

農業機械学会東北支部報

No. 59 DEC. 2012

平成24年12月

目次

巻頭言

- ・学会名変更と支部会の今後の活動・・・・・・・・・・・・・・・・・・次期支部長・夏賀元康・・1

研究報告

- ・近赤外分光法によるヤギ生乳成分の測定（第2報）・・・・・・・・鳥友図・片平光彦・夏賀元康・吉田宣夫・・3
- ・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1報）・・・・・・・・設楽徹・片平光彦・夏賀元康・・7
- ・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2報）
・・・・・・・・鈴木ミチル・設楽徹・片平光彦・夏賀元康・・13
- ・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3報）
・・・・・・・・設楽徹・鈴木ミチル・片平光彦・夏賀元康・・17
- ・ステレオ視と KINECT センサによる栽培果菜類の三次元距離計測の事例・・野上規朗・高橋照夫・張樹槐・・23
- ・Effect of the Narrow Ridge - Direct Sowing Technique of Saving Labor in Green Soybean (Edamame) Production
・・・・・・・・Tonny KINSAMBWE・Mitsuhiko KATAHIRA・Motoyasu NATSUGA・・27
- ・ベニバナ花卉収穫機の開発・・・・・・・・後藤克典・長沢和弘・勝見直行・原田博行・・31
- ・寒冷地における耕作放棄地へのナタネ導入について
・・・・・・・・金井源太・澁谷幸憲・天羽弘一・本田裕・齋藤秀文・・35
- ・八郎潟干拓地水田における稲わら収集作業の特徴・・齋藤雅憲・進藤勇人・片平光彦・加藤良成・山谷正治・・39
- ・八郎潟干拓地稲わら収集作業における稲わら水分の変動要因
・・・・・・・・進藤勇人・齋藤雅憲・片平光彦・加藤良成・山谷正治・・43
- ・近接リモートセンシングによるブタナ頭花の検出
・・・・・・・・鈴木由美子・升本義丈・小泉佑太・田中勝千・杉浦俊弘・・47
- ・田代平地域におけるブタナ分布域推定のための草種判別
・・・・・・・・小泉佑太・田中勝千・鈴木由美子・杉浦俊弘・皆川秀夫・升本義丈・・51
- ・クロロフィル蛍光を用いた水稻の塩ストレス評価
・・・・・・・・渡邊翔太・田中勝千・皆川秀夫・杉浦俊弘・鈴木由美子・岩崎悠・中坪あゆみ・・55

トピックス

- 【若手の会活動の報告】・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・59
- 【支部学術賞を受賞して】・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・61
- 【支部奨励賞を受賞して】・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・62

支部会記事

- 庶務報告及び会計報告・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・63
- 平成24年度研究発表会発表課題・・・・・・・・・・・・・・・・・・72
- 農業機械学会次期東北支部役員及び役員体制・・・・・・・・・・74
- 農業機械学会東北支部規約・表彰規定と内規・役員選挙規定・投稿規定・・・・・・・・・・75

- 東北地域農業機械関係の研究担当者名簿・・・・・・・・・・・・・・・・81
 - 団体賛助会員名簿・個人会員名簿・・・・・・・・・・・・・・・・・・87
-

巻頭言

学会名変更と支部会の今後の活動

次期支部長 夏賀元康（山形大学農学部）

1. はじめに

今期に続き、次期の支部長を拝命しました。支部規約に支部長の重任を可とする規定を盛り込んで最初のケースになりました。2年間、よろしく申し上げます。

学会名を農業機械学会から農業食料工学会に変更することが今年度の総会において圧倒的多数の賛成で承認されました。農業機械の黎明期の1937年に創立された農業機械学会は、水田稲作機械化体系が1970年代にほぼ完成してから、次第に農業機械だけでなく、農産加工、バイオマス分野など、多くの分野を対象を広げてきました。その結果、最近では学会名が実態を反映しなくなってきたことは支部会員の皆さんも感じておられたと思います。大下学会長から学会名変更が提案され、1年間の議論の末に2012年度総会で承認されました。学会名の変更に伴う諸規定の変更にかかるため、2013年4月から新学会名にはならず、9月の帯広畜産大学での学会からになりそうです。支部としても名称変更することになりますが、総会

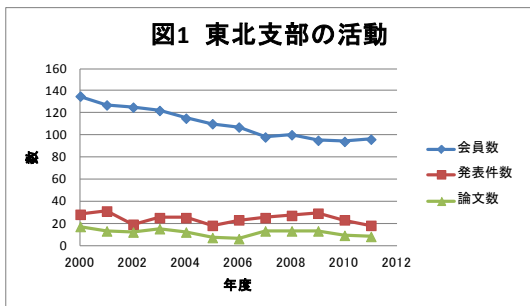
の議決事項ですので、2013年度の総会時に名称変更の提案をします。農業機械という名称が学会名から消えることに寂しさを覚えるむきもあろうかとは思いますが、農業と食料を学会名に取り込むことにより会員の範囲が広がります。これは会員拡大のチャンスですので、支部会員の皆さんは積極的に新規会員の勧誘をしていただきたい。これを機に支部活動が更に活発になることを期待しています。

さて、この2年間で最大のできごととは2011年3月11日の東日本大震災です。この震災により、太平洋沿岸の岩手・宮城・福島3県では甚大な被害を受けました。さらに大震災によって引き起こされた福島第一原子力発電所の事故は広範囲に放射性物質をまき散らし、農産物などへの被害ははかりしれません。農業機械学会は東日本大震災調査検討委員会を立ち上げて取り組んでいます。東北支部でも太平洋側3県の研究機関が主になって農地の復興などに取り組んできました。しかし、政権の末期症状で混乱が続き、なかなか本

格的に復興してきたという手応えが感じられません。これだけでも政権交代は必至でしょうが、右傾化が心配されます。外交など、妙な方向に行くことは避けなければなりません。

2. 東北支部の現況

図1に示したように、東北支部の会員数は学生会員を併せて100名前後で、減少傾向は最近緩やかになったとはいえ、続いています。会員数の減少は現下の情勢では止むを得ないと感じていますが、会員数の減少は支部の財政に会費収入の減少という形で直接的に悪影響を及ぼします。そのため、支部役員の手当を半減し、旅費を節約する、などの対策を取ってきましたが、抜本策にはならないため、2012年度から支部報発行の経費削減に取り組んでいます。会員の皆さんには投稿規定の変更などご迷惑をお掛けしますが、ご理解をいただければ幸いです。



