ISSN 0287-9115

農業食料工学会東北支部報

No.62 DEC. 2015 平成27年12月

目　次

追悼

・片岡　崇先生を偲んで・・張　樹槐・武田純一・・1

研究報告

・水田転換ほ場での機械化作業体系の確立（第1報）　・・・・・・・・・・・・・佐藤麻衣・田邊　大・片平光彦・夏賀元康・・3

・水田農業機械の作業時における燃料消費量に関する研究（第1報）・・・・・・・・・・・今野真輔・片平光彦・夏賀元康・・7

・水稲の代かき同時散播機の作業特性・・・大竹智美・本多祐介・荒木　宝・白土宏之・菅原金一・片平光彦・夏賀元康・・11

・田畑輪換における水稲無代かき湛水直播栽培の効果

・・・進藤勇人・片平光彦・齋藤雅憲・中川進平・松波寿典・佐々木景司・佐藤雄幸・・15

・リモートセンシングを利用したイネいもち病の発生予察・・・木村　杏・鈴木由美子・田中勝千・森山茂治・皆川秀夫・・19

・ヤマノイモ調製作業の現状と改善・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・齋藤雅憲・進藤勇人・佐藤克樹・本田邦俊・・23

・施肥同時溝切り機を用いた長ネギの省力栽培技術に関する研究（第3報）

・・・大竹智美・進藤勇人・齋藤雅憲・片平光彦・夏賀元康・・27

・洋ナシ用皮むき機の開発・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・佐藤慈仁・高橋史夫・片平光彦・夏賀元康・・31

・ナタネ精選技術と油品質の向上・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・加藤　仁・金井源太・・35

・無変換ナタネ油および廃食油利用の発電機導入可能性・・・・・・・・・・・・・・・・・金井源太・野中章久・小綿寿志・・39

・有機的管理実践牧場における植生と牛の採食行動の関係（第2報）

・・・鈴木由美子・小笠原英毅・梅村和弘・田中勝千・寳示戸雅之・皆川秀夫・・43

・リモートセンシングを利用した草地における放射性汚染モニタリング

・・・鈴木由美子・田中勝千・寳示戸雅之・皆川秀夫・・47

・外来生物ブタナの分光スペクトルにおよぼす生理的特性の影響・・・・・・・・・・鈴木由美子・田中勝千・皆川秀夫・・51

・家畜ふん尿を利用したユーグレナの利活用に関する基礎研究（第2報）

・・・戸松央理・田中勝千・皆川秀夫・鈴木由美子・鈴木健吾・中村良平・渡邉翔太・・55

・家畜ふん尿を利用したユーグレナの利活用に関する基礎研究（第3報）

・・・戸松央理・田中勝千・皆川秀夫・鈴木由美子・鈴木健吾・中村良平・渡邉翔太・・59

・近赤外分光法によるコンクリート構造物の劣化診断（第7報）・・・・・・・川代知寛・設楽　徹・片平光彦・夏賀元康・・63

・リモートセンシングによる森林フェノロジー観測手法の開発（第1報）

・・・増山寛規・鈴木由美子・田中勝千・皆川秀夫・・67

トピックス

［シンポジウム・現地見学会報告］・・・・・・・・・・・・・・・・・・・

片岡　崇先生を偲んで

2015 年 7 月 12 日（日曜日）夕刻，北海道大学の研究者仲間より一通のメールがまいり，同日午前 10 時に片岡　崇先生がなくなったとの連絡でした。その内容に驚くとともに，とても深い悲しみを覚えました。まだ 50 歳の若さで，大学の教育研究がさておき，愛する奥さんや頼もしいお子さんらの事を考えると，ただただ無念というほかありません。つい 2 月の大学個別入学試験で札幌に行った時，先生の研究室を訪ね，学生の研究テーマなどについて普通に意見交換をした時や，昨年の沖縄学会でいつものように談笑していた時のことを昨日のように脳裏に浮かびます。お葬式などで分かったことですが，病気になられたのは 4 年も前の 2011 年だったそうです。この間，一切の弱音を吐かず普通に我々と付き合っていた先生がどれくらい強い意志の持ち主か，頭が下がる思いでいっぱいです。色々と苦痛や苦労もあったかと思いますが，どうかどうか安らかにお休みください。

片岡　崇先生は，1964 年 12 月 31 日に北海道旭川市にお生まれになり，地元の名門旭川東高校を卒業された後，北海道大学へ進学しました。北海道大学の配属講座は，農学部農業工学科原動機学講座（現在：ビークルロボティクス研究室）で，指導教員が渋沢　栄助手（現在：東京農工大学教授）でした。その後同大学院博士前期課程へ進み，研究テーマは，当時最先端のフラクタル科学という理論によるロータリ耕うんにおける土塊の形成過程の解明でした。1989 年 3 月に修士（農学）の学位が授与され，日本電装株式会社へ就職致しました。先生の研究実績やお人柄もあり，1 年半ほどの会社勤務の後に，1990 年 11 月に岩手大学農学部助手へとご栄転されました。その後，母校の北海道大学から博士（農学）の学位（論文名：高速回転切削過程における形成土塊の運動学的考察）が授与されました。そして，2000 年 10 月に母校の助教授として転出されました。

先生が岩手大学に勤務した 10 年間では，生物生産機械工学講座に所属し学生実験や機械工作実習等の授業科目を担当された他，アップカットロータリ耕うんやリンゴ収穫ロボット等の研究に精力的に取り組まれ，有為な人材を数多く輩出されました。大学の教育研究以外で特筆したのは何と言っても，農業機械学会東北支部の会員による東北若手の会の設立に尽力されたことでしょう。先生が岩手大学に勤務してから 4 年ほど後の 1994 年 8 月 17 日に，第 1 回東北若手の会が岩手大学農学部附属滝沢農場で開催されました。この会の設立は，東北支部を何とか元気にしたいとの一心で，当時の東北支部関係者を説得し，研究者仲間に呼びかけられた，先生の信念とご人望によるところが大変大きかったと推察されます。この動きに啓発され，後に各地で若手の会が設立され，

全国大会の際に合同シンポジウム等も開催されました。東北若手の会は，先生が北海道大学へ転出された後も，当時のように支部講演会前日などに勉強会などが企画され，研究成果の交流だけでなく，東北支部会員の親睦の場として引き継がれています。

先生のご研究は，常に時代の最先端技術と農業機械の融合に関連したテーマでした。大学院時代は，フラクタル科学という数学の最新概念をロータリ耕うんへの導入，岩手大学時代は，情報技術の一つである最新の画像解析手法を果樹栽培の省力化・自動化への応用，北海道大学においては，精密農業やハイパースペクトル計測技術，GPS 技術などの農業への普及推進でした。このように最新の科学技術の動向に目を光らせ，自分の教育研究内容へ積極的に取り入れてきた先生の姿勢は，今後とも東北支部の会員一同の心の中に深く刻まれて行くことと思います。

最後に，片岡　崇先生の農業機械学会東北支部の発展に対するご貢献，東北支部会員へのご厚誼に感謝の誠を捧げますとともに，先生のご冥福を心からお祈り申し上げます。

平成 27 年 12 月

農業食料工学会東北支部常任幹事
武田純一（岩手大学），張　樹槐（弘前大学）

水田転換ほ場での機械化作業体系の確立(第1報)

-転換初年目ほ場でのエダマメの生育特性-

佐藤麻衣*，田邊大**，片平光彦**，夏賀元康**

Establishment of a Power Farming System in an Upland Field Converted from Paddy Field (Part 1)

- Green soybean growth and yields in an upland field for the first year after converted from paddy field-

Mai SATO*・Dai TANABE**・Mitsuhiko KATAHIRA**・Motoyasu NATSUGA**

Abstract

This study was undertaken to assess a power farming and a new cropping system for cultivating vegetables in an upland field converted from paddy field with improving drainage. We used green soybean as crop. We investigated soil physical properties, work capabilities of rotary tilling and ridge-making implements, and green soybean growth and yields. Field experiments were carried out in the two small paddy fields, Block A (2.0a) and B(2.0a), at Yamagata Field Science Center Takasaka farm, Faculty of Agriculture, Yamagata University. Block A had an outer open ditch only. Block B had an outer open ditch with a mole drain. The green soybean cultivar “Yuagari-musume” was seeded on May 14, 2015. We investigated soil physical properties (saturated hydraulic conductivity, plastic limit, pF1.8 moisture weight percentage and upland index), work accuracy (theoretical work rate, pulverizing rate and ridge shape) and green soybean growth and yields. Open ditch and mole drain in gray lowland soil gave a certain amount of improvement for the soil physical properties. Both fields had high pulverizing rate and good soil moisture weight percentage at the plastic limit with up-cut rotary tilling. However, the mole drain may give adverse effect in the low rain fall years since it may drain out the water from the converted rice fields.

[Keywords] paddy-upland rotation, open field vegetable, green soybean, soil physical properties, power farming system

1. 緒言

山形県庄内地域は日本でも有数の米の生産地であり，日本海側の水田地帯は低湿重粘土で排水不良のほ場が多い。そのため，山形県では水田畑地化事業が 2001 年度から 2010 年度まで行われ，水田の有効活用として畑作物の栽培に積極的に取り組んでいる。山形県での水田転換畑の研究は，藤井ら[1]による大豆栽培など多くの報告がある。また，近年では土地生産性を高めるため，高収益作物である園芸作物に対する研究に対する要望も高まっている。庄内地域南部の鶴岡市では，平成 24 年度の園芸作物の作付け面積はエダマメ 783ha，メロン 228ha，かぶ 152ha，なす 74ha，ネギ 60ha とエダマメの作付けが 60%を占めている[2]。水田ほ場を畑転換して効率よい野菜栽培を行うには，ほ場の不透水層を破砕し，排水性・通気性などの土壌物理性改善による畑地化の促進や排水不良で砕土性に劣るほ場に適した作業技術の導入が必要である。排水不良なほ場での作業技術については，深沢らが庄内地域における明渠および暗渠による排水効果について報告[3]している。土壌物理性の改善については，細川が砕土率を高めて播種後の発芽や定植後の苗の活着をスムーズにする耕うん技術を報告[4]している。また，細川は豆類の湿害を回避する技術として，アップカットロータリを利用した耕うん同時畝立て播種技術についても報告している。しかし，水田転換畑での野菜栽培を推進するには，作業技術以外にも地域に適合した作付け体系を考える必要がある。

そこで，本研究は水田連作ほ場を畑転換し，露地野菜の作付け体系に合致したトラクタを基幹とした新たな機械化体系を構築し，生産現場に普及することによる生産者の粗収益増加を目的とする。本年度は土壌物理性改善を目的としたほ場の営農排水対策によるほ場物理性の変化，水田転換初年目ほ場での導入作目であるエダマメに対する耕うん同時畝立て播種機の作業性とエダマメの生育・収量の調査を行った。

2. 実験方法

(1) 試験場所・試験区

山形大学農学部附属やまがたフィールド科学センター高坂農場の小区画水田ほ場 2 筆で行った。試験区は周辺明渠のみを施工した A 区(2.0a)，明渠と弾丸暗渠を施工した B 区(2.0a)を設置した(図 1)。

* ：山形大学大学院農学研究科 鶴岡市若葉町
** ：山形大学農学部 鶴岡市若葉町

(2) 供試機械

排水対策は2014年10月27日にトラクタ（イセキ,AT-410）にスクリューオーガ式溝切り機（松山,OM-310）を取り付けて明渠を施工した。次いで，2014年11月8日にはトラクタ（前述）にモールドレーナ（イセキ，PD-110）を取り付けて弾丸暗渠を施工した。

明渠は溝底幅が15～19cm(S.D.：1.0cm)，溝幅が30～35cm(S.D.：2.0cm)，深さが26～38cm(S.D.：3.5cm)に施工した。弾丸暗渠は5m間隔でほ場の水尻から水口側に向かって片側4本ずつの合計8本，ほ場の中央部に1本を施工した。なお，弾丸暗渠はいずれも明渠と連結した。

エダマメの播種はトラクタ(クボタ,KL31ZC)にアップカットロータリ(松山,APU1610H)と傾斜目皿式播種機(アグリテクノ矢崎,AFRG-2S)を取り付けて耕うん同時畝立て播種を行った(図2)。

(3) 耕種概要

栽培品種は中生の湯あがり娘(カネコ育成)を用い，種子処理用殺菌殺虫剤(クルーザーMAXX)を塗沫処理して供試した。施肥は播種前に牛糞籾殻堆肥を2t/10a，化成肥料（LP苦土安2号：N:P_2O_5:K_2O=12：16：14）を基肥として4kg-N/10aをほ場全面に全層施肥した。栽植条件は条間75cm，株間20cmの2粒播きの設定で，2015年5月14日に各区とも6条を播種した。

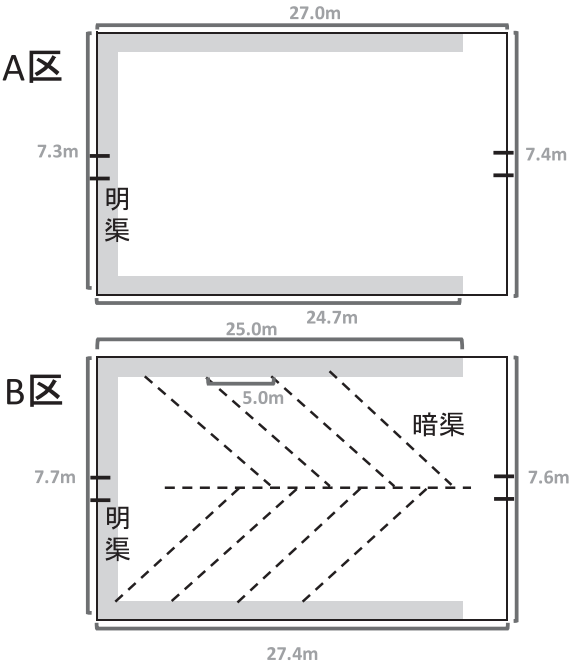


図1　試験ほ場での明渠と弾丸暗渠の配置図

図2　耕うん同時畝立て播種機

(4) 調査項目

調査は明渠施工後とエダマメ播種前の土壌物理性，播種時の作業精度，エダマメ生育と収量について以下のとおり行った。

1)土壌物理性は地表面を薄く削り有機物を除いた表層(0-5cm)の土壌を円筒コア（直径50mm，高さ51mm，容積100mL）で採取し飽和透水係数(cm･sec^{-1})，塑性限界含水比とpF1.8含水比を測定した。サンプリングはほ場の対角線上の3か所で行い，各測定値を平均化した。また，ほ場の畑地化を示す畑地化指標は以下の（1）式で算出した。

$$畑地化指標 = \frac{塑性限界含水比}{pF1.8\ 含水比} \qquad (1)$$

2)理論作業量は作業時の直進作業時間（3工程）をストップウォッチで測定し，その平均値から算出した。

3)砕土率は畝上層(0-10cm)の土壌をスコップで採取し，網目20mmの篩で土塊を分離し，採取した全土壌に占める20mm以下の土塊の質量割合を求めた。サンプリングはA・Bほ場とも5か所から行い，その平均値を求めた。

4)作業精度は畝形状（畝幅・床幅・高さ）を計測した。調査は各試験区から3条を選び，水口側から手前・中央・奥の3か所で行い，その平均値を算出した。

5)苗立ち率は播種後13日目に各区両端の条を除いた4条の株間を計測し，栽植密度と播種数に対する発芽数の割合を求めた。

6)エダマメの生育は各試験区の4か所に2.4mの調査区を設置し，草丈・節数・分枝・葉色を播種後33日目から約10日間隔で3回調査した。

7)収量は生育調査に用いた調査区に含まれる全個体を収穫して調査した。調査では未熟莢・1粒莢・奇形莢・着色莢等を除いた良品を選別し，莢を含めた新鮮重の割合による完全莢率，単位面積あたりの収量を算出した。

3.結果および考察

(1)土壌物理性の変化

土壌物理性の経過を表1に示す。塑性限界含水比はA区が排水対策前の2014年10月で27.4%，排水対策後の2015年4月で30.6%,同様にB区が28.8%と30.8%であった。pF1.8

含水比はA区が0.38と0.41,B区が0.38と0.38であった。飽和透水係数は各区とも明渠施工後が-6 であったが，播種前にはA区が-6〜-7，B区が-4〜-7とB区で範囲が広くなった。畑地化指標はA区が0.71と0.74,B区が0.77と0.81であり，採取時期と試験区間で有意差がなかった。

水田転換ほ場での土壌物理性は畑地化の進行に伴い排水性が改善され，ほ場容水量を示すpF1.8含水比が低下し，土壌団粒の塑性変形が生じなくなる水分点である塑性限界含水比の変動が少ないとされる[5]。高坂農場の水田ほ場は灰色低地土に区分されており，重粘土ほ場よりも排水性が良いといえる。そのため，転換初年目のほ場では，排水対策前で畑地化指標が0.72〜0.77と大きく，弾丸暗渠施工によるpF1.8含水比の低下が少なかった。しかし，弾丸暗渠の施工は飽和透水係数の範囲を拡大し，畑地化指標の差が拡大しており，畑転換が可能な 0.8 以上のレベルを確保するなど一定の効果が確認できた。

表1　土壌物理性

試験区	採取時期	塑性限界 (%)	pF1.8含水比	飽和透水係数 (cm sec⁻¹)	畑地化指標
A	2014/10	27.4	0.38	-6	0.71
	2015/4	30.6	0.41	-6〜-7	0.74
B	2014/10	28.8	0.38	-6	0.77
	2015/4	30.8	0.38	-4〜-7	0.81

注1:飽和透水係数は10の乗数のみを表示し、全調査サンプルの範囲を示す

(2)理論作業能率と作業時の砕土率

理論作業能率はA区が0.70h/10a，B区が0.75h/10aであり，2つの試験区に有意な差がなかった。砕土率はA区が88.0%，B区が82.7%となり，2つの試験区に有意な差がなかった(表2)。

砕土率は両区とも転換初年目で80%を超えており，アップカットロータリによる良好な砕土性が確認できた。また，作業時の土壌含水比はA区B区ともに0.3前後になっており，塑性限界含水比に近似するなど砕土しやすい状態にあった。

表2　理論作業量と砕土率

試験区	理論作業量 (h 10a⁻¹)	砕土率 (%)	含水比
A	0.70	88.0	0.30
B	0.75	82.7	0.29

(3)畝形状

畝幅はA区で64.4cm,B区で64.9cm,同様に床幅は33.7cmと36.0cm，高さは18.5cmと17.8cmであった(図3，4)。各項目は試験区間に有意な差がなく，両試験区で同等の畝を形成できた。また，細川が行ったアップカットロータリを使用した畝立てでは，床幅が30〜35cm，高さが15〜20cmと報告[6]されている。本年度の実験では，細川らの結果と比較して床幅と高さが同等であり，十分な作畝精度を有していた。

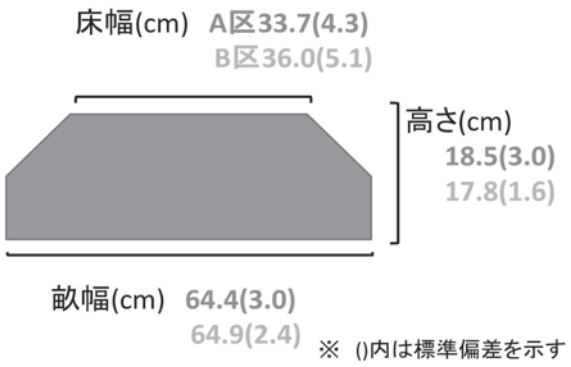


図3　作成された畝形状

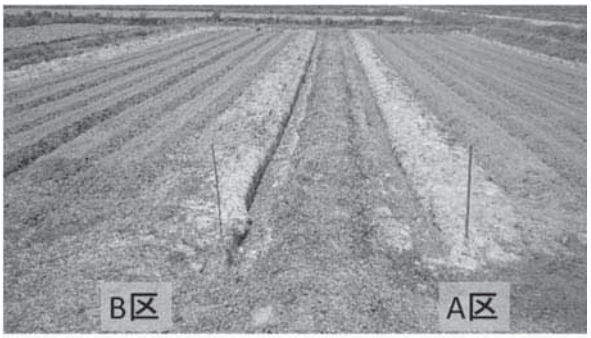


図4　作畝後のほ場

(4)株間と苗立ち率

株間はA区が17.5cm，B区が18.7cmであった。苗立ち率は図5に示すとおりA区が69〜100%，B区が88〜96%の範囲であった。

苗立ち率は適度な土壌含水比と高い砕土率のため，各区とも平均値で88%以上を確保できた。A区とB区では有意差が見られなかったが，A区の一部で苗立ち率の低下がみられるなど標準偏差が14%とB区よりも大きく，かつF検定で分散に差が生じており，排水性の違いが出芽に影響した可能性も否定できない。

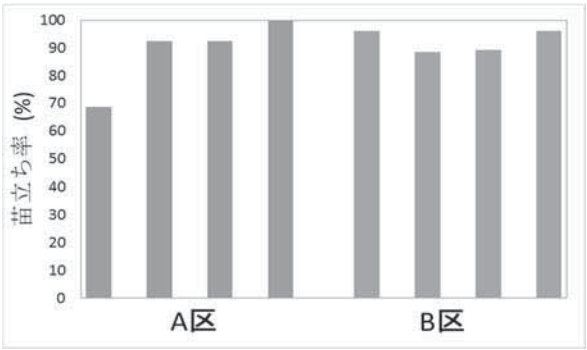


図5　苗立ち率

(5)生育調査

生育初期から開花期までの各試験区のエダマメの生育経過を表3に示す。草丈はA区が10.9〜26.8cm，B区が11.9〜29.6cm，節数はA区が5.1〜10.6，B区が5.3〜10.2，分

枝数はA区が0〜2.5，B区が0.3〜2.3，葉色はA区が30.0〜31.7，B区が31.7〜32.9であった。

ほ場の観察では,図6に示すとおり生育に大きな差が見受けられなかった。ただし，B区は草丈が高く節数が同等であることから,葉の繁茂によってほ場内での密度が高まったため，節間長がA区よりも長くなった。以上から，生育初期では，弾丸暗渠を施工したB区がA区よりも生育が良好であったといえる。

表3　生育調査

播種後日数	処理区	草丈 (cm)	節数	分枝数	葉色 (SPAD値)
33	A区	10.9	5.1	0.0	30.0
	B区	11.9	5.3	0.3	28.9
42	A区	15.8	8.0	0.8	35.6
	B区	16.7	7.9	1.2	36.8
53	A区	26.8	10.6	2.5	31.7
	B区	29.6	10.2	2.3	32.9

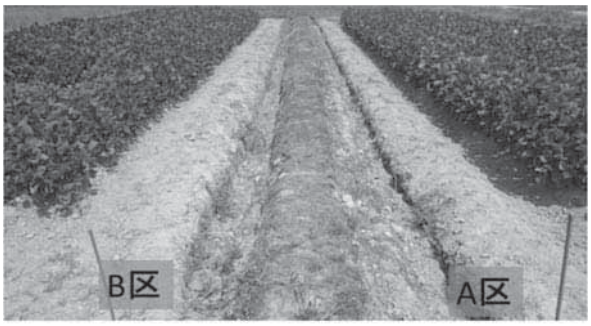


図6　収穫期でのエダマメ栽培ほ場
(2015年8月5日：播種後80日)

(6)栽植密度・収量調査

栽植密度はA区が13.3本，B区が14.3本であった。1本あたりの葉柄数は試験区間に大きな差が見られないが，1葉柄あたりの莢数と1莢あたりの莢重，完全莢率がA区で高くなった。その結果，10aあたりの収量はA区で1173kg，B区で747 kgと試験区間で有意な差が生じた(表4)。

B区は排水対策を施したことから排水性が良好であるため，A区よりも高い収量を期待したが，本年度の栽培では，暗渠施工による効果を確認できなかった。その理由として，今年度の降水量が考えられる。2011年度から5年間のエダマメ栽培期間3か月間の鶴岡市の降水量を図7に示す。縦軸は5月10日からの積算降水量,横軸は5月10日から8月10日までの期間を示している。2015年の積算降水量は期間をとおして194mmと例年に比べて少ない。また，今年の開花時期は点線に示す6月30日であるが，エダマメにとって水が必要となる開花期に雨が長期間降っていないことがわかる。小雨の影響は，本年度の試験ほ場周辺のエダマメ栽培ほ場で開花期以降に何度かの畝間灌水が確認できたことからも窺える。すなわち，本年度のエダマメ栽培では，開花期を含めて生育期間をとおして降水量が少なかったため,暗渠施工と畝立てによる湿害回避効果が発揮できなかった。また，

表4　栽植密度と収量調査

試験区	栽植密度 (本 m^{-2})	1本あたりの葉柄数 (本)	1葉柄あたりの莢数 (個)	1莢あたり莢重 (g)	完全莢率 (%)	収量 (kg $10a^{-1}$)
A区	13.3	23.4	2.8	2.0	68.2	1173.3
B区	14.3	23.3	2.1	1.8	59.7	747.8

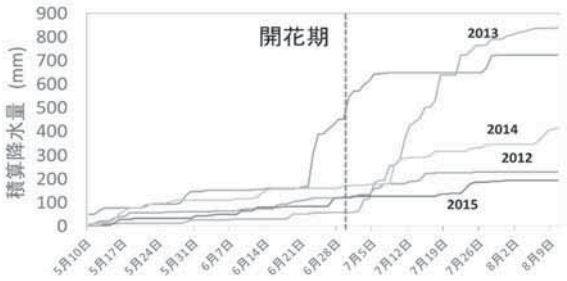


図7　播種日から3ヶ月間の積算降水量

排水性の改善はほ場容水量を低下させるため,開花期に必要な水分を土壌中に溜めることができず,水が不足して弾丸暗渠を施工したB区の収量を低下した。

4. まとめ

（1）転換初年目のほ場では弾丸暗渠施工によるpF1.8含水比の低下が少なかったが，飽和透水係数の範囲拡大により，畑地化指数が畑転換可能な0.8以上のレベルを確保するなど一定の効果を確認できた。

（2）耕うん同時畝立て播種の作業精度は耕うん時の土壌含水比が適切であり,アップカットロータリによる高い砕土性で設定どおりの畝形状が得られた。

（3）弾丸暗渠や畝立て栽培では今年度のように降水量が少ない年の場合，湿害回避効果が発揮されず，逆効果となり開花期でのほ場の水不足につながる可能性がある。

参考文献

1)　藤井弘志,安藤忠弘,吉田昭,大沼彪,鈴木武,阿部吉克,今野周,1981.水田転換畑の大豆栽培における土壌条件と養分吸収が子実収量に及ぼす影響,山形県農業試験場研究報告,第15号,39-53.

2)　山形県農林水産部農村整備課,2011.あなたの田んぼを宝の山に!〜水田畑地化事業のあゆみ〜.

3)　深沢昭吾,上野正夫,小南力,下田英雄,桝谷精治,1982.転換畑における幡多作物安定生産のための土壌理化学性の改善,山形県立農協試験場研究報告,第17号,127-149.

4)　細川寿,2004.重粘土転換畑の耕うん作業技術,中央農業総合研究センター.

5)　中野啓三，1983．重粘土転換畑における易耕性の評価,農地物理学会誌，48号，38-43.

6)　細川寿,2003.重粘土転換畑における大豆の室外回避技術,関東東海北陸農業研究成果情報.

水田農業機械の作業時における燃料消費量に関する研究（第１報）

－自脱型コンバインの作業特性－

今野　真輔*・片平　光彦**・夏賀　元康**

Fuel consumption of agricultural machines on paddy fields (Part 1)

- Working properties of head-feeding combine -

Shinsuke KONNO*・Mitsuhiko KATAHIRA**・Motoyasu NATSUGA**

Abstract

Recently, Japanese rice-growing farmers face difficult conditions and decreasing market prices of rice. The Shonai area of Yamagata prefecture, which has many medium scale cultivated fields, is among Japan's largest rice cultivation areas. Few reports have described studies of fuel consumption of agricultural machines, including head-feeding combines, in medium scale fields near the Sea of Japan. This study investigated working properties and fuel consumption associated with harvesting paddy rice. The objectives of this study are to decrease fuel consumption, to improve working efficiency, and to increase farmer income by reducing the variable costs of rice production. All tests used head-feeding combines (H064G; Iseki Co. Ltd., at Takasaka farm / H066G; Iseki Co. Ltd., at Akita Agricultural Experiment Station) at the University Farm, Faculty of Agriculture, Yamagata University (Takasaka Farm) and Akita Agricultural Experiment Station during September–October, 2014. We investigated work conditions, fuel consumption, and the traveling locus using a GPS logger (GPS Trip Recorder 747 Pro; Transystems Inc. / WBT-202; Wintec). The fuel consumption was measured using the top-fill method. Working time, working distance, and working capacity were calculated using the working locus. Fuel consumption at Takasaka Farm and Akita Agricultural Experiment Station were3.38 and 2.13 L/10 a, respectively. As the number of turns and distance in fields increased, fuel consumption increased. Therefore, working methods that decrease the number of turns and no-work distance must be introduced to decrease fuel consumption.

[Keyword] combine harvester, fuel consumption, work capacity, paddy rice

1. 緒言

近年，温室効果ガスの排出量の増加が原因とされる気象変動が顕著となっている。具体的には気温上昇や降雨パターンの変化であり，それらによって自然環境や農作物生産に影響をもたらす。温室効果ガスの排出量は今後も増加すると予測され，温室効果ガス削減の取組が世界的に実施されている。農業分野は温室効果ガスの排出量全体に占める割合は少ないが，一定の排出量を占めるため温室効果ガスの排出量削減に向けた取組を考える必要がある。問題となっている温室効果ガスはその 95％が二酸化炭素である。自動車やトラクタの排出ガスには二酸化炭素が含まれているため，それらの排出ガスを減少させることで温室効果ガスの削減に寄与できる。

一方，原油価格は近年，不安定な状態が続いている。日本は資源に乏しく原油価格の変動による影響を大きく受けるため，原油価格の高騰が農業で使用する軽油費用の増加を誘引し，作物生産に要する費用の増加につながる。また，米の価格は下落傾向にあり，米生産農家の経営はより一層厳しくなっているため，軽油使用量を削減して生産費を抑制する必要がある。

農業機械の省エネ作業については，平成 19 年に農林水産省生産局から農業者を対象に二酸化炭素の排出抑制やコスト削減に活用可能な「農業機械の省エネマニュアル」が刊行されている。そのマニュアルは数年おきに新たな試験結果や情報が追加されて改訂される。現在刊行されている平成 27 年度版の「農業機械の省エネ利用マニュアル」には農業機械の省エネ利用ポイントが記されている。コンバイン作業時の留意点としては，①脱穀部の回転等を適正化，②適正なこぎ深さでの作業，③適切な走行速度での作業，④ほ場の排水対策と中干しの徹底，⑤高水分作物の収穫を避ける，⑥汎用コンバインでの 2 段刈り，⑦遠距離移動時でのトラック等による運搬，⑧自走移動時での高速段設定，⑨ほ場内の移動の減少があげられている。

M.Safa(2010)らは，ニュージーランドのカンタベリー地域での小麦生産で耕起と収穫作業時がほかの作業と比べて燃料消費が多いと報告している。燃料消費量の研究はトラクタを基幹とした各作業で行われている。Gotoh ら(2010）は走行ギアと PTO ギアを高く設定し，エンジンスピードを低下させることで燃料消費量が減少すると報告している。普通型（軸流）コンバインに関する報告ではコムギやオオムギ，ナタネの収穫に際し，刈取りや脱

*山形大学大学院農学研究科　**山形大学農学部

穀作業をしていない状態でコンバイン駆動部を停止し，エンジン回転数を 2100 から 1000rpm に下げることで燃料消費量を減少できると報告している。また，軸流コンバインは脱穀分離ロータの回転数を 500rpm から 650rpm まで増加させることで，燃料消費量が増加すると報告されている（ Liudvikas Spokas ら，2011）。しかし，水稲栽培での農業機械の燃料消費量に関する報告は近年大規模区画ほ場を中心としたものが多く，中規模区画で日本海側の気象条件に適応した事例が少ない。

以上から，本研究では日本でも有数の稲作地帯である山形県庄内地方での中規模区画の水田で作業の効率化による燃料消費量の削減による農家収入の増加と排気ガスの削減による地球環境の改善を目的とする。本報は水稲での自脱型コンバインによる収穫作業の作業特性と燃料消費量を調査した。

2. 材料と方法

(1) 実験場所

水稲収穫作業時の燃料消費量の調査は 2014 年 9 月，10 月に山形大学農学部附属やまがたフィールド科学センター高坂農場（以下高坂農場）と秋田県農業試験場（以下秋田農試）で行った。供試ほ場の面積は高坂農場が約 30a（長辺 100m，短辺 30m），秋田農試が 1ha（長辺 200m，短辺 50m）である。秋田農試では 1 区画のほ場で同型のコンバイン 2 台を使用し収穫した。供試した品種は高坂農場が“出羽燦燦”，“ササニシキ”，“はえぬき”，秋田農試が“あきたこまち”である。

(2) 供試機械

収穫作業は図 1 と 2 に示す自脱型コンバイン（井関農機(株) , H064G：高坂農場，井関農機(株), H066G：秋田農試）で行った。出力は H064G が 44.9kW, H066G が 34.6kW である。オペレータは高坂農場の技能職員 1 名，秋田農試の技能職員 2 名に依頼した。なお，機械の設定はオペレータに一任した。

(3) 調査項目

1) ほ場状態

作業時のほ場状態は土壌含水比，籾含水率，刈り株の高さを測定した。土壌含水比はほ場の 3 か所から深さ 0-10cm の土壌（W_1 : g）を採取し，105℃に設定したオーブン（DV-41，YAMATO SCIENTIFIC CO. LTD.）で 24 時間絶乾（W_2 : g）した。乾燥した土壌は(1)式で含水比を算出した。

$$土壌含水比(\%,\ d.b.) = \frac{W_1 - W_2}{W_2} \times 100 \qquad (1)$$

籾含水率(%，w.b.)は収穫された籾（W_a : g）を 80℃に設定したオーブン（DV-41，YAMATO SCIENTIFIC CO. LTD.）で 48 時間絶乾（W_b : g）する方法または水分測定機器を使用する方法で測定した。前者の方法で測定した場合は (2) 式で含水率を算出した。

図 1　高坂農場で使用した自脱型コンバイン（H064G）

図 2　秋田農試で使用した自脱型コンバイン（H066G）

$$籾含水率(\%,\ w.b.) = \frac{Wa - Wb}{Wa} \times 100 \qquad (2)$$

刈り株の高さ(cm)はほ場から無作為に 3 か所の調査区を抽出し測定した。刈り株高さは収穫作業後にほ場に残った刈り株の土壌表面から株の先端までの高さを，1 調査区につき 10 個体測定した。

2) 作業状態

作業内容はGPSロガー（ Transystems Inc ，Trip Recorder 747Pro；Wintec,WBT-202）で走行軌跡を測定して評価した。なお，GPS の測定誤差は 1m 以内である。得られたデータは直進，旋回の各工程に分類し，各工程の作業時間，走行距離，走行速度と作業能率を算出した。

3. 結果と考察

(1) ほ場状態

作業時のほ場状態を表 1 に示す。高坂農場では土壌含水比が 0.58，籾含水率が 21.4%，刈り株高さが 19.2cm であった。秋田農試では土壌含水比が 0.50，籾含水率が 24.3%，刈り株高さが 8.8cm であった。

高坂農場では調査期間が 24 日と長かったため，土壌含水比が 0.77～0.41 の範囲で変動した。同様に，籾含水率は高坂農場で調査期間の前半が 23%前後，調査期間後

表 1　収穫作業時の作業条件

調査項目	調査場所	平均	標準偏差
土壌含水比	高坂農場	0.58	0.13
	秋田農試	0.50	0.02
籾含水率(%)	高坂農場	21.4	3.5
	秋田農試	24.3	0.5
刈り株高さ(cm)	高坂農場	19.2	1.6
	秋田農試	8.8	1.0

表 2　調査場所での燃料消費量と実作業能率

調査項目	調査場所	n	平均	標準偏差
燃料消費量	高坂農場	6	3.38	0.28
(L/10a)	秋田農試	4	2.13	0.28
実作業能率	高坂農場	6	0.52	0.17
(h/10a)	秋田農試	4	0.37	0.03

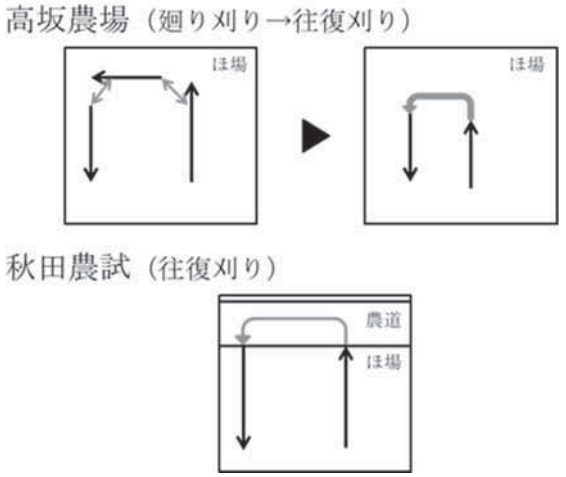


図 3　高坂農場と秋田農試での自脱型コンバインの運行法

半が 17%前後であった。また，高坂農場では刈り株高さが秋田農試と比較して高いが，これはほ場の土を巻き込まないようにしたいというオペレータの意向が反映した。

(2) 刈り取り時での運行法の概要

高坂農場と秋田農試でのコンバインの進行経路と刈取部位を図 3 に示す。高坂農場では最初の 6 周前後を廻り刈り，その後往復刈りで作業を行った。秋田農試では全工程を往復刈りで行った。収穫はいずれもほ場外側から内側に向けて作業を行った。高坂農場では廻り刈りの際に長辺の端まで刈り取りを行い，その後後退と斜行を繰り返して旋回半径を確保して作業を行った。秋田農試はほ場の長辺が長いため，収穫時の直進走行距離が長くなった。また，旋回は農道ターン方式で行うため，旋回時の切り返しや方向転換が少なかった。

(3) 燃料消費量と作業能率

調査場所ごとの燃料消費量と実作業能率を表 2 に示す。燃料消費量は高坂農場で 3.0～4.0L / 10a，秋田農試が 1.7～2.5L / 10a である。高坂農場では土壌含水比の高いほ場で操作性が悪化し，燃料消費量が大きくなった。また，秋田農試では水稲の株が試験区の一部で倒伏しており，それによって燃料消費量に差が生じた。

実作業能率は高坂農場で 0.40～0.60 h / 10a，高坂農場で 0.35～0.40 h / 10a であった。高坂農場では，結束紐の不足や機械の動作不良といったトラブルの対応による中断時間が長引いたほ場があり，それによって実作業能率の変動が大きくなった。燃料消費量と実作業能率はいずれも高坂農場より秋田農試で良い結果であった。秋田農試はほ場の長辺が長く，旋回を農道ターン方式で行うため，機械の操作性と作業性を高坂農場より良好にした。

(4) 燃料消費量と旋回

調査場所ごとの総走行距離に占める旋回とアンロード走行距離の割合を表 3，旋回とアンロード回数を表 4 に示す。総走行距離に占める旋回とアンロード走行距離の割合は高坂農場で 16.3%と 3.0%，秋田農試で 5.1%と 6.5%であった。旋回とアンロードの回数は高坂農場で 30.8 回と 5.0 回，秋田農試で 9.8 回と 9.8 回であった。高坂農場は最初の 6 周前後を廻り刈りで作業したため，旋回回数が増加した。秋田農試は高坂農場よりほ場面積が大きいため，アンロード回数が増加した。ただし，秋田農試はほ場の長辺が長く，農道ターン方式で作業を行ったため，旋回とアンロード走行距離の割合が小さい傾向にあった。旋回やアンロード走行距離の割合の低下は，刈り取りを行う直進走行距離の割合が増加することを示し，無駄な走行距離が少なくなったといえる。

総走行距離に占める旋回走行距離の割合と燃料消費量の相関を図 4 に示す。総走行距離に占める旋回走行距離の割合と燃料消費量には正の相関関係があり，総走行距離に占める旋回走行距離の割合が大きいと燃料消費量が増加する傾向にある。すなわち，燃料消費量を減少するには旋回時の走行距離を少なく必要がある。旋回回数と燃料消費量の相関を図 5 に示す。旋回回数と燃料消費量

表 3　調査場所での総走行距離に占める旋回とアンロード走行距離の割合（%）

調査場所	工程	平均	標準偏差
高坂農場	旋回	16.3	3.2
	アンロード	3.0	0.4
	合計	19.3	
秋田農試	旋回	5.1	0.6
	アンロード	6.5	0.4
	合計	11.6	

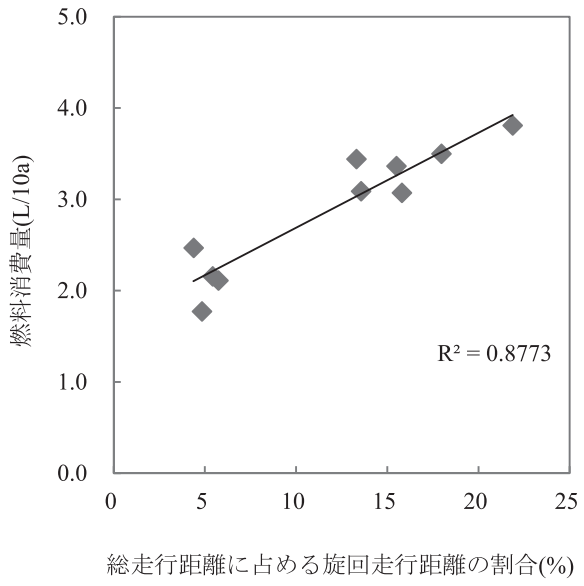


図 4　総走行距離に占める旋回走行距離の割合と燃料消費量

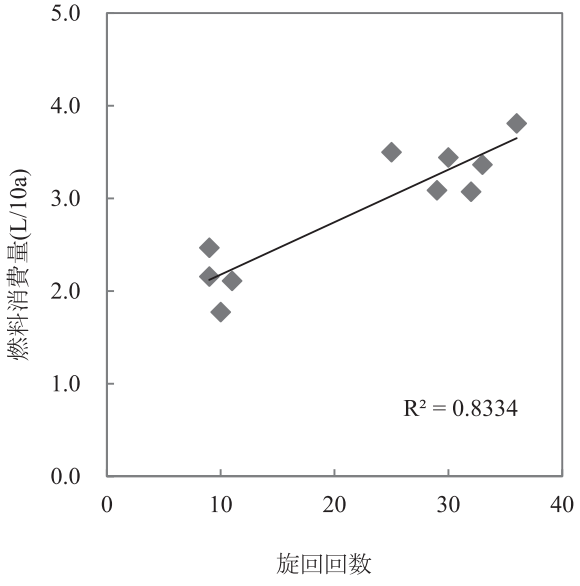


図 5　旋回回数と燃料消費量の関係

表 4 調査場所での旋回とアンロード回数

調査場所	工程	平均	標準偏差
高坂農場	旋回	30.8	3.8
	アンロード	5.0	0.0
	合計	35.8	
秋田農試	旋回	9.8	1.0
	アンロード	9.8	1.0
	合計	19.5	

には正の相関関係があり，旋回回数が多いほど燃料消費量が増加する傾向にあった。旋回回数の多い廻り刈りでは，周回を少なくして往復刈りの作業を増やすことで燃料消費量の減少につながる。

今回の調査ではデータ数が少なく，調査できなかった項目あった。今後は機械設定やほ場条件を統一し，全刈り収量や立毛角などの項目を追加するなどして燃料消費量に影響を与える要因を引き続き検討する。

4. 摘要

中規模区画の水田ほ場で自脱型コンバインの作業特性を調査した結果、以下の結論を得た。

(1) 燃料消費量と実作業能率はほ場の長辺が長く，旋回を農道ターン方式で行う秋田農試が高坂農場よりも低下した。

(2) 燃料消費量は総走行距離に占める旋回走行距離の割合が高くなるにつれて増加する傾向にあった。

(3) 燃料消費量を低減するには作業性の悪化要因を改善し，かつ旋回を少なくする作業法の導入が必要である。

参考文献

1) 一般社団法人日本農業機械化協会，2016．農業機械の省エネ利用マニュアル，1-6，12-15．

2) M.Safa, S.Samarasinghe, M.Mohssen, 2010. Determination of fuel consumption and indirect factors affecting it in wheat production in Canterbury, New Zealand, Energy, 35, 5400-5405.

3) Takashi GOTOH, Tsukasa TESHIMA, Yasuroh SUGIURA, Hiroyuki TAKAHASHI, Kazufumi SHIMIZU, Ei SEKI, 2010. Reduction Rate of Fuel Consumption by Gear Up and Throttle Down on an Agriculture Tractor, Japan Agriculture Research Quarterly, Vol.44, No.4.

4) Liudvikas Spokas, Dainius Steponavicius, 2011. Fuel consumption during cereal and rape harvesting and methods of its reduction, Journal of Food, Agriculture & Environment, Vol. 9 (3&4), 257-263.

