国地域に自生するシバ3系統（採集地は、島根県隠岐郡西ノ島町、同県同郡隠岐の島町、山口県長門市の3カ所）のほふく茎（2節分）を2本ずつ移植しガラス室で生育させた。地下水位処理は、土壤面から3, 10, 20cmの高さに地下水位を維持する3処理とし、5反復で配置した。全処理区とも基肥として、土壤の充填時にポット当たり複合肥料（N:P₂O₅:K₂O=15:15:15）1.8g、苦土石灰2.0gを土壤全層に混合した。地下水位処理は、4月5日から7月18日までの104日間、各水位になるよう水道水で満たした1/2,000aのワグネルポットの中に上記の移植ポットを入れて行った。

土壤の通気性の良否を判断するため、7月6日（処理92日後）に深さ3cmの土壤の酸素拡散速度（ODR）を測定した。また、地下水位処理にともなう土壤の化学性の変化を把握するため、7月17日

(処理103日後)には深さ5 cmまでの土壌の一部を採取し、風乾した後、全窒素及び全炭素含有率をN-Cアナライザー(住友化学社製, sumigraph NC-80AUTO)で、pHをpHメーターで測定した。7月18日にはポットで生育するシバの根を水洗し、地上部を直立茎、ほふく茎及び枯死部に分け、ほふく茎長を測定した後、70℃で乾燥して乾物重を測定した。

(2) 試験2 庇蔭試験

1996年4月25日に、赤黄色土を1/5,000 a ワグネルポットに充填し、各ポットにシバ3系統(採集地は、島根県隠岐郡西ノ島町、山口県長門市、同県下関市の3カ所)及びバーミューダグラス(*Cynodon dactylon* (L.) Pers., 品種不明)の苗を2個体ずつ移植した。バーミューダグラスは、シバの庇蔭条件に対する反応を他の暖地型のシバ型草種と比較することで草種としての特性を明らかにするために用いた。苗の育成は、土壌を充填したペーパーポットで行い、バーミューダグラスは3月15日に播種し、シバは4月5日にほふく茎(1節分)を移植し、ガラス室内で生育させた。庇蔭処理は、2重にした防虫網でポットを覆う強庇蔭区、1重の防虫網で覆う弱庇蔭区、ポットの東西面に高さ39cm、幅19cm、厚さ10cmの衝立を置く朝夕庇蔭区及び無庇蔭区の4処理区とし、5反復で配置した。群落相対照度計を用いて測定した相対照度は、強庇蔭区が26.4%、弱庇蔭区は37.2%であった。全処理区とも基肥として、土壌の充填時にポット当たり化成肥料(N:P₂O₅:K₂O=15:15:15)2.4g、苦土石灰2.8gを全層に混合した。庇蔭処理は、4月26日から89日間実施した。なお、バーミューダグラスは、6月3、17日及び7月5日に地上3cmで刈取りを行った。

7月23日に全処理区とも根を掘り起こし水洗し、地上部とともに70℃で乾燥して乾物重を測定した。

(3) 試験3 斜面試験

1995年3月20日に、赤黄色土を38×26cm、高さ16cmのコンテナに充填し、各コンテナに5×5cmの市販のシバのソッド(品種は不明)を2枚ずつ移植した。コンテナの側面下部には水抜き用の穴を開けた。処理は、コンテナの短辺の方位4(北、南、東、西)と傾斜角度2水準(強:27°, 弱:15°)を組み合わせ

せた8処理、それにコンテナを水平に置いた対照区を加えた9処理区とし、5反復の乱塊法で配置した。全処理区とも基肥として、土壌の充填時にコンテナ当たり化成肥料(N:P₂O₅:K₂O=15:15:15)6.0g、苦土石灰9.0gを全層に混合した。傾斜処理は、シバ移植直後の3月20日から8月9日まで142日間行った。なお、全処理区とも6月22日(処理94日後)、7月7日(処理109日後)に地上2cmで刈取った。

7月12日にはソッドから発生しているほふく茎の本数を調査するとともに、8月9日には根を掘り起こし水洗し、地上部とともに70℃で乾燥して乾物重を測定した。また、各方位の強傾斜区及び対照区では、コンテナの中央部の深さ7cmの地温を4月5日～9日及び7月24日～28日に2時間間隔で測定した。試験期間中、コンテナは屋外に置いた。

2) 結果

(1) 試験1 地下水位試験

地下水位処理終了前日の土壌のpH、全窒素含有率及び全炭素含有率と処理92日目の土壌の酸素拡散速度(ODR)を第1表に示した。土壌のpHは、赤黄色土よりも黒ボク土のほうが高く、また、地下水位3cm区が10、20cm区よりも高かった。土壌の全窒素含有率及び全炭素含有率は、赤黄色土に比べて黒ボク土の値が著しく高く、地下水位処理間には明らかな差異はみられなかった。一方、土壌のODRは、地下水位処理間に顕著な差が認められ、地下水位が高い処理区ほど低く、また、水位3、10cm区においては黒ボク土のほうが赤黄色土よりも明らかに低い値を示した。

第1表 各地下水位処理区の土壌表層のpH(H₂O)、全窒素含有率(T-N)、全炭素含有率(T-C)及び酸素拡散速度(ODR)

土 壌	地下水位 (cm)	pH (H ₂ O)	T-N (%)	T-C (%)	ODR (10 ⁻⁸ g/cm ² ・min)
赤黄色土	3	4.4	0.06	0.76	15.1
	10	4.3	0.06	0.80	29.2
	20	4.3	0.06	0.68	44.3
黒ボク土	3	5.0	0.57	10.18	11.9
	10	4.8	0.57	10.31	17.3
	20	4.3	0.57	10.05	50.2

地下水位処理後のシバの乾物重を第2表に示した。地上部及び根の乾物重は、いずれのシバ系統及び土壌とも水位3cm区で最も小さい値を示し、地下

第2表 各地下水位処理区のシバの乾物重

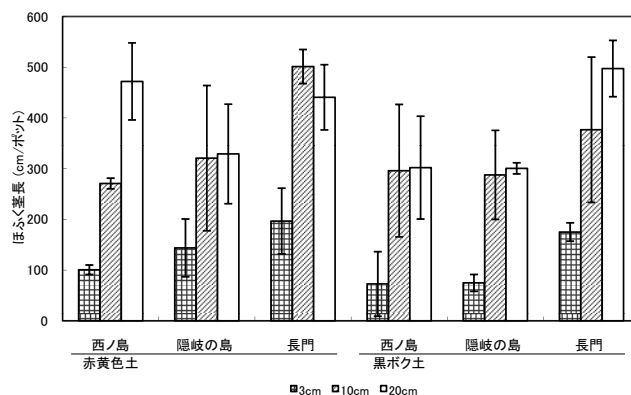
土壌	シバ系統	地下水位 (cm)	乾物重 (g/ポット)		
			地上部	根	合計
赤黄色土	西ノ島	3	4.32b	0.81b	5.13b (31.3)
		10	12.06a	1.93a	13.99a (85.5)
		20	14.55a	1.82a	16.37a (100)
	隠岐の島	3	4.04c	0.72c	4.76c (30.3)
		10	9.77b	1.44b	11.21b (72.7)
		20	13.45a	1.96a	15.41a (100)
	長門	3	5.08b	0.88b	5.96b (35.4)
		10	14.16a	2.29a	16.45a (97.7)
		20	14.91a	1.93a	16.84a (100)
黒ボク土	西ノ島	3	1.83b	0.29c	2.12b (16.1)
		10	11.44a	1.09b	12.53a (95.3)
		20	11.85a	1.30a	13.15a (100)
	隠岐の島	3	1.76b	0.32c	2.08b (20.6)
		10	7.81a	0.76b	8.57a (85.0)
		20	9.16a	0.92a	10.08a (100)
	長門	3	3.28b	0.58b	3.86b (26.6)
		10	12.55a	1.36a	13.91a (95.8)
		20	13.19a	1.33a	14.52a (100)

注1) 同一土壌の同系統で異なる文字を付した処理間にはTukeyにより5%水準で有意差有り。

2) 合計乾物重の括弧は地下水位20cmに対する比率を示した。

水位20cm区に対する比率は、16.1～35.4%であった。また、土壌別にみると、黒ボク土での乾物重が赤黄色土よりも低かった。シバの系統間差を比較すると隠岐郡の2系統に比べて山口産の系統では水位3cmにおける地上と根の合計乾物重の低下の度合いが小さかった。一方、地下水位10cm区の地上と根の合計乾物重は、水位20cm区に対する比率で72.7～97.7%と地下水位3cm区に比べれば低下の度合いが小さく、系統間の比較では山口系の低下率が97.7%及び95.8%と小さい傾向が認められた。

シバのほふく茎長を第1図に示した。ほふく茎長は、合計乾物重と同様に水位3cm区で最も低い値を示した。水位10cm区と20cm区の差は赤黄色土の西ノ島系統以外は明らかでなかった。

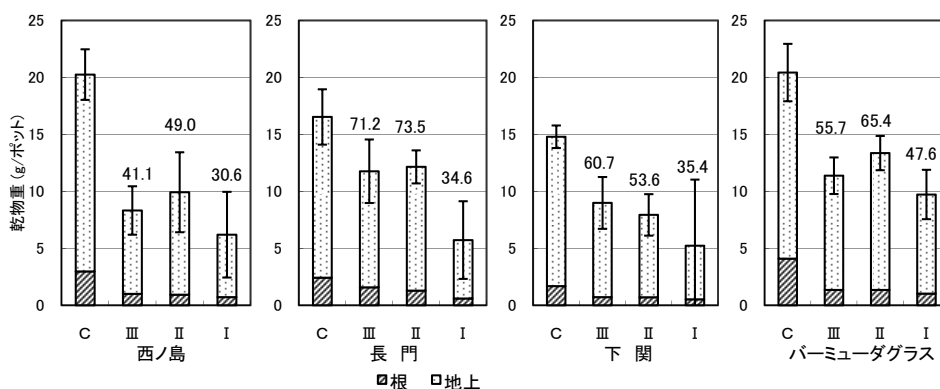


第1図 各地下水位処理区におけるシバのほふく茎長

注) 図中のエラーバーは標準偏差を示す。

(2) 試験2 庇蔭試験

庇蔭処理後のシバの乾物重を第2図に示した。強庇蔭区では地上部と根を合計した乾物重は、いずれのシバ系統とも著しく減少し、無庇蔭区の30.6～35.4%であり、バーミューダグラスの47.6%に比べても低い値であった。根の乾物重は、無庇蔭区の24.2～31.4%であり、バーミューダグラスの25.1%と同等の低下率であったが、地上部の乾物重は31.7～36.4%とバーミューダグラスの53.2%に比べて低かった。弱庇蔭区及び朝夕庇蔭区は、無庇蔭区に対する乾物重の低下率が強庇蔭区に比べて小さかった。弱庇蔭区及び朝夕庇蔭区の乾物重をシバの系統間で比較すると、西ノ島町及び下関市よりも長門市の系統で、無庇蔭区に対する低下率が小さかった。



第2図 各庇蔭処理区におけるシバ及びバーミューダグラスの乾物重

C: 無庇蔭 (対照), III: 朝夕庇蔭, II: 弱庇蔭, I: 強庇蔭

注1) 図中のエラーバーは標準偏差を示す。

2) 図中の数字は対照に対する比率(%)。

(3) 試験3 斜面試験

第3表に処理後114日目のシバのほふく茎の本数を示した。ほふく茎の本数を伸長している方向別に調査したところ、いずれの傾斜処理区においても斜面の下方に伸長したほふく茎が斜面の上方に伸長したほふく茎より多かった。上向きのほふく茎の本数は、方位にかかわらず弱傾斜区より強傾斜区のほうが少なく、全ほふく茎に占める上向きのほふく茎の割合も、強傾斜区(8.3~19.3%)が、弱傾斜区(23.4~32.1%)より低くなった。合計ほふく茎数は、傾斜角度の影響は明らかでなかったが、方位についてみると、対照区に比べて南区のみが優っていた。

処理後のシバの乾物重を第4表に示した。地上部及び根の乾物重は、斜面の方位にかかわらず、強傾斜区よりも弱傾斜区のほうが多かった。方位別では南面の乾物重が最も高く、東と西が低かった。

第3表 方位・傾斜角度別のシバのほふく茎本数

方位	傾斜	ほふく茎数(本/0.1m ²)			上向き割合 ¹⁾ (%)	
		上向き	下向き	合計		
北	27°	2.2	9.2	11.4	19.3	* ²⁾
	15°	3.4	9.6	13.0	26.2	
南	27°	2.2	11.2	13.4	16.4	*
	15°	3.0	9.8	12.8	23.4	
東	27°	2.0	8.4	10.4	19.2	*
	15°	2.2	7.0	9.2	23.9	
西	27°	1.0	11.0	12.0	8.3	*
	15°	3.6	7.6	11.2	32.1	
水平(対照)		-	-	11.0	-	

注1) アークサイン変換後、統計処理した。

2) 同一方位の傾斜角度間にTukey法により5%水準で有意差有り。

なお、各方位区の強傾斜区及び対照区の地温を測定したところ、4月5日~9日の平均気温は、南(23.2℃)>対照(23.0℃)=東(23.0℃)>西(22.7℃)>北(22.3℃)、7月24日~28日の平均気温は東(30.4℃)>対照(30.0℃)>西(29.6℃)>南(29.5℃)>北(29.2℃)であった。

3) 考察

シバは、本来乾燥状態の土壌を好み、地下水位の高まりとともに乾物重が減少すると言われている⁴⁶⁾。本試験においても、地下水位3、10cm区においては生育の低下が認められ、過湿な土壌条件では生育が抑制された。本試験で供試した中国地方産3系統では、高地下水位による生育の抑制度合いに系統間で差が認められたものの、その差は大きいものではな

第4表 方位・傾斜角度別のシバの乾物重

方位	傾斜	乾物重(g/0.1m ²)		
		地上部	根	合計
北	27°	30.8	6.2	37.0 (81) *
	15°	38.3	8.4	46.7 (103) *
南	27°	35.1	7.2	42.3 (93) *
	15°	41.7	9.1	50.8 (112) *
東	27°	29.1	6.6	35.7 (79) *
	15°	33.4	8.6	42.0 (93) *
西	27°	27.7	7.1	34.8 (77) *
	15°	34.6	8.5	43.1 (95) *
水平(対照)		37.2	8.2	45.4 (100)

注1) 同一方位の傾斜角度間にTukey法により5%水準で有意差有り。

2) 括弧内の数字は対照に対する比率。

かった。日本各地の自生系統をより広範に収集して調査すれば、過湿土壌条件下での生育のより優れた系統を見いだせる可能性があると推察され、耐湿性の強いシバ系統を用いることが有効な方法のひとつである。しかし、放牧利用を前提とすれば過湿土壌は泥濘化を助長するので、地下水位の高い棚田跡地へのシバ導入にあたっては、排水処理を行い、乾田化することが現場レベルでは重要となる。

砂壤土に植えたオオムギでは、土壌のODRが $15 \times 10^{-8} \text{ g/cm}^2/\text{min}$ で根の成長が制限されたと報告されている⁴³⁾。本試験では、ODRが $29.2 \times 10^{-8} \text{ g/cm}^2/\text{min}$ の赤黄色土に移植したシバは、地下水位10cm区で生育抑制がみられたことから、シバが良好な生育を示すODR値は $30 \times 10^{-8} \text{ g/cm}^2/\text{min}$ 以上であると推察される。また、ODRは、地下水位3、10cmでは赤黄色土よりも黒ボク土のほうで低く、シバの生育も概ね黒ボク土のほうで強く抑制された。黒ボク土は他の土壌よりも低いODR値を示したと報告されており¹⁾、黒ボク土では過湿による生育低下が顕著になる危険性がある。

シバは、耐陰性が弱く、庇蔭が強くなるほど生育が悪化するといわれている^{15,19,35,46)}。本試験においても、庇蔭強度が高いほどシバの生育が低下する傾向がみられた。本試験で検討した3系統の生育反応の差は、庇蔭が強い場合には明瞭ではないが、庇蔭が弱まると明瞭となった。したがって、林床等の日射が制限される場所への導入に適する系統が存在する可能性がある。

一方、谷筋などでは日照時間の短縮が起こることが知られており¹⁴⁾、本試験ではこの状況を想定してポットの東西面に衝立を立て、朝夕の日射を遮る処

理を設けた。この場合、ポットよりも衝立のほうが約19cm高く、約3cm幅が広いため、シバは長時間日陰におかれることになった。シバの最大成長は14～16時間の日長で得られたという報告⁹⁸⁾があり、また、本試験でも朝夕庇蔭区ではシバの生育が抑制されたことから、日照時間の短縮もシバの生育を抑制することが明らかである。さらに、朝夕庇蔭区と弱庇蔭区の生育が3系統とも概ね同等のレベルであった。本試験では積算日射量の測定は行っていないが、シバの生育は日照時間及び日射強度から算出される総日射量に影響される可能性が示唆された。

庄司⁸¹⁾は、斜面の傾斜角度が高まるにつれてシバは下方向に伸長するほふく茎の割合が多くなると報告している。本試験においても、斜面方位にかわりなく、傾斜角度が高い区では上向きに伸長するほふく茎の割合が少なかった。しかし、急傾斜区の27°の斜面においても上向伸長のほふく茎はみられたことから、急傾斜地に導入したシバの場合にも上方向の広がりにある程度貢献できる。

斜面は、方位によって日射量、日照時間、地温に違いがみられ、南斜面では日射量が多く、北斜面では少ない^{8, 14)}。また、一般に南向き斜面では、土壌水分が少なく、表土が薄く、有機物や窒素含有率が低いと言われている⁸²⁾。本試験では、土壌の要因については検討せず、気象的な影響のみを扱ったが、その結果、シバの生育は、急傾斜区よりも緩傾斜区のほうで良好で、また方位別には南向きで生育が最も良く、東、西向きで悪かった。本来、シバ型野草地の多くは緩傾斜地に、また、方位としては南東から南西向きの斜面に分布していたという調査報告³⁰⁾があり、また、バヒアグラスは北斜面より南斜面のほうが生育がよいという報告⁹¹⁾もあるが、本試験での結果は概ねこれらの結果と一致した。方位によって生育に差がみられたのは、日射の影響によるものと推察されるが、北向き斜面よりも東、西向き斜面でシバの生育が下回った理由については、本試験の結果からは明らかにすることはできなかった。

以上のように、シバの生育は地下水位、日射条件及び斜面の傾斜、方位によって異なった。本試験はポット条件下で小規模に実施した試験の結果であり、実際の場面では、土壌の理化学性の影響や植生の影響なども複雑に関与するが、シバの生育に関す

る基礎的なデータが得られたと考える。

4) 摘要

地下水位の高低及び庇蔭割合がシバの生育に及ぼす影響を中国地域に自生するシバ系統（島根県隠岐郡西の島町、同県隠岐の島町、山口県長門市、同県下関市）を供試して検討するとともに、斜面の方位・傾斜角度によるシバの生育の違いを検討した。

地下水位3, 10cmでは水位20cmに比べてシバの生育が悪く、とくに水位3cmではその傾向が著しかった。シバの自生系統間には高地下水位での生育の差異は小さかった。終日強い庇蔭処理を加えることにより、シバは各系統とも生育が著しく抑制された。終日弱い庇蔭処理を加えた処理区と東西面からの日射を遮断した処理区では、強い庇蔭処理区よりも生育低下の度合いが小さかった。また、庇蔭処理による生育反応には系統間差異がみられた。傾斜面に生育させたシバ個体のほふく茎の伸長方向性は、上向きより下向きが優位であり、傾斜角度が高いほどその傾向が強まった。傾斜面でのシバの生育は、急傾斜区よりも緩傾斜区のほうが良好であった。また、方位の違いでは東向きや西向きより南向きで良好であった。

2 シバの生育に及ぼす林床リター量の影響

落葉広葉樹林の林床にはリターが厚く積もっており、シバ植生に転換するためには、このリターがシバの定着や初期生育に及ぼす影響について明らかにする必要がある。

主として枯死植物体から成る地表面のリターは、そこに生育する植物にとり、生物的效果、物理的效果及び化学的效果をもたらすことが知られている⁶⁰⁾。草地造成分野においてもこれまでに、リターは、雨水による養分の溶出及び分解、無機化により、窒素等の養分を植物に供給する⁸⁹⁾こと、さらに、土壌の理化学的⁵³⁾あるいは肥料的効果⁶⁰⁾により牧草の発芽、定着を促進することなどが報告されている。しかし、一方、リターは、新たに牧草等を人為的に導入しようとする場合には、播種植物種子と土壌との密着を阻害し、播種床としては望ましくない環境を形成していることになる。そこで、これまでの研究では、シバを播種する場合にはリターを除去し、

裸地条件で行うことが、シバの定着を促進し、良好な手法とされている⁵³⁾。しかし、シバの造成法としては種子を播種する手法と既にシバ群落を形成したものをシバ苗としてソッドの形態で移植する手法がある。一般的には、シバは種子からの造成より、多労ではあるがシバ苗を移植の方が早期にシバ草地を形成できる。しかし、これまでに林床下でのリターが移植したシバ苗の生育に及ぼす影響については検討されていない。また、間伐材や脱落した枝葉を林内において集積し焼却処理すると、地表に多量の炭や灰が残る。トールフェスクについては、落葉灰の上への播種が良好な発芽をもたらすと報告されている⁵⁴⁾が、これらの炭や灰がシバに及ぼす影響については検討されていない。このように、林床リターや木炭が移植したシバ苗の生育にどのように影響するかは明らかでない。

そこで、本節では落葉広葉樹の落葉を主とするリター及び枝葉を焼却した木炭が、移植したシバ苗の生育に及ぼす影響について、土壤水分、シバへの養分供給及び地温の3点から検討した。なお、木炭はリターではないが、本稿ではリターに含めて表現した。

1) 材料及び方法

試験は1997年3月26日から7月9日まで、中国農業試験場畜産部内のガラス室で行った。ガラス室内の試験としたのは、屋外の林床では土壤水分の調整が難しく、過湿あるいは乾燥によるシバ苗の生育への影響が懸念され、リター処理の影響を明瞭に区別して解析することが難しいと考えられたためである。さらに、風によるリターの飛散によってリター量が変化する恐れもあり、また林床の立地、土壤条件が不均一なため、精密な試験を行うのが困難なことによる。

(1) 試験処理

土壤表面に施用するリター量を異にする3処理(落葉リター区、木炭区、対照区(裸地区))を設定した。赤黄色土を約6mm目のふるいにかけた後、縦38cm、横26cm、高さ16cmのポリプロピレン製コンテナに充填し、3月26日に、各コンテナに市販のシバ(品種は不明)を5cm×5cmの大きさに調製したソ

ッドを2枚ずつ移植した。ソッドはコンテナの短辺の側壁から7cm、両長辺の側壁からそれぞれ10.5cm離れた位置に移植した。全処理区とも基肥として、土壤の充填時にコンテナ当たり複合肥料(N:P₂O₅:K₂O=15:15:15)を6gと苦土石灰9gを全層に混合した。

リター及び木炭は、前年の9月～12月に採取し風乾したものを供試した。落葉リターは、コナラ(*Quercus serrata* Thunb.)を主体とし、エゴノキ(*Styrax japonica* Sieb.et Zucc.)、ヤマザクラ(*Prunus Sargentii* Rehd. subsp. Jamasakura (Sieb.) Ohwi.)及びノグルミ(*Platycarya strobilacea* Sieb.et Zucc.)からなる中国地方で一般的にみられる広葉樹林の林床に堆積した未分解の落葉を供試し、コンテナ当たり40g(乾物重)を土壤表面に均一に敷き詰めた。この量は405g/m²に相当するが、落葉樹林伐採年の9月のリター量の調査結果が302～463g/m²であったことから決定した(落葉リター区)。

木炭区は、広葉樹林の間伐材及び枝葉を焼却した後、大きさが2cm角以内の炭に灰が混じったものを収集し、コンテナ当たり300g(乾物重)を土壤表面に均一に敷き詰めた。この量は供試した炭と灰をコンテナ全面に敷き詰めるのに必要な量として決定した。窒素含有率は、落葉リターが0.716%、木炭が0.221%であった。試験中のかん水は、1日に1回の観察により土壤表面が乾燥している場合にのみ実施した。試験は5反復の乱塊法とした。

(2) 調査方法

1997年7月9日、全処理区の基底被度を調査した後、シバ苗を掘り起こし、根を水洗し、茎葉(直立茎及びほふく茎)と根に切り分け、70℃で通風乾燥して乾物重を測定した。さらにリターからシバへの窒素成分の養分供給について検討するため、各処理区内のブロックをひとまとめにして、茎葉を粉碎し、窒素含有率をN-Cアナライザー(住友化学社製、sumigraph NC-80AUTO)を用いて測定した。リターの有無と土壤水分の関係及びリターから土壤への窒素の溶出について明らかにするため、7月7日に各処理2反復について深さ5cmまでの土壤を採土円筒(容量100ml)を用いて採取し、土壤中の含水率と全窒素含有率を測定した。

リターの有無と地温の関係を明らかにするため、6月20日から7月4日までシバ苗から5～6cm離れた位置において深さ3～5cmの地温を1時間間隔で測定した。このうち、一日の日照時間が5時間以上であった6月23日、24日及び26日について日中（7：00～18：00）と夜間（1：00～6：00及び19：00～24：00）に分けて地温の平均値を算出した。

2) 結果

(1) シバの生育

処理後105日目にあたる7月9日のシバの基底被度、コンテナ当たりのシバの乾物重（茎葉及び根）を第5表に示した。シバの基底被度は、植え付け時は3処理区とも5%であったが、試験終了時には落葉リター区52%、木炭区60%、対照区48%となった。落葉リター区ではシバのほふく茎はリターの下部で広がり、そのほふく茎から発生した直立茎がリターの上に伸長し、リターがシバの広がりを抑制することにはなかった。被度及び乾物重には、有意な処理間差はなかった。茎葉重と根重の比（T/R比）は落葉リター区が対照区よりも大きく、落葉リターの存在により茎葉に対する根の割合が低下する傾向がみられた。

(2) シバ茎葉の窒素含有量、土壌の全窒素含有率及び含水率

7月のシバ茎葉及び土壌の全窒素含有量、土壌含水率を第6表に示した。シバ茎葉の窒素含有量は、処理間の差は小さいが、落葉リター区及び木炭区では対照区よりも高い傾向がみられた。土壌の全窒素含有率は処理の影響がみられなかった。土壌含水率は、対照区より落葉リター区及び木炭区で高い傾向にあるものの、有意な処理間差がなかった。

(3) 地温

シバが定着し、旺盛な生育を示す6月下旬から7月上旬において日照時間5時間以上であった3日間の地温の平均値を昼夜別に第7表に示した。日中の地温は、木炭区の値が最も高く、落葉リター区が低かったが、夜間の地温は落葉リター区が他の2処理区よりも高く、日中とは概ね逆の傾向がみられた。このため、昼夜温の差は落葉リター区の2.2℃に対して木炭区及び対照区ではそれぞれ5.2℃、5.0℃と大きかった。

第5表 各リター処理区のシバの被度と乾物重

処 理	被 度 (%)	乾物重(g/0.1m ²)			T/R ¹⁾
		ほふく茎+直立茎	根	合 計	
落葉リター	52a	25.8a (104)	3.3a (64)	29.1a (97)	7.9a
木 炭	60a	36.8a (148)	6.2a (120)	43.0a (143)	6.1ab
対 照	48a	24.9a (100)	5.2a (100)	30.1a (100)	4.8b

注1) 地上部（ほふく茎+直立茎）／根。

2) 異なる文字を付した処理間にはTukey法により5%水準で有意差有り。

3) 括弧内の数字は無処理に対する比率。

第6表 各リター処理区のシバのほふく茎及び直立茎の窒素含有量と土壌の全窒素含有率、土壌含水率

処 理	ほふく茎、直立茎	土 壌	
	窒素含有量 (g/ポット)	全窒素含有率 (%)	含水率 (%)
落葉リター	0.59	0.050	27.8a
木 炭	0.56	0.045	25.8a
対 照	0.53	0.047	19.3a

注) 異なる文字を付した処理間にはTukey法により5%水準で有意差有り。

第7表 各リター処理区の日照時間5時間以上の日の地温

処 理	日中 ¹⁾	夜間 ²⁾
	℃	
落葉リター	29.4	27.2
木 炭	30.7	25.5
対 照	30.3	25.3

注1) 7：00から18：00まで。

2) 19：00から6：00まで。

3) 1997年6月23、24、26日に測定した。

3) 考察

本試験でのかん水は、観察により土壌表面が乾燥している場合に実施する方法であり、7月の土壌水分には有意な処理間差はなかった。落葉リター区は他の処理区に比べて土壌表面が乾くことが少なく、かん水量は木炭区及び対照区よりも少なかった。落葉リター区は落葉が幾重に重なり合って土壌を覆っており、これによって土壌からの蒸発が抑制されたと推察される。前節の結果からシバは地下水位が20 cmで、平均土壌含水比が16%のような土壌水分が高い条件では、生育が劣ることが明らかになった。本試験で落葉リター区では対照区より根の生育が劣っており、土壌水分の過剰が根の生育を抑制した原因の一つである可能性がある。

リターからの窒素成分の供給について検討するために調査したシバ茎葉の窒素含有量は、落葉リター区で対照区よりも高かった。地表面のリターの存在は、窒素等の養分を自らの溶出あるいは分解により供給し、シバの生育に促進的に働くことが予想される。本試験で供試したリターの全窒素含有率は、木炭よりも落葉が高く、土壌の全窒素含有率も落葉リター区は対照区よりも高い傾向がみられ、リターから溶出した窒素がシバに吸収されたと推察される。また、シバ草地に施肥を行うとT/R比 (Top/Root) が高まるといわれており⁵²⁾、落葉リター区のT/R比が高かった一因として、リターから供給された窒素養分が影響したと推察される。

一方、木炭区については土壌の全窒素含有率が対照区よりも低かったが、対照区よりもシバ茎葉中の窒素の値が高く、木炭から窒素が供給され、シバの生育に影響した可能性がある。

リターはP、K、Ca及びMg等の成分を還元すると報告されており³¹⁾、また有機物分解時には植物の生育を阻害する物質である酢酸、乳酸、酪酸等の有機酸を生成するといわれているが⁸⁹⁾、これらについてもシバの生育に作用していた可能性が考えられ、今後検討する必要がある。

深さ3～5 cmの地温には日射の影響が強く作用するため、日照時間が5時間以上であった日について測定を行った。その結果、地温は、日中は木炭区、対照区が落葉リター区より高かった。木炭区と対照区の平均気温を比較すると0.4℃木炭区が高かった

が、最高気温は対照区の34.0℃に対して木炭区は35.0℃と1.0℃高かった。夜間は落葉リター区が他の2処理区よりも高かった。この原因としては、木炭と土壌との比重や吸水力の違いに伴う比熱の変化が影響したことと、本試験で供試した赤黄色土は赤色に近い土色であるのに対し、木炭区は土壌表面が黒色のため、日中は日射による温度の上昇が顕著であったことが挙げられる。落葉リター区はリターが土壌表面を厚く覆っていたが、葉や腐植は熱の伝導が悪いといわれており⁶⁾、地温の上昇が妨げられたと推察される。一方、夜間には落葉で被覆されていた処理区では熱の放散が抑えられて地温の低下が抑制された。

三田村ら⁴⁹⁾は、シバの幼植物の生育を昼温19～34℃、夜温14～29℃の範囲で調査したところ、昼温29℃、夜温24℃で最も生育が良好で、昼夜温の低下とともに生育が悪化し、特に根重の低下が著しかったと報告している。また、昼温34℃、夜温29℃の昼夜とも高気温の場合は呼吸量の増加が生育を抑制したとしている。本試験においては落葉リター区は、昼間の地温の上昇が低く、また夜間の地温が27.2℃と他の処理区よりも1.7～1.9℃高く、呼吸量が多かったと推察される。これらのことから落葉リター区では、晴天時の地温条件は生育に不利に働くことが明らかになった。しかしながら、曇天時の落葉リター区の地温は25.6℃と対照区の24.8℃よりも高く、生育期間全体では落葉施用による地温変化が生育へ及ぼす影響についてはさらに検討する必要がある。

以上の結果から、地表面のリターは土壌含水率及び地温といった土壌環境に影響を及ぼし、土壌への窒素の還元を通じてシバ茎葉の窒素含有量にも作用し、シバの生育に影響を及ぼすことが明らかになった。広葉樹の落葉は土壌含水率、昼間の地温の上昇の点でシバの生育条件として幾分不利に働くことが懸念されるが、シバの被度や生育量には明らかな抑制効果は認められなかった。三田村ら⁵³⁾は、播種したシバの定着と生育はリターの存在によって阻害されたと報告しているが、本試験のようにソッドの形態で移植した場合には生育への阻害作用は少なく、シバの植え付け時にリターを放置してもシバ植生の拡大を強く抑制する可能性は小さい。地表の落葉は降雨による土壌侵食を減少させるといわれてお

り⁸⁹⁾、除去しないほうが土壌保全上からも好ましい点もある。木炭については、シバの生育への有意な影響は認められなかったが、観察によりシバの茎葉及び根の生育は向上しており、生育の促進に有効であった。

本試験は前述したように現地試験で懸念される土壌水分の影響を軽減し、リターの飛散を防止するため、ガラス室内でのポット栽培下で実施した。したがって、実際の林床とは気温、地温及び日射条件等が厳密には異なる。特にポット内の地温は昼夜の差が大きいとされており⁸³⁾、温度の上昇に伴い増大するリターの分解⁸⁹⁾は実際の林床よりも大きく、このことがシバの生育に作用したことは否定できない。詳細な結果の検証は現地林床で行う必要があるが、落葉、木炭のシバの初期生育に及ぼす影響の一樣相は明らかにできたと考える。

4) 摘要

広葉樹の落葉リター及び木炭の有無がシバ苗の生育に及ぼす影響を土壌環境の変化と関連づけて検討した。

シバの茎葉（ほふく茎及び直立茎）の生育は、有意な処理間差はみられず、リターの存在の影響は認められなかった。根重は落葉リター区が低く、茎葉に対する根の割合は落葉の存在により低下した。シバ茎葉の窒素含有量は、落葉リター区及び木炭区とも対照区よりも高い傾向がみられた。土壌の含水率は有意な処理間差はみられなかった。日照時間5時間以上の日の地温は、日中は落葉リター区が対照区及び木炭区よりも低く、夜間は落葉リター区が高い傾向がみられた。したがって、地表面の落葉リターは地温の点でシバ苗の生育に不利に作用すると考えられたが、シバの地上部の生育への明らかな抑制作用は認められなかった。木炭は地温上昇効果がみられたが、シバ苗の生育への影響はみられなかった。

Ⅲ シバ植生の拡大に及ぼす管理方法の影響

1 シバ草地化の速度に及ぼす寒地型牧草の播種の影響

前章ではシバの生育に及ぼす立地環境の影響について明らかにした。ここでは、管理方法がシバ植生

の拡大に及ぼす影響について検討した。

植生の現存量が少ない場所を放牧を続けながらシバ草地を造成する場合、シバ草地化するまでの期間の放牧牛の飼料不足を回避するために寒地型牧草を造成時に混播し、牧草を先行して定着・繁茂させ、その後徐々にシバを定着・繁茂させる方法が考えられてきた。これまでにシバ草地の造成時における寒地型牧草の混播に関する研究^{53,61,62)}が行われ、シバと牧草の生育に適する施肥条件等が明らかにされてきた。しかしながら、これらの研究はシバが播種された草地で行われていることから、シバ苗の移植によるシバ草地の造成時に寒地型牧草を混播することによるシバ苗の広がりや生育が、シバの草地化の速度及び生産量に及ぼす影響については十分に調べられていない。また、これまでの試験の多くは冷涼な地域で行われてきた。中国地方の沿岸地帯のように、春から秋まで平均気温が10℃以上と温暖であり⁴¹⁾、7、8月には25℃以上となる地域においては、寒地型牧草の生育には夏季の高温が阻害要因となると指摘されており⁵⁹⁾、シバにとっては生育の旺盛な期間が長く、シバ草地化は冷涼な地域に比較して早期に進む。このため寒地型牧草をシバ苗の植え付けと同時に播種した場合、牧草の存在がシバの草地化に及ぼす影響も冷涼な地帯とでは異なると思われる。そこで、温暖地においてシバ草地を造成する場合の寒地型牧草播種の影響について、シバ草地化の速度及び生産量の点から調査した。

1) 材料及び方法

試験は、中国農業試験場畜産部内の標高約30mの圃場において、1995年3月から1996年9月に実施した。試験開始時における圃場の土壌（深さ5cm）の化学性は、pH（H₂O）が5.8、T-Nが0.088%、T-Cが0.97%であった。

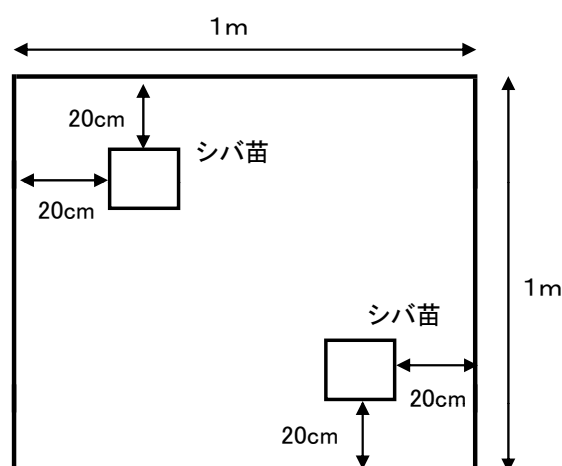
(1) 試験処理

シバ苗の植え付け時に寒地型牧草を播種しない無播種区と播種する播種区を設けた。播種区は6草種単播による処理区とし、マメ科のアカクローバ（*Trifolium pratense* L., 「Kenland」）、アルサイクローバ（*Trifolium hybridum* L., 「Tetra」）及びシロクローバ（*Trifolium repens* L., 「Huia」）の3草種とイネ科のペレニアルライグラス（*Lolium perenne* L., 「Friend」）、トー

ルフェスク (*Festuca arundinacea* Schreb., 「Kentucky 31」) 及びオーチャードグラス (*Dactylis glomerata* L., 「Aonami」) の3草種とした。

1 処理区の大きさを 1 m^2 ($1\text{ m} \times 1\text{ m}$) とし、処理区当たり基肥として複合肥料 (15-15-15) で N, P_2O_5 , K_2O をそれぞれ 4.5 g と苦土石灰 50 g を施用した。1995年3月20日に播種量をいずれの草種も 2 g とし、散播・鎮圧し、市販の $10\text{ cm} \times 10\text{ cm}$ の大きさのシバのソッドを張りシバ法により 1 処理区当たり 2 枚 (単位面積当たり 2 % の広さに相当) を第 3 図のとおり処理区周囲から 20 cm 離れた位置に対角線上に植付けた。2 反復の乱塊法で各区を配置した。

刈取りは、初年目 (1995年) は 6 月 14 日から 11 月 14 日の間、2 年目 (1996年) は 4 月 17 日から 8 月 21 日の間に各 7 回、地上 4 cm で行った。試験期間中に追肥は行わなかった。なお、処理区内に発生したシバ及び牧草以外の植物は適宜除去し、また、処理区外へ伸長したシバ及び牧草のほふく茎は切除した。



第 3 図 シバ苗の植付け地点

(2) 調査方法

刈取り後に処理区を 10 cm 間隔で 100 の格子状の区画に分け、シバが出現した区画数を調査しその割合を測定し、「シバの広がり度」とした。また、シバと牧草の被度を各刈取り時及び調査最終時の 2 年目の 9 月に測定した。さらに、刈取った生草をシバと牧草に分け 70°C で乾燥し測定し、それぞれ、乾物収量とした。

2) 結果

(1) シバの広がり度及び被度の推移

第 8 表にシバの広がり度の推移を示した。無播種区のシバの広がり度は、初年目のシバ苗植え付け後速やかに増加し、6 カ月後の 9 月には既に 80% を超え、2 年目の 5 月には 100% に達し、この間、いずれの播種区よりも有意に高く推移した。播種区では 2 年目の 5 月までは低い値で推移したが、その後いずれの処理区とも増加傾向を示した。9 月にはアカクロローバ区及びアルサイクローバ区では 100% に達し、シロクロローバ区が続いた。トールフェスク区やオーチャードグラス区では広がり度は低かった。

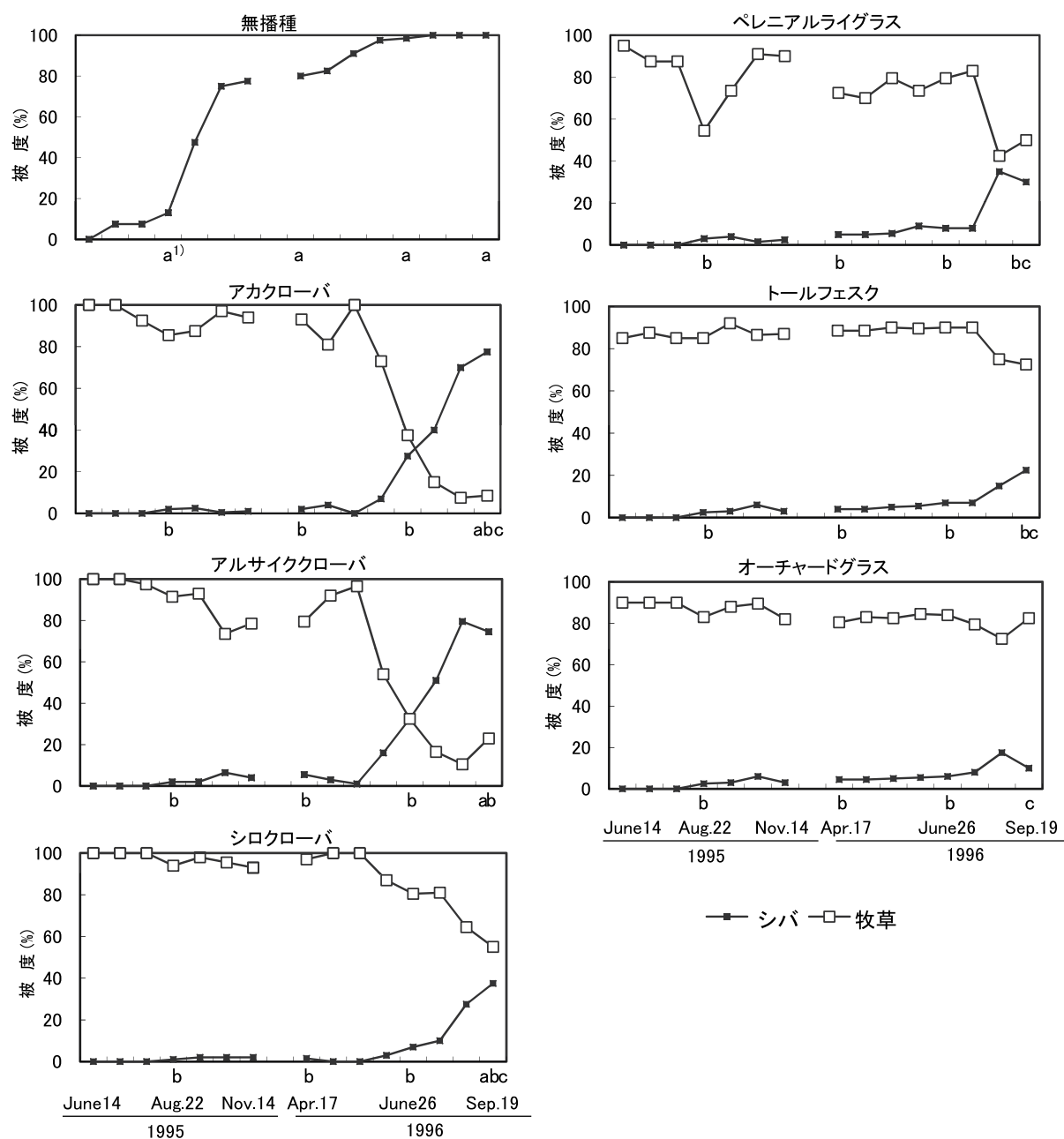
第 4 図にシバ及び牧草の被度の推移を示した。シバの被度は、無播種区では初年目の植え付け後の早い時期から徐々に増えていき、8 月下旬以降は急激に増加し、2 年目の 7 月中旬以降は 100% となった。一方、播種区では初年目にはいずれの処理区も低い値であった。しかし、2 年目にはアカクロローバ区とアルサイクローバ区で大きく増加し、9 月 19 日にはそれぞれ 77.5% 、 74.5% に達した。シロクロローバ及びイネ科の播種区では 40% 以下と低かった。牧草の被度は、初年目はいずれの処理区も 50% 以上であ