3. 活動方針の継続

2011～2012年度の活動方針としていくつかの項目を挙げました。地域貢献、国際貢献、会員数増加、支部運営の世代交代などです。地域貢献については2年の任期中に各県がそれぞれ最低1回は研究会やシンポジウムを開催するようにしたいと書きましたが、震災の影響で達成は出来ませんでしたので、さらに来期も継続して達成していきたいと思いません。国際貢献もさらに進めなければなりません。こういう活動を通じて支部会の知名度を上げ、新会員の獲得につながっていければいいと考えています。世代交代に関しては率先して足を引っ張ってしまったようで恐縮ですが、30代後半から40代前半の若手が次第に増えてきましたので、できるだけ若い人たちに支部運営に参加していただくようにしていきたいと考えています。

4. おわりに

課題は山積していますが、会員の皆様のご協力をいただいで東北支部の活性化と体質改善に取り組んでいきたいと思いません。2014年度には岩手大学で合同学会が予定されています。弘前での学会と同じく、支部全体で取り組んでいきますのでご協力をよろしくお願ひします。

近赤外分光法によるヤギ生乳成分の測定 (第2報)

—ヤギ生乳成分の変動と測定精度—

鳥 友図*・片平光彦**・夏賀元康**・吉田宣夫**

Constituent Content Determination of Goat Raw Milk

Using Near-Infrared Spectroscopy (Part 2)

--The Fluctuation of Goat Raw Milk Constituent Content and NIRS Prediction Accuracy--

Yuuto WU*・Mitsuhiko KATAHIRA**・Motoyasu NATSUGA**・Norio YOSHIDA**

Abstract

We investigated the fluctuation of goat milk constituents and the possibility of improving the accuracy of near-infrared spectroscopy (NIRS) to predict goat raw milk constituent content using transmittance spectra in short wavelength range 650-1100nm. Milkoscan was used for reference analysis. PLS regression with full-cross validation method was employed for the development and the validation of models. Results showed that the goat milk constituent content fluctuation was larger in fat and protein, and smaller in lactose, and that good calibration models could not be developed for 10mm pathlength. In order to improve the accuracy of NIRS in short wavelength range, we may need for stronger light source with temperature stability of milk sample.

[Keywords] near-infrared spectroscopy, goat, raw milk

1. はじめに

ヤギは最も古い家畜の1つであり、その乳は世界各地のいろいろな民族の人々に、栄養摂取源として利用されてきた。ヤギ生乳の品質はいくつかの要素に依存することが知られており、特に種の特性、泌乳期の段階、遺伝、繁殖習性、飼育方法、搾乳方法や生理状態などに深く関係している¹⁾。これらの要素との関係を解明することは生乳を生産する酪農家にとっては重要である。この解明をさらに進めるには、常に乳質の継続的な検査を行ない乳成分の変動をモニタリングする必要があり、そのためには、迅速かつ簡便な検査手段が求められる。

近赤外分光法は、農産物や食品を構成するO-H、C-H、N-Hなどの官能基の近赤外波長域における吸収スペクトルによりそれらの成分あるいは特性を推定する非破壊分析法の一種である。1975年にはカナダ穀物委員会 (CGC) に、1978年には米国農務省穀物検査機関 (USDA/FGIS) に小麦タンパク質分析の公定法としてそれぞれ採用され、その後、肉製品・青果物・シリアルフード・タバコ・羊毛などの水分・脂質・タンパク質・炭水化物の分析に用いられるなど、分析対象・試料形態は多岐にわたっている²⁾。

また、市販の近赤外分光分析計の検出器は、1100nm以下の波長ではシリコン(Si)ディテクタが、1100nm以上の波長では硫化鉛 (PbS) とインジウムガリウムヒ素 (InGaAs) ディテクタが一般的に使われている。PbS と InGaAs ディテクタはSi ディテクタに比較して高価であり、また温度特性が大きいので、ペルチエ素子を使った電子冷却などによりディテクタを一定温度に冷却しなければならず、これが分析計のコストを引き上げる要因となっている。Si ディテクタにはこれらの欠点がなく、低コストのため、測定波長範囲はSi ディ

テクタが使用できる1100nm以下であることが望ましい³⁾。

そこで、本研究では基礎研究として、ヤギ生乳の品質を評価する上で主な基準となる乳主要成分 (乳脂肪、乳タンパク質、乳糖、無脂固形分SNF、全固形分TS) の含量を、近赤外分光法 (波長範囲650-1100nm) によってどの程度の精度で推定できるか検討した。第1報では、2010年の6月初旬から7月下旬にかけて採集した試料を用いて作成した、ヤギ生乳の成分含量を推定するキャリブレーションの精度について、乳脂肪と乳タンパク質は精度よく測定できたが、乳糖は精度よく測定できなかったと報告した。無脂固形分は乳脂肪以外の固形分であり、乳糖の占める割合が大きいことから、その測定精度が乳糖の低い測定精度に影響されたと考えられた。一方、TSは乳糖の割合が相対的に小さいため、乳糖の影響がSNFほどではなかった。乳糖キャリブレーションの精度が低かった原因の1つとしては、キャリブレーション作成に用いた試料の乳糖の成分範囲が狭かったことが考えられた。また、第1報では光路長 (試料セル) に2mm、5mm、10mmの3種類を用いてスペクトルを測定した。光路長が長くなると試料からの情報をより多く持つスペクトルが得られ測定精度の良いキャリブレーションが作成できることが期待できるが、結果としては10mmによる測定精度が5mmに優れることはなかった。その原因の1つとしては光強度が不足したことが考えられた。これらの結果から本報では、①試料の成分範囲を大きくすること、②光路長10mmの測定方法を改良すること、の2点によって精度の良いキャリブレーションが作成できないか検討した。

*:岩手大学大学院連合農学研究科

** :山形大学大学院農学研究科

2. 材料と方法

(1) 供試試料

ヤギ生乳試料は前報と同様に、山形大学農学部附属農場に飼育している日本ザン種ヤギの乳を用いた。本報では、サンプリング期間を2011年の4月下旬から8月初旬まで3ヶ月以上と長くし試料数を増やした。

(2) 基準分析

前報と同一のMilkoscan 133B (Foss Electric, Denmark)を使用して生乳試料の乳脂肪、乳タンパク質、乳糖、SNFとTSを測定し、基準値とした。

(3) スペクトル測定

生乳の透過スペクトルは前報と同じ光学測定系によって波長範囲650-1100nmで測定した。測定条件は、積分時間と繰り返し回数を、光路長2mmでは積分時間0.5秒×繰り返し回数10、5mmでは2.5秒×10、10mmでは前報通りの5秒×10と積分時間を長くした10秒×10にそれぞれ設定した。

(4) キャリブレーションの作成と検証

統計解析ソフトウェアThe Unscrambler v9.8 (CAMO, Norway)を使用し、full-cross validation手法によるPLS回帰分析によってキャリブレーションの作成と検証を行なった。