5) 農作業試験法編集委員会，1987．農作業試験法，農業技術協会，76-83．

水稲の代かき同時散播機の作業特性

大竹智美*・本多祐介*・荒木宝*・白土宏之**・菅原金一***・片平光彦*・夏賀元康*

Working Properties of Direct Broadcast Seeding Machine with Puddling Rice Cultivation

Tomomi OTAKE*・Yusuke HONDA*・Takara ARAKI*・Hiroyuki SHIRATSUCHI **・Kin-ichi SUGAWARA ***・Mitsuhiko KATAHIRA*・Motoyasu NATSUGA*

Abstract

Direct seeding of paddy rice is necessary to develop a high-efficiency working system to obtain low-cost and labor saving technology to match the efficiency of large paddy fields. This study was conducted to increase the spread area of direct seeding to improve germination rates and work capabilities of broadcast seeding. Therefore, this study investigated seeding properties and work rates of the developed broadcast seeding machines to establish direct shallow broadcast seeding technology with puddling using non-coated rice seed. The developed broadcast seeding machine with paddling was composed with tractor, paddy harrow, seeding machine, and land roller components. Direct broadcast seeding with puddling in the field test showed 0.40 m/s work speed, 1.2 h/10 a work rate, and 9.1 g/m2 for the amount of seeding. Testing of shallow puddling showed that the center position of the paddy harrow increased the germination rate by 13.6–26.3 percentage points over those of the other test blocks. Seeding depths of germinated seeds were 2.25 mm on average. For seeding depths of less than 7 mm, no correlation was found for germination rates. The side direction distribution rate of germination seeds when using a commercial broadcast plate was 16.4% on center positions on average, and 51.1% with ±6–9 cm from the center position, on average. The cross-side distribution rate increased to 9–12 cm area for a high-tip setting of the broadcast plate from the soil surface. These values showed a normal distribution with a peak value at 9–12 cm area.

[Keywords] rice, direct broadcast seeding with puddling, germination rate, seeding property

1. 緒言

水稲の直播栽培は、平成25年度に日本全国で25,889ha行われており、その中で代かきを行わないで畑状態のほ場に播種する乾田直播が 8,499ha、代かきを行ったほ場に播種する湛水直播が17,272haである。水稲の全作付面積の1,599,000ha（平成25年度）に対して直播栽培の面積比率は1.6%である。ただし、水稲直播栽培は平成15年の栽培面積が13,139haであることと比較して約2倍の増加になっており、普及が進んでいることを示している[1)]。地域ごとの作付面積では北陸地域が8,244ha、東北地域が6,996ha、中国・四国地方が3,286haとなっており、上記の地域で全体の 72%を占める[1)]。東北地域は積雪寒冷地の気象条件であるが、直播栽培は平成 15 年の約3,000haから順調に増加しており、特に青森県、岩手県、宮城県で栽培面積の増加が顕著である。本学のある山形県は、平成25年の直播栽培普及率（直播栽培面積/水稲作付け面積）が2.28%、平成24年の栽培面積が1,333ha、そのうち庄内地域が1,041haであり、東北でも有数の直播栽培地域である[2)3)]。

水稲直播栽培は、前記したとおり湛水直播と乾田直播に大別され、播種様式が散播、条播、点播に分類される。散播は背負い式の動力散布機や産業用無人ヘリコプタを用いて行われることが多く、その他に乗用散粒機を用いた作業技術についての報告[4)]もある。条播は高精度湛水条播機やエアアシスト式条播機の開発研究が行われ、条播の普及拡大に寄与している[5)6)]。点播は条播と比較して登熟歩合や耐倒伏性に優れるなどの利点があり、その優位性を活用するため播種機構の開発を中心に研究が行われている[7)8)]。また、近年は過酸化カルシウム粉衣（カルパー）と比較して鳥害の発生が少ない鉄コーティング技術[9)]、大規模化に適したグレンドリルを用いた乾田直播作業体系の研究や普及が盛んであり[10)]、直播面積の普及拡大に寄与している。

水稲栽培では平成24年の統計で30a以上の区画が156万haで整備率が63.2%、そのうち1ha以上の区画が21.7万haで整備率が8.6%となっており、ほ場の大区画化が年々進行している[11)]。そのため、水稲直播栽培では大区画ほ場に対応した低コスト省力化技術の要望が高まっており、そのための高効率な作業技術体系の確立が求められている。作業の高効率化に関し、散播は他の播種様式と比較して作業能率が高いが、苗立ち率や収量の変動が大きく、それが技術普及に際しての障害になっている。本報では低コスト化に有効な散播の作業性と苗立ち率を改善することによる普及面積の拡大を目的に、カルパー粉衣を行わずに催芽籾をほ場に散播する代かき同時浅層播種栽培技術を確立するため、開発した播種機の作業能率と播種特性を検証した。なお、本研究は農林水産省の「攻めの農林水産業の実現に向けた革新的技術緊急展開事業」の助成を受けて実施した。関係各位に対して謝意を表する。

*山形大学農学部，**東北農研センター，***（株）石井製作所

2. 試験方法

（１）実験場所

播種実験は2014年８月に山形県鶴岡市の山形大学農学部附属やまがたフィールド科学センター高坂農場の水田ほ場（ほ場面積：162m^2，33×4.9m）で行った。実験データの解析は山形大学農学部で行った。

（２）実験機の構成

代かき同時散播作業機は乗用トラクタ(イセキ,AT-410型，出力 31kW）にドライブハロー（ニプロ，HR-2400）と播種機（石井製作所，SV-R10EZ)、鎮圧ローラー（φ：150）を組み込んだものである（以下、実験機と呼称)。実験機に組み込んだ播種機はドライブハロー作業幅の半分(1200mm)に対して１台、合計２台を配置した。また、播種機は種子ホッパ下部から種子導管を介して先端が40cm間隔になるように設定した。播種機の種子繰り出し口先端には、プラスチック製の拡散板（先端幅：170mm）を配置し、催芽籾を分散して播種できるようにした。播種機の構成と拡散板の配置を図１に示す。

代かき同時散播は、荒代かきを行ったほ場に実験機でその１〜２日後に代かきと同時に催芽籾を散播し、鎮圧ローラーで覆土して表面から 10mm 以内の深さに播種する農研機構東北農研センターで開発された作業技術である。

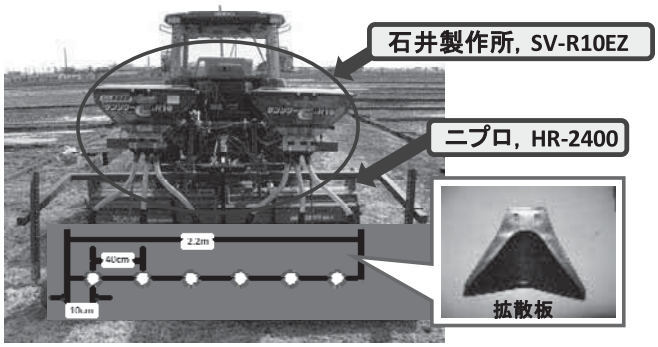


図１　実験機の構成と播種板の配置

（３）実験方法

１）作業性と播種性能調査

代かき同時散播実験はトラクタに付属する代かき深度調整ダイヤルを用いて代かきの深度を深と浅の２段階に設定し、エンジン回転数を 2500rpm、走行ギアを中-4（設定走行速度:0.43m/s)の条件で行った。播種量は 9kg/10a（催芽籾)に設定し、播種前に落下試験を行い調整した。ほ場試験では代かき深度別に深区と浅区、さらに深度区中にハロー中央部区と車輪部区を設置し、合計４試験区をそれぞれ設定した。

２）催芽籾の分布特性

播種機に付属する拡散板での催芽籾の拡散実験は、拡散板を鉄製スタンドにクランプで固定し、先端が地表面から 5〜25cm まで 5cm 間隔の高さになるように調整し、合計５つの試験区を設定した。なお、催芽籾は拡散板の上方にクランプで固定したホッパに供給した。

（４）検討項目

１）作業性と播種性能調査

作業性の調査はGPSロガー(Transystem,Trip Recorder 747Pro，観測精度：DRMS<1.5m）を用いて作業速度（m/s）と作業時間（sec)、走行距離(m)を計測し、作業能率（h/10a）を求めた。播種量は播種前後の催芽籾質量を計測し、ほ場面積で除して算出した。播種深度と苗立ち数は、前記した調査区内から図 2 に示す土壌ブロック（250mm(L)×150mm(W)×150mm(H)）を１区あたり４個採取し、土壌ブロック内に含まれる催芽籾の数と位置を削り出して求めた。

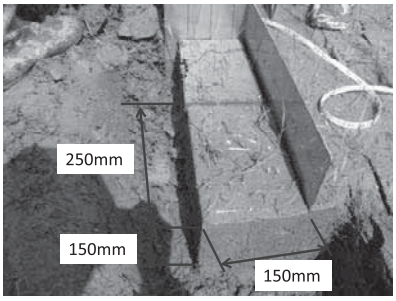


図２　土壌ブロックの採取（2014 年 9 月 10 日）

２）催芽籾の分布特性

催芽籾の分布特性調査は、水稲催芽籾約 25g を供給ホッパに投入して 30mm×30mm のメッシュ（80 ブロック）に区切ったアルミトレイ（高坂農場水田ほ場の土壌）上に試験区ごとに播種し、メッシュ上に落下した籾数を計測した（図 3)。

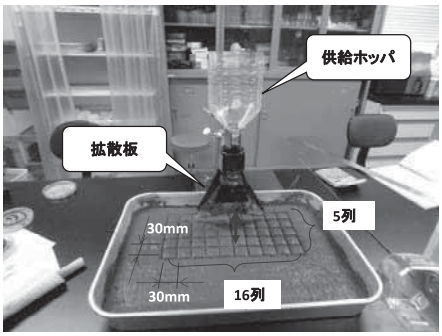


図３　催芽籾分布特性試験での試験器の構成

3. 実験結果

（１）作業性と播種精度

実験機を用いた播種試験は作業速度が 0.40m/s、総走行距離 48.4m、作業能率が 1.2h/10a、播種量 9.1g/m^{2}であった（図 4）。作業速度は設定値よりも 7.0%低下し、播種量は 1.1%増加した。

作業速度と播種量の変化は播種が代かきと鎮圧の同時作業であったため、ドライブハローの回転による押し出しよりも実験機の負荷に起因する車輪の進行低下の割合が高まったことが要因である。作業能率は試験ほ場の面

積が小さかったため、直進作業時間（54 秒）に比して旋回に要する時間（183 秒）が長くなり、実際のほ場レベルでの作業能率よりも低下した。

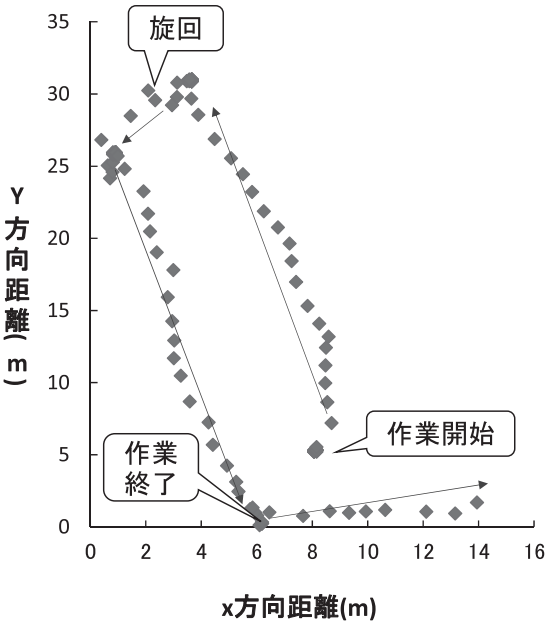


図 4　実験機での播種作業時の走行軌跡

出芽した籾の播種深度は 1.0～3.8mm の範囲で分布し、代かき深度の違いやトラクタの車輪部と中央部の間で有意差がなかった。不出芽の籾での播種深度は 17.6～40.2mm と出芽した籾よりも分布域が広く、かつ分散が大きくなった。その場合での車輪部と中央部では、代かき深度を深く設定することで播種深度が 44～128%まで深くなった。出芽率は、代かき深度を浅くした場合のハロー中央部で他区よりも 13.0～26.3 ポイント増加した。また、サンプリングブロック内での播種量は、代かき深度の深区が浅区と比較して 45～49％増加する傾向にあった（図 5、表 1）。これは代かき深度を深くすることでトラクタの進行低下が増加したことが要因と考えられる。なお、出芽した籾の播種深度は平均 2.25mm であり、7mm 以内の播種深度であれば出芽率との間に相関を示さなかった（図 6）

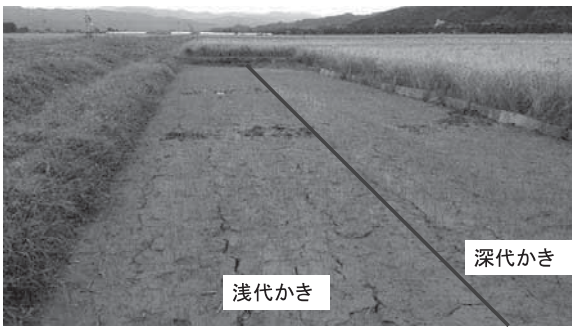


図 5　各試験区の出芽状況（2014 年 9 月 17 日）

表 1　代かき深度が播種深度と出芽率に与える影響

試験区	代かき深さ	播種深度A (mm)	播種深度B (mm)	出芽率 (%)	播種量 (g/m^2)
車輪	深い	1.0 (0.43) a	40.2 (8.24) a	49.7 (6.76) a	19.4 (4.64) a
	浅い	3.8 (2.52) a	17.6 (11.08) b	63.0 (21.96) a	13.4 (8.23) a
中央	深い	2.1 (2.40) a	33.0 (7.47) ab	62.4 (12.11) a	17.7 (6.42) a
	浅い	2.6 (1.60) a	22.9 (15.70) b	76.0 (12.36) a	11.9 (6.34) a

注1：播種深度Aは出芽籾、Bは不出芽籾を示す。
注2：異なるアルファベット間に5%水準で有意差あり。
注3：( ) 内数値は標準偏差を示す。

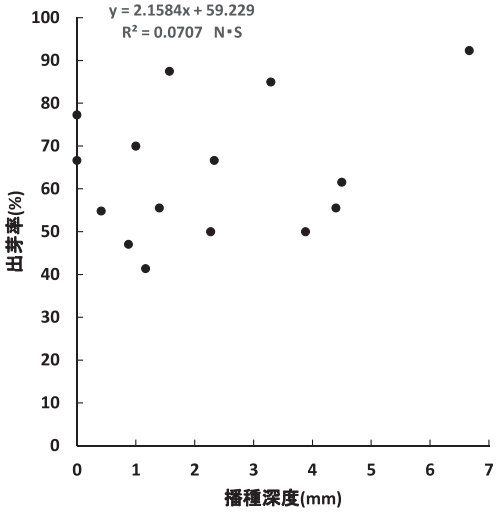


図 6　播種深度が出芽率に与える影響

（2）催芽籾の分布特性

播種機に付属した拡散板による横方向での籾の分布は、中央から左右に±3cm の範囲に 11.5～35.7%が分布し、平均分布率 16.4%で拡散板が高くなるに従い減少した。中央から左右に±6～9cm の位置には散布した籾の 42.2～62.4%が分布し、平均分布率が 51.1%であった。中央から左右に±12～15cm 離れた位置では散布した籾の 12.9～45.4%が分布し、平均分布率 32.5%で拡散板が高くなるに従い増加した。縦方向では散布した籾が拡散板先端位置を中心に 3～-6cm の範囲に 10.6～69.7%が分布し、平均分布率 36.0%で拡散板が高くなるに従い減少した。拡散板先端位置から縦方向に 6～9cm の範囲では散布した籾の 30.1～61.9%が分布し、平均分布率が 49.9%であった。同様に 12～18cm の範囲では散布した籾の 0.2～40.7%が分布し、平均分布率 14.0%で拡散板が高くなるに従い増加した（図 7、図 8、図 9）。

市販拡散板での催芽籾の分布は横方向で拡散板中央部の分布率が低く、±6～9cm の範囲に多く分布し、拡散板の高さが高くなるほど側方の遠い位置での分布率が高まった。市販拡散板は中央部に突起があるため、落下した催芽籾が突起部に接触して拡散板の側方に集中することが中央部の分布を少なくした要因である。実験機の拡散板は 40cm 間隔で配置されているため、拡散板中心から左右 20cm の範囲に均等に播種する必要がある。そのため、均等に散播するにはほ場表面から拡散板を 20～25cm の高さになるように配置し、かつ±6～9cm 範囲の分布率を低下させ、中央部と±12～15cm の範囲に分布する割合が

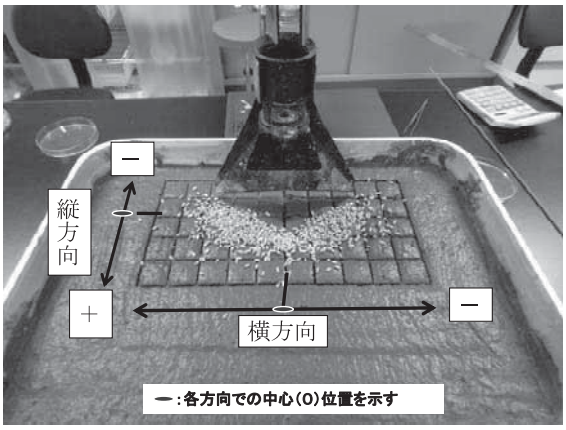


図 7　市販拡散板を用いた催芽籾の分布

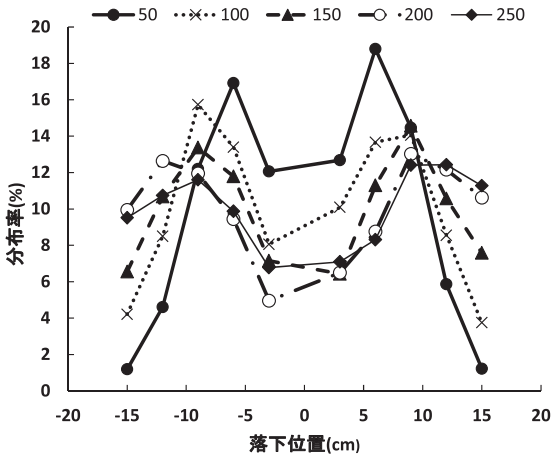


図 8　市販拡散板での催芽籾の分布率（横方向）

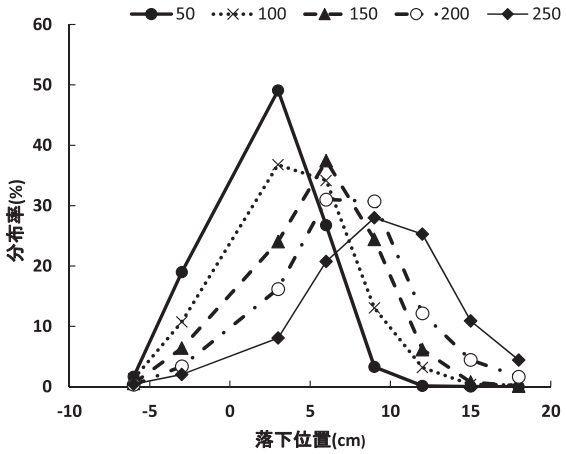


図 9　市販拡散板での催芽籾の分布率（縦方向）

増加するように拡散板を改良する必要がある。また、縦方向では拡散板高さが高くなるにつれて分布域が広がった。ただし、拡散板高さ 20～25cm では、それ以外に設定した高さよりも最大分布率を示した位置を中心に均等に分布する傾向にあった。

4. 摘要

1)ほ場での代かき同時散播試験では作業速度が 0.40m/s、作業能率が 1.2h/10a、播種量 9.1g/m^2 であった。
2)出芽率は代かき深度を浅くした場合のハロー中央部で他区よりも 13.0～26.3 ポイント増加した。
3)発芽した籾の播種深度は平均 2.25mm であり、発芽率との間に相関を示さなかった。
4)市販拡散板での催芽種子の横方向の分布率は中央部が平均 16.4%、中央から±6～9cm 離れた位置が平均 51.1%であった。
5)縦方向の分布率は拡散板先端がほ場面から高くなるほど 9～12cm での分布率が高まり、それを中心に均等に分布する傾向にあった。

参考文献

1)農林水産省：最新の直播の状況（25 年産），http://www.maff.go.jp/j/seisan/ryutu/zikamaki/z_genzyo/pdf/zikamaki_zyoukyou_25.pdf. Accessed Sep. 22, 2015.
2) 東北農政局：東北地方における水稲作関係資料（平成 27 年 6 月版），http://www.maff.go.jp/tohoku/seisan/suitou/pdf/rice_meguji_h2706.pdf. Accessed Sep. 22, 2015.
3)やまがたアグリネット：水稲直播栽培の実施状況，http://agrin.jp/hp/kome/library/25pdf/08.pdf . Accessed Sep. 22, 2015.
4)澤村篤,中山正義,川崎健,秋田重誠,笹倉修司：乗用散粒機による水稲代かき湛水散播栽培,農作業研究,27(3),234-241, 1992.
5) 西村洋,林和信,後藤隆志,堀尾光広,市川友彦,浅野士郎,上田吉弘,福間英明,中尾敏夫:高精度水稲湛水条播機の開発(第 3 報),農機誌,63(6),122-130,2001.
6) 塚本隆行,吉永悟志,古畑昌巳,LOAN Nguyen Thi Thanh,帖佐直：湛水直播水田におけるエアーアシスト条播機の播種深増大技術の開発,農作業研究, 49(2), 49-55, 2014.
7) 冨樫辰志,下坪訓次,吉永悟志:水稲代かき同時打込み点播機の開発と播種深度特性,農作業研究, 36(4),179-186, 2001.
8) 片平光彦,久米川孝治,若松一幸,三浦恒子,松橋秀男,金田吉弘,鎌田易尾,児玉徹：株形成に対応した水稲乾田直播用点播機の開発,農機誌,64(5),134-141,2002.
9)古畑昌巳,帖佐直,松村修,湯川智行:鉄資材のコーティングが湛水直播水稲の出芽・苗立ちに及ぼす影響,日作紀,78(2),170-179,2009.
10)大谷隆二,関矢博幸,冠秀昭,中山壮一,齋藤秀文:大区画圃場におけるプラウ耕乾田直播を核とした 2 年 3 作水田輪作体系,農機誌,75(4),220-224,2013.
11)農林水産省：農林水産基盤の整備状況について，http://www.maff.go.jp/j/council/seisaku/nousin/bukai/h25_4/pdf/siryou5.pdf. Accessed Sep. 22, 2015.

田畑輪換における水稲無代かき湛水直播栽培の効果

進藤勇人[1)]・片平光彦[2)]・齋藤雅憲[1)]・中川進平[1)]・松波寿典[3)]・佐々木景司[1)]・佐藤雄幸[4)]

Effect of Non-puddling Direct Seeding Cultivation of Rice on Paddy-upland Rotation

Hayato SHINDO・Mitsuhiko KATAHIRA・Masanori SAITO・Shinpei NAKAGAWA・Toshinori MATSUNAMI・Keiji SASAKI・Yuko SATO

［キーワード］無代かき、田畑輪換、水稲直播、復元田、倒伏、土壌砕土性

1. 緒言

水稲直播栽培は、生産者の経営規模拡大に伴い省力技術としての期待が大きい。秋田県の直播面積は 1,095ha で、取り組み経営体数が 468 となっている（平成 26 年、県水田総合利用課調べ）。近年は水田に対する補助政策変更の影響もあり、県内の直播面積はやや減少傾向であるが、1 経営体あたりの取り組み面積は増加傾向である。

規模拡大を進める生産者は、米の生産調整に対応した水田転換大豆作や野菜作等も増加しているため、水田の田畑輪換利用が拡大している。田畑輪換時の復元田では一般的に連作水田に比べて水稲の生育が旺盛になり倒伏しやすいため、倒伏回避の観点から無窒素肥料で栽培されることも多い。直播水稲は移植水稲に比べて倒伏しやすいため、直播栽培を復元田に導入しにくいことも直播面積が増加しない一因となっている。八郎潟干拓地の移植栽培では、復田初年目に代かきをした場合、無窒素で栽培されるが、無代かき移植では育苗箱全量施肥で慣行施肥量の半量施肥で代かきの無窒素栽培と同等の収量が得られることが明らかにされている。これは代かきをしないことで作土の土壌窒素発現量が減少するためと考えられている[1)]。

一方粘質のグライ土水田の転換利用では、転換時のほ場の排水確保と砕土性の向上が重要であり、明きょや心土破砕耕が基本技術となっている。しかし、基本的な排水対策のみでは不十分な場合も多く、水稲作で代かきをしない不耕起栽培を行うことでグライ層が低下して、土壌が酸化的になること[2)]、無代かき栽培を行うことで同じ土壌含水比でも砕土性が高まること[3)]が報告されている。排水不良田の田畑輪換利用では水稲作から排水性を悪化させない農法の導入が有効であり、代かきをしない栽培法の導入の効果は大きい。

代かきをしない直播栽培では乾田直播が一般的であるが、秋田県では直播面積の 5%以下に留まっており、酸素供給剤（商品名：カルパー粉粒剤 16）を粉衣し土中播種する湛水（潤土）直播が主流である。乾田直播が普及していない原因は、根雪期間が長く播種前の春作業に問題があること、出芽・苗立ちが不安定であることが原因である。そこで、筆者らはかん水前に砕土・整地し、かん水して土壌を軟らかくした後、市販の湛水直播機で播種する無代かき湛水直播栽培技術を確立した。代かきは行わないが苗立ち安定化のために酸素供給剤を粉衣し、播種後落水管理をすることで代かきをする通常の湛水直播と同等以上の苗立ち、収量、玄米品質を得られることを明らかにしている[4)]。

本報は、田畑輪換で代かきをしない無代かき湛水直播栽培を行い、復元田での水稲の倒伏軽減、跡地土壌の砕土性や土壌の変化を調査し、その効果を検討したので報告する。

2. 試験方法

（1）試験年次・試験場所・ほ場条件

試験は 2008～2010 年の 3 カ年、秋田県秋田市の秋田県農業試験場内水田ほ場で行った。ほ場区画は長辺 200m、短辺 50m の 1ha で、土壌は細粒質強グライ土である。供試ほ場は前年に大豆（品種：リュウホウ）を作付けしたほ場の復田初年目である。2008 年と 2010 年は同一ほ場である。土壌砕土性の調査は、同一ほ場または隣接ほ場の水稲作付け後もしくは翌年の水稲作付け前に、同一条件で 8～10cm（平均 8.8cm）の耕深でロータリ耕うんした後に行った。

1)秋田県農業試験場　秋田県秋田市雄和相川字源八沢 34-1
2)現　山形大学農学部　山形県鶴岡市若葉町 1-23
3)現　農業・食品産業技術総合研究機構　東北農業研究センター　岩手県盛岡市下厨川赤平 4
4)現　秋田県農林水産部農林政策課　秋田県秋田市山王 4-1-1

表１　試験ほ場の来歴、播種前の作業の概要および水稲の生育ステージ

年次	区名	前々作	前作	作業日					生育ステージ		
				均平作業		砕土・整地					
				プラウ	レベラ	縦軸ハロー	砕土率(%)	代かきハロー	幼穂形成期	出穂期	成熟期
2008	無代かき	乾直	大豆	4月7日	4月15日	5月4日	89	−	7月22日	8月11日	9月29日
	代かき					−	−	5月8日	7月22日	8月11日	9月29日
2009	無代かき	乾直	大豆	1月6日	4月1日	5月6日	91	−	7月20日	8月10日	9月30日
	代かき					−	−	5月8日	7月19日	8月10日	9月30日
2010	無代かき	無代かき湛直	大豆	3月30日	4月9日	5月3日	86	−	7月21日	8月7日	9月16日
	代かき					−	−	5月8日	7月20日	8月7日	9月17日

（２）試験区の構成

復田初年目の同一ほ場内に無代かき区および代かき区の２区を設けた。ほ場と作業の来歴の詳細を表１に示した。3 カ年とも水稲作付け前にレーザ均平を行った。作業はレーザプラウ（12inch、8 連、Su 社 LCPQY128H 型）で耕起し、直装式レーザレベラ（作業幅 5m、Su 社 LL5000 型）で高低差±2.5cm を目標に行った。プラウの耕深は 2008、2009、2010 年でそれぞれ、11、12、14.5cm である。レーザ均平作業後、無代かき区は縦軸駆動ハロー（Su 社 VHB3000 型、スパイラルローラ未装着）で砕土整地した。代かき区は同一ほ場の一部を代かきハロー（M 社 HWS-4100BR 型）で代かきを行った。代かき後のほ場は全体を湛水管理し、落水後に播種した。無代かき区と代かき区の試験面積はそれぞれ 82a、18a である。両試験区は窒素肥料を施用せず、追肥も行わなかった。

（３）耕種概要

播種は無代かき区、代かき区ともに 6 条多目的湛水直播機（K 社、 NSU67-DS6NKF 型、条間 30cm）を用いて湛水（潤土）土中条播方式で行った。播種日は 2008、2009、2010 年でそれぞれ、5 月 13 日、5 月 10 日、5 月 14 日である。水稲品種は「あきたこまち」を用い、浸種、催芽後、酸素供給剤（商品名：カルパー粉粒剤 16）を乾籾比等倍でコーティングして、供試した。播種量（乾籾換算）は 2008、2009、2010 年でそれぞれ、3.5、3.1、4.3 g/㎡であった。播種後は出芽 10%まで落水管理し、その後再湛水した。水稲の生育ステージは、幼穂形成期が 7 月 19〜22 日、出穂期が 8 月 7〜11 日、成熟期が 9 月 16〜30 日で、処理間の差は 1 日以内であった（表１）。

（４）調査項目

1）水稲の苗立ち率、生育、収量：6 月上旬に 1m（50cm×2 条）の苗立ち本数、草丈、葉数、白化茎長（播種深度）を 24 カ所調査し、面積あたり播種量と 1 粒あたり種子重量から苗立ち率を算出した。その平均値に近い苗立ち調査区のうち 6 区を以降の生育調査区として、草丈、茎数（穂数）、葉緑素計値（K 社葉色素計 SPAD502 型）を生育ステージごとに調査した。また、成熟期に生育調査の平均穂数と同数の稲体を採取し、着粒籾数、登熟歩合を測定した。また、生育調査区の近傍から 1.2m（4 条）×3m 刈り取りを行い、1.9mm 篩で調製し、玄米水分を 15%に換算して収量を算出した。さらに、得られた玄米を用いて千粒重を測定した。また、穀粒判別器（Sa 社 RGQI10A 型）で整粒数を測定し、整粒率を算出した。

2）水稲時期別窒素吸収量：各区から水稲の幼穂形成期（以降、幼形期とする）、穂揃い期、成熟期に中庸な生育の 1 条から地上部 50cm 分を 4 箇所で採取し、通風乾燥（80℃、48 時間）後に乾物重を測定した。その後、0.5mm メッシュ以下に粉砕して一定量を硫酸分解したのち、窒素リン自動分析装置（ブランルーベ社 TRAACS2000 型）で、窒素含有率を測定した。窒素吸収量は乾物重に窒素含有率を乗じて求めた。調査は 2008、2009 年のみ行った。

3）土壌砕土率：耕うん後の土層全体から採取した土壌を篩目 20mm の篩を用いて調製し、土塊の最長径 20mm 未満の土壌の重量比率を算出して、土壌砕土率とした。あわせて、土壌含水比を乾熱法（105℃、24 時間）で測定した。

4）土壌断面調査：水稲を作付けした翌年 4 月に土壌断面調査を行った。調査は、2010 年 4 月 20 日（2009 年水稲作付け翌年）、2011 年 4 月 18 日（2010 年水稲作付け翌年）に実施し、土壌層位別に酸化・還元状態の指標である土色、ジピリジル反応、斑紋・結核を調査した。

3. 結果および考察

（１）水稲の苗立ちと苗立ち期の生育

無代かき区の砕土・整地後の砕土率は、86〜91%と高かった（表 1）。観察では均平作業時にも砕土されるため、その後の縦軸駆動ハローによりでさらに砕土率が高まったと考えられた。なお、播種作業は市販の湛水直播機で行ったが、代かき区と同程度の作業時間で播種可能であった（データ省略）。無代かき区の苗立ち本数は 3 年間の平均値で 85.2（81.7〜90.7）本/㎡で、目標である 80〜95 本/㎡（秋

表２　復元田における無代かき直播が苗立ちに及ぼす影響

年次	試験区	苗立ち数 本/㎡	苗立ち率 %	草丈 cm	葉数 葉	白化茎長 mm
2008	無代かき	90.7	72.8	16.8	3.3	3.5
	代かき	78.1	62.7	18.2	3.0	7.4
2009	無代かき	83.2	75.7	16.4	3.5	3.6
	代かき	93.3	84.9	15.7	3.6	5.1
2010	無代かき	81.7	51.1	19.3	4.2	4.5
	代かき	93.9	58.7	20.1	4.5	4.9
平均	無代かき	$85.2^{n.s.}$	66.5	$17.5^{n.s.}$	$3.7^{n.s.}$	$3.9^{n.s.}$
	代かき	88.4	68.8	18.0	3.7	5.8

注1）調査日は2008年6月12日、2009年6月8日、2010年6月14日である。
注2）n.s.は分散分析で有意差（5%水準）がないことを示す。

田県稲作指導指針）が確保され、代かき区と同等であった（表２）。また、苗立ち率は３年間平均で 66.5%と代かき区の 68.8%と同等であり、代かき区との比較では年次により傾向が異なった。代かきをしないことによる苗立ち率への影響は小さいと考えられた（表２）

６月上旬における無代かき区の草丈、葉数はそれぞれ、3 年間の平均値で 17.5cm、3.7 葉と代かき区と同等であり、苗立ちの遅れはなかった。一方、無代かき区の白化茎長（播種深度）は３年間の平均値で 3.9mm であり、代かき区に比べ、やや短い傾向であった（表２）。無代かき栽培は土壌表面が硬いため、播種深度がやや浅くなるものと推察された。この傾向は連作田の場合と同様の傾向であった[4)]。

（２）幼形期における水稲生育と生育時期別窒素吸収量

幼形期における無代かき区の草丈および茎数は３年間の平均値でそれぞれ 64cm、572 本/㎡であり、いずれの年次においても代かき区と比べ、草丈が短く、茎数が少ない傾向であった。また、窒素吸収量は 2008、2009 年でそれぞれ、4.4、5.5gN/㎡で同様に代かき区より少なかった。3 年間の平均値の葉緑素計値は同等で、年次間で一定の傾向が認められなかった（表３）。一般的に復元田では水稲の生育が旺盛になり、それによる生育過剰が問題になる。得られた結果から、無代かき区の生育は代かき区に比べ抑制されていることから、代かきをしないことで復元田における栄養生長期の生育を抑えられることが明らかとなった。筆者らは無代かきを想定した未撹乱湿潤土（作土）を用いた湛水培養（30℃、4 週間）で、撹乱土壌を用いた場合よりも土壌窒素発現量が減少することを報告[1)]している。本試験で得られた結果は、中干しまでの湛水期間の土壌窒素発現量が減少したことを反映している。

一方、成熟期における無代かき区の窒素吸収量は 2008、2009 年でそれぞれ、12.2、13.2gN/㎡で代かき区とほぼ同等であった。生育時期別窒素吸収割合をみると、無代かき区は代かき区と比べ、2 カ年とも播種から幼形期までで少なく、穂揃期から成熟期で多かった（図１）。無代かき区は、幼形期までの窒素吸収量が少なくなるが、それ以降の窒素吸収量が多い「秋まさり」的生育パターンを示し、成熟期では代かき区と同等の窒素吸収量が得られた。

表３　復元田における無代かき直播が幼穂形成期の水稲生育に及ぼす影響

年次	試験区	草丈 cm	茎数 本/㎡	葉緑素計値 SPAD502	窒素吸収量 gN/㎡
2008	無代かき	63	512	40.9	4.4
	代かき	67	583	42.5	6.3
2009	無代かき	63	711	42.1	5.5
	代かき	68	743	43.0	6.4
2010	無代かき	65	493	38.2	―
	代かき	68	506	36.6	―
平均	無代かき	64*	572n.s.	40.4n.s.	5.0
	代かき	68	611	40.7	6.4

注1）2010年の窒素吸収量は調査していない。
注2）＊は分散分析で5%水準で有意差があることを示し、n.s.は有意差がないことを示す。

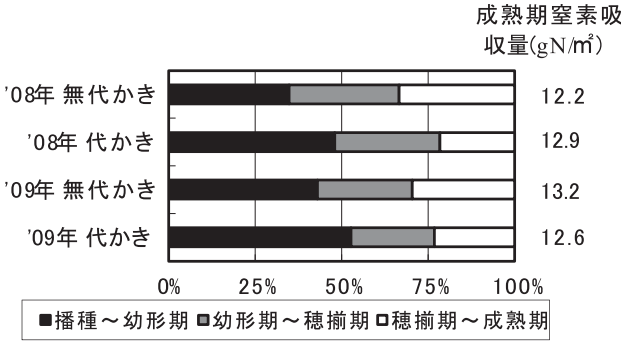


図１　復元田における無代かき直播が生育時期別地上部窒素吸収割合に及ぼす影響

（３）無代かき直播が倒伏、玄米収量・品質に及ぼす影響

無代かき区の稈長および倒伏程度は３年間の平均値でそれぞれ、80cm と 1.2 であり、代かき区に比べて稈長が 3cm 短く、倒伏程度が 0.9 小さかった。玄米収量は３年間の平均で 52.4kg/a と代かき区より 2kg/a 少ないが、外観品質および整粒率はそれぞれ、3.1 と 78.4%で、代かき区よりも同等以上であった。これはいずれの年次でも同様の傾向であった（表４）。無代かき区は稈長が短いことで倒伏程度が小さくなり、それにより玄米の外観品質と整粒率の低下を抑制できた。また、無代かき区の収量構成要素は代かき区と比べて穂数、籾数がやや少ない傾向であるが、登熟歩合がやや高くなり、千粒重が大きかった（表４）。これは幼形期までの生育量が少なく、穂揃期から成熟期までの窒素吸収割合が高い生育の特徴を反映したもののといえ

表４　復元田における無代かき直播が倒伏、玄米収量・品質、収量構成要素に及ぼす影響

年次	区名	稈長 cm	sd	倒伏程度 0-4	精玄米重 kg/a	sd	穂数 本/㎡	一穂粒数 粒/穂	籾数 千粒/㎡	登熟歩合 %	千粒重 g	外観品質 1-9	整粒率 粒数%	sd
2008	無代かき	77	2.1	0.3	52.3	6.5	390	61	23.9	91.1	23.7	3.0	87.1	1.8
	代かき	82	3.3	0.8	55.2	6.7	428	65	27.7	89.7	23.4	3.0	86.4	1.9
2009	無代かき	81	3.4	2.6	52.3	7.9	475	57	27.3	93.8	22.9	2.4	81.8	6.7
	代かき	88	3.2	3.7	54.5	4.8	481	59	28.2	92.7	22.5	3.8	78.2	6.6
2010	無代かき	82	3.2	0.6	52.5	2.7	397	63	24.9	88.6	23.6	4.0	66.4	6.7
	代かき	85	4.2	1.7	53.5	5.1	438	56	24.7	86.8	23.3	4.4	63.4	6.6
平均	無代かき	80*	2.7	1.2*	52.4n.s.	0.1	421n.s.	60n.s.	25.3n.s.	91.2*	23.4**	3.1n.s.	78.4n.s.	10.8
	代かき	85	3.2	2.1	54.4	0.9	449	60	26.9	89.7	23.1	3.7	76.0	11.6

注1）玄米品質は、東北農政局秋田農政事務所調べ。
注2）＊および＊＊はそれぞれ、分散分析で5%、1%水準で有意差があることを示し、n.s.は有意差がないことを示す。

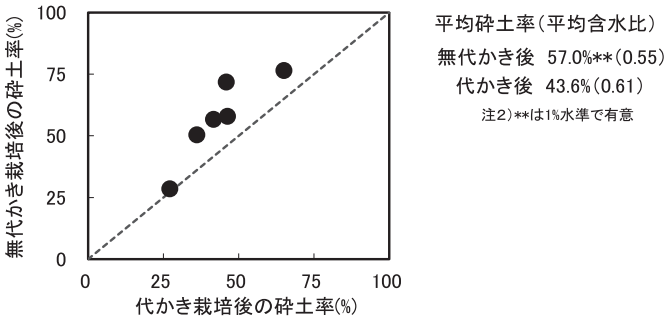


図２　無代かき、代かき跡地土壌における砕土率の関係（2008、2009）

注1）同一ほ場または隣接ほ場の水稲作付け後もしくは翌年作付け時に、同一作業機により同じ日に耕うんした無代かき後、代かき後ほ場を対とした。

表５　田畑輪換における無代かき直播が土壌へ及ぼす影響

層位	2011年4月18日調査（2010年水稲作付け翌年）							2010年4月20日調査（2009年水稲作付け翌年）						
	深さ	無代かき跡			代かき跡			深さ	無代かき跡			代かき跡		
		土色	ジピリジル反応	斑紋・結核	土色	ジピリジル反応	斑紋・結核		土色	ジピリジル反応	斑紋・結核	土色	ジピリジル反応	斑紋・結核
	cm層界下端		−〜+++			−〜+++		cm層界下端		−〜+++			−〜+++	
1	11	2.5Y3/2	−	糸根含む、膜含む	5Y3/2	+	糸根あり、膜含む	10	2.5Y3/2	−	なし	2.5Y3/2	−	糸根含む、膜あり
2	21	5Y3/1	++	糸根含む、膜含む	5Y3/2	++	糸根あり	19	2.5Y3/2	−	糸根含む、膜含む	2.5Y3/2	−	糸根含む、膜あり
3	41	7.5Y2/1	+++	膜あり	7.5Y3/1	+++	膜あり	37	2.5Y3/1	−	糸根あり、膜含む	2.5Y3/1	−	糸根含む、膜あり
4	56+	7.5Y3/1	+++	なし	7.5Y3/1	+++	なし	47+	5Y4/1	+++	なし	5Y3/1	+++	なし

る。これらのことから復元田では無代かき湛水直播を導入することで、倒伏による玄米品質の低下を抑制できることが明らかになった。

（４）無代かき直播跡地土壌の砕土性と土壌断面

水稲作付け後にロータリで耕うんした際の平均砕土率は無代かき区と代かき区でそれぞれ57.0%、43.6%で無代かき区が有意（1%水準）に高かった（図２）。

2011年４月の断面調査では代かき跡の１層（作土）の土色が 5Y3/2 でジピリジル反応が(+)であった。一方、無代かき跡では土色が2.5Y3/2とやや酸化的土色で、ジピリジル反応が(-)であることから、代かき跡に比べて作土が酸化的であると判断された。2010年４月の調査では、土色とジピリジル反応は同じであった。しかし土壌が一度還元的になり、その後酸化的になった際にみられる糸根状や膜状の斑紋・結核は無代かき跡で認められなかった。無代かき栽培は湛水期間の作土が酸化的に推移したものと考えられた。また、両年（ほ場）とも下層では各項目に変化みられなかった。大谷らはロータリによる砕土性を無代かき栽培を４年間継続した水田と代かきを継続した水田を比較した結果、無代かきほ場は同じ含水比でも砕土率が高くなること、融雪後の土壌水分が低く推移することを報告[3]している。太田らは重粘土水田の田畑輪換時に無代かき移植を導入することで、転換畑のときに獲得した土壌の畑地化形質を維持できることを報告[5]している。本報告で得られた結果はこれらの報告と一致していた。以上から無代かき湛水直播を田畑輪換に導入することは、転換時に重要な土壌の砕土性や排水性を確保しやすくなることが明らかになった。

4. 摘要

本報では、田畑輪換で代かきをしない無代かき湛水直播栽培を行い、復元田での水稲の倒伏軽減、跡地土壌の砕土性や土壌の変化を調査し、その効果を代かき栽培と比較・検討した。その結果、復元田における無代かき湛水直播は苗立ち率の低下が認められず、幼形期までの生育量を抑制した。また、無代かき湛水直播は稈長が短くなり、倒伏が軽減されて登熟が良好になり、玄米の外観品質が向上した。さらに跡地土壌は砕土性が向上し、作土が酸化的であることを明らかにした。

以上から、無代かき湛水直播は特に粘質で排水不良の水田における田畑輪換に導入することで、技術的問題点の解決に寄与できる。

謝辞　本研究の一部は、農水省委託プロジェクト研究「水田の潜在能力発揮等による農地周年有効活用技術の開発」で実施した結果である。関係各位に感謝申し上げます。

参考文献

1) 進藤勇人・村上章・原田久富美・太田健・小林ひとみ：復田時の水稲不耕起・無代かき移植栽培における育苗箱全量施肥、東北農業研究、57、25-26、2005
2) 金田吉弘：八郎潟干拓地低湿重粘土における田畑輪換効果の解明と水稲安定多収技術に関する研究、秋田農試研報、33、1-45、1993
3) 大谷隆二・西崎邦夫・柴田洋一：無代かき水稲直播栽培に関する研究（第１報）－土壌物理性と易耕性－、農機誌、58(1)、73-80、1996
4) 進藤勇人・片平光彦・齋藤雅憲・佐々木景司・佐藤雄幸：湛水直播機を用いた水稲無代かき湛水直播栽培、農作業学会、46(別1)、15-16、2011
5) 太田健・舛谷雅弘・村上章・藤井芳一・小林ひとみ：不耕起および無代かき移植水稲栽培による畑地化の維持効果、土肥誌、72(6)、797-802、2001

リモートセンシングを利用したイネいもち病の発生予察

―ハイパースペクトル画像解析による葉いもち感染の推定―

木村　杏*・鈴木由美子*・田中勝千*・森山茂治**・皆川秀夫*

Forecast of Rice Blast Disease by Remote Sensing

―Estimation of leaf blast severity with a hyperspectral imaging―

Anzu KIMURA*, Yumiko SUZUKI*, Katsuyuki TANAKA*, Shigeharu MORIYAMA**, Hideo MINAGAWA*

Abstract

The objective of this research is to select the most sensitive wavelengths for the discrimination of the spectral variations of paddy rice under different leaf blast infection at outdoor pot cultivation. A significant difference of grass length, dry matter amount and number of tillers was not recognized between the damage of leaf blast infection. On the other hand, a significant difference of SPAD values was recognized from 130 days after seeding ($P < 0.05$). Although spectra of three conditions were no significant difference before and after the blast infection, little difference was observed in the near infrared region after infection. As a result of the evaluation of based on variation analysis in the spectrum with the blast infection, difference of variation was recognized at 650-700 nm. The change of physiological characteristics of the paddy rice would cause by occurrence of blast because this region is the absorption band of chlorophyll. Consequently, it was considered that sensitive wavelength for the discrimination between the damage of leaf blast infection was the region of 650-700 nm.