第 8 表 シバの広がり度の推移

播種草種	1995年		1996年		
	9月13日	11月14日	5月29日	7月17日	9月19日
	%				
無播種	80.5a	96.5a	100.0a	100.0a	100.0a
アカクロローバ	16.0b	19.0b	27.0b	71.5bc	100.0a
アルサイクローバ	18.0b	27.5b	38.0b	89.0ab	100.0a
シロクロローバ	12.0b	14.5b	16.5b	39.0c	91.0ab
ペレニアルライグラス	20.0b	23.5b	31.5b	48.0bc	87.0ab
トールフェスク	17.0b	21.0b	26.5b	36.5c	70.0b
オーチャードグラス	19.5b	21.5b	25.5b	39.0c	72.5b

注 1) アークサイン変換した後、Tukey法により統計処理した。

2) 同一日付間で異なる文字を付した処理間には 5% 水準で有意差有り。



第4図 シバ及び牧草の被度の推移

注1) アークサイン変換した後有意差検定を行った。

2) 異なる文字を付した処理間にはTukey法によりシバの被度に5%水準で有意差有り。

ったが、2年目にはアカクロバ区とアルサイクロバ区が大きく低下した。

シバの生育と牧草の被度との関連を検討するため、第9表に播種区の初年目及び2年目の時期別の牧草の被度と2年目の最終調査時である9月19日のシバの被度との関係を、また第10表に2年目の春～夏の期間の乾物収量を示した。2年目の6月～8月の牧草の被度と最終調査時のシバの被度には負の相

関関係がみられ、この時期に牧草の被度が低い播種区ほどシバの被度は高い傾向がみられた。また牧草の被度が低い区はアカクロバ区及びアルサイクロバ区であり(第4図)、この両区では6月中旬から8月下旬における乾物収量(第10表)はシロクロバ区を除く他の播種区よりも有意に少なかった。

第9表 時期別の牧草の被度と1996年9月19日のシバの被度との相関係数

1995年	r	1996年	r
6月14日	0.699*	4月17日	-0.021
7月5日	0.712**	5月2日	-0.021
7月27日	0.323	5月29日	0.465
8月22日	0.294	6月12日	-0.754**
9月13日	0.002	6月26日	-0.936***
10月12日	-0.334	7月18日	-0.909***
11月14日	-0.144	8月21日	-0.898***
平均被度	0.279	平均被度	-0.856***

注) ***, **, *:それぞれ $p < 0.001$, $p < 0.01$ 及び $p < 0.05$ 水準で有意。

(2) 乾物収量

第11表に各区のシバ及び牧草の乾物収量を示した。なお、2年目の収量は8月下旬までの値であり、秋の収量を含んでいない。無播種区では、シバ苗を植え付けた初年目のシバの収量は42 g/m²と少なかったが、2年目には396 g/m²となり初年目の10倍近くに増加した。一方、播種区のシバの収量は初年目にはわずかで測定できず、2年目でも処理区当たり7～97 gの範囲であった。播種区の中ではアカク

ローバ区及びアルサイククローバ区のシバ収量が多かったが、無播種区のそれぞれ13%, 24%にすぎなかった。牧草の収量を初年目と2年目で比較すると、アカクローバ区及びアルサイククローバ区で減少率が大きかった。

3) 考察

(1) 牧草の衰退とシバ草地化の速度

本試験で調査した広がり度はシバのほふく茎の伸長による個体占有面積を示し、また被度はほふく茎を母体とする直立茎の繁茂の状態を表すといえる。したがって、広がり度と被度からシバ地化の完成度を知ることができる。無播種区のシバの広がり度はシバ苗植付け6カ月後の9月には既に80%を超え、2年目の5月には100%に達した。また被度でも植付け7カ月後の10月には75%に達し、2年目の7月には100%となった。シバ草地を造成する場合、完全にシバ地化するには3、4年を要することが報告されている^{69, 100)}。本試験では、シバの植え付け後の土壌水分は十分であり、初期の活着に気象が好

第10表 牧草播種区における1996年春から夏の期間の牧草収量

播種草種	4月17日- 5月1日	5月2日- 5月28日	5月29日- 6月11日	6月12日- 6月25日	6月26日- 7月17日	7月18日- 8月21日
	g/m ²					
アカクローバ	81.7a	403.9a	50.3a	21.5b	5.4b	5.4d
アルサイククローバ	127.8a	293.4abc	26.1a	20.2b	6.2b	7.5d
シロクローバ	154.4a	339.0ab	48.7a	24.3b	32.6b	26.9cd
ペレニアルライグラス	90.5a	217.6bc	86.1a	83.0a	157.0a	77.3bc
トールフェスク	117.6a	241.2abc	43.4a	57.8a	135.7a	121.5ab
オーチャードグラス	92.0a	153.5c	75.2a	80.5a	122.5a	171.0a

注) 同一列間で異なる文字を付した処理間にはTukey法により5%水準で有意差有り。

第11表 シバ及び牧草の乾物収量

播種草種	乾物収量 (g/m ²)						減少率(%) ²⁾ (1996年:1995年)
	1995年			1996年			
	シバ	牧草	合計	シバ	牧草	合計	
無播種	42	－	42c	396a	－	396b	－
アカクローバ	－	1,669a	1,669a	52a	871a	923a	47.8ab
アルサイククローバ	－	1,296ab	1,296ab	97a	555b	652ab	57.3a
シロクローバ	－	1,287ab	1,287ab	44a	744ab	788ab	42.2ab
ペレニアルライグラス	－	1,356ab	1,356ab	13a	1,004a	1,017a	25.1ab
トールフェスク	－	926b	926b	30a	881a	911a	4.3b
オーチャードグラス	－	968b	968b	7a	887a	894a	8.4ab

注1) 同一列間で異なる文字を付した処理間にはTukey法により5%水準で有意差有り。

2) アークサイン変換した後、統計処理した。

条件であった。また除草も適宜行っている。このような条件において、牧草という競争相手が無い無播種区では、ほふく茎を伸長させ繁茂し、より短期間にシバ草地化を達成していった。一方、播種区の中では、シバの広がり度及び被度は2年目のアカクロローバ区、アルサイククロローバ区では5月以降に急速に増加した。しかし他の草種播種区では増える傾向にあるものの低調に推移しており、牧草播種によりシバの生育が抑制される傾向がみられた。播種区におけるシバ草地化の速さを左右する要因として、牧草によるシバに対する庇蔭^{10, 72)}、養水分の競合等⁶²⁾の影響がある。各播種区について、2年目の牧草生産量の減少率をみると、アカクロローバ区、アルサイククロローバ区で減少率の値が大きかった(第11表)。アカクロローバ、アルサイククロローバは永続性に乏しい草種であり、播種後年数を経るにしたがい減少しやすく、特に夏の暑さに弱く夏枯れを受けやすい^{29, 71)}。両草種の夏季の生産量の低下は、このことを裏付けている。試験期間中、初年目後半から2年目にかけでは降水量が少なかったが、この気象条件も牧草の生育には不適であった。このためアカクロローバやアルサイククロローバは2年目には衰退してしまい、シバにとっては競争相手が消滅し、裸地率も増えたため生育を高められたと考える。このように、播種区でも牧草が早期に衰退する条件がシバ地化には好ましいといえる。また、マメ科牧草は窒素固定を行っていたと推察され、試験終了時の土壌(深さ0~5 cm)の全窒素含有率はイネ科牧草播種区の0.087~0.094%と比較してマメ科牧草播種区では0.096~0.100%と高かった。したがって、アカクロローバ区、アルサイククロローバ区では窒素固定で付与された窒素がシバの成長を助長した可能性がある。

(2) 播種牧草の収量とシバ草地化

前記したようにシバ草地化には時間を要するとして、この間の草量不足や裸地を抑えるために、シバ草地造成時に牧草を混播する試みが行われてきた。本試験では、無播種区の乾物収量は初年目は42 gであり、播種各区の3~5%と極めて少なく、2年目でも396 gと播種各区の39~61%と少なかった。シバの収量に限ると初年目は播種区では痕跡程度に確認できただけであり、2年目でも播種区は無播種区

(396 g)の2~24%程度と少なかった。したがって、シバ草地化までの期間に草量を確保するという観点では無播種区が劣ることになる。

しかしながら、前項のようにシバ草地化の速度からみると無播種区が播種区よりも勝り、また播種区でも早期に牧草が衰退したアカクロローバ区、アルサイククロローバ区が優れた。本試験では、シバ草地化の対象地は林地の伐採跡地や強害草を防除するため除草剤を散布した草地のように野草植生が貧弱な場所を想定しているため除草を行った。また、年平均気温が14.6℃で、年間降水量が1,765mmの地域にあり、試験実施年の後半の降水量はやや少ない傾向にあったが、気温はおおむね平年並みであった。試験を実施した地域は冬季に積雪がみられるものの気候は温暖地に相当し、このような気象条件と雑草の少ない条件にあるシバ草地化の対象地では、春に牧草を播種せずに造成を開始すれば秋にはシバは生育を拡大し、次の年の夏(シバ苗植え付けから約1.5年後)にはほとんどシバ地化することが明らかになった。この速さはこれまでの報告の移植後2~3年⁶⁹⁾、移植後3~4年¹⁰⁰⁾よりも短かった。意識的にシバ草地造成を行う以上は、より短期間にシバ草地化することが求められる。本結果から牧草を導入しなければ短期間にシバ草地化が得られるため、草量確保を理由とした牧草の導入は逆に本来のシバ草地化を遅らせることになる。

なお、本試験ではシバ苗を面積比で2%を植え付けたが、適切なシバ苗の植え付け量についての検討が必要である。

以上のことから、本試験のような比較的温暖な地域では牧草の播種をしないことが、速やかにシバ地化が図れ、造成期間を短縮できるといえる。

4) 摘要

シバ草地造成時に播種した寒地型牧草のシバ草地化の速度及び収量に及ぼす影響について検討した。

シバ草地化は、シバの出現した区画の割合から求めた広がり度と被度により調べた。そのシバの広がり度及び被度は、牧草無播種区では早い時期から高く推移し、それぞれ植付け2年目の5月及び7月には100%に達した。一方、牧草播種区では植付け初年目は低く推移し、2年目に増える傾向がみられた

ものの、低調に推移した。植付け2年目の6～8月の牧草の被度と9月のシバの被度との間には負の相関関係がみられ、牧草の被度が低い播種区ほどシバの被度が高い傾向がみられた。シバの生産量は、無播種区では1年目は42 g/m²と少なかったが、2年目は396 g/m²と増加し、両年とも播種区を上回った。シバ草地化の速さは、牧草によるシバに対する庇蔭、養水分の競合等が影響した。したがって、草量確保のための寒地型牧草の播種はシバの生育には抑制的に働き、雑草が少ない条件でのシバの造成時には牧草を播かないほうが早期にシバ草地が完成するため、造成期間の短縮の点から望ましい。

2 シバ草地化に及ぼす導入後の放牧管理の影響

シバは放牧環境に適応した草種であり、家畜の踏圧や採食にも強いといわれている¹⁵⁾。放牧条件下では牧草は牛の蹄により踏みつけを受けるとともに、草地土壌の緊密化の影響を受けるといわれている⁶⁷⁾。しかし、シバの地下部器官は踏圧によってほとんど影響は受けなかったと報告されており²⁾、さらに、シバはほふく茎に再生のための養分を蓄積し⁸¹⁾、採食により頻繁に剪葉される連続放牧下でも良好な生育を示す。放牧による植物の生育への影響は複雑であるが、刈取管理と比較することにより、放牧管理の影響に関する知見を得ることができる。

そこで、移植したシバの生育及びシバ草地化に及ぼす放牧の影響を刈取管理と比較して、放牧牛の踏圧による土壌の物理性の変化や放牧牛の採食が他草種との競合に及ぼす影響から検討を行った。

1) 材料及び方法

試験は、1999年から2000年にかけて栃木県大田原市の中村牧場で実施した。試験地の概況及び試験方法は以下のとおりである。

(1) 試験地の概況

中村牧場の林地160 aのうち、アカマツ (*Pinus densiflora* Sieb. et Zucc.)、広葉樹及び雑灌木が混在し、林床にアズマネザサ (*Pleioblastus chino* (Franch. et Savat.) Makino) が繁茂する15 aを試験地として試験を実施した。試験地の傾斜度は平均5°の南向きで、土壌は黒色火山灰土で腐植に富んでおり、pH

は4.7であった。

(2) 試験処理

立木はアカマツ、ヤマザクラ等を主体に22本を残して間伐し、林床のアズマネザサを刈り払った。残存する立木の平均樹高は約13mである。間伐後の林床の相対照度は、1 m間隔に50カ所で測定し、平均69%であった。また、伐採木の搬出作業により、林床のリターが除去され、地表面が露出していた。1999年4月20、21日にシバ (品種：朝駆) のソッド20cm×15cmを1m²に1枚植え付けた。1999年8月12日に放牧区と禁牧して刈取管理を行う刈取区をこの林地内に設置した。1区の広さは8 m×8 mで、3カ所とした。1999年は、7月下旬から10月下旬まで、2000年は5月上旬～12月上旬まで黒毛和種成雌牛2～5頭を林地全体を1牧区として放牧した。放牧頭数は草量に応じて増減し、飼料が不足する時期は補助飼料 (乾草) を給与した。刈取区は1999年9月16日、2000年5月29日、7月14日、8月14日、9月6日に地上3 cmで刈取り、刈草は搬出した。なお、アズマネザサの再生がみられたため、1999年6月9日に放牧区を含む試験区全体の掃除刈りを行った。また、放牧区では9月16日にタケニグサ (*Macleaya cordata* (Willd.) R.Br.)、クマイチゴ (*Rubus crataegifolius* Bunge)、ヨウシュヤマゴボウ (*Phytolacca Americana* L.) 等を刈り払い、除去した。

(3) 調査方法

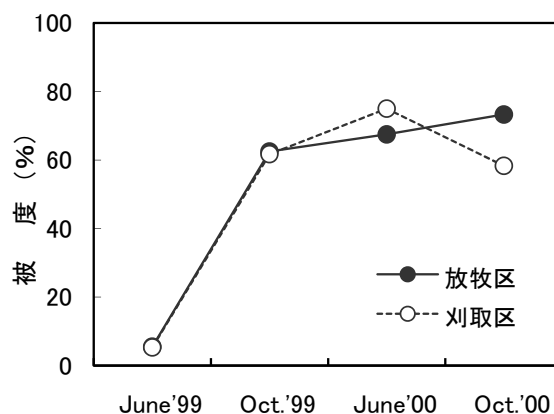
植生調査を6月と10月に1 m×1 mの固定コドラートを用いて行った。出現種の冠部被度と草丈を測定し、積算優占度 (SDR₂) を算出した。シバの根の生育を調査するため、1999年10月20日と2000年10月17日に放牧区及び刈取区とも1区当たり2カ所の土柱を掘上げ、水洗後70℃で乾燥して乾物重を測定した。土柱の大きさは1999年は縦、横20cm、深さ20cm、2000年は縦、横20cm、深さ30cmとした。土柱は地表から深さ、0～5 cm、5～10cm、10～20cm及び20～30cm (2000年のみ) の4層に切り分けて、根を水洗し、70℃で乾燥して根の乾物重を測定した。放牧と刈取りによるシバの根の活力の差異を明らかにするため、深さ5 cmまでの土層に含まれていたシバの根について、根の呼吸量を測定した。根の呼吸量

の測定は、酸素を飽和した30℃の蒸留水に根を浸し、酸素消費量を溶存酸素計（堀場製作所製、OM-14）を用いて測定した⁷⁾。さらに、放牧牛による踏圧が土壌の物理性に及ぼす影響を明らかにするため、1999年4月22日、10月12日、2000年10月6日に深さ15cmまでの土壌を採土円筒（容量100ml）を用いて採取し、三相分布を測定するとともに、山中式土壌硬度計を用いて深さ5、10、15cmの土壌硬度を測定した。なお、移動型のプロテクトケージ（1m×1m）を5カ所設け、1999年は5回、2000年は9回、ケージ内外の植物を地際から刈取り、シバとシバ以外に区分けして、乾物重を測定し、被食量を算出した。

2) 結果

(1) シバの生育及び植生

放牧区及び刈取区のシバの被度を第5図に示した。試験1年目の1999年は、6月から10月にかけて両処理区ともシバの被度が急速に高まり、10月には約62%になった。試験2年目の2000年は放牧区ではさらに被度が高まる傾向がみられた。刈取区は6月の値は放牧区よりも高かったものの、10月には低下した。これはメヒシバ等の草種が夏季以降繁茂し、シバを庇蔽したため、シバが部分的に衰退したためである。第12表に積算優占度（SDR₂）の上位5草種のSDR₂及び被度の推移を示した。1999年はアズマネザサが放牧区では2位であり、刈取区では4位であった。2000年6月は、両区ともアズマネザサの



第5図 シバの被度の推移

順位が2位であったが、2000年10月には放牧区で3位、刈取区では5位以下に下がった。メヒシバは、刈取区では1999年及び2000年6月にそれぞれ2位、3位であったが、被度は9%、2%と低かった。2000年10月に両区ともSDR₂が2位となった。この時期のメヒシバの被度は放牧区が8%、刈取区が25%であった。

放牧牛が採食した草種を明らかにするため、内外差法によって測定した放牧牛の被食量は、1999年は7月23日から11月10日までで1m²当たりシバが25.4g、シバ以外の草種が238.7gであった。2000年は5月10日から11月22日の間の調査で1m²当たりシバが71.4g、シバ以外が102.6gであり、シバの被食量は、試験1年目に比べて大きく増加した。

第12表 積算優占度（SDR₂）¹⁾の上位5種の推移

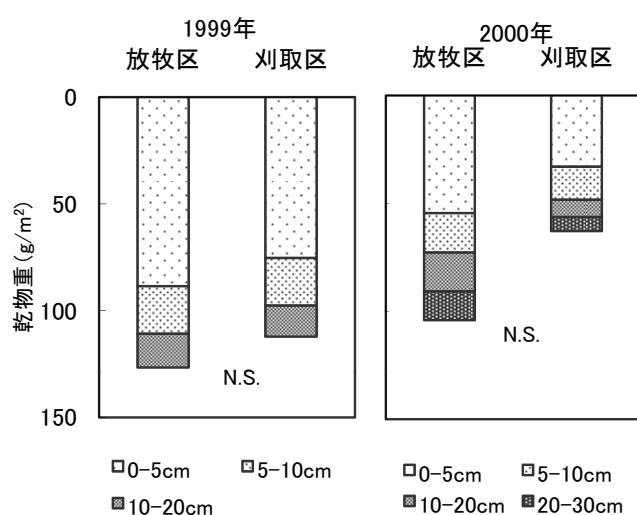
試験区	1999年10月			2000年6月			2000年10月		
	草種	SDR ₂	被度(%)	草種	SDR ₂	被度(%)	草種	SDR ₂	被度(%)
放牧区	1 シバ	90.1	62.5	シバ	79.6	67.5	シバ	100.0	73.3
	2 アズマネザサ	55.1	6.3	アズマネザサ	57.1	9.5	メヒシバ	52.5	5.5
	3 クマイチゴ	20.6	1.7	ニガイチゴ	15.5	0.8	アズマネザサ	47.7	7.8
	4 チヂミザサ	17.1	0.5	クマイチゴ	13.3	2.0	クマイチゴ	17.9	1.3
	5 ヌルデ	15.0	0.5	ヌルデ	12.9	0.7	ノゲシ	16.6	1.3
刈取区	1 シバ	100.0	61.7	シバ	100.0	75.0	シバ	85.3	58.3
	2 メヒシバ	54.2	8.8	アズマネザサ	40.4	1.7	メヒシバ	62.6	14.7
	3 チヂミザサ	41.0	2.2	メヒシバ	27.7	2.3	チヂミザサ	28.5	4.2
	4 アズマネザサ	28.0	1.0	ニガイチゴ	24.1	2.5	スズメノヒエ	20.1	1.2
	5 イヌビエ	18.5	1.0	チヂミザサ	19.4	5.5	キンエノコロ	14.8	2.2

注1) SDR₂ = (草丈比数H' + 被度比数C') / 2.

(2) シバの根の生育及び活力

第6図に1999年10月及び2000年10月に調査した根の深さ別の層別根重を示した。1999年は深さ20cmまで、2000年は深さ30cmまで調査した。全根重は、1999年及び2000年ともに両処理区間に有意な差はみられなかった。両処理区とも1999年に比べて2000年の根重が少なかった。この理由としては、1999年は移植したシバのソッド部分以外は、ソッドの形成が不十分であったため、移植部分を中心とした場所で調査しており、移植前の既存の根が含まれていたことによって値が高かった。これに対して、2000年は全体にソッドが形成され、移植部分が不明瞭であったため、新規にソッドが形成された部分での調査が含まれており、根重が前年よりも少なかった。土壌の深さ別の根の分布割合は、深さ0～5cmの根の割合が両処理区とも2000年に低下した。

シバの根の活力を検討するため、根の呼吸量を測定した結果を第13表に示した。根の呼吸量が多いほど根の活動が活発であり、活性が高いと判断できる。根の呼吸量は、1999年及び2000年とも放牧区よりも



第6図 シバの層別根重の推移

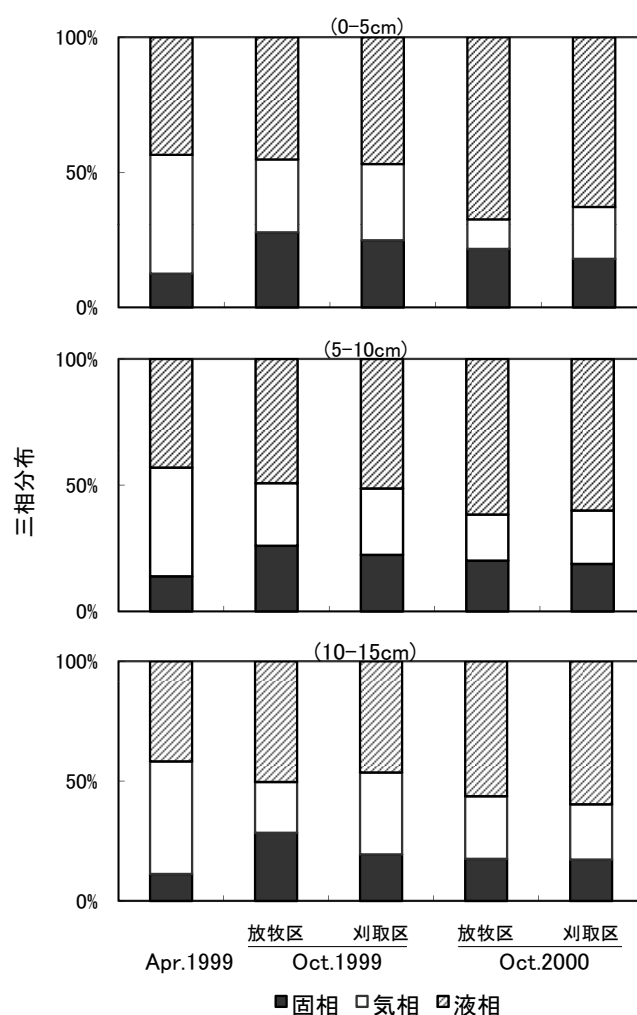
第13表 シバの根の呼吸量		
処 理	根の呼吸量 (mg/DMg/h)	
	1999年10月	2000年10月
放牧区	2.1a	2.4a
刈取区	2.9a	2.7a

注) 異なる文字を付した処理間にはTukey法により
5%水準で有意差有り。

刈取区が高い傾向にあるものの、処理間に有意な差はみられなかった。

(3) 土壌硬度及び土壌三相分布

放牧牛による踏圧が土壌の物理性に及ぼす影響を明らかにするため、土壌硬度を第14表に、土壌三相分布を第7図に示した。土壌硬度は、試験開始時の1999年4月には16mm以下であり、刈取区はその後17mm以下と低い値で推移した。一方、放牧区は深さ5cm及び10cmの硬度が高まった。土壌の三相分布は試験開始時の1999年4月には固相率が11.2% (深さ10～15cm)～13.9% (同5～10cm)と低く、気相率が43.1% (同5～10cm)～47.0% (同10～15cm)と高かった。放牧区及び刈取区とも次第に固相率が高まり、気相率が低下する傾向が認められたが、この傾向は刈取区に比べて放牧区で顕著であった。



第7図 土壌の三相分布の変化

第14表 土壌硬度の推移

処 理	深さ(cm)	土壌硬度 (mm)		
		1999年4月	1999年10月	2000年10月
放牧区	5	14.7	18.8	20.6
	10	15.5	19.6	19.1
	15	15.7	18.1	16.9
刈取区	5	—	16.9	16.6
	10	—	16.3	16.6
	15	—	16.7	16.1

注) 山中式土壌硬度計の指標値。

3) 考察

本試験では造成にあたって林床の枯葉等のリターは除去してシバを移植した。林地の伐採跡地ではリター層を除去すると越年性及び永年性の野草類が侵入し、増加すると報告されており⁶⁰⁾、リター層は物理的影響により草本類の侵入に抑制的に働くと考えられる。本試験ではシバの植え付け6ヶ月後の1999年10月の植被率が放牧区は75%、刈取区は84%と高かったが、これはリターを除去したことにより草本類の侵入を容易にした可能性がある。一方、シバの被度は、既存の試験⁶⁹⁾に比べて顕著に早く高まったが、この要因は本実験ではほふく茎の伸長が優れる品種「朝駆」³⁷⁾を用いたためである。

試験開始時に林床に繁茂していたアズマネザサは、刈取処理してからシバを植え付けたが、その後も旺盛な再生がみられたため、両区とも再度刈取りを実施した。その後は再生茎の草丈は低く、放牧牛が葉身を採食したため、生育が抑えられた。落葉広葉樹林を伐採し、ミヤコザサが優占した草地に播種法によりシバを導入するには、放牧による攪乱を加えてササを衰退させて1年生イネ科雑草が侵入してから播種するのがよいといわれている⁵⁰⁾。本試験では間伐し、アズマネザサを伐採してすぐにシバを導入したが、シバ植生の拡大は良好であった。これは放牧、刈取りによってササの生育が抑えられたためと推察される。

放牧区では放牧頭数の増減があったものの、春から秋に継続的に放牧されており、常に採食を受けていた。このような条件ではシバ以外の草種は草丈が低く抑えられることから、草丈が低いシバも十分な日射を受け良好な生育を示した。シバは短期輪換放牧及び連続放牧に適していると報告されており¹⁰⁾、

継続的な放牧条件で管理したことがシバの優占度を高めた一因である。これに対して刈取区ではシバが他の草種に庇蔭される期間があり、このことがシバの被度の低下を生じた。

放牧条件下では植物体は牛の蹄により約3 kg/cm²の踏みつけを受けるといわれている⁴²⁾。さらに、踏圧は、植物体自体への蹄傷による生育阻害のほかに土壌の緊密化をもたらして通気性、透水性を不良にし、根の伸長や養分吸収を阻害するといわれている⁶⁸⁾。しかしながら、シバは踏圧には比較的強いといわれており²⁾、シバ幼植物は、広い範囲の土壌硬度で正常に成長することが示されているほか⁵⁰⁾、適度な踏圧によって分岐茎数、節数、根数等が増加して密な芝生になるといわれている¹⁷⁾。また、シバのほふく茎は器械組織が発達しており、外力による損傷を最小限度にとどめる構造になっている¹⁶⁾。

本試験では根量、土壌の深さ別の根の分布割合及び根の活力には両処理区間に明らかな違いがみられなかった。土壌の物理性を土壌硬度と三相分布から評価したところ、両指標とも放牧牛による踏圧の影響がみられたものの、その程度は小さかったことから、シバの根の成長や根の活力にも影響が認められなかったと推察される。シバ草地では深さ約10～15 cm付近に硬盤層の形成が進み、造成後20年程度でシバ草地土壌生態系は安定するといわれており²¹⁾、今後放牧を継続することにより、土壌の緊密化が進むと予想されるが、シバ草地化には支障とならないと考える。

間伐した林床の光環境の経年変化について、アカマツ壮齢林では間伐後の急速な樹冠の発達はみられないといわれており¹¹⁾、アカマツが多い本試験地では急速に林床の照度が減少することはないと判断できる。したがって、ほぼ全面に広がったシバについては適切な放牧管理が行われていれば今後も植生が維持されると推察される。

本試験は他の試験とは異なり北関東で実施した。シバの生育は他の試験を実施した中国地方と北関東との間に違いがある可能性があるが、本試験での発生雑草がメヒシバ等の中国地方でも一般的な草種であり、土壌の物理性を介しての影響にも大きな違いがないと推察されることから、放牧及び刈取りの影響について、大きな違いはないと考える。

4) 摘要

間伐した林地の林床に移植したシバの生育に及ぼす放牧の影響について、刈取管理と比較を行った。移植したシバの生育は、移植1年目は放牧区及び刈取区とも差がみられなかったが、2年目は刈取区ではメヒシバ等のイネ科雑草が繁茂し、シバが抑圧され、部分的に衰退した。放牧区では採食や踏圧によりシバ以外の草種の生育が抑制され、シバの生育は良好であった。また、放牧区では表土の緊密化が認められたものの、シバの地上部の生育、根の生育及び生理的機能が抑制されることはなく、放牧条件下において約1年でシバが優占した。したがって、シバ草地化を計るためには、刈取管理よりも連続放牧による管理が適しているといえる。

Ⅳ シバを導入した遊休農林地の植生の変化

1 シバを導入した耕作放棄棚田の植生及び土壌環境の変化

これまでの試験において、シバの生育は地下水位20cmに比べて水位3cmでは顕著に低下すること、土壌の種類やシバの自生系統間で、高地下水位での生育に違いがみられたが、その差は小さいことが明らかになった。このため、地下水位の高い棚田跡地等へのシバの導入に当たっては、排水対策が不可欠であると考えられた。しかし、これまで水田跡地に牧草を導入した研究事例²⁷⁾はあるものの、棚田跡地にシバを導入して放牧利用した場合の検討はほとんどなされていない。

そこで本研究では、耕作が放棄され、灌木類及びイグサが優占する棚田跡地にシバを導入し、放牧管理した場合の土壌環境と植生の変化を3年間にわたり、調査した。

1) 材料及び方法

(1) 灌木優占地

中国農業試験場畜産部内の放棄後約60年経過した西向きの棚田跡地で試験を行った。試験地の土壌は赤黄色土で、面積は旧田面部が約15a、周囲の法面等を含めると約40aである。試験開始前の植生は、コナラ、カシワ (*Quercus dentate* Thunb. ex Murray)、アカマツ等の樹高2～4mの灌木類が優占し、下草に

はスゲ類 (*Carex* spp.)、イグサ (*Juncus effuses* L. var. *decipiens* Buchen.)、カヤツリグサ (*Cyperus microiria* Steud.) 等が生育していた。

1994年6月に灌木類及び草本類を刈払い、搬出した後、旧田面の周囲に深さ30～50cm、幅約30cmの排水路を掘った。6月17～20日にかけて市販のシバのソッド (品種不明) を約9×15cmに切り、旧田面部に1枚/m²を植付けた。植付法は、つるはしで浅く土を掘ってソッドの一部を埋め、土をかぶせて足で踏みつけた。

1994年7月18日から、試験地 (旧田面) と隣接する野草地を含む約1haに、黒毛和種成雌牛を放牧した。放牧方法は、1994年は10月21日まで6～15頭を年3回輪換放牧し、1995年は5月9日から10月30日まで、1996年は4月23日から10月27日まで3頭を定置放牧した。放牧強度は、500kgの成牛に換算して201 (1994年) ～389 (1996年) 頭・日/ha/年 (以下、カウデーまたはC Dという。) に相当した。1994、1995年には年数回、灌木類の萌芽を刈取り、ノイバラ (*Rosa multiflora* Thunb.) を掘取り、除去するとともに、1995年6月に全面を掃除刈りした。

調査は、1m×1mの定置コドラートを旧田面部に16カ所設置して行い、毎年9月中旬に出現植物の被度及び草丈を測定した。また、同時に50cm×50cmの移動コドラートを用い、旧田面部16カ所を地際から刈取り、草種別に分け、70℃で乾燥した後、乾物重量を測定した。1994年の6月と毎年9月には、山中式土壌硬度計を用いて旧田面部を6カ所、深さ0、5、10cmにおける土壌硬度を測定した。さらに、土壌硬度測定時に100mlの採土円筒を用い、0～5cm、5～10cmの深さの土壌を採取し、三相分布を測定した。土壌の試料は、100℃で乾燥後、ガラス電極pHメーターによってpH (H₂O) を測定するとともに、N-Cアナライザーを用いて全窒素及び全炭素含有率を測定した。

なお、1994、1995年の9月にはシバ定着個体の生育場所6カ所を選定し、20×20×20cmの土柱を掘り上げ、深さ0～5、5～10、10～20cmの土層に切り分けた。これらの土柱サンプルを水洗してシバの根を採取し、70℃で乾燥して根重を測定した。

(2) イグサ優占地

所内の耕作放棄後約60年の西向きの棚田跡地で同様の放牧試験を行った。土壌は灌木優占地と同じである。試験地は旧田面部のみで、面積は約3aである。試験開始前の植生は、イグサの被度が80%と高く、他にはスゲ類等が混在していた。1994年6月7日に茎葉処理除草剤（グリホサートイソプロピルアミン塩剤）を340ml/10a散布し、草本類が枯死した6月20日に刈払った後、搬出した。灌木優占地と同様の方法で排水路を掘り、6月21日に同様の方法でシバを植付けた。植付け直後から隣接する野草地（約3.5ha）とともに黒毛和種成雌牛を放牧した。放牧方法は、1994年は10月21日まで6頭、1995年は4月25日から10月17日まで6頭、1996年は4月23日から12月5日まで3頭を、それぞれ定置放牧した。放牧強度は500kg成牛に換算して193（1994年）～275（1995年）CDに相当した。1994、1995年に数回、ノイバラの除去を行うとともに、1995年6月に掃除刈

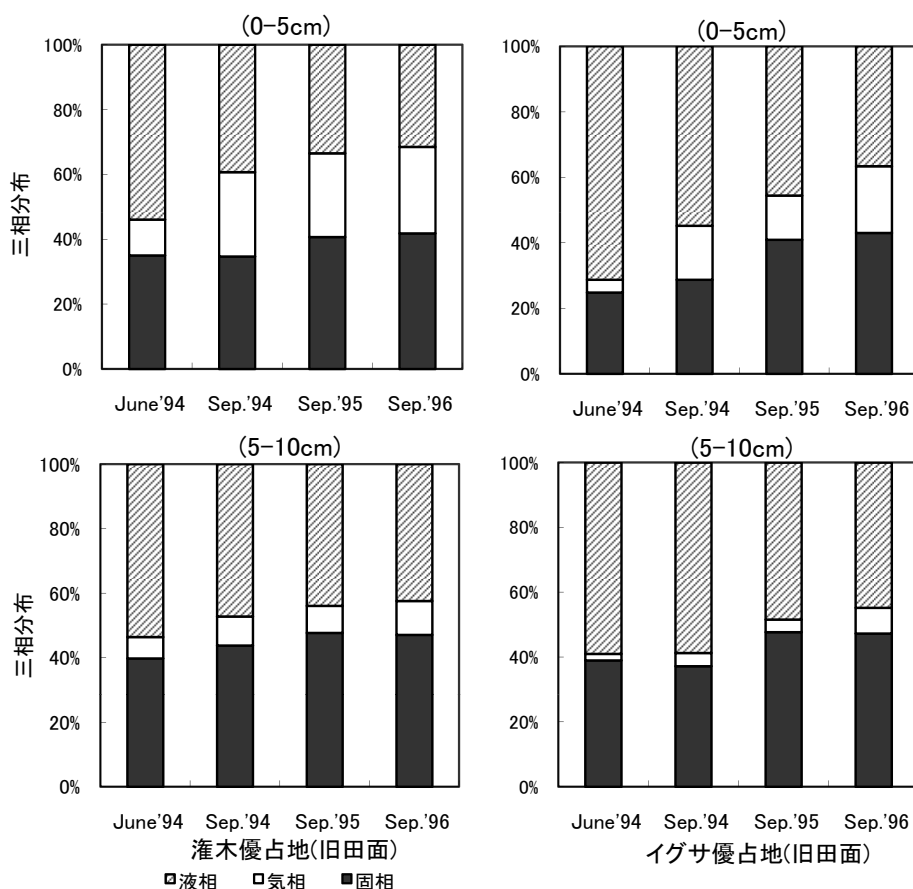
りを実施した。

調査は灌木優占地と同様の方法で、田面の出現植物の被度及び草丈、植物種ごとの現存量、土壌硬度及び三相分布、土壌pH、土壌の全窒素及び全炭素含有率、シバの層別の根量を測定したが、調査箇所数は、被度、草丈及び現存量の調査では4、それ以外のものは3とした。

2) 結果

(1) 土壌の理化学性

深さ0～10cmにおける土壌の三相分布の変化を第8図に示した。旧田面部では、0～5cm層、5～10cm層のいずれも、試験開始時には灌木優占地、イグサ優占地ともに液相が高く、特にイグサ優占地で71%（0～5cm）、59%（5～10cm）と著しく高い値を示した。その後、両試験地とも液相の割合は経時的に低下し、その度合いは0～5cm層の方で著しかった。それに対応し、固相または気相の割合は高



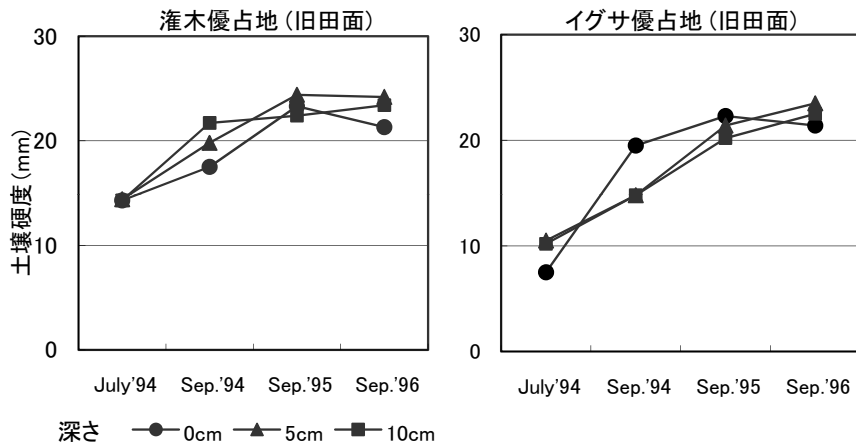
第8図 土壌の三相分布の変化

まる傾向がみられた。

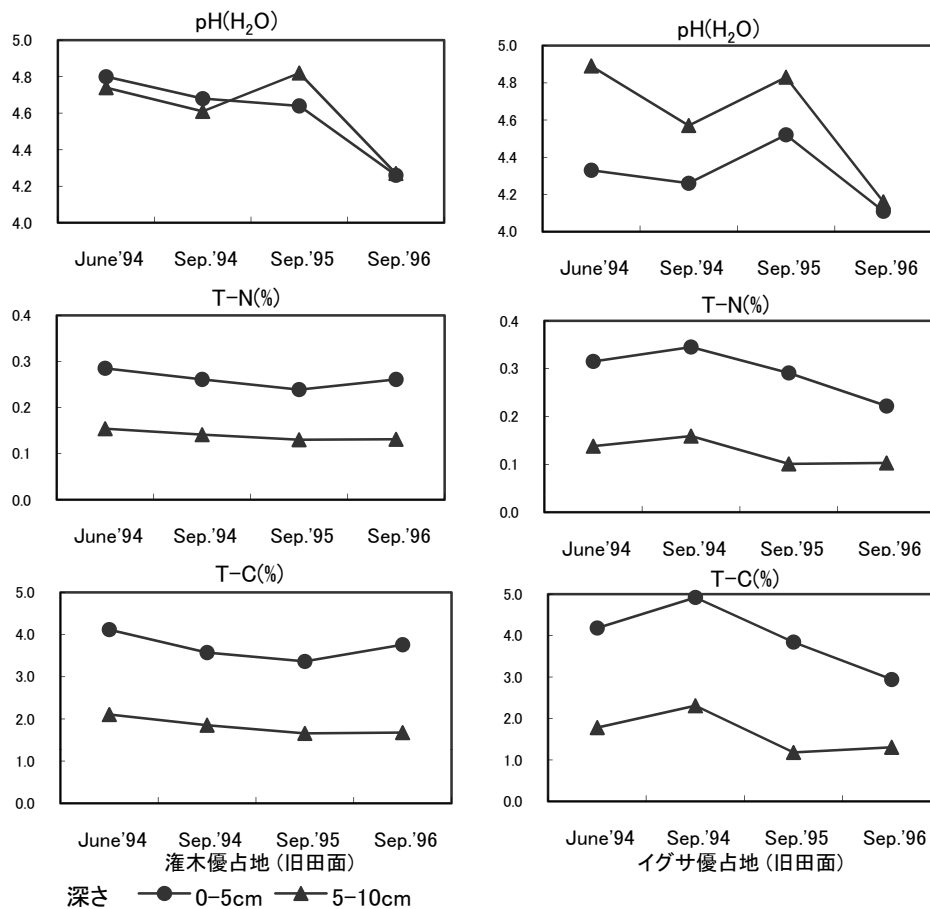
深さ 0～10cmにおける土壌硬度の変化を第9図に示した。試験開始時の土壌硬度は、灌木優占地の旧田面では14.3～14.4mmでイグサ優占地の旧田面では7.5～10.5mmであった。その後1995年の9月まで、各試験区とも土壌硬度が経時的に高まり、いずれも20

mm以上となったが、その変化の度合はイグサ優占地で特に顕著であった。1995年から1996年にかけては、いずれの試験区も土壌硬度に大きな変化はみられず、放牧開始後、1年以上を経過して安定した。

地下 0～10cmの土壌のpH及び全窒素、全炭素含有率の変化を第10図に示した。土壌pHは、試験開



第9図 土壌硬度の変化



第10図 土壌のpH (H₂O), T-N及びT-Cの変化

始時には4.3～4.9の範囲で、その後は各試験地とも概ね低下していく傾向が認められた。灌木優占地の土壌pHは、0～5 cm層と5～10 cm層の間に明らかな差はみられなかったが、イグサ優占地では1995年まで0～5 cm層のpHが5～10 cm層よりも明らかに低い値で推移した。しかし、1996年には差が見られなくなった。

土壌の全窒素含有率は、試験開始時には、0～5 cm層が0.29～0.32%、5～10 cm層が0.14～0.15%と、0～5 cm層で高い値を示した。その後はいずれの試験地も横ばいか、わずかに低下する傾向が認められたにすぎず、一貫して5～10 cm層よりも0～5 cm層で高く推移した。土壌の全炭素含有率は、試験開始

時には、0～5 cm層が4.1～4.2%、5～10 cm層が1.8～2.1%と全窒素含有率の場合と同様、5～10 cm層よりも0～5 cm層で値が高く、その後の推移も全窒素含有率とほぼ同様の傾向を示した。

(2) 植生及び現存量

灌木優占地及びイグサ優占地の主要な草種の被度及び植被率、裸地率の変化を第15表、積算優占地(SDR₂)を第16表に示した。シバを植えて3ヵ月後の1994年9月の灌木優占地とイグサ優占地の旧田面部におけるシバの被度は植付け時の被度1.4%に比べてほとんど変化がなかった。また、1994年は、灌木優占地では、ススキ (*Miscanthus sinensis*)、イ

第15表 主要草種の被度及び植被率、裸地率の変化

草 種	灌木優占地(旧田面)			イグサ優占地(旧田面)		
	1994	1995	1996	1994	1995	1996
(被 度)						
シバ	2.4	14.0	45.8	2.8	26.3	45.8
アブラガヤ	7.0	12.1	7.9	1.0	1.5	4.0
ススキ	7.6	2.2	2.0	1.0	0.3	1.0
ヤハズソウ	1.0	2.9	5.2	—	0.8	0.8
トウバナ	3.1	5.9	3.0	1.5	6.5	1.0
イグサ	1.6	1.1	0.6	2.5	4.0	5.8
ヒメクグ	—	—	0.2	3.3	1.0	5.3
スゲ類	0.3	5.7	2.4	—	6.8	0.8
ツボクサ	—	2.7	2.4	1.0	5.8	0.8
植被率	37.2	69.1	85.1	20.0	58.8	83.8
裸地率	68.1	36.6	20.3	85.0	46.3	22.5

注) 調査は旧田面部のみ、シバは1994年6月に植え付け、調査は毎年9月に行った。

第16表 積算優占地(SDR₂)¹⁾の上位5種の変化

灌木優占地(旧田面)		イグサ優占地(旧田面)	
草 種	SDR ₂	草 種	SDR ₂
(1994年)			
ススキ	100.0	イグサ	87.9
アブラガヤ	41.7	ヒメクグ	60.2
コナラ	37.3	シバ	56.8
トウバナ	22.1	ササガヤ	51.6
スズメノヒエ	17.6	ススキ	44.0
(1995年)			
アブラガヤ	93.2	シバ	68.6
シバ	68.0	イグサ	57.6
トウバナ	54.1	スゲ類	32.1
スゲ類	43.4	トウバナ	27.3
ヤハズソウ	39.7	アブラガヤ	25.7
(1996年)			
シバ	71.6	シバ	70.4
アブラガヤ	52.9	ダンドボロギク	50.6
ススキ	52.2	イグサ	50.5
キンエノコロ	39.8	アブラガヤ	39.8
ヤハズソウ	36.4	ススキ	25.4

注1) SDR₂ = (草丈比数H' + 被度比数C') / 2.