3. 結果と考察

(1) 乳成分の変動

乳脂肪、乳タンパク質、乳糖などの乳成分は血液から乳腺に取り込まれる種々の原料から合成されるものである。このため、乳脂肪、乳タンパク質、乳糖、SNF、MUN(乳中尿素態窒素)等の変化から、摂取飼料の量やバランスが適正かどうか、ヤギの体調を知ることができる。牛の場合では、乳成分は一般に泌乳期や産次などの要因によって大きく変動することがすでに明らかにされており、同じ哺乳類反芻動物であるヤギも同じ傾向を示すことが推測できる。そこで、本研究では、まず、基準分析値(Milkoscanの測定値)に基づいて乳成分の変動を検討した。図1に2010年の成分変動を、図2に2011年の成分変動を、それぞれ示した。2010年では、乳脂肪は \bar{x} (平均)=1.68%, SD(標準偏差)=0.64%, CV(変動係数)=0.38, 乳タンパク質は \bar{x} =2.43%, SD=0.29%, CV=0.11, 乳糖は \bar{x} =3.77%, SD=0.19%, CV=0.05, SNFは \bar{x} =7.20%, SD=0.32%, CV=0.04, TSは \bar{x} =8.87%, SD=0.85%, CV=0.10であり、2011年では、乳脂肪は \bar{x} =3.40%, SD=2.01%, CV=0.59, 乳タンパク質は \bar{x} =2.97%, SD=0.50%, CV=0.17, 乳糖は \bar{x} =4.27%, SD=0.27%, CV=0.06, SNFは \bar{x} =8.24%, SD=0.54%, CV=0.07, TSは \bar{x} =11.64%, SD=2.28%, CV=0.20であった。2年を通して、乳脂肪と乳タンパク質の変動は大きく、乳糖の変動は小さかった。2011年では、サンプリング期間を長くし試料数を増やしたにもかかわらず、乳糖の変動は小さく、成分範囲は大きくならなかった。すなわち、単に搾乳期間を延長して試料数を増やすことでは乳糖の成分範囲を広めることはできなかった。DRAČKOVÁ⁴はチェコ白短毛ヤギの乳を対象にした研究で、乳糖の成分範囲が0.55%と、さらに狭い範囲内で変動する結果を得ており、乳糖の変動の小ささはヤギの生理的要因に由来するものであると考えられる。SNFは乳中の固形物のうち乳脂肪を除いたものであり、乳タンパク質、乳糖、ミネラル、ビタミンなどが

含まれる。このうち乳タンパク質と乳糖が圧倒的に多いこと、乳糖の変動が小さかったため、SNFの変動は乳タンパク質の変動と並行したと考えられる。

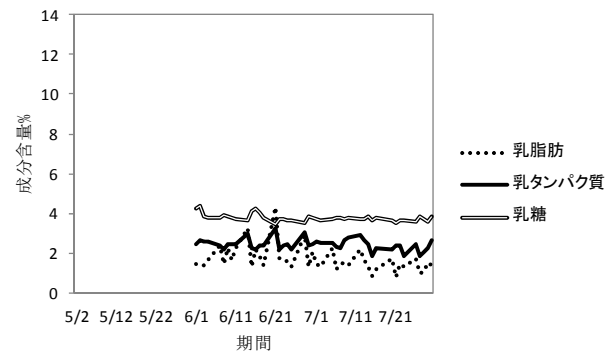


図1 2010年供試ヤギ21号の乳成分変動

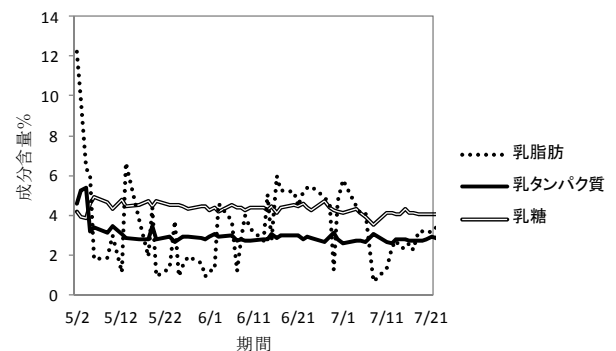


図2 2011年供試ヤギ378号の乳成分変動

(2) 光路長による測定精度

近赤外分光法は、如何にして測定対象の情報を多く持つスペクトルを測定するかが重要である。本研究では、2mm、5mm、10mmの光路長を用いてスペクトルを測定した。光路長が長くなると成分の情報をより多く持つスペクトルが得られ、精度の良いキャリブレーションが作成できると予想したが、前報の結果では、光路長の違いによるキャリブレーションの精度は2mm<5mm=10mmとなった。その原因は光強度の不足が考えられた。そこで本報では、光源が前報と同一であるので、光強度を増加させるため露光時間(積分時間)を長くしてスペクトルを測定した。表1は光路長10mmで積分時間を変えたときの精度を比較したものであるが、精度の向上はわずかに見られるものの所期の精度は得られず、やはり5mm≧10mmの結果であった。夏賀ら³は、牛乳の近赤外透過スペクトルを本研究と同じ短波長域(400-1098nm)で3種類(1mm, 4mm, 10mm)の光路長によって測定し、乳脂肪、乳タンパク質と乳糖の成分含量を推定したが、光路長が4mmから10mmになった場合では、精度が著しく上がる結果であった。夏賀らの研究では、スペクトル測定中に試料温度を40℃に維持したが、本研究ではスペクトル測定中に試料セルを保温していない。このことから、本研究では光路長5mmから10mmになる時に測定精度が向上しなかった原因には、露光時間の長くなったこと(最長1分40秒)によって測定中に試料の温

度が低下し、測定に悪影響を与えた可能性が考えられる。

(3) キャリブレーション結果

2年分の試料を用いて作成したキャリブレーションの結果を表2に示した。各乳成分の光路長別によるキャリブレーション精度は5mmによるものが最も高かった。5つの乳成分では、乳脂肪のキャリブレーションの決定係数が $r^2=0.89$ と最も大きかった。これは成分範囲が一番広がったことによる。測定精度 $SECV=0.48\%$ は他に比べ大きく、また、夏賀らの光路長10mmでの測定精度 $r^2=0.93$ 、 $SECV=0.38\%$ よりいずれも劣ったため、さらに精度向上を検討する必要がある。図3に散布図を示した。乳タンパク質のキャリブレーションは、図4に示したように $r^2=0.68$ 、 $SECV=0.22\%$ と、夏賀らの得た測定精度 $r^2=0.48$ 、 $SEP=0.14\%$ （光路長10mmと波長範囲400-1098nm）より乳脂肪と同様に劣り、さらに精度向上を検討する必要がある。キャリブレーションの精度が最も低かったのは乳糖であり、図5に示したように r^2 が非常に低く、精度の良い推定はできなかった。SNFとTSの推定精度が比較的低かったのは、乳糖推定精度の低さが影響しているものと考えられる。乳糖の推定精度が低