[Keywords] rice blast fungus, remote sensing, pot cultivation, spectral analysis.

1. 研究背景

稲作栽培における病害の種類は数多くあるが，その中でも主要な病気にイネいもち病（*Pyricularia oryzae*，以下，いもち病）がある。いもち病はイネの三大病害の一つであり，イネの根以外の部分を侵すため，部位によって葉いもち，節いもち，穂いもちなど分けられる。いもち病菌は糸状菌（かび）の一種であり，籾殻や稲ワラに付着して胞子の状態で越冬する。越冬後は，胞子から菌糸が伸び，再び形成された胞子が空気中に飛散し，浮遊することによりいもち病が発生する（図 1）。葉いもちについては，いもち病菌の胞子が葉に付着して進入菌糸が発生し，イネ体内に侵入するまでに葉面濡れ時間が 15～25℃の気温下で 10 時間以上必要であることが確認されてきた（吉野 1973，山口 1984）。青森県では 6 月から 7 月にかけて梅雨やオホーツク海気団より吹きつける冷湿な偏東風（ヤマセ）による影響でイネの葉面に長時間水分がついている状態となる。ヤマセが持続的に吹き付けることにより病気感染の好適条件となるため，カビの一種であるいもち病斑が発生しやすい。1995 年の青森県におけるいもち病の発生は，近年にない多発生となり，発生面積は葉いもちが 28,183 ha，穂いもちが 36,831 ha であり，作付面積に対する発生面積率はそれぞれ 38.6 %，50.4 %であった。これは記録が残されている 1953 年以降で最多となった（太田ら 1996）。

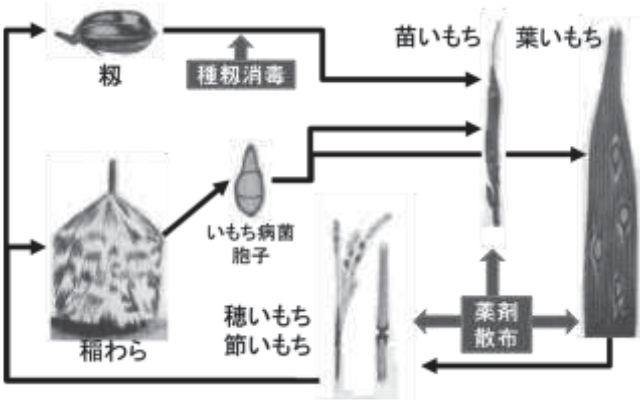


図 1　いもち病伝染経路（深谷および向井引用，一部改編）

いもち病を抑制するためには，葉いもち病の早期発見・検出および防除管理が重要となる。現行の栽培体系においては，消費者の良食味志向により「コシヒカリ」や「ひとめぼれ」等のいもち病に対する抵抗性の弱い品種の作付面積が優先している。そのため，いもち病防除は薬剤に依存している（野口 2012）。また，いもち病抵抗性品種の育成，殺菌剤の開発などが進められてきたが，抵抗性品種の罹病化や薬剤耐性いもち病菌の出現などにより，いもち病は依然として重要な病害である（大久保ら 2015）。一方で，消費者の食の安全性への関心の高まりや環境汚染への懸念などから，これまでの薬剤に依存した防除体系を見直し，新たな手法の開発が必要となる。

いもち病の検出に関する既往の成果には，葉いもちシュミレーションモデル（BLASTL）を利用した葉いもちの適正防除についての研究（根本 1992），航空カラー写真によるいも

*北里大学獣医学部　青森県十和田市東二十三番町 35－1
**地方独立行政法人青森県産業技術センター 農林総合研究所　藤坂稲作部：青森県十和田市大字相坂字相坂 183

ち病の広域的発生程度の把握（半沢 1995），および分光放射計によって測定されたイネ群落の植生指数によるいもち発生の危険性・被害度の評価（笹原 2005，Kobayashi ら 2003，小林ら 2005）があるが，いずれも発生後の検討であり予察には至っていない。一方，アメダスの気象情報から，いもち病の好適環境を予測するシステム（BLASTAM）が利用されている（越水 1988）。このシステムでは，気象条件からイネの葉面が濡れている時間を予測し，いもち病菌に感染する気象条件かを推定する。しかし，降雨量が少ない場合にはアメダスにより降雨を捉えることができず，BLASTAM での推定基準で感染好適条件が検出されない例がある（深谷ら 1999，大久保ら 2015）。青森県ではヤマセが冷湿なうえ，霧を伴うために日照量が不足してイネの葉面が長時間濡れている場合もある。そのため，より精度の高い予察システムの検討が必要であると考えられる。そこで，本研究では航空画像や分光スペクトル情報によりいもち病を検出した例を参考に，リモートセンシングによる葉いもち病の発生予察システムを構築することを最終目的とした。本論文では，近接リモートセンシングにより，ポット栽培条件下のイネを対象に，いもち病感染の有無がスペクトル特性に与える影響について述べる。

2. 材料および方法

(1) 調査対象

供試土壌は粒径 2 mm に揃えた黒ぼく土，供試水稲はつがるロマンおよび青系 IL2 号（つがるロマンにいもち病抵抗性遺伝子を導入させた水稲）であり，両者とも地方独立行政法人青森県産業技術センター農林総合研究所（以下，農林総合研究所）より提供された。

1/5000 a ワグネルポットに土壌 1.5 kg を充填・均一に締固めた後，粉末化した肥料と土壌 1.5 kg を混合して，ポットに充填した。肥料は，窒素，リン酸，カリ（成分比 N:P:K=8:8:8）を含む混合肥料で，農林総合研究所のポット栽培試験の施肥条件を参考にポット当たり窒素 2.50 g になる様に施肥した（基肥 1.75 g，追肥 0.75 g：播種後 69 日平成 27 年 7 月 9 日）。その後，潅水して撹拌することで代掻きを再現し，土壌が落ち着いた後に各ポット 1 株（4 本）の苗を移植した（図 2）。つがるロマンを 20 ポット，青系 IL2 号を 10 ポット，合計 30 ポットを用意した。播種日は平成 27 年 5 月 1 日，移植日は 5 月 29 日（播種後 28 日），収穫日は 10 月 2 日（播種後 154 日）である。

ポットは，コンクリートの上に直接置くと，ポット内の温度が上がり過ぎるため，机上（高さ約 70 cm）に置き，温度の過上昇を防いだ。また，鳥害等を防ぐため，網室で管理した。作製したポットのうち，つがるロマン 15 ポット（以下，いもち）をいもち病感染区に設置し，残りのつがるロマン 5 ポット（以下，つがる）および青系 IL2 号 10 ポットを対照区に設置した。その後，いもち病感染区の四方をビニールカーテンで囲い，播種後 87 日（7 月 27 日）にいもち病罹病イネをいもち病感染区内に置き，いもち病菌を自然拡散させた。効率的に拡散させるため，感染好適条件（葉面を濡らす，風通しを悪くするなど）を再現した。なお，以下の結果および考察ではいもちとつがるの 2 条件についてのみ述べる。

図 2 作製ポットの例

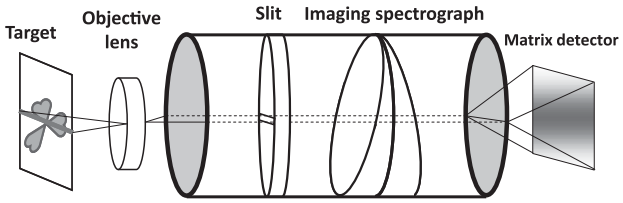


図 3 ハイパースペクトルカメラのメカニズム

(2) 生育量調査

イネの生育量は，播種後 29 日（移植日翌日）から 154 日まで週に 1 回，生育ステージ，草丈および SPAD 値を測定した。ただし，いもち病感染直後の 2 週間は，週に 2～3 回測定した。SPAD 値は，葉身の中央部の緑色部（罹病に伴う変色部は除く）を葉緑素計（SPAD-502，Konica Minolta）により測定した。加えて，分げつ期終了後に最大分げつ数を，収穫時に地上部の乾物重量を測定した。

(3) 分光反射スペクトル測定

分光反射スペクトルは，500W のハロゲン光照明下で，観測波長域 400～1000 nm，波長分解能 6 nm のハイパースペクトルカメラ（ImSPectorV10，Specium）により測定した。このカメラは，イメージング分光器と CCD により構成されており，ラインスキャナとして機能する（図 3）。そのため，三脚に固定した電動雲台の回転により，カメラの撮影光軸を移動させることで，イネの全体の画像を取得した。その後，取得画像を岡本ら（2006a および 2006b）が設計・構築したハイパースペクトル画像解析のためのソフトウェアに取り込み，任意の地点のイネの受光強度（30 画素）を抽出した。受光強度を平均値 1，最小値 0 になるよう正規化し，その平均を代表値とした。いもち病感染に伴うスペクトルの変動の程度を把握するため，分散分析を実施した。

3. 結果および考察

(1) 生育量

イネの草丈は，播種後 90 日までは生長に伴い急激に高くなった。その後，播種後 117 日で最大値（88.0～90.2 cm）に

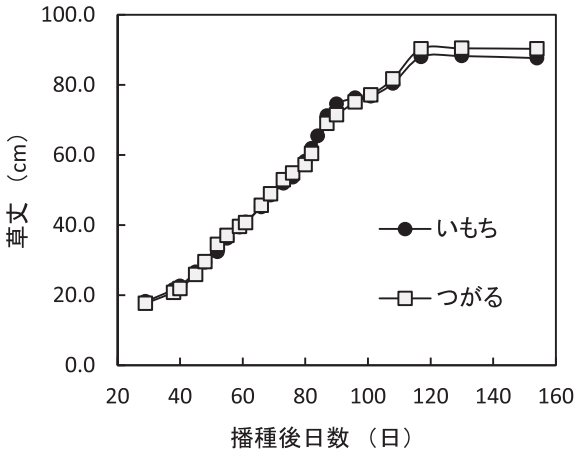


図5　播種後経過日数の草丈

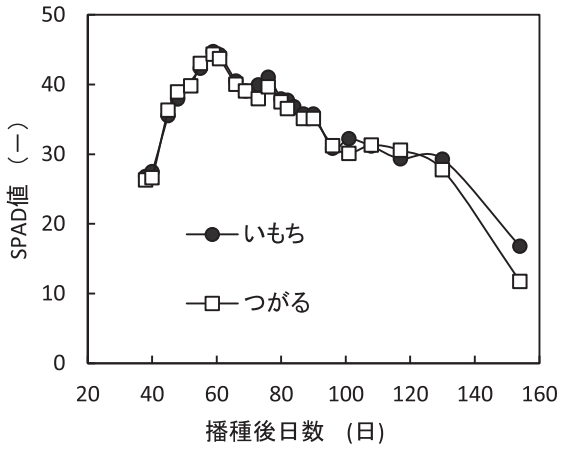


図6　播種後経過日数のSPAD値

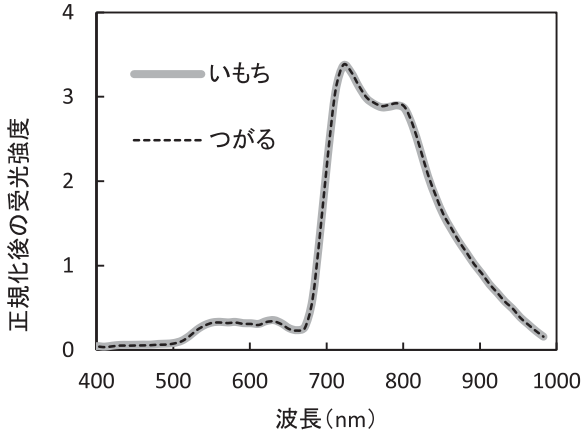


図7　いもち病発生前における受光強度
（測定日：平成27年7月17日）

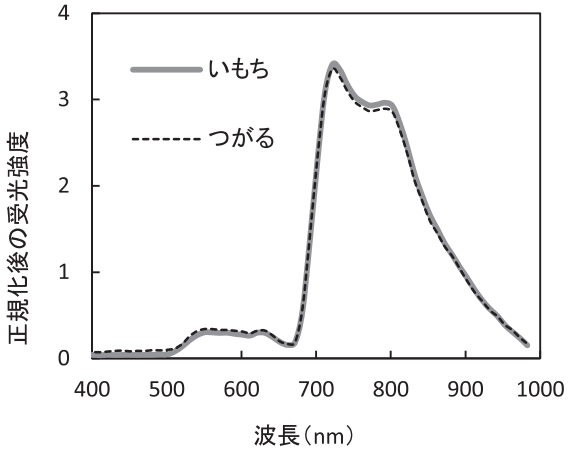


図8　いもち病発生後における受光強度
（測定日：平成27年8月5日）

到達し，120 日後にはほぼ一定となった（図 5）。一方，SPAD 値は，草丈よりも早い時期の播種後 50 日までに急激に上昇した。その後，播種後 60 日に最大値に到達し，徐々に低下した（図 6）。一般に，イネの SPAD 値は分げつ期ごろまでは生長に伴い上昇し，幼穂形成期ごろから低下するといわれており（Yang ら 2014），本研究の取得結果も同様の傾向であった。また，草丈および SPAD 値は播種後 76 日の値に上昇がみられるが，これは追肥（播種後 69 日）による影響と推察できる。草丈は設定条件間に差は無く，同等であった（$P < 0.05$）。また，最高分げつ数および収穫時の乾物重も同等であった（$P < 0.05$）。これは，葉いもち病感染が生育の盛んな分げつ期以降であったこと，すなわち，いもち病が初期生育における生育抑制の要因とならず，分げつ発生数に影響を及ぼさなかったことが要因に挙げられる。一方，播種後 130 日以降で，いもちの SAPD 値はつがるより高い値を示した（$P < 0.05$）。これはいもち病発生に伴う葉色や色素量の変化を反映していると推察した。いもち病感染の翌日（播種後 88 日）から，いもちでは病斑が目視確認された。その後，日数の経過に伴い病斑の数は増加し，登熟期には穂いもちも確認された。一方，つがるでは播種後 88 日にはほとんど病斑が確認さなかった。その後，つがるでも病斑が確認されたものの，いもちと比較して病斑の数はわずかであった。

(2)　いもち病発生前後のスペクトル特性の変化

スペクトル特性については各条件の 4 個ポットを抜粋し，検討した。スペクトルは，一般的な植物と同様の特性を示し，可視域では緑色光（550 nm）にピークがあり，近赤外域は可視域よりも高い値を示した。いもち病発生前の 7 月 17 日のスペクトルでは，条件間で受光強度に大きな差がなく，同様の傾向であった。一方，いもち病発生後の 8 月 5 日の受光強度でも大きな差は見られなかった。しかし，いもちは近赤外域700 ～800 nmの間でつがるよりも0.06 ～0.10ほど高い値を示した（図 7 および図 8）。また，測定日間の受光強度の変動を把握するために分散分析を実行したところ，両条件ともに測定日により違いが確認された（$P < 0.05$，図 9）。各波長の分散から，両条件とも 740 nm 付近が最も高い値を示した（いもち 0.014，つがる 0.012）。つがるでは 650 nm 付近および 700 nm 付近でも小さなピークが確認できたが（つがる 0.003～0.004），いもちでは確認できなかった（いもち 0.001～0.002）。スペクトルはイネの生育に伴い可視域では上昇し，近赤外域では減少する。本研究では，スペクトル取得時に 2 条件間で草丈および SPAD 値には差が見られなかったことから，生育状態は同程度と判断できる。よって，現段階では

いもち病感染・発生に伴うイネの生理的特性の変化によりスペクトルの変動の程度が異なったと推察できる。740 nm付近は，受光強度の最大値付近の波長であり，この波長はクロロフィル濃度と相関のある指数の算出に利用されている波長と隣り合っている。また，650～700 nmの間にはクロロフィルに吸収されて光化学系で励起エネルギーとして利用される領域（680 nm）が含まれている。そのため，いもち病発生に伴い光合成色素濃度などの生理的特性が変化したと考えられる。

4. 摘要

本研究では，リモートセンシングによるいもち病発生予察の基礎研究として，ポット栽培条件下のイネを用いて，いもち病発生の有無がスペクトル特性に与える影響を明らかにした。その結果，以下のことが明らかとなった。

(1) いもち病感染が分げつ期以降であったため，草丈，地上現存量および分げつ数に有意な差はなかった。しかし，SPAD値は，播種後130日以降に有意な差（$P < 0.05$）が確認された。

(2) いもちおよびつがるの分光スペクトルは，いもち病感染前後で大差がなかったが，感染後の近赤外領域にわずかに差が確認された。

(3) いもち病感染に伴うスペクトルの変動をは，特に650～700 nmの間で差が確認された。この領域はクロロフィルの吸収帯であることから，いもち病の発生によりイネの生理的特性が変化したと推察した。

謝辞

本研究を遂行するに当たり，地方独立行政法人青森産業技術センター農林総合研究所の皆様には多大なる御協力を頂きました。ここに記して感謝の意を表します。

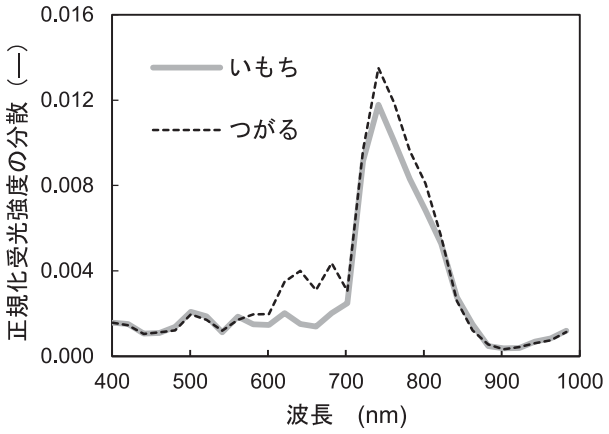


図9　感染前後のいもちとつがるのスペクトルの分散

引用文献

(1) 深谷富夫・保坂　学・庄内玲子（1999）イネいもち病の各種全般発生開始期予測方式の秋田地方における適合性．北日本病虫研報 50：21-24.

(2) 半沢伸治・根本和俊・遠藤頼嗣・荒川市郎・橋本　晃（1995）航空カラー写真によるいもち病の広域的発生程度の把握．北日本病害虫研究会報 46：12-14.

(3) Kobayashi T., Kanda E., Naito S., Nakajima T., Arakawa I., Nemoto K., Honma M., Toujyou H., Ishiguro K., Kitada K., Torigoe Y. (2003) Ratio of rice reflectance for estimating leaf blast severity with multispectral radiometer. J. Gen. Plant Pathol. 69: 17-22.

(4) 小林　隆・神田英司・笹原剛志・石川志保・畑谷みどり・石黒　潔・菅野洋光・鳥越洋一（2005）穂いもち被害度と正規化植生指数（NDVI）の関係，日本植物病理学会報 71：326-329.

(5) 越水幸男（1988）アメダス資料による葉いもち発生予察法．東北農業試験場研究報告 78：67-121.

(6) 根本文宏・橋本　晃・半沢伸治（1992）葉いもちシュミレーションモデル（BLASTL）を利用した葉いもちの適正防除について．北日本病害虫研究会報 43：27-29.

(7) 野口（辻本）雅子（2012）イネいもち病菌の準有性的組換菌の病原性と病原力に関する研究．中央農研研究報告 17：1-38.

(8) 岡本博史・酒井憲司・村田哲郎・片岡　崇・端 俊一（2006a）ハイパースペクトル画像による多目的解析に対応したオブジェクト指向ソフトウェアフレームワークの構築．農業情報研究 15：103-112.

(9) 岡本博史・酒井憲司・村田哲郎・片岡　崇・端 俊一（2006b）ハイパースペクトル画像解析フレームワークを利用したリモートセンシングソフトウェアの開発．農業情報研究 15：219-230.

(10) 大久保さゆり・菅野洋光・小林 隆（2015）高解像度気象データを用いた東北地方におけるイネ葉いもち発生予察モデル（BLASTAM）の検証．天気 62(1)：5-15.

(11) 太田恵二・藤村建彦・松田正利・木野田みはる（1996）1995年の青森県におけるいもち病の発生実態．北日本農薬研究会報告 47：3-7.

(12) 山口富夫（1984）稲いもち病・紋枯病の発生生態に関する研究．日本植物病理学会報 50：304-306.

(13) 笹原剛志・佐々木次郎（2005）分光放射計で測定されたイネ群落の植生指数による穂いもち発生の危険性評価．北日本病虫研報 56：11-15.

(14) Yang H., Li J., Yang J., Wang H., Zou J., He J (2014) Effects of nitrogen application rate and leaf age on the distribution pattern of leaf SPAD readings in the rice canopy. PLoS ONE 9(2): e88421.

(15) 吉野嶺一（1973）イネいもち病菌の侵入に関する予察的研究Ⅱ 接種温度と侵入率の経時変化．日本植物病理学会報 39：186.

ヤマノイモ調製作業の現状と改善
―回転ノズルを活用した調製機による労働負荷低減―

齋藤雅憲*・進藤勇人*・佐藤克樹**・本田邦俊***

Improvement on Preparation Working of Chinese Yams
―The Working load reduction by Preparation Machine applying Rotary type nozzle―

Masanori SAITO*・Hayato SHINDO*・Katsuki SATO**・Kunitoshi HONDA***

[Keywords] rotary type nozzle, chinese yams, preparation working, load reduction, repetitive motion

1. はじめに

秋田県のヤマノイモ（ツクネイモ（*Dioscorea polystachya Turcz.*）の地域名称）栽培は，主に県北地域（大館市）を中心に，水田転換作物として栽培が行われている。ヤマノイモは，ヤマイモの一種で，ナガイモに比べ粘りが強く，生食以外に和菓子の原料として利用されている。栽培面積は，生産者の高齢化などの影響により2010，2012，2014年でそれぞれ，36，29，24haと減少傾向にあるため，産地の維持には1戸当たりの栽培面積拡大が必要な状態である[1)]。

ヤマノイモ栽培では，定植から収穫までの機械化作業体系が確立されつつあり，定植には移植作業機[2)]，収穫にはトラクタアタッチメントの掘り取り機が用いられている。収穫後の作業体系は，掘り取り（収穫）→運搬（軽トラック）→乾燥（ビニルハウス内で乾燥）→根切り→調製（土や埃の除去）→選別・出荷（重量，形状を手選別）の順で行われる（図1）。収穫作業には掘り取り機が用いられるが，調製作業は手作業で行われ，これらを合わせた収穫調製時間は，ヤマノイモ栽培の所要労働時間の約4割を占めており[3)]，省力化が強く求められている。ヤマノイモは傷つきやすく腐敗しやすいため，調製作業では，水やブラシによる土，埃等の除去が行えず，圧縮空気が用いられる。現地での慣行調製方法は，掘り取り後乾燥のためハウス内に山積みにされた大量のイモを一方の手で把持し，もう一方の手でエアガンを持ち1個ずつ圧縮空気を用いて土や埃を除去している。慣行のエアガンによる調製作業では，圧縮空気をイモ全体に当てるため，手首を回転させたり，腕を振ったりする長時間の反復動作が必要で，労働負荷が大きく頸肩腕障害も懸念され，生産者から改善要望がある。

圧縮空気を使う作業にはネギの調製作業があり，最近では圧縮空気を広範囲に作業させる回転ノズルを用いることで，作業能率の向上と空気使用量の節減が可能となることが報告されている[5)]。また，回転ノズルはネギ調製機だけでなく，ニンニク調製機にも搭載され市販されている。

そこで，本報では調製作業の現状調査を行い，さらに調製作業の改善のため，圧縮空気を対象物広範囲で作用させる回転ノズルを作業機本体に固定し，ヤマノイモを両手で持って調製可能な作業機による労働負荷軽減を検討した。

2. 試験方法

（1）試験場所・年次

2013～2015 年に秋田県大館市のヤマノイモ生産農家において調査及び試験を行った。

（2）供試機械

供試した2種類の調製機の諸元を以下に示す。

1）農試試作機　ノズル：回転ノズル，ノズル固定位置：本体フレーム，移動方法：車輪，入切弁：機械式（フットペダル），ヒータ：無，遮蔽板：有

2）メーカ試作機　ノズル：回転ノズル，ノズル固定位置：本体フレーム，移動方法：車輪，入切弁：電磁式（近接センサ），ヒータ：有，遮蔽板：無

（3）試験区の構成

改良区：回転ノズルを本体フレームに固定した2種類のヤマノイモ調製作業機（農試試作機（図2），メーカ試作機（図3））を用いて調製作業を行った（改良作業）。

慣行区：エアガンを用いて手作業で調製作業を行った（慣行作業，図4）。

なお，エアコンプレッサーの吐出圧力は，いずれも0.4～0.6MPaである。

（4）調査項目

作業者4人（A：50代女性，B：50代男性，C：50代女性，D：50代男性）を対象に以下の項目を調査した。

1）労働負荷：長時間の反復動作（手首の回転回数（掌が表→裏，裏→表になった状態をそれぞれ，1回とカウントした），手振り時間（エアガンで圧縮空気を噴射している時間））を労働負荷とした。

*：秋田県農業試験場　秋田県秋田市雄和相川字源八沢34－1　**：（株）マツモト群馬県高崎市倉賀野町東部工業団地2454-3
***：鹿角地域振興局　鹿角市花輪字六月田1

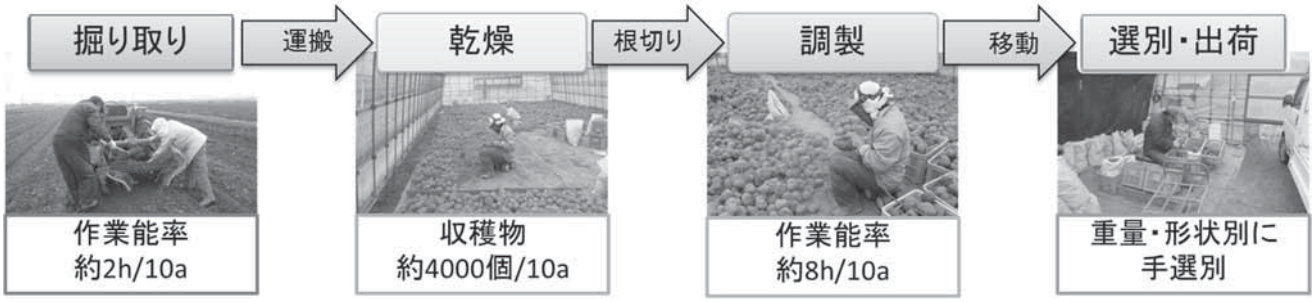


図１　ヤマノイモの収穫調製出荷作業体系

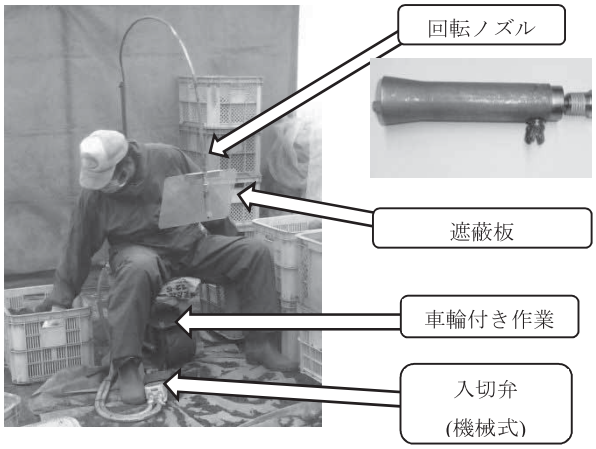


図２　改良作業の様子（農試試作機）

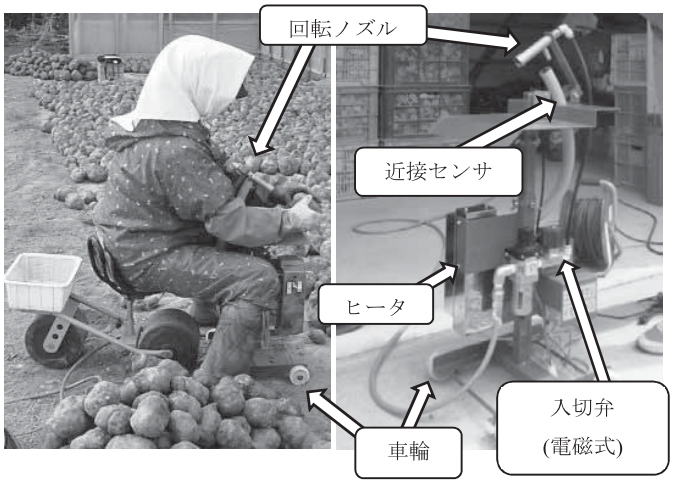


図３　改良作業の様子（メーカ試作機）

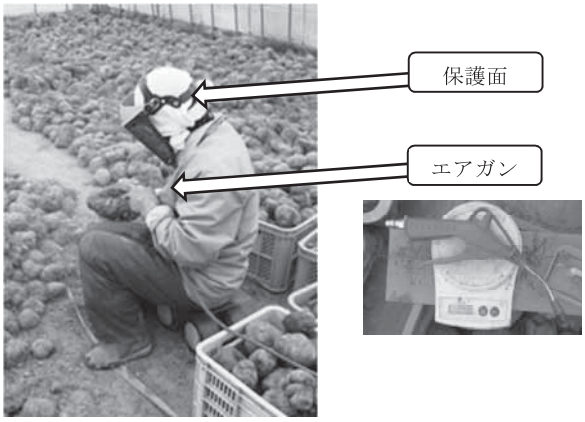


図４　慣行作業の様子（エアガン）

2）作業時間（s）：ヤマノイモ 10 個を調製する時間をストップウオッチを用いて調査した。なお，調製を行ったイモは，大きさ，形状，土の付着度合が中庸なものを選び，供試した。また，作業精度（仕上がり）は農家慣行と同等になるように調製を行った。

3）空気使用量（L）：気体流量計（アズビル（株），MCF025 型）を用いて計測し，ヤマノイモ 10 個を調製する際の空気使用量として計測した。

4）使用後の聞き取り調査：試験時に協力いただいた農家３軒（作業者 A～D を含む６名）を対象に，慣行区と改良区の疲れ，能率などを自由回答形式で聞き取り調査した。

3. 結果及び考察

（１）ヤマノイモ調製作業の現状

ヤマノイモの掘り取りには掘り取り機（BL125 型，松山）が用いられ，10a 当たりの収穫作業時間は約２時間であった。一方，4000 個（10a 相当量）の調製作業時間は，約８時間であり，掘り取り時間の約４倍の時間を要していた（図 1）。調製作業時間を短縮することで，その時間を収穫作業に費やせるため，収穫調製作業期間の短縮できる可能性があると考えられた。

慣行の調製作業は，大量のイモを一方の手で把持し，もう一方の手でエアガンを持ち１個ずつ圧縮空気を用いて土や埃が除去されていた。また，作業者はエアガンから放出される圧縮空気を広範囲に当てるため，腕を振りながら，かつイモを回すため，手首を回転させながら作業が行われていた。さらに，土の跳ね返りから顔面を保護するため，保護面を着用して作業が行われていた。

（２）ヤマノイモ調製作業機

農試試作機，メーカ試作機は，両者とも圧縮空気を広範囲に作用させる回転ノズルが本体フレームに固定され，車輪による移動が可能な構造である。圧縮空気の入切は，農試試作機，メーカ試作機でそれぞれ，フットペダル式の入切弁（機械式），近接センサと入切弁（電磁式）により，行うことが可能であった。また，メーカ試作機にはヒータが装備され，ヤマノイモの調製作業を行う低温環境下（約 10℃以下）でも回転ノズルをスムーズに動作させることが可能であった。

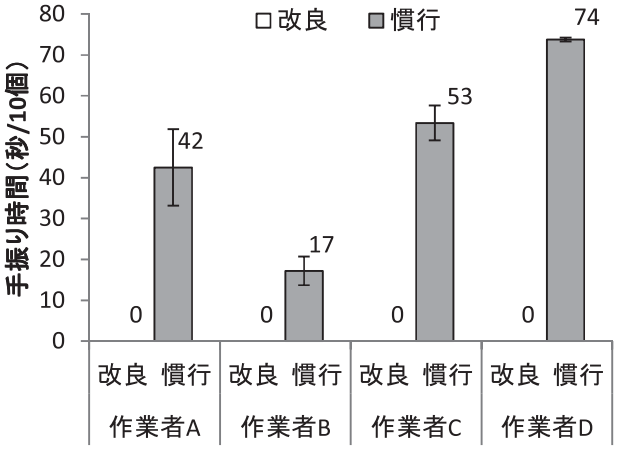


図５　改良作業の手振り時間削減効果

注１　改良作業では，固定した回転ノズルを用いるため，手振り作業はなくなる。

注２　データは調製作業（10 個）3 回の平均値。エラーバーは，標準偏差を示す（n=3）。

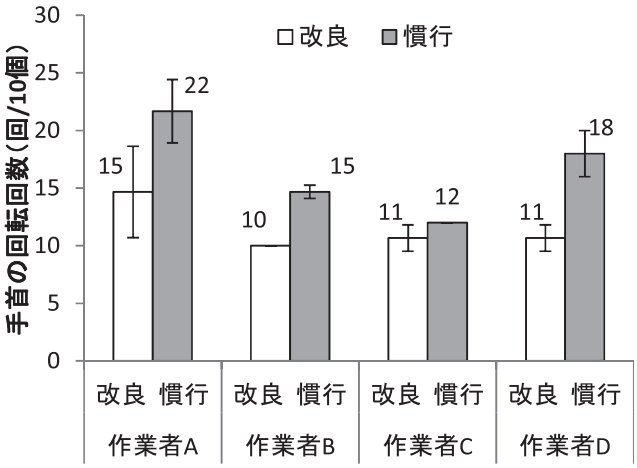


図６　改良作業の手首の回転回数削減効果

注１　掌が表→裏，裏→表になった状態をそれぞれ，1 回とカウントした。

注２　データは調製作業（10 個）3 回の平均値。エラーバーは，標準偏差を示す（n=3）。

両作業機は，慣行作業に比べエアガンを持たずにヤマノイモを両手で把持しての調製作業が可能であった。また，慣行作業では，除去した土の跳ね返りから顔面を保護するため，保護面を着用して作業するが，改良作業では，圧縮空気を跳ね返りづらい方向に噴射するため，回転ノズル手前に遮蔽板を装着するか（図 2），無くすことが可能であった（図 3）。

（3）労働負荷軽減

慣行作業区では，圧縮空気をイモ全体に噴射させるため，ヤマノイモ 10 個当たり 17～74 秒エアガンを手振りしながら調製しているが，改良区では，作業機に固定した回転ノズルでエアを広範囲に作用させるため，手振り作業を削減可能であった（図５）。また，ヤマノイモ 10 個当たりの手首の回転回数は改良区と慣行区でそれぞれ，10～15 回，12～22 回であり，改良作業区は 8～39％減少した（図６）。これは，調製機による作業では，イモを両手で把持することが可能で，手首をひねらなくても指先で作業可能であるためと考えられた。以上から，長時間の反復作業が減少し，労働負荷軽減が達成された。

（4）作業能率及び空気使用量

改良区と慣行区のヤマノイモ 10 個当たりの調製作業時間は，それぞれ，平均 70.2 秒（53.9～84.7 秒），73.9 秒（53.3～84.7 秒）であり，同等であった（表 1）。回転ノズルを用いることで，圧縮空気が広範囲に当たるため，作業時間が減少すると想定していたが得られた結果は異なっていた。これは，ヤマノイモ調製作業機に対する習熟度合が，作業者により異なっていた影響である考えられた。

また，改良区と慣行区の 10 個当たりの空気使用量は，それぞれ，平均 145.6 L（100.0～216.7 L），131.7L（65～193.3L）であり，同等であった。（表１）。ところで，回転ノズルをネギの調製作業に用いた場合，空気噴射量が節減できることが報告されている[5]が，本試験結果は異なる傾向を示した。これは，改良区で，イモの全面に圧縮空気を容易に当てられるため，慣行区に比べてより丁寧な作業が行われた可能性が有り，結果的に作業時間の差が小さかったことが大きく影響していると考えられた。

（5）使用後の聞き取り調査

慣行作業と改良作業を行った農家を対象に，それぞれの作業について自由回答で聞き取りを行った結果を表 2 に示す。疲労については，慣行作業では筋肉痛等の疲れの症状がみられたが改良作業で改善されていた。また，改良作業の作業能率については，調製機の高さ調整，作

表１　作業方法の違いによる調製作業時間と空気使用量の比較

年次	作業者	作業方法	作業時間 秒/10個	作業時間 比	空気使用量 L/10個	空気使用量 比
2014	A	改良	84.7	121	216.7	112
		慣行	70.0	(100)	193.3	(100)
	B	改良	59.7	112	120.0	88
		慣行	53.3	(100)	136.7	(100)
2013	C	改良	53.9	70	100.0	154
		慣行	77.0	(100)	65.0	(100)
	D	改良	82.7	87	－	－
		慣行	95.3	(100)	－	－
平均		改良	70.2	95	145.6	111
		慣行	73.9	(100)	131.7	(100)

注１　データは調製作業（10 個）3 回の平均値。

表 2　各作業の作業性についての聞き取り調査結果

項目	改良作業	慣行作業
手、肩、首の疲労について	・手首の痛みが無くなった。 ・作業が楽になった。	・疲れがたまる。 ・作業の翌日、筋肉痛になった。
作業能率について	・2個同時に持てるので、早くできる可能性がある。 ・作業方法によっては遅くなる可能性がある。	・作業能率が上がらなかった。
その他	・両手が使えることが良い。 ・最初、慣れずに使いづらかった。 ・遮蔽板があるとよい。 ・回転ノズルだけ販売して欲しい。 ・できれば、調製作業を全自動化したい。	・初心者でも作業しやすい。
調整機を導入する際の価格について	・約10万円なら導入を検討する。	

注１　調査日 2015 年 9 月 9 日，調査農家３軒（６名）。

業場のレイアウト等によって改善できるという感想が得られた。その他では，改良作業と慣行作業でそれぞれ，「最初，慣れずに使いづらかった」，「初心者でも作業しやすい」という意見があった（表 2）。したがって，改良作業は労働負荷を改善できるが，ある程度の習熟が必要であると考えられた。

4. 摘要

本研究では，多くの反復動作が含まれ労働負荷が大きく頸肩腕障害が懸念されるヤマノイモの調製作業の改善を目指して，圧縮空気を対象物に広範囲で作用させる回転ノズルを作業機本体に固定し，ヤマノイモの両手把持可能な調製作業機による労働負荷軽減を検討した。

その結果，改良区ではイモを両手で持って作業ができるため，手を振る動作を削減可能であった。また，改良区では回転ノズルを使用することで，自ずから広範囲に圧縮空気を当てることが可能であるため，手首の回転回数は慣行区に比べて，8～39％減少した。

また，改良区でのヤマノイモ 10 個当たりの調製作業時間と空気使用量は，平均 70.2 秒，145.6 L であり，慣行区と同等であった。

以上から，圧縮空気とエアガンで行うヤマノイモ調製作業（慣行作業）を，回転ノズルを作業機本体に固定し，両手作業可能な作業機で行う（改良作業）ことで，調製作業における長時間の反復作業を減少させ，労働負荷軽減が図られた。

回転ノズルを搭載したヤマノイモ調製機は，株式会社マツモトから 2014 年春に市販化された。今後，現地で普及が進むと考えられる。

最後に，本試験で開発した技術がヤマノイモ栽培の作付面積向上に寄与することを期待する。

謝辞

本研究は，JA あきた北 山の芋部会，株式会社マツモト，北秋田地域振興局農林部農業振興普及課の皆様から多大な協力をいただいた。ここに記して、謹んで謝意を表す。

参考文献

1) 山の芋実績検討会資料，JA あきた北 山の芋部会，2015，3.

2) 片平光彦，上田賢悦，進藤勇人，阿部浩，小林由喜也，2010. 種芋移植機を用いたツクネイモ定植作業の省力化技術（第 1 報），農業機械学会誌，72(1)，169-176.

3) 片平光彦，進藤勇人，上田賢悦，鈴木基，阿部浩，小林由喜也，2012. 種芋移植機を用いたツクネイモ定植作業の省力化技術（第 2 報），農業機械学会誌，74(3)，220-225.

4) 秋田県農林水産部，2014. 作目別技術・経営指標，196-197.

5) 藤岡修，大森定夫，紺屋朋子，本庄求，松本弘，小暮朋晃，2014. 高効率ネギ調製機の開発（第 1 報），農機学会誌，76(1)，78-85

施肥同時溝切り機を用いた
長ネギの省力栽培技術に関する研究（第３報）

－土壌の物理性が根の伸長と生育に与える影響－

大竹智美*，進藤勇人**，齋藤雅憲**，片平光彦*，夏賀元康*

Labor Saving Techniques of Welsh Onion Cultivation Using Fertilizer-Applicator Ditcher (Part 3)

—Influence of Welsh Onion Root and Plant Growth in the Different Soil Physical Properties—

Tomomi OTAKE *, Hayato SHINDO **, Masanori SAITO**,
Mitsuhiko KATAHIRA *,Motoyasu NATSUGA *

Abstract

The total Welsh onion cultivation area in Japan is 22,900ha. Welsh onion, a well-known and profitable vegetable, faces increased production cost in Japan because of high fertilizer and labor costs. Therefore, we developed a fertilizer-applicator ditcher to conduct labor-saving cultivation. This study investigated the influence of root and plant growth in the different soil physical properties and chisels in soil. The fertilizer-applicator ditcher had three chisels which open ditches on the bottom surface and which apply fertilizer. Therefore, we set two experimental blocks that combined one ditching chisel and two fertilizer chisels. The experimental block A had one fertilizer chisel only. The experimental block B had a ditching chisel and two fertilizer chisels. After opening a ditch using the fertilizer-ditcher, we measured the soil hardness at the soil surface and 10 cm under the surface using digital force gauge. We also measured the root length, root number, and young plant growth approximately 20-30 days after planting. Soil hardness at 10cm under the surface were 224.6-318.7 N/cm^2 and 36.7-45.4 N/cm^2 in the experimental block A, and 261.4 N/cm^2-297.1 N/cm^2 and 23.6-31.1 N/cm^2 in the experimental block B, respectively. Root numbers were 94.5 and 118.3 for the experimental block A, and 174.5 and 126.3 for the experimental block B, respectively. Plant heights were26.2cm and 30.0cm in the experimental block A, and 25.9cm and 32.5cm in the experimental block B, respectively. Plant weights were 3.8g and 4.8g in the experimental block A, and 5.5g and 5.8g in the experimental block B, respectively. We concluded that the roots of Welsh onion processed with any chisel in soil had much greater at 10 cm under the surface than in soil surface.