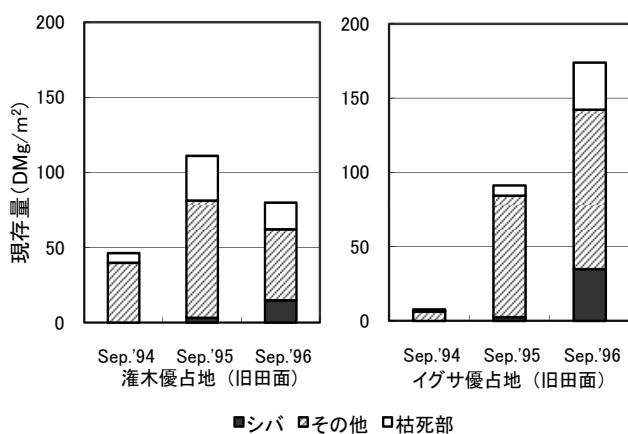
グサ優占地では、ヒメクグ (*Cyperus brevifolius*) の被度が最も高く、被度及び草丈から算出した積算優占地 (SDR_2) はそれぞれススキ、イグサが第1位を示した。1994年の植被率は、灌木優占地及びイグサ優占地の旧田面部とも40%以下であり、裸地の多い状態であった。

1995年になるとシバが広がり始め、シバの被度は灌木優占地の旧田面部では14.0%、イグサ優占地の旧田面部では26.3%となり、出現植物の中で最も被度が高くなった。また、他の草種も繁茂したため、両試験地とも植被率が著しく増加した。 SDR_2 からみると、イグサ優占地ではシバが1位となり、灌木優占地の旧田面部では、アブラガヤ (*Scirpus wicheri*) が1位、シバは2位であった。

1996年には灌木優占地及びイグサ優占地の旧田面部のシバの被度は、いずれも45.8%となり、シバが SDR_2 の1位を占め、また、植被率も80%を越えた。

3年間を通じて被度が増加する傾向にあった草種は、灌木優占地の旧田面ではヤハズソウ (*Lespedeza striata*)、イグサ優占地ではアブラガヤ及びイグサであった。

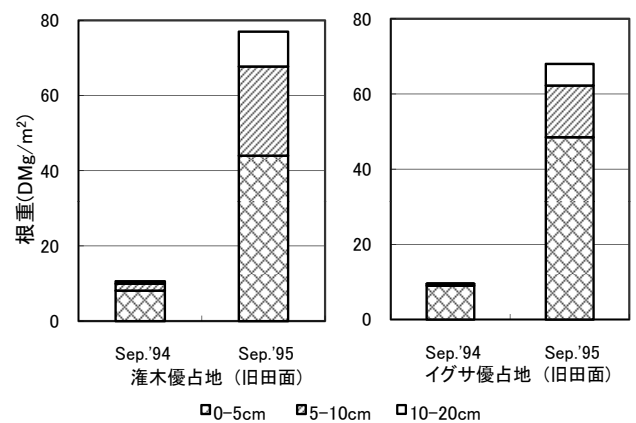
毎年9月の地上部現存量を第11図に示した。1994年の灌木優占地及びイグサ優占地の旧田面部の現存量は少なく、特にイグサ優占地の値はごくわずかにすぎなかった。両試験地とも1995年には現存量が大きく増加したが、シバの占める割合は2.8~2.9%と低い水準にとどまった。灌木優占地及びイグサ優占地の旧田面部とも1995年から1996年にかけてシバの現存量が大幅に増加したものの、全体に占める割合



第11図 地上部現存量の変化

はそれぞれ18.5, 20.1%にとどまった。一方、灌木優占地の法面の現存量は年次によって変動が大きく、また、シバはみられなかった。

1994年と1995年のシバの層別根重を第12図に示した。1994年は灌木優占地及びイグサ優占地の合計根重は10.6 g/m², 9.6 g/m²と少なく、特に深さ5 cmより下の根重はごくわずかであった。1995年には両試験地とも根重は77.0 g/m², 68.0 g/m²と著しく増加し、また、深さ10cm以下にも多量の根が伸長していた。



第12図 シバの層別根重の変化

3) 考察

棚田は、地形的条件から耕作放棄後も多湿である場合があり、放棄水田を放牧草地としてみると、すでに乾田化している場合には問題が少ないが、泥濘化を防ぐためにある程度の排水性の改善処理が必要である。本試験の対象地も周囲からの流入水があり、試験開始時の旧田面部は多湿な状態にあったため、明きょを掘り、排水に努めた。その結果、排水対策の効果が認められ、土壌の乾燥化が促進された。排水方法については、本試験では明きょとしたが、放牧牛の行動が制限されることはなかった。しかし、排水路が放牧牛の歩行等により崩れ、浅くなる場合もみられたことから、明きょにした場合は定期的に補修を行う必要がある。

本試験では土壌の物理性として三相分布及び硬度を測定した結果、経年的に旧田面部の土壌硬度と固相の割合が高まる傾向が認められた。これには土壌の乾燥化も関与しているが、放牧地では牛の踏圧に

よる土壌の緻密化が著しいことが知られており⁵⁸⁾、放牧牛の踏圧による影響が相当に大きかったものと推察される。トールフェスク草地では放牧に伴い、地下0～10cm層の固相が増加し、気相の割合が低下するとともに、硬度が急激に高まる傾向がある⁶⁷⁾。本試験では固相の割合及び硬度については同様の傾向がみられたが、気相の割合についても放牧開始後に増加する傾向がみられた。これは排水処理にともなう液相の急激な減少が結果的に三相分布における気相の増大に結びついたためであると推察される。土壌硬度は、放牧開始後1年以上を経過して安定した。

一方、土壌の化学性について、上述のトールフェスク草地の結果⁶⁷⁾と比較してみると、本試験の両試験地の土壌pHは、トールフェスク草地の値とほぼ同程度で、また、土壌の全窒素含有率及び全炭素含有率は牧草地の値よりも高く、特に0～5cm層で顕著な相違が認められた。水田土壌の全炭素及び全窒素含量は、休耕年数が増すにつれて増加するといわれており^{3, 66)}、本試験の試験地の全窒素及び全炭素含有率が高かったのは、休耕期間中に植物遺体が土壌に還元され、有機物が蓄積されたためと推察される。試験地の土壌の全窒素及び全炭素含有率は、経年的に横ばいか、わずかに低下する傾向を示したが、低下した理由は利用にともない、蓄積した有機物の分解が進んだためであると推察される。

耕作が放棄された水田は、土壌、地形、排水の良否、気象環境によっても異なるが、一般的にその地域の潜在植生に向かって遷移する⁵⁵⁾といわれ、休耕田では3年目頃から大型多年草雑草や山野草が侵入し始め、10年以上で完全に優占し、群落化する³⁾と報告されている。また、湿性の立地ではヨシを中心とする水湿植物が長期間優占するといわれている⁶⁴⁾。イグサ優占地は、土壌が著しく多湿であったためイグサが繁茂し、灌木優占地では部分的に乾燥地が存在していたため灌木類が生育していたと推察される。

本試験では、灌木優占地については、前植生を刈払い、搬出したのみであったが、イグサ優占地については除草剤の散布を実施した。これは、イグサが放牧牛にあまり採食されずにシバの生育を抑圧する危険性があったためである。除草剤の散布によって

イグサはほぼ姿を消したが、その一方で、裸地率が著しく高い状態で推移することとなった。「Ⅲ－1シバ草地化の速度に及ぼす寒地型牧草の播種の影響」において牧草の播種はシバの広がりを抑制し、早期のシバ草地化を図るためには、他の草種との競争がないほうが好ましいことが明らかになった。しかし、裸地率を高くすることは、土壌の保全や飼料の確保という点からは問題がないわけではなく、できるだけ前植生の抑圧には除草剤を使わないほうが望ましい。

シバは、土壌の硬度には耐性がある^{36, 50)}ものの、高地下水位及び日照不足に弱いといわれている^{36, 46)}。本試験において移植したシバの根重は、土壌硬度が高まった1995年に大きく増加しており、本試験地で見られた程度の硬度はシバの根の伸長を大きく阻害することはないと考える。また、シバが2年目以降急速に広がったのは、旧田面の土壌の乾燥化が進んだためと放牧牛の採食により他草種の草丈が低く抑えられていたためであると推察される。無追肥条件で放牧を毎年行くとシバ草地が形成されるといわれており⁵¹⁾、今後もさらに放牧を続けた場合、シバの被度がより高まると予想される。

なお、本試験では、シバの被度が高まった1996年においても、現存量中のシバの割合がかなり低い水準にとどまったが、これはシバが放牧牛により頻繁に強く採食され、低い草丈の状態であったためである。また、灌木優占地では経年的にススキの被度が低下する傾向がみられたが、これは放牧牛の採食の影響が再生力の弱いススキに大きく現れたと考える。

本試験では灌木類の萌芽の刈払い、イバラの除去を実施するとともに、不食過繁地が生じたので掃除刈りを行った。これらの作業は、植生や放牧圧によって程度は異なるものの、シバ導入後1～2年は必要であった。今後は、この期間のより省力的な施業方法を検討していく必要がある。

4) 摘要

耕作が放棄され、灌木類及びイグサが優占する棚田跡地の前植生を刈払い、除草剤散布によって抑圧し、排水処理した後、シバを導入し、放牧で管理した場合の土壌環境及び植生の変化を3年間にわたっ

て調査した。

シバを導入し、放牧管理することによって旧田面部では深さ0～10cmの土壌の液相の割合が減少し、固相または気相の割合が高まるとともに、硬度が急速に高まった。旧田面部の深さ0～10cmの土壌のpHは試験開始から約2年間、概ね低下する傾向がみられ、全窒素及び全炭素含有率は、横ばいかわずに低下する傾向がみられた。試験1年目は、旧田面部の植被率が低く、シバの被度も小さかったが、2年目からシバの被度が急速に高まり、3年目にはシバの被度が45.8%となった。旧田面部の地上部現存量は、試験1年目は少なく、特に除草剤散布区ではわずかであった。シバの現存量は2年目から3年目にかけて高まった。また、シバの根重は1年目から2年目にかけて著しく増加し、深さ10cm以下にも多くの根が伸長した。

2 落葉広葉樹林林床へのシバの定着に及ぼす立木による庇蔭の影響

放置された林地は、立木の成長が進む一方、間伐がなされないため、林内は暗く、林床植生の乏しい場所が多い。このような林地に林内放牧を行うと、短期間に放牧家畜の飼料草の不足を生じ、放牧牛への影響が大きく、また、土壌流亡等の問題も発生することになり²⁶⁾、長期の放牧は困難である。この低牧養力を改善するため、林床に寒地型牧草を導入し、飼料確保を目的とした試験が行われてきた。その結果、間伐度合いを強めるほど導入した牧草の収量が増加すること、また草種によって庇蔭条件下での生育に差がみられることなどが報告されている^{11, 88)}。さらに、林床植生を牧草に転換することにより、一時的に牧養力は向上するものの、牧草植生を維持するためには毎年施肥しなければならないこと、林内の寒地型牧草は硝酸態窒素含有量が高くなるため放牧家畜の嗜好性が低くなることなどの問題点が挙げられている¹²⁾。

一方、シバは日当たりの良い所では良好な生育を示すものの、庇蔭条件下では生育が低下することを、「Ⅱ-1」で示した。このことからシバを林床に導入する場合、既存林木の間伐が必須となるが、光環境の変化する樹林地におけるシバの定着・生育と間伐強度との関係は十分な解明がなされていない。

そこで、本試験では、落葉広葉樹林を間伐して、立木密度を変えた林床におけるシバの定着及び生育について、主に光環境の観点から検討した。

1) 材料及び方法

中国農業試験場畜産部内の4.1haの野草放牧地内にある落葉広葉樹とアカマツ等が混在する1.1haの林地内に試験区を設け、1996年1月から1998年10月まで調査を行った。試験地である林地は傾斜度が約20°の西向きの斜面と一部平坦面から成り、以前から隣接する野草放牧地とともに放牧が行われていたが、試験開始前の林内は暗く、林床植生は乏しかった。

(1) 試験方法

1996年1～2月に、試験地内の全てのアカマツを伐採し、落葉広葉樹に関して、強、中及び弱に間伐して、立木密度の異なる3処理区（疎区：30本/10a，中区：44本/10a，密区：63本/10a）を設定した。この立木密度の設定には広葉樹の大径木生産混牧林の施業²⁵⁾での立木密度20～40本/10aを参考にした。1区の面積は、40m×20mで、伐採木の殆どは処理区外に搬出したが、枝葉などの一部は処理区内で焼却した。試験地の立木の樹種はコナラが51%で最も多く、次いでエゴノキ（17%）、ヤマザクラ（15%）及びノグルミ（10%）が多かった。全樹種の平均樹高、平均胸高直径はそれぞれ9.1m、10.4cmであった。コナラは、平均樹高、平均胸高直径はそれぞれ9.8m、11.2cmと全樹種平均に比べて大きく、エゴノキは7.1m、6.8cmと小さかった。3月25～27日に処理区全面に対して15cm×15cmの大きさの市販のシバのソッド（品種不明）を1㎡当たり1枚の割合で植付けた。植付けは、土壌表層のリターを除去してソッドを置き、10cmのプラスチック杭で固定して行った。試験は1区制で行った。

試験地には、毎年4月下旬～12月上旬の期間に黒毛和種成雌牛3頭を周囲の野草地及び林地とともに定置放牧した。放牧強度は、500kg成牛に換算して1996年は166CD、1997年は143CDに相当し、1998年は最終調査時の10月29日までの期間で133CDであり、その後も放牧を継続した。放牧牛の行動調査（1996年と1997年の5月、7月及び9月に24時間連

続で調査) から, 試験地のある林地に家畜がいた時間は平均88分/日であり, 林内での採食時間は平均40分/日であった. なお, 伐採した落葉広葉樹の萌芽及び木本類等が繁茂したため, 1996年9月19日, 1997年6月13日, 8月7日及び1998年8月6日に掃除刈りを実施した. 刈払った枝葉等は放置した.

(2) 調査方法

a シバの活着及び生育量

1996年6月4日に各処理区内からランダムに選んだ100枚のソッドを対象に緑葉が存在するソッドの数を数え, 植付けたシバの活着率を求めた. また, シバの冠部被度(被度)について各処理区3カ所の固定したコドラート(1m×1m)において1996年6月5日, 9月10日, 1997年9月3日及び1998年10月28日に調査した.

実験終了時のシバの生育状況を把握するため, 1998年10月29日に各処理区4カ所ずつ, シバが生育している地点において縦10cm, 横10cm, 深さ10cmの土柱を掘り取り, 水洗して70℃で乾燥し, シバの全乾物重を測定した.

b 推定葉面積指数及び光量子束密度

各処理区全体の平均的な立木による遮蔽度合いを比較するため, 1996年10月30日及び1998年10月14日に, プラントキャノピーアナライザー(LI-COR社製, LAI-2000)を用いて地上約10cmで立木の推定葉面積指数(以下, ELAI)を測定した. 本装置は, 490nm以下の波長の光をセンサー部の魚眼レンズで測定し, 遮蔽のない場所での測定値と比較して太陽光の遮蔽度を算出した後, 放射移動モデルを用いて葉面積指数を算出する機構を備えており, イネ及びダイズ等での報告例がある^{92,93)}. 本試験では立木落葉樹の葉面積指数の実測値は測定していないため, 本機による葉面積指数の推定値には若干の誤差が含まれると推定される. しかし, 立木の遮蔽度あるいは林床の明るさの相対的比較には利用できると考え, 採用した. なお, 立木による林床の庇蔭強度は測定位置によって大きく異なると考えられるため, 各処理区とも10mの直線をランダムに5本とり, 直線上を1m間隔で測定し, 平均の測定値を用いた.

ELAIは林床植物の受光条件を決める指標となり

うと考えられるが, 林床に届く実際の相対受光量も林床の光条件を示す重要な要因と考える. そこで林内の特定の地点の一定期間内の相対受光量(相対光量子束密度)を1997年の4月15日～5月7日及び7月2日～31日の晴天日に, 光量子センサー(LI-COR社製, LI-190SA)を用いて測定した. すなわち, 各処理区3カ所の光量子束密度(以下, これを日射量と称する)について, 連続測定法⁴⁾により林外及び地上約10cmの高さでそれぞれ60秒間隔の24時間積算値を測り, 相対光量子束密度(以下, RPF Dまたはこれを相対日射量と称する)を求めた.

c 林床のリター量

1996年3月, 9月と1997年及び1998年の9月に各処理区とも, ランダムに1m×1mのコドラート枠を4カ所設けて, 土壌表層の未分解の落葉, 落枝等からなるリター層の部分を採取し, 70℃で乾燥した後, リター量とした.

2) 結果

(1) シバの活着, 生育及び植生の推移

第17表に各処理区に植付けたシバのソッドの活着率を示した. 活着率は, 疎区75%, 中区86%, 密区98%であり, 立木密度が高いほど高かった.

第17表 シバの活着率

処 理	活着率(%)
疎区	75
中区	86
密区	98

第18表に林床におけるシバとシバ以外の植物の被度の推移を示した. シバの被度は, 伐採年の1996年にはいずれの処理区も4%以下で推移したが, 1997年には, 立木密度に対応した増加を示し, 疎区では中区及び密区よりもかなり高くなり, 35%以上となった. 1998年10月には, 疎区ではほぼ60%に達したが, 他の区では30%以下にとどまった. シバ以外の植物の被度は1996年6月には28～38%であったが, 同年の9月にはいずれの処理区も50%以上に増加した. その後, シバ以外の植物は1998年10月には疎区では37%に低下したが, 中区及び密区では50%以上の高い値であった. なお, 主な草本類はスゲ類, ア

第18表 シバ及びその他の草種の被度の推移

処 理	草 種	被 度 (%)			
		1996年6月	1996年9月	1997年9月	1998年10月
疎区	シバ	1.7	3.0	36.7	58.3
	その他	38.0	61.4	54.9	37.3
中区	シバ	2.0	2.7	20.0	26.7
	その他	35.4	80.6	63.0	65.9
密区	シバ	2.0	3.3	15.0	28.3
	その他	28.1	55.6	70.1	58.5

第19表 シバの乾物重

処 理	乾物重 (g/m ²)
疎区	573 (413-882)
中区	514 (470-591)
密区	397 (360-470)

注1) 数値は平均値 (最小値-最大値)。

2) 地上部及び地下部の合計。

ブラガヤ、ヘクソカズラ (*Paederia scandens*) 及びトウバナ (*Clinopodium gracile*) であり、木本類はヤマツツジ (*Rhododendron obtusum*) 及びノグルミであった。

第19表に最終調査時である1998年10月29日のシバの乾物量を示した。疎区及び中区に比べて密区のシバの乾物重は少なかった。

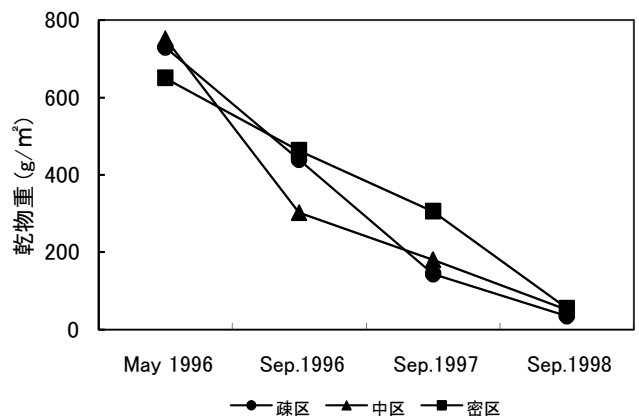
(2) 林床の光環境及びリター量

第20表に立木のELAI及び林床のRPFdを示した。伐採年(1996年)の10月のELAIは、それぞれ疎区0.40、中区0.74、さらに密区0.96と、全体に1以下の低い値を示したが、立木密度が高くなるほどELAIは高くなる傾向がみられた。伐採2年後の1998年10月にはいずれの処理区も伐採年に比べてELAIが高まり、この間の増加率をみると、疎区の23%に比較して中区及び密区ではそれぞれ49%、37%と高くなった。なお、いずれの処理区とも測定場所によってELAIにバラツキがみられた。

伐採翌年の1997年の林床のRPFdは、4月～5月

には疎区94.8%、中区90.6%及び密区62.4%と、相対的に高い値を示したが、7月では疎区83.4%、中区71.4%及び密区33.0%と、いずれの処理区も低下した。特に中区及び密区の立木が多い処理区での低下が大きかった。なお、各処理区の測定場所間の偏差は7月の密区で最大30%近くになった以外は小さく、概ね10%以内であった。

第13図に林床のリター量の推移を示した。リター量は立木伐採直後の1996年3月には650～753 g/m²であったが、9月には302～463 g/m²といずれの処理区とも半減した。その後リター量はいずれの処理区とも経年的に減少し、1998年10月には36～56 g/m²と試験開始時の10%以下となった。



第13図 林床のリター量の推移

3) 考察

(1) シバの活着率に及ぼす立木密度

本試験では3月下旬にシバの植付けを行い、その6月上旬の活着率は、立木密度が高い区ほど高い値を示す結果を得た。この原因としては下記のことが考えられる。立木密度が高い処理区では林内へ入射する日射量が相対的に少なくなり(第20表)、表層土壌からの蒸発が抑制され⁴⁾、土壌水分が保持され

第20表 立木の推定葉面積指数 (ELAI) 及び相対光量子束密度 (RPFd)

処 理	ELAI		RPFd (%)	
	1996年10月30日	1998年10月14日	1997年4月15日-5月7日	1997年7月2日-31日
疎区	0.40 (0.15-0.74)	0.49 (0.31-0.68)	94.8 (93.5-96.4)	83.4 (81.4-86.1)
中区	0.74 (0.58-0.94)	1.10 (1.02-1.18)	90.6 (88.1-92.5)	71.4 (66.1-75.6)
密区	0.96 (0.75-1.41)	1.31 (1.08-1.52)	62.4 (56.5-65.7)	33.0 (19.6-48.7)

注) 数値は平均値 (最小値-最大値)。

た結果、植付けたシバの活着が良好になった。平吉・松村¹⁵⁾は、シバ草地への庇蔭は1～2ヶ月間はシバの成長に好影響を与えた後、その後は成長を阻害したと報告している。本試験開始時の密区程度では、庇蔭によりシバの活着は阻害されず、むしろ活着のためには促進の効果があったといえることから、移植後2～3ヶ月目のシバ苗の活着についても、庇蔭による日射不足の影響は小さいと考える。中区、疎区では密区に比べ若干活着率が劣るものの後述するシバの生育状況から判断すると、4月に本試験並の雨量(47mm)が確保されるならば、シバの活着には支障は生じない。

(2) シバの生育に及ぼす林床の光条件

活着後のシバの被度は、疎区において、植付け2～3年目に著しく高くなった。中区、密区においても増加がみられたものの、その割合は疎区に比べ明らかに小さかった。また、立木による日射の遮蔽が少ない場所ほどシバの生育が良い傾向が認められた。さらに、最終調査時のシバの地上部及び地下部の生育量(第19表)においても密区・中区よりも疎区が優っていた。これらのことをELAIとRPFIDによる林床の光環境の観点から把握すると、次のように考察される。遮光処理はシバの生育を大きく阻害することが報告されており¹⁹⁾、立木による庇蔭割合の大きい密区・中区では、試験開始時には活着率は若干優れているものの、その後の発育段階においては光合成が抑制され、生育が劣った。一方、疎区においては立木のELAIが伐採年(シバ植付け年)の1996年の10月の測定時では0.40と低く、RPFIDにみられる林床の相対日射量は立木の展葉が十分完了した1997年7月でも平均値としては80%以上を維持していた。このように疎区の林床の受光条件は密・中区より優れており、疎区では林床のシバはかなりの日射を受けて、良好な生育を維持できたと推察される。

落葉広葉樹林の伐採後に発達するミヤコザサ群落では、シバ導入後、毎年無追肥条件で放牧を行うことにより、シバ草地が形成されるとの報告もあり⁵¹⁾、本試験でも放牧に加え、掃除刈りも行ったためシバと競合する木本や草本類の草丈が低く抑えられ、受光条件の良い疎区では、シバの生育が良好であった

と推察される。

移植によってシバ草地を造成する場合には造成1～2年目の雑草対策として年数回の掃除刈り、またはそれと同等のかなり強い放牧圧を必要とする⁶⁹⁾と報告されている。本試験では雑灌木の再生が観察されたため、放牧に加えて掃除刈りを年1、2回実施した。この掃除刈りがシバ草地化の促進に有効な影響を与えたと推察される。本試験で採用した程度の放牧強度、すなわち放牧家畜にダメージを与えない林内放牧においては、シバ草地化には掃除刈りが必要となる。

ところで、本試験の疎区でも立木のELAIは伐採1年目の10月の0.40から3年目の10月には0.49と増加した(第20表)。したがって、疎区においても経年的に立木の成長により、樹冠が閉鎖し、林床の光環境が悪化し、次第にシバの生育が衰えてくる可能性がある。このためシバ植生の維持にはその後の立木による庇蔭を抑えるために、さらなる間伐あるいは枝打ち等を必要とする。なお本試験においては、立木の成長に関する樹高及び胸高直径の調査は、試験開始後には実施していないので、樹木の生育に関する評価はできない。今後、間伐及び放牧が立木の成長に及ぼす影響について、長期にわたる調査が必要であり、シバ植生の維持及びシバの生産性、飼料成分と立木の成長による庇蔭強度の関係についても明らかにする必要がある。

本試験においては各試験区の庇蔭の度合いはELAIやRPFIDの平均値で示したが、その値は処理区の中でも場所によってかなり異なっていた。疎区においては、立木の間隔が広く空いており、また立木によって庇蔭される部分が一日のなかで時間とともに移動するため、長時間強く庇蔭される部分は少ない。そのため、試験終了時には被度58%に達し、概ね全面にシバが広がったものと推察される。これに対して中区及び密区においては樹冠が閉鎖し全く日が射さない部分と、立木から離れているため長時間日射を受ける部分が存在し、パッチ状にシバが広がった所もあった。このように処理区内においても光の条件等が不均一でシバの生育にもバラツキが観察された。しかし本試験では1区制しか試験区を設定できず、現地実証的な試験結果であり、その結果を複数の地点を調査して代表する値を平均値で示

し、結果を考察した。

(3) シバの生育に及ぼすリターの影響

林地の地表面には多量のリターが堆積している。これまでに15～20年生の落葉広葉樹林では、伐採跡地には、未分解の落葉が690DMg/m²、分解の進んだ落葉が2,240DMg/m²存在したとの報告もある⁶⁰⁾。本試験においても、試験開始には700g/m²前後のリターが存在したが、シバを植付ける際は植付け部分のリターを除去して行った。しかしながらその後、いずれの処理区とも時間の経過とともにリターは減少した。本試験地においては、立木から落葉により、毎年リターが供給されているものの、樹木の伐採時には地表面温度の上昇もあり、有機物分解が促進されたと考えられ^{31, 89)}、また、放牧牛による攪乱も加わり、供給量よりも分解量が上回った。しかし、本試験ではリターを除去した試験区は設けていないため、リターの存在が地温やシバの根及びほふく茎の伸長に及ぼす影響については今後の研究を待たねばならない。

以上のように、落葉広葉樹林の林床に植付けたシバの活着そのものには、供試した立木密度の範囲では立木が多いことによる阻害は認められなかった。しかし、活着後の生育は立木密度が低く、庇蔭が少ないほど良好となることは明白である。すなわち、シバ草地化が進んだ疎区では樹高約9mの立木が30本/10a存在し、伐採後3年目の10月の立木のELAIは0.49、2年目のRPFDFは立木の展葉後の7月の値が83.4%を維持していた。この程度の立木密度であれば、林床へのシバ植生の導入は、掃除刈りが不可欠ではあるものの、比較的容易である。

4) 摘要

落葉広葉樹林を間伐して3段階(30, 44, 63本/10a)の立木密度を設定し、林床に導入したシバの定着と生育の経過を3年間にわたり調査した。

シバの活着率は、立木密度が高く、庇蔭割合が大きい処理区ほど高い傾向が認められた。これは立木密度が高いほど植付け後の土壌の乾燥が抑制されたためであると推察された。シバの被度は、いずれの処理区も初年目には低く推移したが、植付け2年目

及び3年目になると立木密度の低い処理区ほど高くなり、立木密度30本/10a区では3年目の10月には58%に達した。植付け3年目の10月にはシバの生育量も立木密度が低い処理区ほど多かった。伐採年(シバ植付け年)の立木の推定葉面積指数(ELAI)は、処理区間の差は大きくないが、立木密度が高い処理区ほど高い傾向が認められた。また、いずれの処理区においても経年的に立木による庇蔭の割合が増加する傾向がみられた。ELAIの値は、本試験期間を通して、立木密度の低い処理区ほど小さい傾向にあり、林床の相対日射量も、伐採2年目7月の調査では立木密度30本/10aの粗密度区の林床では80%以上を確保し、他の中・高密度区より、林間の光透過率が良好であり、高い受光量であった。

林床のリター量は試験開始時に約700g/m²あり、2年後の10月にはいずれの密度区でも10分の1以下に減少した。また、処理区間の差はいずれの時期においても小さかった。

以上のことから、供試した立木密度の範囲ではシバの活着率は立木による庇蔭によって若干の差はあるものの、活着率の差がシバ植生の形成に及ぼす影響は認められない。シバ植生の形成において、重要なことはシバ活着後のほふく茎の伸張による被度の拡大であり、その活性を生み出す葉身による有機物の生産を高めること、すなわち光合成能力を高めることである。シバはC₄植物であることから、できるだけ高強度の光環境下での生育が望ましい。本試験においては、樹高9m程度の広葉樹林では立木密度30本/10aの疎林状態であれば、シバにとっての光環境としては実用上障害とならず、比較的容易に林床をシバ植生に転換できると結論された。

3 除草剤散布法及び刈払い法を用いたワラビ優占草地へのシバ導入法の検討

ワラビ(*Pteridium aquilinum* L.)は、放牧草地では一般的には不食草であり、牧草の再生力が過放牧や過少放牧などの不適切管理で低下してくると、繁茂してくる草地の強害雑草の一つである⁵⁷⁾。また、家畜の必要とする草量が不足してくると家畜がそれを採食し、中毒に陥ることがある¹³⁾。これは、汎骨髄癆といわれ¹³⁾、中毒成分としてプタキロサイドが挙げられ、造血臓器、特に骨髓の機能が障害され、

再生不良性貧血を発症する中毒である⁸⁷⁾。日本の中山間地域の草地及び林内草地には、この雑草が繁茂し、利用を中止させられた牧場も多い。このような荒廃草地の簡易更新には、精緻な管理利用を必要とする外来の牧草ではなく、日本の環境に適応し、家畜の放牧圧だけで維持可能な在来野草であるシバが有望である。シバとワラビとの関係については、それぞれの種の特性として次のように考察できる。

シバはほふく茎で網状にマットを形成し、物理的にワラビの出葉を抑えるという⁸⁰⁾ 利点もあるが、逆に、シバは庇蔭に弱く (Ⅱ-1 地下水位、日射条件及び斜面の方位・傾斜角度がシバの生育に及ぼす影響)、ワラビが優占した草地では、ワラビの茎葉に庇蔭されて地表面への太陽光の透過が少なくなるため、生育が抑圧される³⁶⁾ 可能性もある。これらの特性を考慮し、シバの導入に当たっては事前にワラビを十分に抑圧しておく必要がある。

これまでに、ワラビに対する除草剤としてアシュラム散布の効果が高いとされている^{56,79,99)}。刈取りによるワラビの抑圧に関しては、年3回、3年間の刈取りでは根絶しえないと報告されている⁷⁹⁾。しかし、これらの研究は、草地に侵入したワラビを抑圧することを主目的としたものであり、ワラビが既に優占してしまい、牧草類の植生がかなり消失した草地を対象としたものでない。そのような衰退草地では、ワラビの抑圧と同時に、新たな牧草の導入・定着を必要とするが、これに対応する研究は、これまでにみられない。

そこで、本試験ではワラビ優占地において、ワラビを抑制するとともに、新たにシバを導入し、植生の転換を目的とした。優占しているワラビの抑制法として、除草剤のアシュラムを散布する方法とワラビを刈払う方法 (刈払い法) とを採用し、比較した。さらに、それぞれの処理後にシバ苗を移植し、その定着及び生育を調査し、上記処理法の効果の評価を行った。

1) 材料及び方法

(1) 試験地

中国農業試験場畜産部内の4.1haの野草放牧地内のワラビが優占している地点を試験地とした。この放牧地は全体的に、西-南西向きに緩やかに傾斜し

ており、林地、シバ優占地及び牧草と野草の混在地を含んでいた。1995年5月の試験開始時のワラビの被度は70%、本数は47.5本/m²、草丈は51.9cmであった。

(2) 試験処理

処理区は、アシュラム散布区及び刈払い区を設けた。1区の面積は25m² (5 m × 5 m) で、2反復で配置した。

アシュラム散布区の処理量は、同剤 (37%液剤) のワラビに対する標準使用量 (370ml~555ml/10 a, 成分量) の下限である370ml/10 a (成分量) とし、10 a 当たり100 Lの水に希釈し、1995年5月18日に噴霧器で散布した。その後、ワラビが枯れ始めた6月5日に、シバの発芽・定着に障害が生じないように地上部を刈払い、搬出した。刈払い区は、1995年の5月~10月に計6回 (5月17日、6月19日、7月17日、8月17日、9月14日及び10月17日)、現存植生を地上約5 cmで刈払った。

1994年の10月12日に市販のシバのほふく茎をペーパーポットに移植し、ガラス室内で育成した。その苗を1995年6月9日に両処理区に50cm×50cm間隔で移植した。なお、移植は先端の尖った鉄棒で開けた穴にシバ苗を挿入し、足で踏みつけて行った。

(3) 処理区の管理

処理区には、黒毛和種成雌牛を1995年は6頭、1996年及び1997年は3頭を周囲の野草地とともに定置放牧した。放牧期間は1995年には6月2日から10月中旬まで、1996、1997年には4月下旬から12月上旬まで、とした。放牧強度は、500kg成牛に換算して143 (1997年) ~191 (1995年) CDに相当し、処理区内の植生が軽く採食される程度であった。処理区の周辺で繁茂するワラビの試験地内への侵入がみられたため、1996年には3回 (5月17日、6月2日及び8月16日)、1997年には1回 (5月2日)、これらの刈払いを実施した。

(4) 調査方法

各処理区1カ所の固定したコドラート (1 m × 1 m) のワラビの本数を時期別に計7回調査 (1995年は5月12日、7月17日、8月17日、1996年は5月17

日、8月16日、1997年は7月1日、9月24日)するとともに、シバ及びその他の出現植物の被度を年1回(1995年10月11日、1996年10月15日、1997年9月24日)調査した。さらに、移植したシバ苗の活着率を1995年7月12日に各処理区ランダムに選んだ50個体について調査した。

2) 結 果

(1) ワラビの消長

両処理区のワラビの本数の推移を第21表に示した。処理年の8月にはアシュラム散布区では2.0本/m²、刈払い区では12.0本/m²となった。アシュラム散布区では処理後1年目の1996年8月に14.5本/m²に増加したが、処理後2年目の1997年7月の発生本数は1.5本/m²と少なかった。刈払い区は処理後2年目以降減少傾向がみられ、1997年には発生がみられなかった。

(2) シバの活着及び植生の推移

移植33日後の1995年7月12日のシバの活着率とシバ、ワラビ及びその他の草種の被度の変化を第22表に示した。シバの活着率は、アシュラム散布区が74%と高く、刈払い区の49%を上回った。

シバの被度は、アシュラム散布区及び刈払い区では移植当年10月には、それぞれ1.5%、1.0%と低く、翌年から徐々に増加し、1997年9月には両処理区とも60%に達した。このことから両処理区とも、処理翌年以降、シバ草地化が速い速度で進行していると判断できる。これらと並行して、ワラビの被度は、アシュラム散布区では散布後、一旦増加した後、減少に転じ、1997年10月には1.5%にまで低下した。一方、刈払い区では処理後、ワラビの増加は全く認められず、1996年10月以降は0%となった。また、両処理区においては、処理年の1995年にはヒメスイバ (*Rumex acetosella*)、スゲ類、ジャノヒゲ (*Ophiopogon japonicus*) 及びヒメクグ等の既存植生の被度が70%以上に急増したが、その後減少傾向を示し、1997年秋には30%台に低下した。

3) 考 察

本試験の刈払い区では処理年内に6回の刈払いを繰り返しているが、このような度重なる茎葉の除去により、ワラビは再生のための地下茎の貯蔵養分を消耗した状態で年を越すことになった。処理翌年の1996年に3回、1997年に1回、管理的に行った刈払いは、これら衰弱したワラビ地下器官の貯蔵養分を

第21表 ワラビの本数の推移

処 理	1995年			1996年		1997年	
	5月12日	7月17日	8月17日	5月17日	8月16日	7月1日	9月24日
	本/m ²						
アシュラム散布	43.5a	0.5a	2.0a	6.0a	14.5a	1.5	1.5
刈払い	51.5a	15.5a	12.0a	2.5a	1.5a	0	0

注) 同列内の異なる文字を付した処理間にはTukey法により5%水準で有意差有り。

第22表 シバの活着率とシバ、ワラビ及びその他の草種の被度の変化

処 理	草種	活着率 (%) ¹⁾	被度 (%)		
		1995年7月12日	1995年10月	1996年10月	1997年9月
アシュラム散布	シバ	74a	1.5	7.5	60.0
	ワラビ		2.5	16.5	1.5
	その他 ³⁾		76.0	63.5	31.0
刈払い	シバ	49a	1.0	17.5	60.0
	ワラビ		2.5	0.0	0.0
	その他		71.5	70.0	35.0

注1) アークサイン変換した後有意差検定を行った。

2) 異なる文字を付した処理間にはTukey法により5%水準で有意差有り。

3) 主な草種はヒメスイバ、スゲ類、ジャノヒゲ、ヒメクグ及びオオアレチノギク。

一層消耗させる結果となり、ワラビ個体は消滅していったものと推察される。

アシュラムは、ワラビの若齢葉に対して除草効果が高いとされるが⁹⁹⁾、本試験での5月18日の処理は若齢葉の多発時に該当し、そのため、十分な除草効果が得られた。しかし、アシュラム処理区では、処理直後にはワラビは速やかに薬剤により抑圧されるものの、地上部は若干、生き残っていた(第21表)。このことは、散布薬液の付着を免れたか、付着しても生理生化学的機構によりその除草効果が及ばなかったものであるが、いずれにせよ生き残ったワラビ個体が存在することを示している。これら、アシュラム処理後も生き残ったワラビは、処理された当年はそれ以上刈払いを受けないため、越冬前に地下茎の貯蔵養分を一定程度、増加させることが可能であったと推察される。そのため、処理翌年以降は刈払い区と同じ数回の刈払いを受けるとはいえ、刈払い区のように完全に消滅するには至らなかった。

シバの活着率は、アシュラム散布区が74%と高く、刈払い区の49%を上回った。この時点(1995年7月12日)の刈払い区のワラビの本数は15.5本/m²と、依然高水準を維持しており(第21表)、ワラビとの競合の影響を受けた可能性が大きい。一方、アシュラム散布区では、アシュラム処理によりワラビ密度が著しく減少した後にシバが移植されるため、ワラビとの競合が少なかったといえる。このようなシバ移植直後のワラビの残存量の違いが起因して、アシュラム散布区の活着率が刈払い区より高くなったと推察される。

シバの被度は、アシュラム散布区及び刈払い区とも徐々に増加し、1997年9月には60%に達した。シバの被度の動きについては、以下のように考察される。本試験期間中、両処理区においては家畜(牛)が放牧されていた。また、観察では植生の群落高は2.5~17.5cmと低く推移していた。このことから、処理直後にはワラビの減少に伴う光環境の好転により、ワラビを除く既存植生は生育空間が広がり、生育が促されると同時に、家畜に採食される機会が増大した。その際、地表近くにあるシバも一部は同様に採食されることになるが、これらの既存植生に比べてシバは放牧に強く¹⁵⁾、生育が抑えられることはほとんどないとみてよい(Ⅲ-2 シバ草地化に及

ばす導入後の放牧管理の影響)。このようにして、シバの受光条件は時間の経過とともに一層良好となり、2年目には急激に生育し、優占度を高めたものとする。なお、両処理区とも、前記したように主処理を行った翌年以降にも数回の刈払いを行っている。この処理は放牧条件下にあっても翌年以降に生き残ったワラビや再生してくるその他の植生の除去及び試験地周囲から侵入するワラビの抑圧を目的として行ったものである。そのため、厳密には本試験ではアシュラム処理区はアシュラムの処理及びその後の刈払い処理の効果も含むことになる。

なお、本試験では、アシュラムは成分量で370ml/10a施用したが、梨木ら⁵⁶⁾は成分量で350ml/10aで効果がみられたと報告しており、本試験の結果はこの報告と概ね一致した結果であった。

以上のように、ワラビ優占地にアシュラム散布または刈払いを行った後に、シバ苗の移植を行い、その後の掃除刈りと放牧管理することにより、ワラビの再発を抑え、シバ草地化することが可能であった。なお、一旦、シバが優占し、ほふく茎がマット状に広がった後は、ワラビの出葉が抑えられるので、掃除刈りを繰り返す必要性は少なく、通常の放牧管理を継続すればシバ植生は十分に維持されると判断される。

4) 摘 要

ワラビ優占地にアシュラム散布または刈払いを行った後に、シバ苗の移植を行い、その後の掃除刈りと放牧管理を行い、ワラビの消長とシバの広がりについて検討した。

アシュラム散布区では、ワラビは処理により抑圧された後、処理翌年に増加したが、処理後2年目の発生本数は少なかった。刈払い区では、ワラビは2年目以降減少し、3年目は発生がみられなかった。シバの活着はアシュラム散布区よりも刈払い区で低く、ワラビの競合の影響を受けた。シバの被度は処理翌年から増加し、3年目には両処理区とも60%に達した。アシュラム散布区及び刈払い区ともワラビの発生を抑制し、シバ植生の優占化に有効に作用したが、1年間に6回の刈払いを行うことは、労働力が弱体化した中山間地域の農村の現状から困難であ

り、アシラム散布による方法が現実的である。

V 総合考察

我が国において輸入飼料に依存しない低コスト肉牛生産を行うためには放牧飼養を取り入れることが有効な方法の一つである。さらに、過疎化、高齢化が進行している中山間地域においては、増加している遊休農林地の植生管理を兼ねた利用技術として肉用牛の放牧が省力的で現実的な方策である。

遊休農林地を放牧利用するにあたっては、傾斜地が多い中山間地域では植生を放牧に適した草種に転換することが、土壤保全の観点からも重要である。放牧用の草種として、従来は寒地型牧草が主体に用いられてきたが、温暖地においては夏枯れによる植生の悪化が生じることから、センチピードグラス等の暖地型草種が取り上げられるとともに^{18, 47)}、一部の地域で利用されてきたシバが見直されている。シバは、寒地型牧草と異なり無施肥で管理でき、更新等の必要がない²¹⁾ことから省力的かつ低投入な管理が可能である。これまでシバについては生態学的な植生遷移に関する研究^{39, 51, 94, 95, 96)}や短期間に造成する研究^{32, 70, 75, 76, 77)}が行われてきたが、多様な中山間地域の立地環境に応じた造成技術に関する詳細な研究は見られない。

シバにおける放牧方法として集約的な輪換放牧よりも粗放的な定置放牧が適していることから、広い面積を1牧区として管理する方法が望ましい。そのため、中山間地域では耕作放棄された棚田跡地とともに、その周囲に存在する林地や野草地を一体的に利用することにより、広い面積の放牧地を確保することが可能になる。その場合、林地は間伐を行って林床にシバを導入し、野草地は有毒なワラビを防除することで、安全かつ土壤保全的な放牧利用が可能になる。また、放牧地内に林地が存在することにより放牧家畜の庇蔭林としての役割も期待できる。さらに、広葉樹林地については残存木数を200~400本/ha程度に間伐して放牧利用しながら、大径木を生産する方式が提案されており²⁵⁾、家畜生産以外の生産が見込める可能性がある。