かったのは搾乳期間を延長したにもかかわらず乳糖の変動が小さく成分範囲が狭かったことが主な理由であると考えられる。これはヤギの生理的要因によるものであると考えられるため、なんらかの方法で乳糖の成分範囲を大きくすることができれば精度の良い乳糖キャリブレーションが作成できる可能性はある。

DRAČKOVÁら⁴⁾は、FT-NIRによって波長範囲10000-2500 cm^{-1} （1000-4000nm）でヤギ生乳の成分測定を行ない、乳脂肪、乳タンパク質、乳糖、SNF、TSの標準誤差を0.15、0.11、0.05、0.19、0.33と報告しており、いずれも本研究の結果より優れていた。これは、高価なFT-NIR装置により長波長領域で得られた結果であり、本研究に使用した測定装置は精度が劣るもののはるかに安価で、なおかつオンライン・リアルタイム計測に向いていることを考慮すれば一概に優劣を判断できない。以上のことから、本研究で得られた精度は先行研究の同一波長範囲及び長波長範囲で得られた精度には及ばなかったが、試料温度を一定に維持する、安定したスペクトルが得られるように光学系を改良する、などを検討していけば実用出来る可能性があると判断した。

表1 光路長10mmで積分時間を変えたときの精度比較

乳成分	光路長 10mm	最適波長範囲(nm)	nF	r^2	SECV (%)
乳脂肪	積分時間 5000msec	700-1000	7	0.87	0.56
	積分時間 10000msec	750-1000	5	0.89	0.52
乳タンパク質	積分時間 5000msec	750-900	3	0.24	0.24
	積分時間 10000msec	750-950	10	0.35	0.21
乳糖	積分時間 5000msec	700-1050	9	0.20	0.25
	積分時間 10000msec	650-1000	9	0.21	0.24
SNF	積分時間 5000msec	650-1050	3	0.21	0.41
	積分時間 10000msec	700-1050	8	0.24	0.41
TS	積分時間 5000msec	700-1050	8	0.87	0.71
	積分時間 10000msec	750-1000	5	0.84	0.78

* nF：回帰分析のファクタ数、 r^2 ：決定係数、SECV：近赤外分光法による予測値の標準誤差

表2 2年分の試料を用いて作成したキャリブレーションの結果

乳成分	光路長	最適波長範囲(nm)	試料数	nF	r^2	SECV (%)
乳脂肪	2mm	650-1050	340	9	0.80	0.64
	5mm	750-1050	351	8	0.89	0.48
	10mm	700-950	331	6	0.84	0.54
乳タンパク質	2mm	650-1050	347	7	0.60	0.25
	5mm	700-1000	350	7	0.68	0.22
	10mm	750-950	343	8	0.57	0.26
乳糖	2mm	700-1000	350	8	0.32	0.25
	5mm	650-1000	354	8	0.38	0.24
	10mm	650-900	347	6	0.36	0.24
SNF	2mm	750-1050	344	8	0.59	0.37
	5mm	650-950	342	2	0.70	0.32
	10mm	650-1050	346	7	0.54	0.43
TS	2mm	700-1050	346	8	0.78	0.85
	5mm	650-1050	351	6	0.86	0.68
	10mm	650-1050	346	7	0.75	0.99

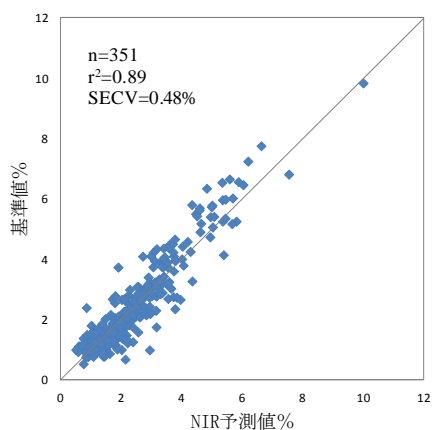


図3 乳脂肪キャリブレーションの散布図 (光路長5mm)

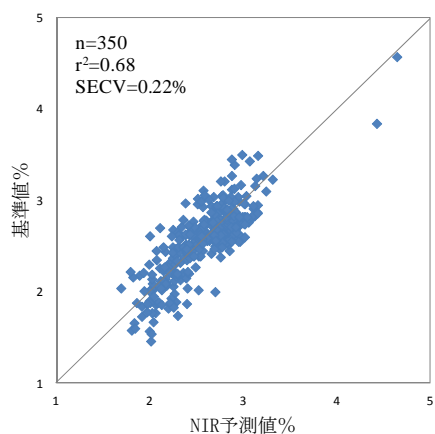


図4 乳タンパク質キャリブレーションの散布図 (光路長5mm)

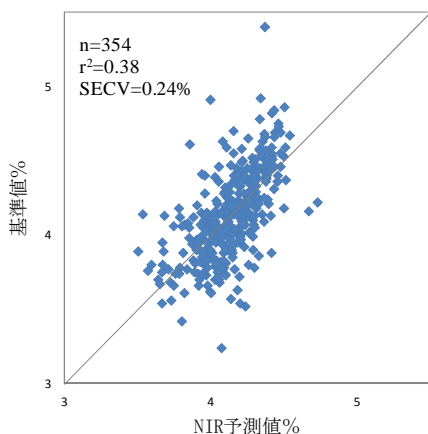


図5 乳糖キャリブレーションの散布図 (光路長5mm)

4. まとめ

前報の結果から、近赤外短波長域 (650-1100nm) の透過スペクトルを利用してヤギ生乳の成分率を精度よく推定するには、成分範囲を大きくすること、光路長を長くすることが考えられたため、本報ではこれら2点について搾乳期間の延長と積分時間の延長を行い検討した。その結果、乳脂肪と乳タンパク質では比較的精度の良いキ

ャリブレーションが得られたが、乳糖では得られなかった。乳糖の精度を向上させるためには成分範囲を何らかの方法でさらに大きくする必要があると考えられる。また、光源の強度を強くして積分時間を短くし、繰り返し回数を増やすことによりノイズの低減を図ること、さらに測定中に試料の温度が低下しないように光学系を改良すること、などでも精度の向上の可能性は残されているので、今後検討していきたい。なお、本研究で用いた生乳試料は冷凍保存されたため、冷凍による影響については別途検討が必要である。