[keywords] Welsh onion, fertilizer-applicator ditcher, chisel, root, soil physical properties, soil hardness

1. 緒言

2014 年度での長ネギの作付面積は全国で 22,900ha であり，そのうち千葉が 2,360ha，埼玉が 2,430ha，茨城が 1,910ha と関東・東北地域で全体のおよそ半数を占めている。収穫量は千葉が 67,000t，埼玉が 63,300t，茨城が 48,600t であり，対前年産比 101%と生産量が安定している。また，長ネギは 2014 年の卸売価格が 325 円/kg であり，キャベツの 88 円/kg や人参の 111 円/kg と比較して収益性が高い作物である。生産地では連作畑以外でも水田転換畑への作付も行われ，前記したとおり長ネギの栽培面積や収穫量の増加に寄与している。しかし，生産現地では農業従事者の高齢化や資材費の高騰が問題になっており，生産性と品質に優れる新品種の育成，肥効調節型肥料を用いた施肥効率の改善による生産コストの低減，作期拡大，植え溝切りや定植作業など作業内容の見直しといった技術開発が不可欠な現状にある。このうち，作

*山形大学農学部，**秋田県農業試験場

期拡大については本庄がセル大苗を用いた7月どり作型が報告している[1)]。

筆者らは，2010年度から施肥同時溝切り機の開発と栽培試験を行ってきた。慣行の長ネギ栽培ではほ場全面に施肥をした後にトラクタでほ場を耕うんし，その後歩行管理機などを用いて植え溝を作成して苗を定植する。しかし，その慣行作業は作業工程が多く，植え溝の形状も不均一で，定植精度も劣っていた。施肥同時溝切り機は，土壌膨軟化を目的とした作溝チゼル1本と施肥チゼル2本，植え溝の整形板を組み込むことで作溝と同時に溝底に側条施肥を行う。施肥チゼルは内部が空洞になっており，機体中央部に位置する幅150mmの施肥チゼル固定部で施肥チゼルを中央から左右に0～50mm，深さを0～100mm程度の範囲に調整できる（図1）。これまでの実験において，施肥同時溝切り機の利用は長ネギの施肥・植え溝切り作業の能率と定植精度が改善し，施肥効率を向上する結果が得られている。慣行の全層施肥栽培と施肥同時溝切り機による側条施肥栽培の比較では，草丈や窒素吸収量，良品割合が側条施肥栽培で多くなり，作溝チゼルと施肥チゼル2本を組み合わせて両側側条施肥とした試験区で最も生育が良好であった[2)]。

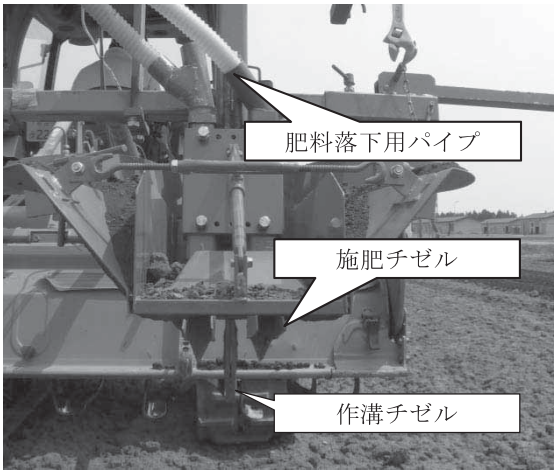


図1　施肥同時溝切り機

側条施肥と作物生育の関係は，施肥位置の違いが水稲の窒素利用率に与える影響について報告があるが，畑作物では藤原らがキャベツで報告しているのみで事例が少ない[3)]。長ネギでは筆者らが施肥同時溝切り機を用いて側条施肥を行った事例が報告されているが，新たに組み込んだ作溝チゼルや施肥チゼル，側条施肥位置の違いが長ネギの生育や根の伸長にどのような影響を及ぼすか不明であった。そのため，本報では作溝チゼルと施肥チゼルによって生じる土壌の膨軟化に着目し，チゼルの組み合わせによる土壌物理性の変化が長ネギの根の伸長と生育に与える影響を調査した。

2.　実験方法

（1）実験場所

本実験は夏どり作型（以下夏どり）と秋冬どり作型（以下秋冬どり）の2作型で行った。夏どりは秋田県農業試験場（以下秋田農試），秋冬どりは山形大学農学部附属やまがたフィールド科学センター高坂農場（以下高坂農場）で行った。土質は秋田農試が表層腐植質黒ボク土，高坂農場が灰色低地土である。

（2）供試機械

実験では乗用トラクタ（夏どり：クボタ，KL3450，25kW，秋冬どり：クボタ，KL34R，25kW）に施肥溝切り機（マメトラ，R47）と肥料散布機（タイショー，PS-50F）を組み合わせた施肥同時溝切り機で作溝作業を行った。定植はチェーンポット（日本甜菜製糖株式会社，CP-303）で育苗した苗を，簡易移植器（日本甜菜製糖株式会社，HP-6）を用いて行った。

（3）耕種概要

供試品種は2作型とも夏扇パワー（コーティング種子）を用いた。夏どりは2014年10月に播種し，無加温雨よけハウス内で2015年4月の定植まで育苗した。秋冬どりは2015年4月に播種し，同年6月の定植までガラス温室で育苗した。基肥は夏どりで化成肥料（N:P:K 12:16:12）を9kg-N/10a，秋冬どりで肥効調節型肥料（N:P:K 25:9:9）を23kg-N/10a施用した。

（4）試験区

試験区は施肥チゼル1本のみで片側側条施肥としたA区と作溝チゼルに施肥チゼル2本を加え，片側側条施肥としたB区の2試験区を設定した。作溝チゼルは植え溝の中心，溝底から深さ15cmに設定した。施肥チゼルは植え溝の中心から側方±5cm，溝底から深さ3cmの位置に設定した（図2）。

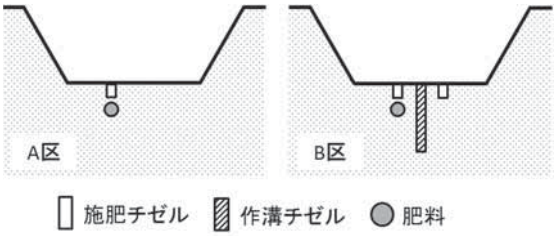
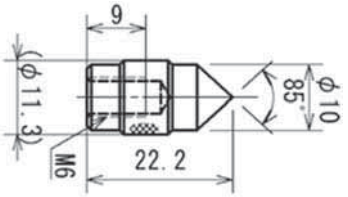


図2　試験区のチゼル設定

（5）測定項目

作溝作業後（夏どり：2015年4月，秋冬どり：2015年6月）に溝底の土壌硬度（N/cm^2）をデジタルフォースゲージ（IMADA，ZTA-500）を用いて計測した。測定は図3に示す円錐状のアタッチメントを用い，土壌に22.2mm/5sで貫入させて最大値を記録した[4)]。測定箇所は溝底中心と中心から両側方に5cmずらした位置の溝底表面，表面から10cm掘り下げた同位置の合計6点を測定した。なお，測定は各試験区の3地点で行い，一地点に付き3回測定して平均化した。



http://www.forcegauge.net/wp-content/uploads/239421be71b1b6dcf4f5ef1a546098da.pdf.

図3　使用したアタッチメント（単位：mm）

根は各試験区に植え溝の中心部を基点に長ネギ苗6本分を含む幅21cm，奥行き15cm，高さ14cmの調査区を設置し，それをS-1～S-6に6ブロックに分割して採取した（図4）。採取した根は，土を洗い流してから水を満たした小瓶に入れて5℃以下の冷蔵庫で保存し，根数とルートスキャナで根長（mm）を調査した。

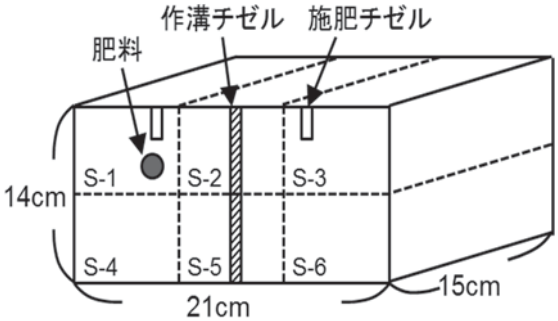


図4　根の調査区とサンプリングブロック

調査値は，各調査区の根長密度（根長/土体積：mm/cm^3）と分布割合（%）を算出した。なお，採取したブロックに含まれる苗は草丈（cm），分岐長（cm），一本重（g）を調査した。根のサンプリング日は夏どりが定植後30日，秋冬どりが定植後21日であった。S-1～S-6の各サンプリングブロックは土壌硬度と根の生育調査と対応している。

3.　実験結果

（1）作溝後のほ場状態

作溝作業は含水比が夏どりで0.35，秋冬どりで0.28の状態で行い，砕土率がそれぞれ78.5%と86.1%であった。植え溝の形状や作溝チゼル・施肥チゼルの施工深は過去5年の実験（進藤ら，2014）で年次間に差がないため，調査を省略した[4)]。

定植時の苗質は夏どりが草丈34.1cm，一本重2.4g，生葉数2.1枚，秋冬どりが草丈29.2cm，一本重0.9g，生葉数2.4枚であった。秋冬どりと比較して夏どりの苗が大きいのは，育苗期間の違いによるものである。

（2）作溝時の土壌硬度

夏どりの土壌硬度は植え溝表面でA区が9.9～13.2N/cm^2，B区が10.3～12.0 N/cm^{2}の範囲にあり，試験区間に差がなかった。下層の土壌硬度はA区が224.6～318.7 N/cm^2，B区が261.4～297.1 N/cm^{2}であり，表層と比較して下層の土壌硬度は約20～30倍であった。下層の土壌硬度はA区のS-4がB区より小さい値を示し，S-5とS-6ではA区がB区より大きい値を示した。（図5）

秋冬どりの土壌硬度は植え溝表面でA区が12.6～16.7 N/cm^2，B区が5.9～8.3 N/cm^{2}の範囲であった。下層の土壌硬度はA区で36.7～45.4 N/cm^2，B区で23.6～31.1 N/cm^{2}の範囲にあり，全体的にB区で土壌硬度が小さくなった（図5）。

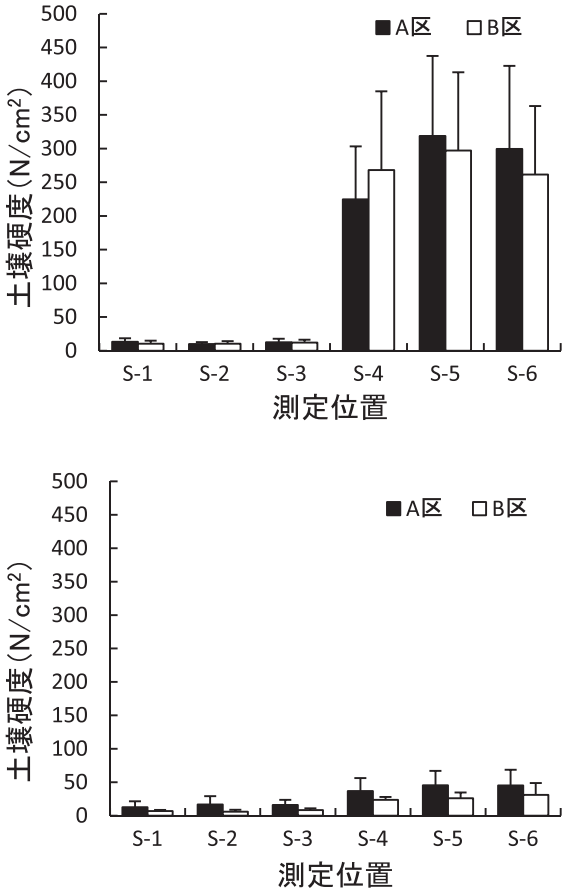


図5　各ブロックでの土壌硬度の違い
（上段：夏どり　下段：秋冬どり）

B区は作溝チゼルで下層の土壌が破砕されたため，A区と比較して土壌硬度が小さくなった。夏どりと秋冬どりでの土壌硬度の差は，土質の違いと考えられる。また，A区とB区では施肥チゼルの施工が異なるS-1とS-3の間で夏どりが0.6と2.9 N/cm^2，秋冬どりが5.7と7.6N/cm^{2}の差があった。なお，B区はS-1やS-2よりもS-3で土壌硬度が大きくなる場合があり，肥料なしで施肥チゼルを施工することで施肥部の空隙に土壌が崩落して充填されて硬度が大きくなったと考えられる。

（3）根の伸長

各試験区の総根数と根長密度を図6に示す。総根数は夏どりA区が94.5本，B区が174.5本，秋冬どりA区が

118.3本，B区が126.3本であった。根長密度は夏どりA区が0.9 mm/cm^3，B区が1.6 mm/cm^3，秋冬どりA区が0.9 mm/cm^3，B区が0.9 mm/cm^{3}であった。総根数及び根長密度は2作型共にB区が多くなる傾向にあった。

夏どりは秋冬どりと比較して下層の土壌が硬いことから，作溝チゼルによる土壌破砕による根域拡大の影響が大きくなり，A区とB区間に差を生じさせた。

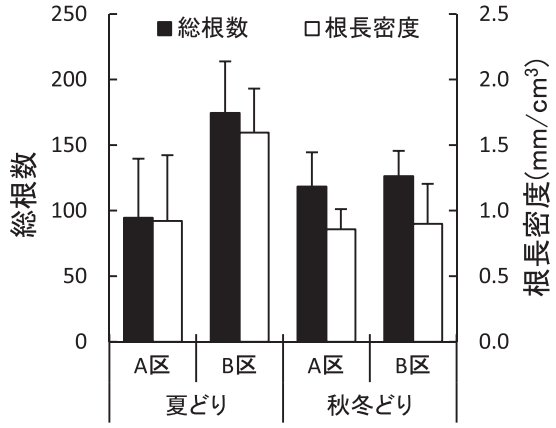


図6　各試験区での総根数と根長密度

夏どりと秋冬どりの根長分布割合（%）を図7に示す。

夏どりでのA区はS-1～S-3に該当する植え溝の表層に根全体の約75%が分布していたのに対し，B区の同部位は約65%となっており，下層への根の伸長量が多かった。B区は作溝チゼルを施工したS-5，施肥チゼル（肥料なし）を施工したS-3とその直下のS-6に分布する根の割合がA区と比較してそれぞれ5%程度増加した。S-3の土壌硬度はA区と比較してB区が約8N/cm^{2}程度小さいだけであるが，施肥チゼルによって生じた細かな亀裂や空隙に根が伸長し，分布割合が増えたといえる。

秋冬どりでのS-1～S-3への分布はA区が約70%，B区が60%であった。作溝チゼルを施工したS-5はA区と比較してB区の根長分布割合を10%程度増加した。施肥チゼル（肥料なし）を施工したS-3直下のS-6では，土壌硬度が夏どりよりも小さいため，作溝チゼルの効果が大きくならず根長分布割合が1%未満の増加に止まった。しかし，夏どりと同様にB区は下層への根の分布割合が多くなった。

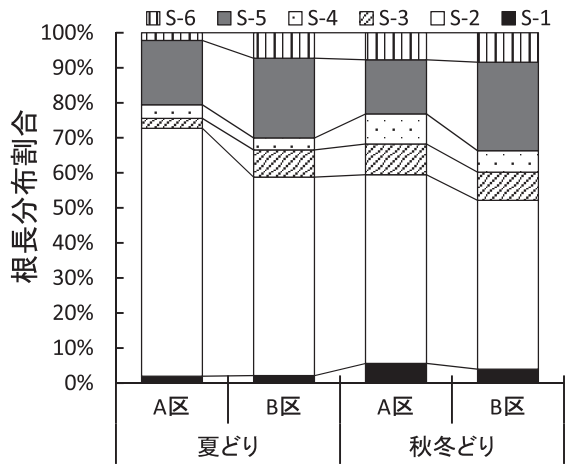


図7　根長分布割合

根長分布割合は土壌硬度が大きかった夏どりで根長密度と同様に作溝チゼルのないA区と作溝チゼルのあるB区の差が大きくなった。また，施肥チゼルを入れたB区のS-3では夏どりで根長分布割合の増加が見られるため，土壌硬度に明確な差がないが根の横方向への伸長に影響を及ぼすといえる。

（4）長ネギ苗の生育状況

根サンプリング時の長ネギ苗の生育は，夏どりではA区で草丈26.2cm，分岐長7.7cm，一本重3.8g，B区で草丈25.9cm，分岐長8.5cm，一本重5.5gであった。秋冬どりではA区で草丈30.0cm，分岐長7.1cm，一本重4.3g，B区で草丈32.5cm,分岐長8.2cm,一本重5.8gであった。

B区は全ての測定項目において2作型共に生育が良好であった。B区は作溝チゼルでの土壌破砕によって空隙が生じて土壌硬度が小さくなり，根域が広がったため，生育が良好になったといえる。

4.　摘要

1)植え溝表層の土壌硬度は2作型共にS-1とS-3でB区の土壌硬度がA区よりも小さくなった。

2) 作溝チゼルは溝底下層の土壌を破砕するため，施工部位を中心に土壌硬度を低下した。

3) 根の伸長は2作型共にB区で多くなった。特に，夏どりではB区の総根数がA区と比較して80本近く増加した。

4) 夏どりでの根の分布はB区で作溝チゼルを施工した下層部と施肥チゼル（無施肥）を施工したS-3で増加した。

5)長ネギ苗の生育は作溝チゼルの効果で根域が広がったため，2作型ともにB区で良好となった。

参考文献

1) 本庄求，2013. 寒冷地における長ネギの大苗育苗による早期収穫．農機誌，75（3），116-118.

2) 大竹智美，進藤勇人，齋藤雅憲，本庄求，片平光彦，夏賀元康，2015. 施肥同時溝切り機を用いたネギ栽培における生産性改善に関する研究（第二報）. 農機誌投稿中

3) 藤原隆広，吉岡宏，佐藤文生，2000. 畝内条施肥におけるキャベツの生育と雑草発生に及ぼす影響．農作業研究，35（1），25-32.

4) 進藤勇人，大竹智美，片平光彦，本庄求，齋藤雅憲，夏賀元康，2014. 施肥同時溝切り機を用いたネギ栽培における生産性改善に関する研究（第一報）. 農業食料工学会誌，76（6），533-540.

洋ナシ用皮むき機の開発

佐藤慈仁*・高橋史夫**・片平光彦*・夏賀元康*

Development of an European Pear Peeling Machine

Shigehito SATO*・ Fumio TAKAHASHI**・ Mitsuhiko KATAHIRA*, Motoyasu NATSUGA*

Abstract

Processing of European pear has been heavily depended upon manual labor since its flesh is soft and its shape is irregular. In order to increase European pear consumption, peeling process has to be mechanize. Therefore, we developed four prototype peeling tools which have different internal diameter. A prototype peeling tool which has smallest internal diameter (12.48mm) showed peeling time of 114.0 s, peel loss of 13.6% and juice loss of 4.6%, respectively. A prototype peeling tool which has largest internal diameter (18.04mm) showed peeling time of 64.0 s, peel loss of 19.5% and juice loss of 2.3% , respectively. Peeling time and juice loss decreased as internal diameter increased in the prototype peeling tools.

[Keywords] European pear, peeling, preparation

1．緒言

洋ナシ(Pyrus communis)はヨーロッパから西アジアを原産とするバラ科ナシ属の果実で，日本では山形県を中心に生産が行われている。しかし国内の洋ナシの結果樹面積および収穫量は，平成26年度はそれぞれ1,520ha(前年比97%), 24,400t(前年比90%)であり，年々減少する傾向にある[1)]。

洋ナシ生産量を維持・拡大するには，生食のみでなく加工用途での消費量を増やす必要がある。加工品にとしてはジュースやジャム，シロップ漬け等が既に販売されている。しかし，洋ナシは一般的に果肉が柔らかく，形状が不均一なため，加工時の皮むき作業が手作業で行われている。そのため，加工場などでは作業従事者の労力や時間，熟練が必要とされており，コスト高の要因になっている(写真1)。

皮むきは果実や野菜の加工において嗜好性や栄養価に影響を与える[2)]ため，重要な工程の一つである。現在工業的な皮むきは主に機械的手法や化学的手法，熱的手法で行われている。アルカリを用いた化学的方法は高品質な加工製品が作れる一方で，排水が高pHになる，化学的酸素要求量(COD)が大きくなる，有機物含量が増加するなど，環境への負荷が大きいとされる。また，蒸気を用いた熱的方法は化学的手法より環境に与える負荷を低くするが，蒸気の発生に多量の水やエネルギーを必要とするためコスト高となる[3), 4)]。機械的手法による皮むきは他の手法と比較して損傷が少ないため，可食部が新鮮な状態に保たれて好ましいとされる[5)]。そのため，加工現場では環境負荷の軽減と低コスト化に向けて，機械的手法での皮むきに対する要望が高い。

機械的手法で皮むきを行う際の問題は形状に対する柔軟性の低さとロスの多さである。一般的に，果実や野菜の機械的皮むきは炭化ケイ素等を使った研削や刃で行われている。研削による皮むきは皮を加工物に残すことなく剥皮するが，不均一な形状に対する柔軟性が低いため，対象物に凹凸がある場合に凸部を可食部ごと削ってしまう[6)]。刃を使った皮むき機では，対象物を回転させながら皮むきを行うことで対象物の不均一な表面に追従して皮むきができるため，果実などへの利用が多い[7)]。

本試験では，洋ナシの加工による消費量増大のため，効率的でむき残しやロスが少ない皮むき器具を試作し，その実用性を評価した。

2．材料と方法

(1) 供試材料

試験には山形県上山市で栽培されたラ・フランスを，収穫後2℃

写真1　加工工場での洋ナシの皮むき（山形市）

*　：山形大学農学部　（〒997-8555 山形県鶴岡市若葉町1-23）
**　：株式会社ガオチャオエンジニアリング　（〒997-0033 山形県鶴岡市泉町8-27）

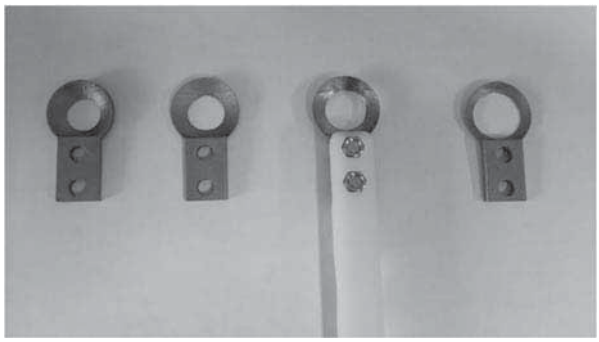


図1　試作皮むき器具（左から①，②，③，④）

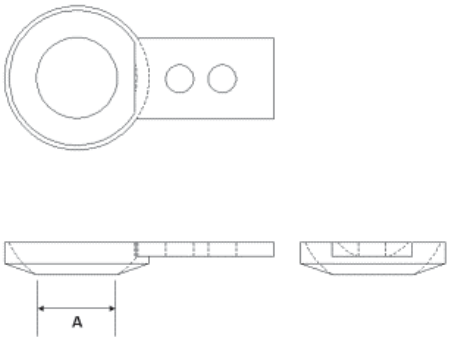


図2　試作皮むき器具概要図

＊A は試作器具内径を示す

で保存したのちに 20℃で追熟させて熟度をそろえたものを使用した。ラ・フランスは日本における栽培面積の約 64.8%）を占める基幹品種であり，他の品種と比較して，果形が不正円形で表面が凹凸の場合があるといった特徴を有するため[9]，他品種よりも機械的な皮むきが難しい。そのため，ラ・フランスで実用的な水準での皮むきをすることができれば，洋ナシの他品種にも応用が可能である。

⑵ 試作器具概要

試作器具は図 1 に示すとおり径の違う 4 種類(内径 12.48，13.36，15.35，18.04mm，径の小さい物から順に①，②，③，④とする)を作成してそれぞれ試験を行い，皮むきに最も適するものを検討した。今回試作した皮むき器具は，洋ナシの凹凸に沿って皮をむくことができるよう逆円錐形で底面に穴が開いている（図 2）。果実の剥皮は底面部を果実表面に押し当てて動かすことで行う。なお，本試作器具は使用者の安全性と耐久性を考慮して刃を入れなかった。また，対照として市販のピーラー（ FC-09, SUNCRAFT ）を使用した。

⑶ 実験方法

皮むき実験は，果実を手で持った状態でらせん状に皮をむいていく試験（以下試験 1 と呼称，図 3）と試作回転固定台の爪でラ・フランス下部 3 点を刺して固定し，モータで回転させながら試作器具を押し当てて皮むきを行う試験（以下試験 2 と呼称，図 4）の 2 種類を行った。なお，試験 2 は試作器具の機械化を想定して行ったものである。

図3　試験 1（手での固定方式）

図4　試験 2（モータ回転方式）

皮むきを行う前に果実質量(g)をデジタル台秤で測定した。皮の硬さ（N）は果梗部・赤道部・果頂部を個体によって差があるかを調査するため硬度計（プランジャー径 3mm, FR-5120, LUTRON ELECTRONIC ENTERPRISE CO.）で測定した。また，熟度の部位による変動を確認するため，先に計測した位置から 90°ずらした赤道部の果皮表面をナイフで切り落とし，果肉の硬さ(lb)を硬度計(プランジャー径 8mm, FT-011, ITALTEST)で測定した。ラ・フランスの皮むき作業は上記の調査を行った後，4 種類の試作皮むき器具と市販のピーラーで行い，作業後の果実とむけた皮の質量，むいた皮の厚さ(mm) を計測した。なお，モータで回転させる際は回転を安定させるため，果実の上部と下部を平行になるように切断し，切り落とした部分に対するロスが少なくなるように皮をむいてから質量を計測した。皮むき試験は作業に要した時間をストップウォッチで計測し，3 反復した。

⑷ 性能評価方法

性能評価は皮むきに要した時間(s)，皮むき率(%)，果汁の質量に対する果汁ロス(%)，むけた皮の厚さで行った。皮むき率，果汁の質量に対する果汁ロス(%)は以下の(1)と(2)式から算出した。

$$\text{皮むき率}(\%) = \frac{PW}{FW_1} \times 100 \qquad (1)$$

$$\text{果実の質量に対する果汁ロス}(\%) = \frac{FW_1 - (FW_2 + PW)}{FW_1} \times 100 \qquad (2)$$

PW：むけた皮の質量(g)，FW_1：皮むき前の果実の質量(g)，FW_2：皮むき後の果実の質量(g)を示す。

果実表面の凹凸や皮むき後の時間経過による果汁の損失の影響を抑えるため，性能評価に果実の表面積ではなく，質量を使用した。計測した質量から算出した皮むき率と果汁ロスはそれぞれの平均値を用い，Tukey 法で一元配置の分散分析を行った。

3. 結果と考察

(1) 供試果実の状態

実験に供試したラ・フランスの表皮硬度は果梗部で 2.41～3.05N，赤道部で 2.71～2.92N，果頂部で 2.96～3.21N となり，部位の違いや試験 1 と 2 の間に有意差がなかった。果肉の硬さは試験 1 で 3.03lb，試験 2 で 3.17lb となり，試験 1 と 2 の間に有意差があった（表 1）。

表 1　果皮の硬さと果肉の硬さ

	皮の硬さ(N) 果梗部		赤道部		果頂部		果肉の硬さ(lb)
試験1	3.05(1.004)	n.s.	2.92(0.833)	n.s.	3.21(0.109)	n.s.	3.03(0.592) ＊
試験2	2.41(1.125)	n.s.	2.71(0.868)	n.s.	2.96(1.056)	n.s.	3.17(0.555) ＊

＊括弧内は標準偏差を示す

＊: 個体間に有意差あり n.s.: 有意差なし

(2) 試作器具の性能評価

1) 皮むきに要する時間

試験 1 での皮むきに時間は試作皮むき器具①，②と比較して③，④が 23.0～50.0s 有意に短縮された（表 2）。試作皮むき器具は径が大きいほど皮むきにかかる時間が短くなる傾向にあった。これは試作器具が果実表面に接する面積が大きくなることが要因といえる。

試験2は試験1と同様の傾向にあるが，有意差がなかった（表3）。試験 2 では剥皮を行う前に果実の上下を切り落としているため，試験 1 と比較して切断面から容易に試作器具を差し込むことができたことが要因である。

表 2　皮むき性能評価結果（試験 1：手による固定方式）

	タイム(s)	皮むき率(%)	果汁ロス(%)	皮の厚さ(mm)
①	114.0(18.33) b	13.6(1.38) ab	4.6(0.68) bc	1.44(0.558) b
②	107.7(6.69) b	11.4(0.95) a	3.2(0.71) bc	1.44(0.483) b
③	84.7(8.14) a	15.1(1.35) abc	2.5(1.12) c	2.09(0.684) c
④	64.0(4.58) a	19.5(0.48) d	2.3(0.69) c	3.09(0.995) d
ピーラー	62.7(15.04) a	9.5(0.94) a	0.6(0.57) a	1.01(0.196) a

＊異なるアルファベット間に5%水準で有意差あり

＊括弧内は標準偏差を示す

表 3　皮むき性能評価結果（試験 2：モータ回転方式）

	タイム(s)	皮むき率(%)	果汁ロス(%)	皮の厚さ(mm)
①	18.08(1.539) a	12.7(6.32) a	3.7(2.19) a	1.13(0.417) b
②	18.18(0.609) a	17.1(2.65) a	2.9(0.12) a	1.49(0.735) bc
③	14.44(2.317) a	20.6(5.53) a	1.2(0.62) a	1.70(0.607) c
④	13.73(2.208) a	23.9(2.60) a	1.5(0.43) a	2.84(1.18) d
ピーラー	14.47(4.745) a	16.4(2.60) a	0.5(0.45) a	0.59(0.164) a

＊異なるアルファベット間に5%水準で有意差あり

＊括弧内は標準偏差を示す

2) 皮むき率と果汁ロス

皮むき率は試験1と2ともに径が小さい器具ほど小さくなる傾向にあった（表 2，3）。試験 1 では器具②が 11.4%と最も良い結果を示した。これは表 1 に示すとおり使用した果実の熟度に差があったためである。また，試験 2 は器具を利用して果実下部の皮を剥く際に加える力が試験 1 より小さかったため，試験 1 と比較して器具間の差が小さくなった。

皮むき率は径の小さい器具のほうで小さくなったが，果汁ロスは増加する傾向があった。試験 1 では皮むきに際して果実に対して強い力が加わるため，果実の切断面から試作器具を差し込みやすかった試験 2 と異なり果汁ロスが多くなった。試作器具での果汁ロスは市販ピーラーと比較して多いためそれを少なくできるように改善する必要がある。

3) 皮の厚さ

剥離した皮の厚さは，試験 1・2 ともに器具①，②が③，④と比較して 0.21～1.65mm 薄い結果を示した。径の大きい試作器具は果皮に対して差し込みやすいが，果実の凸部を果肉ごと除去してしまうため，剥離した皮が厚くなった。試作器具では刃の入る角度や刃の当たる面積についても検討し，影響を調査する必要がある。

4) 試作器具に対する総合評価

性能評価試験ではすべての項目で市販のピーラーが最も優れた結果を示した。試作器具には刃を入れていないため，ピーラーと比べ刃が入りにくく，皮むきに必要な力が大きくなった。

また，剥皮後の果実はピーラーと比較して試作器具を使用したもので褐変の発生が速くなった。試作器具は市販ピーラーよりも果実に過大な力が加わるため，細胞組織が過度に破壊されたことが原因といえる。試作器具は内側で果皮を果肉ごと削るようなむき方になるため，果肉表面に縞状の溝ができ，皮むき後の外観がピーラーよりも不良であった（図 5，6）。

試作器具は試験 1 の場合，試験者が目視で確認しながら皮むきをしたためむき残しがなかったが，試験 2 では果皮のむき残しが多くなった(図 7)。試験 2 は試験者が試作器具を果実表面に押し当てているため，果実の凹凸に対応できなかったことが原因である。試作器具と回転台を装置化するには果実の凹凸に沿って剥皮を行える

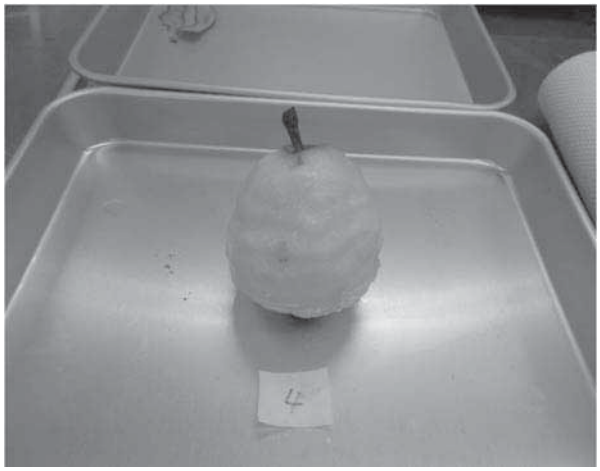


図 5　試作器具による剥皮果実の外観（試験 1）

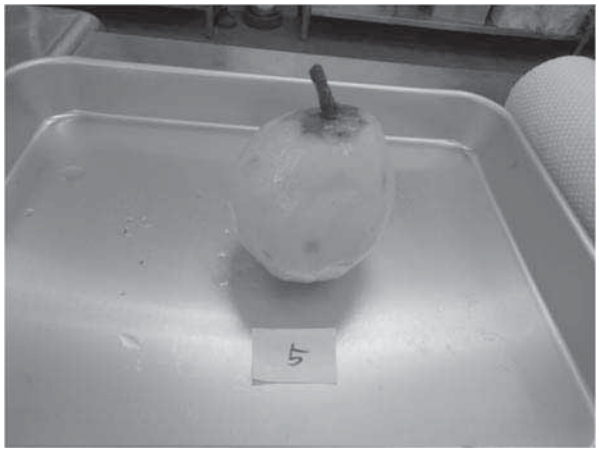


図6　市販ピーラーによる剥皮果実の外観（試験1）

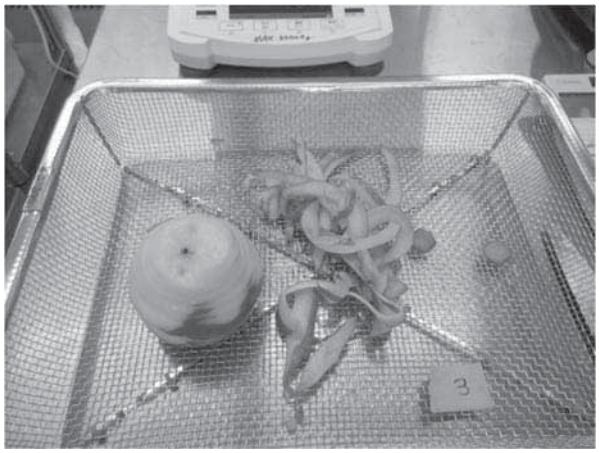


図7　試作器具による剥皮果実の外観（試験2）

図8　試験2での果実の損傷

機構にする必要がある。また，試験2では果実の下部に針を3か所刺すことで固定したため，追熟が進み柔らかくなった果実で回転動作や試作器具を押し当てる力で果肉が損傷して芯が抜けて空転することがあった（図 8）。本器具を装置化するには果実の固定方法についても検討の必要がある。

4. 摘要

（1）試作器具は内径の違いの他に器具が果実と接触する角度や面積の大きさによって皮むき率や荷重ロスに影響を与える。

（2）試作器具は皮むきに際して過度な荷重が加わり，果肉に褐変を生じさせたため，本体に刃を入れつけることで果実にかかる力を減らす必要がある。また，試作器具間での性能の差は内径の違いの他に器具が果実と接触する角度や面積の大きさが影響する。

（3）回転台の利用は皮むきにかかる時間を短縮するが，果実形状に沿った皮むきができず，ロスが増加した。今後は回転に対応した機構の開発が必要である。

（4）ラ・フランスは追熟度合いによって果肉硬度に差が生じて皮むきに影響を与えるため，異なる硬度での皮むきの性能評価が必要である。

謝辞

本研究を実施するにあたり，山形県農業総合研究センターの山田美里氏，遠藤昌幸氏に多大な協力をいただいた。ここに記して感謝の意を表す。

参考文献

1) 農林水産省, 2015. http://www.maff.go.jp/j/tokei/kouhyou/sakumotu/sakkyou_kazyu/pdf/syukaku_senasi_14.pdf, Accessed Oct. 12, 2015.

2) Li, X., Pan, Z., Atungulu G.G., Wood, D., McHugh, T., 2014. Peeling mechanism of tomato under infrared heating: Peel loosening and cracking. Journal of Food Engineering 128, 79-87.

3) Floros, J.D., Chinman, M.S., 1990. Diffusion phenomena during chemical (NaOH) peeling of tomatoes. Jouunal of Food Science 55(2), 552-553.

4) Wongsa-Ngasri, P., 2004. Ohmic heating of biomaterial: Peeling and effects of rotating electric field. Ph.D. thesis, The Ohio State University.

5) Emdi, B., Kosse, V., Yarlagadda, P.K.D.V., 2007. Abrasive peeling of pumpkin. Journal of Food Engineering 79, 647-656.

6) Emdi, B., Abbaspour-Fard, M.H., Yarlagadda, P.K.D.V., 2008. Mechanical peeling of pumpkins. Part 1: Using an abrasive-cutter brush. Journal of Food Engineering 89, 446-452.

7) Emadi, B., Yarlagadda, P.K.D.V., 2006. Peeling pumpkin using rotary cutter. Proceedings 2nd Global Congress on Manufacturing and Management, Santos, Brazil. 114-118.

8)農林水産省, 2015. http://www.e-stat.go.jp/SG1/estat/List.do?lid=000001129267. Accessed Oct. 14, 2015.

9）農山漁村文化協会, 2000. 果樹園芸大百科 9 西洋ナシ, 45-46.

ナタネ精選技術と油品質の向上

－自作可能な高能率選別機の性能評価－

加藤仁*・金井源太**

Purification of rapeseed grain and oil quality

-Development of a DIY screening machine-

Hitoshi Kato, Genta Kanai

［キーワード］ナタネ，選別，酸価

１. はじめに

大量生産，大量消費が基本的な消費パターンとなる輸入ナタネは無色透明の食用油を高効率で生産するために，ヘキサン抽出，脱酸，脱色，脱臭などの処理を経る。一方で，国内で生産されるナタネは，生産量が少なく，地域特産物などとしての販売であるため，圧搾搾油，濾過などの最低限の処理を経て，食用に供される。近年では，例えばエキストラバージンオリーブオイルやグレープシードオイルなど，無色透明に近いものではなく，風味や色合などを評価対象とするような形態の食用油も販売，消費されている背景から，ナタネ油においても国内生産の特有の風味を残したものが，安全・本物志向の消費者に人気があり，割高ではあるものの，差別化商品として販売されている[1]。一般的にナタネは収穫後に乾燥・調製が行われて搾油所等へ出荷されるが，搾油後に脱酸等の精製を行わない場合は，ナタネ乾燥後の選別精度が油の色や酸価等の品質に大きく影響する。その際，食用油脂の代表的な品質指標である酸化安定性に関して，未熟粒や損傷粒は品質が劣ることが知られており[2]，選別による除去が重要である。

ナタネの選別についての報告には大豆用ベルト選別機を用いた高精度の形状選別法[3]があるが，能率が 60 kg/h と比較的遅く，また，ナタネ油の品質評価がなされていない。また，食料庁型篩および米麦用回転式選別機を用いた選別目開きについての報告[4]もナタネ油品質の測定は行っていない。また，唐箕および大豆用ベルト選別機による選別と油品質についての報告[5]では，選別能率については検討されていない。

そこで，ここでは実際にナタネ選別を行う際に重要となる選別能率の確保とナタネ油品質の向上を目的にナタネ油生産に適した乾燥前粗選別，乾燥後精選別法について検討した。予備的な分級試験として JIS 規格の標準篩，乾燥前粗選別には砂篩機の改造機，乾燥後精選では，他用途の機械を汎用利用するのではなく，簡易に自作が出来るナタネ専用機[6]を用いた。

２．材料および方法

（１）供試材料

供試したナタネはキラリボシである。キラリボシは農研機構東北農業研究センターにて育成されたダブルロー品種（無エルシン酸，低グルコシノレート）であり，オレイン酸 70 %以上とオリーブ油に近い脂肪酸組成で，グルコシノレートの低減化により搾油粕の飼料化としての利用も可能な品種である。キラリボシは比較的温暖な土地での栽培にも適しており，国内での生産拡大にもつながる。

農研機構中央農研試験圃場および農家圃場で栽培されたナタネを汎用コンバインにて収穫した後，水分 9 %まで乾燥させて試験に供試した。各試験の供試材料の条件を表１に示す。

表１　選別試験供試材料

	試料概要	処理
試料1	キラリボシ（2010），中央農研水田圃場（茨城県つくばみらい市）	唐箕選別，分級試験
試料2	キラリボシ（2012），中央農研水田圃場（谷和原）	乾燥前粗選別試験，乾燥後精選別試験
試料3	キラリボシ（2012），中央農研畑圃場（牛久市）	乾燥前粗選別試験，乾燥後精選別試験
試料4	キラリボシ（2012），農家畑圃場（東海村）	乾燥前粗選別（データ無し），乾燥後精選別試験
試料5	キラリボシ（2012），農家畑圃場（福島県須賀川市）	乾燥前粗選別（データ無し），乾燥後精選別試験

（２）ナタネの分級試験

乾燥後に唐箕による風力選別処理した試料１について目開き 1.4，1.7，2.0，2.4 mm の JIS 規格標準ふるいにて電磁式ふるい振とう機（AS200，Retsch）による三次元運動分級（振とう幅 1.5 mm，振とう時間１分）を行った。分

*　農業・食品産業技術総合研究機構　中央農業総合研究センター　新潟県上越市
**　農業・食品産業技術総合研究機構　東北農業研究センター　岩手県盛岡市

級したそれぞれの材料を試験用搾油機（S100-200，サン精機）にて圧搾し，圧搾粗油をろ過（定量用５種Ｂろ紙）してナタネ油を作成し，酸価を滴定法（ISO 660:2009）に準拠して測定した。なお，酸価は食用油の品質の基準で，値が高いほど油の酸化が進行し品質が劣化していることを示す指標である。CODEX の粗油(crude oil)では 4.0，日本農林規格の食用油では 2.0 が基準値とされている。

（３）乾燥前粗選別試験

コンバイン収穫後の試料２，３について乾燥前粗選別試験を行った。選別には横振式砂篩機（SV-3，マゼラー）を用いた。子実より大きな夾雑物を除去するために，網を７メッシュ平織りステンレス金網（目開き 2.8 mm，線径 0.8 mm，開口率 60.8％）に交換した。供給はバケット昇降機で行い，供給速度は 700 kg/h 程度であった。選別前材料，網上の夾雑物，網下の子実を採取し，水分を 10 g 粒-105 ℃-24 h 法で測定した。選別前材料，網下の子実については平型乾燥機（通風温度 40 ℃）にて水分 9 ％程度まで乾燥させた後，圧搾ろ過してナタネ油を作成して酸価の測定を行った。

（４）乾燥後精選別試験

コンバイン収穫後，乾燥前粗選別し，水分９％程度まで乾燥させた試料２，３，４について乾燥後精選別試験を行った。選別には製作した二段式の選別機[6]を使用した。本機は，整粒より大きな茎・莢や雑草種子などの夾雑物を除去する上段と，整粒より小さい雑草種子，損傷粒（圧扁された種子など），夾雑物を除去する下段の二段のふるいから構成される。上段は孔径 φ2.5 mm，ピッチ 4.0 mm，開孔率 35.4 ％の丸孔パンチングメタルで，有効ふるい面積は 0.2 m^2（W400 mm，L500 mm），下段はスリット幅 1.5 mm，長さ 23.0 mm，開孔率 28.0 ％の長丸孔のパンチングメタルで，有効ふるい面積は 0.4 m^2（W450 mm，L890 mm）である。上段の傾斜角は６°，下段の傾斜角は７°に設定し，両段ともエアー式のピストンバイブレータ（FPLF-18-M，タムラインターメーション）にて振動数 75Hz，振動力 100 N で振動させた。供給は手作業で行い，供給速度は 100～250 kg/h 程度であった。

選別前材料，選別後整粒，下段下の材料をそれぞれ圧搾ろ過してナタネ油を作成し，酸価の測定を行った。

３．結果および考察

（１）ナタネの分級試験

分級試験の結果を図１に示す。供試材料は唐箕選別，乾燥後の試料であり，夾雑物割合は乾燥質量比で 0.5 ％であった。子実については，1.4 mm 未満は 1.4 ％，1.4～1.7 mm に 13.6 ％，1.7～2.0 mm に 78.1 ％，2.0～2.4 mm に 6.3 ％，2.4 mm 以上に 0.0 ％に分級された。分級された子実を観察したところ，1.7 mm 以上に損傷粒は無く，1.7 mm 未満に損傷粒が観察され，特に 1.4 mm 未満には損傷粒が多く見られた。

夾雑物については 1.7 mm 未満に 0.0 ％，1.7～2.0 mm に 0.1 ％，2.0～2.4 mm に 0.3 ％，2.4 mm 以上に 0.2 ％と分級された。唐箕選別後の試料であったため，細かい夾雑物は除去されていたと考えられ，唐箕選別で除去できなかった莢（さや）の一部やイタリアンライグラス，カラスノエンドウ等の雑草種子が中心であった。