以上のような背景から、本研究では中山間地域の遊休農林地にシバを造成することを目的として、始

めにシバの生育に及ぼす立地環境の影響を検討し、地下水位、庇蔭割合、斜面の方位・傾斜角度、地表のリターの影響について明らかにした。次に管理方法がシバ植生の優占化に及ぼす影響としてシバ苗植栽時の寒地型牧草の播種の影響及び放牧管理の影響について明らかにした。さらに、得られた知見を基に耕作放棄棚田、広葉樹林地、ワラビ優占地にシバの定着・生育が向上すると考えられる処理を行ってからシバ苗を導入し、放牧管理することによるシバ草地化の可能性について、実証的に試験を実施した。以上の試験で得られた結果から、立地環境の変化とシバ草地化との関係について検討を加えて取りまとめた。

1 シバの生育に及ぼす立地環境の影響

棚田等の水田跡地は、放棄後も地下水位が高く、土壤が過湿である場合が多い。そこで、シバの生育と地下水位との関係について調査を行った。その結果、シバの生育は、地下水位20cmで栽培した場合に比較して同3cmの場合（過湿条件）、顕著な低下がみられた。土壤別では、赤黄色土よりも黒ボク土での栽培のほうが過湿による生育低下が著しかった。また、過湿条件下の生育に関して、シバの自生系統間には明確な差異は観察されなかった。これらの結果より、地下水位の高い場所へのシバの導入には、排水対策が不可欠であると判断された。

放牧対象林地が、斜面に立地し、林床内が低日照の場合には、林木の伐採が必要となるが、斜面の崩壊を防ぐ観点から、樹木の皆伐は避け、間伐を実施する必要がある。その後、明るくなった林床にシバを導入することが望ましいと想定される。また、中山間地域では、日当たりの悪い谷間の圃場が放棄されている光景が随所に見られる。上記の林床や谷間の圃場等においては、日射強度の低減及び日照時間の短縮が生じている。これらの地域へのシバの導入を考える場合には、シバと日射量との関係を明らかにしておく必要がある。そこで、庇蔭割合がシバの生育に及ぼす影響を調査した。その結果、終日弱い庇蔭処理（林床の相対日射量37.2%）を加えた処理区及び東西面からの日射を遮断した処理区では、終日強い庇蔭処理（相対日射量26.4%）を加えた処理区よりも生育低下割合は小さかった。また、庇蔭処

理による生育反応にはシバの系統間差異がみられた。これらの結果から、庇蔭割合が高い場所ではシバの導入にあたっては、日射環境を改善する必要があることが明らかになった。

中山間地域においてシバの導入対象地は、水田跡地を除けば傾斜地が多い。そこでシバを斜面に植付け、方位・傾斜角度と生育との関係について調査した。その結果、シバの生育は急斜面（27°）よりも緩斜面（15°）で良好であった。また、方位の違いでは東向きや西向きより南向きで良好であった。また、斜面に生育するシバのほふく茎の伸長方向性は、上向きより下向きが優位であり、傾斜角度が高いほどその傾向が強まった。これらの結果から、シバの導入には緩斜面が適しており、南斜面でシバが優占しやすいことが明らかになった。また、傾斜地でのシバの増殖に当たっては、傾斜地上部から下部へ伸長させるように苗の配置を考慮すべきであるといえる。

林床にシバを導入する場合、林床にはリターが厚く積もっていることが多い。また、間伐材や脱落した枝葉を林内において集積し焼却処理することも想定され、その場合には地表に多量の炭や灰が残ることになる。これらのことを想定し、リターや炭が移植したシバ苗の生育に及ぼす影響について検討した。その結果、シバ根部の生育はリターの存在で低下するものの、シバの茎葉部の生育には差異は認められなかった。地温は、日中にはリター区が無リター区及び木炭区よりも低く、夜間にはリター区が高い傾向がみられた。このような違いはみられたが、いずれにせよ、シバ地上部の生育への明確な差異は認められず、本試験からはリターの有無の功罪は結論できなかった。木炭も地温上昇効果がみられものの、シバ苗の生育への影響はみられなかった。以上より、林内の既存リター量の有無や間伐材の焼却により発生する炭灰の存在は、導入シバの定着・生育に大きな影響を及ぼすことはない結論される。

2 シバ草地化に及ぼす管理方法の影響

シバ草地の造成には、長期間を要するため、植生の現存量が少ない場所に放牧を継続しながらシバ草地を造成する場合、シバ草地化過程における放牧牛の飼料不足が発生する。そこで、シバ苗の植付け時

に寒地型牧草を同時に播種し、牧草を先行して定着・繁茂させ、その後徐々にシバを定着・繁茂させる方法を検討した。その結果、牧草無播種ではシバの広がりが早く、植付け2年目には被度が100%に達した。一方、牧草を播種した場合には、シバの被度は、10~77.5%と低く推移した。牧草播種区において、試験区の牧草の被度と最終調査時のシバの被度との関係をみたところ、植付け2年目の6~8月の牧草の被度とシバの被度との間に負の相関関係がみられた。したがって、草量確保のための寒地型牧草播種は、シバの生育に抑制的に働くので、既存植生に雑草が少ない条件下では、実施しないほうが、早期にシバ草地が完成する。これは、造成期間の短縮を図り、シバ草地化の欠点を補う視点から好ましい。

遊休農林地にシバ苗を移植した後は、既存の種との競合下で、放牧管理を実施しつつ、シバ草地化を図ることになる。そこで、放牧管理がシバ植生の優占化に及ぼす影響について、刈取管理と比較し、検討した。シバの生育は、植付け1年目には放牧管理と刈取管理の間に差がみられなかったが、2年目には刈取管理ではメヒシバ等のイネ科雑草が繁茂し、シバが抑圧され、部分的に衰退した。放牧管理では採食や踏圧によりシバ以外の草種の生育が抑制され、シバの生育は良好であった。また、放牧により表土の緊密化が認められたが、シバの地上部の生育、根の生育及び生理的機能が抑制されることはなく、放牧管理下において約1年でシバが優占化した。したがって、シバ草地化を計るためには、刈取管理よりも連続放牧による管理が適していると判断できる。

3 シバを導入した遊休農林地の植生の変化

放棄後数十年が経過し、遷移が進行し、灌木類及びイグサが優占する棚田跡地にシバを導入し、放牧管理した場合の土壤環境と植生の変化を3年間にわたって調査した。既存の灌木類及び草本類を刈取り、旧田面の周囲に明きょを掘り、シバを張りシバ法で植付けた。4月~10月に放牧し、適宜掃除刈りを行った。その結果、旧田面部では深さ0~10cmの土壤層の三相構造において、液相の割合が低下し、固相または気相の割合が高まるとともに、土壤硬度が急

速に高まった。試験1年目には、旧田面部の植被率が低く、シバの被度も小さかったが、2年目からシバの被度が急速に高まり、3年目にはシバの被度が45.8%となった。旧田面部の地上部現存量は、試験1年目には少なく、シバの現存量は2年目から3年目にかけて高まった。また、シバの根重は1年目から2年目にかけて著しく増加し、深さ10cmよりも下層に多くの根が伸長した。したがって、すでに乾田化しているか、排水処理によって乾田化が可能な棚田は、シバ苗を導入し、放牧管理を継続することにより、シバ草地化が可能であると考察される。

かつて薪炭林等として利用されてきたコナラ等の落葉広葉樹林は、管理が放棄され、林内は暗く、下草に乏しい。これらの林床にシバを導入するために必要な間伐強度を検討した。樹高約9mの試験地林に、3種類の立木密度区(30本/10a, 44本/10a, 63本/10a)を設け、シバを張りシバ法で植付け、その後放牧管理を持続した。その結果、シバの活着率は、立木密度が高く、庇蔭割合が大きい処理区ほど高い傾向が認められた。これは、立木密度が高いほど植付け後の土壤乾燥が抑制されたことによると推察された。ソッドの移植によるシバの導入では、移植後の乾燥による苗の枯死が生じることがある。ポット苗の移植では十分な降雨がなくても高い定着率が得られたと報告されているが¹⁸⁾、根が少ないソッドの移植に際しては、降雨が期待できる時期に移植する、苗の一部を埋める等の方策により活着率が向上すると考えられる。また、3～4月のシバ苗は地上部が生育を停止した状態であるために乾燥に強いといわれており⁶³⁾、この時期に移植を行うことにより高い活着率が期待できる。シバの被度は、いずれの処理区も初年目に低く推移したが、その後、試験2年目及び3年目になると立木密度の低い処理区ほど高くなり、立木密度30本/10a区では3年目に58%に達した。立木の推定葉面積指数(ELAI)では、処理区間にけるその値の差異は大きくないが、立木密度が高い処理区ほど高い傾向がみられ、経年的には立木による庇蔭の割合は増加した。さらに、林床の相対日射量も、伐採2年目7月の調査では立木密度30本/10aの粗密度区における林床では80%以上を確保し、他の中・高密度区より、林間の光透過率が良好であり、高い受光量であった。林床のリ

ター量は試験開始時に700g/m²あり、2年後にはいずれの処理区も10分の1以下に減少した。以上のことから、樹高9m程度の広葉樹林では立木密度30本/10aの疎林状態であれば、シバにとっての光環境としては実用上障害とならず、比較的容易に林床をシバ植生に転換できると判断された。

ワラビは、放牧草地では一般的に不食草であり⁷⁸⁾、草地の強害雑草の一つである⁵⁶⁾。また、家畜が採食し、中毒に陥ることがある^{56,78)}。ワラビ優占地へのシバ導入に当たっては、シバの庇蔭に弱い特性を考慮し、事前にワラビを十分に抑圧しておく必要がある。そこで、ワラビ優占地において、シバ植生への転換を目的として、除草剤のアシュラムを散布する方法とワラビを刈払う方法を取り上げ、それらの効果及び比較を行った。本試験では、両処理がワラビの消長と、植付けたシバの定着及び生育に及ぼす効果をみた。アシュラム散布によりワラビは処理直後には抑制され、その後、若干の増加を示したが、処理後2年目の発生本数は少なかった。刈払い法では、1年目に6回の刈払いを行うことにより、ワラビは2年目以降減少し、3年目は発生がみられなくなった。これは、度重なる茎葉の除去により、再生のための地下茎の貯蔵養分が消耗したためと考えられた。シバの活着はアシュラム散布よりも刈払い区で低かったが、これはワラビとの競合の差異であると推察された。シバの被度は処理翌年から増加し、3年目には両処理とも60%に達し、約2年後にはシバ優占草地に転換していた。これらの結果より、除草剤処理法、刈払い法とも遷移過程では若干の優劣はあるものの、いずれの手法を採用してもワラビ優占地のシバ草地化は可能であると判断される。

以上のように、本研究では遊休農林地をシバ草地化するための方法について検討を行い、シバ草地化に必要な条件及び管理技術を実証試験で確認した。本研究で明らかになった結果により、中山間地域の遊休農林地の棚田跡地、広葉樹林地及びワラビ優占地をシバ草地化するため基礎的な知見が得られたと考える。

シバが自生している場所は、日当たりが良く、放牧管理によって植生の草高が低く維持されているところが多い。本試験でも移植したシバ苗の生育は日射環境が良好で他草種との競合が小さい条件で良好

であった。これは、「Ⅲ－１」、「Ⅲ－２」、「Ⅳ－２」及び「Ⅳ－３」の各章・節の結果から明らかである。さらに、土壌は過湿でない場所で生育が良好であり、リターの存在は生育の阻害要因にならなかった。このため、耕作放棄棚田では排水処理、広葉樹林では間伐、ワラビ優占地ではワラビの抑圧処理を行ってから放牧管理することにより、シバ植生の優占化が進行した。以上の方法により、遊休農林地のシバ草地化は可能である。一方、シバ植生の優占化が進んだ場所では適度な強度の放牧管理を続け、不食草の除去のための掃除刈を行うことによりシバ優占植生を維持できると判断される。なお、斜面でのシバの生育についてはポット試験で実施したものの、現地での検討は行っていない。方位・傾斜角度によるシバ草地化の差異については別途現地での検討が必要である。

シバ草地の放牧利用に関しては、広い面積の場所での放牧となるため、家畜管理の面での工夫が必要となる。繁殖牛を飼養する場合、授乳中の子付きの牛では親子分離施設を設置して子牛を収容し、栄養補給をする方法があり⁴⁴⁾、この方式では発情発見や捕獲等の放牧牛の管理作業が容易になるとともに、子牛も行動範囲を制限することで発育向上が期待される。また、本研究ではシバの導入法として張りシバとペーパーポット苗の移植を用いたが、これらの方法は植栽に労力を要することから、広い面積を造成する場合には放牧地の一部にシバを導入し、放牧牛の糞による種子散布によって次第にその他の部分にシバ植生を拡大する方法⁸⁴⁾が有効である。以上のように、本試験で得られた知見に合わせて既存の知見を活用することにより、遊休農林地の放牧利用の推進が期待できる。

謝 辞

本研究の取りまとめに当たり、御指導を賜り、御校閲の労をいただいた東京農業大学農学部福山正隆教授ならびに畜産草地研究センター飼料作生産性向上研究チーム佐藤節郎氏に衷心よりお礼を申し上げます。また、御校閲の労をいただき、ご助言をいただいた東京農業大学農学部松尾英輔教授ならびに平野繁准教授及び近畿中国四国農業研究センター研究

管理監家常高氏には、深甚なる謝意を表します。さらに、本研究の遂行にあたり懇切な御指導を戴いた作物研究所企画管理室長長峰司氏、畜産草地研究センター研究管理監梨木守氏、畜産草地研究センター元草地生産基盤部長及川棟雄氏、近畿中国四国農業研究センター粗飼料多給型高品質牛肉研究チーム高橋佳孝氏、同元総合研究第2チーム長故圓通茂喜氏、宮崎大学農学部山本直之准教授及び本論文の作成に当たって御理解と御便宜をいただいた伏見昭秀氏には心から謝意を表します。本研究を実施するに当たり、多大なご協力をいただいた栃木県大田原市の中村牧場の故中村聖暉氏、ならびに試験地の造成や供試牛の管理等に御支援をいただいた近畿中国四国農業研究センター業務第3科職員各位、畜産草地研究センター業務第3科職員各位に心から謝意を表します。

引用文献

- 1) 阿江教治 1985. 土壌空気と作物生育：一水田転換畑における大豆栽培を中心として一. 土壌の物理性 51：3－8.
- 2) 秋山 侃・久保祐雄 1978. 草地における蹄傷：一被圧した野草類の光合成と乾物生産一. 草地試研報 12：23－31.
- 3) 安西徹郎 1989. 水田における休耕中の管理と休耕の年限. 農業技術 44：551－554.
- 4) 荒木眞之 1995. 森林気象. 川島書店, 東京. 76－111.
- 5) 千葉喬三・佐藤晃一・亀山信夫・中村博美 1986. 棚田に隣接する里山林の利用. 農土誌 54：211－216.
- 6) 大後美保 1977. 微気象の探求. 日本放送出版協会, 東京. 30－62.
- 7) 杜 冠華・小川正則・安藤定美・続 栄治・村山盛一 1997. 木酢液と木炭の混合物がメロン果実のスクロース含量に及ぼす影響. 日作紀 66(3)：369－373.
- 8) 藤原 忠・阿部博史 1973. 寒冷地開発地の土地利用高度化のための技術の確立：第1章 標高および傾斜方位の相違による気象条件の変化. 東北農試研究速報 16：3－10.

- 9) 福田栄紀・梨木 守・目黒良平1994. 森林極相地帯のシバ草原成立機構における草食動物の役割：3. 踏圧が草地及び森林構成種の出芽，生育に及ぼす影響の差異. 日草誌 40（別）：47-48.
- 10) 福山正隆・嶋村匡俊・牛山正昭・及川棟雄1985. 短草型草地の特性の解明：Ⅲ. 短草混生草地の利用管理と生産力及び種相互の競合との関係. 草地試研報 31：93-107.
- 11) 後藤正和・菅原和夫・林 兼六 1982 a. アカマツ壮令林地の牧草生産性. 日草誌 27：381-386.
- 12) 後藤正和・菅原和夫・林 兼 1982 b. 壮令林内牧草の採食利用性. 日草誌 28：330-335.
- 13) 早川康夫 1972. 草地における放牧牛のワラビ採食：第1報 長草型野草地における行動. 北農試彙報 100：78-90.
- 14) 林 陽生・黒瀬義孝 1991. 農業環境研究におけるメッシュデータと気象情報の利用（11）：中山間地域を対象としたメッシュ図の利用と局地気象（1）. 農及園66：716-722.
- 15) 平吉 功・松村正幸 1957. シバ牧野に関する研究（第1報）. 日草研誌 3：16-22.
- 16) 本多 侑・河野通世 1963. 芝の形態並びに解剖学的研究，特に日本芝 *Zoysia japonica* Steud. について. 千葉大園芸学部報 11：1-22.
- 17) 本間 啓・小沢知雄 1962. 土壤構成と日本芝の生育ならびに踏圧による影響に関する実験的研究. 造園雑誌 26：27-30.
- 18) 井出保行・小山信明・佐藤節郎・高橋佳孝 2004. 放牧導入による棚田跡地の保全的利用. 近中四農研報 3：15-36.
- 19) 井上隆吉・佐々木泰斗 1958. シバの庇蔭試験. 東北農試研報 14：92-103.
- 20) 石 弘之 2007. 食べるのか燃やすのか，バイオ燃料が招く食料危機. 世界 762：190-197.
- 21) 石塚悟史・岩崎貢三・櫻井克年 1997. 造成された日本シバ草地土壤の経年変化. 土肥誌 68：549-558.
- 22) 岩間秀矩 1995. 耕作放棄棚田の法面崩壊と保全的土地利用. 総合農業の新技术 8：98-102.
- 23) 岩間秀矩 1996. 耕作放棄水田における飼料生産基盤拡大上の技術的問題点と対策. 草地試資料 平成7-6：25-30.
- 24) 岩波悠紀 1986. 林業側からみた林畜複合経営技術：—広葉樹林を中心として—. 日草近中支報 15：35-46.
- 25) 岩波悠紀 1994. 林内放牧による肉牛振興と森林・環境・国土保全. 畜産の研究 48：224-230.
- 26) 岩波悠紀 1997. 中山間地域の活性化に果たす畜産の役割と機能（3）：—林畜複合問題について—. 畜産の研究 51：25-32.
- 27) 貝 昌之・宗綱良治・島村真吾 1988. 水田酪農地帯における転作畑の放牧利用技術. 山口畜試研報 7：145-156.
- 28) 鎌田隆義 1997. 島根県における在来シバの放牧利用に関する試験研究の現況. 日畜関西支部報 136：33-36.
- 29) 金子幸司・杉信賢一・小島昌也 1969. アカクローバの生存維持機構に関する若干の知見. 日草誌 15：59-68.
- 30) 加納春平・村里正八・井村 毅 1980. シバ型野草地の立地特性の解析：—北上山地貞任・和山地区の場合—. 日草誌（別）26：91-92.
- 31) 片桐成夫・金子信博・長山泰秀・栗原紀美子 1991. 萌芽二次林のリターフォール量および養分還元量の変化. 島根大農研報 25：15-22.
- 32) 川原尚人・岡本一志・山崎清人 1994. シバポット苗を用いた暖地急傾斜シバ草地の短期造成技術：第1報 ハウス利用によるシバポット苗の加温育苗・移植法. 日草誌 40（別）：125-126.
- 33) 北原徳久・吉村義則・鈴木慎二郎 1985. シバ（*Zoysia japonica*）の耐寒性について. 日草誌（別）31：212-213.
- 34) 北原徳久 1987. シバ草地の造成および放牧利用. 畜産の研究 41（11）：46-50.
- 35) 北村文雄 1965. 日本芝園芸品種栽培の基礎的研究（第2報）：—生育におよぼす日照の影響並びに肥料3要素の効果について—. 造園雑誌 28：18-22.
- 36) 北村文雄 1975. 芝草の環境抵抗性について. 芝草研究 4：5-14.

- 37) 小林 真・蝦名真澄・生永治彦・岡野秀樹・徳弘令奈 2000. 匍匐茎の伸長に優れるシバ新品種「朝駆 (あさがけ)」の育成とその特性. 日草九支報 30 (2) : 41-43.
- 38) 小迫孝実・井村 毅・河野道治 1986. シバ草地の造成に関する研究: 一造成過程中的の放牧強度が家畜の行動に及ぼす影響—. 日草誌32 (別) : 302-303.
- 39) 小山信明 1989. 放牧草地におけるエネルギーの流れ: V 植生の移行がエネルギーの流れに及ぼす影響. 草地試研報 42: 9-39.
- 40) 小山信明 2006. 「耕作放棄地の畜産的利用」: はじめに. 日草誌 52: 109-110.
- 41) 久保良雄・諸遊英行・氷高信雄・岩間 泉・須崎陸夫 1972. 中国縦貫道路の開発と中山間地帯農業の展開に関する研究. 中国農試報 D 5: 1-114.
- 42) 久保祐雄・秋山 侃 1977. 草地における蹄傷: 一被圧した牧草類の光合成と乾物生産—. 草地試研報 10: 15-22.
- 43) Letey, J., L. H. Stolzy, N. Valoras and T. E. Szuszkiewicz 1962. Influence of soil oxygen on growth and mineral concentration of barley. Agron. J. 54: 538-540.
- 44) 萬田富治・島田和宏・竹ノ内直樹・大島一修・林 義朗・中西直人・高橋佳孝・小迫孝実・大谷一郎・圓通茂喜・小路 敦・山本直之・棚田光雄・千田雅之 1998. 胚移植とシバ型草地への放牧を利用した肉用牛生産技術を基幹とする地域複合営農システムの確立. 中国農試研究資料 31: 35-56.
- 45) 松村正幸・岩田悦行・中島仁蔵 1972. 有用野草の播種増殖に関する基礎的研究: (3) 播種による日本芝草地の造成に関する 2, 3 の圃場試験. 岐阜大農研報 33: 349-359.
- 46) 松村正幸・長谷川俊成・山田良彦・白村広吉 1984. 地下水位ならびに日射条件の違いに対する夏型芝草 3 種の反応について. 芝草研究 13: 127-136.
- 47) 松尾直樹・井上眞理・古屋忠彦・鄭 紹輝・福山正隆 2004. 九州 3 地域における気象要因とシバおよびセンチピードグラスの生産量との関連性. 九大農学芸誌 59: 89-97.
- 48) 三田村強・小川恭男・鎌田悦男 1982 a. シバ型草地に関する研究: I. 牛糞中のシバ種子数とその発芽特性. 日草誌 27: 387-393.
- 49) 三田村強・小川恭男・鎌田悦男 1982 b. シバ型草地に関する研究: II. シバ幼植物の生長に及ぼす温度の影響. 日草誌 27: 394-399.
- 50) 三田村強・小川恭男・鎌田悦男 1982 c. シバ型草地に関する研究: III. シバの発芽・定着・生存に及ぼす土壌硬度, 土壌改良資材および肥料の影響. 日草誌 28: 82-88.
- 51) 三田村強・小川恭男・岡本恭二・手島道明・鎌田悦男 1985 a. シバ草地に関する研究: V. 伐採後に形成したミヤコザサ群落の攪乱方法の違いがシバ草地の成立に及ぼす影響. 草地試研報 30: 82-90.
- 52) 三田村強・小川恭男・岡本恭二・手島道明・縣和一・鎌田悦男 1985 b. シバ型草地に関する研究: VI. シバ草地の植生並びに現存量に及ぼす施肥の影響. 草地試研報 30: 91-104.
- 53) 三田村強・小川恭男・岡本恭二 1990. 落葉広葉樹伐採跡地におけるシバーオーチャードグラス型草地の成立過程に関する生態学的研究: I. 表面播種したシバ (*Zoysia japonica* STEUD.), オーチャードグラス (*Dactylis glomerata* L.) および数種草種の定着に及ぼすリターと施肥の影響. 日草誌 35: 286-292.
- 54) 森田 脩・後藤正和・三石昭三・松山高博 1992. 表面播種におけるイネ科牧草の発芽・定着: 5, アカマツとコナラの落葉とその分解物の表面におけるトールフェスク (*Festuca arundinacea* Schreb) の発芽動態と根鞘毛の固着力. 日草誌 38: 327-334.
- 55) 中川昭一郎 1993. 耕作放棄水田の実態と対策. 農業土木事業協会, 東京. 111-120.
- 56) 梨木 守・野本達郎・原島徳一 1980. 放牧地のワラビに対する *asulam* の散布時期. 雑草研究 25: 214-216.
- 57) 梨木 守・野本達郎・目黒良平 1984. 公共育成牧場におけるエゾノギシギシとワラビの発生要因. 雑草研究 29: 61-70.
- 58) 小原道郎・宮内紀一・小瀬川康雄 1964. 草地

- 土壌の特性ならびに植生と土壌との関係. 畜試研報 7 : 65-87.
- 59) 越智茂登一・中村勤史・窪田昌綱・氷高信雄 1969. 中国地域中山間地帯における水田酪農の動向と技術体系の策定. 中国農試報 D 4 : 35-77.
- 60) 小川恭男・福田栄紀・岡本恭二 1989. 落葉広葉樹伐採跡地のリター層がオーチャードグラス (*Dactylis glomerata* L.) の生長に及ぼす影響. 日草誌 35 : 134-140.
- 61) 小川恭男・三田村強・福田栄紀・岡本恭二 1992. 落葉広葉樹伐採跡地におけるシバ・オーチャードグラス型草地の成立過程に関する生態学的研究 : II. シバ (*Zoysia japonica* STEUD.), オーチャードグラス (*Dactylis glomerata* L.) および数草種を表面播種した混播草地の植生変化に及ぼす施肥の影響. 日草誌 38 : 308-314.
- 62) 小川恭男・三田村強・福田栄紀・岡本恭二 1994. 落葉広葉樹伐採跡地におけるシバ・オーチャードグラス型草地の成立過程に関する生態学的研究 : III. 表面播種したシバ (*Zoysia japonica* STEUD.) およびオーチャードグラス (*Dactylis glomerata* L.) の茎数密度, 地上部重および地下部重の経年変化に及ぼす施肥の影響. 日草誌 39 : 411-419.
- 63) 小川恭男・小山信明 1994. 撒き芝法によるノシバ (*Zoysia japonica* STEUD.) 草地の春造成. 九農研 56 : 141.
- 64) 大黒俊哉・松尾和人・根本正之 1996. 山間地における放棄水田と畦畔のり面の植生動態. 日本生態学会誌 46 : 245-256.
- 65) 大口龍太郎・森岡 正・畑 勝彦 1997. シバ型草地の早期造成技術の確立. 奈良畜試研報 24 : 21-28.
- 66) 太田 健・谷山一郎・草場 敬・森 昭憲・荒谷 博 1996. 耕作放棄棚田における土壌特性の経年変化. 土壌の物理性 73 : 3-10.
- 67) 大谷一郎・高橋佳孝・魚住 順・余田康郎・五十嵐良造 1994. 赤黄色土のトールフェスク草地における牧草根と土壌環境に及ぼす採草, 放牧利用の影響. 中国農試研報 14 : 69-89.
- 68) 大友功一・藤本長之・美濃羊輔 1978. 土壌の緊密性が牧草の根の初期生長におよぼす影響について. 帯大研報 11 : 107-112.
- 69) 大槻和夫・河野道治・細山田文男・谷口長則・野田 博 1984. シバ型草地の動態に関する研究 : 第 2 報 輪換放牧で利用した短草型草地の植生の変遷と牧養力. 四国農試報 44 : 158-185.
- 70) 佐竹康明・福住弘巳 1994. シバポット苗を用いた暖地急傾斜シバ草地の短期造成技術 : 第 2 報 シバポット苗の露地育苗・移植方法の検討. 日草誌 40 (別) : 127-128.
- 71) 佐藤 庚 1981. オーチャードグラスとアカクローバの単播および混播草地の生産性 : I. 4 年間の生産性と造成初期の生産構造. 日草誌 27 : 64-70.
- 72) 佐藤健次・原島徳一・西田智子 1993. 八方放牧地のシバ・牧草混在草地の動態に及ぼす施肥量の影響. 草地試資料 平成 4 - 14 : 144-148.
- 73) 佐藤節郎・森田弘彦・千田雅之 2003. 中国地方中山間地域の小規模耕作放棄水田におけるイタリアンライグラス (*Lolium multiflorum*) とイヌビエ (*Echinochloa crus-galli*) を組み合わせた粗飼料生産体系. 雑草研究 48 : 211-221.
- 74) 島村真吾 1995. 肉用牛経営による山間遊休地の活用. 草地試資料 平成 7 - 3 : 41-47.
- 75) 篠原 実・西岡辰雄 1993. 暖地急傾斜シバ草地の短期造成技術の確立 : 第 1 報 (1) 施設・播種育苗技術の確立. 徳島県畜試研報 34 : 41-44.
- 76) 篠原 実・西岡辰雄 1994. シバポット苗を用いた暖地急傾斜シバ草地の短期造成技術 : 第 3 報 種子からのハウス内シバポット育苗・移植法. 日草誌 40 (別) : 129-130.
- 77) 篠原 実・白田英樹・西岡辰雄 1995. 暖地急傾斜シバ草地の短期造成技術の確立 : 第 2 報 (1) 最適移植密度と部分施肥効果の検討. 徳島県畜試研報 36 : 8-10.
- 78) 嶋田 饒 1962. ワラビの生態 : 一 野草地におけるワラビの動態一. 雑草研究 1 : 70-77.
- 79) 嶋田 饒 1966. 除草剤による野草地の改良 : 第 1 報 TCBA 散布によるススキ-ワラビ型草地植生の動態. 雑草研究 5 : 123-131.

- 80) 嶋田 饒 1976. シバ草地の生態. 芝草研究 5 : 87-94.
- 81) 庄司舜一 1983. 芝草の種生態：一特にシバを中心にして. 芝草研究 12 : 105-110.
- 82) 杉本安寛・平田昌彦・上野昌彦・仁木巖雄 1987. 植生と土壌の理化学性に及ぼす斜面方位の影響：—阿蘇斧岳の調査例—. 宮崎大農報 34 : 297-304.
- 83) 鈴木晴雄・三田俊次・宮本硬一 1979. 栽培ポットの微気象. 農業気象 35 : 21-29.
- 84) 高橋佳孝・齋藤誠司・大谷一郎・萩野耕司 1995. シバ草地を含む放牧地での牛糞によるシバ種子の散布. 日草誌 41 (別) : 15-16.
- 85) 高橋佳孝 1996. 山間棚田を利用した肉用牛放牧. 畜産コンサルタント 374 : 18-23.
- 86) 高橋佳孝 1998. シバ型草原への保全的転換とその持続的利用技術：三瓶山の自然と人と牛の調和をめざして. 中国農試. 48-61.
- 87) 竹之内直樹・圓通茂喜・大島一修・島田和宏・大谷一郎・山本直之・今川昭宏・高橋政義 1996. 放牧時にワラビ中毒の発症を認めた黒毛和種における臨床および血液所見の推移. 中国農試研報 16 : 93-106.
- 88) 戸田忠祐・久根崎久二・佐藤勝郎・落合昭吾・及川稜郎・太田 繁・帷子剛資・漆原礼二・阿部誠・平野 保・桜田奎一・新渡戸友治・斉藤精三郎 1980. 山地における落葉広葉樹林帯の草地開発方式. 岩手畜試研報 9 : 1-89.
- 89) 堤 利夫 1987. 森林の物質循環. 東京大学出版会, 東京. 1-47, 100-118.
- 90) 上田孝道 2000. 和牛のノシバ放牧. 農山漁村文化協会, 東京. 58-69.
- 91) 上野昌彦・杉本安寛・平田昌彦 1985. パヒアグラス (*Paspalum notatum* Flüggé) の根の生長に及ぼす斜面方位の影響. 日草誌 31 : 104-109.
- 92) Welles, J.M. and J.M. Norman 1991. Instrument for indirect measurement of canopy architecture. Agron. J. 83: 818-825.
- 93) 山本晴彦・鈴木義則・早川誠而 1995. プラントキャノピーアナライザーを用いた作物個体群の葉面積指数の推定. 日作紀 64 : 333-335.
- 94) 山本嘉人・斎藤吉満・酒井聡樹・桐田博充・林治雄 1993. 放牧によりススキ型草地がシバ型草地に遷移する速さ. 日草誌 39 (別) : 147-148.
- 95) 山本嘉人・斎藤吉満・桐田博充・林 治雄・西村格 1997 a. ススキ型草地における異なる人為圧による植生遷移の方向. 日草誌 42 : 307-314.
- 96) 山本嘉人・斎藤吉満・桐田博充 1997 b. 放牧によるススキ型草地の主要植物種の拡張積算優占度の変化率. 日草誌 42 : 315-323.
- 97) 山本嘉人・北川美弥・西田智子 2005. 水田放牧地における導入草種の定着性・生産性, 現地実証プロジェクト研究報告：栃木県北部における遊休水田の放牧利用による持続的畜産方式の可能性. 畜草研放牧管理 : 17-22.
- 98) Youngner, V.B. 1961. Growth and flowering of *Zoysia* species in response to temperatures, photoperiods, and light intensities. Crop Sci. 1: 91-93.
- 99) 行永寿二郎・井手欽也・伊藤幹二 1973. ワラビに対する *asulam* の殺草効果とそれに関連する 2, 3 の生態. 雑草研究 15 : 34-41.
- 100) 高知県農林技術会議 1981. 野シバ草地の造成とその利用技術. 高知県農林業の技術情報 29 : 1-8.
- 101) 全国農業協同組合中央会 2007. 世界と日本の食料・農業・農村に関するファクトブック2007. 東京 : 16, 21, 43.

Establishment of *Zoysia* Pasture in Abandoned Agricultural Lands

Ichiro OTANI

Summary

Recently, abandoned agricultural lands—particularly terraced paddy fields and forests—have increased in extent in the hilly and mountainous areas of Japan. These abandoned lands can be used without intensive management when they are used as grazing pasture. Japanese lawngrass (*Zoysia japonica* Steud.), a common species in native Japanese pastures, is known to be useful in this application because it persists without intensive management and alleviates soil erosion by stabilizing soils with its stolons, which densely cover the soil surface. This study was intended to clarify the methods for converting abandoned agricultural lands into *Zoysia* pasture to support cattle grazing and facilitate improved land use and conversion.

The results obtained can be summarized as follows:

1. The influences of groundwater level, shading, and slope aspects on *Z. japonica* growth were examined. Growth of *Z. japonica* was more seriously inhibited in the treatment with a 3-cm groundwater level than in the 20-cm treatment. The growth differences among lines were not significant. Under severe shade (26% relative solar radiation), growth was more seriously inhibited than under weak shade (37.2%) and short-day treatments. Growth differences among the lines were recognized in both the weak shade and short-day treatments. The growth of *Z. japonica* was greater on a gentle slope (15°) than on a steep slope (27°), and was greater on a south-facing slope than on an east- or west-facing slope. On slopes, the stolons of *Z. japonica* were more numerous growing downward than growing upward.

2. The influences of forest-floor litter and charcoal on *Z. japonica* growth were examined in a greenhouse experiment. Sod of *Z. japonica* was grown in pots with three soil-surface treatments: leaf litter of deciduous trees, charcoal, and neither (control). The dry weights of stolons and the number of erect stems of *Z. japonica* did not differ significantly among the treatments; however, the root dry weights were lower for the plot with leaf litter than for the control. Leaf litter decreased the soil temperature during the day and retained heat in the soil during the night. The mechanisms for how litter affected the growth of stolons and erect stems of *Z. japonica* were unclear. The application of charcoal increased the daytime soil temperature, but did not affect the growth of *Z. japonica*.

3. The effects of spring-sown herbage species on the establishment of *Z. japonica* were also investigated. Sod of *Z. japonica* was planted and herbage species were sown in March (sowing treatment). In plots where herbage species were not sown (control), both the frequency and coverage of *Z. japonica* increased rapidly, reaching 100% in the second year. In contrast, coverage by *Z. japonica* in the sowing treatments were low (10% to 77.5%) in the first year and increased only slowly in the second year. In the second year, the coverage of *Z. japonica* in September was inversely correlated with the coverage of herbage species in June, July, and August in the sowing treatments. This inverse correlation indicates that competition between the herbage species and *Z. japonica* for light, nutrients, and water suppresses the growth of *Z. japonica*, and that

the herbage species do not increase forage production before the establishment of *Z. japonica*. It appears that, in warm areas with few weeds, *Z. japonica* becomes established earlier when herbage species are not sown.

4. The effects of grazing and cutting on the establishment of *Z. japonica* were investigated and compared. In the first year, *Z. japonica* coverage did not differ significantly between the grazing and cutting plots. In the second year, the summer coverage was lower in the cutting plot because abundant *Digitaria adscendens* occurred in the plot. In the grazing plots, where plant heights were kept low by cattle grazing, *Z. japonica* dominated during the second year. In the grazing plots, the soil hardness and rate of solid phase of the soil were greater in the top layer, but the growth of tops and roots of *Z. japonica*, and root respiration, were not inhibited. Therefore, the establishment of *Z. japonica* was completed in 1 year under grazing conditions.

5. Changes in vegetation and soil properties in abandoned terrace paddy fields under grazing conditions after the transplanting of *Z. japonica* sod were investigated over the course of 3 years. When grazing started, bush species and *Juncus effusus* dominated. All plants were cut and open ditches were dug for drainage. In the top layer of the field, the rate of liquid-phase soil decreased, with the proportions of the solid and gas phases increasing; i.e., soil hardness increased rapidly. Plant coverage was low in the first year; *Z. japonica* coverage began to increase in the second year and reached 45.8% in the third year. The *Z. japonica* biomass increased in the third year. The root weight of *Z. japonica* increased greatly in the second year, and roots grew to a depth of 10 cm. Thus, *Z. japonica* could be established in a couple of years in abandoned terrace paddy fields under ditch-drained or well-drained conditions in the presence of grazing.

6. The growth of grazed *Z. japonica* on the floor of a deciduous forest was investigated at three tree densities. The rooting ratios of *Z. japonica* sods were 75%, 86%, and 98%, respectively, at low (300 trees/ha), medium (440 trees/ha), and high (630 trees/ha) tree densities. The highest rooting rate (at high density) was ascribed to the suitable soil water content, which was maintained under the dense canopy. Coverage by *Z. japonica* at low density increased more rapidly than that at medium and high density in both the second and third years after transplanting. At low density, coverage of *Z. japonica* was 58% in October of the third year. The estimated leaf area index (ELAI) of the trees increased gradually from the first year to the third year in all treatments. The highest ELAI value was recorded at high density throughout the experiment. The values of relative solar radiation at the forest floor in the second year were 83% at low density. The amount of tree litter on the forest floor decreased from year to year in all treatments; no appreciable differences were recognized among the treatments. The growth of *Z. japonica* was more rapid at low density (for trees averaging 9 m in height).

7. The effects of herbicide application (asulam, developed by Bayer Co.) and cutting on converting a bracken fern (*Pteridium aquilinum* L.) - dominated pasture into a *Z. japonica* - dominated pasture were investigated. The number of *P. aquilinum* shoots became 0.5/ m² two months after asulam treatment and increased slightly during the second year. However, in the cutting plot, in which vegetation was cut six times during the first year, the number of *P. aquilinum* shoots decreased year by year, and the fern had disappeared by the third year. This disappearance was probably caused by exhaustion of the rhizome nutrient reserves. The rooting rate of *Z. japonica* was lower in the cutting plots than in the asulam application plots because of competition with *P. aquilinum*. The coverage of *Z. japonica* in both plots increased in the second year, and reached 60% in the third year. Therefore, both asulam application and cutting were useful for converting pasture dominated by bracken fern into a *Z. japonica* pasture.