5. 謝辞

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には、ヤギ生乳試料のご提供をいただいた。また、山形県農業総合研究センター畜産試験場には、Milko-scanのご提供をいただき、生乳試料の分析にご指導およびご協力をいただいた。さらに、生産機械システム研究室の学生には生乳の採取と分析にご協力をいただいた。ここに記して謝意を表する。

参考文献

- 1) Aganga, A., Amarteifio, J., Nkile N., 2002. Effect of stage of lactation on nutrient composition of Tswana sheep and goat's milk, *J Food Compos Anal* 15, 533-543.
- 2) 佐藤哲生, 岩元睦夫, 橋詰和崇, 吉野正純, 古川左近, 染谷幸雄, 矢野信禮, 1985. 近赤外分光分析法による生乳成分の測定, *日本畜産学会報*, 56 (11), 878-882.
- 3) 夏賀元康, 川村周三, 伊藤和彦, 2002. 近赤外分光法における測定波長範囲と光路長が生乳成分の測定精度に与える影響, *農業機械学会誌*, 64 (5), 83-88.
- 4) Dračková, M., Hadra, L., Janštová, B., Tilová, P., Přidalová, H., Vorlová, L., 2008. Analysis of goat milk by near-infrared spectroscopy, *ACTAVET. BRNO* 2008, 77, 415-422.
- 5) 佐藤哲生, 吉野正純, 古川左近, 染谷幸雄, 橋詰和宗, 矢野信禮, 1985. 赤外線牛乳分析器による全乳固形分率測定のための補正值, *日本畜産学会報*, 56, 215-220.
- 6) 岩元睦夫, 河野澄夫, 魚住純, 1994. 近赤外分光法入門, 幸書房, 25.

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1報)

—近赤外分光法によるコンクリート構造物の診断の可能性—

設楽 徹*・片平 光彦**・夏賀 元康**

The Diagnosis of Concrete Deterioration in Infrastructures Using Near-Infrared Spectroscopy (Part 1)

- Possibility of the Diagnosis of Concrete Deterioration in Infrastructures Using Near-Infrared Spectroscopy -

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

Abstract

Many reports have been issued recently of damages in infrastructures such as bridges and tunnels caused by the deterioration of concrete with which they are mainly made of. In order to prevent serious damage to them with the detection of concrete deterioration in the early stage, we investigated the applicability of near-infrared spectroscopy (NIRS) to the detection of deterioration caused by neutralization and salt damage. We obtained results; $R^2=0.88-0.96$ and RPD =2.74-4.66 and concluded that NIRS can be applied to the detection of concrete deterioration.

[Keyword] near infrared spectroscopy, concrete, deterioration, carbonation, salt damage

1. はじめに

日本の社会資本整備における現在の重要な課題として、老朽化した社会資本の更新コストの縮減、突発的な社会資本の機能不全の防止のため、既存の社会資本をいかに経済的かつ効率的に維持管理していくかということが挙げられる。

社会資本の大部分を占めるコンクリート構造物は、これまで半永久的な構造物であり、かつメンテナンスフリーと位置付けられ、維持管理に注意が払われることは少なかった。しかし、その性能にはやはり限界があり、コンクリートは時間の経過とともに劣化して行くことは避けられず、現存するコンクリートの大部分には何らかの劣化が発生し、補修・補強が必要なものが少なくない。

こうしたコンクリート構造物の経済的かつ効率的な維持管理には、正確な調査・診断に基づく計画の作成及び補修・補強の実施が求められる。しかし、社会資本はその性質上、広範囲に分布するため調査範囲が極めて広く、かつ環境条件や立地条件が厳しい場合が多く、またそのストックが膨大であるため、調査・診断に多大な労力と費用を必要とすることが推測される。また、現在の調査・診断は、目視によりその大部分が実施されているが、構造物内部で発生し、外部に変状が現れない損傷・劣化は発見できない。今後の社会資本の調査・診断について、従来の診断方法では経済的かつ効率的な対応が困難であると懸念されている。

そこで近年、老朽化したコンクリート構造物の診断において、非破壊試験の重要性が指摘され、それにとともに多くの非破壊試験手法が開発されてきている。非破壊試験により現場で簡便・迅速・低

コストにコンクリートの劣化情報を得ることができれば、将来の社会資本の維持管理において極めて有効であると考えられる。また、非破壊試験は目視検査では発見できない化学的劣化を診断することができる方法であり、適切に活用すればより確実な維持管理を行うことができる。

近年では、魚本(2006)らによって、コンクリートの化学的情報を、非破壊試験法である近赤外分光法を用いて診断する手法が試みられており、現場における簡便・迅速・低コストの診断技術として今後の展開が期待されている。

そこで、本研究では近赤外分光法によるコンクリート構造物の劣化の診断の可能性について検討を行った。

2. コンクリート構造物の劣化

コンクリートの劣化はひび割れなどの物理的なものや、化学的侵食などの化学的なものなど多岐に渡っており、その原因も様々である。コンクリートの代表的な化学的劣化について下記に示した。

(1) 中性化

中性化とは、大気中の二酸化炭素がセメント硬化体に侵入し、コンクリート内の水分と炭酸化反応を起こすことによって炭酸を発生し、この炭酸とセメント硬化体に含まれる強アルカリ性を示す水酸化カルシウムが反応して弱アルカリ性の炭酸カルシウムに変化し、コンクリートのpHが低下する現象である。

pHの低下に伴い、コンクリート内に埋め込まれた補強鉄筋の腐食が促進され、鉄筋の腐食膨張によるひび割れの発生、表面部の剥

*:岩手大学大学院連合農学研究科

** :山形大学大学院農学研究科

離・剥落、鉄筋の断面欠損による耐荷力の低下などが起こり、構造物または部材の性能低下が生じる。

(2) 塩害

塩害とは、コンクリート内の塩化物イオンの存在により、鉄筋コンクリート内の鉄筋の腐食が促進される現象である。この原因となる塩化物イオンは、コンクリート製造時に材料より供給される場合と、海水や寒冷地の道路の凍結防止剤のように構造物の外部環境より供給される場合とがある。

コンクリート内に埋め込まれた補強鉄筋の腐食が促進され、鉄筋の腐食膨張によるひび割れの発生、表面部の剥離・剥落、鉄筋の断面欠損による耐荷力の低下などが起こり、構造物または部材の性能低下が生じる。

いったん中性化や塩害が進行してひび割れを生じた場合、そのひび割れを通して酸素等の供給量が増加し、鉄筋腐食が加速する。これにより、ひび割れの拡大・耐荷力の更なる低下などが生じるため、早期の発見と適切な補修・補強が重要となる。