分級された各サンプルから作成したナタネ油の酸価測定結果を図２に示す。分級前のナタネ油の酸価は 3.3 mgKOH/g であるのに対し，1.4 mm 未満から作成したナタネ油の酸価は 56.9 mgKOH/g と高い値，1.4～1.7 mm で 4.1 mgKOH/g，1.7～2.0 mm で 1.7 mgKOH/g，2.0～2.4 mm で 2.1 mgKOH/g を示した。1.4 mm 未満の子実から作成したナタネ油の酸価が高いのは損傷した子実が多く含まれることが原因と考えられる。また，1.4～1.7 mm の酸価が高いことも損傷粒の影響と考えられる。

食用植物油脂の日本農林規格での区分「なたね油」の酸価基準値 2.0 mgKOH/g 以下を満たすためには，酸価を上昇させる原因となる損傷粒を除去する必要がある。

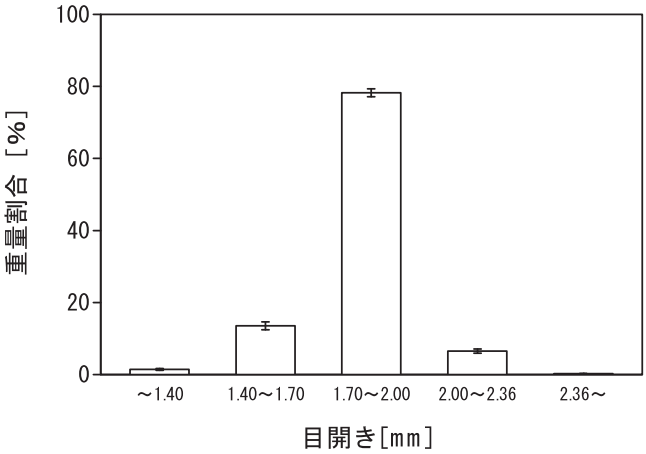


図１　ナタネ分級試験結果（試料１）

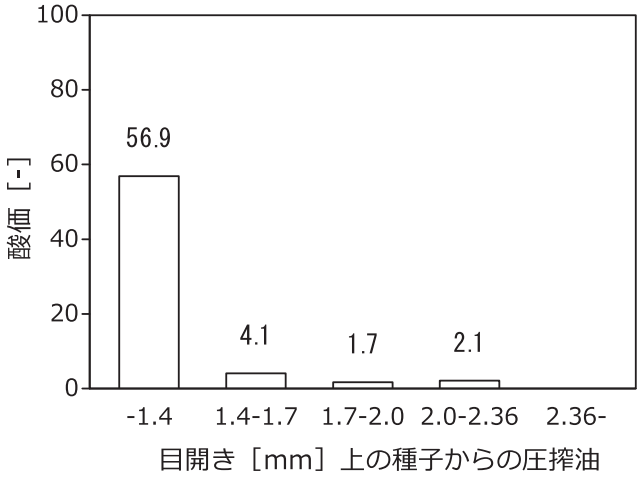
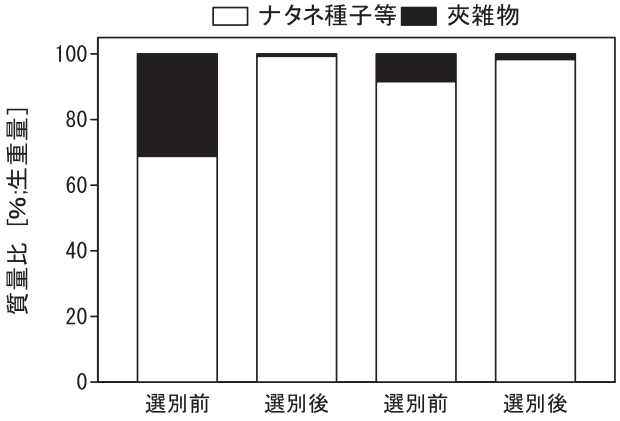


図２　分級後のナタネ油の酸価（試料 1）

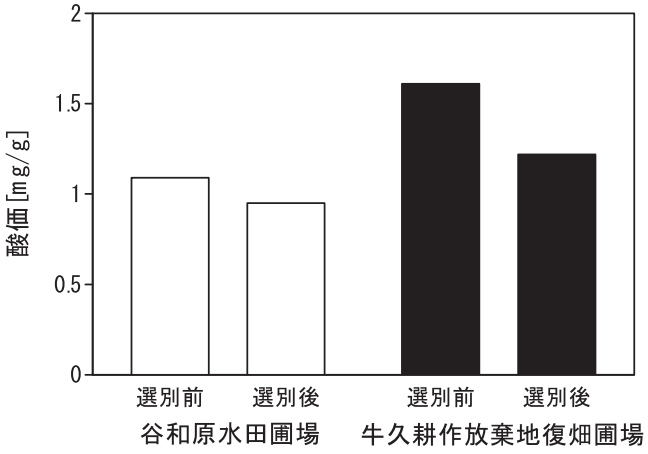
（２）乾燥前粗選別試験

選別試験結果を図３に示す。乾燥前選別を行うことにより，試料２では選別前は夾雑物割合（生重量）31 %であったが，選別によりの夾雑物の 98 %が除去され，夾雑物割合（生重量）0.7 %となった。試料３では夾雑物割合 8%の 79 %の夾雑物が除去され，粗選別後には夾雑物割合 1.7 %となった。ここでの夾雑物には茎，莢などが多く含まれ高水分で，試料 2 の夾雑物水分 74 %，試料 3 で 59 %であった。これらの夾雑物を除去することにより，選別後の水分は試料 2 では 39 %から 32 %，試料 3 では 33 %から 32 %まで低下した。

試料２，試料３から搾油したナタネ油の酸価を測定した。その結果，試料２では選別前の油が 1.09 mgKOH/g であるのに対し選別後の油は 0.95 mgKOH/g に，試料３では選別前の油が 1.61 mgKOH/g であるのに対し選別後の油は 1.22 mgKOH/g とそれぞれ酸価は低下した。未熟種子は酸価が高いが，未選別区では乾燥により莢が外れ，莢中にある未熟種子が整粒と混合してしまったため酸価が高く，選別区では莢とともに未熟粒も除去されたと推測される。



(a)　乾燥前粗選別試験結果



(b) 乾燥前粗選別と酸価

図３　粗選別と酸価（試料２，３）

以上より乾燥前選別は，高水分の夾雑物を除去することで乾燥効率を向上させ，夾雑物として未熟種子を含む莢も除去することでナタネ油の酸価を低下させることが明らかとなった。

（３）乾燥後精選別試験

選別試験結果を図４に示す。二段篩の上段では直径 2.5mm 以上の夾雑物が除去され，組成は莢，イタリアンライグラスやカラスエンドウの種子などで，選別材料に対する質量比（生重量）1.0～2.5 %であった。下段では幅 1.5 mm 以下の夾雑物が除去され，組成は裂皮や圧扁した損傷粒や粒径の小さな未熟粒，雑草種子などで，選別材料に対する質量比（生重量）7.2～14.7 %であった。

子実損失は上下段ともほとんど認められなかった。また，上段ではカラスエンドウが効果的に除去され，整粒口への夾雑物の混入割合も質量比（生重量）で 0.1 %以下であった。

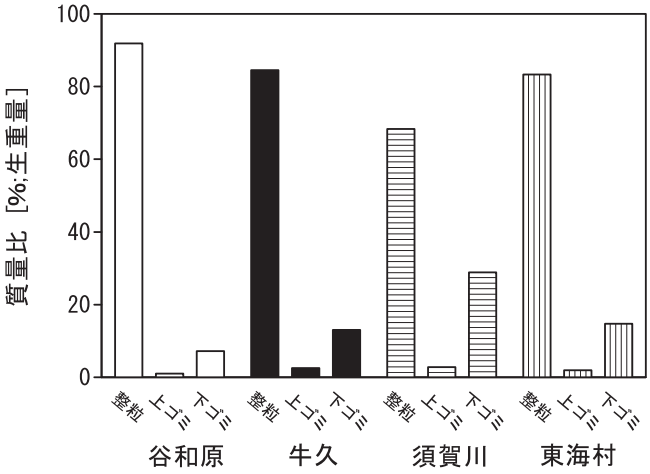


図４　乾燥後精選別試験結果（試料２，３，４）

なお，カラスノエンドウについては代表的なナタネ夾雑物であるが，唐箕選別後の分級試験試料に残留していることからもわかるように唐箕による除去も難しく，また，球形種子であることから大豆用ベルト選別機による形状選別も難しい。そのため，ナタネ子実より大きな夾雑物として，丸目篩により除去することが効果的といえる。

選別処理速度は，本試験では精度向上のために低めに設定したものの，夾雑物割合 31 %の試料２で 250 kg/h，夾雑物割合が 8 %と比較的多い試料３，４においても 160 kg/h であった。なお，同じく丸目篩による選別である金井ら[4]による回転篩（供給速度 200～300 kg/h，3 回通し）は，実質の処理能力は 60～100 kg/h と推察されるため，本機の方が能率は高いと考えられる。

選別前のナタネ材料と選別後のナタネ整粒から生成したナタネ油の酸価を図６に示す。ここで，「油 A」は選別前試料由来のナタネ油，「油 B」は選別後試料由来のナタネ油である。また，図６（a）は乾燥前粗選別を行わなかった場合，（b）は行った場合である。乾燥前粗選別により，

試料２（谷和原）について，油 A，油 B とも酸価が低下しており，試料３（牛久）においても油 A，油 B とも酸価が低下し，品質の向上が認められた。乾燥後の精選別の影響では，乾燥前粗選別を行わなかった場合も行った場合も同様に各試料について選別後はナタネ油の酸価が低い値となり，精選別により品質の向上が認められた。乾燥前粗選別なし，乾燥後精選別なしと粗選別も精選別も行ったものを比較すると，試料２では酸価を 0.6 mgKOH/g，試料３では 0.8 mgKOH/g 低下させることが出来た。

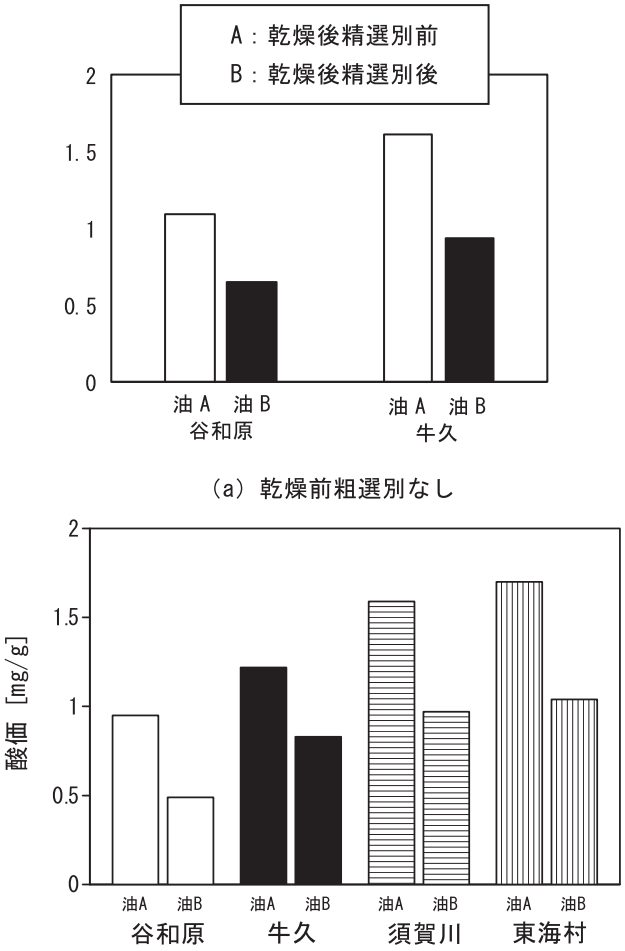


図５ 乾燥後精選別による酸価について（試料 2，3，4，5）

４．摘要

JIS 規格篩による収穫後ナタネ分級試験，改造済砂篩機による乾燥前粗選別試験，パンチングメタルによる自作篩をもちいた乾燥後精選別試験および圧搾油の酸価測定により，以下の知見を得た。

１）乾燥，唐箕選別後の夾雑物割合 0.5 %の試料について，JIS 規格篩による分級試験から，1.4 mm 以下に特に酸価の高い損傷粒が分級されることが明らかになった。夾雑物はイタリアンライグラス，カラスノエンドウなどの雑草種子が中心であった。

２）目開き 2.8 mm に改造した砂篩機を用い，供給速度 700 kg/h で乾燥前粗選別を行い，高水分の夾雑物である莢の除去によって，選別前後で水分を 1～7 %低下させることができた。また，選別により莢と共に莢中の未熟粒を除去することで選別後試料は酸価を低下させることができた。

３）自作篩により供給速度 100～250 kg/h で乾燥後精選別を行い，各試料について選別後はナタネ油の酸価が低い値となった。なお，乾燥前選別も行わなかった場合と比較すると，最大で酸価を 0.8 mgKOH/g 低下させることが出来た。

引用文献

１）石田正彦，2011．ナタネ・ナタネ油の特徴と用途いろいろ，第２章 菜の花の素顔・種類と働き，菜の花エコ辞典，創森社，藤井絢子編著，50.

２）梶本五郎，吉田弘美，芝原章，山庄司志朗，1981．粗製綿実油の酸化安定性について，油化学，31(1)， 39-46.

３）澁谷幸憲，大谷隆二，天羽弘一，西脇健太郎，2006．循環式乾燥機とベルト選別機を用いたナタネの乾燥調製・選別法， 農研機構東北農業研究センター成果情報 2005，
https://www.naro.affrc.go.jp/project/results/laboratory/tarc/2005/tohoku05-13.html

４）金井源太，竹倉憲弘，加藤仁，松崎守夫，安本知子，薬師堂謙一，2010．回転式粒厚選別機によるナタネ・ヒマワリの夾雑物除去，農業施設，41 (2)，87-94.

５）金井源太，2013．第 V 部第 3 章ナタネのカスケード利用技術と熱量構成，国産ナタネの現状と展開方向，2013.3.13，昭和堂，京都，野中章久編著，273-280.

６）加藤仁，金井源太，松崎守夫，重田一人，薬師堂謙一，2012．地油生産に適したナタネ種子選別機，農研機構中央農業総合研究センター成果情報 2011，
https://www.naro.affrc.go.jp/project/results/laboratory/narc/2011/220b0_10_04.html

無変換ナタネ油および廃食油利用の発電機導入可能性

金井源太*・野中章久*・小綿寿志*

Development of the modified diesel generator fed with SVO and WVO

Genta Kanai, Akihisa Nonaka, Hisashi Kowata

［キーワード］ナタネ，SVO，直接燃焼，省エネルギー，自給

1．はじめに

植物油の燃料利用は，軽油代替燃料として脂肪酸メチルエステル（FAME）に変換する方法が一般的であるが，無変換ナタネ油（SVO：Straight Vegetable Oil）を用いる手法もある。政策的な後押しなどから，ドイツでは一時期には50万t程度のナタネ油が実際に燃料として利用されていた[1)]。

筆者らは，ディーゼル発電機を供試機として，エンジンに燃料系統の加熱システム付加などの簡易な改造を施し，無変換ナタネ油のディーゼル燃料利用試験を行なった。その結果，定期的な整備により安定的に利用が可能であるとの知見を得ている[2) 3)]。発電機利用では，トラブル発生時の影響が大きいトラックや農作業機での利用と比較して，バックアップとして既設電源が使用できる点で実用上の利点がある。

ここでは，無変換ナタネ油利用のディーゼル発電機を用い，穀物乾燥機および発泡スチロール減容化装置の電源として実用利用する試験を行い，主に実用上の問題点把握を目的に検討した。供試燃料として，未使用の圧搾搾油ナタネ油とともに，主に一般家庭由来の廃食油も用いた。一般家庭由来の廃食油は，使用回数も少なく，酸価[4)]および塩分などを調査した結果，劣化程度が低く，供試可能であると判断した。

2．試験方法

（1）薪ボイラー併用穀物乾燥試験

図1(a)に示すとおり，薪ボイラー熱源による穀物乾燥機と組合せることで，外部電源や化石燃料を利用せずに乾燥作業を行った。薪ボイラー熱源穀物乾燥機は，ペレットボイラー熱源穀物乾燥機[5)]を利用し，ペレットボイラーを薪ボイラーと交換したものである。

改造済ディーゼル発電機（デンヨー製，7.5KVA），薪ボイラー（N-220NSB，ATO 製），熱交換器（特注品），循環式乾燥機（EST170SN，金子農機製，最大使用電力：1.693 kW）により構成され，循環式乾燥機からバーナーを取外し，側面に熱交換器を付加することにより，本体の吸引ファンによって熱交換器を経て加熱された空気が穀物層を通過，乾燥を行う構造である。温風発生に用いる温湯は薪ボイラーにより製造され，熱交換器で通風空気を加熱する仕組である。なお，発電機は既往の報告で用いたものであるが，試験前にエルスベット製燃料噴射ノズル，フィルタ類は新品に交換済である。

（2）乾燥機電力供給試験

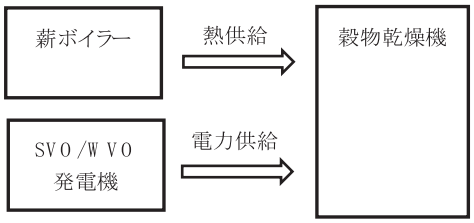
図1(b)のとおり，作業委託を請負う農業法人の乾燥施設にて，水稲収穫後，乾燥作業の一部で改造済発電機（デンヨー製 7.5kVA）の利用試験を行った。主として乾燥機の電源として使用し，コンプレッサーや籾摺機などにも使用した。また，廃食油は後述（3）の事業者が収集したもので，通常はFAME に変換の上，同法人を含む利用者が農業機械，トラック等で利用しているものである。本試験で供試した廃食油は，収集したものを遠心分離（チヒロ製スピンクリーン M300）にて精油したものである。本装置は原油タンクと精油タンクが共用で，遠心分離機を循環し，タンク全体を処理する方式である。

（3）発泡スチロール減容化装置電力供給試験

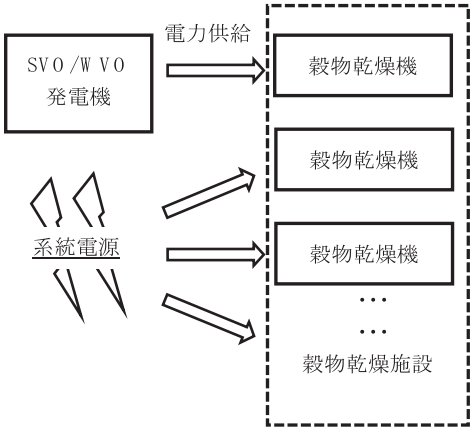
試験の概要を図1（c）に示す。電力供給試験をおこなった事業者では，廃食油回収とは別に発泡スチロールの回収，減容化作業も行っている。この作業では，減容化装置（シグマ機器製エコデンパッカーEDP400SE，三相200V）を稼働させており，電力は主に発泡スチロールを軟化させるための加熱部分と破砕・圧縮するためのモーター部分にて消費される。

供試発電機は新ダイワ製 DGM250MK（定格容量 20 KVA（50 Hz），エンジン：クボタ製 V2403-K3A）で，内蔵エンジンに対応するエルスベット製改造キット（Product No.82142403-0007）を取付けた。改造の概要は，無変換植物油の粘度を適切な値まで低下させるための燃料系統への加熱装置の付加，燃料への塵の混入に対応するための燃料フィルタの付加，燃料供給系統への付加部品が増えたことによる圧力損失に対応するための燃料供給ポンプの付加である。改造作業は，（株）みちのくクボタに依頼した。改造後，軽油および圧搾搾油の未使用ナタネ油による試運転および減容化装置の試験稼働を行い，遠心分離精油済の廃食油による稼働を行った。

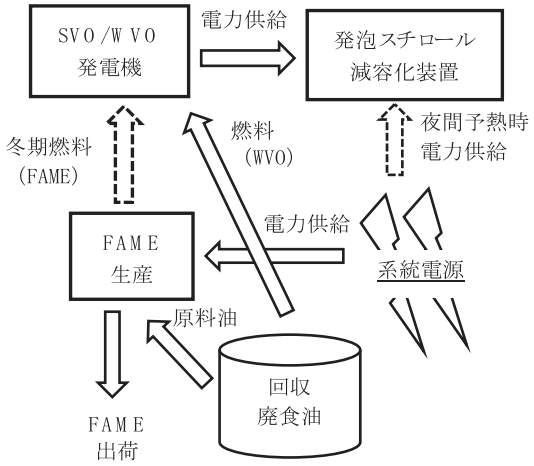
* 農業・食品産業技術総合研究機構　東北農業研究センター　岩手県盛岡市



(a) 薪ボイラー併用穀物乾燥試験



(b) 乾燥機電力供給試験



(c) 発泡スチロール減容化装置電力供給試験

図 1 電力供給試験概要

表 1 ナタネ乾燥試験概要

供試材料	キラリボシ
収穫日	2014/7/14
張込量（kg-8%w.b.換算）	1529
初期水分（%w.b.）	13.6
仕上水分（%w.b.）	7.3
乾燥時間（h）	6.0
乾減率（%/h）	1.0
外気温度（℃）	25
外気湿度（g/kg）	13.8
通風温度（℃）	46.5
排気温度（℃）	29.6
排気湿度（g/kg）	18.2
燃料消費量 （kg）	60
加熱効率（［通風空気の熱量］/［燃料の熱量］） （%）	43
徐水量 1 kg あたり消費燃料熱量 （MJ）	9.8

表 2 ボイラー運転概要

	平均	最大
炉内温度 （℃）	522.1	716.8
温湯(出) （℃）	64.4	80.0
温湯(戻) （℃）	53.3	64.2
外気温（℃）	25.0	27.3
通風温度（℃）	46.5	56.7
排気温度（℃）	30.3	33.0
吸気風量（m^3/h）	14.0	35.0
循環流量（L/min）	28.4	29.0

表 3 発電機運転概要 張込時含む）

電力消費量 （kWh）	10.2
ナタネ油消費量 （L）	8.0
平均燃料消費率 （L/h）	0.75
平均消費電力 （kW）	0.97
徐水量 1 kg あたり電力消費量（kWh）	0.05
徐水量 1 kg あたりナタネ油消費量（L）	0.04

３.結果および考察

（１）薪ボイラー併用穀物乾燥試験

表１に乾燥試験の概要，表２に薪ボイラーの運転概要を示した。供試材料は，東北農研（盛岡市）にて通常の栽培を行ったナタネ（キラリボシ）を用い，初期水分は13.6％であった。乾燥試験は順調に進み，平均乾減率1.0％/h，仕上水分7.3％，燃料使用量60 kg（剪定枝35 kg，オガライト，木質ブリケット，薪）であった。通風空気の加熱効率（燃料の発熱量のうち，乾燥機の通風空気の加熱に有効利用された割合）は43 ％であった。

薪ボイラーの運転も順調であり，平均では炉内温度522 ℃，64.4 ℃の温湯を28.4 L/min で供給した。熱交換器にて，通風空気は20℃程度加熱され，温湯は10 ℃程度温度低下した。排気は 30 ℃程度で，乾燥が進むにつれて徐々に上昇し，乾燥終了時には33 ℃となった。

除水量1kg 当りに用いた燃焼熱量は9.8 MJ/kg であった。ペレット燃料ボイラーを用いた小麦乾燥では通風空気の加熱効率60～65 ％,麦の除水量当り燃焼熱量は7.8～11.6 MJ/kg であった[5)]。ペレット燃料ボイラーを用いた小麦乾燥と比較すると通風空気への加熱効率がやや低かったが除水量当りの燃焼熱量は同等であった。

表３に乾燥機およびボイラーの電源として用いたナタネ油供試発電機の運転概要を示す。平均消費電力は0.97 kW，ナタネ油消費量は8.0 L であった。徐水量１kg あたりでは，電力消費量 0.05 kWh，ナタネ油消費量 は0.04 L であった。

薪ボイラー併用穀物乾燥では，デモンストレーション的ではあるが，系統電源，化石燃料を使用せずに穀物乾燥作業を実施可能であった。電気料金や化石燃料の高止りに伴い，エネルギー自給による穀物生産のコスト低減の可能性を示す結果を得た。

（２）乾燥機電力供給試験

供試期間2014 年９月～11 月では，合計163 時間，廃食油 226 L，フィルタ詰りによる整備４回（フィルタ洗浄１回，フィルタ交換３回），総発電量161 kWh，時間あたり平均燃料消費率1.4 L/h,平均負荷1.0 kW であった。

圧搾搾油による未使用ナタネ油を供試した既往の研究[2)]では燃料フィルタ詰りの発生は100～200 時間使用後であり，163 時間で４回はフィルタ詰りの頻度が高いといえる。回収廃食油は酸価上昇は低かったが，当初，遠心分離工程を経ない廃食油を給油したため，夾雑物が多かったことによると考えられる。濾過などにより夾雑物除去を予め行うことにより改善できると考えられる。また，平均負荷あたりの燃料消費率も高めの値となっており，既往の研究の試験条件とは異なる変動負荷であったことや不調による始動作業の繰返しがあったことが要因として考えられる。

現地農家側としては，繁忙期の水稲収穫時期ではあったが，急なフィルタ交換には対応できないものの発電機の起動や配線の変更など，予定されている作業であれば対応可能であるとのことであった。この点では，バックアップの系統電源が利用できることは大きな利点であるといえる。また，各種機械の運転を試みたところ，電力容量が問題ない装置については稼働可能であったとのことである。さらに，電力容量の関係で発電機の安定的な運転ができなかったが，運転時間が長いエアコンプレッサーや籾摺機などを発電機で稼働したいとの要望があり，筆者らが意図する農業生産におけるエネルギー自給によるコスト低減についても興味があるとのことであった。

表４　乾燥機電力供給試験概要

	燃料使用量 [L]	運転時間 [h]	発電量 [kWh]	整備状況
2014. 9～11	226	163	161	フィルタ整備：４回（洗浄１，交換３）

（３）発泡スチロール減容化装置電力供給試験

発泡スチロール減容化装置の運用方法として，早朝からのヒーター部予熱はタイマー設定により系統電源を用いて行い，減容化作業開始時に発電機始動と系統電源から発電機への電源切替を行うこととした。

動作確認のため，軽油15L での試運転，東北農研にて栽培～精油を行ったナタネ油（キラリボシ）40L での試運転を行った。試運転の結果，減容化装置の電源として問題なく動作することがわかり，廃油を用いた本試験運転を行った。

試験運転および整備の概要を表４に示す。2015 年６月末から試験を開始し，8/30 に通常整備事項であるエンジンオイル，エンジンオイルフィルタの交換を行った。また，燃料フィルタは標準で水抜き200 時間毎，フィルタ交換400 時間毎であり，標準よりは短いが，始動性低下の使用感も有り，半分程度の使用時間であったが，並列に接続されている純正のフィルタと改造キット付属のフィルタの２種類を両方とも交換した。燃料フィルタ交換後には始動性の復旧も確認できた。始動時には燃料温度が低く粘度が高い燃料がフィルタを通過することから，フィルタの詰り具合が始動性に大きく影響すると考えられる。

10 月末で約４ヶ月を経過したが，発表スチロール減容化作業にも支障は生じておらず，燃料使用量は 850 L，発電量は1345 kWh に達し，平均燃料消費率2.2 L/h，平均負荷3.6 kW で順調に運転中である。燃料消費率，平均負荷については，月毎に変動があるが，減容化される発泡スチロールの種類や処理量などの影響を受けるため，要因は不明である。運転試験を継続し，発電機の能力低下に起因する変動が無いか測定する予定である。

なお，現地側としては，発電機導入に伴い，作業手順はやや増えたものの，廃食油が集積される施設としては

望ましい機械との認識で，苦にならないとのことであった。また，発電機が不調な場合に系統電源が予備として確保されていることも安心して試験導入できる要素であるとのことであった。今後，電力コストの低減幅を具体的に把握することで，本システムの導入効果を評価する必要がある。

表５　発泡スチロール減容化装置電力供給概要

	燃料使用量 [L]	運転時間 [h]	発電量 [kWh]	整備状況
2015.7	250	108	462	特になし
2015.8	280	116	404	8/30 初回交換：オイル，オイルフィルタ，燃料フィルタ
2015.9	200	90	277	特になし
2015.10	120	64	202	特になし

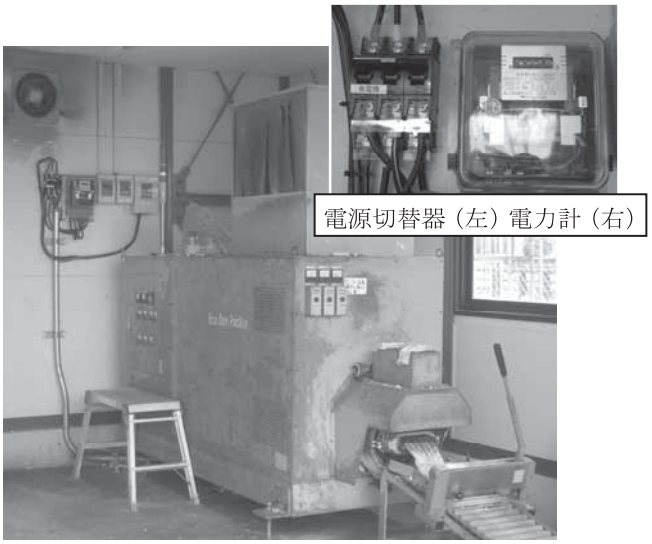


写真２　発泡スチロール減容化装置

４．摘要

無変換ナタネ油利用のディーゼル発電機を用い，穀物乾燥機および発泡スチロール減容化装置の電源として利用する実用試験を行い，以下の知見を得た。

１）無変換ナタネ油利用のディーゼル発電機は，薪ボイラー穀物乾燥との併用により，系統電源，化石燃料を使用せずに穀物乾燥作業を実施可能であることが確認され，農業生産におけるエネルギー自給の可能性が示された。

２）現地農家での乾燥機電力供給試験では，合計 163 時間，廃食油 226 L，フィルタ整備４回，総発電量 161 kW 発電量，時間あたり平均燃料消費率 1.4 L/h，平均負荷 1.0 kW の運転実績で，乾燥機等で利用した。導入現地側によると不調時の予備としての系統電源も確保されており，発電機関連作業の負担贈はあるが，電力自給によるコスト低減にも興味があるとのことであった。

３）発泡スチロール減容化装置への電力供給試験は，4ヶ月間で燃料使用量は 850 L，発電量は 1345 kWh，平均燃料消費率 2.2 L/h，平均負荷 3.6 kW で、順調に運転中である。現地では、発電機操作などの負担増はあるが，電力自給によるコスト低減にも興味があり，収集される廃食油が有効利用され有意義であるとの認識であった。

４）本システムに対する現地側の期待度は高く，今後，電力コストの低減幅を把握することで，本システムの導入効果を評価，提示する必要がある。

謝辞

有限会社ピース，いわて生協，社会福祉法人 盛岡アビリティセンター，環境パートナーシップいわての皆様には，実験スペース,実験装置,実験作業のサポートなど，研究推進上，多大なるご協力を頂きました。ここに謝意を表します。

参考文献

１）Gassner,T.，Remmele，E.，Stotz.,K.，2007. Quality assurance for rapeseed oil fuel，Proceedings of 15th European Biomass Conference & Exhibition，1982-1984.

２）金井源太，澁谷幸憲，小綿寿志，2014. ナタネ油の燃料利用がディーゼルエンジンへ与える影響，農業施設，45(１)，14-24.

３）金井源太，澁谷幸憲，小綿寿志，2015. ナタネ油のディーゼルエンジン利用経過と燃料噴射ノズル汚損状況，農業施設，46(１)，9-17.

４）野中章久，2015. 生協が回収する廃食用油の品質と地域的資源としての特徴，　協同組合研究，34 (2)，131-138.

５）金井源太，小林有一，竹倉憲弘，加藤仁，薬師堂謙一，2010. ペレットボイラーを熱源とした循環式乾燥機の可能性，農業機械学会誌，72 (3)，297-299.

有機的管理実践牧場における植生と牛の採食行動の関係（第 2 報）

—夏季における肉用牛の採食行動—

鈴木由美子*・小笠原英毅*・梅村和弘**・田中勝千*・寳示戸雅之*・皆川秀夫*

Relationship between grazing behavior of beef cattle and vegetation in organically managed pasture (Part 2)

—grazing behavior of cattle in summer—

Yumiko SUZUKI*, Hideki OGASAWARA*, Kazuhiro UMEMURA**,
Katsuyuki TANAKA*, Masayuki HOJITO*, Hideo MINAGAWA*

[Keywords] bite counter, GPS, grazing behavior, herbage intake, vegetation pattern

1. 研究背景

北里大学獣医学部附属フィールドサイエンスセンター八雲牧場（以下，八雲牧場）では土壌，草，家畜（肉牛）および家畜排泄物の資源循環を軸に，新たな肉牛の生産および販売のあり方について提示している。八雲牧場では，1994 年から輸入飼料穀物の使用を中止し，自給飼料（牧草，トウモロコシホールクロップサイレージ）のみを給与する肉牛生産方式に転換した。また，2003 年からは農薬，2004 年からは化学肥料の使用を中止し，家畜排泄物を堆肥化して草地に還元する資源循環型牛肉生産を実践している。飼養する牛は，牧場の環境に適応でき，粗飼料利用性が高く，放牧適性を持つ日本短角種（以下，N 種）を主体とした肉用牛である。本牧場では，雑種強勢を活用して交雑種の利用も進めており，フランス原産のサレール種と N 種の交雑種（以下，SN 種）および SN 種と N 種の交雑種なども飼養している。この牧場では，牛の品種による食草パターンの違いに着目して，複数品種の牛を一つの牛群で管理することで牧区内の牧草をまんべんなく牛に採食させて，牧草利用率を高め，栄養価が高く維持できる短草利用を図っている（萬田ら 2004）。しかしながら，本牧場で独自に交配させた SN 種や NSN 種の生態的特徴については不明な点が多い。他方，牛の採食を中心とした行動は，牧草の草種，草量，密度および草高などの草地の特徴と密接に関連しており（McNaughton および Georgiadis 1986，Vallentine 2000），イネ科草とマメ科草の混播草地ではマメ科草が選択的に採食される傾向がある（佐々木ら 1997，小倉および菅原 1996，Dumont ら 1995）。さらに，天候などの気象環境の違いも放牧行動に大きく影響し，その影響の大小は牛の品種による温度や湿度に対する反応の差に起因する。以上のことから，牛の行動を把握することは，草地植生の不均一性に合った適切な放牧管理を実行するための指標となると考えられる。換言すれば，牛がいつ，どこで，どのくらい牧草を採食しているかを定量的に把握することが，家畜生産量と利用草量の向上，または草地植生の保全において重要となる。

近年では，牛の採食行動の把握に万歩計の原理を応用したバイトカウンター（Umemura et al., 2009），加速度計（Watanabe et al., 2008）および音響モニタリング法（Tani et al., 2013）などが利用され，採食回数および採食時間の推定の可能性が示された。加えて，GPS（Global Positioning System）を利用することで，牛の歩行時間（篠田ら 2009，渡辺ら 2013）の測定の可能性も示された。放牧馴致方法は今のところ経験的に確立されてきたものが多く，放牧環境に対して牛がどのように適応しているか定量的な基準は明らかではないため（白羽ら 2013），これらの技術を応用することで草地植生に応じた適切な放牧管理が実行できると考える。また，これまで篤農家が経験的に実践してきた管理を，データ化することが可能となる。そこで，本研究では資源循環型肉牛生産の実践牧場である八雲牧場において効率的な肉牛生産システムを構築するための基礎資料を提供するため，放牧期間中の放牧牛の採食を中心とした行動パターンの空間分布を統計解析に基づき定量的に把握することを目的とする。第 1 報では，入牧前の植生と牛の採食行動の関係について検討し，牛は草量が多く，マメ科冠部被度が高い領域を優先的に採食していることを明らかとした。そこで，本報では，夏季における牛の品種による採食を中心とした行動パターンの差について検討した。

2. 方法

（1）調査対象

調査は，2014 年 8 月 4－7 日に八雲牧場内（北海道二海郡八雲町）の第 3 牧区−2（面積：2.90 ha）で実施した。調査牧区はイネ科牧草（オーチャードグラス（*Dactylis glomerata* L.），ケンタッキーブルーグラス（*Poa pratensis* L.），ペレニアルライグラス（*Lolium perenne* L.）など）とマメ科牧草（シロクローバ（*Trifolium repens* L.））の混生草地である（図 1）。毎年 5－11 月は肉用牛による輪換放牧に利用されている。牧区には 2 つの沢があり，傾斜角度 4.9−6.6° の傾斜地（約 0.42 ha）を含む。調査対象牛群は日本短角種（N 種）19 頭，N 種（雌）とサレール種（雄）との交雑種（以下，SN 種）11 頭，ヘレフォード種 1 頭およびシャロレー種 1 頭を含む 32 頭で，平均月齢 26 ヶ月，平均体重 620 kg である。牛群は 8 月 4 日の 13 時に牧区に入牧

*北里大学獣医学部　青森県十和田市東 23 番町 35－1
**北海道農業研究センター　北海道札幌市豊平区羊ヶ丘 1

させ，3 日間放牧させた後，8 月 7 日の 12 時に退牧させた。

調査時の気象環境は，気象庁観測データを引用した。

（2）実験方法

牛群から平均的な体格の N 種 3 頭（平均体重 562kg±41 kg，月齢約 26 ヶ月）および SN 種 3 頭（平均体重 667 kg±13 kg，月齢約 26 ヶ月）の計 6 頭を選定し，対象牛とした（表 1）。なお，SN 種は雑種強勢がよく発現した結果，N 種に比べて生時および離乳時の体重が有意に重く（$P<0.01$），肥育終了時の体重も重くなることから（畔柳ら 1992），2 種間には約 100kg の体重差が生じた。

対象牛の行動調査として，放牧中に採食回数および牛の位置を測定した。まず，対象牛に GPS（GlobalSat，DG-100，重量 114 g）および首式バイトカウンター（Umemura et al., 2009，重量 354 g）を取り付け放牧した（図 2）。GPS の公称測地精度は 10 m 2DRMS で，30 s ごとの牛の位置情報（緯度および経度）および移動速度が測定できる。GPS のバッテリー駆動時間は 24 時間程度となっているため，放牧開始 24 時間後および 48 時間後に GPS バッテリーを交換した。測定した位置情報をヒュベニの公式に適用して，供試牛の歩行距離を算出した。ヒュベニの公式は，地球の形状（回転楕円体）を考慮して，2 点間の距離を算出する方法である。Swain ら（2008）は，GPS を用いて放牧牛の歩行速度を調査した結果，最高歩行速度は 36 m/min と報告している。本研究ではこの結果を基に，歩行速度が 36 m/min 以上のデータを異常値として分析から除外した。加えて，曇天時や牛が庇蔭した場所にいるときに正確な測位ができず外れ値が出現したため，外れ値も異常値として扱った。バイトカウンターでは，10 min における牛の顎運動回数が測定され，この測定値を較正式（R^2＝0.91，Umemura et al., 2009）に代入することで採食回数が推定できる。採食が確認された時間と牛の位置情報を照らし合わせ，採食場所と非採食（休息，移動および反芻など）場所を特定し，それぞれの歩行距離を算出した。加えて，牛の採食場所の密度分布をカーネル密度推定法により求め，採食場所の空間分布を把握した。カーネル密度推定法は，確率密度関数を推定する手法の一つで，観測点の密度を可視化することが可能である。また，観測データを基に補完することで，観測点以外の地点の確率密度を推定することができる。データ処理にはソフトウェア R（R Development Core Team, 2007.）を供試し，歩行距離は自作関数，カーネル密度推定法は“MASS”パッケージの kde2d 関数（Venables および Ripley2002）により実装した。

3. 結果および考察

調査期間中の平均気温は 23.7℃（S.D.=1.3℃）で，肉用牛の飼料摂取量への影響が少ない温度（15～25℃）の範囲内であった（農業食品産業技術総合研究機構（編），2009）。そのため，本調査においては温度が牛の採食に影響は少ないと判断した。しかし，約 10 mm/h と比較的短時間に集中した降雨量が計測されたことから（8 月 5 日 10 時～12 時），降雨が採食に影響した可能性が考えられた。バイトカウンターにより測定した牛の採食回数は，個体により有意な差が確認できなかったことから，測定値の平均を代表値とした（図 3）。牛の採食は，様々な時間に確認できたことから，分散型の採食と判断できる。しかし，午前 1～4 時および午前 7 時 30 分～10 時までは，放牧 3 日間で採食が確認できなかったことから，採食行動は 1 日で 3～4 回のピークを持ち，日内で周期的に変化していたと考えられる。既往の研究により，採食行動は 1 日で 3–4 回のピークを有すると言われており（近藤 1987），本研究での採食回数の結果も同様な傾向であった。採食時間は，放牧 1 日目が 8.1 h，2 日目が 7.0 h，3 日目が 9.3 h で，2.3 h の差が確認された。1 日当たりの採食回数は，1 日目が 17,177 回，2 日目が 14,212 回，3 日目が 22,072 回で，7860 回の差が確認された。放牧 2 日目は短時間に集中した降雨が観測されたため，採食時間および採食回数とも

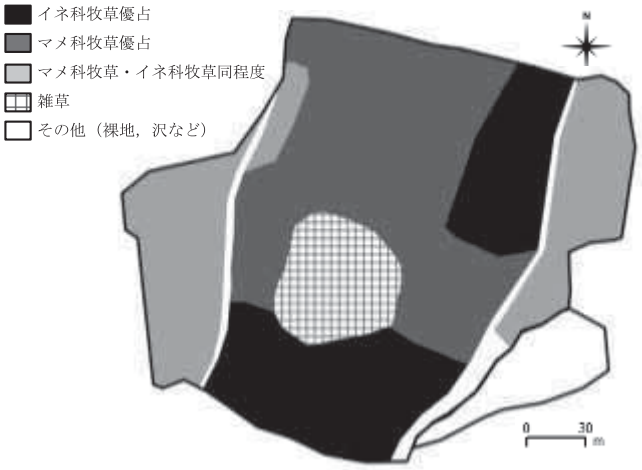


図 1　入牧前の牧区内の植生

表 1　調査対象牛の体重および月齢

品種	個体番号	体重 (kg)	月齢 （ヶ月）	性別
N	1	589	26	雄
	2	577	25	雄
	3	521	27	雄
SN	1	675	26	雄
	2	675	27	雄
	3	652	26	雄

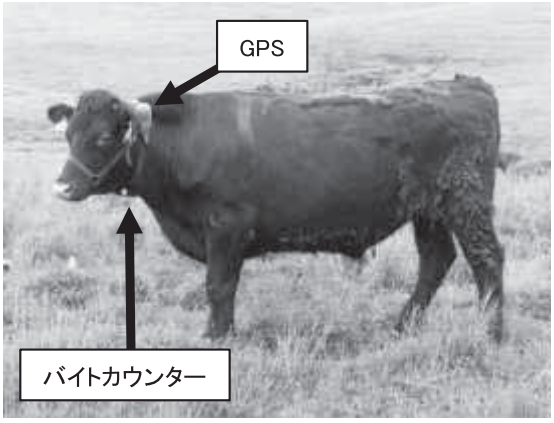


図 2　GPS と首式バイトカウンターの取り付け方法

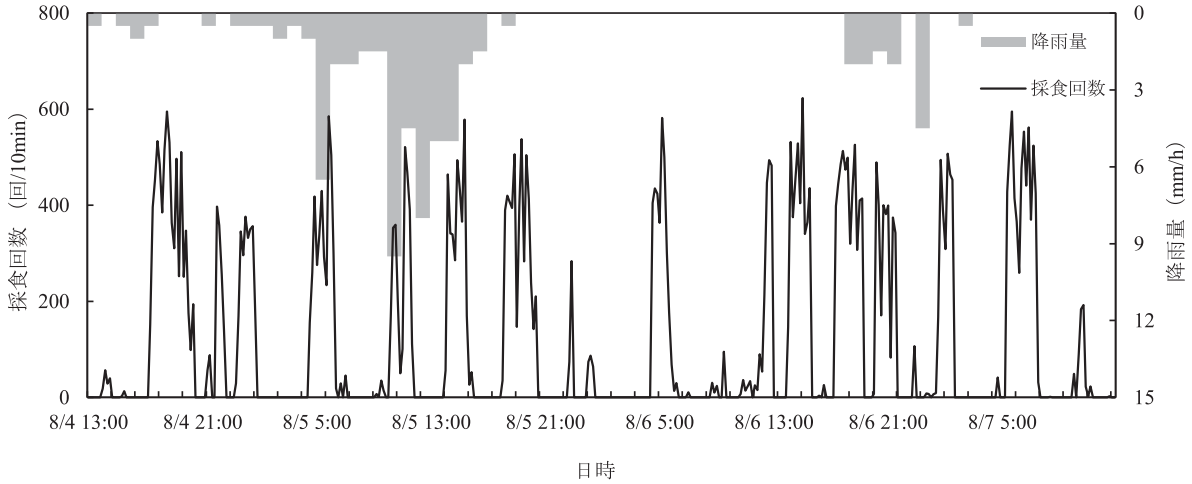


図 3　バイトカウンターにより測定した牛の採食回数と降雨量

表 2　牛の歩行距離

	品種	1日目	2日目	3日目
総歩行距離	N種	5.26 ± 0.11	5.14 ± 0.30	4.54 ± 0.45
	SN種	5.77 ± 0.04	5.90 ± 0.15	5.25 ± 0.19
採食に伴う歩行距離	N種	2.10 ± 0.05	2.11 ± 0.08	2.18 ± 0.07
	SN種	2.04 ± 0.13	2.14 ± 0.17	2.31 ± 0.13
非採食時の歩行距離	N種	3.17 ± 0.16	3.04 ± 0.36	2.36 ± 0.45
	SN種	3.73 ± 0.09	3.76 ± 0.31	2.93 ± 0.10

に最少だったと考えられる。一方，放牧 3 日目は，採食に伴う可食部の減少により，牛の一口に入る草量が減少したことで，口を頻繁に動かして多くの草を採食し，採食時間および採食回数が増加したと考えられる。

GPS により測定した位置情報から求めた牛の放牧 3 日間の総歩行距離は，N 種が 15.0 km（標準偏差 0.36 km），SN 種が 16.9 km（標準偏差 0.08 km）となり，品種間で有意な差（$P < 0.01$）が確認された。放牧 2 日目までは品種間に有意な差（1 日目 $P < 0.01$，2 日目 $P < 0.05$）が確認されたが，放牧 3 日目は同等の距離であった。採食時の歩行距離は品種による有意な差は無かった（2.04～2.31 km）。一方，非採食時（移動や休息，探査行動など）における歩行距離は，放牧 2 日目までは品種間で有意な差（1 日目 $P < 0.05$，2 日目 $P < 0.1$）が確認されたものの，3 日目には同等の距離であった（表 2）。以上のことから，N 種と SN 種の歩行距離には違いがあり，その違いは非採食時の行動様式の違いが影響していると推察した。一般に，N 種は温順な性格で放牧適性が高いといわれている。S 種も放牧適性に優れて，南アフリカでは優れた耐暑性，カナダの寒冷地では耐寒性が評価されて世界中の風土と飼育環境に適応するといわれている。一方で，環境が変わると落ち着かない様子を示すことから，注意深く警戒心が強いと考えられる（山口 2011）。牛は新しい牧区に入ると，牧区内を一巡するような探索行動をとる。今回対象とした 2 種は，上述した特徴から推察すると，SN 種は新しい牧区に入ったことで N 種よりも注意深く探索行動をしたため，特に放牧 1 日目および 2 日目の非採食時の歩行距離が長く，牧区の環境に慣れた放牧 3 日目には同等の歩行距離となったと考える。牛の採食行動は，品種や個体により異なる場合があるといわれているが，本研究の対象牛には採食時の歩行距離に有意な差は確認されたかった。また，各放牧日の採食場所の分布密度は概ね揃っていた（図 4）。以上のことから，N 種および SN 種間および個体間の選択食草性には大きな差は無いと判断した。

4.　結論

本研究では，資源循環型畜産実践牧場である八雲牧場において効率的な肉牛生産システムを構築するために，夏季における牛の品種による採食を中心とした行動パターンの差について検討した。その結果，以下のことが明らかとなった。

1)　牛の歩行距離は，放牧 1 日目および 2 日目で SN 種が N 種より長く，この差は非採食時における歩行距離の差で，SN 種は新しい牧区に入ったことで N 種よりも注意深く探索行動をしたことが要因に考えられた。

2)　採食時の牛の行動は概ね揃っており，両種とも採食場所は牧区全体に広がっていた。品種間に大きな差がなかったことから，選択食草性に大きな差がないと考えられた。

3)　放牧 1 日目はマメ科優先区，2 日目はイネ科・マメ科混生区およびイネ科優先区，3 日目はイネ科優先区および雑草の群生が確認された領域周辺での頻度が高かった。これらのことから，供試牛はマメ科牧草が優占し，かつ草量が多い領域に対して嗜好性が高いと推察した。

謝辞

本研究の一部は，平成 25 年度（第 26 期）北里大学学術奨励研究（若手研究）および文科省科研費（15K07708，22880031）の助成により実施した。本研究を遂行するにあたり，北里大学獣医学部附属フィールドサイエンスセンター八雲牧場の教職員の皆様，並びに北里大学獣医学部生物環境科学科生態管理学研究室専攻生の皆様には，多大なる御協力を頂きました。ここ

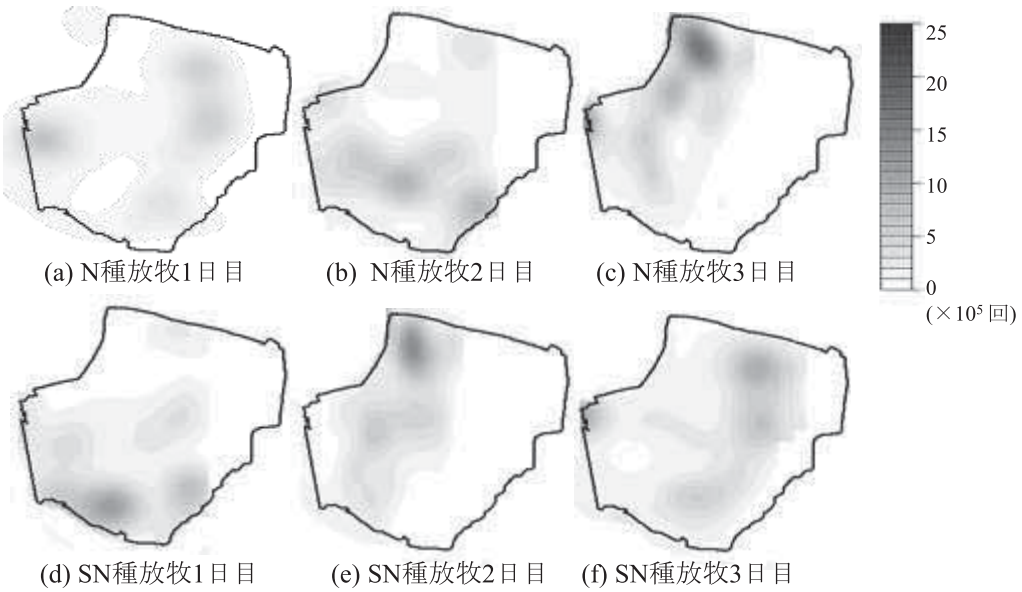


図 4　採食場所の分布密度

に記して謝意を表します。

参考文献

1) Dumont, B., Petit, M., D'hour, P., 1995. Choice of sheep and cattle between vegetative and reproductive cocksfoot patches. Appl. Anim. Behav. Sci. 43, 1–15.