温暖地向き低グルテリン酒米品種「みずほのか」の育成

飯田修一・春原嘉弘・出田 収・松下 景・前田英郎*・根本 博*・
石井卓朗*・吉田泰二**・中川宣興***・坂井 真****・古川幸子*****・
水間智哉*****・清川良文*****・若井芳則*****

Key words : rice, cultivar, low glutelin, brewer's rice, sake, Mizuhonoka

目 次

I 緒 言	45	6 病害その他抵抗性	53
II 育成経過	46	IV 栽培適地および栽培上の留意点	54
1 来 歴	46	1 栽培適地	54
2 選抜の経過	46	2 栽培上の留意点	54
III 特性の概要	48	V 命名の由来および育成従事者	54
1 一般特性	48	VI 摘 要	56
2 玄米の外観品質	48	謝 辞	59
3 収 量 性	49	引 用 文 献	59
4 成分分析	51	Summary	61
5 醸造特性	51		

I 緒 言

新品種「みずほのか」は、2000年から「多収系1000」の系統名で、黄桜株式会社との共同研究を通じて酒造用としての特性を評価してきたものであり、2008年4月25日に農林認定品種「水稻農林426号」として登録された。ここにその育成経過、特性の概要等を報告し、本品種の普及や利用のための参考に供する。各種の酒類との競合のもと、日本酒の消費量は年々低下し、清酒酒造メーカーの収益の確保が厳しい状況である。清酒の生産費に占める原料米費の割合は高く、原料を効率的に利用しつつ良質な酒を生産する技術の開発が必要とされている。一般にタンパク質含有率が低い米の方が雑味の少ない

良質な酒を造りやすい⁶⁾。また、タンパク質含有率を下げるために50%近くまでの高度な精米を行ってタンパク質含有率を下げるのが清酒の仕込みにおいて実施されており、それだけ削られた部分は無駄となっている。一方、米の可消化性タンパク質であるグルテリンが少ない低グルテリン米は、タンパク質含有率の低い米と同じように良質な酒が造りやすいと期待できる。中央農業総合研究センター北陸センターでは酒造用米としての利用を1つの目標として北陸地域の栽培に適した大粒の低グルテリン品種「春陽」を育成しており、高度精白を行わなくてもアミノ酸の量を下げられる低コストの酒造用米として利用されている⁵⁾。酒造用に大粒で心白のある特性を持たせた低グルテリン米を育成すれば、高度な精米を行わなくても、良質な酒が造ることが可能に

(平成20年7月18日受付, 平成20年10月2日受理)

米品質研究近中四サブチーム

低コスト稲育種研究近中四サブチーム

稲メーカー育種研究チーム

*現 作物研究所

**現 東北農業研究センター

***元 中国農業試験場

****現 九州沖縄農業研究センター

*****現 黄桜株式会社

なる。そこで、温暖地に適した低グルテリン形質を有し醸造適性に優れた酒米品種の育成を目指した。また、この研究においては低グルテリンの形質に適した新規の醸造手法（特許3721422）が開発され、この技術の利用により「みずほのか」を用いたより良質な酒の醸造が可能となった。

Ⅱ 育成経過

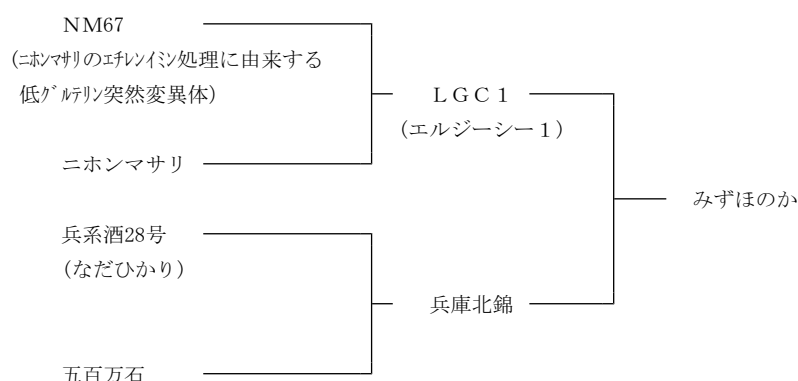
1 来 歴

「みずほのか」は、イネ種子の主要なタンパク質であるグルテリン含有が少ない低グルテリン形質（低グルテリン遺伝子 *Lgc1*）を持つ「L G C 1（以下「エルジーシー1」）」を母、「兵庫北錦」を父とした交配後代より育成した酒米品種である（第1図）。「兵庫北錦」は、兵庫県で育成された酒造好適米品種である³⁾。「エルジーシー1」は低タンパク食としての利用を目的に、胚乳貯蔵タンパク質の一種であるグルテリンが少ない低グルテリン形質をはじめて有する品種として、農業生物資源研究所放射

線育種場と（旧）農業研究センターが共同で育成した品種である⁴⁾。

2 選抜の経過

「みずほのか」の選抜経過を第1表、育成系統図を第2図に示した。1995年、中国農業試験場（現近畿中国四国農業研究センター）において、低グルテリン形質を持つ酒米品種の育成を目標に人工交配を行い、39粒の交配種子を得た。同年冬期より1996年春期にかけてF₁を世代促進温室で養成し、同年にF₂世代を普通期直播栽培により集団養成した。1997年に、F₃世代を集団で養成した。1998年にF₄世代で普通期移植栽培による個体選抜を行い、電気泳動分析により低グルテリン遺伝子（*Lgc1*）について、固定した個体を選んだ。1999年（F₅）に系統選抜を行い、2000年（F₆）以降は、系統番号「多収系1000」を付して、生産力検定試験・特性検定試験・醸造適性検定試験に供試した。2004年（F₁₀）以降は系統名「中国酒185号」を付して関係府県に配付してきた。2008年4月25日に「水稻農林426号」と

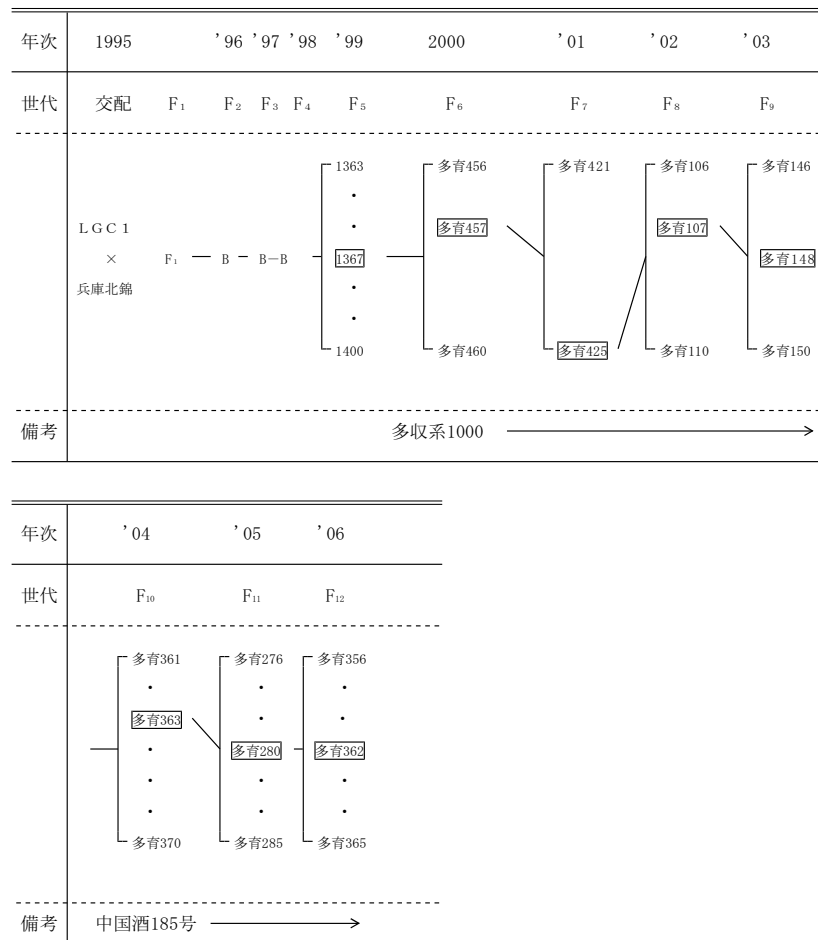


第1図 「みずほのか」の系譜

第1表 「みずほのか」の選抜経過

年 次		1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	
世 代		交配	F ₁	F ₂	F ₃	F ₄	F ₅	F ₆	F ₇	F ₈	F ₉	F ₁₀	F ₁₁	F ₁₂
栽	系統群数							1	1	1	1	1	1	1
	系 統 数						38	5	5	5	5	10	10	10
植	個 体 数	(39粒)	5	3000	3000	1300	*16	*32	*32	*32	*32	*32	*32	*32
選	系統群数							1	1	1	1	1	1	1
	系 統 数						1	1	1	1	1	1	1	1
抜	個 体 数				38	5	5	5	5	5	5	5	5	5

注1) *は1系統当たりの個体数。



第2図 「みずほのか」の育成系統図

第2表 普通期移植栽培における生育調査成績

a) 標肥区

品種名	出穂期 (月日)	成熟期 (月日)	登熟日数 (日)	倒伏 (0-5)	紋枯病 (0-5)	下葉枯 (0-5)	稈長 (cm)	穂長 (cm)	穂数 (本/m ²)
みずほのか	8.13	9.23	41	1.6	1.1	1.8	86	21.4	320
兵庫北錦	8.06	9.19	44	1.0	1.5	1.7	80	21.0	277
日本晴	8.14	9.24	41	1.8	1.4	2.1	88	19.3	387

b) 多肥区

品種名	出穂期 (月日)	成熟期 (月日)	倒伏 (0-5)	稈長 (cm)	穂長 (cm)	穂数 (本/m ²)
みずほのか	8.14	9.25	3.7	96	22.0	338
日本晴	8.16	9.25	3.7	101	19.9	411
ヒノヒカリ	8.21	10.02	1.0	94	19.7	392

注1) 標肥区は2003年度～2006年度の生産力検定試験2反復の平均値。

2) 多肥区は2005年度～2006年度の生産力検定試験2反復の平均値。

3) 標肥区は元肥として窒素成分で0.56kg/a、追肥として窒素と加里を成分で各0.14kg/a 施用した。
多肥区は元肥として窒素成分で1.12kg/a、追肥として窒素と加里を成分で各0.14kg/a 施用した。
播種日は5月第2半旬、移植(成苗植え)は6月第2半旬である。

4) 倒伏程度は0(無)～5(完全倒伏)の6段階評価。

5) 紋枯病、下葉枯は0(無)～5(甚)の6段階評価。

して登録され、「みずほのか」と命名された。「みずほのか」の品種登録出願番号は、第21442号（2007年9月11日）であり、2007年度の世代は雑種第13代である。

Ⅲ 特性の概要

1 一般特性

育成地における普通期移植栽培標肥区および多肥区での生育調査成績は第2表、特性調査成績は第3表の通りである。標肥区における出穂期は「兵庫北錦」より7日遅く、「日本晴」と同等である。成熟期は「兵庫北錦」より4日遅く、「日本晴」と同等である。瀬戸内平坦部では“中生の中”に当たる。稈長は「日本晴」より2 cm短く、「兵庫北錦」より6 cm長い。穂長は「日本晴」より2 cm程度長く、兵庫北錦とほぼ同等である。穂数は「日本晴」より少

なく、「兵庫北錦」より多い。草型は“偏穂重型”である（写真1）。稈の細太および剛柔は、ともに「日本晴」並の“中”および“やや柔”であり、耐倒伏性は「日本晴」並で、「兵庫北錦」よりやや弱く、多肥栽培においては倒伏が見られる。芒の多少は通常“極少”であり、芒の長さは“短”である。ふ先色は“白”，ふ色は“黄白”，粒着密度は“中”，脱粒性は“難”の粳種である。

2 玄米の外観品質

育成地における普通期移植栽培では、「みずほのか」の玄米は長さ、幅ともに「日本晴」より大きく、「兵庫北錦」より長さがやや短く幅は同等である（写真2，第4表）。「みずほのか」の粒長/粒幅の値は、「日本晴」より小さく「兵庫北錦」と同等であり、粒長×粒幅は「日本晴」より大きく「兵庫北錦」よりやや小さく、粒形、粒大は“やや円”，“やや大”

第3表 普通期移植栽培における特性調査成績

品種名	稈		芒		ふ先色	ふ色	粒着密度	脱粒 難易	粳糯 の別
	細太	剛柔	多少	長短					
みずほのか	中	やや柔	極少	短	白	黄白	中	難	粳
兵庫北錦	中	やや剛	無	—	白	黄白	中	難	粳
日本晴	中	やや柔	稀	短	白	黄白	中	難	粳
エルジーシー1	中	中	稀	極短	白	黄白	中	難	粳

注1) 2003年度～2006年度の標肥栽培した生産力検定試験標肥区の平均値。



写真1 「みずほのか」の草姿（左からみずほのか、兵庫北錦、日本晴）



写真2 「みずほのか」の籾（下）と玄米（上）
（左からみずほのか、兵庫北錦、日本晴）

に分類される。「みずほのか」の千粒重は「日本晴」より4～5 g重い25.7 g程度で、「兵庫北錦」より2 g程度軽い。平均粒厚は「日本晴」より厚いが、「兵庫北錦」より薄い（第5表）。玄米外観品質調査成績を第6表に表した。「みずほのか」は「兵庫北錦」より光沢があり、乳白、背白の発生が少なく、玄米の外観品質は「兵庫北錦」に酒米としての評価基準で優る。

3 収量性

収量調査成績については第7表に示した。育成地における普通期移植栽培での「みずほのか」の玄米収量は、標肥区では「兵庫北錦」、「日本晴」より多

く、多肥区でも「日本晴」、「ヒノヒカリ」より多い。しかし、「みずほのか」の多肥区における玄米重は、標肥区より少なく、これは多肥区において倒伏が見られる（第2表）ことから、倒伏により登熟不良になったものと考えられる。2004年～2006年に滋賀県高島市新旭町で行った慣行施肥量による現地栽培試験では「みずほのか」の玄米収量は59.8kg/aであり、育成地の普通期移植栽培標肥区並であった（第8表）。

また、現地栽培試験においては、各年、各圃場ともに倒伏は見られなかった。

第4表 玄米の粒形調査成績

品種名	粒長 (mm)	粒幅 (mm)	粒厚 (mm)	粒長/粒幅	粒長×粒幅	粒形	粒大	千粒重 (g)
みずほのか	5.32	3.00	1.98	1.77	16.0	やや円	やや大	25.7
兵庫北錦	5.44	3.06	2.03	1.78	16.6	やや円	やや大	27.8
日本晴	5.11	2.76	1.87	1.86	14.1	中	中	21.2

注1) 2005年度～2006年度の生産力検定試験標肥区の平均値。

2) 粒長、粒幅および粒厚は300粒をサタケ品質判別器RCQI20Aで測定した。

第5表 玄米の粒厚分布調査成績

品種名	粒厚 (mm)								1.8mm 以上	平均粒厚 (mm)
	1.6 未満	～1.6	～1.7	～1.8	～1.9	～2.0	～2.1	2.2 以上	(%)	
みずほのか	0.5	0.7	1.3	4.6	4.3	20.9	62.2	5.6	97.6	2.04
兵庫北錦	0.2	0.2	0.5	1.8	1.6	9.6	40.8	45.5	99.3	2.13
日本晴	1.6	1.9	5.7	24.7	24.8	37.9	3.9	0.0	91.0	1.88

注1) 2005年度～2006年度の生産力検定試験標肥区の平均値。

2) 玄米100 gを段篩いで5分間選別した。重量比。

3) 平均粒厚は1.7mm以上の粒の厚さの平均値を示した。アンダーラインはモードを示す。

第6表 玄米外観品質調査成績

品種名	色沢	光沢	心白	腹白	乳白	背白	茶米	胴割	穂発芽	玄米 品質
みずほのか	中	中	甚	中	微	極微	極微	極微	無	5.0
兵庫北錦	やや淡	やや否	甚	極微	少	少	極微	極微	微	5.8
日本晴	やや淡	中	極微	極微	微	極微	極微	無	無	4.9

注1) 2003年度～2006年度の生産力検定試験標肥区の平均値。

2) 品質は1（極良）～9（極不良）の9段階評価で、「みずほのか」および「兵庫北錦」については酒米としての評価基準、「日本晴」については一般主食用の評価基準で判定した。

第7表 収量調査成績

(1) 標肥区

品種名	全重 (kg/a)	玄米重 (kg/a)	比較比率 (%)		収穫 指数 (%)
			兵庫北錦 比	日本晴 比	
みずほのか	164.7	61.2	119	117	37.2
兵庫北錦	139.3	51.6	100	98	37.0
日本晴	149.2	52.4	102	100	35.1

(2) 多肥区

品種名	全重 (kg/a)	玄米重 (kg/a)	比較比率 (%)		収穫 指数 (%)
			日本晴 比	ヒノヒカリ 比	
みずほのか	167.8	59.0	113	103	35.2
日本晴	160.1	52.4	100	91	32.7
ヒノヒカリ	181.7	57.4	110	100	31.6

注1) 標肥区は2003年度～2006年度の生産力検定試験の平均値。

2) 多肥区は2005年度～2006年度の生産力検定試験の平均値。

第8表 滋賀県高島市新旭町における現地栽培試験

品種名	年次	圃場	栽培面積 (a)	施肥量		収量 (kg/a)
				元肥 (Nkg/a)	穂肥 (Nkg/a)	
みずほのか	2004	H氏圃場	42.7	0.60	0.44	61.2
		U氏圃場	28.6	0.40	0.49	59.7
		K氏圃場	29.1	0.43	0.54	56.7
	平均					59.2
	2005	H氏圃場	81.0	0.36	0.42	60.0
		U氏圃場	58.2	0.81	0.46	64.7
		O氏圃場	38.2	0.15	0.68	55.0
		K氏圃場	28.8	0.41	0.42	62.5
	平均					60.6
	2006	H氏圃場	58.9	0.36	0.42	65.2
		U氏圃場	85.5	0.81	0.10	60.7
		O氏圃場	34.8	0.15	0.30	52.6
		K氏圃場	29.1	0.40	0.50	59.8
	平均					59.6
	2004～2006平均					59.8
コシヒカリ	2005	新旭町圃場	28.5	0.23	0.40	57.8
	2006	新旭町圃場	33.3	0.30	0.40	50.6
	2005～2006平均					54.1

第9表 総タンパク質含有率およびアミロース含有率

品種名	タンパク質含有率 (%)		アミロース含有率 (%)
	玄米	白米	
みずほのか	7.3	6.1	16.7
兵庫北錦	7.9	6.8	16.9
日本晴	7.6	6.6	18.2
春陽	6.9	5.9	20.1
山田錦	7.5	6.4	18.7
エルジーシー 1	6.9	5.9	20.1

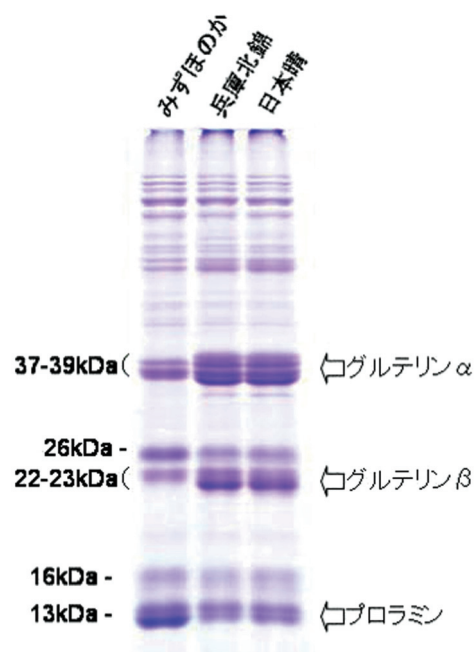
- 注1) 2003年度～2006年度の普通期移植栽培による生産力検定試験標肥区の平均。
「春陽」,「山田錦」は2003年度に未調査,「エルジーシー 1」は2004年度に未調査のため当該年を計算から除いた。
- 2) タンパク質含有率は, elementar社のrapidN (換算係数5.95) にて分析した。
アミロース含有率は, K-KI溶液の呈色による650nmでの吸光度で分析した。
- 3) 白米の精米歩合は, 約90%である。

4 成分分析

「みずほのか」の玄米および白米中の総タンパク質含有率と白米のアミロース含有率を第9表に示した。「みずほのか」の白米のタンパク質含有率は「エルジーシー 1」,「春陽」より高かったが,「兵庫北錦」,「日本晴」,「山田錦」より低かった。アミロース含有率は16.7%で,「日本晴」より低く,「兵庫北錦」と同等であった。「みずほのか」の白米における全タンパク質の電気泳動像を第3図に示した。この泳動像から組成比率を測定し, 16kDaと13kDaのタンパク質の合計を難消化性タンパク質として, 全組成から引いたものを可消化性タンパク質とした(第10表)。「みずほのか」は明らかに37-39kDaと22-23kDaのグルテリンの含量が低く, 可消化性タンパク質の割合も「兵庫北錦」,「日本晴」より18~19%程度少なかった。この割合は, 低グルテリン米「エルジーシー 1」と同等であったが,「春陽」よりやや高かった。

5 醸造特性

「みずほのか」の酒造用としての玄米分析および醸造特性について検討した。試験は黄桜株式会社で実施した^{1,2)}。「みずほのか」の酒造用原料米としての玄米品質および精米特性を第11表に, 心白発現率を第12表に, 白米の成分および吸水特性を第13表に, 消化性分析結果を第14表に示した。「みずほのか」は「日本晴」と比較して玄米千粒重が大きく, 精米時間は「兵庫北錦」より長いが,「日本晴」よ



第3図 「みずほのか」のSDS-PAGE電気泳動像
SDS-PAGEは白米の粉碎試料から8 M尿素を含む液で全タンパク質を抽出してSDS-ポリアクリルアミドゲル電気泳動法で分析した。

り短い。碎米率は,「兵庫北錦」より高く,「日本晴」より低かった。無効精米歩合は「兵庫北錦」と同等であった。「みずほのか」の心白の割合は,「兵庫北錦」よりやや少ない。「みずほのか」の総タンパク質含有率は「兵庫北錦」,「日本晴」よりやや低い。カリウム含有率は「兵庫北錦」,「日本晴」よりやや高かった。吸水率の20/120分比は,「兵庫北錦」と同等であった。消化性試験の結果からは,「みずほ

第10表 タンパク質組成分析および可消化性タンパク質含有率

品種名	タンパク質組成 (%)							可消化性 タンパク 質割合 (%)	可消化性 タンパク 質含有率 (%)
	76以上	57	37-39 グルテリン α	26	22-23 グルテリン β	16	13 (kDa)		
みずほのか	8.2	7.2	17.0	13.7	10.4	11.9	31.7	56.4	3.4
兵庫北錦	6.4	7.7	30.7	9.0	20.3	8.4	17.5	74.1	4.9
日本晴	6.4	8.6	31.2	8.5	20.4	8.1	16.8	75.1	4.7
春陽	7.6	6.6	14.3	15.8	9.2	12.4	34.2	53.4	3.0
エルジーシー 1	8.1	7.6	16.1	14.7	10.6	11.4	31.5	57.1	3.4

- 注1) タンパク質組成の分析には、2003年度～2006年度の普通期移植栽培による生産力検定試験の約90%の搗精度の白米を使用した。ただし、「エルジーシー 1」は2004年度に未調査のため当該年を計算から除いた。
- 2) 可消化性タンパク質割合は、難消化性のタンパク顆粒 I に局在する16kDa、13kDaのタンパク質組成を除いた組成値の合計である。
- 3) 可消化性タンパク質含有率は、第9表の白米総タンパク質含量に可消化性タンパク質割合を乗じて算出した。

第11表 酒造用原料米としての玄米品質および精米特性

品種名	精米 時間 (秒)	玄米 千粒重 (g)	調湿前 玄米水分 (%)	見掛精米 歩合 (%)	真精米 歩合 (%)	無効精米 歩合 (%)	砕米率 (%)	搗精後 千粒重 (g)
みずほのか	620	25.8	13.5	70.0	75.0	5.0	36.5	19.4
兵庫北錦	510	28.6	13.5	69.8	74.1	4.3	21.0	18.3
日本晴	790	20.7	13.3	69.8	73.6	3.8	39.2	18.2
エルジーシー 1	765	23.4	13.5	70.0	74.1	4.1	50.4	17.2

- 注1) 精米にはサタケ製テスト精米機を使用し、150gを精米した。ここでは、酒米研究会統一分析法に準じ、玄米水分を13.8%に調整後、70%精米歩合まで精米を行い、白米水分13.5%に調湿後、各種白米分析に供した。
- 2) 試験は2000年と2002年に黄桜株式会社で実施した。育成地における生産力検定試験標肥区（2000年、2002年）の材料を供試した。
- 3) 見掛精米歩合とは、糠部に移行した砕米を白米重量に加算していない数値であり、真精米歩合は（白米整粒1000粒の重量g／玄米整粒1000粒の重量g）×100で表される。真精米歩合から見掛精米歩合を減じた数値を無効精米歩合とする。

第12表 心白発現率

品種名	心白の 割合 (%)	腹白の 割合 (%)	無白の 割合 (%)
みずほのか	64	31	6
兵庫北錦	70	23	8

- 注1) 試験は2000年と2002年に黄桜株式会社で実施した。育成地における生産力検定試験標肥区（2000年、2002年）の材料を供試した。
- 2) 心白は玄米の中心部に白濁部がある玄米粒であり、腹白は玄米の腹部に白濁部がある玄米粒である。
- 3) 無白は、心白、腹白以外の粒の割合である。

のか」は糖度が高く、フォルモール窒素量が「兵庫北錦」より著しく低く、低グルテリン米の「エルジーシー 1」について低かった。また、得られた液量は、「兵庫北錦」並であり、残渣は試験に供試した

品種の中でもっとも少なかった。

2002年産の「みずほのか」を用いて総米150kgによる純米酒の試験醸造を行った。アミノ酸度が低い特徴のある酒が得られたが、製成酒のきき酒評価において、酒造適性の高い対照品種の「吟おうみ」と比べると、官能において好まれない特有の香りを有し、苦みを感じるとのコメントが見られ、香り、味ともに「吟おうみ」よりやや劣った（第15表）。通常の醸造方法では、特有の異臭を生じない酒を醸造することは困難と考えられたので、清酒もろみ用酵素剤を添加してもろみ中の蒸米の溶解を助けることで各種数値がどう変化するかを検討した。その結果、「みずほのか」に清酒もろみ用酵素JW201を添加して醸造すると特異香が生じず、香り、味ともに官能

第13表 白米の成分および吸水特性

品種名	総タンパク質 含有率 (%)	カリウム 含有率 (ppm)	吸水率		
			20分 (%)	120分 (%)	比 (20/120分)
みずほのか	5.2	554	26.4	27.6	0.96
兵庫北錦	5.5	527	26.4	27.2	0.98
日本晴	5.6	505	25.8	27.3	0.94
エルジーシー 1	5.1	529	24.8	25.7	0.97

注1) 試験は2000年と2002年に黄桜株式会社で実施した。育成地における生産力検定試験標肥区(2000年, 2002年)の材料を70%に精白した白米の分析値。

2) 酒米研究会統一分析法 (<http://www.sakamai.jp/bunseki.html>) により分析した。

3) 比(20/120分)は浸水20分後と十分に吸収させた浸水120分後の吸水率の比で比が1に近いほど短い時間で吸水できる能力があることを示す。

第14表 消化性分析

品種名	吸水率 (%)	蒸米溶解性			
		Brix (%)	F-N (ml)	液量 (ml)	残渣 (g)
みずほのか	28.8	9.9	0.36	47.3	13.3
日本晴	31.0	8.2	0.55	45.8	15.4
兵庫北錦	30.5	9.1	0.57	47.3	14.1
エルジーシー 1	29.1	7.9	0.30	44.5	16.8

注1) 試験は2000年と2002年に黄桜株式会社で実施した。育成地における生産力検定試験標肥区(2000年, 2002年)の材料を供試した。

2) Brixは糖度値, F-Nはフォルモール窒素量を示す。

フォルモール窒素量とは全アミノ酸の定量法の一つで、アミノ酸がホルマリンと反応して酸としての性質を持つ化合物に変わることを利用したもので、中和後の清酒に中性ホルマリンを加え、これを0.1NのNaOHで滴定してアミノ酸量を測定する。

評価が向上することが判明した(第16表)。このもろみ用酵素を添加して特有の香りを生じないようにする手法については、特許として登録した(特許登録3721422)。この技術を用いて2005年産の「みずほのか」総米8000kgを純米酒として「コシヒカリ」を対照とした仕込みを行った。得られた純米酒は、アルコール度は「コシヒカリ」と比べると0.5%低く、酸度はやや低く、アミノ酸度が明らかに低かった(第17表)。製成した酒の量は「コシヒカリ」より4%ほど多く、粕歩合は「コシヒカリ」の20.3%に比べると17.8%と少なく、これは生産効率が高いことを示す。「みずほのか」純米酒のきき酒の結果は、炭素ろ過を行ってない段階、行った段階のものともに、「コシヒカリ」純米酒と比べて香り、味ともに同等か優った。この「みずほのか」純米酒を2006年12月18日に岡山市で開催された近畿中国四国地域食

材フェアにて一般の人を対象に香り、味について良い、やや良い、普通、やや悪い、悪いの5段階によるアンケート調査を行ったところ「みずほのか」純米酒は香りについて71%の人が、味について84%の人が「良い」または「やや良い」と回答した(第18表)。

「みずほのか」ともろみ用酵素を添加する技術を用いた実地醸造規模での醸造試験の結果、消費者に好まれる風味の良質な酒を粕歩合が少なく生産効率を高く製造できることが確かめられた。

6 病害その他抵抗性

育成地におけるいもち病抵抗性遺伝子型の検定によると、「みずほのか」は真性抵抗性遺伝子 *Pii* を有すると推定される(第19表)。育成地、青森県農林総合研究センター藤坂稲作研究部、愛知県農業総合

試験場山間農業研究所における葉いもち圃場抵抗性試験では、いずれも“弱”と判定された(第20表)。育成地、愛知県農業総合試験場山間農業研究所における穂いもち圃場抵抗性は「日本晴」と同程度の“中”と判定された(第21表)。「みずほのか」の白葉枯病抵抗性は育成地および宮崎県総合農業試験場におけるせん葉接種法による検定で“弱”と判定された(第22表)。鹿児島県農業試験場における紋枯病抵抗性検定試験では、“弱”と判定された(第23表)。穂発芽性は「ヒノヒカリ」より強く「日本晴」より弱い“やや難”である(第24表)。

Ⅳ 栽培適地および栽培上の留意点

1 栽培適地

「みずほのか」の出穂期から判断して、関東以西の地域に適するとみられる。

2 栽培上の留意点

- 1) 耐倒伏性は多肥条件では強くなく、酒造用として低タンパク質の特性を生かすためにも、多肥栽培は避ける。
- 2) いもち病に弱いので、いもち病防除を適正に行う。

V 命名の由来および育成従事者

「みずほのか」は、低グルテリン米という新しい種類の酒米と新しい醸造法による酒造りにより、ほのかな香りのあるすっきりした酒が醸造できる酒米品種として命名した。

「みずほのか」の育成従事者は第25表の通りである。

第15表 2002年産「みずほのか」の総米150kgによる試験醸造結果

a. 製成酒の一般成分

酒の種類	品種名	日本酒度	アルコール度 (%)	酸度 (ml)	アミノ酸度 (ml)
純米酒	みずほのか	+3.5	18.0	2.46	0.60
	吟おうみ	+6.5	18.5	2.23	1.34
本醸造酒	みずほのか	-4.5	18.4	1.97	0.54
	吟おうみ	-3.0	19.0	1.76	1.14

b. 製成酒のきき酒結果

酒の種類と ろ過の有無	品種名	香	味	コメント
純米酒 未ろ過	みずほのか	2.62	2.69	特有の香
	吟おうみ	2.38	2.46	カビ臭、きれい、苦い
本醸造酒 未ろ過	みずほのか	2.46	2.31	
	吟おうみ	2.31	2.31	味残る
純米酒 炭素ろ過	みずほのか	2.62	2.54	特有の香、苦み強い
	吟おうみ	2.54	2.38	味多い
本醸造酒 炭素ろ過	みずほのか	2.54	2.38	
	吟おうみ	2.54	2.54	良好

注1) 日本酒度、アルコール度、酸度、アミノ酸度は国税庁所定分析法により分析した。

2) 使用した酵母はKZ06で、原料米はそれぞれ精米歩合70%を用いた。

3) きき酒は黄桜株式会社のパネラー13名による評点1(良) - 5(不可)の5点法により評価した。数値が少ないほど良好となる。

第16表 酵素剤添加による2002年産「みずほのか」の清酒小仕込み試験による上槽酒きき酒結果

使用掛米	麴歩合	酵素剤	香	味	特異香
みずほのか	20%	なし	3.00	3.00	+
みずほのか	10%	JW201	2.89	2.67	—
みずほのか	15%	JW201	2.89	2.33	—
みずほのか	20%	JW201	2.78	2.56	—
みずほのか	20%	JW121	3.22	3.00	+
みずほのか	20%	デナブシン	3.22	3.11	+
吟おうみ	20%	なし	2.33	2.33	—
吟おうみ	10%	JW201	3.00	3.00	—
吟おうみ	15%	JW201	2.78	2.56	—
吟おうみ	20%	JW201	2.56	2.33	—
吟おうみ	20%	JW121	2.44	2.56	—
吟おうみ	20%	デナブシン	2.56	2.78	—

注1) 小仕込み試験の方法は、55%精米の「五百万石」を麴として、掛け米に精米歩合70%の2002年産の「みずほのか」(近中四農研産)、対照米として「吟おうみ」(滋賀県新旭町産)を使用し、これに麴歩合20%に相当する、もろみ用酵素JW201 (αアミラーゼ+グルコアミラーゼ+酸性プロテアーゼ、洛東化成工業製)、四段用酵素JW121 (αアミラーゼ、洛東化成工業製)、およびデナブシン (酸性プロテアーゼ)を添加して、総米170g、酵母種「KZ06」で実施した。

2) 黄桜株式会社のパネラー9名による評点1(良) - 5(不可)の5点法により評価した。

数値が小さいほど良好となる。

3) 上槽酒とは、もろみから圧搾機で搾って得られたばかりの酒である。原酒とも呼ばれる。

第17表 酵素剤添加による2005年産「みずほのか」の総米8000kg清酒醸造試験

酒の種類	日本 酒度	アルコール (%)	酸度 (ml)	アミノ酸度 (ml)
「みずほのか」純米酒	-1.0	17.7	2.02	0.81
「コシヒカリ」純米酒	+1.0	18.2	2.14	2.05

b. 粕歩合と上槽酒生成量

酒の種類	製成酒(L)	酒粕(kg)	粕歩合(%)
「みずほのか」純米酒	18465	1420	17.8
「コシヒカリ」純米酒	17728	1620	20.3

c. 「みずほのか」純米酒の原酒のきき酒結果

酒の種類	ろ過の実施	香	味	コメント
「みずほのか」純米酒	未ろ過	2.3	2.3	甘い
「コシヒカリ」純米酒	未ろ過	2.3	2.6	味多い
「みずほのか」純米酒	炭素ろ過済	2.2	2.4	甘い
「コシヒカリ」純米酒	炭素ろ過済	2.4	2.7	酸味

注1) 「みずほのか」純米酒においては70%精米歩合の「みずほのか」1800kgを麴米とし6400kgを掛米として使用した。「コシヒカリ」純米酒においては、70%精米歩合の「コシヒカリ」を麴米、掛米ともに同量用いた。

2) 「みずほのか」純米酒の醸造にあたっては、清酒もろみ用酵素剤JW201を麴と合わせて麴割合40%になるように添加した。「コシヒカリ」の仕込みは純米酒としての比較対照で酵素剤は添加していない。

3) 使用酵母は、黄桜吟醸6号+黄桜吟醸1号である。

4) きき酒は黄桜株式会社の10名のパネラーで実施した。

香・味は5点法(1:良~5:不可)により評価した。

第18表 「みずほのか」純米酒のアンケートによるきき酒結果

酒の嗜好	男	女	不明	香り	味
大変好き	13	4	0	1.82 (71%)	1.41 (94%)
好きな方である	18	11	0	1.76 (83%)	1.48 (93%)
普通	9	11	3	2.09 (61%)	2.14 (70%)
あまり好きでない	2	0	0	1.50 (100%)	1.50 (100%)
嫌い	0	0	0	—	—
不明	1	1	0	1.50 (100%)	1.50 (100%)
平均	(合計)43	27	3	1.86 (71%)	1.67 (84%)

注1) 2005年産みずほのか総米8000kg醸造試験で得られた「みずほのか」純米酒を8ヶ月間原酒貯蔵した後、割水酒としてビン詰めを行った純米酒によるアンケート調査を企画した。

アンケートの設問は以下の通りである。

- 性別 1. 男性 2. 女性
- お酒（アルコール類）の嗜好について
 - 大変好き 2. 好きな方である 3. 普通 4. あまり好きでない 5. 嫌い
- 香り 1. 良い 2. やや良い 3. 普通 4. やや不良 5. 不良
- 味 1. 良い 2. やや良い 3. 普通 4. やや不良 5. 不良
- 香り、味の数値はアンケートの評価の点数をそのまま平均化した値である。

香り、味の括弧内の割合は、それぞれの項目で「良い」および「やや良い」と答えた人の割合である。

第19表 いもち病真性抵抗性遺伝子型の推定（育成地，2003年）

品種系統名	接種菌株（コード番号）			推定 遺伝子型
	稲86-137 (007)	TH68-126 (033)	TH68-140 (035)	
みずほのか	S	R	S	<i>Pii</i>
新2号	S	S	S	+
愛知旭	S	S	R	<i>Pia</i>
藤坂5号	S	R	S	<i>Pii</i>
クサブエ	R	S	S	<i>Pik</i>
ツユアケ	R	S	S	<i>Pik-m</i>

注1) 接種方法は噴霧接種による。表中のSは罹病性反応，Rは抵抗性反応を示す。

Ⅵ 摘 要

「みずほのか」は、低グルテリン形質を持ち良質な酒が得られる温暖地向けの酒米品種を育成することを目的に、低グルテリン米の「エルジーシー1」を母、「兵庫北錦」を父とする交配後代より育成した品種である。1995年、中国農業試験場において交配を行い、以降、集団育種法に準じて育成を進め、2000年以降は系統番号「多収系1000」を付して、生産力検定試験、特性検定試験に供試した他、黄桜株式会社にて醸造適性検定試験を開始した。2004年度以降は系統名「中国酒185号」を付して地域適応性

を検討してきた。2008年に「水稻農林426号」として認定された。

- 出穂期は「兵庫北錦」より7日遅く、「日本晴」と同等である。成熟期は「兵庫北錦」より4日遅く、「日本晴」と同等である。瀬戸内平坦部では“中生の中”に当たる。稈長は「日本晴」より2cm短く、「兵庫北錦」より6cm長い。穂長は「日本晴」より2cm程度長く、「兵庫北錦」とほぼ同等である。穂数は「日本晴」より少なく、「兵庫北錦」より多い。草型は「偏穂重型」である。稈の細太および剛柔は、ともに「日本晴」並の“中”

第20表 葉いもち抵抗性検定試験成績

a. 育成地における成績				b. 特性検定試験地における成績			
品種名	推定 遺伝子型	発病 程度	判定	品種名	推定 遺伝子型	発病 程度	判定
みずほのか	<i>Pii</i>	5.1	弱	みずほのか	<i>Pii</i>	6.3	弱
日本晴	<i>Pia</i>	4.2	中	藤坂5号	<i>Pii</i>	4.6	中
コシヒカリ	+	5.9	弱	イナバワセ	<i>Pii</i>	6.8	弱
藤坂5号	<i>Pii</i>	5.0	やや弱	五百万石	<i>Pii</i>	5.6	弱
イナバワセ	<i>Pii</i>	5.1	やや弱				

注1) 2002年度～2005年度の平均値。
畑晩播法による。

注2) 2002年度と2005年度の平均。
「イナバワセ」は2002年度の数値。
畑晩播法による。

c. 特性検定試験地における成績			
品種系統名	推定 遺伝子型	発病 程度	判定
みずほのか	<i>Pii</i>	9.2	弱
東北IL2号	<i>Pia, Pii</i>	8.3	弱
黄金晴	<i>Pia, Pii</i>	7.2	弱
藤坂5号	<i>Pii</i>	7.7	弱

注1) 愛知県農業総合試験場山間農業研究所において調査された。

注2) 2005年度と2006年度の平均。
畑晩播法による。

第21表 穂いもち抵抗性検定試験成績

a. 育成地における成績										
品種名	推定 遺伝子型	2003年			2004年			2006年		
		出穂期 (月日)	発病 程度	判定	出穂期 (月日)	発病 程度	判定	出穂期 (月日)	発病 程度	判定
みずほのか	<i>Pii</i>	8.19	4.0	やや強	8.09	5.5	中-やや弱	8.06	4.5	中
日本晴	<i>Pia</i>	8.18	5.0	中	8.11	3.8	やや強	8.10	4.0	中
兵庫北錦	<i>Pii</i>	8.05	5.0	中	7.31	6.0	やや弱	—	—	やや弱
コシヒカリ	+	8.04	9.0	弱	7.26	6.5	やや弱	7.25	6.8	やや弱
黄金晴	<i>Pia, Pii</i>	8.19	6.0	やや弱	8.07	6.1	やや弱	8.06	5.0	中
ヒノヒカリ	<i>Pii</i>	8.25	6.0	やや弱	8.17	5.0	やや弱	8.15	5.5	弱

b. 特性検定試験地における成績							
品種名	推定 遺伝子型	2002年			2004年		
		出穂期 (月日)	発病 程度	判定	出穂期 (月日)	発病 程度	判定
みずほのか	<i>Pii</i>	8.22	7.5	やや弱	8.18	5.3	やや強
日本晴	+	8.26	6.7	やや弱	8.20	4.7	やや強
ミネアサヒ	<i>Pia, Pii</i>	8.17	5.4	やや弱	8.09	5.3	やや強
いなひかり	<i>Pii</i>	—	—	—	8.23	2.1	強

注1) 愛知県農業総合試験場山間農業研究所において調査された。

第22表 白葉枯病抵抗性検定試験成績

品種名	近中四農研			宮崎総農試	
	I 群菌	II 群菌	判定	病斑長 (cm)	判定
みずほのか	5.0	6.7	弱	13.3	弱
日本晴	3.9	5.2	中	7.8	中
ヒノヒカリ	4.8	6.9	やや弱	10.5	やや弱
あそみのり	1.2	3.8	強	5.2	強
金南風	5.5	7.2	弱	12.2	弱

注1) 近中四農研の数値は、2002年度～2006年度の検定の平均値。

左からI群菌 (T7174)、II群菌 (T7147) に対する反応。

0 (無発病) ～10 (全葉枯死) の11段階評価。

2) 宮崎県総合農業試験場の数値は、2004年度～2006年度のせん葉接種法による検定の平均値。II群菌 (T7147) に対する反応。

第23表 紋枯病抵抗性検定試験成績

品種系統名	発病度	総合判定
みずほのか	54.7	弱
WSS3	2.0	強
多収系772	61.7	弱
日本晴	45.7	やや弱
ヒノヒカリ	47.0	やや弱

注1) 鹿児島県農業試験場における2004年度～2006年度の平均値。

2) 以下の調査基準から計算される発病度から判定を行った。

調査基準

A: 株の半数以上の茎が発病し、最上位病斑が止葉から穂首まで達し一部止葉が枯死する。

B: 株の半数以上の茎が発病し、最上位病斑が止葉葉鞘まで達しているが止葉は生色がある。

C: 株の半数以上の茎が発病し、最上位病斑が第2葉鞘まで達している。

D: 病斑が第3葉鞘まで達している。

E: 発病を認めない、または第4葉鞘以下の発病。

発病度 = $(4 \times A + 3 \times B + 2 \times C + D) \times 100 / (4 \times \text{調査株数})$

および“やや柔”であり、耐倒伏性は「日本晴」並で、「兵庫北錦」よりやや弱く、多肥条件では倒伏が見られる。芒の多少は通常“極少”であり、芒の長さは“短”である。ふ先色は“白”，ふ色は“黄白”，粒着は“中”，脱粒性は“難”の梗種である。

2. 「みずほのか」の玄米千粒重は約26 gであり、「日本晴」より重いが、「兵庫北錦」より軽い。玄

第24表 穂発芽性検定試験成績

品種名	発芽	
	程度	判定
みずほのか	4.7	やや難
兵庫北錦	7.0	やや難
日本晴	9.4	中
ヒノヒカリ	1.9	難

注1) 2003年度～2006年度の生産力検定試験の平均値

2) 発芽程度の数値は0～10の11段階評価。

米の外観品質は「兵庫北錦」に比べて優る。

3. 育成地における普通期移植栽培での玄米収量は、「兵庫北錦」「日本晴」より高い。

4. 「みずほのか」の精米時間は「兵庫北錦」より長いが、「日本晴」より短い。碎米率は、「兵庫北錦」より高いが、「日本晴」より低い。「みずほのか」の心白の割合は、「兵庫北錦」よりやや少ない。「みずほのか」の総タンパク質含有率は「兵庫北錦」よりやや低い、「吟おうみ」より高い。吸水率は、「兵庫北錦」並である。通常の醸造方法では特有の香りが発生するが、清酒ろみ用酵素を添加することで特有の香りの発生を抑制することが可能となり、消費者に好まれる風味の良質な酒を粕歩合が少なく生産効率を高く製造できる。

5. いもち病真性抵抗性遺伝子は *Pii* を有すると推

第25表 「みずほのか」の育成従事者

年次 世代	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	
氏名	交配 F ₁	F ₂	F ₃	F ₄	F ₅	F ₆	F ₇	F ₈	F ₉	F ₁₀	F ₁₁	F ₁₂	
飯田修一	○ 4月											○	現在員
春原嘉弘							○ 4月					○	現在員
出田 収												○ 4月	現在員
松下 景						○ 8月						○	現在員
前田英郎	○ 10月											○ 3月	現 作物研究所
根本 博			○ 4月			○ 3月							現 作物研究所
石井卓朗	○				○ 10月								現 作物研究所
吉田泰二		○ 10-3月											現 東北農業 研究センター
中川宣興	○	○ 9月											現 埼玉県在住
坂井 真	○	○ 4月											現 九州沖縄農業 研究センター
古川幸子						○ 4月						○	黄桜株式会社
水間智哉						○ 4月						○	黄桜株式会社
清川良文						○ 4月						○	黄桜株式会社
若井芳則						○ 4月						○	黄桜株式会社

定され、葉いもち圃場抵抗性は“弱”，穂いもち圃場抵抗性は“中”である．白葉枯病抵抗性は“弱”，穂発芽性は“やや難”である．

謝 辞

本品種の育成は、①農林水産技術会議事務局の総合的開発研究、「画期的新品種の創出等による次世代稲作技術構築のための基盤的総合研究」のⅡ期（1998～2000年度）、②「食料自給率向上のための21世紀の土地利用型農業確立を目指した品種育成と安定生産技術の総合的開発」5系：画期的新品種の創出による次世代稲作技術の開発（2001～2002年度）、③新鮮でおいしい「ブランドニッポン」農産物提供のための総合研究（2003～2005）、④低コストで質の良い加工・業務用農産物の安定供給技術の開発4系（2006～）の各プロジェクトの一環として実施したものである．これらプロジェクト研究の企画・推進に労をとられた関係者並びに参画された各機関の研究担当者、交配母本「L G C 1」の提供をいただいた農業生物資源研究所放射線育種場、特性検定試験を担当された各県の関係各位に対して謝意を表す

る．また、「みずほのか」の育成に当たり、種々協力いただいた近畿中国四国農業研究センター研究支援センター職員、各種特性検定試験の補助をいただいた契約職員の皆様に対して厚くお礼申し上げる．

引用文献

- 1) 古川幸子・水間智哉・清川良文・柳内敏靖・若井芳則・松下景・前田英郎・飯田修一・根本博 2002. 走査型電子顕微鏡による酒造用低グルテリン米の観察 日本生物工学会 80:512-520.
- 2) 水間智哉・古川幸子・清川良文・若井芳則・山本佳宏・筒井延男・松下 景・前田英郎・飯田修一・根本 博 2002. 酒造用低グルテリン米の酒造適性 日本生物工学会 80:503-511.
- 3) 西田清数・山根国男・佐村 薫・岩井正志・五百蔵義弘・須藤健一・曳野亥三夫 1982. 酒米新品種「兵系酒38号」の育成 兵庫県農業総合センター研究報告 35:1-8.
- 4) 西村 実 2000. イネ低グルテリン系統L G C - 1 の育成と腎臓疾患患者の食事療法への適

用農業技術 55 (10) : 26-29.

- 5) 上原泰樹・小林 陽・太田久稔・清水博之・福井清美・三浦清之・大槻 寛・小牧有三・笹原英樹 2002. 水稻新品種「春陽」の育成. 中央

農業総合研究センター研究報告 1 : 1-21.