しかし、中性化・塩害は、劣化が進行し鉄筋腐食によりひび割れを生じない場合、表面に変状が現れない劣化現象であるため、一般に目視での診断は困難である。

3. 材料と方法

(1) 供試体

普通ポルトランドセメント（太平洋セメント、JIS R 5210）と、蒸留水を水セメント比 $W/C=50\%$ で練り混ぜたセメントペーストにより、図1に示した寸法の供試体を作成した。作成した供試体は表1に示した区分及び方法により劣化因子を導入した。

供試体は全部で36個作成し、養生は20°Cに設定した室内で、比較のため大気中及び水中で養生したものを除き、材齢1日からポリ袋に入れ封緘養生した。作成した供試体は材齢28日に達した後で測定に供した。

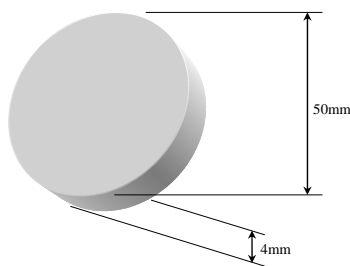


図1 供試体の寸法

表1 劣化因子の導入方法

劣化現象	劣化因子	劣化因子の導入方法
中性化	炭酸イオン	炭酸水
塩害	塩化物イオン	塩化ナトリウム水溶液

(2) スペクトル測定

図2に示した近赤外分光分析装置 NIRS6500 (Foss-NIR Systems, USA) は、回折格子を用いた走査型分光計と様々なオプション、データ解析用のパソコンから構成され、反射・透過のいずれのレイアウトでも測定が可能である。

測定波長範囲は 400-2498nm で、検出器には 400-1100nm の領域では Si 検出器が、1100-2498nm の領域は PbS 検出器が用いられている。本研究では標準板（リファレンス）は装置に内蔵されているセラミックディスクを使用し、反射レイアウトで測定を行った。



図2 近赤外分光分析装置 NIRS6500 の外観

(3) 基準分析

中性化の劣化因子として水酸化カルシウムと炭酸カルシウムを、塩害の劣化因子として塩化物イオンを分析・定量した。

各劣化因子の基準分析法について下記に示した。

1) 中性化

前処理として供試体をコンクリートドリルで削孔し、その粉末を90 μ m のふるいにかけて微粉末を採取した。採取した微粉末は、示差熱重量分析器 DTG-60H（島津製作所、京都）により水酸化カルシウムと炭酸カルシウムを定量した。

2) 塩害

前処理として供試体をコンクリートドリルで削孔し、その粉末を150 μ m のふるいにかけて微粉末を採取した。採取した微粉末は、JIS A 1154 により供試体粉末に含まれる塩化物イオンを抽出し、その濾液をチオシアン酸水銀(II)吸光光度計 DR2800 (HACH, USA) により塩化物イオンを定量した。

(4) キャリブレーションの作成と検証

統計処理ソフトウェアには The Unscrambler v9.2 (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。キャリブレーションの精度は決定係数 R^2 (大きいほどよい)、Cross validation 法による予測値の標準誤差 SECV (小さいほどよい)、試料成分の標準偏差と近赤外光による予測値の誤差の比 RPD (2.4 以上なら実用性があると判断される) により判断した。

本研究では供試体分光光度計の全測定波長範囲である 400-2498nm、

長波長領域のみの 1100-2498nm, 短波長領域のみの 700-1100nm でそれぞれキャリブレーションを作成した。なお, アウトライヤは適宜除外した。

4. 結果と考察

(1) スペクトル

観測されたスペクトルを長波長領域と短波長領域に区分して, 図3と図4に示した。

長波長領域では 1450nm, 1920nm などに大きなピークが観測されたが, 短波長領域では大きなピークは認められなかった。

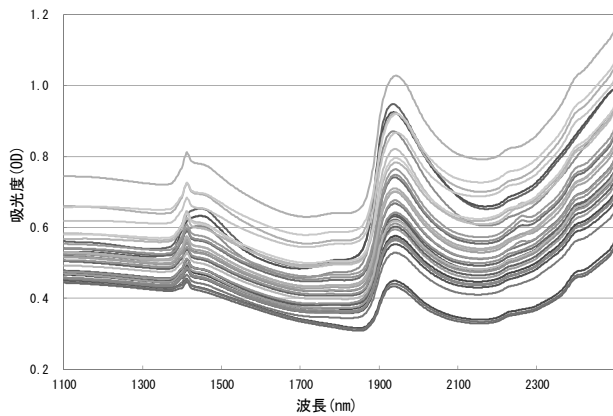


図3 コンクリートのスペクトル(1100-2498nm)

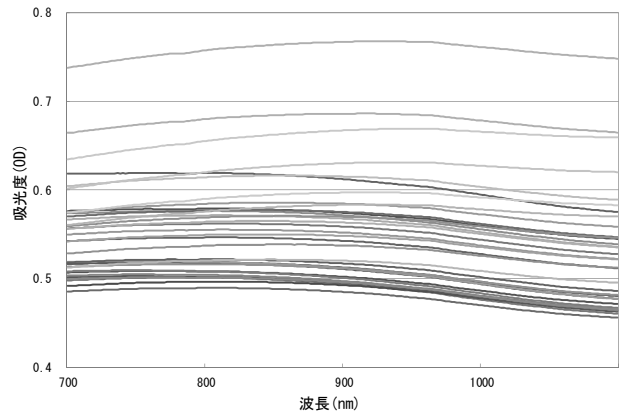


図4 コンクリートのスペクトル(700-1100nm)

劣化区分ごとのスペクトルを図5に示した。

塩害コンクリートのスペクトルには 2260nm 付近に明確な吸光ピークが見られた。一方, 中性化コンクリートでは波形の変化は見られるものの, それほど明確なピークは見られなかった。また, 高水分率の供試体については, 水の吸光により 1450nm 付近のピークがマスキングされるなど, 標準コンクリートに比べ, スペクトル波形に変化が見られた。このことから, この方法でコンクリートの分析を行う場合, 供試体の水分が推定精度に影響を及ぼすことが推測される。また, 水分が多いことで, 供試体の温度による精度への影響も考えられる。そのため, コンクリートの推定を精度よく行うためには, 水分や温度の影響についても検討する必要があると考えられる。