2) 近藤誠司. 1987 牛群の行動適応に関する研究北海道大学農学部邦文紀要, 15(2): 192-233.

3) 畔柳　正・福田芳詔・東　善行・近藤　洋（1992）サラー種(♂)×日本短角種(♀)F1 の発育と増体成績，日本畜産学会東北支部会報 41(3)：157-161.

4) 萬田富治（2004）自然・食・ヒトの健康を保全する地域資源循環型畜産の構築―北里大学獣医学部牧場における理論と実践―，日草誌 50：453-460

5) McNaughtonJ.S., Georgiadis J.N.,1986 Ecology of African Grazing and Browsing Mammals.Annual Review of Ecology and Systematics.Vol. 17: 39-66

6) 農業食品産業技術総合研究機構（編），2009，日本飼養標準・肉用牛（2008 年版），中央畜産会，P86

7) 小倉振一郎・菅原和夫（1996）反芻家畜によるシロクローバ（*Trifolium repens*L.）の利用性-定時給餌および不断給餌下における緬羊のシロクローバ採食性-.日本草地学会誌, 42: 134-140.

8) R Development Core Team, 2007. R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. Available online: http://www.R-project.org/. Accessed Aug. 28, 2007.

9) 佐々木千鶴・西道由紀子・八代田真人・中辻浩喜・近藤誠司・大久保正彦，1997，集約放牧下における泌乳牛の採食位置，北海道草地研究会会報 31: 38 -41.

10) 篠田　満・須藤賢司・松村哲夫・梅村和弘（2009）ハンディ GPS を利用したホルスタイン種経産放牧牛の歩行時間からの採食行動時間の推定．日本草地学会誌 55：34-39

11) 白羽知子・清健太郎・鈴木直美・伊藤友紀・八代田真人・大谷　滋・大橋秀一（2013）放牧経験が放牧和牛の行動配分と採食行動に及ぼす影響．愛知農総試研報 45:85-9.

12) Swain D.L., Hutchings M.R., Marion G., 2007. Using a spatially explicit model to understand the impact of search rate and search distance on spatial heterogeneity within an herbivore grazing system. Ecological Modelling. 203, 319–326.

13) Tani Y., Yokota Y., Yayota M., Ohtani S. (2013) Automatic recognition and classification of cattle chewing activity by an acoustic monitoring method with a single-axis acceleration sensor. Computers and Electronics in Agriculture 92:54-65.

14) Umemura K., Wanaka T., Ueno T., 2009. Estimation of feed intake while grazing using a wireless system requiring no halter. J Dairy Sci. 92(3):996-1000. DOI: 10.3168/jds.2008-1073.

15) Vallentine, J.F., 2000. Grazing Management. Academic Press

16) Venables, W. N. and Ripley, B. D. (2002) Modern Applied Statistics with S. Fourth edition. Springer.

17) Watanabe N., Sakanoue1 S., Kawamura K., Kozakai T. (2008) Development of an automatic classification system for eating, ruminating and resting behavior of cattle using an accelerometer. Grassland Science 54:231–237.

18) 渡辺也恭・坂上清一・川村健介・吉利怜奈 (2013.10) 加速度計に基づく活動量計を用いた放牧牛の採食行動の識別. 日本草地学会誌 59：226-230.

19) 山口高弘（2011）東北アジア地域の次世代型肉用牛開発の展望–環境と調和した産肉システムの視点から–，東北畜産学会報 60（3）：39 ～ 57.

リモートセンシングを利用した草地における放射性汚染モニタリング

—牧草の分光反射スペクトルと放射性セシウムの関係—

鈴木由美子*・田中勝千*・寳示戸雅之*・皆川秀夫*

Monitoring of Radioactive Contamination in Grassland by Remote Sensing

—Relationship between Reflectance Spectra and Radioactive Cesium in Grassland—

Yumiko SUZUKI*, Katsuyuki TANAKA*, Masayuki HOJITO*, Hideo MINAGAWA*

[Keywords] Great East Japan Earthquake, hyperspectral camera, Image processing, Unmanned aerial vehicle.

1. 研究背景

2011年3月11日に発生した東日本大震災の地震と津波で，東京電力株式会社福島第一原子力発電所（以下，福島第一原発）の6基のうち1～3号機で電源をほとんど失い，原子炉内を十分に冷却できなくなった。津波後は，第1，2，3および4号機の炉心溶融（メルトダウン）が起き，その後建屋は水素爆発で損壊した（第1号機：3月12日，第2号機：3月14日，第3号機：3月14日，第4号機：3月15日）。その結果，大量の放射性物質が環境中に放出された。このうち，放射性ヨウ素（^{131}I）および放射性セシウム（^{134}Cs，^{137}Cs）の放出量は多かった。^{131}Iは，半減期が8.04日と短いことから，2011年の秋では検出されていない。一方で，^{134}Csは半減期が2.06年，^{137}Csは半減期が30.2年であることから，根を通じて作物可食部へ移行する経路が問題となる（山口ら2012）。

放射性セシウムに対する植物の吸収能は，移行係数（植物体の放射性セシウム濃度と乾土の放射性セシウム濃度の比）で評価される。移行係数は，植物の養分要求性と同様に，植物種間および品種間で差があることが認められている（Broadleyおよび Willey, 1997; Gouthuら1997；Broadleyら1999；山上ら 2009；山上ら 2010）。作物においては，可食部の放射性セシウム濃度に対する乾土の放射性セシウム濃度の比で表されることが多い。各作物の移行係数については，JAEA（落合ら 2009）等を参照されたい。この移行係数は，同一作物でも土壌条件，栽培条件および気象などの様々な要因によって異なるといわれており，移行係数に2桁ほどの幅がある（Ehlkenおよび Kirchner 2002）。よって，作物の放射性セシウムの吸収量は土壌のセシウム濃度からだけでは把握することが困難と考えられる。福島第一原発の事故後，福島県内の農地土壌は，放射性セシウムの検出限界値以下であったのが会津地方の2地点のみで，原発が立地する浜通りでは5,030 Bq kg^{-1}であった（農林水産省 2011）。そのため，農地においては作物への移行が長期的に懸念される。また，森林では，放射性セシウムは比較的動きやすい形態で保存され循環する。国土面積の 73%が中山間地域である日本においては，森林と隣接する農地が多く，森林からの放射性セシウムの流入も念頭に置き，農地の長期的なモニタリングが必要と考える。そこで本研究では，福島県南相馬市の森林と隣接する草地において，牧草の放射線汚染状況をモニタリングするための手法を検討することを目的とした。本論文では，リモートセンシングを用いて，非破壊・非接触で牧草の放射性セシウム推定の可能性について検討した。

2. 材料および方法

（1）調査対象地

本実験は，福島第一原発から20 km圏内に位置する福島県南相馬市小高区の3ヵ所の草地で実施した。この地区は，平成23年4月22日に警戒区域に指定され立入禁止となり，その後，平成24年4月16日に警戒区域の指定が解除され，避難指示解除準備区域（復旧・復興のための支援策を実施し，住民が帰還できるための環境整備を目指す区域）となった。

平成25年9～10月に，南相馬市内の草地内に125 m^2（10 m×12.5 m）の調査対象区を設け，2.5 m四方に区切った（20区画）。次に，耕起し（耕深：15 cmまたは25cm），堆肥およびカリ肥料を散布した。堆肥は，放射性汚染を受けていない堆肥（青森県十和田産堆肥，$^{134+137}$Cs濃度：0 Bq kg^{-1}，以下低濃度堆肥），低濃度堆肥と放射性汚染を受けた堆肥（福島県南相馬市産）を混ぜたもの（$^{134+137}$Cs濃度：2,782 Bq kg^{-1}，以下中濃度堆肥）および放射性汚染を受けた堆肥のみ（$^{134+137}$Cs濃度：5,574 Bq kg^{-1}）の3種とし，散布量を5 t/10aまたは10 t/10aとした。また，土壌中の交換性カリ含量を高めると植物体中の放射性セシウム濃度が低下するといわれていることから（Tsukadaら2002），カリ肥料は3水準（低：5 kg K_2O/10a，中：15 kg K_2O/10a，高：30 kg K_2O/10a）で散布した。その後，オーチャードグラス（ナツミドリ）を3 kg/10a程度手撒きして覆土した後，ケンブリッジローラーで鎮圧した（寳示戸，未公表）。

（2）調査方法

牧草の分光反射スペクトルおよび空撮画像は，2番草に当たる平成26年7月22日および23日に取得した。なお，取得時の牧草の生育ステージは，出穂期である。

分光スペクトルの測定には，観測波長域400～1000 nm，

*北里大学獣医学部　青森県十和田市東23番町35－1

波長分解能 6 nm のハイパースペクトルカメラ（ImSpectorV10，Specium）を用いた。このカメラは，PGP 方式のイメージング分光器と CCD により構成されており，ラインスキャナとして機能する。そのため，撮影対象物全体の画像を取得するためには，撮影光軸または対象物を移動させる必要がある。本研究では，三脚に固定した電動雲台の回転（1°/s）により，カメラの撮影光軸を移動させることで，撮影対象物全体のハイパースペクトル画像を取得した。取得画像は，岡本ら（2006a，2006b）によって設計・構築されたハイパースペクトル画像解析のためのソフトウェアフレームワークを基に開発したソフトウェアに取り組み，牧草の分光スペクトルを収集した。収集した分光スペクトルは，画像撮影時の光環境（照度，レンズの絞り値など）の違いで，同一個体の同一部であっても輝度レベルが異なる。そこで，輝度レベルを揃えるために，正規化処理を施した（岡本ら 2006b）。

空撮画像の取得には，嶋田ら（2014）が開発したマルチロータ UAV（Unmanned Aerial Vehicle）空撮システムを用いた。供試 UAV は 6 枚の回転翼を持つヘキサコプター（JABO，H601）で，ペイロードは約 500 g である。機体下部にセンサ架台として 2 軸制御型ジンバルを取り付けた。このジンバルにコンパクトデジタルカメラ（RICOH，GR）を搭載し，対地高度約 80 m から草地の可視画像を取得した（空間解像度：約 3 cm 以下，画像フォーマット：JPEG，図 1）。供試カメラのキャリブレーションには Agisoft Lens（Agisoft 製）を用いた。また，取得画像のモザイク，オルソ化には PhotoScan（Agisoft 製）を用いた。

画像取得後，牧草を刈取り，重量および放射性物質（^{134}Cs：セシウム 134，^{137}Cs：セシウム 137，^{40}K：カリウム 40）を測定した。なお，刈取り，重量および放射性物質の測定方法は寳示戸ら（2014 および 2015）を参照されたい。

3. 結果および考察

（1）分光反射スペクトルと放射性物質との関係

実験実施時期（7 月下旬）は，平均気温が 25.6℃（気象庁浪江気象台データ引用）と高く，牧草には夏枯れが観察された。特に夏枯れが顕著であった地点 1 の調査結果は割愛した。牧草の正規化受光強度を見ると，これまで観察されてきた同品種の牧草の分光反射特性（鈴木ら 2007）と同様の傾向であった（図 2）。受光強度と分析値（^{134}Cs，^{137}Cs，^{40}K）との間の相関係数（r）は，最大でも 0.4 に達することは無かった（$n = 40$）。しかし，波長に対する r の推移は ^{134}Cs と ^{137}Cs は同傾向（可視域：0.15～0.37，近赤外域：－0.36～－0.09）で，^{40}K とは異なった（可視域：－0.18～0.04，近赤外域：－0.05～0.15）。このことから放射性物質に対する作物の吸収能の違いを捕捉できていると考えられた（図 3）。また，変数選択による重回帰分析を適用した結果でも，検証時決定係数（R^2）の最大値は 0.2 以下であり，供試センサによる放射線物質濃度の影響を検出することが難しいことが推察された。一方，試験区の条件を考慮し，地点 2 と地点 3 の結果を個別に検討したところ，地点 2 では 450～580 nm の範囲で ^{134}Cs および ^{137}Cs のいずれも r は 0.6 程度を示した（地点 3 では 0.2～0.4 程度）。よって，緑色域の色濃度変化から放射性セシウムの推定の可能性が示された（図 6～7）。しかしながら，この領域に対する放射性セシウムとの関連性については，不明な点が多い。一般に緑色域は，全体の色素濃度の増加に伴い反射が高くなるといわれていることから（Seybold 1942），色素などの他の要素から間接的に推定している可能性が高い。

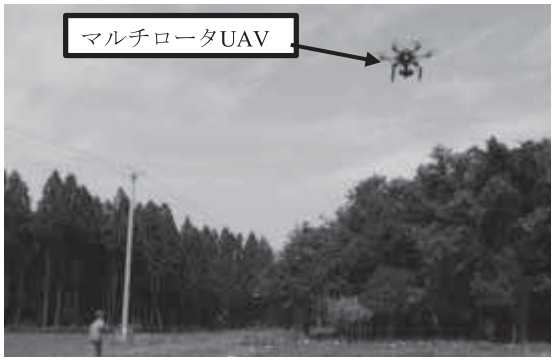


図 1　空撮実験の作業風景

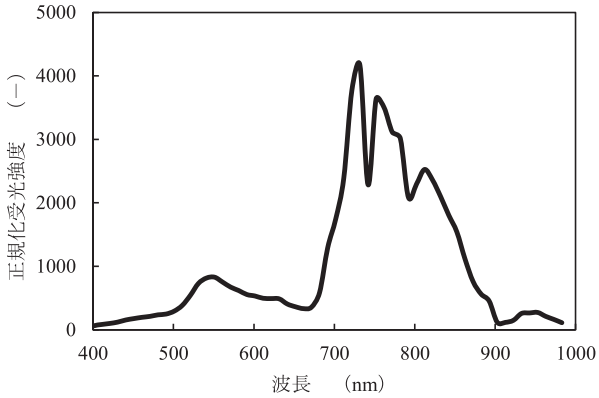


図 2　牧草の平均正規化受光強度

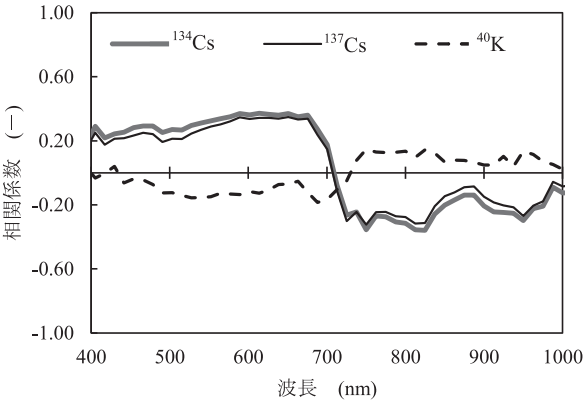


図 3　牧草の正規化受光強度と放射性物質濃度の関係

（2）空撮画像による牧草の放射性汚染状況の推定

緑色域から間接的に放射性セシウム濃度を推定の可能性

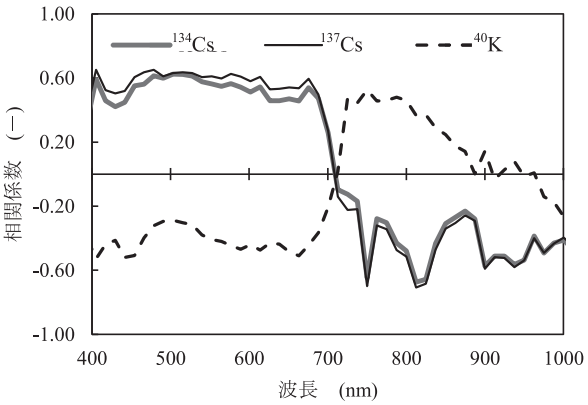


図 4　地点 2 の受光強度と放射性物質濃度の関係

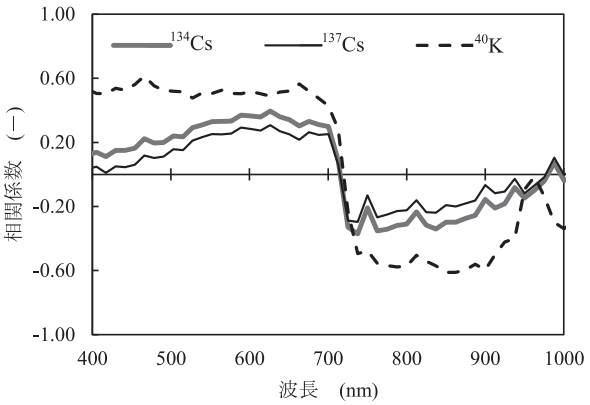


図 5　地点 3 の受光強度と放射性物質濃度の関係

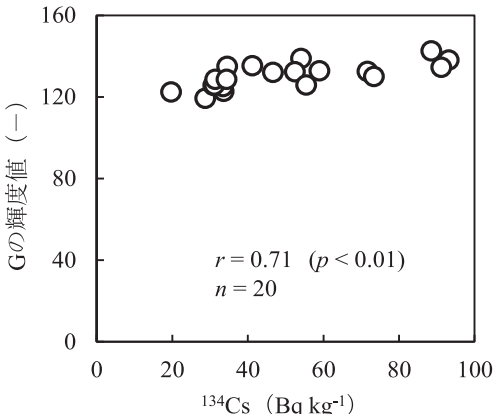


図 6　^{134}Cs と G の輝度値の関係

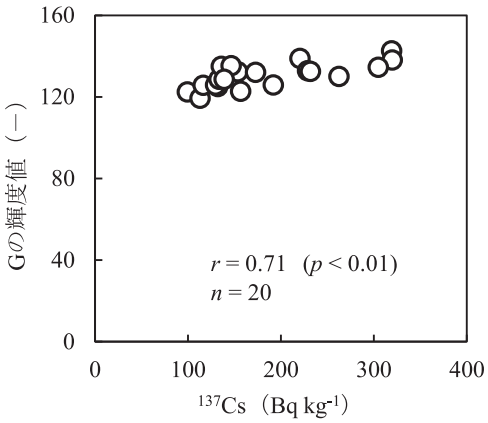


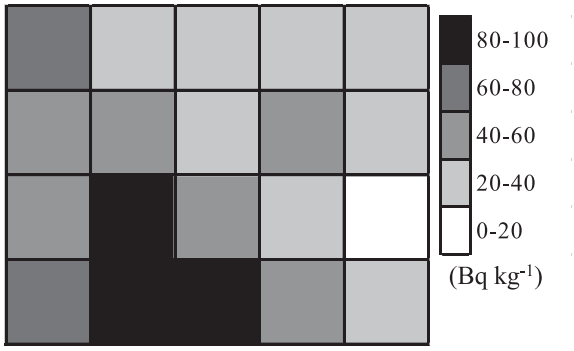
図 7　^{137}Cs と G の輝度値の関係

を考慮し，空撮画像から緑色域の色濃度（G）と放射性セシウムを比較したところ，r は ^{134}Cs および ^{137}Cs ともに 0.71 であった（$p < 0.01$，図 4〜7）。実測マップ（図 8（a））と G の濃度分布マップ（図 8（b））を比較してみると，放射性セシウム濃度が高い地点では輝度値も高くなり，区画内の相対的なセシウム濃度を概ね反映していることが示唆された。しかしながら，先述したように，緑色領域は色素濃度と関連することから，色素の濃度差から間接的に推定していると推察される。

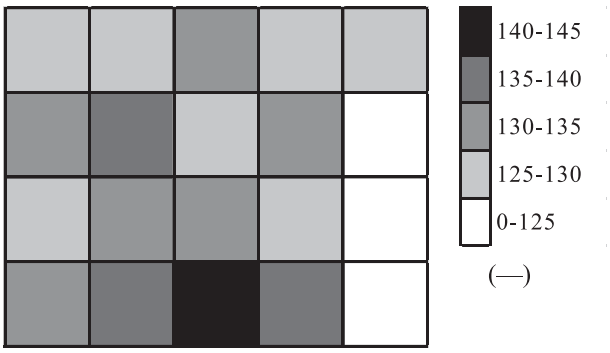
4. 摘要

本研究では，森林と隣接する草地において，牧草の放射線汚染状況をモニタリングするため，リモートセンシングにより牧草の放射性セシウム濃度の推定の可能性について検討した。その結果，下記のことが明らかとなった。

1) 近接観測で取得した分光スペクトルと放射性セシウム濃度（^{134}Cs および ^{137}Cs）の r は，波長 450〜580 nm で 0.6 程度であった。
2) 空撮画像により取得した緑色光の輝度値と放射性セシウム濃度の r は 0.71 で，緑色光を利用することで区画内の相対的なセシウム濃度を定性的に把握できる可能性が示された。
3) 今回の測定では，牧草に夏枯れが観察されたことから，



(a) ^{134}Cs濃度分布図



(b) 緑色光の輝度値分布

図 8　^{134}Cs 濃度の分布と緑色光の輝度値分布

撮影適期での画像取得が困難であった。加えて，取得データと放射性セシウムとの間には高い相関が認められたものの，波長と放射性セシウムとの関連性については不明な点が多い。緑色光域は，光合成色素濃度や葉色と関連することから，これらの要素から間接的に推定している可能性が高い。そのため，更なる検証が必要と考える。

謝辞

本研究は，北里大学東日本大震災復興支援研究（課題名：放射線影響下における農業･自然生態系および家畜の管理に関する実践的支援研究）の一部として実施しました。

調査区の選定，現地調査および牧草の成分分析では，北里大学獣医学部附属 FSC および北里大学獣医学部獣医放射線学研究室の教職員の皆様には多大なる御協力，御支援を頂きました。また，秋田県立大学の嶋田浩准教授には，UAV に関わる研究テーマ立ち上げ当初から今日に至るまで有益な御教示，御助言を頂きました。さらに，調査試験区を提供して頂いた半杭様，渡邊様には多大なる御協力を頂きました。ここに記して感謝の意を表します。

引用文献

1) Broadley, MR., Willey NJ., Mead A. (1999) A method to assess taxonomic variation in shoot caesium concentration among flowering plants. Environmental Pollution, 106, 341-349
2) Broadley MR., Willey NJ. (1997) Differences in root uptake of radiocaesium by 30 plant taxa. Environmental Pollution, 97, 11-15.
3) Entry JA., Watrud LS., Reeves M. (2001) Influence of organic amendments on the accumulation of Cs-137 and Sr-90 from contaminated soil by three grass species. Water Air and Soil Po llution, 126, 385-398
4) Gulin SB., Polikarpov GG., Martin JM. (2003) Geochronological reconstruction of Cs-137 transport from the Coruh river to the SE Black Sea: comparative assessment of radionuclide retention in the mountainous catchment area. Continental Shelf Research, 23: 811-1819
5) 寳示戸雅之（2015）帰還困難区域森林・草地土壌の放射性セシウム放射能の実態 ―浪江町小丸地区における空間線量率と土壌汚染の定点観測結果 2013 年 5 月～2014 年 12 月―，日本草地学会 2015 年信州大会（小集会）.
6) 寳示戸雅之・伊藤伸彦・佐藤　至・佐藤衆介・岡田啓治・鈴木由美子（2014）帰還困難区域森林・草地土壌の放射性セシウム放射能の実態，日本土壌肥料学会 2014 年度東京大会講演要旨集.
7) 気象庁，過去の気象データ（浪江気象台）http://www.data.jma.go.jp/obd/stats/etrn/view/daily_a1.php?prec_no=36&block_no=0295&year=2014&month=7&day=&view=（accessed 2015.9.26）
8) 農林水産省（2011）農地土壌の放射性物質濃度分布図の作成について．http://www.s.affrc.go.jp/docs/press/110830.htm.（accessed 2015.9.26）
9) 落合透・竹田聖司・木村英雄（2009）生物圏評価のための土壌から農作物への移行係数に関するデータベース．JAEA-Fata/Code, 1-62
10) 岡本博史・酒井憲司・村田哲郎・片岡　崇・端 俊一（2006a）ハイパースペクトル画像による多目的解析に対応したオブジェクト指向ソフトウェアフレームワークの構築．農業情報研究 15：103-112.
11) 岡本博史・酒井憲司・村田哲郎・片岡　崇・端 俊一（2006b）ハイパースペクトル画像解析フレームワークを利用したリモートセンシングソフトウェアの開発．農業情報研究 15：219-230.
12) Seybold, A. (1932) Uber die optischen Eigen-schaften der Laubl~itter, Planta 16: 195-226.
13) 嶋田　浩・永吉武志・田中勝千・中坪あゆみ（2014）マルチコプタ型 UAV を用いたパーソナルリモートセンシングシステムの開発，第 73 回農業食料工学会年次大会講演要旨集：278.
14) 鈴木由美子･田中勝千･加藤 亘･岡本博史･片岡　崇･端俊一・嶋田 浩･杉浦俊弘･嶋 栄吉（2007）牧草成分の推定システムの開発－ハイパースペクトルイメージングセンサを利用した牧草成分の推定－．農業機械学会誌 69（5）：43-51.
15) Tsukada H., Hasegawa H., Hisamatsu S., Yamasaki S (2002) Transfer of 137 Cs and stable Cs from paddy soil to polished rice in Aomori, Japan.J.Environ.Radioact 59 : 351-365.
16) Tucker C.J. (1979) Red and photographic infrared linear combinations for monitoring vegetation. Remote Sens. Environ, 8: 27-150.
17) 山口紀子・高田裕介・林健太郎・石川　覚・倉俣正人・江口定夫・吉川省子・坂口　敦・朝田　景・和穎朗太・牧野知之・赤羽幾子・平舘俊太郎（2012）土壌－植物系における放射性セシウムの挙動とその変動要因，農環研報，31：75-129.
18) 山上　睦・箭内真寿美・久松俊一（2009）第 3 章　植物の元素集積性に関する調査研究．平成 20 年度環境科学技術研究所年報，27-29
19) 山上　睦・箭内真寿美・久松俊一（2010）第 3 章　植物の元素集積性に関する調査研究　平成 20 年度環境科学技術研究所年報，http://www.ies.or.jp/japanese/research/seikaH20pdf/3_H20 .pdf

外来生物ブタナの分光スペクトルにおよぼす生理的特性の影響

鈴木由美子*・田中勝千*・皆川秀夫*

Spectral Properties of *Hypochaeris radicata* Affected by Physiological Characteristics

Yumiko SUZUKI*, Katsuyuki TANAKA*, Hideo MINAGAWA*

Abstract

Hairy cat's ear (*Hypochoeris radicata* L.; non-native species) has been widely distributed throughout in Hakkoda, Tashirotai farm, where its disturbance of the ecosystem is a severe issue. The long-term objective of this study is to estimate spatial distribution of *H. radicata* in Tashirotai area. In this paper, the relationship between spectral properties and physiological characteristics of *H. radicata* and grasses (orchardgrass and timothy) was described. As the results, spectral properties in the visible and near-infrared regions between *H. radicata* and grasses were different. Chlorophyll a+b contents were 38.3 ± 1.7 μg/mL (*H. radicata*) and 43.6 ± 4.6 μg/mL (grasses), and carotenoids contents were 6.6 ± 0.3 μg/mL (*H. radicata*) and 7.0 ± 0.3 μg/mL (grasses). Moisture contents were 87.2 ± 1.0 % (*H. radicata*) and 72.4 ± 1.5 % (grasses). The thicknesses of epidermis were 22.2 ± 4.3 μm (*H. radicata*) and 21.0 ± 5.9 μm (grasses), and thicknesses of leaf were 306.8 ± 12.0 μm (*H. radicata*) and 160.4 ± 8.6 μm (grasses). Spectra were considered to reflect the differences in the moisture contents and anatomy of leaves.

[Keywords] grassland ecosystem, visible and near-infrared region, moisture, photosynthetic pigment, anatomy of leaf

1. 研究背景

八甲田山麓に広がる田代平地域では，1860 年代から牛馬の放牧がおこなわれ，ノシバ（*Zoysia japonica* Steud.）を主体とした天然シバ草地が形成・維持されてきた。その後，この牧野景観が評価されて 1936 年に十和田国立公園（現在，十和田八幡平国立公園）の一部となった（中道 1956）。1960 年代からは，外来牧草を導入した草地造成が進められ，放牧利用が拡大した。しかしながら，牛肉の輸入自由化を契機に 2000 年以降は放牧利用が減少し，様々な植物が進入しやすい環境となった。近年では外来生物法により要注意外来生物に指定されているブタナ（*Hypochoeris radicata* L.）が散見され始めた（図 1，十亀ら 2011）。ブタナは多年生草本で，タンポポに似た形状をしており，タンポポモドキとも呼ばれている。様々な土壌環境に対する適応性が高く，耐寒性および踏み付け・刈取りに対する耐性がある。また，牧草の生長を抑制することも明らかとなっている。田代平に生息するブタナの遺伝子解析の結果，ブタナは人工草地から天然シバ草地に遺伝子流動が起こっていることが明らかとなった（十亀ら 2011）。このことから，ブタナの生息域拡大は牧野景観の乱れや草地生態系への負の影響を及ぼすことが推察される。ブタナの生息を抑制する前提として，ブタナの分布域把握が必要となるため，本研究グループではリモートセンシングによりブタナの分布域推定を試みた。これまで，ブタナとイネ科草の可視・近赤外分光スペクトルを用いた草種判別法について検討してきたものの（小泉ら 2013，鈴木ら 2014），分光スペクトルの差異が発生する要因の解明には至ってない。一方で，可視・近赤外におけるスペクトル特性に対して植物種や環境要因，生物的要因（光合成色素や水分，葉齢，葉組織，葉面の毛やワックスの有無など）が影響することは明らかとなっている（玖村および石井 1971）。そこで，本報では生物的要因を踏まえたブタナ分布域推定手法を開発するために，

図 1　外来生物ブタナ
出典：改訂版原色牧野大圖鑑

*北里大学獣医学部　青森県十和田市東 23 番町 35－1

ブタナとイネ科草の分光スペクトルに影響を及ぼす生理的特性を明らかにすることを目的とした。

2. 材料および方法

(1) 調査対象

本研究では，田代平牧場の採草地に生息する草種と同一であるブタナとイネ科草（オーチャードグラス（*Dactylis glomerata* L.）およびチモシー（*Phleum pratense* L.））の葉部を田代平牧場および北里大学獣医学部十和田キャンパス内から採取し，サンプルとした。なお，サンプルの生育ステージは，出穂期または開花期である。

（2）分光反射スペクトル測定

ブタナおよびイネ科草のサンプル 1.0 g を 6 cm 四方の黒色容器に入れ，可視・近赤外分光器（HSR8100，マキ製作所，観測波長域：400～1000 nm，波長分解能：6 nm）および近赤外分光器（C9913，浜松フォトニクス，観測波長域：400～1000 nm，波長分解能：7 nm）により 400～1700nm の分光反射スペクトルを測定した。なお，サンプルの 4 方向からスペクトルを測定し，各測定の反復回数を 100 回とした。測定したサンプルの反射強度は，標準白色板の反射強度で除すことで反射率に変換した。なお，後述する各草種の生理的特性および形態的特性の測定では，本測定で供試したサンプルを用いた。

（3）生理的特性の測定

水分は，サンプル 0.8 g を 70℃で 48 h 以上通風乾燥させ，生草重量に対する水分量の割合により求めた。

光合成色素の抽出には様々な手法があるが，本研究では intact な葉から直接抽出が可能な測定法である，N,N-ジメチルホルムアミド（dimethylformamido，以下 DMF）による抽出を試みた。まず，DMF をマイクロピペットで 4 μL 量りとり，試験管にサンプル（0.1 g）と DMF を入れた。なお，効率的に色素が抽出できるように葉は 2 mm 四方に細断した。試験管をパラフィルムで密封し，光による色素分解を防ぐためアルミホイルで遮光した。その後，冷暗所で 3 日間静置して色素を抽出した。色素の定量では，光路長 10 mm で 480.0 nm，646.8 nm，663.8 nm および 750.0 nm の吸光度を分光光度計（UV mini 1240，島津製作所）により測定し， Wellburn（1994）の算出式（式 1－4）により単位容積当たりのクロロフィル a（Chl_a），クロロフィル b（Chl_b），総クロロフィル（Chl_a+b）およびカロテノイド群（Car_total）の色素量を求めた。

$$\mathrm{Chl_a} = 12 \times A_{663.8} - 3.11 \times A_{646.8} \quad \text{（式 1）}$$

$$\mathrm{Chl_b} = 20.78 \times A_{646.8} - 4.88 \times A_{663.8} \quad \text{（式 2）}$$

$$\mathrm{Chl_a+b} = 17.67 \times A_{646.8} + 7.12 \times A_{663.8} \quad \text{（式 3）}$$

$$\mathrm{Car_total} = (1000 \times A_{480.0} - 1.12 \times \mathrm{Chl_a} - 34.07 \times \mathrm{Chl_b}) / 245 \quad \text{（式 4）}$$

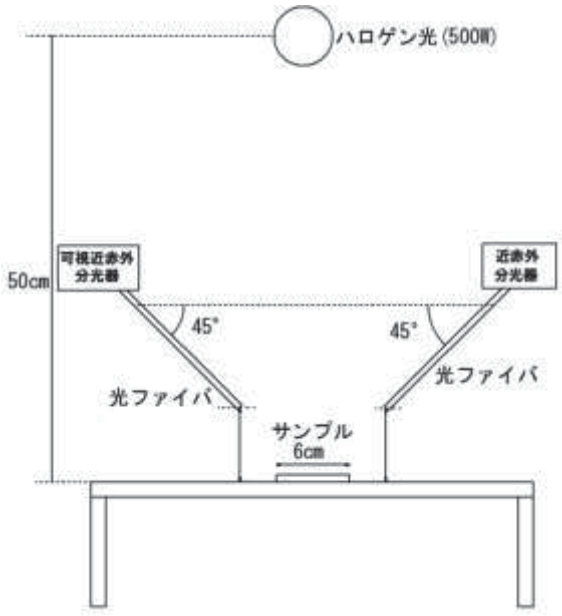


図 2 スペクトル測定の概要

ここで $A_{663.8}$：663.8 nm で測定された吸光度から 750 nm で測定された吸光度を引いた値

$A_{646.8}$：646.8 nm で測定された吸光度から 750 nm で測定された吸光度を引いた値

$A_{480.0}$：480.0 nm で測定された吸光度から 750 nm で測定された吸光度を引いた値

（4）形態的特性の測定

形態的特性として，葉の断面構造を観察した。まず，カミソリを用いて葉の薄く切り，観察用プレパラートを作成した。次に，光学顕微鏡（BX-51，OLYMPUS）により検鏡し，内部形態的特徴として，葉表面の毛の有無，表皮および葉全体の厚さ，柵状組織および海綿状組織の構造等について観察した。その後，葉断面の画像をデジタルカメラ（CANON, X7i）により取得し，各特徴を定量的に把握するため，画像解析ソフトウェア（マイクロ MAGIC，マイクロネット）により厚さや太さを測定した。

3. 結果および考察

可視・近赤外領域におけるブタナとイネ科草の反射率は，500 nm 付近の可視・緑色光域および 700 nm 以降の近赤外域ではブタナがイネ科草に比べて低い値を示した（図 3 および 4）。一般に，可視・近赤外光域における分光スペクトル特性は，葉内色素や葉齢，水分，葉組織の発達等に関連しているといわれており，特に 400～700 nm は色素類に関連するとされている（Seybold 1932，中路 2009）。以上のことから，これらの特徴は，光合成色素量や水分などの生理的特性，葉の内部の形態的特性を反映した結果と推察できる。

ブタナの水分は，イネ科草と比較して低い値を示した（$p < 0.01$，ブタナ：87.2±1.0 %，イネ科草：72.4±1.5 %，図 5）。

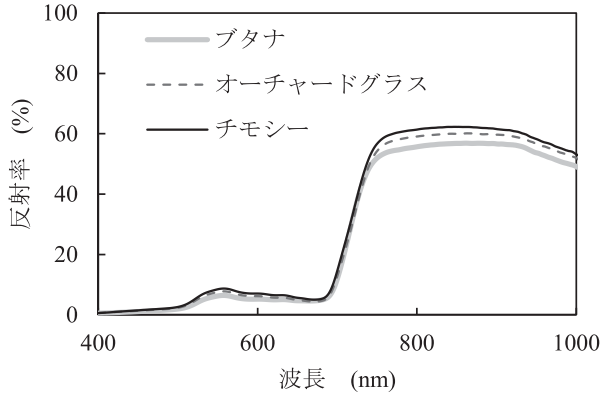


図 3　可視・近赤外光域の分光反射スペクトル

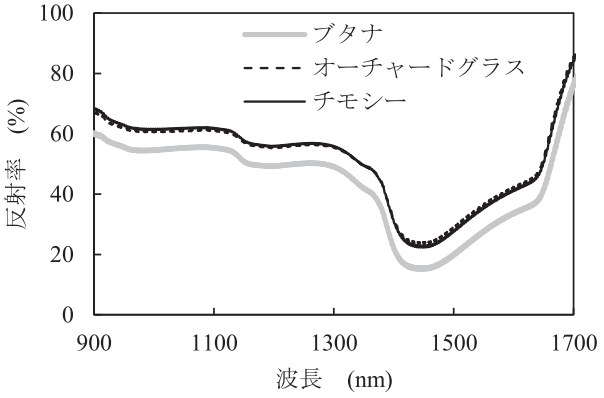


図 4 近赤外光域の分光反射スペクトル

今回測定した波長域における水分の吸収体は, 1,450 nm および 970 nm である。これらの領域は，水分が高いと反射率が低下し，水分が低下すると反射率が高くなる。1,450 nm における反射率は，1,300 nm と比較してブタナでは 44.8%，イネ科草では 33.4%減少していた。よって，この領域は水分を反映した結果と考えられる。970 nm における反射率は，わずかに低下が見られるものの，2 種間で大きな差が確認できなかった。

光合成色素は, クロロフィル a はブタナとイネ科草で同等であったものの，クロロフィル b ($p < 0.1$，ブタナ : 16.0 ± 1.5 μg/mL，イネ科草： 21.2 ± 5.1 μg/mL)，総クロロフィル（$p < 0.05$, ブタナ : 38.3 ± 1.7 μg/mL, イネ科草: 43.6 ± 4.6 μg/mL）およびカロテノイド群（$p < 0.01$，ブタナ：6.0 ± 0.1 μg/mL, イネ科草 : 7.0 ± 0.1 μg/mL）では差がみられた（図 6)。そのため，ブタナとイネ科草の色素含量は異なるといえる。一般に, クロロフィルの分解はグリーンピークよりも右側の反射率を増大させ, カロテノイド群の分解はグリーンピークより左側の反射率を増大させる（中路 2009)。測定した分光反射スペクトルは，青色光域（400～500 nm）は同等であったものの，赤色光域（650～690 nm）ではブタナが高い値を示した（$p < 0.05$)。赤色光域はクロロフィルと関連していることから, 総クロロフィルの含量の差を反映した結果と考えられた。緑色光域（500～600 nm）は，イネ科草がブタナより高い値を示した ($p < 0.1$)。この領域は色素と関連しており，全体の色素濃度の増加に伴い反射が高くなるといわれている（Seybold 1942)。よって，可視域における分光反射スペクトル特性は, 色素含量を反映した結果であることが示唆された。また，鈴木ら（2014）が求めたブタナとイネ科草の葉部判別に有効な 6 つの波長帯（712 nm，662 nm，692 nm，702 nm，561 nm および 752 nm）は，葉内色素の波長選択性に依存している領域であることから（中路 2009)，色素含量の差はブタナとイネ科草の判別に有効な指標と判断できる。しか