- 6) 若井芳則 2000. 製麹特性・掛米適性の評価. 前重道夫・小林信也編. 最新日本の酒米と酒造り. 養賢堂. 東京. 178-189

New Low-Glutelin Brewers' Rice Cultivar 'Mizuhonoka' for the Western Region

Shuichi IIDA, Yoshihiro SUNOHARA, Osamu IDETA, Hideo MAEDA*,
 Hiroshi NEMOTO*, Takuro ISHII*, Taiji YOSHIDA**,
 Nobuoki NAKATGAWA***, Makoto SAKAI****, Sachiko FURUKAWA****,
 Tomochika MIZUMA*****, Yoshifumi KIYOKAWA***** and Yoshinori WAKAI*****

Summary

'Mizuhonoka', a new low-glutelin brewer's rice cultivar developed at the Chugoku National Agriculture Research Center for the Western Region (formerly the Chugoku National Experimental Station), is useful for brewing high-quality sake. 'Mizuhonoka' was bred from the progeny of a cross performed in 1995 between LGC1 and 'Hyogokitanishiki' to add the low-glutelin-content trait to the paternal cultivar. The promising progeny line was named 'Tashukei 1000'; investigations into its use and suitability for brewing began at Kizakura Co. Ltd. in 2000. In 2004, the line was redesignated 'Chugoku-sake 185' and entered adaptability testing. In 2008, it was registered officially as 'Paddy Rice Norin 426' and named 'Mizuhonoka' by the Ministry of Agriculture, Forestry and Fisheries. The following results have been obtained for this cultivar:

1. 'Mizuhonoka' has a heading date that is 7 days later than that of 'Hyogokitanishiki' and equivalent to that of 'Nipponbare'. Its maturity date is 4 days later than that of 'Hyogokitanishiki' and is equivalent to that of 'Nipponbare'. Its maturity is classified as medium-medium in flatlands along the Seto Inland Sea. Its culm length is 86 cm, which is 2 cm shorter than that of 'Nipponbare' and 6 cm longer than that of 'Hyogokitanishiki'. Its panicle length is 2 cm longer than that of 'Nipponbare' and equivalent to that of 'Hyogokitanishiki'. Its panicle number per unit area is less than that of 'Nipponbare', but more than that of 'Hyogokitanishiki'. Plant type of this cultivar is semi-panicle type. Its culms thickness is medium and hardness is slightly soft. Its tolerance for lodging is slightly strong, equivalent to that of 'Nipponbare' and weaker than that of 'Hyogokitanishiki'. The awns are few, very weak, and short. The apiculus is white, and the lemma is light gold. The shattering resistance is strong, and the grains are non-glutinous.
2. The thousand-kernel weight of 'Mizuhonoka' is about 26 g, which is greater than that of 'Nipponbare' but less than that of 'Hyogokitanishiki'. The brown rice appears to have visual quality superior to that of 'Hyogokitanishiki'.
3. Yield of 'Mizuhonoka' in standard fertilized plots at breeding sites was 61.2 kg/a, which is superior to

Rice Quality Research Subteam(Western Region)

* National Institute of Crop Science

** National Agricultural Research Center for Tohoku Region

*** Chugoku National Agricultural Experiment Station

**** National Agricultural Research Center for Kyushu Okinawa Region

***** Kizakura Co. Ltd.

that of either 'Hyogokitanishiki' or 'Nipponbare'.

4. Polishing time is longer than that of 'Hyogokitanishiki' and shorter than that of 'Nipponbare'. The rice cracks more easily than that of 'Hyogokitanishiki' but is more difficult to break than that of 'Nipponbare'. The ratio of white cores is slightly lower than that of 'Hyogokitanishiki'. Total protein content is lower than that of 'Hyogokitanishiki' and higher than that of 'Gin-oumi'. The water-absorption ratio is equivalent to that of 'Hyogokitanishiki'. Application of classical brewing techniques produces an unpleasant odor, but adding enzymes for brewing of sake mash prevents the occurrence of this odor. Application of this technique to rice brewing produced good-quality sake with improved production efficiency with low volume of sake cakes.
5. 'Mizuhonoka' apparently possesses the true resistance gene (*Pii*) against rice blast, but its field resistance against leaf blast is weak and that against panicle blast is moderate. Its resistance against bacterial leaf blast is weak. Its viviparity is slightly hard.
6. Judging from its maturation characteristics, 'Mizuhonoka' can be grown in regions from Kanto to western Japan.

Emergence and Growth of Temperate Forage Plants Surface-seeded on Litter Layers and Cattle Dung on the Forest Floor

Eiki FUKUDA*

Key words: cut-over area, germination strategy, grazing cattle dung, litter layer, moisture content, safe site, seedling establishment, surface-sowing

Contents

I	Introduction	64
II	Materials and Methods	64
1	Study site	64
2	Grazing management	65
3	Seeding area	65
4	Seeding method	65
5	Survey method	66
1)	Survey locations	66
2)	Survey period	66
6	Statistical analysis	66
III	Results	67
1	Number of emerged seedlings and individual tall fescue and orchardgrass plants in the following year	67
2	Number of emerged seedlings and individual white clover plants in the following year	67
3	Plant length of tall fescue, orchardgrass, and white clover in the following year	67
IV	Discussion	68
1	Difference between seedling growth on cattle dung and that on the litter layer	68
2	Factors contributing to the difference in emergence and that growth in cattle dung and litter layer locations	68
3	Potential problems regarding the introduction of forage plants using cattle dung	69
	Acknowledgements	70
	References	70
	Summary	72
	和文摘要	73

(Received November 12, 2008)

Department of Animal Production and Grasslands Farming

* Present address: National Agricultural Research Center for Tohoku Region

I Introduction

Recently in Japan, to prevent desolation of unused or underused agricultural lands and use them for the livestock industry, they have been increasingly used as cattle pasture, providing significant public and social-economic benefits²²⁾. However, a problem that has been faced is the plants on such land, which are primarily native plants and shrubs and have poor regrowth rate after being grazed, while those that are not eaten by cattle are overgrowing²¹⁾. In particular, in areas that have been used continuously for grazing, a significant problem is the gradual decline in mass of edible plants, along with the decreasing number of wild plant species. The most pressing issue for the long-term use of these underused agricultural lands as pasture is the stable supply of edible plants for livestock. Therefore, introducing perennial forage plants, which have a better regrowth rate and better nutritional properties than wild plants, into these areas is thought to be an effective means to increase the carrying capacity and prolong the period these pasturelands can be used.

A thick layer of leaves and organic debris often covers the surface of agricultural and forestry lands that have been abandoned for a long time^{18,19)}. This litter layer prevents the germination of plants with small seeds, such as forage plants¹⁰⁾, and inhibits the seedlings' roots from reaching the soil surface^{19,20,26)}. Therefore, dealing with this litter layer has become a significant technical issue in the establishment and renovation of grasslands^{9,14)}. Most physical methods used to modify this litter layer during grassland establishment are not technically practical under the unfavorable conditions of former agricultural land in mountainous regions, because of the topography, the amount of labor required, and the financial burden^{13,15,27)}.

However, an intriguing phenomenon is often noted in pastures: many seedlings of forage plants and weeds emerge from cattle dung^{2,6,7,17)}. Yet no studies have investigated the use of cattle dung as germination sites and nursery beds for surface-sown forage plants or the germination and survival of forage plants on cattle dung pats in which those seeds are mixed.

In this study, I attempted to develop a forage plant introduction method using dung from grazing cattle under the condition with accumulated litter layers. I examined the difference in germination and growth of three temperate forage plants surface-sown on a litter layer and on cattle dung scattered on the floors of a secondary forest and a deforested area used as grazing land, which are common underused lands in Japan. In addition, I investigated whether cattle dung acted as a safe site^{5,11)} for forage plants that were surface-sown.

II Materials and Methods

1 Study site

The study site was situated on a grazing pasture at the Ohda Campus of the National Agricultural Research Center for the Western Region (132°30'4"E, 35°10'20"N; average annual temperature and precipitation 15.4 °C and 1759 mm) in Ohda city, Shimane Prefecture, Japan. The pasture (4.9 ha) was grazed by a breeding herd of Japanese Black cattle in rotation with other pastures and had been extensively managed without fertilization since 1994. In addition, because the pasture was infrequently used (i.e., low grazing pressure) until 2003, there were few introduced forage plants except a little tall fescue (*Festuca arundinacea* Schreb.) and redtop (*Agrostis alba* L.) in the open area and were a significant number of shrubs and wild plants, such as *Rhus javanica* L., *Rosa multiflora* Thunb., *Miscanthus sinensis* Anderss., and *Pteridium aquilinum* Kuhn. The pasture consisted of two paddocks, one of which was used as the test

paddock (2.5 ha, elevation of 110-130 m) and had a secondary deciduous broad-leaved forest with a litter layer.

2 Grazing management

In 2004 and 2005, six Japanese Black cattle steers were introduced to the test paddock and were rotated to the other paddock every 2 weeks. The steers were grazed from 1 June to 21 October 2004 and from 26 May to 19 October 2005. The average weight of the steers at the start of grazing was 414 kg/head in 2004 and 374 kg/head in 2005.

3 Seeding area

The site used for seeding in the test paddock was composed of two areas: (1) a rectangular area of 7 ares in the center of a secondary forest of 60 ares primarily composed of deciduous trees, including 22-to 26-year-old *Quercus serrata* Thunb., 24-to 29-year-old *Platycarya strobilacea* Sieb. et Zucc., and *Styrax japonica* Sieb. et Zucc. (hereafter referred to as the “secondary forest area”); and (2) a felled area of 28 ares in which 19 ares was clear-cut and 9 ares was thinned, both of which were cut in March 2005 (hereafter referred to as the “felled area”). The stand density of trees with a breast-height diameter greater than 15 cm was 10.6 trees/are in the secondary forest area and 5.1 trees/are in the thinned area. Both seeding areas were covered with a litter layer having a dry matter weight (measured as the average value of 15 locations) of 1021.3 ± 388.2 g/m² (SD). Randomly distributed dung pats were deposited by grazing cattle from June to September on the litter layer in both seeding areas. Forage plant species introduced in the past (i.e., *F. arundinacea* and *A. alba*) were not distributed in these areas. The relative photosynthetic photon flux densities on the surface of the litter layer in the cut-over, thinned, and secondary forest areas are shown in Figure 1.

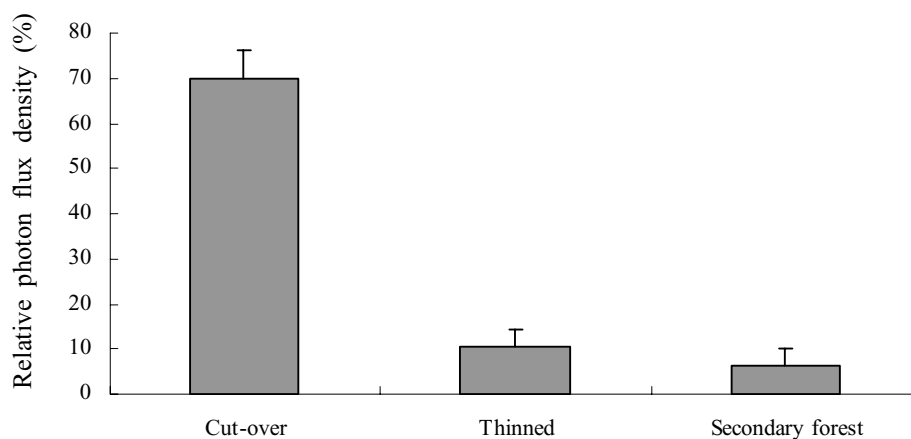


Figure 1 Relative photosynthetic photon flux density (%) on the surface of the litter layer in the cut-over area, thinned area, and secondary forest area. Measurements were conducted around 14:00 on 20 June 2006 ($n = 15$ in each area).

4 Seeding method

The three forage plant species tested were tall fescue (*F. arundinacea* cv. Fawn, hereafter “Tf”), white clover (*Trifolium repens* L. cv. Huia, hereafter “Wc”), and orchardgrass (*Dactylis glomerata* L. cv. Akimidori, hereafter “Og”). The germination rates of these three plant species were over 80% in a preliminary germination test. In the felled area, where the canopy density was low, Tf and Wc were mixed-seeded on the

surface on 21 September 2005. The seeding rates for each plant species were 4 and 1 g/m², respectively. In the secondary forest area, where the canopy density was high, the shade-tolerant Og¹²⁾ was seeded on 6 October 2005 at 4 g/m². Fertilizer was not applied. The daily average air temperature and precipitation in Ohda city from 21 September to 31 October 2005, which influenced the emergence and growth of the forage plants, are shown in Figure 2.

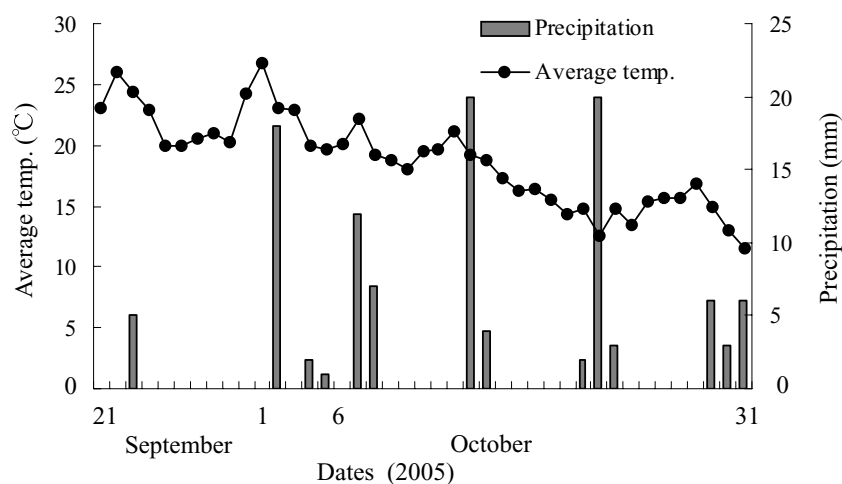


Figure 2 Daily average air temperature and precipitation in Ohda city (elevation 15 m) from 21 September to 31 October 2005. The seeding date was 21 September for tall fescue and white clover and 6 October for orchardgrass.

5 Survey method

1) Survey locations

Cattle dung locations were randomly selected in both areas, excluding the peripheries. A 10-cm × 10-cm square surrounding the center of the selected dung pat and a square of the same size 1 m due south of the dung pat were used as the survey locations. Most of the latter locations were covered by a litter layer and were assumed to have the same topographic conditions and light environment as the corresponding dung pat. Data were collected from 40 of these paired survey locations in the felled area and 20 in the secondary forest area.

2) Survey period

Tf, Og, and Wc seedlings were counted from 17 to 18 November 2005. Numbers of individuals were counted again and plant lengths were measured from 26 to 29 May 2006, just before the cattle were let into the paddock.

6 Statistical analysis

All statistical analyses were performed using SPSS 13.0J software. Student's *t*-test was used to determine significant differences in mean seedling numbers per 100-cm² area and in plant length between the dung pat and litter layer locations.

III Results

1 Number of emerged seedlings and individual tall fescue and orchardgrass plants in the following year

The numbers of seedlings emerged in November and individual plants in the following year were greater in the cattle dung locations than in the litter layer locations for Tf in the felled area and Og in the secondary forest area (Figs. 3 and 4). The average number of Tf seedlings per 100-cm² cattle dung location was 2.3 times that in the litter layer locations ($P < 0.01$), and the average number of Tf plants in the cattle dung locations in the following year was 1.8 times that in the litter layer locations ($P < 0.05$). The average number of Og seedlings per 100-cm² cattle dung location was 2.8 times that in the litter layer locations ($P < 0.001$), and the average number of Og plants in the following year was 1.4 times that in the litter layer locations. In winter, 4 of the 20 test cattle dung pats in the secondary forest area were scattered by wild boars. Therefore, when the survey was conducted in May, the number of Og plants on these 4 dung sites was markedly decreased.

2 Number of emerged seedlings and individual white clover plants in the following year

In the felled area, the number of Wc seedlings emerged in November and the number of individual plants in the following year tended to be greater in the cattle dung locations than in the litter layer locations, although the differences were not statistically significant (Fig. 5). The average number of Wc seedlings per 100-cm² cattle dung location was 1.7 times that in the litter layer locations. The number of individual plants in the following year was 1.1 times that in the litter layer locations.

3 Plant length of tall fescue, orchardgrass, and white clover in the following year

Plant lengths of Tf and Og were longer in the cattle dung locations than in the litter layer locations (Fig. 6). The average plant length of Tf in the cattle dung locations was 1.6 times that in the litter layer locations ($P < 0.05$). The average plant length of Og in the cattle dung locations was 2.9 times that in the litter layer locations ($P < 0.01$).

Plant length of Wc was longer in the cattle dung locations than that in the litter layer locations (Fig. 6).

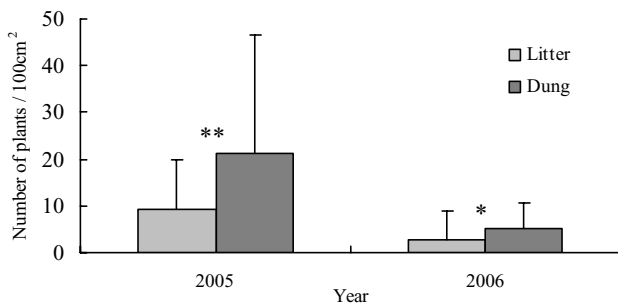


Figure 3 Number of tall fescue seedlings on the litter layer and cattle dung locations in a felled area in November 2005 and May 2006. Seeds were sown on 21 September 2005 at 4 g/m². Measurements were conducted on 17-18 November 2005, and 26-29 May 2006. Vertical lines indicate 1 standard deviation. * $P < 0.05$, ** $P < 0.01$ ($n = 40$).

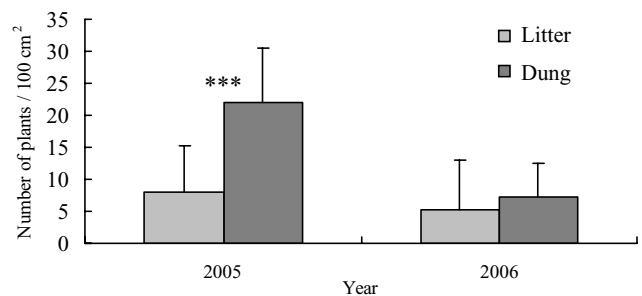


Figure 4 Number of orchardgrass seedlings on the litter layer and cattle dung locations in a secondary deciduous forest in November 2005 and May 2006. Seeds were sown on 6 October 2005 at 4 g/m². Measurements were conducted on 17-18 November 2005, and 26-29 May 2006. Vertical lines indicate 1 standard deviation. *** $P < 0.001$ ($n = 20$).

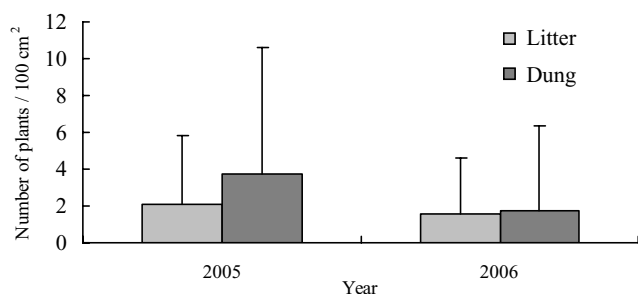


Figure 5 Number of white clover seedlings on the litter layer and cattle dung locations in a felled area in November 2005 and May 2006. Seeds were sown on 21 September 2005 at 1 g/m². Measurements were conducted on 17-18 November 2005, and 26-29 May 2006. Vertical lines indicate 1 standard deviation ($n = 40$).

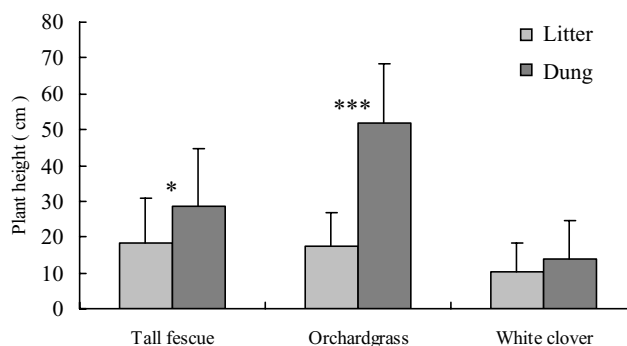


Figure 6 Plant length of tall fescue, orchardgrass, and white clover on the litter layer and cattle dung locations in May 2006. Tall fescue and white clover were seeded in a felled area on 21 September 2005 at 4 and 1 g/m², respectively, and orchardgrass in a secondary deciduous forest on 6 October 2005 at 4 g/m². Measurements were conducted on 26-29 May 2006. Vertical lines indicate 1 standard deviation. * $P < 0.05$, *** $P < 0.001$ ($n = 40$ for tall fescue and white clover, $n = 20$ for orchardgrass).

The average plant length of Wc in the cattle dung locations was 1.3 times that in the litter layer locations, but there was no significant difference.

IV Discussion

1 Difference between seedling growth on cattle dung and that on the litter layer

The temperate forage grasses Tf and Og emerged better in the cattle dung locations than in the litter layer locations on the floor of the secondary forest and in felled areas used as cattle pasture (Figs. 3 and 4). In addition, the growth of each seedling was also superior in cattle dung locations (Fig. 6). Thus, the difference in medium conditions between the cattle dung and litter layer locations influenced the germination and subsequent growth of Tf and Og. Thus, cattle dung is a suitable environment for germination and growth of these forage grasses. Although Wc showed a greater number of seedlings and plants the following year and greater plant length at the cattle dung locations than in the litter layer locations, a clearly significant difference between the locations was not found (Figs. 5 and 6). These findings indicate that on a forest floor covered by a litter layer, cattle dung functions as a safe site for surface-seeded temperate forage grasses, but not to the legume Wc as a suitable germination and nursery bed.

2 Factors contributing to the difference in emergence and growth between cattle dung and litter layer locations

Several factors likely contributed to the larger number of forage grass seedlings in the cattle dung location. Cattle dung maintains a higher moisture content for longer than the litter layer^{7,24)} by absorbing water from sources such as precipitation, thereby promoting the germination of the seeds within. As a result, cattle dung

fosters the emergence and growth of forage grasses, resulting in a high survival rate of the seedlings⁷⁾. In addition, large cattle dung masses on top of the litter layer compress the litter, reducing the air-filled spaces and leading to greater cohesion between the surface soil, litter layer, and cattle dung, and so promoting moisture flow from the surface soil to the dung. Therefore, water absorption and germination of seeds on top of or within the dung is promoted. Finally, the nutrients within the cattle dung enhance plant growth^{1,23,25)}.

By contrast, the litter layer surface is generally made up of large leaves and branches that are not well decomposed, and the surface is more prone to dry conditions than the deeper layers. Therefore, seeds that fall on the top of the litter layer during surface-seeding face poor moisture conditions¹⁶⁾. If a seed does begin to germinate, it is difficult for the root to reach the soil surface. The deeper layers of the litter layer have a much higher moisture content¹⁶⁾, and seeds that reach these deeper layers have an environment conducive to germination. However, it is difficult for the germinated seedlings to penetrate the thick litter layer and reach the surface. Consequently, the germination rate and emergence rate of seeds that fall on the litter layer during surface-seeding appear to be low^{19,20,26)}.

The germination characteristics of Wc may have contributed to the lack of differences in germination and growth between the cattle dung and litter layer locations. In general, Wc germinates better than forage grasses. If sufficient moisture is maintained, Wc seeds can absorb water immediately and germinate quickly^{3,8)}. Therefore, even those seeds on the litter layer would have been able to absorb water from the precipitation (Fig. 2) and germinate quickly, meaning that the moisture-retaining characteristics of cattle dung pats would not have provided a significant benefit to Wc so much as the grasses.

3 Potential problems in the introduction of forage plants using cattle dung

Most of the abandoned agricultural lands or cut-over areas planned for the introduction of forage plants are in mountainous regions. These sites are covered with a thick litter layer that is not easily managed on account of the unfavorable topography and the amount of labor required. The findings of this study indicate that an effective method for the introduction of forage grasses into abandoned lands with litter layers would be to seed on dung from grazing cattle. The success or failure of introducing forage plants in this way depends on the density of dung pats over a site. Where cattle dung density is low, repeated interannual seeding would likely be important for the gradual expansion of the area covered by forage plants. Further study is required to determine which forage plant species would respond well to the random-point distribution of cattle dung. Short grasses with creeping stems would be promising candidates because they gradually expand their growth area via their creeping stems, which begin from source points⁴⁾. Thus, cattle dung has the potential to be a significant component of an environmental conservation technique for introducing forage plants into areas covered by a litter layer without disturbing existing soil and vegetation.

To further develop this simple technique for introducing forage plants by seeding on cattle dung, the following preliminary work must be completed:

- (1) Select promising forage plant species appropriate for seeding on cattle dung.
- (2) Using these species, clarify the influence of various characteristics of cattle dung (e.g., size, thickness, moisture content, number of days from the elimination date) on the germination and growth behavior on dung.
- (3) Identify the factors that are responsible for differences in the germination and growth of forage grasses and Wc on cattle dung.
- (4) Formulate the appropriate seeding rate per unit of cattle dung surface area for each forage plant.

- (5) Clarify the influence of cattle dung pat density at the planned site on the rate at which forage plants cover the site.
- (6) Identify the water retention characteristics and mechanism of cattle dung.

Acknowledgements

The author thanks the field staff of the Ohda Campus of the National Agricultural Research Center for the Western Region for their technical assistance in the field.

References

- 1) Aarons, S. R., R. C. O'Connor and P. J. C. Gourley 2004. Dung decomposition in temperate dairy pastures. I. Changes in soil chemical properties. *Aust. J. Soil Res.* 42: 107-114.
- 2) Akbar, G., A. C. Call and D. R. Wiemeier 1995. Cattle dungpat microenvironmental effects on germination and establishment of crested wheatgrass. *Arid Soil Res. Rehabil.* 9 : 409-422.
- 3) Archer, K. A. and J. I. Rochester 1982. Numbers and germination characteristics of white clover seed recovered from soils on the Northern Tablelands of New South Wales after drought. *J. Aust. Inst. Agric. Sci.* 48: 99-101.
- 4) Bao, G., M. Hirata and A. M. Islam 2004. Effects of N and K application on gap colonization by centipedegrass. *J. Jpn. Grassl. Sci.* 50 (ext) 98-99.
- 5) Fowler, N. L. 1986. Microsite requirements for germination and establishment of three grass species. *Am. Midl. Nat.* 115:131-145.
- 6) Fukuda, E. 2001. Herbivore grazing effects on the succession in a cutover area in Japan: the mechanisms of establishments of *Zoysia japonica* grasslands in the forest climax zone. *J. Jpn. Grassl. Sci.* 47: 436-442 (in Japanese).
- 7) Fukuda, E., R. Meguro and M. Nashiki 1995. Roles of herbivores in establishment of *Zoysia japonica* grasslands in the forest climax zone. 4. Effects of litter layers in forest understory on moisture content of cattle dung and germination of seeds in the dung. *J. Jpn. Grassl. Sci.* 41 (ext): 13-14 (in Japanese).
- 8) Fukuda, E., R. Meguro and T. Yagi 2000. Difference in germination characteristics between seed populations with different coat color. *Jpn. J. Grassl. Sci.* 46(ext): 136-137 (in Japanese).
- 9) Hirota, H. 1973. Improvement of surface sowing in grassland establishment. IV. Method of seedbed preparation for oversowing. *J. Jpn. Grassl. Sci.* 19:38-52 (in Japanese with English summary).
- 10) Hoshino, M., N. Moriya, J. Ikeda and H. Matsumoto 1958. Studies on effects of environmental factors on germination and early growth of forage plants. II. The relationship between seed weight and early growth of forage plants under shade condition. *J. Jpn. Grassl. Sci.* 4: 77 (in Japanese).
- 11) Isselstein, J., B. J. R. Tallowin and N. R. E. Smith 2002. Factors affecting seed germination and seedling establishment of fen-meadow species. *Restor. Ecol.* 10:173-184.
- 12) Lin, C. H., R. L. McGraw, M. F. George and H. E. Garrett 1999. Shade effects on forage crops with potential in temperate agroforestry practices. *Agroforestry Syst.* 44: 109-119.
- 13) Miaki, T., I. Ohmoto, T. Siraishi, Y. Kanaga, T. Chiwa, S. Watanabe, T. Ohmori, I. Katayose, N. Takao and

- Y. Mizoguchi 1975. On Grass productivity of steep mountainous grassland. V. Observation on the grass productivity and grazing capacity of steep mountainous pastures established by the unplowing method. J. Jpn. Grassl. Sci. 21:9-15(in Japanese with English summary).
- 14) Mitamura, T., Y. Ogawa and K. Okamoto 1990. Ecological studies on establishment and development of *Zoysia japonica* Steud. - *Dactylis glomerata* L. association from cut-over land of broad leaved deciduous forest. I. Establishment of *Zoysia japonica* Steud., *Dactylis glomerata* L. and several weed species surface-sown on the land. J. Jpn. Grassl. Sci. 35: 288-292 (in Japanese with English summary).
 - 15) Mizoguchi, S. and H. Hirota 1976. Improvement of surface sowing in grassland establishment. VI. Effects of hole-and furrow seeding on the germination and later growth of pasture species. J. Jpn. Grassl. Sci. 22:132-135 (in Japanese with English summary).
 - 16) Morita, S., K. Sarumaru, E. Yabuuchi and K. Nomura 1981. Emergence of forage plants sown in the forest understory. J. Jpn. Grassl. Sci. 27 (ext): 255-256 (in Japanese).
 - 17) Obara, M., S. Ogura, T. Shishido and K. Sugawara 2006. Seed dispersal by defecation of cattle rotationally grazed in sown and native pastures. J. Jpn. Grassl. Sci. 52: 6-16 (in Japanese with English summary).
 - 18) Ogawa, Y., T. Mitamura and K. Okamoto 1980. Studies on maintenance of productivity of grazing pastures. VI. Effects of non-grazing on litter mass. J. Jpn. Grassl. Sci. 26 (ext): 117-118 (in Japanese).
 - 19) Ogawa, Y., E. Fukuda and K. Okamoto 1989. Effect of litter layers on the establishment of orchardgrass (*Dactylis glomerata* L.) oversown in the cutover land of deciduous broad-leaved forest. J. Jpn. Grassl. Sci. 35: 127-133 (in Japanese with English summary).
 - 20) Ogawa, Y., E. Fukuda and K. Okamoto 1990. Effects of litter layers on the establishment and growth of orchardgrass (*Dactylis glomerata* L.) sown on the cutover land of larch-tree forest. J. Jpn. Grassl. Sci. 36: 130-137 (in Japanese with English summary).
 - 21) Senda, M. 2004. Development of grazing on less-utilized arable land on farm communities. J. Jpn. Farm Manag. 42: 64-67 (in Japanese).
 - 22) Senda, M., Y. Tanimoto and N. Koyama 2002. Grazing system for conservation of rural resources -On the analysis of case studies-. Misc. Publ. Natl. Agric. Res. Center West. Reg. 1: 1-74 (in Japanese with English summary).
 - 23) Sugimoto, Y., R. P. Ball and W. P. Theobald 1992. Dynamics of nitrogen in cattle dung in pasture under different seasonal conditions. J. Jpn. Grassl. Sci. 38 : 167-174.
 - 24) Sugiura, T., H. Kobayashi and S. Iwase 1998. Low input improvement of degraded grassland in semiarid area of China. 1. Evaluation of sheep dung as a water retention agent. J. Jpn. Grassl. Sci. 43:352-356.
 - 25) Wachendorf, M. 2005. Nitrogen leaching from N-15 labelled cow urine and dung applied to grassland on a sandy soil. Nutrient Cycl. Agroecosyst. 73: 89-100.
 - 26) Yano, A. 1973. Studies on the improvement of vegetation on sloped lands in warmer districts. VIII. Effect of the kind of litters on the germination and the early growth of pasture grasses. J. Jpn. Grassl. Sci. 19: 265-268 (in Japanese with English summary).
 - 27) Yano, A. 1976. Studies on the improvement of vegetation on sloped lands in warmer districts. XII. Suitable seed-bed condition for germination and establishment of seed pellet. J. Jpn. Grassl. Sci. 22: 99-103 (in Japanese with English summary).

Summary

The objective of this study was to evaluate whether dung of grazing cattle could serve as safe sites for forage plants seeded on the surface litter layer of a forest floor. Three temperate forage plants (*Festuca arundinacea* Schreb., *Trifolium repens* L., and *Dactylis glomerata* L.) were surface-seeded in early autumn on litter layers or cattle dung on the floors of a deciduous broad-leaved secondary forest and a felled area in a grazing land. In late autumn, the number of seedlings that emerged on cattle dung was compared with that on the litter layer. The following May, the number and length of individuals that survived were measured. More individuals emerged and survived on cattle dung than on litter. The average number of seedlings of *F. arundinacea*, *D. glomerata*, and *T. repens* per 100 cm² of the cattle dung sites were 21.2, 22.0, and 3.7, which were 2.3, 2.8, and 1.7 times those on the corresponding litter layer sites. The following May, the average number of plants of the same species per 100 cm² of the cattle dung sites were 5.0, 7.2, and 1.7, which were 1.8, 1.4, and 1.1 times those on the litter layer sites. The plant lengths of each on the cattle dung sites were 28.4, 51.6, and 13.8 cm, which were 1.6, 2.9, and 1.3 times those on the litter layer sites. All characteristics of the forage grass species, except the plant number of *D. glomerata* in the following May, were significantly different between the two sites, but *T. repens* showed no significant differences. These findings indicate that cattle dung could function as a safe site for surface-seeded forage grasses, providing an environment suitable for their emergence and growth on secondary and clearcut forest floors with litter layers.

林床に分布する落葉層と牛ふんの上に表面播種された牧草の出芽と生育

福田栄紀*

摘 要

放牧地内の落葉層が堆積する二次林林床において、放牧牛の排糞が、表面播種された寒地型牧草 3 種のセイフサイトとなりうるかどうかを検証した。5 月から10月まで牛群が放牧される草地内の落葉広葉樹二次林において、3 月に伐採し、一部間伐区域を含む伐採跡地の林床に9 月下旬トールフェスクとシロクローバを、伐採しなかった二次林の林床に10月上旬オーチャードグラスを表面播種した。播種後、両林床において、牛ふん上とその南 1 m の落葉層上に各々10cm四方の定置調査区を設け、11月中旬に出芽数を、翌年 5 月末に生残個体数と草高を測定し、それらを牛ふん上と落葉層上とで比較した。両イネ科草種とも、出芽数、翌年の個体数と草高の平均値は、牛ふん上の方が落葉層上より高かった。即ち、牛ふん上のほうが出芽数は約2.5倍、生残個体数は約1.5倍、草高は1.6～2.9倍、落葉層上より高い値を示した。イネ科草種に関するこれら特性値の平均値の差は、オーチャードグラスの生残個体数を除き、いずれも有意であった。一方、シロクローバについても各特性値は牛ふん上のほうが落葉層上より高かったが、いずれも有意な差ではなかった。落葉層で被われた二次林や伐採跡地の林床において、牛ふんは表面播種された寒地型イネ科牧草にとって出芽、生育するのに好適な環境と考えられ、セイフサイトとして機能すると結論づけられた。

四万十川の一流域における窒素，リン，無機イオンの濃度変動 および負荷流出特性

吉田正則・村上敏文*・吉川省子・藤原伸介**

Key words : agricultural and livestock industries, catchment, concentration, effluent load, river

目 次

I 緒 言	75	1 降水の水質	78
II 対象流域	76	2 手計測，手採取による水質評価	78
III 研究方法	76	3 自動測定と修正補完による流量， 水質評価	81
1 調査地点	76	4 物質収支	85
2 調査期間	77	5 農業集落の影響	87
3 流 量	77	V 摘 要	87
4 降 水 量	77	謝 辞	88
5 水 質	77	引 用 文 献	88
6 日負荷量と比負荷	77	Summary	89
IV 結果と考察	78		

I 緒 言

四万十川は，四国山地の不入山に源を発し，高知県西部の5市町，愛媛県南部の3市町（合併後）を流域とし，四国第二の流域面積（2,270km²）を有する河川である．本河川は“日本最後の清流”として全国的にも名高いが，1980年代以降，支流における水量の減少，濁りの発生，漁獲高の減少などが契機となって水質の悪化が懸念されるようになった¹⁾．

そのため高知県は「四万十川清流保全計画」²⁾や「清流四万十川総合プラン」³⁾を策定し，市街地や事業所に対する排水浄化処理を重点的に進めてきた．しかし四万十川上流域は養豚を中心とする畜産業の盛んな地域であり²⁾，豚舎からは多量の汚水が直接川へ放流されている．これらの汚水は基本的に

曝気処理されたもので，国の排水基準⁴⁾からみても特に問題になるものではないが，そこに含まれる多量の負荷が四万十川の水質にどのような影響をおよぼしているかは不明のままといわざるを得ない．

また同地域は水稻のほか，ショウガや大豆の栽培が盛んな地域である．水稻に関しては春先の川の濁りと代かきとの関係が指摘されているが，これは単に懸濁物の流入ということだけでなく，窒素，リンなど肥料成分の流入問題としても捉えることができる．

ショウガは近年，中国産などとの競争からより一層の高収量，高品質化が求められており，化成肥料や堆肥が増加する一因となっている．また大豆は米からの転換作物として栽培が盛んになりつつあるが，ここでも養豚から発生する大量の豚ふん堆肥を投入している実態がある．

（平成20年9月1日受付，平成20年12月9日受理）

広域農業水系保全研究チーム

*現 東北農業研究センター

**現 中央農業総合研究センター

このように四万十川上流域では、畜産業のみならず耕種農業からも河川への窒素，リンの流出懸念が高まってきているが，農畜産業から流出する窒素，リンの実態や河川水質との因果関係については未解明な部分が多く，行政的にも具体的な対策が打たれないままとなっている。

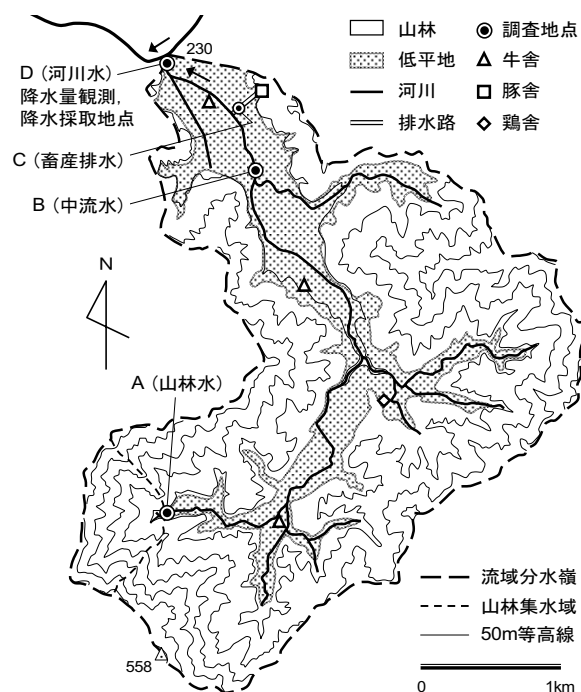
そこで前報⁵⁾では，農業活動による水質汚濁のおもな原因となる窒素，リン，およびこれらの流出特性を知る上で役立つ情報となる無機イオンの河川水質におよぼす影響を明らかにするため，流量，濃度，負荷量の測定・評価手法の確立を図ってきた。本報では，前報⁵⁾により確立された手法を用いて窒素，リン，無機イオンの濃度，負荷量の変動実態を明らかにする。そして各水質項目の変動特性や物質収支などから農畜産業と河川水質との関わりに関する定量的な評価を試みたので報告する。

Ⅱ 対象流域

対象流域は四万十川上流の少々支川に属する面積815haの流域である（第1図）。標高は230～558m，年間降水量は3,264mm，年平均気温は15.0℃である（降水量と気温は1990～1999年のアメダス平均値）。流域の76%（622ha）は山林が占め，残り24%（193ha）を川に沿う低平地が占める。山林はスギ・ヒノキの常緑針葉樹人工林で現在も伐採と植林が行われている。低平地には112haの耕作地が含まれるほか，耕作放棄地，遊休地，宅地，道路などが含まれる。

おもな作目は水稻（76.0ha），ショウガ（7.3ha），大豆（6.5ha），タバコ（2.9ha），施設ニラ（1.7ha）などである（カッコ内は作付け面積，2000年役場聞き取り）。水稻のかんがい水源は山林流出水，かんがい方式は用排水分離の水路かんがいで一筆ごとに掛け流しが行われる。水稻以外の作目は転換畑栽培である。畜産は酪農家2戸，肥育牛農家1戸，養豚農家1戸，ブロイラー農家1戸で，乳用牛34頭，肉用牛162頭，豚1,328頭，ブロイラー17,000羽が飼養されている。常住人口は270人である（ともに，2000年役場聞き取り）。

なお，上記の土地利用，作物栽培，家畜飼養状況は四万十川上流における農業地域の特徴をよく表し



第1図 調査流域の概要

たものであり，本流域で得られる知見が当該農業地域全体の評価に役立つと予想されることから本流域を選定した。

Ⅲ 研究方法

1 調査地点

調査地点は河川最上流の山林－低平地境界地点A（前報⁵⁾の山林水Aと同一地点），中流地点B，豚舎からの污水が河川に流入する直前の排水路地点C，流域（低平地）末端地点Dとし，地点Aでは「山林水」，地点Bでは「中流水」，地点Cでは「畜産排水」，地点Dでは「河川水」と区分して調査した（第1図）。また地点Dでは降水量観測と降水採取を併せて行った。

畜産排水は豚舎から常時排出される污水をおもな給源とし，周辺農地の地表排水を交えながら河川へ流出する。中流水は畜産排水の河川出口から上流へ約500m遡った地点の河川水である。牛舎や鶏舎からの常時排水は認められなかったことから，中流水の水質は，これより上流に位置する面源からの水質を表わすとみなしてよい。

2 調査期間

調査期間は2000年3月16日から2003年3月15日の3年間である。本報ではこの期間を3分割し，2000年3月16日から2001年3月15日までを1年目，2001年3月16日から2002年3月15日までを2年目，2002年3月16日から2003年3月15日までを3年目と呼ぶ。

畜産排水と中流水については2001年5月23日から2002年9月25日までの1年4ヶ月間を調査期間とした。

3 流 量

河川水，山林水の流量 ($\text{m}^3 \text{d}^{-1}$) は前報⁵⁾の方法で測定した。欠測日の流量は，実測された流量から修正補完法⁵⁾を用いて推定した。手計測による全山林流量 ($\text{m}^3 \text{d}^{-1}$) (後述の第3図で使用) は，便宜上，前報⁵⁾の式(37)における修正補完流量に山林水の手計測流量を代入して求めた(山林水拡張法)。

畜産排水，中流水の流量 ($\text{m}^3 \text{d}^{-1}$) は原則2週間に1度，プロペラ式流速計(三光精密工業製SV101型)による流速・断面積計測法⁶⁾で測定し，1日当たりの流量に換算した。

4 降 水 量

日降水量 (mmd^{-1}) は転倒ます式雨量計(キャンベル製385型)により測定した。欠測日は，流域より5km離れたアメダス観測所の日降水量データを用いた。

5 水 質

1) 河川水と山林水

河川水，山林水の濃度 (mgL^{-1}) は前報⁵⁾と同様の方法で採水，分析した。河川水の濃度は自動採水により原則毎日測定したが，器械の不調などで採水ができなかった日は欠測日とした。山林水の濃度は原則2週間に1度の手採取しか行わなかったため，手採取日を含む調査期間すべての日を欠測日として扱った。これらの欠測日の濃度は，実測された濃度から修正補完法⁵⁾を用いて推定した。手採取による全山林濃度 (mgL^{-1}) (後述の第3図で使用) は，便宜上，前報⁵⁾の式(39)における修正補完

濃度に山林水の手採取濃度を代入して求めた(山林水拡張法)。

2) 畜産排水と中流水

畜産排水と中流水は原則2週間に1度，ポリ瓶で手採取した。畜産排水，中流水の濃度 (mgL^{-1}) は，前報⁵⁾と同様の方法で分析した。採水作業の不備から調査期間中9日の欠測日が生じたが，河川水や山林水のような濃度補完は行っていない。

3) 降 水

降水は地上3mに設けた直径180mmの漏斗で採取し，6Lポリ瓶に貯留したあと原則2週間に1度回収した。漏斗上面は常に開放し，湿性降下物(雨滴に取り込まれて降下する物質)と乾性降下物(粒子として降下する物質)を区別しなかった。この方法では任意日の降水濃度 (mgL^{-1}) は分析できないため，当該日のあとの直近回収日の濃度で代表させた。また回収日までの濃度変化や水質変化は無視した。

4) 水質項目と濃度分析法

分析する項目は全窒素(T-N)，全リン(T-P)，ナトリウムイオン(Na^+)，アンモニウム態窒素(NH_4^+-N)，カリウムイオン(K^+)，マグネシウムイオン(Mg^{2+})，カルシウムイオン(Ca^{2+})，塩化物イオン(Cl^-)，硝酸態窒素(NO_3^--N)，亜硝酸態窒素(NO_2^--N)，リン酸態リン($\text{PO}_4^{3--}\text{P}$)，硫酸イオン(SO_4^{2-})である。濃度分析法は前報⁵⁾に記したとおりである。