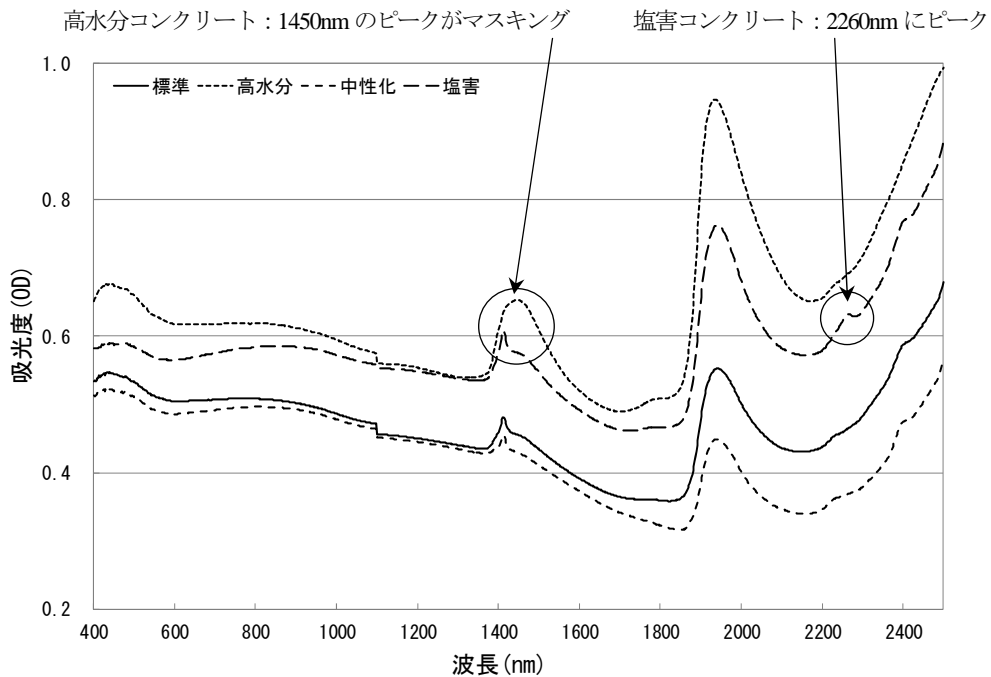


図5 劣化区分ごとのコンクリートのスペクトル(400-2498nm)

(2) キャリブレーション

キャリブレーション結果を表2に示した。最も精度良好だった波長範囲 1100-2498nm で作成したキャリブレーション散布図と、最も精度が劣った波長範囲 700-1100nm のキャリブレーション散布図をそれぞれ図6~11に示した。

水酸化カルシウム・炭酸カルシウム・塩化物イオンの各成分において、いずれの波長範囲でも近赤外分光法による予測値と基準分析値とは高い相関が見られた。このことから、近赤外分光法によるコンクリート構造物の劣化の診断は可能であると判断された。

推定精度は長波長領域 1100-2498nm で最も高く $R^2=0.88-0.96$, $RPD=2.74-4.66$ と良好な推定精度が得られた。実用化の指標とされる RPD が 2.4 を上回っていることから、実用化を期待できる推定精度が得られたものと判断される。また、安価なシリコン(Si)検出

器で検出可能な短波長領域 700-1100nm においても $R^2=0.71-0.89$, $RPD=1.80-2.81$ とまずまずの精度が得られた。

また、キャリブレーションに使用した供試体のうち、水中養生を行った3個の供試体をアウトライヤとして除外したところ、各成分とも推定精度が向上する傾向が見られた。このことから、水分が推定精度に影響を与えることが示唆された。

また、本研究では、中性化の供試体についてはpHを調整した炭酸水で劣化因子の導入を試みたが、劣化因子である水酸化カルシウム及び炭酸カルシウムの基準分析値に大きな差は出なかった。一方、比較のため大気中で養生した供試体については、基準分析値から劣化したものと判断された。このことから、今後の供試体作成においては中性化の劣化因子の導入方法について再度検討する必要がある。

表2 キャリブレーション結果一覧

成分	基準分析値			NIR 予測値					RPD
	最大値 (%)	最小値 (%)	標準偏差 (%)	波長範囲 (nm)	n	nF	R^2	SECV (%)	
水酸化カルシウム $Ca(OH)_2$	17.98	8.04	2.33	400-2498	33	7	0.87	0.87	2.68
				1100-2498	33	6	0.88	0.85	2.74
				700-1100	33	7	0.84	0.99	2.35
炭酸カルシウム $CaCO_3$	25.98	4.84	5.36	400-2498	33	7	0.93	1.51	3.55
				1100-2498	33	9	0.96	1.15	4.66
				700-1100	33	9	0.89	1.91	2.81
塩化物イオン Cl	0.70	0.00	0.18	400-2498	33	8	0.94	0.05	3.60
				1100-2498	33	8	0.96	0.04	4.50
				700-1100	33	7	0.71	0.10	1.80

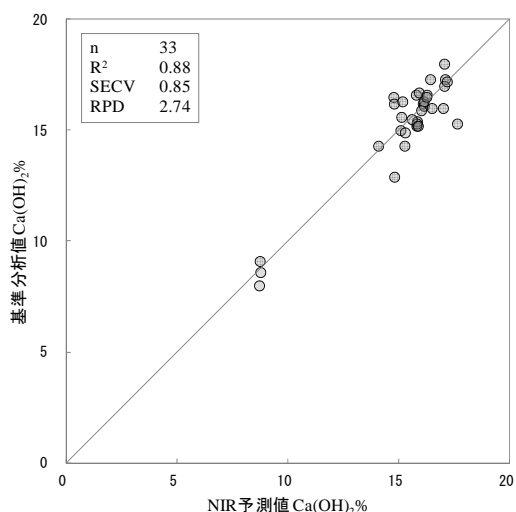


図6 水酸化カルシウムのキャリブレーション(1100-2498nm)

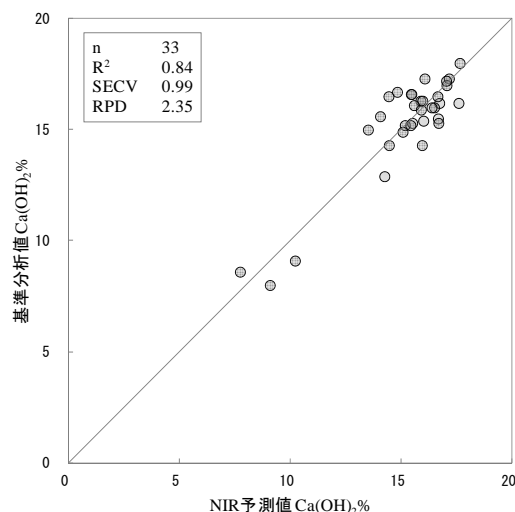


図7 水酸化カルシウムのキャリブレーション(700-1100nm)