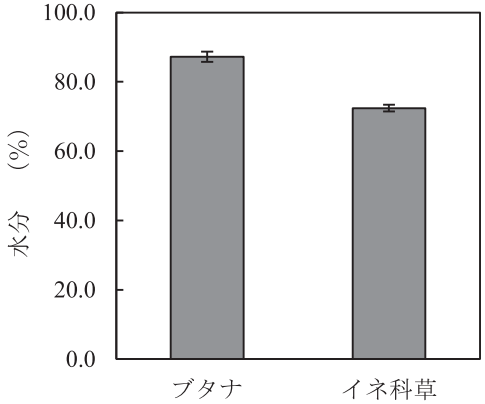
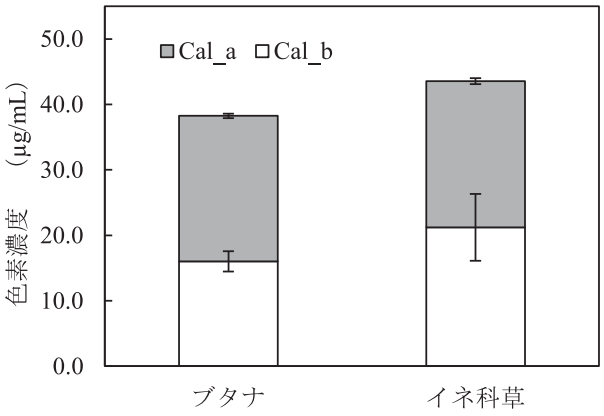
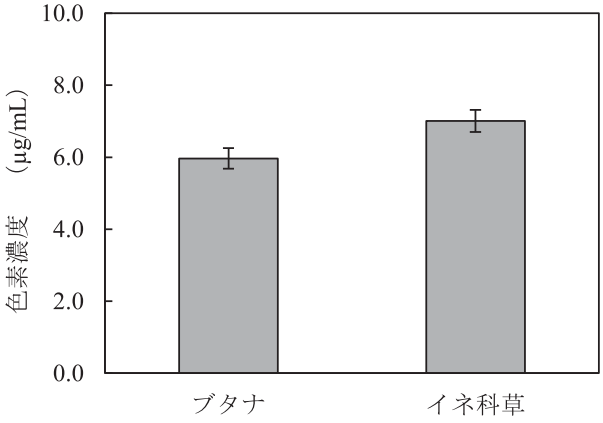


図 5　ブタナとイネ科草の水分



(a) クロロフィルの濃度



(b) カロテノイド群の濃度

図 6　ブタナとイネ科草の光合成色素濃度

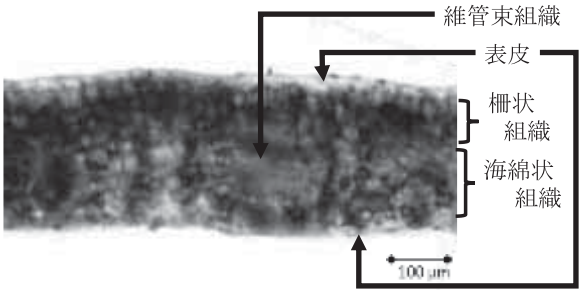


図 7　ブタナの葉の断面構造

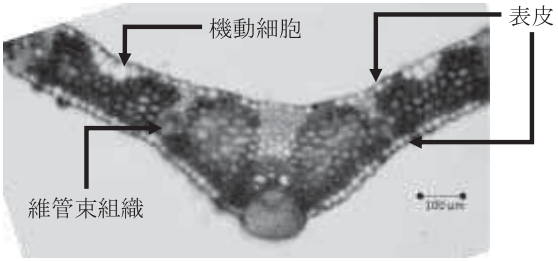


図 8　イネ科草の葉の断面構造

しながら，カロテノイドの濃度差とスペクトルとの関係については，更なる検討が必要と考える。

ブタナとイネ科草の内部形態的特徴は大きく異なっていた（図 7 および 8）。両種ともに外部に突出した毛を有するが，ブタナは太く牛角型の毛が密生していた。この毛の太さは 87.2 ± 25.9 μm であった。葉および表皮の厚さは，ブタナが 306.8 ± 12.0 μm および 22.2 ± 4.3 μm で，イネ科草が 160.4 ± 8.6 μm および 21.0 ± 5.9 μm であった。また，葉肉組織は，ブタナでは表面側に柵状組織があり，柱状細胞が密生して並んでいた。そして，裏面側に海綿状組織があり，不規則に細胞が数層あった。一方，イネ科草は，機動細胞（イネ科植物の葉の表皮において珪酸体を形成する細胞）および維管束組織が確認できるものの，ブタナと比較して柵状組織と海綿状組織の区別が明瞭ではない。一般に，内部組織の空隙率の違いで反射・散乱の特性が異なり，特に近赤外光域の反射特性に対して影響を及ぼす。よって，上述したような形態的違いにより葉内の光の反射・散乱過程が異なると推察できる。

これらのことから，ブタナとイネ科草の分光反射スペクトルは，可視域においては光合成色素含量を反映しており，近赤外光域においては葉内水分および内部組織の配置の違いを反映していたことが示唆された。今後は，生態的・形態的特性を踏まえたブタナ検出またはブタナ被度推定に有効な波長帯の選択が必要と考える。

4. 摘要

田代平に生息する要注意外来生物ブタナの分布域をリモートセンシングにより把握するための基礎研究として，分光反射スペクトルに及ぼすブタナとイネ科草の生理的・形態的特性の影響を明らかにすることを目的とした。その結果，以下のことが明らかとなった、

(1) ブタナとイネ科草の可視・近赤外における分光反射スペクトルには違いがあり，600-700 nm の可視域ではブタナがイネ科草に比べて高く，700 nm 以降の近赤外域ではブタナがイネ科草に比べて低い値を示した。

(2) ブタナとイネ科草の光合成色素含量には有意な差があり，可視域における反射特性は光合成色素含量を反映した結果と推察された。

(3) ブタナとイネ科草の水分量，葉表面の毛の太さ，葉および表皮の厚さには違いがあり，近赤外域における反射特性は水分や葉の内部構造の違いを反映した結果と推察された。

謝辞

本研究の一部は，平成 27 年度北里大学学術奨励研究（若手研究）の助成により実施した。ここに記して感謝の意を表する。

引用文献

1）小泉佑太，田中勝千，鈴木由美子，杉浦俊弘，皆川秀夫（2013）田代平地域におけるブタナ分布域推定のための基礎研究．農業食料工学会東北支部報．60：65-68.

2）玖村敦彦· 石井龍一（1971）葉における光の反射· 吸収· 透過．作物の光合成と物質生産．戸苅義次監修．養賢堂．東京．pp29-34.

3）中路達郎（2009）葉群の分光反射と分光植生指数．低温科学，67：497-506.

4）中道　等（1956）田代牧野沿革史，田代牧野畜産農業協同組合，野澤印刷，24-30.

5）Seybold, A. (1932) Uber die optischen Eigen-schaften der Laubl~itter, Planta 16: 195-226.

6）十亀　彩，杉浦俊弘，小島達也，森大祐，横川輝，馬場光久，陶山佳久（2011）八甲田山田代平のシバ草地に侵入しているブタナの遺伝学的解析．日本生態学会第 58 回全国大会 (2011 年 3 月，札幌) 講演要旨集：P2-319.

7）鈴木由美子，小泉佑太，田中勝千，皆川秀夫（2014）八甲田山麓の田代平に分布する外来生物ブタナのスペクトル特性．日本リモートセンシング学会第 57 回学術講演会講演要旨集：P04.

8）Wellburn, AR (1994) The spectral determination of chlorophyll a and chlorophyll b, as well as total carotenoids, using various solvents with spectrophotometers of different resolution. Journal of Plant Physiology, 144 (3): 307-313.

家畜ふん尿を利用したユーグレナの利活用に関する基礎研究（第 2 報）

―炭素源がユーグレナの増殖に与える影響―

戸松央理*・田中勝千**・皆川秀夫**・鈴木由美子**・鈴木健吾***・中野良平***・渡邉翔太***

Basic Research on Utilization of *Euglena* using Livestock manure (Part2)

―Effects of carbon source has on the growth of *Euglena*―

Ori TOMATSU・Katsuyuki TANAKA・Hideo MINAGAWA・Yumiko SUZUKI・Kengo SUZUKI・Ryohei NAKANO・Shota WATANABE

Abstract

The long-term objective of this study is to develop a method for recovery-reusing of nutrient from the livestock manure using *Euglena*, which can accumulate nitrogen and phosphorus under heterotrophic and phototrophic conditions. In this paper, we investigate the effects of pH and carbon source on the growth of *Euglena* in three mediums such as Cramer and Myers medium (CM medium), CM medium adding glucose (CMG medium) and swine manure. Each medium was adjusted to pH 3.5 with hydrochloric acid prior to culturing. 150 mL of mediums were placed into Erlenmeyer flask. Total number of sample was 15 (CM medium: 6, CMG medium: 6, swine manure: 3).The put of three samples of CM medium and CMG medium were maintained at 3.5 during culturing, and the remaining samples were not adjusted pH. Then, *Euglena* was added to mediums, and followed the changes in cell number. As a result of cultivating *Euglena*, *Euglena* cells in CM medium were increased after adding carbon source 10 g, and the cells in CMG medium increased by maintaining the pH 3.5. The cells in swine manure were increased with increasing concentration of NH_4-N and PO_4-P in the medium. Consequently, the growths of *Euglena* were influence by concentration of nutrients and pH in the medium.

[Keywords] livestock manure, pH, carbon source, *Euglena*

1. はじめに

我が国の家畜から排せつされるふん尿量は約 8,500 万 t と推計されている（農林水産省，2014）。近年，畜産経営の急激な拡大，高齢化に伴う農作業の省力等を背景に家畜排せつ物の資源としての利用が困難になりつつある一方，悪臭など地域の生活環境に関する問題も乗じている。そのため，平成 11 年に「家畜排せつ物の管理の適正化及び利用の促進に関する法律」が施行され，管理の適正化に向けた管理施設の整備が進められた。

家畜排せつ物の処理は主に堆肥化・液肥化・浄化に大別される（前田，2006）。浄化によって処理された家畜排せつ物は，水質汚濁防止法で定められた排水基準（表 1）に沿って河川へ放流されているが，従来の方法では完全に養分を取り除くことが難しく，河川の水質汚濁や湖沼の富栄養化を誘発している（農林水産省，2014）。家畜排せつ物にはリンや窒素が豊富に含まれているが（横内ら，2006），リンは近年枯渇が懸念されている資源である（黒田，2005）。家畜排せつ物から未利用資源を回収することができれば，リン資源枯渇の問題と家畜排せつ物の浄化処理に貢献出来る。

本研究ではリンや窒素を吸収する能力をもつユーグレナを利用して，家畜排せつ物中のリンや窒素などの未利用資源を回収する技術の開発を目指すこととし，第 1 報では，家畜ふん堆肥の抽出液を利用してユーグレナを培養できることを示した。堆肥の抽出液でユーグレナを培養した場合，豚尿を用いた場合と比べて，増殖した細胞数が少なかった。これは，培地中の養分濃度の違いが原因であると考え，堆肥の抽出液よりもリンや窒素濃度の高い豚尿がユーグレナの培養に適していると考えた。

本報では，ユーグレナを利用した家畜排せつ物中の未利用資源の回収を目的とし，基礎実験として Cramer-Myers 培地（Cramer and Myers, 1952. 以下 CM 培地）（Cramer ら，1952）を用いてユーグレナの培養を行い，pH 調整および炭素源の有無がユーグレナの増殖に与える影響を検討した。また，豚尿を培地として用いた場合のユーグレナの細胞数の推移を検討した。

表 1　排水基準項目（一部抜粋）

項目	排水基準
pH	5.8～8.6
BOD	160 mg/L（日間平均120 mg/L）
COD	160 mg/L（日間平均120 mg/L）
SS	200 mg/L（日間平均150 mg/L）
窒素	120 mg/L（日間平均60 mg/L）
リン	16 mg/L（日間平均8 mg/L）

（環境省「一律排水基準」，2015）

*北里大学大学院獣医学系研究科　〒034-8628　青森県十和田市東二十三番町 35-1
**北里大学獣医学部　〒034-8628　青森県十和田市東二十三番町 35-1
***株式会社ユーグレナ 研究開発部 中央研究所　神奈川県横浜市鶴見区小野町 75-1

2.　材料および方法

(1) 供試藻体

(独) 国立環境研究所生物系統保存施設より分譲された *Euglena gracilis* Klebs 株（NIES-49）を藻種とした。ユーグレナの培養に適する培地として，Hutner 培地（Schiff ら，1971），Koren-Hutner 培地（Koren ら，1967），CM 培地等が挙げられる。本研究では，CM 培地を用いて無菌的に培養したものを供試藻体とした。

(2) ユーグレナ（*Euglena*）

ユーグレナ（和名：ミドリムシ）は植物と動物の中間に位置する微細藻類であり，0.1 mm 程の大きさである。光合成によって栄養分を体内に蓄えるだけでなく，動物のように細胞を変形させて移動することができる。リンや窒素を資化する能力を持ち，1 日に 1 回分裂という高い増殖能力を持っている。また，大気中の約 1,000 倍の二酸化炭素濃度の中や，高濃度の栄養塩類を含む汚水中（メタン発酵消化液など）でも生存できるという，高い生存能力を有する（森山ら　2014）。*Euglena* 属には多くの種が含まれるが，本研究では生化学実験等で一般的に用いられ増殖が速く，扱い易い *Euglena gracilis* という種を使用している。以下，ユーグレナとは *Euglena gracilis* のことを指す。

(3) 供試培地および養分分析

供試培地として，CM 培地，CM 培地に炭素源としてグルコース（10 g/L）を添加したもの（以下 CMG 培地），北里大学フィールドサイエンスセンター十和田農場豚舎より採取した豚尿をろ過した豚尿（原尿）培地の 3 種類とした。各培地は塩酸を用いて初期 pH を 3.5 に調整した。また，簡易水質計（L-8021，共立理化学研究所）を用いて抽出液中の養分（リン酸態リン濃度　PO_4-P），（硝酸態窒素濃度　NO_3-N），（アンモニウム態窒素濃度　NH_4-N）を測定した。

(4) pH 調整および炭素源の有無が増殖に与える影響

300 mL 三角フラスコに CM 培地あるいは CMG 培地を各 150 mL 入れたものをそれぞれ 6 サンプル作製し，ユーグレナ（8.0×10^5 cells/mL）を添加した。培養期間中，それぞれ 3 サンプルは pH 調整無しとし，残りの 3 サンプルは pH 調整有りとした。pH 調整有りのサンプルは，塩酸または水酸化ナトリウムを用いて pH を 3.5 に維持した。

(5) 豚尿を用いたユーグレナの培養

300 mL 三角フラスコに豚尿（原尿）培地 150 mL を入れ，ユーグレナ（8.0×10^5 cells/mL）を添加したものを 3 サンプル作製した。

(6) 細胞数の計測および保管方法

細胞計測装置（コールター—カウンターZ2, BECKMAN COULTER）を用いて細胞数を計測した。また，供試藻体および実験サンプルは，温度 26 ℃，明期 12 h，暗期 12 h，照度 5,000 Lux に設定したインキュベーター（FLI-2000H 型，東京理科器械株式会社）内で保管した。

3.　結果および考察

図 1 に CM 培地の細胞数の推移を示した。細胞数の増加は光合成によると考えられ，細胞数は徐々に増加し pH 調整の有り，無しともに 21 日目で最大となった。pH 調整の有無による有意な差は見られなかった（$p>0.05$）。図 2 に CMG 培地の細胞数の推移を示した。培養開始から急激な細胞数の増殖が確認でき，10 日目で細胞数は最大となりその後平衡状態となった。8 日目以降から pH 調整の有無による有意な差が見られ（$p<0.05$），pH 調整有りの方が細胞数の増殖が良い結果となった。図 1，2 を比較すると，CMG 培地の最大値は CM 培地の約 5 倍であった。このことから，炭素源を加え pH 調整をすることで細胞数の最大値を高めることができた。

図 3 に，CM 培地および CMG 培地の pH 調整無しの pH 値の推移を示した。CM 培地は緩やかに pH 値が低下しており，22 日目では pH3 を下回った。CMG 培地では 6 日目まで急激に低下し，その後 pH2 付近で平衡状態となった。細胞数の増加と pH の減少が同時期にあることから，pH 低下の要因として，細胞数の増加に伴い代謝産物として有機酸が蓄積したことが考えられる。

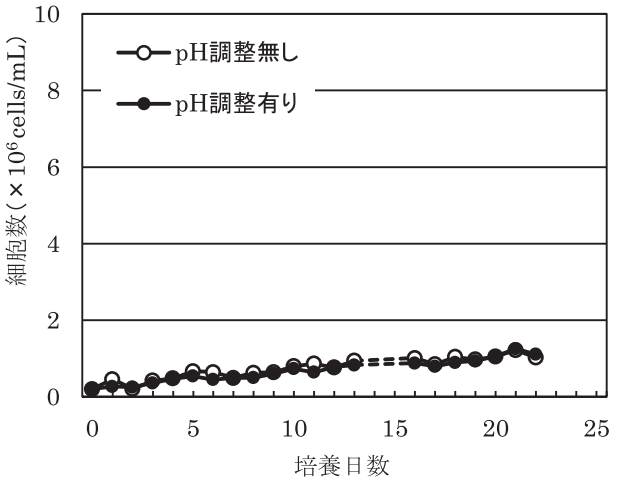


図 1　細胞数の推移（CM 培地）

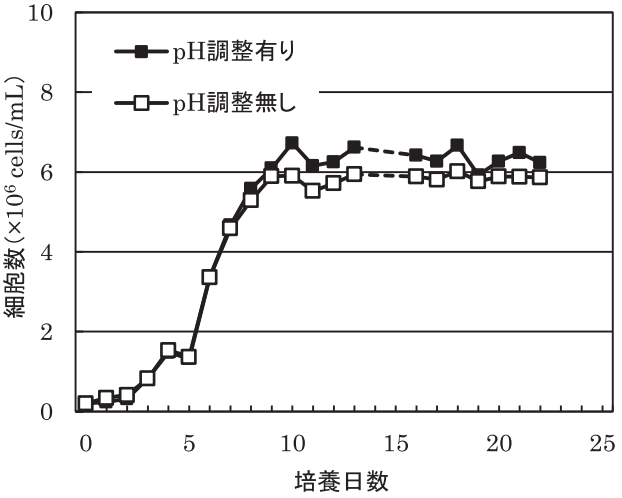


図 2　細胞数の推移（CMG 培地）

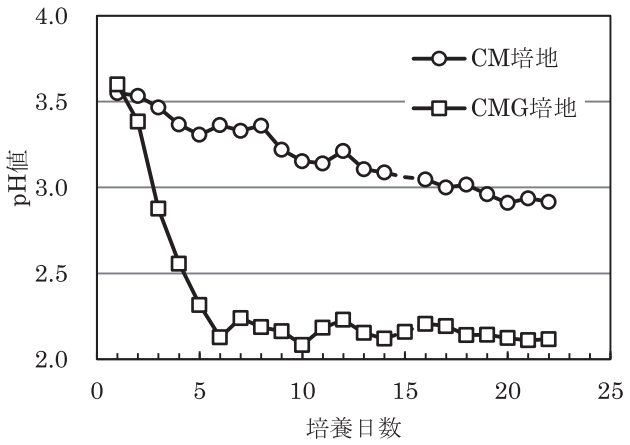


図3　培養日数ごとのpH値の推移（pH調整無し）

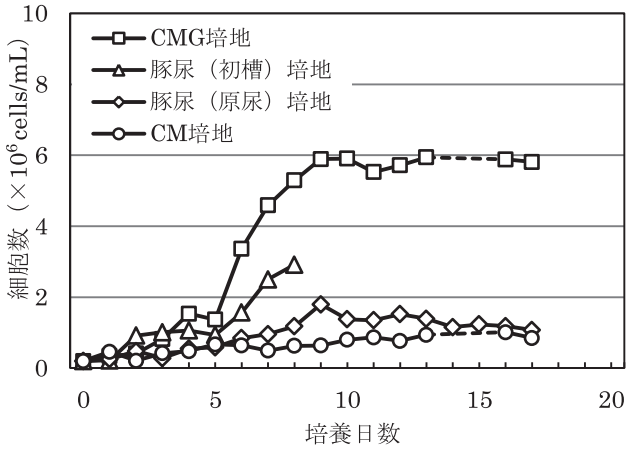


図5　細胞数の推移の比較

図4に豚尿（原尿）培地でのユーグレナの細胞数の推移を示した。9日目で細胞数が最大となり，その後徐々に減少した。図5にCM培地，CMG培地および豚尿（原尿）培地の細胞数の推移と，2012年度に豚尿処理施設初槽より採取した豚尿（初槽）培地での細胞数の推移を示した。豚尿（原尿）培地はCM培地よりも細胞数が増加したが，豚尿（初槽）培地よりは劣る結果となった。また，細胞数の最大値はCMG培地の1/3ほどであった。

CM培地，CMG培地および豚尿（原尿）培地の養分濃度を図6に示した。CMG培地はCM培地にグルコースを添加した培地であるため，PO_4-P濃度および窒素濃度の養分分析では両者に有意な差が見られなかった（$p>0.05$）。豚尿（原尿）培地はPO_4-P濃度が最も高いものの，CM培地の約1/5であった。NH_4-N濃度はCM培地の約1/4で，NO_3-N濃度は微量だが含まれていることがわかった。細胞数の推移がCM培地<豚尿（原尿）培地<CMG培地であったことから，炭素源が細胞数の増殖に与える影響が大きいと考えられる。豚尿処理施設から採取した豚尿（初槽）培地には，豚尿に加え炭素源となり得る豚ぷんも含まれている。従って，豚尿（原尿）培地に豚ぷんを添加することで細胞数の増加が期待できるのではないかと考えられる。

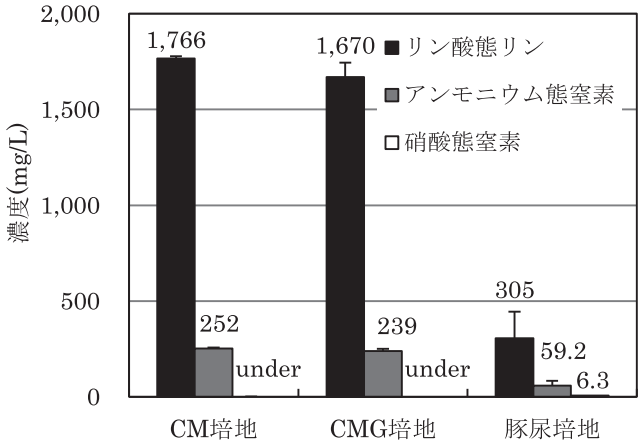


図6　供試培地中の養分濃度

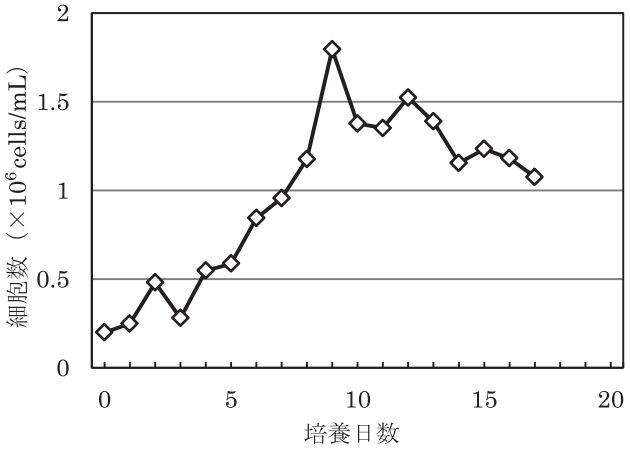


図4　細胞数の推移（豚尿（原尿）培地）

4.　まとめ

CM培地でユーグレナを培養する際は，炭素源を添加し，pH調整をすることで細胞数の最大値を高めることができる。また，豚尿を用いてユーグレナを培養する際は，豚尿中の養分濃度を高めることでCMG培地と比べて遜色ない増殖を得ることができると考えられる。

謝辞

本研究の遂行に当たって，北里大学獣医学部附属フィールドサイエンスセンター（FSC）十和田農場教職員の皆様にお世話になりました。とくに豚尿採取の際に，技能主任の南部剛寛氏にご支援いただきました。心よりお礼申し上げます。また，本学獣医学部生物環境科学科環境情報学研究室の専攻生金澤 健人さん，中村 颯さん，藤田 さくらさん，峯岸 春佳さんおよび森 陽香さんには多大なるご協力をいただきました。ここに記して謝意を表します。

引用文献

1）嵐田亮，2012．微細藻類ユーグレナの特徴と食品・環境分野へ

の応用．光合成研究，22（1），33-34.
2）磐田朋子，2007．住民合意を考慮した家畜排せつ物処理・利用施策の提案手法に関する研究．1－18.
3）北岡正三郎，1989．ユーグレナ－生理と生化学
4）黒田章夫，2005．リン資源枯渇の危機予測とそれに対応したリン有効利用技術開発．環境バイオテクノロジー学会誌，Vol.4, No.2，87－94.
5）小島貞男，須藤隆一，千原光雄，1995．環境微生物図鑑．433－434.
6）Koren, L.E. and Hutner, S.H.，1967．J. Protozool.，14，Suppl.，17.
7）Schiff, L.E. Lyman, H. and Russell, G.K.，1971．Methods Enzymol.，23，143-162.
8）羽賀清典，2003．養豚に切っても切れない汚水処理．独立行政法人　農業技術研究機構　畜産装置研究所　調査・報告.
9）藤谷泰裕，坂口和歌子，高井雄一郎，2007．ユーグレナ培養に適したメタン発酵消化液の処理条件の検討，大阪食とみどり技術センター研究報告，43，13－17.
10）Matsumoto Takahito，Inui Hiroshi，Miyatake Kazutaka，Nakano Yoshihisa，Murakami Katsusuke，2009．Comparison of Nutrients in *Euglena* with those in Other Representative Food Sources Eco-Engineering，21(2)，81－86.
11）Marian Cramer，Jack Myers，1952．Growth and Photosynthetic Characteristics of Euglena gracilis, Archiv fiir Mikrobiologie, Bd. 17, S．384－402.
12）三島信一郎・神山和則，2010．近年の日本・都道府県における窒素・リン酸態リンフローと余剰窒素・リン酸態リンの傾向に関する算出方法とデータベースおよび運用例．農環研報 27，117－139.
13）森山敬仁，吉富克彦，川内智裕，紙谷喜則，岩崎浩一，末吉武志，2014．メタン発酵消化液の有効利用法開発のための基礎的研究―発酵負荷・発酵日数の異なるメタン発酵消化液がユーグレナグラシリス（*Euglena gracilis*）の増殖に与える影響―，農生技管誌，21(1)，9－14.
14）高井雄一郎，瀬山智博，安松谷恵子，2008．ユーグレナを用いたメタン発酵消化液中窒素の除去と家きん飼料としての安全性評価．近畿中国四国農業研究（12）．3－8.
15）横内圀生・市戸万丈・代永道裕・鈴木一好，2006．家畜排せつ物利用の背景と技術開発の現状．日草誌，52(1)，43－49.
16）吉田隆，2004．家畜排せつ物の処理・リサイクルとエネルギー利用―最新浄化・処理技術からバイオマス利用，法対策，有効利用事例まで．エヌ・ティー・エス，1－180.
17）環境省，一律排水基準.
http://www.env.go.jp/water/impure/haisui.html
18）農林水産省，家畜排せつ物の発生と管理の状況．
http://www.maff.go.jp/j/chikusan/kankyo/taisaku/t_mondai/02_kanri/index.html
19）農林水産省，畜産統計．家畜飼養頭羽数及び戸数の推移.
http://www.yptech.co.jp/nonomura/data/data07.pdf#search='1960+%E9%B6%8F+%E9%A3%BC%E8%82%B2%E7%BE%BD%E6%95%B0+%E6%8E%A8%E7%A7%BB'

家畜ふん尿を利用したユーグレナの利活用に関する基礎研究（第3報）

―ユーグレナ粉末の無機化について―

戸松央理*・田中勝千**・皆川秀夫**・鈴木由美子**・鈴木健吾***・中野良平***・渡邉翔太***

Basic Research on Utilization of *Euglena* using Livestock manure (Part3)

―About mineralization of Euglena―

Ori TOMATSU・Katsuyuki TANAKA・Hideo MINAGAWA・Yumiko SUZUKI・Kengo SUZUKI・Ryohei NAKANO・Shota WATANABE

Abstract

The long-term objective of this study is to develop a method for the recovery and reusing of nutrient from the livestock manure using *Euglena*, which can accumulate nitrogen and phosphorus under heterotrophic and phototrophic conditions. This paper explored the *Euglena* powder mineralization process in the soil using beaker culture method. *Euglena* powders (0, 1 and 10 g) were added to andosols respectively. Then water contents of soils were adjusted from 50 to 60 %. After culturing for about one month in an incubator (temperature: 30℃, humidity: 60%), pH and concentrations (PO_4-P, K_2O, NO_3-N and NH_4-N) of soil were measured, and nitrogen mineralization rate was calculated. As a result of available nitrogen during culturing, NO_3-N concentration was increased with decreasing NH_4-N concentration. Further, pH value was decreased with increasing NO_3-N concentration, and the available nitrogen has a correlation with pH. PO_4-P and K_2O concentration were increased with increasing addition amount of the powder. Thus, nitrogen mineralization rate, which was calculated by these data, was 60%. Consequently, it was considered that the *Euglen*a powder is applicable an organic fertilizer.

[Keywords] mineralization, organic fertilizer, *Euglena* powder

1. はじめに

世界人口は1975年では約40億人であったが，2015年には約73億人と約1.8倍増加した。それに伴い穀物の生産量も12億tから25億tへと約2倍に増加した（図1）。この急激な生産拡大は，大量の化学肥料を使用して単収を増大させることにより実現した。日本では，農地面積の減少により化学肥料の総使用量は減少傾向にあるが，耕地面積当たりでは窒素，リン酸ともに1961年から一貫して100～150 kg/ha程度の施肥量であり，特にリン酸肥料の面積当たりの投入量は世界の中で最高水準である（新藤，2010）。

リンは近年枯渇が懸念されている資源である（黒田，2005）。そのため我が国でのリン資源の確保は契緊の課題である。一方，窒素は家畜排せつ物の不適切な処理や農地への過剰な化学肥料の施肥によって余剰窒素を引き起こし，地下水汚染や河川の富栄養化を誘発している（農林水産省，2014）。このことから，自国でのリン資源の確保，土壌中の余剰窒素を防ぐことが重要な課題となる。

近年，エネルギーを筆頭とする様々な資源・環境問題への切り札として，微細藻類が有望視されている（吉田，2014）。本研究では微細藻類の一種であるユーグレナに着目した。リンや窒素を吸収する能力をもつユーグレナを利用することで，家畜排せつ物からリンや窒素などの未利用資源を回収し，新たな有機質資材として作物栽培に利用できないかと考えた。第1報，第2報では，家畜ふん堆肥の抽出液や，豚尿を利用してユーグレナを培養できることを明らかにした。また，ユーグレナは家畜排せつ物中からリンや窒素などの未利用資源を回収できる可能性が示された。しかし，作物栽培にユーグレナを利用する上で，ユーグレナは土壌中でどのように無機化していくのかは明らかにされていない。

本研究では，培養によって得られたユーグレナ粉末の作物栽培への利用を目的とし，ユーグレナ粉末が有機質資材としてどの程度代替できるのかについて基礎的知見を得るために，ビーカー培養法を用いた土壌中での無機化について検討した。

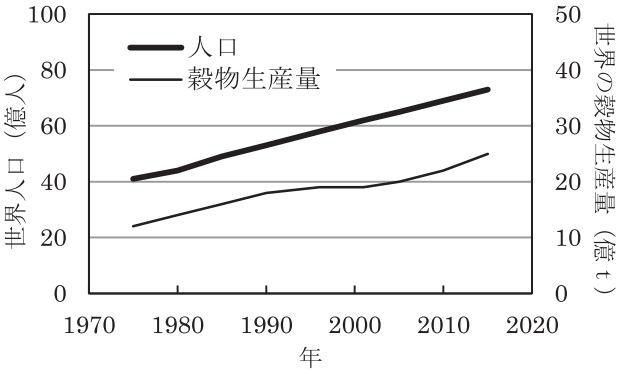


図1　世界人口と穀物生産量の推移（農林水産省，2014）

*北里大学大学院獣医学系研究科　〒034-8628　青森県十和田市東二十三番町35-1
**北里大学獣医学部　〒034-8628　青森県十和田市東二十三番町35-1
***株式会社ユーグレナ 研究開発部 中央研究所　神奈川県横浜市鶴見区小野町75-1

2. ユーグレナの特徴

(1) ユーグレナ（*Euglena*）

ユーグレナは光合成をして増殖する微細藻類であり，0.1 mm 程の大きさである。*Euglena* 属には多くの種が含まれるが，生化学実験等で一般的に使われるのは増殖が速く，扱い易い *Euglena gracilis* という種である（嵐田，2012）。以下，本稿において「ユーグレナ」とは *Euglena gracilis* のことを指す。リンや窒素を資化する能力を持ち，1 日に 1 回分裂という高い増殖能力を持っている。また，大気中の約 1,000 倍の二酸化炭素濃度の中や高濃度の栄養塩類を含む汚水中（メタン発酵消化液など）でも生存できる，という高い生存能力を有する（森山ら，2014）。

(2) ユーグレナの利用

ユーグレナは栄養価が高いことから，将来の食料・飼料として活発に研究が行われてきた（北岡ら，1977）。過去には飼料としての実用化もされており（林ら，2004），近年では機能性食品としての利用やクッキー等の一般食品に添加する形での利用がなされている。また，ユーグレナを原料としたバイオジェット燃料の開発も行われている（嵐田，2012）。

2. 材料および方法

(1) 供試試料および供試土壌

ユーグレナを乾燥させ粉末化させたもの（ユーグレナ粉末）を供試試料とした。また，目開き 2.0 mm の篩を用い，あらかじめ夾雑物を取り除いた黒ボク土（青森県産業技術センター野菜研究所より分譲）を供試土壌として使用した。

(2) 適正 pH に合わせるための石灰施用量の算出（藤原ら，1996）

供試土壌 10 g を 100 mL 容ふた付き容器に入れたものを計 10 本作製した。0.1N 水酸化ナトリウム液をそれぞれの容器に 0，1，2，4，6，8，10，12，14，16 mL 加えた。その後，全量が 25 mL になるように蒸留水を加え，適宜振とうしながら 24 h 放置した。pH メーターを用いて溶液の pH を測定し，グラフ上に添加量ごとの pH 値をプロットし，緩衝曲線を作成した（図 2）。

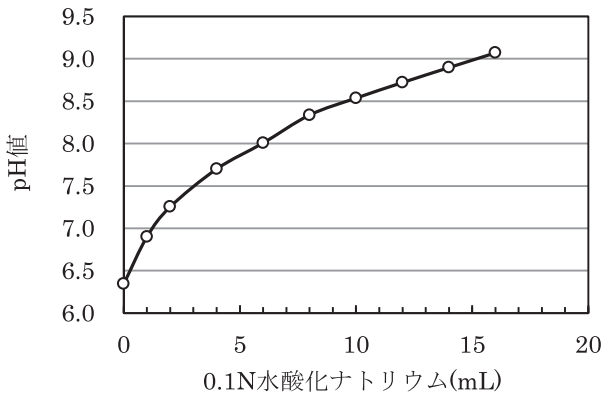


図 2　供試土壌の緩衝曲線

(3) ビーカー培養法による土壌培養

ビーカー培養法とは，ビーカーまたは広口びんに土壌酸度を pH6.5～6.8 に矯正した供試土壌を軽く詰め，水分を最大容水量の 50～60%になるように調節した後に，パラフィルムなどで覆いをして 30℃の定温器内で 2～3 週間培養する方法である。この間，定温器内には水を満たした水盤をおき，器内の湿度を高めて，土壌からの水分の蒸発を防ぐが，ときどきビーカーの重量を測定して水分の損失分を補給する（土壌養分分析法，1970）。

(4) サンプルの作製および保管方法

作成した緩衝曲線をもとに石灰を用いて供試土壌の土壌酸度を pH6.5～6.8 に矯正した。供試土壌をビーカーに 500 g 入れ，ユーグレナ粉末を加えないもの（ブランク），1 .0 g，10 g 加えたものの 3 条件を設定した。各条件ともに 3 サンプルずつ作製し，計 9 サンプルを用意した。含水率が 50～60%w.b.になるように蒸留水を添加し，温度 30℃，湿度 60%に設定したインキュベーター（東京理科器械株式会社，FLI-2000H）内で保管した。サンプルの培養は約 1 ヵ月間とした。

(5) 養分分析および窒素無機化率の算出

7 日間ごとにサンプルを十勝農業協同組合連合会農産化学研究所に送り，pH 値，可給態窒素である硝酸態窒素（NO_3-N）・アンモニア態窒素（NH_4-N）濃度，可給態リン（PO_4-P）濃度，可給態カリウム（K_2O）濃度の養分分析を依頼した。また，可給態窒素の分析結果をもとに窒素無機化率を以下の式により算出した（荒巻ら，2007）。

$$N\ (\%) = (Ne - Ns) / Nt \times 100$$

N ：窒素無機化率（%）
Ne：堆肥混和土壌の無機態窒素量
Ns：土壌のみの無機態窒素量
Nt：堆肥の全窒素量

培養前の堆肥中に含まれていた無機態窒素量の全窒素量に占める割合を算出し，それを培養開始時の窒素無機化率とした。また，培養終了時の窒素無機化率から培養開始時の窒素無機化率を差し引いた値を，培養期間中の窒素無機化率とした。

3. 結果および考察

図 3～7 に養分分析結果を示した。すべての養分において，ブランクおよび 1 g サンプルでは大きな変化がなかった。ここで変化の大きい 10 g サンプルに注目すると，NH_4-N 濃度は培養開始から 7 日目までに急激に上昇し，14 日目にピーク（112.1 mg/100 g）に達した。その後，緩やかに減少し，28 日目には培養開始時の 1.8 倍の濃度であった。NO_3-N 濃度は培養開始から 14 日目まで低い値で横ばいに推移していたが，それ以降上昇し，28 日目には培養開始時の 112 倍の濃度であった。これらの結果から，NH_4-N 濃度が減少するに従って NO_3-N 濃度が増加するという窒素濃度の形態変化過程

が観察された。そのため，ユーグレナ粉末は培養日数の経過に伴い徐々に無機化され，NH_4-N から NO_3-N へ変化したと考えられる。また，pH 値と可給態窒素濃度を比較すると，NH_4-N 濃度が高いと，pH 値も高くなり，NO_3-N 濃度が高くなると，pH 値は下がる傾向がみられた。このことから，可給態窒素濃度と pH 値には相関関係があると考えられる。PO_4-P および K_2O 濃度は 10 g サンプルにおいてもほぼ横ばいで推移しており，ユーグレナ粉末の添加量が多い程高い値となった。これは，ユーグレナ粉末に含まれるリンおよびカリウム濃度が起因していると考えられる。

図 8 に窒素無機化率の推移を示した。NH_4-N の無機化量は，培養開始時は 27.9 mg/100 g であったのに対し，7 日目には 102.2 mg/100 g と急激に増加した。しかし，14 日目でピークに達すると（111.3 mg/100 g），それ以降は徐々に低下して 28 日目では 82.9 mg/100 g となった。一方，NO_3-N の無機化量は培養開始時と比較して 14 日目までは負の値を示した。その後，21 日目で 8.46 mg/100 g となり，28 日目で 37.7 mg/100 g と最大となった。無機化率は，培養開始時

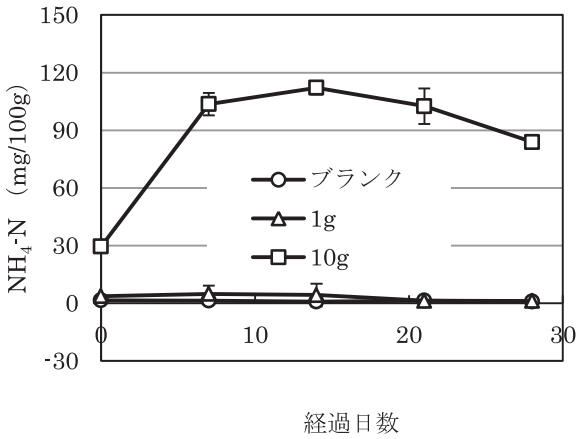


図 3　NH_4-N の変化

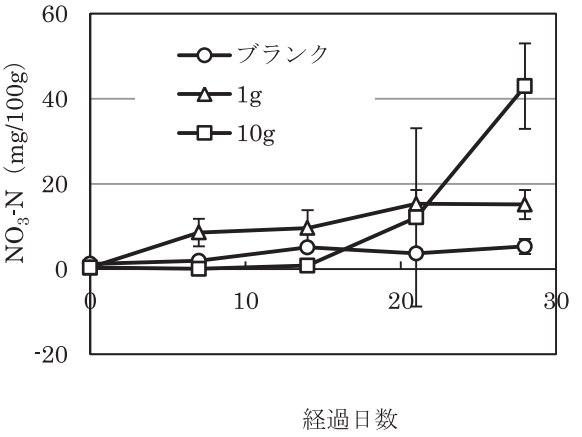


図 4　NO_3-N の変化

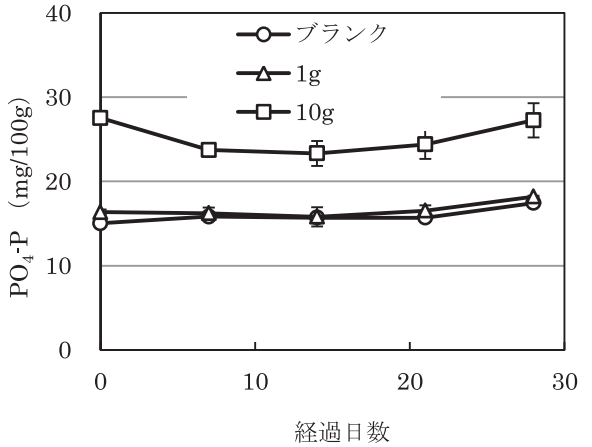


図 5　PO_4-P の変化

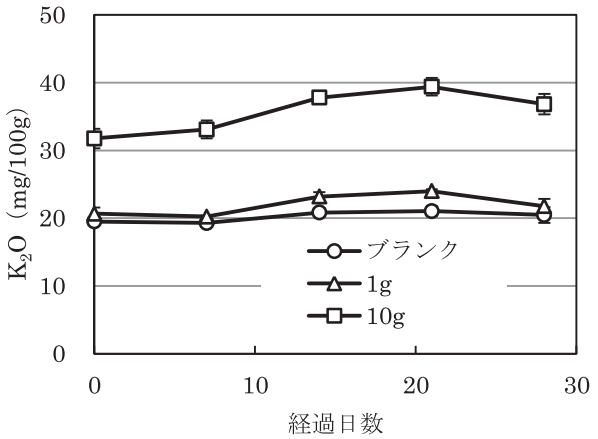


図 6　K_2O の変化

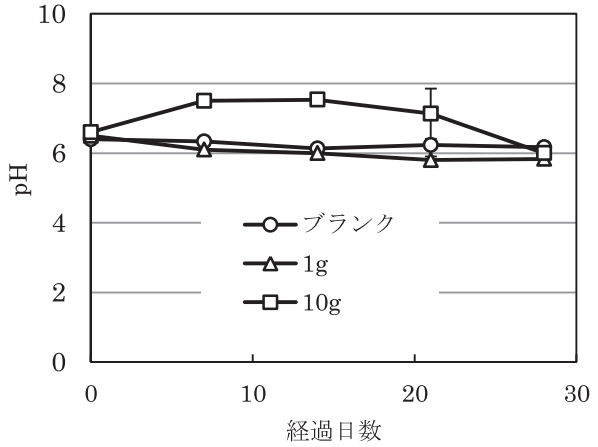


図 7　pH の変化

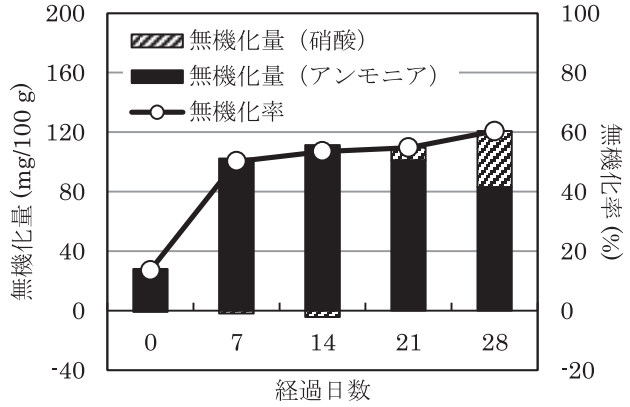


図 8　無機化率の推移

は 14%であったのに対し，7 日目には 50%となった。その後横ばいで推移し，28 日目に最大となった。これらの結果より，無機化量，無機化率ともに培養日数の経過に伴い高くなり，最終的な無機化率は 60%となった。

表 1 にユーグレナ粉末と一般的な家畜ふん堆肥の無機化率を比較した。ユーグレナ粉末の無機化率は一般的な家畜ふん堆肥（23%未満）より約 1.6 倍高いことから，ユーグレナ粉末は有機資材として有用である可能性が示された。

4. まとめ

ビーカー培養法によってユーグレナの無機化実験を行った結果，ユーグレナ粉末が無機化され NH_4-N から NO_3-N へと変化したことがわかった。また，無機化率は 44%であり，一般的な家畜ふん堆肥の無機化率よりも上回っていた。このことからユーグレナ粉末は有機質資材として有用であると考えられるが，施用時期について考慮する必要がある。

表 1　ユーグレナ粉末と家畜ふん堆肥の無機化率の比較

有機質資材	無機化率（%）
ユーグレナ粉末（水田）	60
ユーグレナ粉末（畑地）	44
※ 牛肉ふん堆肥	17.2
※ 乳牛ふん堆肥	11.4
※ 豚ふん堆肥	23.7
※ 鶏ふん堆肥	22.6

※（荒巻ら，2007）より引用

謝辞

本研究の遂行に当たって，青森県産業技術センター野菜研究所の庭田　英子氏，農林総合研究所藤坂稲作部の森山　茂治氏には大変お世話になりました。また，本学部の馬場　光久博士，眞家　永光博士にはビーカー培養法の基本技術についてご教授いただきました。さらに，土壌の培養実験では本学部生物環境科学科環境情報学研究室の専攻生森　陽香さん，金澤　健人さん，中村　颯さん，藤田　さくらさんおよび峯岸春佳さんには多大なるご協力を頂きました。ここに記して謝意を表します。

引用文献

1）嵐田亮，2012．微細藻類ユーグレナの特徴と食品・環境分野への応用，光合成研究，22(1).