なお本報では， NO_2^--N と NO_3^--N の合計を $\text{NO}_{2+3}^--\text{N}$ と表わし，T-N濃度から NH_4^+-N および $\text{NO}_{2+3}^--\text{N}$ 濃度を差し引いた値を有機態窒素(Or.-N)濃度と定義する。

6 日負荷量と比負荷

河川水，全山林の日負荷量 (kg d^{-1}) は前報⁵⁾に基づいて求めた。畜産排水，中流水の日負荷量 (kg d^{-1}) は，日流量に当該日の濃度を乗じて求めた。手計測，手採取による全山林負荷量 (kg d^{-1}) (後述の第3図で使用) は，前記の手計測全山林流量に手採取による全山林濃度を乗じて求めた。濃度が検出されなかった日は日負荷量を0 kg d^{-1} とした。

降水の比負荷 ($\text{kg ha}^{-1} \text{d}^{-1}$) は、日降水量 (mmd^{-1}) に流域面積を乗じた水量にさらに降水濃度を乗じ、1 ha当たりの負荷量に換算して求めた。

Ⅳ 結果と考察

1 降水の水質

第2図に、降水中のT-N、T-Pの濃度と比負荷を期間降水量との関係で示す。ここでの期間降水量は、前回の降水回収日翌日から当該降水回収日までの日降水量合計値を表わす。

期間降水量が10mm以下の場合、T-Nが最大 5.40mgL^{-1} 、T-Pが最大 0.42mgL^{-1} と濃度が高まるときがあったが、期間降水量が10mmを上回る領域では、T-Nが 2mgL^{-1} 以下、T-Pが 0.1mgL^{-1} 以下でおおむね安定していた。少雨時に濃度が高まったのは大気中や漏斗面にあった乾性降下物が少量の降水に取り込まれたためと思われる。

期間降水量と降水比負荷との関係はT-N、T-Pとも250mm前後を頂点とする山型の分布を示したが、原因などの詳細は不明である。

3年間の年平均比負荷（3年積算値を3で除した値）を求めるとT-Nが 18.7kg ha^{-1} 、T-Pが 0.69kg ha^{-1} となった。また、3年間の降水量加重平

均濃度はT-Nが 0.60mgL^{-1} 、T-Pが 0.02mgL^{-1} となった。

2 手計測、手採取による水質評価

第3図には、手計測、手採取による濃度、負荷量の時系列変化、および流量に対する濃度の分布状況を示す。データは1～3年目の全期間を含むが、便宜上、各年の同一月日を重ねて示す。

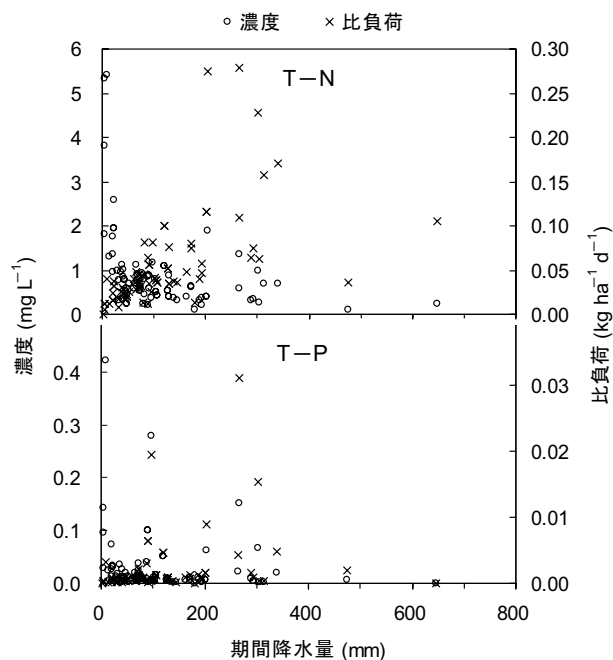
図中の近似曲線は、3次または4次の多項式による負荷量の変動傾向を示す。全山林負荷量の近似曲線は、プロットが低下したため途切れている部分がある。 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ と $\text{PO}_4^{3-} - \text{P}$ の負荷量については、検出回数が少ないため近似曲線を一部省略した。低平地降水負荷量は、降水採取期間中の負荷量を期間日数で除した値をプロットした。

全山林の $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 、 $\text{NO}_{2+3}^- - \text{N}$ 濃度は、降水に比べ低い値を示した。これは降水として山林へ供給された NH_4^+ と NO_{2+3}^- が、前者については林内において酸化、吸収され、後者については前者の酸化生成成分を含め林内で吸収、固定、脱窒されたためと考えられる。一方全山林の Na^+ 、 Mg^{2+} 、 Ca^{2+} 濃度は、降水に対し高い値を示した。これは、蒸発散による降水の濃縮や基岩の化学的風化の影響が関係していることを示す⁷⁾。

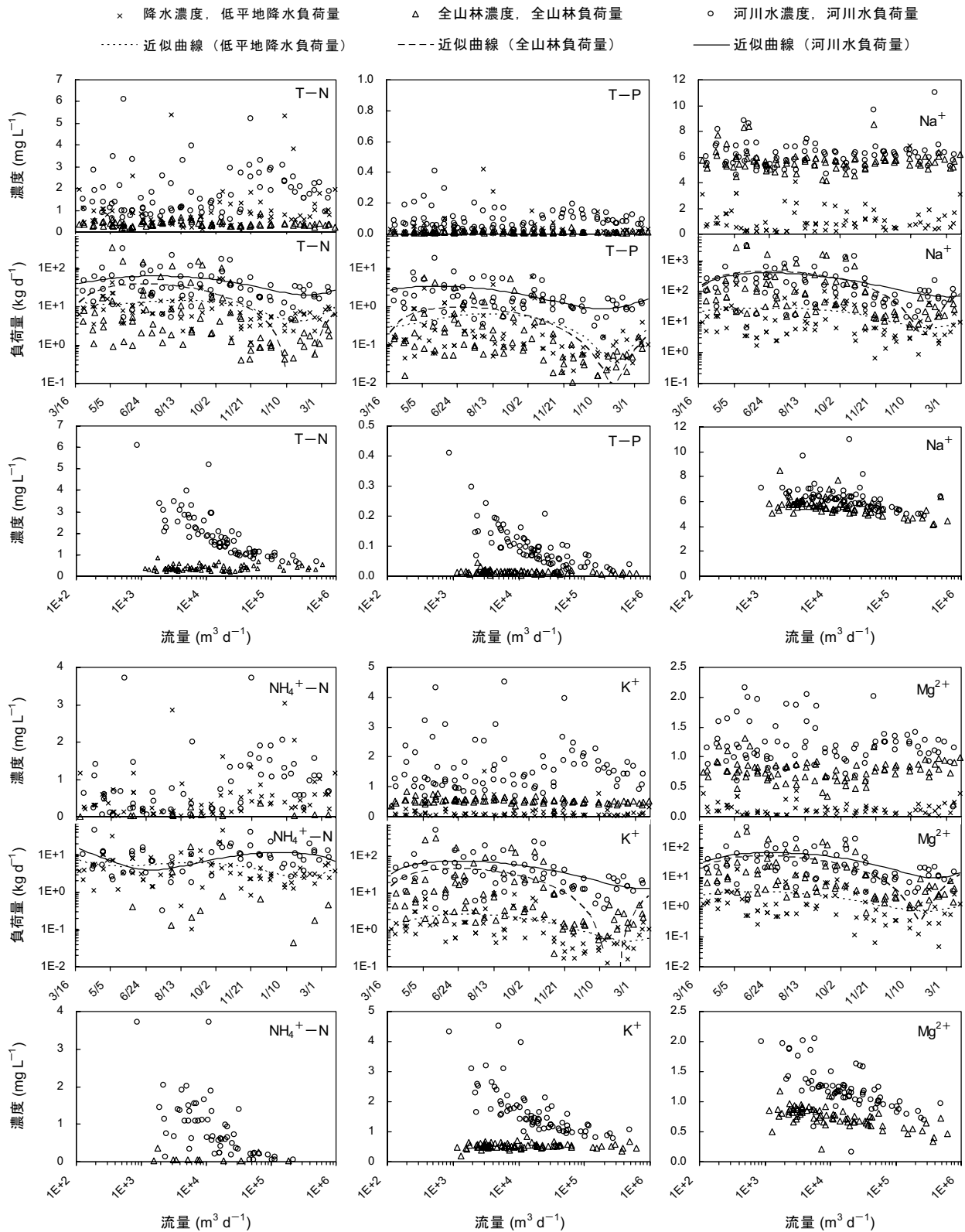
河川水に関しては、 Na^+ 、 Cl^- 濃度の年間変動が小さく、その水準は全山林水と同等であった。しかしこれら以外の水質項目は濃度の年間変動が大きく、春から夏、および秋から冬にかけて濃度ピークがみられた。こうした濃度の高まりは、多くの場合、川の流量が低下したときに現れた。

河川水の負荷量をみると、降水量、流量の多い夏に増加し、それらの少ない冬に減少する傾向がみられた。しかし $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ だけは例外的に夏に少なく冬に多い傾向がみられた。全山林にはこのような傾向がみられないことから、低平地由来 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ の影響が示唆される。また、こうした季節的な変動とは別に突発的な濃度の高まりが認められることから、不定期的な人為起源の可能性がうかがわれる。

流量に対する濃度の関係は、全山林と河川水の分布パターンの違いからつぎのような三つのタイプに分けることができると考えられる。すなわち、山林水と河川水の分布が並行するタイプI (Na^+ 、 Cl^-)、

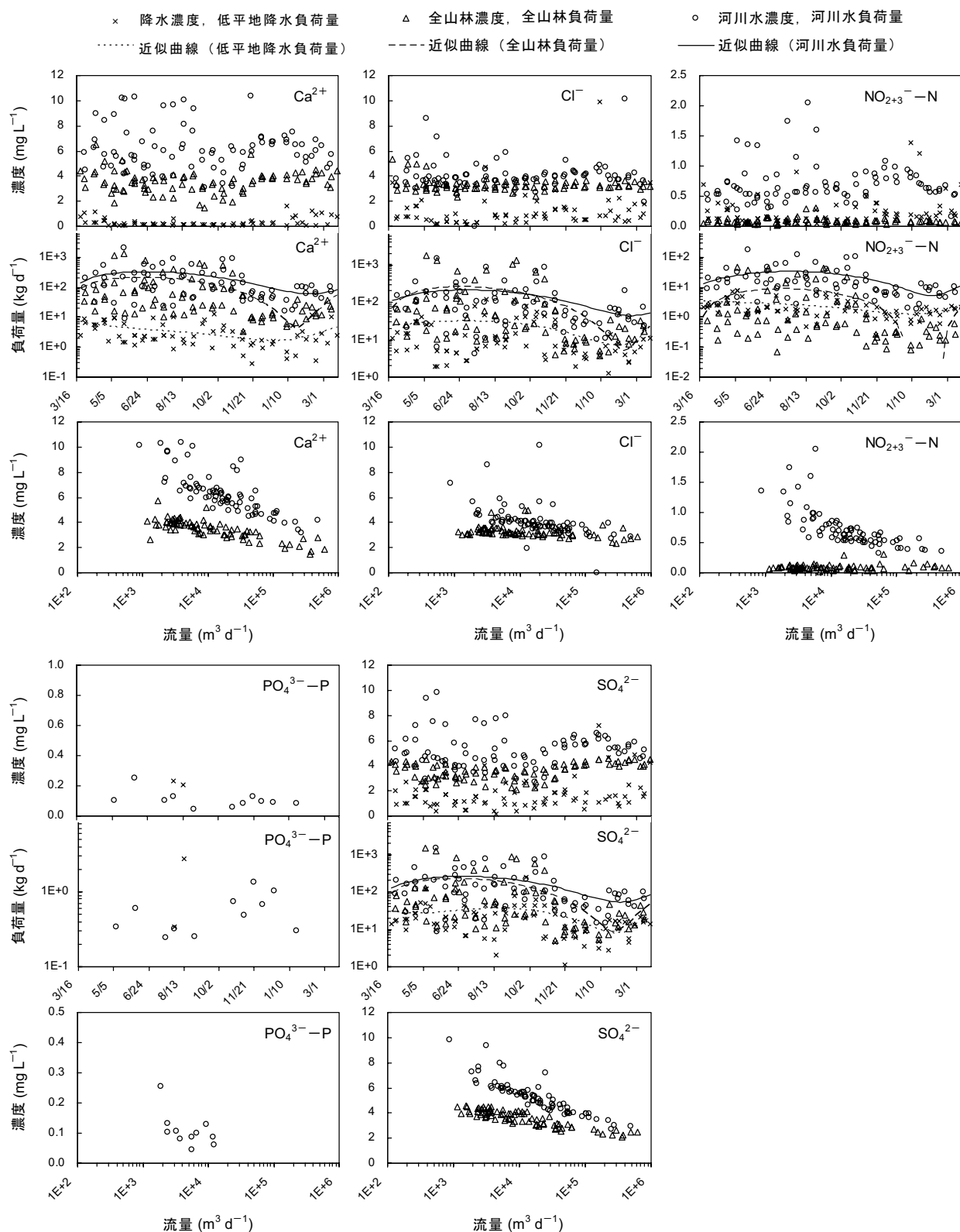


第2図 降水の濃度、比負荷の対降水量分布



第3図 手計測，手採取による濃度，負荷量の時系列変化，および流量に対する濃度の分布

曲線は3次または4次多項式による変動傾向を示す。全山林流量，濃度，負荷量は，河川水との比較のため手計測流量，手採取濃度を山林水拡張法で変換した値を示す。NH₄⁺-Nの全山林負荷量は検出回数が少ないため曲線を省略した。



第3図 (つづき) 手計測, 手採取による濃度, 負荷量の時系列変化, および流量に対する濃度の分布
 曲線は3次または4次多項式による変動傾向を示す。全山林流量, 濃度, 負荷量は, 河川水との比較のため手計測流量, 手採取濃度を山林水拡張法で変換した値を示す。 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ の負荷量は検出回数が少ないため曲線を省略した。

第1表 T-N, T-P, 無機イオンのタイプ別特徴

判断基準	タイプⅠ		タイプⅡ				タイプⅢ				
	Na ⁺	Cl ⁻	T-N	T-P	K ⁺	NO ₂₊₃ ⁻ -N	NH ₄ ⁺ -N	Mg ²⁺	Ca ²⁺	PO ₄ ³⁻ -P	SO ₄ ²⁻
低平地での濃度上昇	×	×	◎	○	○	◎	○	○	○	○	×
低平地での負荷増大	×	×	◎	◎	◎	◎	○	×	×	○ ^a	×
渇水時の濃度上昇	×	×	◎	◎	◎	○	◎	○	○	○	○

◎：明瞭に認められる，○：少し認められる，×：認められない。

^a 山林負荷としては全く検出されず，河川水でもあまり検出されなかったため。

同分布が流量減少とともに明瞭に分かれるタイプⅡ（T-N, T-P, K⁺, NO₂₊₃⁻-N），同分布がタイプⅠとタイプⅡの間にあるタイプⅢ（NH₄⁺-N, Mg²⁺, Ca²⁺, PO₄³⁻-P, SO₄²⁻）である。これらの三つのタイプの特徴をまとめたのが第1表である。ここでは，低平地での濃度上昇が認められるか，低平地での負荷増大が認められるか，渇水時の濃度上昇が認められるか，の三点を判断基準にし，それぞれの基準について，「明瞭に認められる」，「少し認められる」，「認められない」，の三段階に区分した。

タイプⅠの水質項目（Na⁺, Cl⁻）は，どの判断基準も「認められない」項目である。タイプⅡの水質項目（T-N, T-P, K⁺, NO₂₊₃⁻-N）は，判断基準のうちふたつ以上が「明瞭に認められる」項目である。そしてタイプⅢの水質項目（NH₄⁺-N, Mg²⁺, Ca²⁺, PO₄³⁻-P, SO₄²⁻）は，ほとんどの判断基準が「少し認められる」か「認められない」項目である。

これらの特徴から，タイプⅡの水質項目において，低平地通過後の濃度上昇，負荷量増大傾向が強いことが判明した。またNH₄⁺-Nに関しては，低平地での濃度上昇，負荷量増大傾向は強くないものの渇水時の濃度上昇が明らかに認められることから，点源由来の可能性がうかがわれた。

3 自動測定と修正補完による流量，水質評価

第4図には，自動測定値と修正補完値⁵⁾を組み合わせた流量，濃度，負荷量の時系列変化を示す。ここでは分析した11水質項目の代表例としてT-Nの場合を示す。

1) 流 量

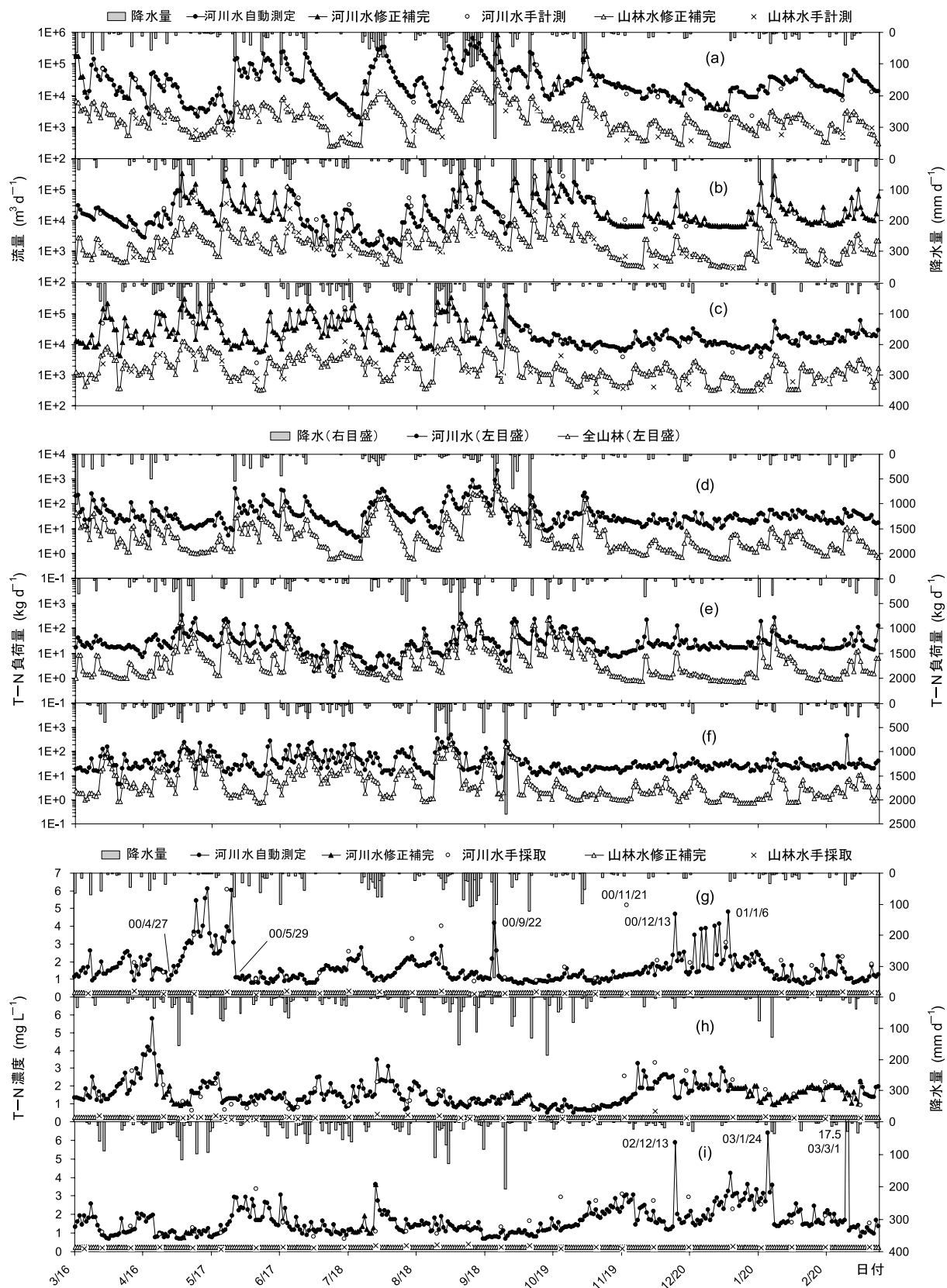
河川水の自動測定流量は降水量の変化によく対応している（第4図 a, b, c）。河川水の修正補完流量も降水量の変化によく対応しており，自動測定流量とのつながりにおいても大きな不都合はみられない。山林水における修正補完流量も河川水の流量に相似する形で降水量によく対応しており，手計測流量との対応もおおむね良好といえる。これらのことは，超音波流速センサーを用いた流量観測法⁸⁾が良好に機能していたことを示すとともに，欠測日における修正補完法の適用⁵⁾が適切に行われたことを示している。

2) 負 荷 量

負荷量の時系列変動をみても降水量との対応関係は良好といえる（第4図 d, e, f）。ただし全山林と河川水を比べると，全山林負荷量が河川水負荷量を超過する日が幾日かみられた（例えば第4図 d, 2000年9月25日～10月2日）。これら日数は3年間の全日数1095日中24日であり，この間の“過剰”流出負荷量は全山林負荷量に対し5%程度であった。

このような過剰流出負荷の発生が修正補完負荷量の評価誤差⁵⁾によるものでないとするれば，その過剰分がどこへ流出したかが問題となる。そこで以下のような考察を行った。

前報⁵⁾にも記した通り，本流域の地質は四万十帯北帯と呼ばれる砂岩，泥岩の互層からなっている^{7, 9)}。そのためこれらの岩石を母材とする堆積層は，泥質な砂層から形成されていることが推測される。本流域の低平地もこのような砂層から構成されると仮定すると，土層の地下水滲出率（飽和した間隙水のうち重力によって排出される水の全容積に



第4図 自動測定値と修正補完値を組み合わせた (a) 1年目, (b) 2年目, (c) 3年目の流量, (d) 1年目, (e) 2年目, (f) 3年目のT-N負荷量, および (g) 1年目, (h) 2年目, (i) 3年目のT-N濃度の時系列変化
図中の00/4/27は2000年4月27日を示す。

対する%)は、大久保・藤田の文献値¹⁰⁾から15~20%と推定される。ここで土層の平面積を低平地に等しい193ha、地下水上昇高を現地井戸調査や所有者の聞き取り調査などから最大5mと仮定すると、本流域が地下に貯留できる水の量は最大 $5\text{ m} \times (0.15 \sim 0.20) \times 193 \times 10^4\text{ m}^2 = (1.4 \sim 1.9) \times 10^6\text{ m}^3$ と見積もられる。

一方、全山林流量と低平地流量の和を河川水流量と比較して、前者が後者より大きい日の差分(過剰流量)を1日当たり平均すると、 $7.0 \times 10^4\text{ m}^3\text{ d}^{-1}$ と計算される。ただし低平地流量には実測値がなく、降水日のため蒸発散量は少ないと推測されることから、ここでの低平地流量は低平地降水量の体積換算値で代用した。過剰流量が連続して発生した日の最長日数は2000年9月11日~10月2日の22日である。これらの値を用いると、過剰流量の最大量は $7.0 \times 10^4\text{ m}^3\text{ d}^{-1} \times 22\text{ d} = 1.5 \times 10^6\text{ m}^3$ と推定される。

地下貯水可能量 $(1.4 \sim 1.9) \times 10^6\text{ m}^3$ が過剰流量の最大量 $1.5 \times 10^6\text{ m}^3$ とほぼ等しい量になったことから、過剰流出日の全山林流量の一部が低平地の地下帯水層に一時的に貯留されている可能性が示唆された。

つぎに全山林負荷量のうち、どの程度の割合が地下へ貯留され得るかを試算する。まず過剰流量(=地下貯水量)に占める全山林由来分の比率を、過剰流量が発生した日の全山林流量と低平地流量の和に対する全山林流量の比率(63%)に等しいと仮定する。すると過剰流量のうちの全山林由来分は $7.0 \times 10^4\text{ m}^3\text{ d}^{-1} \times 0.63 = 4.4 \times 10^4\text{ m}^3\text{ d}^{-1}$ となる。過剰流量が発生した日の全山林流量は日平均 $13.4 \times 10^4\text{ m}^3\text{ d}^{-1}$ であったことから、全山林流量に占める全山林過剰流量の割合は33%となる。ここで地下浸透する負荷量の割合が地下浸透する流量の割合に等しいとすると、全山林負荷量のうち地下へもぐらずに速やかに流出する負荷量は全山林負荷量のうち100%-33%=67%分となる。このような考えのもとで計算し直すと、全山林負荷量のうち地下へもぐらず流出する負荷量が河川水負荷量を上回る日数は(前記の24日に対し)わずか2日、この間の過剰流出負荷量が全山林負荷量に占める割合は(前記の5%に対し)0.2%とごくわずかになる。

以上の考察から、本流域においては、山林から流

出した負荷の一部が低平地の地下に一時的に貯留されることにより、全山林負荷量が河川水負荷量を超過する現象は説明できると考えられた。そして一旦地下に貯留された負荷は、降水後河川水位が低下すると、高度がより高い周辺地下水位とのあいだに生じる水頭差によって地下水とともに河床へと浸出し、河川水負荷の一部として系外へ流出するものと考えられた。

3) 濃 度

本流域の河川水濃度は、降水の継続とともに低下し、降水終了後徐々に上昇するのが一般的傾向であった(第4図 g, h, i)。ただし降水初日に関しては濃度が上昇する日と下降する日の両方がみられた。いずれの場合も降水2日目以降は降水の継続とともに濃度が低下した。すべての降水初日について、その日の濃度が前日(無降水日)濃度より高かったか低かったかをみると、191日中前者は110日、後者は81日だった。単に無降水日の濃度上昇が継続しただけとみられる日を除くと、降水初日の濃度の上昇、下降の頻度はほぼ同数とみられた。

降水初日における濃度変化の違いについてはつぎのような理由が考えられる。すなわち、河川水の濃度変化は降水初期における負荷物質の洗い出しによる濃度上昇期と、その後の流量増にともなう濃度希釈期の2期に分けられる。降水初日の平均濃度は濃度上昇期における濃度上昇の度合いとその継続時間、および濃度希釈期における濃度下降の度合いとその継続時間によって決まる。よって両者のバランスによって降水初日の平均濃度が上昇するか下降するかが決まる、と考えられる。

河川水濃度の基調的な変動パターンは上記のようであるが、時期や降水イベントによっては特異な水質変動が現れる。まず、代かきが行われる4~5月の時期である。この時期は雨の量や降り方が河川の水質に大きな影響をおよぼした。

比較的雨が少なかった1年目(第4図 g, 2000年4月27~5月29日, 期間降水量133mm)は濃度の上昇が大きく、 6 mgL^{-1} に達することもしばしばあった。しかし雨が多かった2年目, 3年目(第4図 h, i, 2001, 2002年4月27~5月29日, 期間降水量それぞれ491mm, 509mm)は、濃度が高くとも3

mgL^{-1} 程度しか上がらなかった。特に3年目は、降水の頻度が大きかったことから、濃度は終始 1 mgL^{-1} 程度を推移した。同期間中の河川水負荷量をみると、1年目は日平均負荷量が 35 kg d^{-1} 、期間負荷量が 1.2 Mg であったのに対し、2年目、3年目は、日平均負荷量が $67 \sim 81 \text{ kg d}^{-1}$ 、期間負荷量が $2.2 \sim 2.7 \text{ Mg}$ と約2倍に増えた(第4図 d, e, f)。

濃度の上昇とともに現れた河川の濁りが代かき直後の田面水の強制落水(代かき落水)によることを目視で確認したこと、そのときの田面水10サンプルの平均 T-N 濃度が 12.8 mgL^{-1} と比較的高い値を示したことから、この時期の河川水負荷量の相当部分は代かき落水によってもたらされていると考えられる。しかし代かき落水の河川水質への影響の仕方は降水量や雨の降り方によって異なっており、雨の少ない年は濃度が高く負荷量は少ない、雨の多い年は濃度が低く負荷量が多い、そして雨が頻繁に降るほど濃度は低下するという傾向を持っていた。

本流域では、河川水濃度が降水の継続とともに低下するのが一般的と述べたが、降水イベントによっては降水2日目以降に急激に濃度が上昇する例がみられた(第4図 g, 2000年9月22日)。この日は前日からの 29 mmd^{-1} に続き、 337 mmd^{-1} の集中豪雨が降った日である。この日採水した懸濁物質の濃度は 61 mgL^{-1} であり、平常時 (2 mgL^{-1}) の約30倍に達した。また懸濁物中の窒素濃度は 3.35 mgL^{-1} であり、採水中の T-N 濃度 (4.19 mgL^{-1}) の80%を占めた。このように通常の降水よりはるかに多い雨が集中的に降ると、河道や流域内に滞留していた堆積物が一気に押し流され、降水2日目にもかかわらず高濃度の河川水が発生したと考えられる。

その他、濃度が急激に上昇する日のなかには、降水とは全く関係のない日が幾日かみられた(例えば第4図 g, 2000年11月21日, 2000年12月13日～2001年1月6日, 第4図 i, 2002年12月13日～2003年1月24日, 2003年3月1日)。このことについては次項で詳しく述べる。

山林水濃度に関しては、河川水濃度と対照的に3年間ほとんど変化せず ($0.22 \sim 0.27 \text{ mgL}^{-1}$)、平均 0.25 mgL^{-1} の低い水準を維持していた。

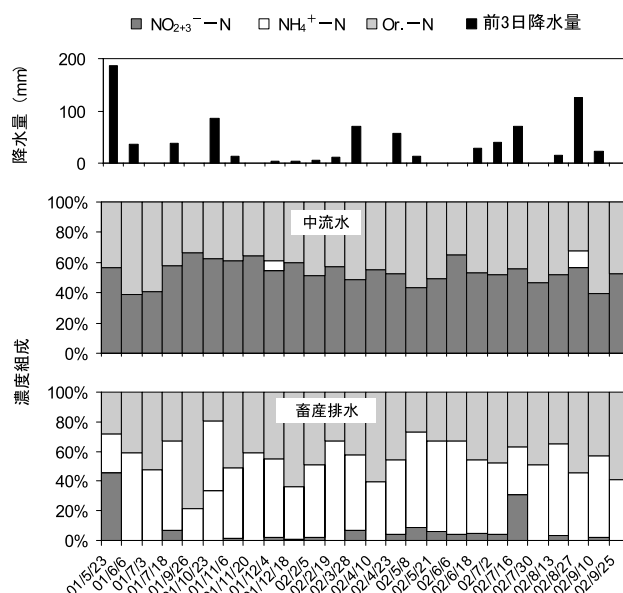
4) 畜産排水と代かき落水の影響

前項で述べた降水に無関係な濃度上昇の要因を検討するため、第5図に、中流水と畜産排水の T-N 濃度に占める $\text{NO}_{2+3}^{-}-\text{N}$ 、 $\text{NH}_4^{+}-\text{N}$ 、 $\text{Or.}-\text{N}$ 濃度の割合を示す。

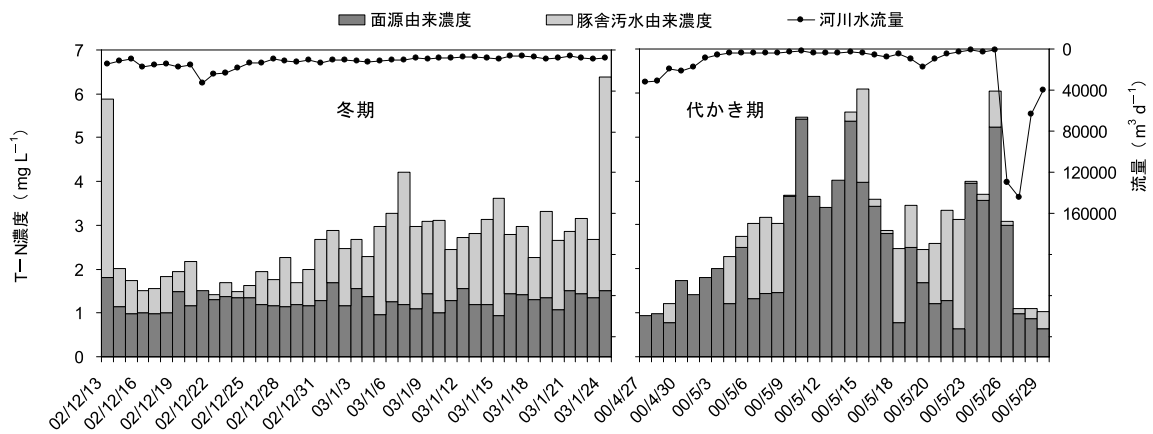
中流水の T-N 濃度は、いずれの日もその大部分が $\text{NO}_{2+3}^{-}-\text{N}$ と $\text{Or.}-\text{N}$ から組成されていた。一方畜産排水の T-N 濃度は、多くの日で $\text{NH}_4^{+}-\text{N}$ と $\text{Or.}-\text{N}$ から組成されるものの、一部に $\text{NO}_{2+3}^{-}-\text{N}$ の組成割合が高まる日があった。この $\text{NO}_{2+3}^{-}-\text{N}$ の割合が高まる日(2001年5月23日, 2001年10月23日, 2002年7月16日)は、当日以前の3日間に降った雨の量(前3日降水量)が比較的多い日に該当する。逆に前3日降水量が認められない日(例えば2001年7月3日, 2001年9月26日, 2001年11月20日など)は、 $\text{NO}_{2+3}^{-}-\text{N}$ が検出されないか検出されても組成割合が低い日であった。これらのことから畜産排水に含まれる $\text{NO}_{2+3}^{-}-\text{N}$ の多くは豚舎からの汚水に由来するものではなく、排水路周辺にある農地からの混入によるものであることが推測された。

以上の知見を踏まえ、畜産排水が河川水の T-N 濃度におよぼす影響を分析するため、つぎのような五つの仮定をおく。

仮定1: $\text{NH}_4^{+}-\text{N}$ は豚舎汚水のみ由来し面源には由来しない。



第5図 中流水と畜産排水の成分別窒素濃度組成



第6図 冬期と代かき期における河川水中の面源由来T-N濃度と豚舎汚水由来T-N濃度

仮定2: $\text{NO}_{2+3}^- - \text{N}$ は面源のみに由来し豚舎汚水には由来しない。

仮定3: 河川水中の豚舎汚水由来Or.-N濃度は、畜産排水中の平均Or.-N/ $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 比（ただし $\text{NO}_{2+3}^- - \text{N}$ の割合が高かった2001年5月23日、2001年10月23日、2002年7月16日は除く）に当該日の河川水中 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 濃度を乗じた値に等しい。

仮定4: 河川水中の面源由来Or.-N濃度は、中流水の平均Or.-N/ $\text{NO}_{2+3}^- - \text{N}$ 比に当該日の河川水中 $\text{NO}_{2+3}^- - \text{N}$ 濃度を乗じた値に等しい。

仮定5: 豚舎汚水由来Or.-Nと面源由来Or.-Nは河川水調査地点に流達するまでに形態変化を起こさない（畜産排水、中流水の流達時間はそれぞれ20, 40分程度）。

ただし、これらの仮定から計算した豚舎汚水由来Or.-N濃度と面源由来Or.-N濃度の和は、必ずしも実測された河川水中Or.-N濃度に一致しなかった。そこで両者の和が実測Or.-N濃度に等しくなるよう、つぎの式で補正した。

$$C_{t,h} = C \times C_t / (C_t + C_m) \quad (1)$$

$$C_{m,h} = C \times C_m / (C_t + C_m) \quad (2)$$

ここに、 $C_{t,h}$: 補正された河川水中豚舎汚水由来Or.-N濃度、 C : 実測された河川水中Or.-N濃度、 C_t : 仮定3で求めた河川水中豚舎汚水由来Or.-N濃度、 C_m : 仮定4で求めた河川水中面源由来Or.-N濃度、 $C_{m,h}$: 補正された河川水中面源由来Or.-N濃度。

式(1)、(2)で計算した補正済みOr.-N濃度を河川水中 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 濃度（豚舎汚水由来）、または

$\text{NO}_{2+3}^- - \text{N}$ 濃度（面源由来）に加え、T-N濃度として表したのが第6図である。

冬期は一年で最も雨が少ない時期であるが、この時期に河川水中のT-N濃度が高まることはすでに述べた。T-N濃度の内訳をみると、面源由来濃度が $1.0 \sim 1.5 \text{ mg L}^{-1}$ とほぼ一定であるのに対し、豚舎汚水由来濃度は、流量の減少とともに上昇する傾向をみせた。第4図fの2002年12月13日、2003年1月24日でみせた濃度ピークの原因が豚舎汚水由来濃度にあることは第6図から明白である。同様の事情は2002年12月13日～2003年1月24日の連続的な濃度ピークにも認められる。

他方、代かき期をみると、流量減少にともなう濃度上昇の要因は豚舎汚水にあるのではなく、むしろ面源由来にあることがわかる。この時期、流域内のあちこちでは代かき作業が行われていたことから、代かき落水の影響が現れたとみられる。通常代かき落水は面源負荷の一種とみなされるが、流量増加によって濃度が低下する点（第6図、2000年5月25日～27日）などは点源に近い性質といえる。このことは、一日一定の面積を約一ヶ月かけて順々に仕上げていく代かき作業の体系に密接に関連しているものと思われる。

4 物質収支

第2表には、本報で扱った全水質項目の年平均負荷量の収支を示す。全山林収支は全山林負荷量から全山林降水負荷量を差し引いた値、低平地収支は河川水負荷量から低平地降水負荷量と全山林負荷量を

第2表 水質項目別の年平均負荷量収支

水質項目	全山林降水	全山林収支 ^a	全山林	低平地降水	低平地収支 ^b	河川水
(Mg)						
T-N	11.9	-5.9	6.0	3.7	9.5 (50)	19.1
T-P	0.4	-0.3	0.2	0.1	1.0 (77)	1.3
Na ⁺	19.2	50.6 (72)	69.8	6.0	14.8 (16)	90.6
NH ₄ ⁺ -N	5.7	-5.4	0.3	1.8	2.0 (49)	4.0
K ⁺	1.9	5.4 (74)	7.3	0.6	12.0 (60)	19.8
Mg ²⁺	2.1	6.1 (75)	8.2	0.6	7.3 (45)	16.1
Ca ²⁺	3.7	32.1 (90)	35.8	1.1	47.6 (56)	84.5
Cl ⁻	21.6	20.0 (48)	41.6	6.7	7.5 (13)	55.7
NO ₂₊₃ ⁻ -N	2.5	-1.0	1.5	0.8	3.6 (61)	5.8
PO ₄ ³⁻ -P	0.0	-0.0	0.0	0.0	0.1 (84)	0.1
SO ₄ ²⁻	26.9	10.5 (28)	37.4	8.3	14.7 (24)	60.4

^a 全山林収支 = 全山林 - 全山林降水, ^b 低平地収支 = 河川水 - 低平地降水 - 全山林. カッコ内の数値は, それぞれ, 全山林, 河川水負荷量に対する全山林収支, 低平地収支の割合%を示す. ただし, 収支がマイナスのときは表示しない.

差し引いた値で, それぞれ全山林, 低平地における湧き出し (プラス), 吸い込み (マイナス) 量を示す. カッコ内の数値はそれぞれ全山林, 河川水負荷量に対する全山林収支, 低平地収支の割合%を示す. ただし収支がマイナスのときは表示しない.

全山林収支をみると, Na⁺, K⁺, Mg²⁺, Ca²⁺, Cl⁻, SO₄²⁻がプラスになったのに対しT-N, T-P, NH₄⁺-N, NO₂₊₃⁻-N, PO₄³⁻-Pはマイナスになった. 窒素を含む水質項目については, 手計測, 手採取による水質評価で述べた全山林濃度の特徴が裏付けられる結果となった. またT-N収支がマイナスになったことは, 溪流として山林から流出する窒素量が降水として山林に流入する窒素量より少ないとする西村¹¹⁾, 山田ら¹²⁾の見解を裏付けるものとなっている. リンを含む水質項目については, 手計測, 手採取による濃度解析では判然としなかったが, 物質収支的にはわずかにマイナス収支になっていることが明らかになった.

他方, 低平地収支をみると, すべての水質項目がプラスになった. 特に全山林収支がマイナスだったT-N, T-P, NH₄⁺-N, NO₂₊₃⁻-N, PO₄³⁻-Pにおいて河川水に占める低平地収支の割合が49~84%と大きかった. 言うまでもなくこれらの水質項目は動植物の栄養源となる窒素, リンを含む項目である. そのため全山林では動植物や微生物

による吸収, 固定などの影響を受けて流出しにくかったのに対し, 低平地では施肥や畜産排水の影響を受けて流出しやすかったと考えられる.

通常NH₄⁺-Nは土壤中で吸着, 酸化されるため面源負荷としては検出されにくい (第5図の中流水はその証左). しかし本流域では, 豚舎からの排水の影響を受けてNH₄⁺-Nの低平地収支が河川水の49%と高い割合を示したと考えられる. PO₄³⁻-Pについても同様の理由から, 低平地収支の割合が84%と非常に高くなったと考えられる.

Na⁺, K⁺, Mg²⁺, Ca²⁺については, 全山林に対する全山林収支の割合が72~90%と顕著であり, 母材からの化学的風化の影響が裏付けられる. 他方, 河川水に対する低平地収支の割合は16~60%と全般に低くなっている. 低平地を構成する物質が山林からの二次堆積物のため, 化学的風化が進みにくかったことがうかがわれる. それにもかかわらずK⁺, Mg²⁺, Ca²⁺の割合がそれぞれ60%, 45%, 56%とある程度高くなったのは, カリ, 苦土, 石灰など農用資材の影響があったためと考えられる. 特にカリは窒素, リン酸とともに化成肥料の主成分であり, 畜ふん堆肥中にも多く含まれることから¹³⁾ K⁺の割合が最も高くなったと考えられる. 一方Na⁺は, 農用資材としての利用がないから河川水に対する低平地収支の割合が16%と最も低くなったと考えられ

る。

河川水に対する低平地収支の割合を第1表のタイプ別水質項目で整理すると、タイプⅠが平均15%、タイプⅡが平均62%、タイプⅢが平均52%（負荷量が少なく第3図および第1表での判断が難しかった $\text{PO}_4^{3-}-\text{P}$ を除くと平均44%）となり、低平地における負荷流入の度合いが低平地での濃度上昇や負荷増大に影響をおよぼしていることが確認された。

5 農業集落の影響

これまでの議論から、低平地より“湧き出す”窒素、リンを含む水質項目が農畜産業に由来する可能性を指摘してきた。本流域には農畜産業以外に窒素、リンを放出する産業が存在しないことがその主たる根拠であるが、この推論をさらに強化するためには、もうひとつの窒素、リン排出源である農業集落を検討しておかなければならない。そこで本節では、農業集落から排出される家庭下水中の負荷量を原単位法で見積もることにした。

役場からの聞き取りによると、本流域集落の家庭下水処理方式は、し尿がくみ取り方式で生活雑排水が無処理放流である。このうちし尿は全量流域外のし尿処理場へ持ち出され、流域内への排出はない。生活雑排水は1人1日当たりの基本原単位を $\text{T}-\text{N}$ が2 g、 $\text{T}-\text{P}$ が0.43 g、流域内排出率を $\text{T}-\text{N}$ が0.8、 $\text{T}-\text{P}$ が0.95と仮定し¹⁴⁾（原典では家庭内流出率を定義しているがここでは簡単のため流域内排出率に読み替える）、常住人口を270人として計算すると、 $\text{T}-\text{N}$ 排出負荷量は年間当たり $2 \times 10^{-6} \text{ Mgd}^{-1} \times 0.8 \times 270 \times 365 \text{ d} = 0.2 \text{ Mg}$ 、 $\text{T}-\text{P}$ 排出負荷量は年間当たり $0.43 \times 10^{-6} \text{ Mgd}^{-1} \times 0.95 \times 270 \times 365 \text{ d} = 0.04 \text{ Mg}$ と見積もられる。これらの値を第2表の低平地収支と比べると、 $\text{T}-\text{N}$ は2.1%、 $\text{T}-\text{P}$ は4.0%にしかならないことがわかる。

このように農業集落から排出される $\text{T}-\text{N}$ 、 $\text{T}-\text{P}$ 負荷量は低平地収支に比べてきわめて少ないことから、低平地収支の大部分（ $\text{T}-\text{N}$ 、 $\text{T}-\text{P}$ についてはそれぞれ9.3Mg、0.96Mg）が農畜産業に由来するとみて差し支えないことが確認された。

今後は主要な土地利用型作物である水稻、ショウガ、大豆における施肥量や堆肥投入量、および畜種別原単位と飼養頭羽数からみた排出負荷量などを精

査し、本報で示唆された農畜産業由来窒素、リン負荷量との照合を図るとともに河川水質に影響をおよぼす主要セクターの解析を進める予定である。

V 摘 要

四万十川上流の一流域（815ha）において、2000年3月16日から2003年3月15日にかけて窒素、リン、無機イオンの濃度、負荷量の変動実態を明らかにし、各水質項目の変動特性や物質収支などから農畜産業と河川水質との関わりに関する定量的な評価を試みた。以下にその要点をまとめる。

- 1) 降水の年平均比負荷は $\text{T}-\text{N}$ が 18.7 kg ha^{-1} 、 $\text{T}-\text{P}$ が 0.69 kg ha^{-1} 、降水量加重平均濃度は $\text{T}-\text{N}$ が 0.60 mg L^{-1} 、 $\text{T}-\text{P}$ が 0.02 mg L^{-1} であった。
- 2) 手計測、手採取による水質評価から、低平地通過後の河川水の濃度上昇や負荷量増大は、 $\text{T}-\text{N}$ 、 $\text{T}-\text{P}$ 、 K^+ 、 $\text{NO}_{2+3}^{--}\text{N}$ において顕著であることがわかった。また NH_4^+-N は冬の渇水時に濃度上昇がみられるほか夏場にも突発的な濃度上昇が認められた。
- 3) 自動測定と修正補完による評価から、山林から河川へ流出する $\text{T}-\text{N}$ 負荷量の一部が地下帯水層へ一時的に貯留される可能性のあることが示唆された。河川水の $\text{T}-\text{N}$ 濃度変動は降水時に低下し、降水後に徐々に上昇するのが一般的であった。しかし代かき、集中豪雨、畜産排水の影響が加わると、それぞれ特異的な濃度、負荷量変動を示した。
- 4) 雨が少ない冬期の河川水 $\text{T}-\text{N}$ 濃度の高まりは、多量の NH_4^+-N を含む畜産排水の流入が原因と考えられた。一方雨の少ない春先に生じる河川水 $\text{T}-\text{N}$ 濃度の高まりは、代かき直後の田面水の強制落水によるものと考えられた。
- 5) 低平地に主たる起源を持つ水質項目は $\text{T}-\text{N}$ 、 $\text{T}-\text{P}$ 、 NH_4^+-N 、 $\text{NO}_{2+3}^{--}\text{N}$ 、 $\text{PO}_4^{3-}-\text{P}$ で、その河川水負荷量に占める割合は49~84%であった。低平地における排出源のひとつである農業集落からの $\text{T}-\text{N}$ 、 $\text{T}-\text{P}$ 排出負荷量がわずかであったことから、低平地起源負荷量の大部分は農畜産業に由来すると推定された。

謝 辞

本研究を実施するにあたりご指導をいただいた森林総合研究所の吉永秀一郎，鳥居厚志，山田毅，篠宮佳樹の各氏，現地調査でご支援をいただいた高知県土木事務所と自治体の皆様，現地調査や化学分析をご支援くださった近畿中国四国農業研究センターの森江昌彦，上枝博樹，岡田達典，大谷恭史，岡田洋子の各氏に深く感謝の意を表す。

引用文献

- 1) 浜田幸作 2002. 四万十川の環境問題. 四万十・流域圏学会誌 1: 45-54.
- 2) 高知県保健環境部環境対策課 1995. 四万十川清流保全計画. 高知県保健環境部環境対策課, 高知. 1-60.
- 3) 高知県文化環境部四万十川対策室 1996. 清流四万十川総合プラン21. 高知県, 高知. 1-170.
- 4) 水質環境学編集委員会 1998. 清らかな水のためのサイエンス-水質環境学-. 農業土木学会, 東京. 15-19.
- 5) 吉田正則・村上敏文・吉川省子・藤原伸介 2008. 四万十川の一流域における流量, および窒素, リン, 無機イオン負荷量の日単位連続評価法. 近中四農研報 7: 49-69.
- 6) 松田 周 2003. 農業土木分野におけるフィールド計測技術(その1)-水文計測技術; 河川流動編-. 農土誌 71: 755-761.
- 7) 吉永秀一郎・山田 毅・三浦 覚 1998. 高知県大正町葛籠川源流域における溪流水質の季節変動. 平成9年度森林総合研究所四国支所年報 39: 41-42.
- 8) 吉田正則・村上敏文 2002. 小規模河川の流量観測におけるドップラー式超音波流速センサーの簡易適用法. 四万十・流域圏学会誌 1: 25-33.
- 9) 高知県文化環境部四万十川対策室 1996. フィールドガイド四万十川. 高知県文化環境部四万十川対策室, 高知. 104, 110.
- 10) 大久保雅弘・藤田至則 1984. 新版地学ハンドブック. 築地書館, 東京. 188-189.
- 11) 西村武二 1999. 森と川-森林の機能. 流域圏(四万十)学会誌プレビュー号: 19-22.
- 12) 山田 毅・篠宮佳樹・吉永秀一郎 2001. 山地小流域におけるpHと硝酸イオン濃度. 四万十・流域圏学会第1回総会・学術研究発表会概要集: 47-48.
- 13) 小柳 渉・安藤義昭・水沢誠一・森山則男 2004. 家畜ふん堆肥中の塩類組成の特徴. 土肥誌 75: 91-93.
- 14) 國松孝男・村岡浩爾 1989. 河川汚濁のモデル解析. 技報堂, 東京. 11-12.

Concentration Change and Effluent Load Characteristics of N, P, and Inorganic Ions in a Watershed in the Shimanto River Basin, Shikoku, Japan

Masanori YOSHIDA, Toshifumi MURAKAMI*, Seiko YOSHIKAWA and Shinsuke FUJIHARA **

Summary

In the Shimanto River Basin in Shikoku, Japan, agricultural activity has been suspected to lead pollution of the Shimanto River. However, the causal relationships between the agricultural activities and changes in water quality are not evident. To reveal these relationships, we analyzed the concentrations and effluent characteristics of N, P, and inorganic ions in the waters of a river, mountain stream, and drainage ditch in an 815-ha watershed in the Shimanto River Basin. The results are as follows.

- 1) The annual mean specific loads of total N (T-N) and total P (T-P) in precipitation were 18.7 and 0.69 kg ha⁻¹, respectively. The corresponding precipitation-weighted average concentrations were 0.60 and 0.02 mgL⁻¹, respectively.
- 2) Manual measurement of data revealed that the concentrations and effluent loads of T-N, T-P, K⁺, and NO₂₊₃⁻-N increased markedly after the river flowed through a low, flat valley in the watershed, and that the concentration of NH₄⁺-N increased abruptly during the year and increased more gradually during the winter.
- 3) Analysis of automatically measured data revealed that a portion of the effluent T-N load from forested mountainous areas could be temporarily stored in the aquifer below the low, flat valley. The T-N concentration in the river water showed a typical pattern of variation in which the concentration decreased during rainy periods and increased during dry periods after rain. However, the T-N concentration in the river water also showed unusual changes during the drainage of flood water after paddling of paddy fields, drainage of wastewater from a pig barn, and drainage after a heavy rainstorm in which precipitation reached more than 300 mm day⁻¹.
- 4) Sudden or gradual increases in the T-N concentration of the river water in winter (i.e. the dry season) were ascribed to inflows of wastewater from the pig barn. Increases in the T-N concentration of the river water during the spring, when there was little rainfall, were ascribed to the drainage of flood water after paddling of paddy fields.
- 5) Water quality characteristics affected by flow through the low, flat valley were T-N, T-P, NH₄⁺-N, NO₂₊₃⁻-N, and PO₄³⁻-P. The proportions of these compounds added from the low, flat valley ranged from 49% to 84%. Most of these compounds were thought to be originated from agricultural and livestock industries, because effluent loads from rural communities (another potential source of these compounds) in the low, flat valley were negligible.

Research Team for Conservation of Agricultural Watershed

* National Agricultural Research Center for Tohoku Region

** National Agricultural Research Center

養液栽培における排液再利用法の検討

笠原賢明・吉川弘恭・東出忠桐・伊吹俊彦*

Key words: 養液栽培, 数理モデル, 排液再利用, 培養液管理, トマト

目 次

I 緒 言	91
II 基本モデル	92
1 前提条件	92
2 養分吸収量の定式化	92
3 排液濃度の定式化	93
4 排液の再利用に関する解析	93
5 解析結果とそれに基づく培養液管理の方 針	94

III トマト栽培における給液管理法の妥当性の 検討	94
1 方 法	94
2 結果および考察	97
IV 摘 要	98
引 用 文 献	98
Summary	99

I 緒 言

施肥管理は作物の生産力に直接かかわる重要な技術であるが、実際の生産現場で適正に実施するには多くの困難を伴う。とりわけ露地栽培の作物では、土壌条件や気象条件の影響を強く受けるため、過剰施肥や養分欠乏といった問題を招きやすい。施設栽培土壌においても、雨水が遮断されるため塩類の集積やガス障害、特定養分の欠乏などが起こりやすい。土壌の種類等を考慮した土壌診断を適宜に行い、適正な施肥量を求めることが必要である。

一方、施設では養液栽培も行われている。養液栽培では土壌を用いずに、植物の生育に必要な養水分を根に供給する。供給時に培地を用いない水耕栽培や噴霧耕、培地を用いる固形培地耕があるが、いずれも窒素・リン酸・カリウムなどの養分をカチオン・アニオンのバランスが保たれる範囲内である程度個別に制御しながら供給できる。そのため、土壌栽培より施肥管理が比較的容易であると考えられる。

近年、トマトの生産に養液栽培が導入されている。ロックウールなどの素材を用いた固形培地耕が一般に行われており、栽培管理の省力化・軽労化やコスト低減、および高品質果実の高収量化が図られている。しかし一方で、環境負荷となる排液の発生といった問題も生じている。

固形培地耕では、培養液を介する病害が発生しない限り、排液を新しい培養液に混入して再利用することが可能である。全量を再利用する閉鎖式養液栽培も理論的には可能であり、こうした施肥法は排液問題の解決に大きく寄与すると期待される。ただしこの場合、排液の養分組成は初めに供給した培養液の組成と通常異なっているため、養分組成に関する検討を加えておく必要がある。

そこで、本研究では、固形培地耕における排液の循環利用を比較的単純な系としてモデル化し、養分組成について代数的な検討を行った。また、この結果に基づいて低廉なシステムによる適切な培養液管理法を提示し、さらに、この管理法により実際に冬春期トマトを栽培し実用的な水準の収量が得られるかどうかを検討した。本稿ではこれらの結果について

(平成20年8月29日受付, 平成21年1月16日受理)

中山間傾斜地域施設園芸研究チーム

*現 畜産草地研究所

て報告する。

Ⅱ 基本モデル

本稿で用いる変数は次の通りである。なお、本稿では一般に行われている同齢苗を同時定植する栽培体系を考える。これらの変数はトマトの生育ステージにより変化しうる。

- I : 作物が吸収する養分量
- I_l : 養分吸収量が作物生育の制限要因とはならない条件下で作物に吸収される養分量 (以下、作物が必要とする養分量)
- C : 培養液中の養分濃度
- C_l : 作物が吸収する養分量が I_l であるときの培養液中の養分濃度
- C_q : 新しく調製する培養液中の養分濃度
- V_A : 作物が吸収する水分量
- V_R : 根と接触する培養液の量
- V_S : 固形培地に供給する培養液の量
- F : 根と接触する培養液中の養分量に対する作物が吸収する養分の割合 ($0 < F < 1$)
- R : 「供給する培養液」に対する「根と接触する培養液」の割合 ($0 < R \leq 1$)
- D : 排液中の養分濃度
- a : 供給する培養液に対する排水の割合 (以下、排水率; $0 < a < 1$)
- b : 供給する培養液量に対する混入する排水量の割合 (以下、排水の混入率; $0 \leq b \leq a$)

ここで、水分量・培養液量は体積、養分量は物質量の次元 (単位) とする。また、これらの変数のすべてが直接に測定可能とは限らない。

1 前提条件

モデルの前提として、以下の5条件を与える。

- 1) 固形培地に供給された培養液のうち、作物の根から吸収されなかった余剰分が排水になる。なお、一般的に栽培ベッドは被覆されることから、作物を介さずに栽培ベッドより蒸発によって失われる水分はないものとする。
- 2) 培養液の供給と、固形培地からの排出までのタイムラグを考慮しない。
- 3) 供給された培養液はすべて固形培地中を通過

し、すべての培養液は根と接触する可能性がある (固形培地中を通過しながらも根と接触しない培養液も存在しうる)。この根と接触した培養液からのみ養分は吸収される。

- 4) 一方、水分は根と接触した培養液のみならず接触しなかった培養液からも吸収される。固形培地内では、気相を介した水の移動が起こるからである。例えば被覆された栽培ベッド内では水の蒸発と凝結が起きていることが実際に観察される。
- 5) 培養液から作物体内への養分の移動は能動輸送によるものである。ただし、固形培地耕では水耕栽培と異なり、培養液の流動性が制限されるため、養分の拡散速度が養分吸収の制限要因になる。

2 養分吸収量の定式化

作物が養分濃度 C 、供給量 V_S の培養液から吸収する養分量 I は、次式で表すことができる (付記1参照)。

$$I = C \cdot V_A \cdot \frac{R \cdot F}{1 - a} \quad (1)$$

式 (1) を変形することにより、作物が必要とする養分量 I_l を吸収するときの培養液中の養分濃度 C_l は、次式で示される。

$$C_l = \frac{I_l}{V_A} \cdot \frac{1 - a}{R \cdot F} \quad (2)$$

この養分濃度 C_l を「適切な養分濃度」と呼ぶことにする。なお、上記はある一つの養分に関する定式化であるが、複数の種類の養分を考えた場合、それらの濃度はほぼ独立に挙動することから、異なる F や C_l の値をとるものの上式は養分の種類にかかわらず一般的に成り立つ。したがって、各種養分の濃度が「適切な養分濃度」となるとき「適切な組成」ということができる。

以上から、次の推考ができる。

- 1) 排水率 a が高いほど培養液の濃度は低くても良い。逆に排水率が低ければ、「適切な養分濃度」は高くなる。
- 2) R が大きいほど培養液の濃度は低くても良い。

直感的には、固形培地中の作物の根張りがよいほど R が大きくなる。作物の養分吸収に寄与する根の量が、何らかの要因で減少すればそれに応じて培養液の濃度を高くする必要がある。

- 3) I_l/V_A の値はいわゆる「吸収濃度」である。これは作物ごとに調べられており、ある程度幅があることが知られているが³⁾、各種養分の I_l と V_A を調べて「吸収濃度」を算出しただけでは、作物に供給する培養液の「適切な養分濃度 (C_l)」ならびに「適切な組成」を決めることはできない。

3 排液濃度の定式化

排液中の養分濃度 D は次式で表される (付記 2 参照)。

$$D = C \cdot \frac{1 - R \cdot F}{a} \quad (3)$$

固形培地耕では排液と培養液に含まれる養分の濃度の大小関係は栽培状況によって変化し、 $D > C$ となることも珍しくない。前提条件 4 のもとでは、これが供給養分の過剰によるものかどうか、 R と F の値が未知であるため一概には判断できない。実際の栽培では、経日的に D/C の変化を調べ、急激にその値が増大したときに養分が過剰に供給されたと判断すべきであろう。

4 排液の再利用に関する解析

固形培地耕において、排液を新しい培養液に混入して再利用する養液栽培装置が開発されている¹⁾。排液の混入率は 2 割程度であることから、排液率を 2 割以下に制御すれば排液を完全に再利用する閉鎖式の養液栽培システムになる。

この装置を用いて養液栽培を行う場合の、培養液管理について検討する。ここで次のように変数の定義を行う。

- C_n : 排液を n 回再利用したときの培養液中の養分濃度
 C_{n-1} : 前回の再利用時の培養液中の養分濃度
 D_{n-1} : 排液の n 回目の再利用時に混入する排液 (前回の再利用時に発生した排液) 中の養分濃度

培養液中の養分濃度 C_n は次式で表される (付記 3 参照)。

$$C_n = b \cdot D_{n-1} + (1-b) \cdot C_q \quad (4)$$

前回の排液濃度は式 (3) より C_{n-1} で表すことができ、式 (4) に代入することで培養液濃度に関する次の差分方程式を導くことができる。

$$C_n = b \cdot \frac{1 - R \cdot F}{a} \cdot C_{n-1} + (1-b) \cdot C_q \quad (5)$$

ここで、排液率および排液の混入率が一定に保たれ、かつ R や F の変動が無視できる期間 (例えば 5 日程度の期間で 5 回の排液の再利用) を想定し、 R や F が一定と考え、解析を行う。すると式 (5) の極限をとることにより、次式が得られる (付記 4 参照)。

$$\lim_{n \rightarrow \infty} C_n = C_q \cdot \frac{a \cdot (1-b)}{a - b + b \cdot R \cdot F} \quad (6)$$

すなわち、作物に供給する培養液の濃度は代数的に収束することが示される。作物に供給する培養液濃度を適切なものにするには、この収束する養分濃度と式 (5) で表される培養液濃度が一致するように C_q を設定すればよい。ここで、排液をすべて再利用する場合を考えると $a = b$ であるから、収束する濃度は次式で表される。

$$\lim_{n \rightarrow \infty} C_n = C_q \cdot \frac{1-a}{R \cdot F} \quad (7)$$

すなわち、排液を再利用する場合には $C_q = I_l/V_A$ と設定することにより、作物が必要とする養分量 I_l の吸収に適した培養液養分濃度 C_l へ自動的に収束していく。

一般に閉鎖式養液栽培では培養液の組成が狂わないように調整が必要とされている⁴⁾。すなわち、目標とする培養液組成を設定し、作物に供給する培養液の組成をそれに合わせるという考え方であり、各種養分の化学分析が必要になる。これに対して、解析したように培養液中の各種養分の濃度が自動的に C_l へ収束していくのであれば培養液の組成を知る必要はなく、化学分析は不要になる。

ここで、上記の解析が現実の固形培地耕に即した

ものであるか推考しておく。結論として排液再利用の繰り返し回数 $n = 5 \sim 10$ 程度でも C_n は C_I に十分近づくと試算される。例えば、排液率 2 割のときに C_I が「吸収濃度」の 2 倍であるような極端な場合 ($R \cdot F = 0.4$) を考えても、 $C_0 = I_I / V_A$ のとき $C_5 = 0.92 C_I$ となり偏差は 10% 以内である。固形培地内や培養液タンク内の培養液が置き換わる期間を 1 日として、1 日を排液再利用の繰り返し回数に相当すると見なせば、これまでの解析が非現実的なものではないと考えられる。ただし、作物が吸収できる上限を超えて養分が過剰に供給される場合には、作物の根が培養液から養分を吸収する割合 (F) が排液の再利用を繰り返すごとに減少していくことになる。代数的に表現すれば $\lim_{n \rightarrow \infty} F = 0$ であり、この場合 C_n は収束しない (付記 5 参照)。

5 解析結果とそれに基づく培養液管理の方針

前項までの解析の結果によれば、排液率 a や R と F の値にかかわらず培養液組成が「適切な組成」に自動的に近づく条件は以下の 3 点である。

- 1) 新しく調製する培養液組成は各養分濃度について「吸収濃度」とする ($C_q = I_I / V_A$)。
- 2) 排液を完全に再利用する ($a = b$)。
- 3) 作物が吸収する養分の量に対して、過剰な量の養分供給を避ける ($\lim_{n \rightarrow \infty} F \neq 0$)。

上述の条件を満たすものとして、排液を再利用する固形培地耕における培養液の養分濃度および組成の管理方針を次のようにする。

- 1) 各養分の濃度が、経験的に知られているいわゆる「吸収濃度」にできるだけ近づくように培養液の組成を設定する。ただし、機器の誤差や長期にわたる栽培期間中の「吸収濃度」の変動などに起因する養分欠乏を回避するために、すべての養分について「吸収濃度」の 1.1~1.2 倍にする。この培養液濃度を「基準濃度」とする。
- 2) 排液をすべて新しく調製する培養液に混入して作物に供給する。
- 3) 排液中の養分濃度は電気伝導度 (EC) に反映されることから、排液の EC を毎日確認し、一定値以上となった翌日には新しい培養液の代わりに水のみを排液と混合して作物に供給する。またその翌日には、必ず新しい培養液に排

液を混入して作物に供給する。すなわち数日単位の平均で見ると新しく調製する培養液中の各養分の濃度 C_q は「基準濃度」の 0.5 から 1.0 倍の間に微調整されながら供給されるのと同等になる。以上のように管理することで「吸収濃度」が「基準濃度」の 0.5 倍から 1.0 倍の範囲にあれば供給される養分量に過不足はなくなる。

Ⅲ トマト栽培における給液管理法の妥当性の検討

一般に、作物は生育に必要な量の養分を吸収できなければ、適正な量の養分を吸収したときに比べて収量が減少する。固形培地耕においても「適切な養分濃度」、「適切な組成」の培養液が供給されなければ、養分吸収量が生育の制限要因となってトマトの収量は減少 (減収) する。前述の排液再利用法は化学分析によらなくても培養液の「適切な養分濃度」、「適切な組成」が達成できることを示したものであり、その妥当性を一般に普及しているかけ流し式の固形培地耕の収量と比較することにより検討した。

1 方 法

前述の培養液濃度・組成管理方針に従って冬春期トマトの長段どり栽培を行った。使用する養液栽培装置の構成を図 1 に示す。排液再利用区とかけ流し区を設定した。固形培地として防根シートでくるんだロックウール (日東紡製ロックファイバーベッド $75 \times 300 \times 910 \text{mm}$) を使用した。

培養液は 2 液混合型の無動力液肥混入器 (ネタフイム社製ネタトロンを 2 個直列に接続) で調製される。新しく調製する培養液の「基準濃度」は、予備試験 (排液を再利用しない固形培地耕、および排液を再利用しつつ化学分析に基づいて培養液組成を調整した固定培地耕において、トマトの全養分・全水分の吸収量を測定した試験) から各養分の「吸収濃度」を算出して「基準濃度」を定めた。その結果、大塚 SC 処方 (N : 15.9, P : 1.4, K : 10.2, Ca : 3.3mmolL^{-1}) の 0.5 倍濃度が最も近く、この組成で新しい培養液が調製されるように液肥混入器を設定した。

排液再利用区では、培地から出た排液は培地の下方に設けた流路に入り、さらに排液管を通して排液

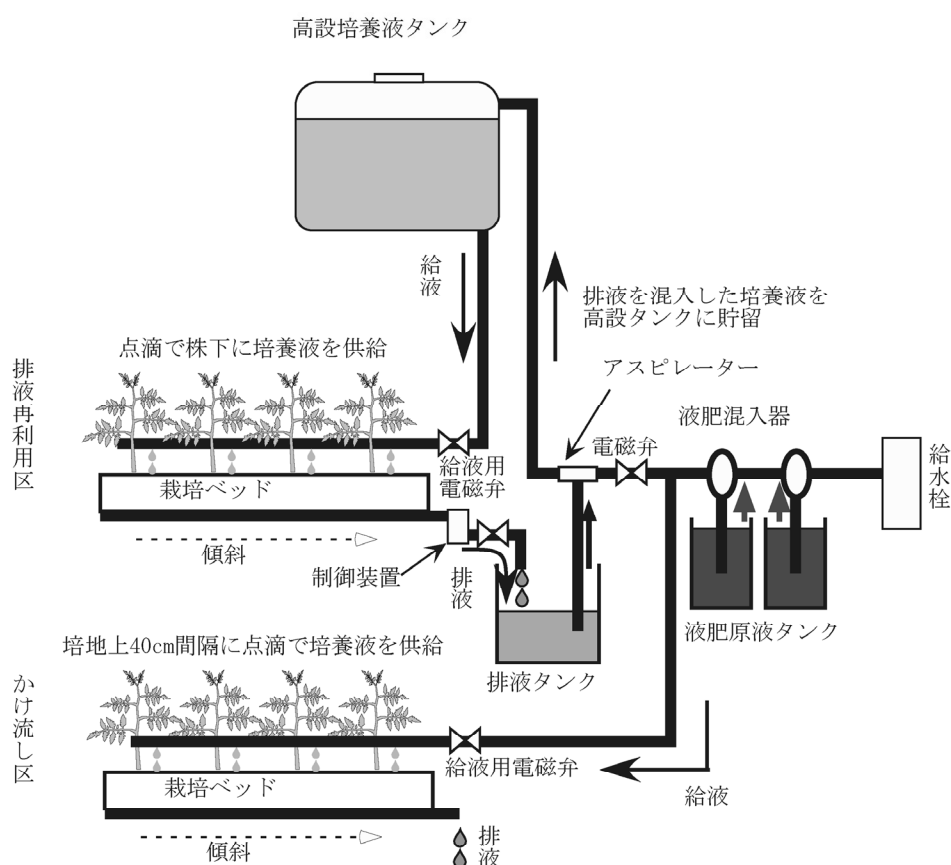


図1 養液栽培装置の構成

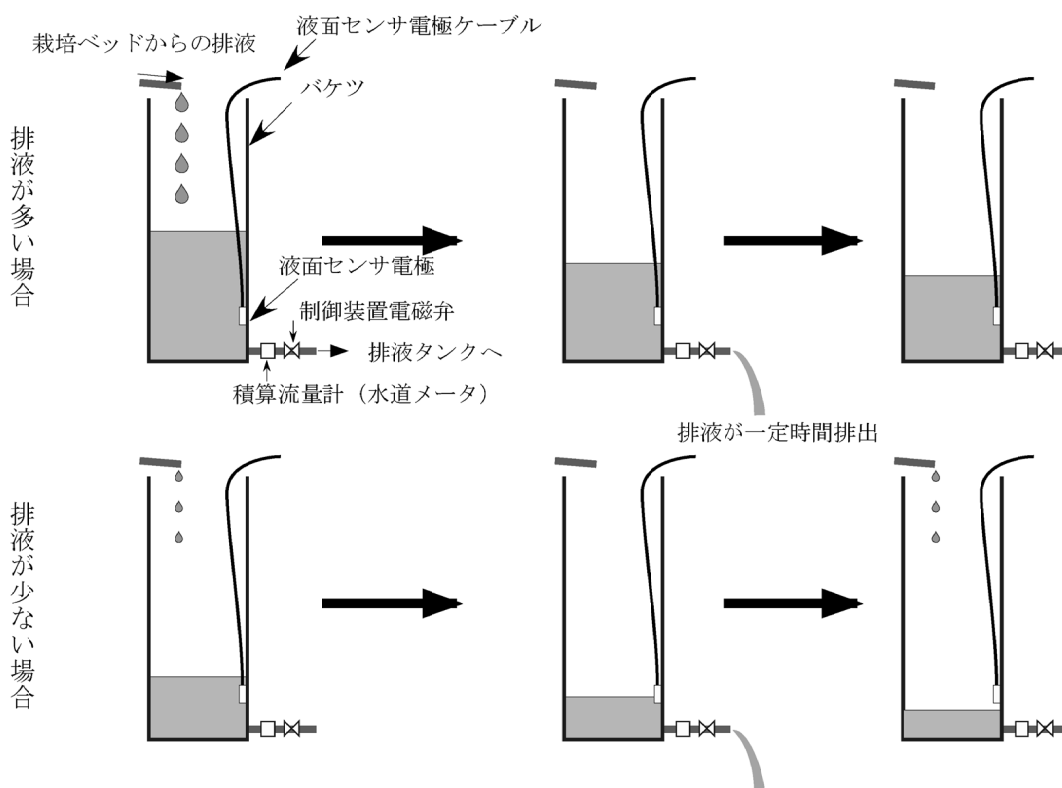
タンクに回収される。排水の流路と固形培地は離れており、一旦培地から出た排水が再び培地と接触することはない。排水タンクの容量は50 Lである。調製された培養液は一旦高設タンク（栽培ベッドからの高さ約4.5 m、容量約200 L）に貯留される。このときアスピレーターにより排水が新しい培養液に混入される。排水の混入率は貯留される培養液に対して2割程度である¹⁾。高設タンクに貯留した培養液は高低差に由来する水圧で供給される。ベッド長8 mに、トマトを株間20 cmで合計40株定植した。ドリッパー（ネタフィム社製ボタンドリッパー；吐出量 2 L h^{-1} ）を株下に1株につき2個設置した。ドリッパーは圧力補正機能を持たず、吐出量は給液管内の水圧に依存し、高設タンク内の培養液量によって変わる。1回の給液時間を3.5分間に設定することで1株あたり約0.15～0.18 L（合計6～7 L）の培養液が供給される。

給液の制御については、24時間タイマで設定した時刻に一定量の培養液の供給を行い、そのときの排

液発生量の多少を参照して次回以降の給液の休止を自動で行える装置（図2）を用いた。この装置を使用した給液量の管理法の概略を図3に示す。これにより栽培期間全体の排水率を2割以下に抑制して排水を全量再利用した。

対照のかけ流し区では、新しく調製される培養液を直接栽培ベッドに供給し、排水を再利用せず装置外に廃棄した。ベッド長5.6 mに、トマトを株間20 cmで合計28株定植した。圧力補正・停止圧機能付きのドリッパー（ネタフィム社製CNLドリッパー；吐出量 3 L h^{-1} ）を培地上に40 cm間隔で設置し、培養液を点滴供給した。給液のタイミングは排水再利用区と同期しており、1回の給液時間を7分間に設定することで計算上1株あたり0.175 mL（合計4.90 L）の培養液が供給される。水源水圧は0.3 MPa以上あり、ほぼ規格通りの一定の吐出量が得られた。

品種は桃太郎8で、2006年秋から2007年春までは排水再利用区のための栽培試験を行った。2～3葉のセル成型苗を9月14日に定植した。2007年秋から



前回の給液中から給液時刻直前までは制御装置電磁弁は閉じており、前回の給液により発生した排水がバケツにたまる。

次回の給液時刻になると図1の給液用電磁弁に先立って制御装置電磁弁が開く。バケツから排水が排出され、水位が低下し、一定時間経過後制御装置電磁弁は閉じる。前回の排水発生量が多く、水位が液面センサ電極の高さまで低下しなかったときは給液用電磁弁は開かず、培養液の供給は休止される（上）。排水発生量が少なく、水位が電極よりも下に低下すると、制御装置電磁弁が閉じると同時に給液用電磁弁が開き、培養液の供給が開始する（下）。

図2 制御装置の動作

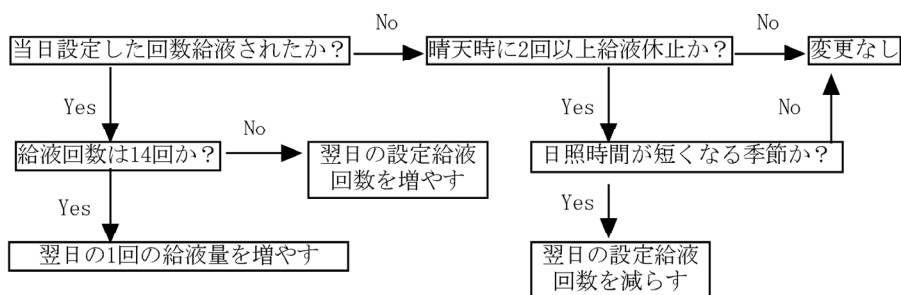


図3 給液量管理の手順

2008年までの試験では、ロックウールポットで4～6葉まで育苗し、排水再利用区は2007年9月19日、かけ流し区は9月26日に定植した。本試験は北向き傾斜約10度の平張型傾斜ハウス内で行い、最も南側の1列に排水再利用区の栽培ベッド、最も北側の1列にかけ流し区の栽培ベッドを設置した。暖房は最

低温度10℃（年末年始は8℃）とし、2006年秋定植では12月から3月まで、2007年秋定植では12月から2月まで行った。誘引は1株おきに左右に振り分けて吊り下げで行った。摘心は行わず可能な限り栽培を続けた。なお、このハウス内の栽培ベッドは1.5m間隔で設置しており、全9列のうち、南側2列目か

ら8列目までは、2007年4月定植－2008年3月終了のトマト栽培試験に供している。

2 結果および考察

2007年、2008年ともに6月30日までの果房別1株あたり収穫量を算出して表1に示す。排液再利用区の可販果重量は両年次とも同程度であった。2007年

秋から2008年春までの試験では収穫量、可販果重量ともにかけ流し区よりも排液再利用区がまさった。かけ流し区の収穫量が劣った原因として、供給した培養液の養分濃度が一般的な処方（0.5～0.8倍濃度の大塚SC処方）に比べて低めだったことの他に、①定植の時期が1週間遅れた、②培養液の供給量やタイミングが再利用区の排液の発生の有無を参照し

表1 1株あたりの果房別トマト収量（単位；g）

2006年秋～2007年春

果房	再利用区		年.月.日	
	総果実重	可販果重	収穫開始日	収穫終了日
1段目	824	781	2007.01.14	2008.3.16
2段目	901	793	01.26	05.07
3段目	763	684	02.06	04.13
4段目	690	621	02.26	05.02
5段目	581	527	03.09	05.14
6段目	639	509	03.30	05.28
7段目	496	402	04.06	05.28
8段目	594	405	04.23	05.28
9段目	563	475	05.07	06.18
10段目	513	359	05.11	
11段目	380	219	06.04	06.28
12段目	332	61	06.07	06.28
13段目	231	37	06.07	
14段目	181	23	06.21	06.28
合計	7688	5896	(不良果の収穫日を除く)	

注：吸水量抑制効果を調べる試験のため、2月28日に培養液に100gの食塩を投入している。

2007年秋～2008年春

果房	再利用区		かけ流し区		年.月.日	
	総果実重	可販果重	総果実重	可販果重	収穫開始日	収穫終了日
1段目	896	846	819	741	2008.01.04	2008.3.17
2段目	900	803	780	636	01.25	03.31
3段目	659	521	581	367	02.08	04.04
4段目	453	297	525	299	02.25	04.18
5段目	366	243	388	185	03.10	05.07
6段目	507	344	501	249	03.24	05.26
7段目	476	288	440	112	04.07	06.06
8段目	363	157	304	83	04.11	06.13
9段目	518	275	342	110	04.28	06.23
10段目	649	400	515	248	05.12	06.23
11段目	627	459	653	399	05.23	
12段目	614	463	650	539	05.26	
13段目	451	359	478	361	06.06	
14段目	378	314	365	306	06.16	
15段目	154	134	128	114	06.23	
16段目	4	4	0	0	06.30	
合計	8014	5908	7469	4748	(不良果の収穫日を除く)	

1株あたりの収量は1列の全収量を株数で除して算出。収穫終了日の空欄は6月30日時点でその果房の収穫が終了しなかったことを意味する。

たためかけ流し区に不利であった、③光条件など環境条件が再利用区に比べてやや不利であった、等が考えられる。なお、1株あたり5.9kgの可販果収量は、10aあたり2200本だとすると単純計算で約13t/10aに相当する。つまり、冬期の栽培に適した施設で暖房条件を改善すれば、この培養液管理方法によって、冬春期トマトの目標収量12t/10aを達成できる可能性がある。

このように、排水を完全に再利用することで結果的に閉鎖式となった固形培地耕で、化学分析等を行わない培養液の管理であっても実用的なレベルのトマト収量を得ることは可能と考えられる。

新しく調製する培養液の各養分を「吸収濃度」に設定し、排水を完全に再利用すれば、作物に供給される培養液の濃度、組成は代数的に「適切な養分濃度」、「適切な組成」に収束することが示されたが、現実の養液栽培においては作物に供給される培養液の濃度も組成も一定値ではなく、変動することが予想される。実際には排水率を一定に保つことは容易でないし、 R や F も作物の状態や環境条件に影響を受け、一定値ではないと考えられるからである（つまり、「適切な養分濃度」も一定値ではない）。しかしながら、それでも試算で示したように各養分の濃度は「適切な養分濃度」の近傍を変動すると推察される。今後、養分分析を行って濃度変動を確かめる必要がある。また、本研究で提示した R （「供給する培養液」に対する「根と接触する培養液」の割合）や F （根と接触する培養液中の養分量に対する作物が吸収する養分の割合）の計測を何らかの方法で行うことができれば、その値に対応した培養液の濃度・組成管理法も可能になると考えられる。

Ⅳ 摘 要

養液栽培の一種である固形培地耕において、単純化された数理モデルに基づき、作物にとって適切な培養液中の養分濃度・組成に関する解析をおこなった。その結果、排水をすべて培養液に混入して再利用を繰り返すことにより、作物に供給される培養液中の養分濃度および組成は理論上、作物にとって適切な値に収束していくことを明らかにした。この解析に基づき、具体的な培養液の管理手順を定め、それに従って冬春期のトマト栽培を行った。その結果、培養液の化学分析を行うことなく、閉鎖式の養液栽培において実用的な水準の収量が得られることを示した。

引用文献

- 1) 笠原賢明・東出忠桐・角川 修・伊吹俊彦 2005. 養液栽培においてアスピレーターの使用により排水を再利用する方法 土肥誌 76. 49-52
- 2) 岡島秀夫 1976. 土壌肥沃度論 農文協, 東京 48-66
- 3) 丸尾 達 2002. 第4章2. 培養液の調製・管理 日本施設園芸協会編 養液栽培の新マニュアル 誠文堂新光社, 東京 159-179
- 4) 丸尾 達 2002. 第6章2. 培養液のリサイクルと処理 日本施設園芸協会編 養液栽培の新マニュアル 誠文堂新光社, 東京 221-227

Study of a culture solution management and residue reuse technique for hydroponics based on mathematical model

Yoshiaki KASAHARA, Hiroyasu YOSHIKAWA, Tadahisa HIGASHIDE and Toshihiko IBUKI*

Summary

In the context of solid medium culture, a type of hydroponics, we used simplified mathematical model to perform an analysis of the nutrient concentrations and compositions in culture solution that are appropriate for crops. The theoretical concentrations and compositions of nutrients supplied to crops would converge with values that were appropriate for crops after the recycle of all residue by its addition to the culture solution. On the basis of the results of this analysis, we established a procedure using the system for culture solution management in the cultivation of winter/spring tomatoes. With this system, practical yields could be obtained in closed-type hydroponics without the need for chemical analysis of the culture solution.

【付記1】

固形培地に供給する培養液の量 V_S と、根に直接接触する培養液の量 V_R から、 R は次式 (A 1) で表される。

$$R = \frac{V_R}{V_S} \quad (\text{A } 1)$$

変形して

$$V_R = R \cdot V_S \quad (\text{A } 1')$$

ここで、 $0 < R \leq 1$ である。

作物によって吸収される水分の量、すなわち吸水量 V_A を用いると排液率 a は次式 (A 2) で定義される。

$$a = \frac{V_S - V_A}{V_S} \quad (\text{A } 2)$$

変形して

$$V_A = (1 - a) \cdot V_S \quad (\text{A } 2')$$

$$V_S = \frac{V_A}{1 - a} \quad (\text{A } 2'')$$

作物は必ず水分を吸収するので $0 < V_A$ 、よって $a < 1$ である。前提条件 4 を条件式で表すと

$$V_A \leq V_S$$

式 (A 2') を代入して

$$(1 - a) \cdot V_S \leq V_S$$

$$\therefore 0 \leq a$$

すなわち、前提条件 4 により、 $0 \leq a$ となる V_S が代数的に担保される。ただし、排液が必ず発生するように V_S を設定することから $0 < a$ である。

もし前提条件 4 が満たされなければ、つまり作物が根と接触した培養液からのみ水分を吸収するならば、条件式は以下ようになる。

$$V_A \leq V_R \quad (\text{A } 3)$$

式 (A 1') と式 (A 2') を式 (A 3) 代入して

$$(1 - a) \cdot V_S \leq R \cdot V_S$$

$$1 - R \leq a \quad (\text{A } 4)$$

式 (A 4) は排液率の下限が $1 - R$ であることを示す。すなわち、前提条件 4 がない場合、無条件に

$0 < a$ とするのは不適切であることが代数的に導かれる。

作物が培養液中から吸収する養分量 I は次式で与えられる。

$$I = C \cdot V_R \cdot F \quad (\text{A } 5)$$

作物の根がまったく養分を吸収しなければ $F = 0$ 、根と接触した培養液からすべて養分を吸収するのであれば $F = 1$ であるが、前提条件 5 より $0 < F < 1$ である。

式 (A 1') を式 (A 5) の V_R に代入する。

$$I = C \cdot R \cdot V_S \cdot F \quad (\text{A } 6)$$

さらに式 (A 2'') を式 (A 6) の V_S に代入し、

$$I = C \cdot V_A \cdot \frac{R \cdot F}{1 - a}$$

が得られる。

【付記2】

培養液中の養分量は $C \cdot V_S$ 、作物が吸収する養分量は $C \cdot R \cdot V_S \cdot F$ 、排液の量は $a \cdot V_S$ であるから排液中の養分濃度は次式で表される。

$$D = \frac{C \cdot V_S - C \cdot R \cdot V_S \cdot F}{a \cdot V_S}$$

V_S で約分して

$$D = C \cdot \frac{1 - R \cdot F}{a}$$

が得られる。

【付記3】

作物に供給する培養液に混入する排液の量は $b \cdot V_S$ である。新しく調製する培養液の量を V_Q とすれば液量の加算により次式が成り立つ。

$$V_Q = V_S - b \cdot V_S \quad (\text{A } 7)$$

培養液中の養分濃度は、新しく調製する培養液に含まれる養分量と混入する排液に含まれる養分量を加算し、培養液の全量で除すれば求まる。

$$C_n = \frac{b \cdot V_S \cdot D_{n-1} + V_Q \cdot C_q}{V_S} \quad (\text{A } 8)$$

式 (A 7) を式 (A 8) に代入することで次式が得られる.

$$C_n = b \cdot D_{n-1} + (1-b) \cdot C_q$$

【付記 4】

C_n を数列として扱うことで次式

$$C_n = b \cdot \frac{1-R \cdot F}{a} \cdot C_{n-1} + (1-b) \cdot C_q \quad (\text{A } 9)$$

は等比数列の漸化式 $C_n - A = r \cdot (C_{n-1} - A)$ という形に変形可能になる. $C_{n-1} - A$ なる数列の第 n 項は次式で表される.

$$C_{n-1} - A = r^{n-1} \cdot (C_0 - A) \quad (\text{A } 10)$$

この等比数列は $|r| < 1$ ならば $n \rightarrow \infty$ のときゼロとなり, 数列 C_n は A に収束する. すなわち, $\lim_{n \rightarrow \infty} C_n = A$ である. また, $r = 1$ のとき, $C_n = C_0$ である. 式 (A 9) を式 (A 10) に当てはめると

$$r = b \cdot \frac{1-R \cdot F}{a} \quad (\text{A } 11)$$

$0 \leq b/a \leq 1$, かつ $0 < 1-R \cdot F < 1$ であるから, $0 < r < 1$ であり, 数列 C_n は A に収束する. 収束する養分濃度は次式で与えられる.

$$A = \frac{(1-b)}{(1-r)} \cdot C_q$$

すなわち,

$$A = C_q \cdot \frac{a \cdot (1-b)}{a-b+b \cdot R \cdot F}$$

【付記 5】

F, R, a, b が一定値でない場合, つまり排液の再利用を繰り返すごとにすべての変数変動する場合について精察する. 培養液中の養分濃度が排液の

再利用にともなって減少する場合, 数列 C_n は次式のように表現される.

$$C_{n-1} > C_n \quad (\text{A } 12)$$

式 (A 9) を式 (A 12) に代入して

$$C_{n-1} > b \cdot \frac{1-R \cdot F}{a} \cdot C_{n-1} + (1-b) \cdot C_q$$

C_{n-1} についてまとめると

$$C_{n-1} > \frac{a \cdot (1-b)}{a-b+b \cdot R \cdot F} \cdot C_q$$

逆に増加する場合, 次式のように表現される.

$$C_{n-1} < C_n$$

$$C_{n-1} < \frac{a \cdot (1-b)}{a-b+b \cdot R \cdot F} \cdot C_q$$

ここで排液の一部を再利用する場合には $\lim_{n \rightarrow \infty} (a-b+b \cdot R \cdot F) \neq 0$ である. すなわち, 数列 C_n が減少するとき下に有界, 数列が増加するとき上に有界となり, 数列 C_n は発散しない (数列 C_n が一定のときには発散しないことは明らか).

一方, 排液をすべて再利用する場合には $a=b$ であるから C_n が増加するとき

$$C_n < \frac{1-a}{R \cdot F} \cdot C_q$$

よって $\lim_{n \rightarrow \infty} R \cdot F = 0$ であるならば, 数列 C_n は上に有界ではない. ここで作物が生育している限り根が減少していくことは考えにくいから $R \neq 0$. したがって $\lim_{n \rightarrow \infty} F = 0$ の場合には数列 C_n は代数的に発散する.

近畿中国四国農業研究センター研究報告 第8号

平成21年 2月26日 印刷

平成21年 2月26日 発行

発行所 独立行政法人 農業・食品産業技術総合研究機構
近畿中国四国農業研究センター

〒721-8514 広島県福山市西深津町6-12-1

発行者 鳥 越 洋 一

印刷所 株式会社 デルタプリント

〒732-0802 広島市南区大州2丁目12-15