2）荒巻幸一郎，山本富三，小山太，渡邊敏朗，荒木雅登，満田幸恵，2007．県内産家畜ふん堆肥の窒素無機化特性．福岡県農業総合試験場研究報告 26.

3）北岡正三郎，細谷圭介，1997．Euglena gracilis タンパク質の栄養価決定のための培養条件の検討と細胞の一般成分およびアミノ酸組成，日本農芸化学会誌 8，483-488.

4）黒田章夫，2005．リン資源枯渇の危機予測とそれに対応したリン有効利用技術開発．環境バイオテクノロジー学会誌，Vol.4, No.2，87－94.

5）新藤純子，2010．食料増産と資源・環境問題としての肥料．第 32 回農業環境シンポジウム，第 1 部.

6）Takahito Matsumoto，Hiroshi Inui，Kazutaka Miyatake，Yoshihisa Nakano，Katsusuke Murakami，2009．Comparison of Nutrients in Euglena with those in Other Representative Food Sources, Eco-Engineering，21(2)，81-86.

7）土壌養分測定法委員会編，1970．肥沃度測定のための土壌養分分析法，205-207.

8）林正弘，榎本俊樹，2004．未来飼料・食糧・新素材の可能性を求めて，遺伝 58，71-76.

9）藤原俊六郎，安西徹郎，加藤哲郎，1996．土壌診断の方法と活用，88-92.

10）森山敬仁，吉富克彦，川内智裕，紙谷喜則，岩崎浩一，末吉武志，2014．メタン発酵消化液の有効利用法開発のための基礎的研究―発酵負荷・発酵日数の異なるメタン発酵消化液がユーグレナグラシリス（*Euglena gracilis*）の増殖に与える影響―，農生技管誌，21(1)，9－14.

11）吉田昌樹，2014．藻類資源の研究開発，表面化学，Vol.35，No.9，516-517.

12）農林水産省，家畜排せつ物の発生と管理の状況．http://www.maff.go.jp/j/chikusan/kankyo/taisaku/t_mondai/02_kanri/index.html

近赤外分光法によるコンクリート構造物の劣化の診断（第７報）

－塩化物イオン推定における各変動要因の検討－

川代　知寛*・設楽　徹**・片平　光彦***・夏賀　元康***

Diagnosis of Concrete Deterioration in Infrastructures Using Near-Infrared Spectroscopy (Part7)

- Effects of Cement and Mortar Types on the Determination of the Chloride Ion Concentration -

*Tomohiro KAWADAI・** Toru SHITARA・Mitsuhiko KATAHIRA***・Motoyasu NATSUGA***

Abstract

Concrete is widely used in the construction of infrastructure, which ultimately deteriorates as a result of chemical damage. To prevent serious accidents caused by concrete deterioration, developing rapid, inexpensive analytical tools is necessary. Some nondestructive methods that detect the physical deterioration of concrete infrastructure, such as cavities and cracks, are already in practical use, while few reports have described the nondestructive analysis of chemical deterioration, such as chlorination and carbonization. We have been investigating the application of near-infrared spectroscopy (NIRS) to estimate the chloride ion concentration in cement because the deterioration caused by chloride ions takes place in cement only. We used cements made by the same manufacturer as samples, although many types of cement exist and they are usually used as mortar and contain sand and crushed stone as aggregate. Therefore, we investigated the effects of these factors on the estimation of the chloride ion concentration using NIRS. The spectrometers used in the study were MicroNIR 1700/2200 (Viavi Solutions Inc.　USA). The wavelength range was 908–1676 nm at 6.2 nm intervals for the MicroNIR 1700 and 1150–2150 nm at 8.1-nm intervals for the MicroNIR 2200.Partial least-squares regression (PLSR) with a full cross-validation method was used to develop and validate the calibration models using The Unscrambler software v9.8 (CAMO Software, Oslo, Norway). The wavelength ranges used for calibration were 1100–1676 nm for the MicroNIR 1700 and 1353–2150 nm for the MicroNIR 2200, since the spectra were noisy at the edges of the wavelength range of both spectrometers.　The results were R2 = 0.64 and SECV = 0.40% for the MicroNIR 1700 and R2 = 0.91 and SECV = 0.20% for the MicroNIR 2200, which were inferior to the results for cement-only samples but still sufficient for the qualitative analysis.

[Keyword] near infrared spectroscopy, concrete, deterioration, chlorination

1. はじめに

コンクリート構造物は廉価で入手しやすく，現在では社会基盤として私たちの生活に欠かすことのできない存在である。農業分野においてもダムや農業用水路などの農業水利施設に利用され産業の基盤として重要な役割を果たしている。これらの社会資本の多くは高度経済成長期に建設され，現在高齢化が着実に進んでおり，構造物の劣化による事故や災害が懸念されている。膨大なコンクリートストックに対応するため，適切にかつ迅速に点検・補修を行う必要がある。

そのため，現在，様々な非破壊検査法が開発されている。例えば，打音法や超音波法などがコンクリート構造物の空洞やヒビを検査するために用いられている。しかしながら，コンクリートの化学的な劣化である塩害や中性化に対しては有力な非破壊検査法が確立されておらず，依然としてコアサンプリング，その後の化学分析による定量化という手法やドリル削孔粉末を化学分析する方法が用いられており，検査の迅速性が課題となっている。そのため，近年では，コンクリートの化学的劣化に関して，近赤外分光法をはじめとした非破壊検査法の応用が試みられている。

筆者らは近赤外分光法を用いてコンクリート中の化学的劣化因子の定量化の研究を進めてきた。第 5 報では小型・安価・軽量という特徴を持つ分光装置 MicroNIR1700/2200 (Viavi Solutions Inc.　USA)のセメント中の塩化物イオンの推定可能性を検討し，精度良く推定できることを明らかにしたが，MicroNIR1700/2200 による劣化の推定精度はサンプルの組成や温度や水分などの環境条件によって変動することが予想されるため，現場への普及にあたりこれらの影響を解明する必要がある。

そこで，本報では，塩害の劣化因子である塩化物イオンの推定において，サンプルの組成や環境条件が精度に与える影響を検討した。

2. 材料と方法

(1)実験のフロー

本実験のフローを図 1 に示した。

*山形大学大学院農学研究科
**岩手大学大学院連合農学研究科
***山形大学農学部

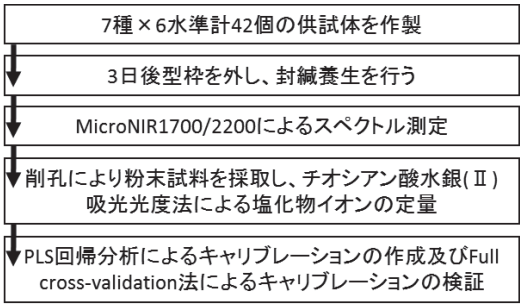


図１　実験のフロー

(2) 供試体の組成及び劣化因子の導入

本研究ではサンプルの組成が測定精度に与える影響を検証するため，複数のセメントの種類・メーカー，細骨材を含んだモルタルや粗・細骨材を含んだコンクリートサンプルを作製した。その作製区分を表 1 に示した。サンプルはφ75×70 の円柱形とし，水セメント比は 50%，塩害の劣化因子となる塩化物イオンはサンプル作製時に練り混ぜ水(蒸留水)に塩化ナトリウム（Cica 特級）を混和することで導入した。導入した塩化物イオンは質量パーセント濃度 0, 1, 2, 4, 8, 16%の 6 水準である。

表１　サンプル調整区分

サンプル No	セメントの種類	Cl^-濃度(%)
No.1-6	普通セメント(太平洋セメント)	
No.7-12	早強セメント(太平洋セメント)	
No.13-18	高炉セメント(太平洋セメント)	
No.19-24	モルタル(普通太平洋セメント)	0, 1, 2, 4, 8, 16
No.25-30	コンクリート(普通太平洋セメント)	
No.31-36	普通セメント(住友大阪セメント)	
No.37-42	普通セメント(宇部三菱セメント)	

(3) 環境条件調整

本研究ではサンプルの温度や水分などの環境条件の影響を検討するため，作製した 42 個のサンプルを表 2 に示した調製方法により低温・常温・高温・乾燥(Dry)・湿潤(Wet)状態に調製した。乾燥，湿潤条件は事前に予備実験を行い，常温サンプル水分の 1/4～2 倍程度異なるように設定した。

表２　環境条件調整区分

環境条件	調整方法
低温	5℃に設定したインキュベータ内で 1 日以上静置
常温	25℃に設定したインキュベータ内で 1 日以上静置
高温	45℃に設定したインキュベータ内で 1 日以上静置
乾燥	70℃のオーブンで 24 時間乾燥させ 25℃インキュベータ内で 1 日以上静置
湿潤	20 分浸漬させ25℃インキュベータ内で 1 日以上静置

(3) スペクトル測定

a)装置の概要

供試した近赤外分光分析装置は前報同様，LVF（Linear variable filter）を用いた小型の分光計である MicroNIR1700/2200(Viavi Solutions Inc. USA)とデータ解析用のパソコンから構成される(図 3)。MicroNIR1700/2200 は光源にタングステンランプを用いて光を照射し，対象物からの拡散反射光を LVF フィルタで分光し，InGaAs ディテクタで検出を行う(図 4)。波長範囲は MicroNIR1700 では 908-1676nm, MicroNIR2200 では 1150-2150nm である。また，本分光器はこの波長範囲を 128 ピクセルに分光するため波長間隔は MicroNIR1700 で 6.2nm, MicroNIR2200 で 8.1nm となっている。

b)スペクトル測定

スペクトル測定は専用ソフトウェア”MicroNIR1.5.7”を用いて行った。またリファレンスには付属の硫酸バリウム板を用いて，反射レイアウトで測定した。なお，機器の形状より遮光しての Dark の測定が難しいため，Dark は光源を OFF にして測定した。積分時間は MicroNIR1700 では 10000μs，MicroNIR2200 では 7000μs，繰り返し回数はどちらの装置も 100 回で測定した。

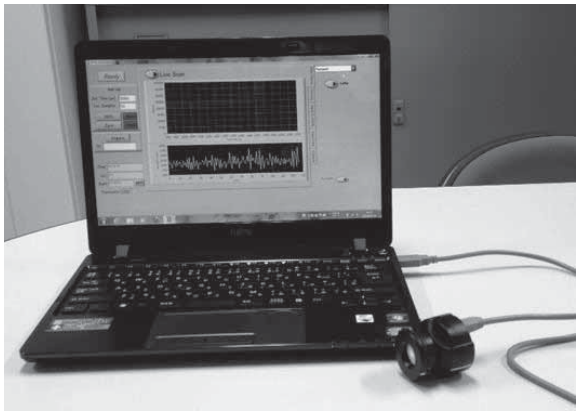


図３　MicroNIR の外観

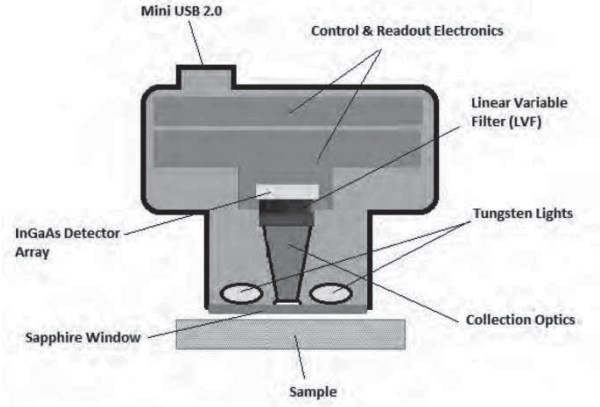


図４　MicroNIR の光学系

(3) 基準分析

既報と同様に，塩害の劣化因子である塩化物イオンをチオシアン酸水銀(Ⅱ)吸光光度法によって定量した。

(4) キャリブレーションの作成と検証

既報と同様に，統計処理ソフトウェア The Unscrambler v9.8(CAMO, Norway)を使用し，Full cross-validation 法による PLS

回帰分析（Partial Least Squares Regression）でキャリブレーションの作成と検証を行った。

3. 結果と考察

(1) 塩害

1)スペクトル

各環境条件下で測定した平均スペクトルをMicroNIR1700では図5に，MicroNIR2200では図6に示した。MicroNIR1700のスペクトルでは1460nm付近に，MicroNIR2200のスペクトルでは1460nm付近と1940nm付近に吸光ピークが見られ，Wet条件で特に大きく見られたことからこれらは水の吸光ピークであると考えられる。温度のスペクトルへの影響は水分のそれと比較すれば小さいものの，MicroNIR2200のスペクトルでは波形が異なっており，推定精度への影響が示唆された。

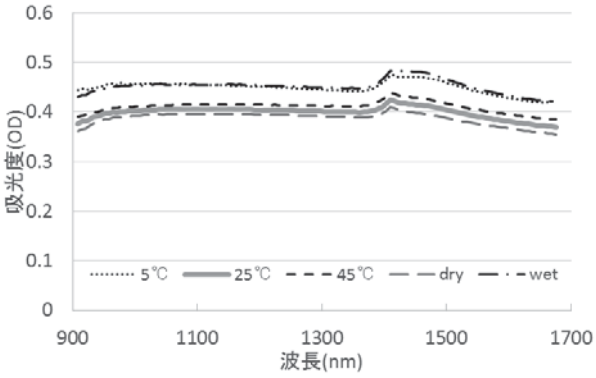


図5　MicroNIR1700による塩害供試体のスペクトル

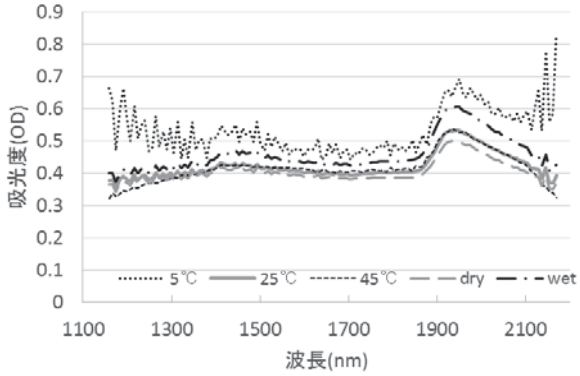


図6　MicroNIR2200による塩害供試体のスペクトル

2)キャリブレーション

MicroNIR1700によるキャリブレーション結果を表3に，MicroNIR2200による結果を表4に示した。なお，両分光器ともスペクトルの両端でノイズが見られたためそれらを除外し，MicroNIR1700では1100-1676nm，MicroNIR2200では1354-2104nmでキャリブレーションの作成と検証を行った。また，精度比較のために第5報(2013)で報告した単一セメントのみで作成したキャリブレーション結果も示した。環境条件による影響を比較するため，25℃での推定結果のSECVを基準として，そのほかの条件でのSECVを比較した。

表3　MicroNIR1700によるキャリブレーション結果

Types　& Conditions	n	nF	R^2	SECV(%)	RPD
Cement	30	2	0.61	0.47	1.52
Mortar & Concrete	12	1	0.71	0.20	1.62
All	42	7	0.64	0.40	1.60
Cement(2013)	24	5	0.98	0.17	7.45
5℃		10	0.73	0.35	1.85
25℃		8	0.75	0.34	1.91
45℃	42	9	0.86	0.25*	2.61
Dry(25℃)		8	0.75	0.33	1.94
Wet(25℃)		7	0.76	0.33	1.98

*5%有意差有

表4　MicroNIR2200によるキャリブレーション結果

Types　& Conditions	n	nF	R^2	SECV(%)	RPD
Cement	30	6	0.91	0.23	3.11
Mortar & Concrete	12	2	0.77	0.18	1.82
All	42	7	0.86	0.25	2.58
Cement(2013)	24	6	0.97	0.22	5.22
5℃		12	0.90	0.21	3.03
25℃		6	0.87	0.24	2.67
45℃	42	9	0.92	0.19*	3.36
Dry(25℃)		7	0.91	0.21	3.14
Wet(25℃)		7	0.94	0.16**	4.02

*5%有意差有　**1%有意差有

MicroNIR1700，MicroNIR2200ともに第5報での結果と比較して精度が劣った。これはサンプルの組成の違いが塩化物イオンの推定に大きな影響を与えたものと考えられる。しかし，MicroNIR2200での全サンプルでの推定精度は，R^2=0.86，SECV=0.25，RPD=2.58であり，セメントサンプルのみによる推定精度R^2=0.97，SECV=0.22，RPD=5.22より劣るものの，現場での大まかな仕分け程度には使用できる可能性が示唆された。

MicroNIR1700の測定では高温条件での推定で精度が良好で常温条件での推定と比較して危険率5%で有意な差が観測された。また，MicroNIR2200の測定では高温と湿潤条件で精度が良好で，それぞれ危険率5%，1%で有意な差が見られた。供試分光器は暖機運転後の分光器内部温度は45～50℃が適正とされており，高温条件ではこれとほぼ合致していたため，測定中の分光器の温度変動が小さく，スペクトルへの影響も小さかったためであると考えられる。また，湿潤条件では，サンプルの水分が高いため図5，図6でスペクトルに観測されたように，水の吸光ピークが他の環境条件でのスペクトルに比べて明確に観測された。塩化物イオンの変化に伴って水の吸光スペクトルの形状及びピークの位置が変動することが知られており，今回の推定精度が良好であった理由もこの変動が明確に現れたためではないかと考えられる。

3)全環境条件マージキャリブレーション

供試分光器での全環境条件でのスペクトルを用いてキャリブレーションを作成した散布図を MicroNIR1700 では図 7 に，MicroNIR2200 では図 8 にそれぞれ示した。MicroNIR1700 での推定精度は R^2=0.74, SECV=0.33, RPD=1.96 であり，MicroNIR2200 では R^2=0.69, SECV=0.36, RPD=1.78 であり，これは常温状態での推定精度とほぼ同等であった。散布図から判断すると「異常なし」「劣化初期」「要補修」の 3 ステージ程度の大まかな仕分けには有効であると考えられる。

一方、基準分析の精度 SDD(Standard Deviation of the Difference) は次の式で定義される。

$$SDD = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n} d_i^2}{2n}}$$

d_i : 基準分析の繰り返し測定間の差　n : 試料数

キャリブレーションの精度を示す SECV が SDD の 1.5-2 倍であれば、良好な精度のキャリブレーションが作成できたと判断できる（引用文献）。本研究の基準分析では SDD=0.03%であったのに対し SECV は 0.33～0.36 と SDD の 10 倍以上であり、実用化に向けて更なる改善が必要であると考えられる。

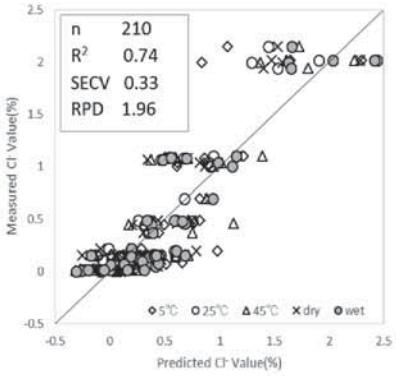


図 7　MicroNIR1700 による全環境条件マージ推定散布図

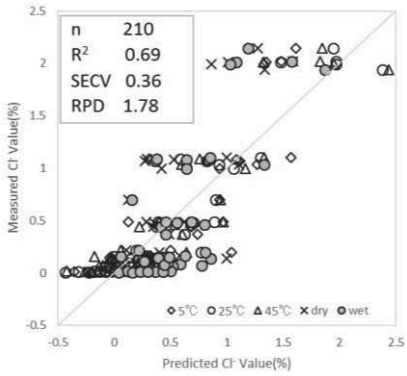


図 8　MicroNIR2200 による全環境条件マージ推定散布図

4. まとめ

本研究では，近赤外分光法によるコンクリート中の塩化物イオン推定におけるサンプルの組成の違いや環境条件の違いの影響を検討した。その結果，

(1)　サンプルの組成による推定精度への影響は大きいことが明らかとなった。全サンプルでのキャリブレーション結果は，SECV=0.28, R^2=0.86, RPD=2.58 であり，セメントのみのサンプルで作成したキャリブレーション結果に劣ったが，現場での大まかな仕分け程度には使用できる可能性が示唆された。

(2)　サンプルの温度や水分量は推定精度に影響を与えることが明らかとなった。MicroNIR1700 による推定では常温条件の推定結果の SECV と，高温条件の SECV との間に危険率 5%で有意差が見られた。また，MicroNIR2200 の測定では高温と湿潤条件でそれぞれ危険率 5%，1%の有意な差が見られた。

(3)　全スペクトルを用いたキャリブレーションの推定精度は，常温状態での推定精度とほぼ同等であり，「異常なし」「劣化初期」「要補修」の 3 ステージ程度の大まかな仕分けには有効であると考えられる。しかし，予測の精度は化学分析の精度の 10 倍以上あり，な実用化に向けて今後更なる精度改善が必要であると考えられる。

5. 謝辞

山形大学農学部地盤工学研究室の奥山武彦先生に分析機器を御提供頂きました。ここに記して謝意を表します。

参考文献

1)　石川　幸宏・金田　尚志・魚本　健人・矢島　哲司：近赤外分光イメージングによるコンクリート中の塩分の定量化に関する提案　コンクリート工学年次論文集　Vol.28 NO.1(2006)

2)　岩元　睦夫・河野　澄夫・魚住　純　近赤外分光法入門　幸書房(1994)

3)　魚本　健人：コンクリート構造物の非破壊検査技術　旺文社(2007)

4)　金田　尚志：マルチスペクトル法によるコンクリート劣化物質検出手法の開発　東京大学学位論文(2004)

5)　金田　尚志・石川　幸宏・魚本　健人：近赤外分光法のコンクリート調査への応用　コンクリート工学　Vol.43 NO.3(2005)

6)　郡　政人・古川　智紀・上田　隆雄・水口　裕之：近赤外分光法を用いたコンクリート中の塩化物イオン濃度の推定手法に関する検討　コンクリート工学年次論文集　Vol.30(2008)

7)　Tormod Naes・Tomas Isaksson・Tom Fearn・Tony Davies：Multivariate Calibration and lassification NIR Publications(2002)

8)　Phil Williams・Karl Norris：Near-Infrared Technology American Association of Cereal Chemists.Inc(1987)

9)　コンクリート診断技術'08[基礎編]　(社)日本コンクリート工学協会(2008)

10)　コンクリート診断技術'08[応用編]　(社)日本コンクリート工学協会(2008)

11)　コンクリート標準示方書　平成 11 年度版　土木学会(2000)

12)　JIS ハンドブック 2009⑩生コンクリート日本規格協会(2009)

13)　夏賀　元康・川村　周三・伊藤和彦：近赤外分光法による高水分小麦の品質測定(第 1 報)―高水分小麦の水分，タンパク質の測定―　農業機械学会誌第 63 巻第 1 号(2001)

リモートセンシングによる森林フェノロジー観測手法の開発(第１報)

—樹葉のスペクトル特性と季節変化—

増山寛規*・鈴木由美子**・田中勝千**・皆川秀夫**

Development of Monitoring Methodology for Forest Phenology Using Remote Sensing(Part 1)

—Spectral Properties and Seasonal Change of Tree Leaves—

Hiroki MASUYAMA*・Yumiko SUZUKI**・Katsuyuki TANAKA**・Hideo MINAGAWA**

Abstract

Leaf phenology has been shown to be one of the most important factors of the effects of climate change on biological systems. In this paper, spectrum characteristics of different three species were investigated for phenology monitoring, and monitoring algorithm were developed in each species. We examined two VIs: GRVI and CI, which were obtained by the measurements under artificial light sources of leaf reflectance. As the results, leaf spectra showed a different trend in the spring, summer and autumn. The time series data of GRVI and CI also showed a different trend in the spring, summer and autumn. GRVI affected by a leaf color change and the appearance of yellow leaf. CI, which has a high correlation with the chlorophyll content in leaves, was considered to reflect the chlorophyll content. Consequently, phenology characteristic for three species will be observed using GRVI and CI.

[Keywords] artificial light sources, hyperspectral camera, leaf phenology, spectral properties

1. はじめに

IPCC（Intergovernmental Panel on Climate Change）の第5次報告書（2013）によると，地球の地上平均気温は1880年から2012年の間に0.85 ℃上昇しており，今後更なる気温の上昇が予測される。このような中で気候変動を検出するための指標の一つとして植物のフェノロジー（生物季節）が注目されている（増田1999）。フェノロジーは気温との関係が非常に深く，気温の変動に伴い変化した例が数多く報告されている（樋口ら2009）。そのため，気候変動を捉える指標として有用といえる。植生のフェノロジーは，目視による観察（藤本2007，伊藤ら2012），定点カメラ（Saitoh et al.2012，上地ら2013）または人工衛星（Melaas et al. 2013，Garonna et al. 2014，Nagai et al. 2015）から取得した画像による観察などがある。日本は，国土の7割が森林であるため，森林フェノロジーの把握が求められる。森林は面積が広大である上に，地形は急峻であることから，人工衛星や航空機などを用いたリモートセンシングによる観測が適していると考える。Melaasら（2013）は，温帯落葉広葉樹林を対象にLandsatTMおよびETM＋から葉の展開（展葉）や紅葉，落葉などを推定した。また，Garonnaら（2014）は約30年間のヨーロッパの植生フェノロジーを衛星画像から求めたNDVIにより把握した。Nagaiら（2015）は日本国内の森林を対象にTerraおよびMODISを用いて2002年から2013年までの森林フェノロジー観測の可能性について検討した。いずれも良好な精度でフェノロジーが観測できたものの，衛星データは空間分解能に制約があり，フェノロジー特性が異なる樹種間での観測が困難であると考えられた。しかし，日本の森林の半分は天然林で，様々な樹種から構成される混交林である場合が多いため，樹種を考慮した観測が必要となる。そこで本研究では，リモートセンシングにより樹種を考慮したフェノロジーの観測手法を開発することを目的とした。本報では，基礎研究として，落葉樹3種における樹葉の分光スペクトル特性の季節変化を明らかにすることを目的とした。

2. 材料および方法

(1) 調査対象

本研究は，北里大学獣医学部十和田キャンパス内の面積約8 haの林地において，代表的な高木種であるカラマツ（*Larix kaempferi*，マツ科カラマツ属），ミズナラ（*Quercus crispula Blume*，ブナ科コナラ属）およびクリ（*Castanea crenata*，ブナ科クリ属）を対象とした。いずれの種も本州において広く分布する種である。

調査期間は2014年5月から11月で，測定間隔は2週間に1回とした。ただし，樹葉の生長や成熟が著しいと推察される展葉期（5月）および黄葉期（11月）については1週間に1回とした。樹葉は，光合成活動が高まる午前中（8時から11時）に，各樹種につき選定した5個体のできるだけ日当たりの良い2～3ヵ所で採取した。その際，樹葉のフェノロジー（展葉，黄葉など）を目視により確認した。

(2) スペクトルの測定

採取した葉を4 cm四方の黒色容器に一定量敷き詰め，スペクト

*北里大学大学院獣医系研究科　青森県十和田市東23番町35－1
**北里大学獣医学部　青森県十和田市東23番町35－1

ル測定用のサンプルとした。この際，樹葉の変色部，ミズナラおよびクリについては主葉脈をサンプルから取り除いた。樹葉と標準白色板の分光スペクトルは，暗室内においてハロゲン光（500W）の照明下でハイパースペクトルカメラ（ImSpector V10，Specim，測定波長：400～1000 nm，波長分解能：6 nm）により取得した。このカメラは，対象物から反射した光を対物レンズで集める。その後，光がスリットを通過することで線状となり，イメージング分光器（ImSpector）によって分光される。分光された光はCCDセンサに照射され，2次元の画像データとして出力される（図1）。出力された画像の水平軸方向は位置情報である空間軸を，垂直軸方向は波長情報である波長軸を示す。このカメラは一度でスリット幅の分光情報が取得できるため，ラインセンサとして機能する。そのため，ハイパースペクトルカメラは三脚に取り付けた電動雲台に装着し，電動雲台を1°/sで回転させることで，測定対象全体の画像を取得した。なお，カメラと対象物の距離は50 cmである。取得した情報は，デジタルビデオカメラ（GR-D650，Victor）により，DVテープに記録した。その後，この画像は動画ファイル（Microsoft DV形式AVIファイル）として，パーソナルコンピュータに取り込んだ。記録した画像は，波長軸が720画素，空間軸が480画素となり，フレームレート（単位時間当たりの画面が書き換えられる回数を表した値）は29.97 fpsとなる。

取得画像を農業用ハイパースペクトル画像解析フレームワーク（岡本ら 2006a，2006b）を基盤に開発したソフトウェアに取り込んだ。このソフトウェアでは，60波長バンドの分光スペクトルを画像の任意の箇所から収集することができる。本実験では，各樹葉サンプルから収集した30画素以上の反射強度の平均値を代表値とし，樹葉の反射強度を標準白色板の反射強度で除すことで反射率に変換した。その後，フェノロジー観測への有効性が示されている植生指数であるGRVI（Green-Red vegetation Index：Kanemasu 1974）を式（1），葉中のクロロフィル含量と相関が高いとされるCI（Chlorophyll Index：Gitelson et al. 1996）を式（2）により算出した。

$$\mathrm{GRVI}=\frac{G-R}{G+R} \quad 式（1）$$

G：503～552 nmの反射率

R：639～676 nmの反射率

$$\mathrm{CI}=\frac{R_{750}-R_{705}}{R_{750}+R_{705}} \quad 式（2）$$

R_{750}：750 nmの反射率

R_{705}：705 nmの反射率"

3.　結果および考察

（1）目視による樹葉フェノロジー観測結果

カラマツは4月中旬から新葉の展葉が始まり，5月初旬には樹冠の全体に葉の展開が確認できた。その後，10月下旬から黄葉が見られ，11月中旬には落葉がほぼ完了した。ミズナラは，4月下旬から新葉の展葉が始まり，5月中旬には葉が最終サイズに達した。その後，10月下旬から黄葉が見られ，11月中旬で落葉がほぼ完了した。クリは，5月初旬から新葉の展葉が始まり，5月下旬には葉が最終サイズに達した。その後，10月下旬から黄葉が見られ，11月の下旬に落葉がほぼ完了した（表1）。樹種間で展葉のフェノロジーには約1ヵ月，落葉では約0.5ヵ月の差が確認されたが，いずれも例年通りで，フェノロジーに影響を及ぼす気温も例年と同様であった。加えて，夏季以降（7月から9月）に，ミズナラにおいてすす病が観察された。すす病とは多くの植物で発生する病気で，葉に付着した昆虫の排せつ物や分泌物にカビの一種である糸状菌が寄生することで葉や枝などすすをかぶったように黒くなる。葉がすす病で覆われると光合成が阻害する場合もあり，すす病の発生はスペクトル特性に影響を及ぼすと推察された。

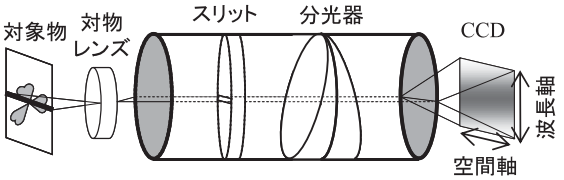


図1　ハイパースペクトルカメラの構造

（2）スペクトル特性の季節変化

春季（5/21），夏季（8/13），秋季（11/19）における3樹種の樹葉のスペクトル特性は，一般的な植物の分光スペクトルと同様の傾向であった（図2）。春季では可視域緑色光（波長：550 nm付近）に明瞭なピークが見られるが，夏季になるとこのピークは3～5%ほど低くなった。これは，新葉の生長に伴う光合成色素量の変化，または葉色の変化を捉えていると考えられる。また，近赤外域の反射率は春季から夏季にかけて最大で約17%低下した。近赤外域の反射率は葉内部構造，主に空隙と密接な関係があり，葉内の空隙が増えると近赤外域の反射率が増加する（Gausman 1970）。よって，春季から夏季にかけての樹葉では葉内の空隙が減少していることが推察される。夏季から秋季にかけては可視域における反射率が大きく上昇し，スペクトルの形状が大きく変化した。これは黄葉現象による光合成色素の減少に伴い，色素による吸収波長帯での反射率が高くなったことが要因に考えられる。また，すす病による生育阻害が考えられたが，一般の分光スペクトルと同様の傾向を示していた。よって，すす病よりも色素や内部形態の変化の影響が大きいことが考えられた。

（3）GRVIの経日変化

GRVIは，春季（5/7～14）に0.3程度で最も高い値を示した。その後，経日的に低下し，夏季は春季より0.1～0.2程度減少した。夏季（7月～8月）には横ばい状態で推移し，大きな変化は確認されたかった。春季および夏季ともに樹種内のばらつきを示す標準偏差は0.08以下であった。一方，秋季は夏季より0.1～0.4程度減少し，11月中旬には-0.2程度となった。また，個体間のばらつきを示す標準偏差も高い値（0.01～0.23）を示した（図5）。GRVIは可視光緑色光と赤色光から算出されるため，葉色の変化を捉えていると考える。そのため，春季から夏季の変化は新葉の生長に伴う葉色の変化（黄緑から深緑）を，秋季における変化は黄葉現象を捉えていると

表1　各樹種の展葉および黄葉の期間

		月								
		4	5	6	7	8	9	10	11	12
フェノロジー	カラマツ	◀┈┈▶							◀──▶	
	ミズナラ		◀┈┈▶						◀──▶	
	クリ		◀┈┈▶						◀──▶	
2014年の月平均気温(℃)*		7.9	14.7	17.1	21.9	21.9	17.5	11.4	6.7	−0.6
過去の月平均気温(℃)**		7.8	12.9	16.4	20.1	22.1	18.1	12	6	0.8

◀┈┈▶展葉，　◀──▶黄葉

＊十和田地域気象観測所のデータを引用，**1981～2010年における月平均気温（十和田地域気象観測所）

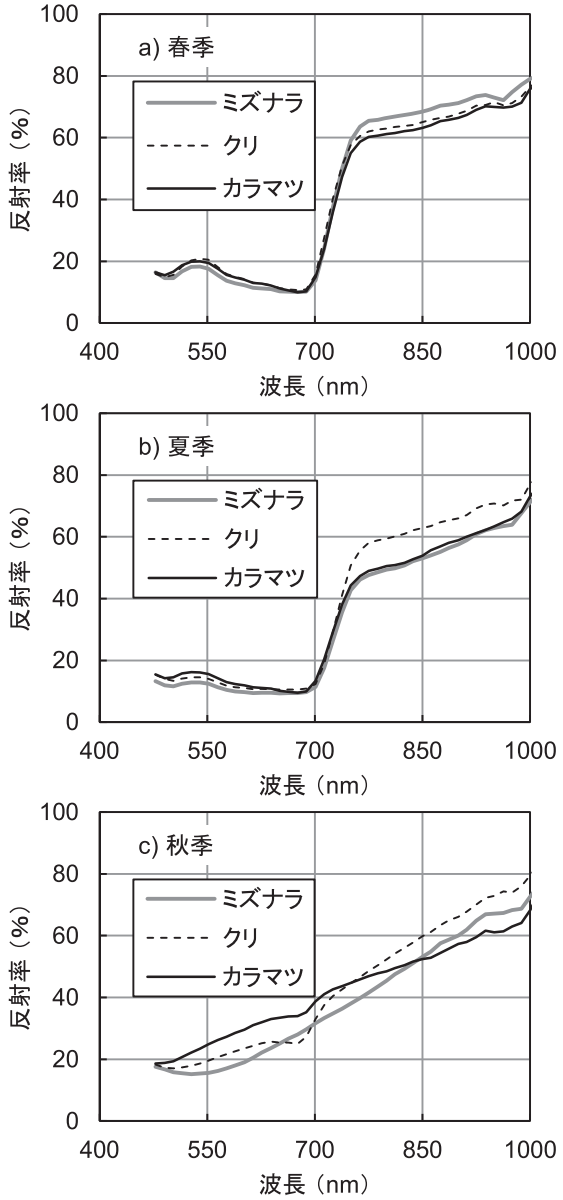


図2　各季節の樹葉のスペクトル

考えられる。また，秋季では個体によって黄葉の進行程度に差があったため，標準偏差が高くなったと推察した。

(4) CI の経日変化

CI は春季（5/7～14）に 0.26～0.43 程度で，その後初夏にかけて増加した。夏季には 0.4～0.5 の間で横ばいに推移しているもの，ミズナラは 6 月から 8 月の間で 0.08 程度低下した。秋季は夏季より急激に減少し，11 月下旬には 0.05～0.1 程度となった（図 7）。CI は葉中のクロロフィル量と相関が高く，吉川ら（1994）の SPAD 値（SPAD 値はクロロフィル濃度と高い相関関係がある）の季節変化と概ね同様の傾向を示していた。よって，これらの変化はクロロフィル量を反映していると考えられる。また，秋季においてカラマツでは黄葉が見られると同時に値が低下したが，ミズナラおよびクリでは黄葉の 30 日程度前から値の減少が始まった。この違いは樹種間でのクロロフィルフェノロジーの違いが原因と推察した。なお，ミズナラにおける夏季の値の低下は，すす病に伴う光合成の阻害が影響していると推察した。

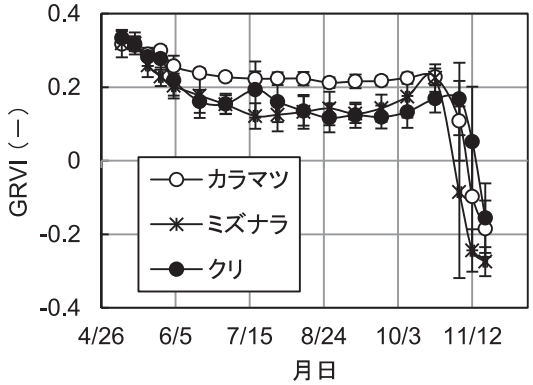


図3　GRVI の経日変化

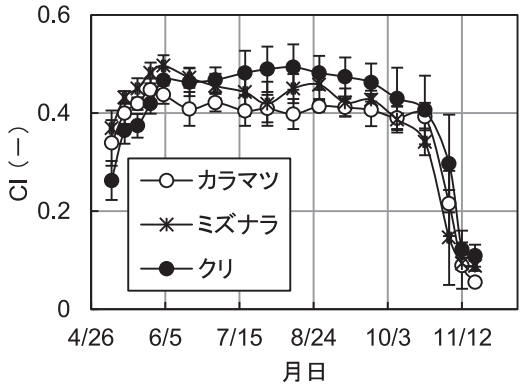


図4　CI の経日変化

4.　摘要

本研究はリモートセンシングによってフェノロジーを樹種ごと

に観測するための基礎研究として、人工照明下にて樹葉スペクトルの時系列データを取得した。その結果，以下のことが明らかとなった。

(1) 樹葉の分光スペクトルは，春季・夏季および秋季で異なる傾向を示した。これは，光合成色素量の変動や葉内部構造を反映していると考えられた。

(2) GRVI は葉色の変化を反映しており，春季の新葉の生長や秋季における変化は黄葉現象を捉えていると考えられる。

(3) CI は葉中のクロロフィル量と相関が高く，クロロフィル量を反映していると考えられた。また，樹種により CI の変化が異なることから，樹種間のクロロフィルフェノロジーの違いをとらえていると考えられた。

(4) これらの結果から，樹種ごとのフェノロジー特性は樹葉の分光スペクトルから観測できる可能性が示された。

謝辞

本研究の遂行に当たって，北海道大学大学院農学研究院岡本博史准教授には実験機器を提供して頂きました。また，北里大学獣医学部生態管理学研究室の専攻生の皆様には本研究に対して多大なる協力をして頂きました。ここに記して感謝の意を示させて頂きます。

引用文献

1) 藤本征司，2007．広葉樹 29 種の 10 年間の開芽フェノロジー観測に基づく開芽日予測法の検討，日林誌，89 (4)，253-261.

2) Garonna, I., Jong, D.R., Dewit, J.W.A., Mucher, A.C., Schmid, B., Schaepman, E.M., 2014. Strong contribution of autumn phenology to changes in satellite-derived growing season length estimates across Europe (1982-2011). Global Change Biology, 20, 3457-3470.

3) Gausman H.W., Allen W.A., Cardenas R., Richardson A. J. 1970. Relation of light reflectance to histological and physical evaluations of cotton leaf maturity, Appl. Opt, 9(3), 545-552.

4) Gitelson, A.A., Merzlyak, M.N., 1996. Signature analysis of leaf reflectance spectra: algorithm development for remote sensing of chlorophyll, J Plant Physiol, 148, 494-500.

5) Kanemasu, E.T., 1974. Seasonal canopy reflectance patterns of wheat, sorghum and soybean, Remote Sens Environ, 3, 43-47.

6) 樋口広芳，小池重人，繁田真由美，2009．温暖化が生物季節，分布，個体数に与える影響，地球環境，14 (2)，189-198

7) IPCC, 2013, Climate Change 2013. The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change.

8) 増田啓子，吉野正敏，朴 恵淑，1999．生物季節による温暖化の影響と検出，地球環境，4 (1)，91-103.

9) Melaas, K.E., Friedl, A.M., Zhu, Z. 2013. Detecting interannual variation in deciduous broadleaf forest phenology using Landsat TM/ETM+ data, Remote Sens. Environ, 132, 176-185.

10) Nagai, S., Saitoh, M.T., Nasahara, N.K., Suzuki, R. 2015. Spatio-temporal distribution of the timing of start and end of growing season along vertical and horizontal gradients in Japan. Int J Biometeorol. 59. 47-54.

11) 岡本博史，酒井憲司，村田哲郎，片岡 崇，端俊一，2006a．ハイパースペクトル画像による多目的解析に対応したオブジェクト指向ソフトウェアフレームワークの構築，農業情報研究，15 (2)，103-112.

12) 岡本博史，酒井憲司，村田哲郎，片岡 崇，端俊一，2006b．ハイパースペクトル画像解析フレームワークを利用したリモートセンシングソフトウェアの開発，農業情報研究，15 (3)，219-230.

13) Saitoh, M.T., Nagai, S., Saigusa, N., Kobayasi, H., Suzuki, R, Nasahara, N.K., Muraoka, H. 2012. Assessing the use of camera-based indices for characterizing canopy phenorogy in relation to gross primary production in a deciduous broad-leaved and an evergreen coniferous forest in japan. Ecological Informatics, 11. 45-54.

14) 上治雄介，今泉文寿，2013．デジタルカメラ画像を用いた開葉期，落葉期の客観的識別手法の検討，筑波大農林研報，1，39-46.

15) 吉村晴香，田中總太郎，小橋澄治，大手桂ニ，妹尾俊夫，国友 優，1991．単葉および重なり合った葉の近赤外域反射の季節的変化，日本リモートセンシング学会誌，11 (4)，5-19.