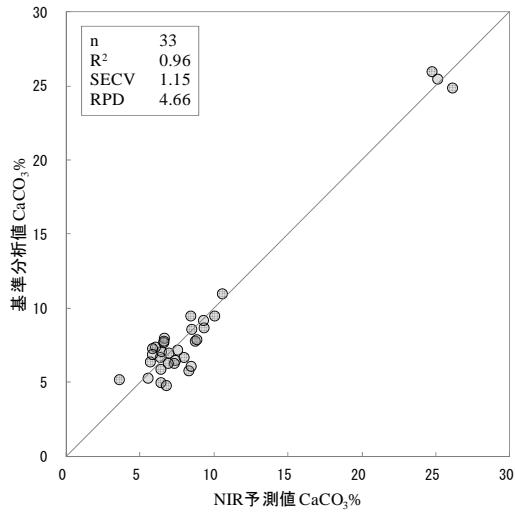


図8 炭酸カルシウムのキャリブレーション(1100-2498nm)

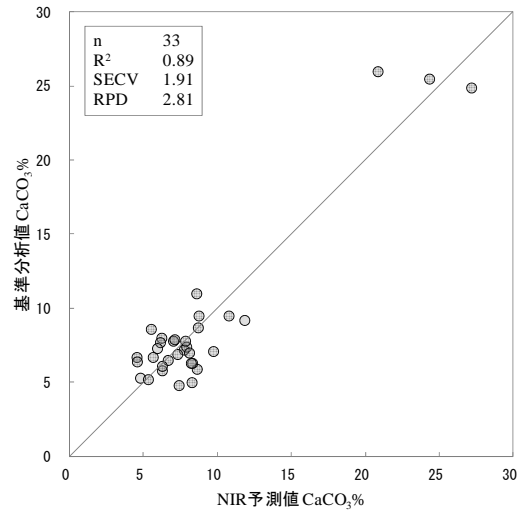


図9 炭酸カルシウムのキャリブレーション(700-1100nm)

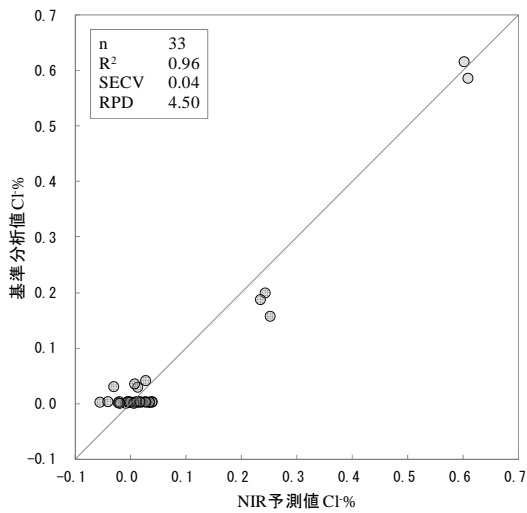


図10 塩化物イオンのキャリブレーション(1100-2498nm)

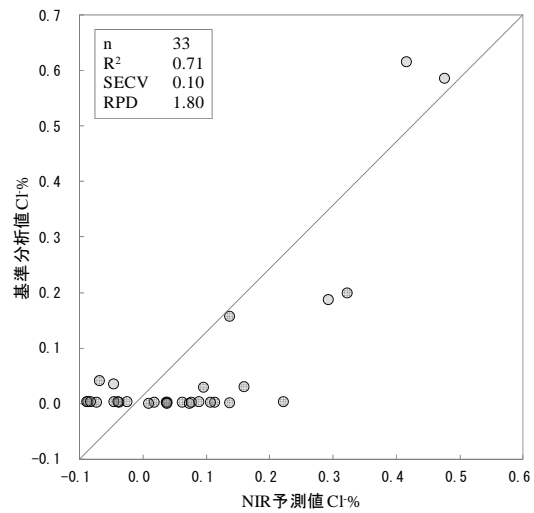


図11 塩化物イオンのキャリブレーション(700-1100nm)

5. まとめ

本研究では、近赤外分光法(測定波長範囲 400-2498nm)により、コンクリートの化学的劣化因子である、水酸化カルシウム・炭酸カルシウム・塩化物イオンの推定精度を検討した。その結果、

- (1) コンクリートの化学的劣化因子である水酸化カルシウム・炭酸カルシウム・塩化物イオンについて精度よく測定することができた。
- (2) 長波長領域 1100-2498nm で、 $R^2=0.88-0.96$ 、 $RPD=2.74-4.66$ と最も良好な推定精度が得られた。
- (3) 安価なシリコン検出器で検出可能な短波長領域 700-1100nm においても $R^2=0.71-0.89$ 、 $RPD=1.80-2.81$ とまずまずの推定精度が得られた。
- (4) 水分がスペクトルに影響を与えており、それにより推定精度に影響を与えていることが示唆された。

本手法を現場での実用化に移すためには、本研究で明らかになった水分や温度の影響に関する検討や、装置普及のためのコストダウンなどについて検討していく必要があると考えられる。

6. 謝辞

本研究の遂行にあたって、秋田県立大学生物資源科学部応用生物科学科の陳先生には近赤外分光分析装置のご提供並びにご指導をいただきました。また、鶴岡工業高等専門学校物質工学科の清野先生、山形大学農学部食料生命環境学科の奥山先生には基準分析の分析装置をご提供並びにご指導をいただきました。さらに、生産機械システム工学研究室の学生諸君にはスペクトル測定並びに基準分析に多大なご協力をいただきました。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, 2006. 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(1).
- 2) 岩元 睦夫, 河野 澄夫, 魚住 純, 1994. 近赤外分光法入門, 幸書房
- 3) 魚本 健人, 2007. コンクリート構造物の非破壊試験技術 旺文社
- 4) 金田 尚志, 2004. 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
- 5) 金田 尚志, 石川 幸宏, 魚本 健人, 2005. 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(3).
- 6) 倉田 孝男, 戸田 勝哉, 2008. ケモメトリックス手法を用いた近赤外線小型分光器によるコンクリート診断装置開発, IIC REVIEW
- 7) 郡 政人, 古川 智紀, 上田 隆雄, 水口 裕之, 2007. 近赤外分光法を用いたセメント硬化体中の塩化物イオンの検出, コンクリート工学年次論文集 Vol.29(2).
- 8) 郡 政人, 古川 智紀, 上田 隆雄, 水口 裕之, 2008. 近赤外分光法を用いたセメント硬化体中の塩化物イオン量の推定, Cement Science and Concrete Technology No.61.
- 9) 郡 政人, 古川 智紀, 上田 隆雄, 水口 裕之, 2008. 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.
- 10) 小林 一輔, コンクリート構造物の総合診断法, 2008. 旺文社
- 11) 十河 茂幸, 森野 奎二, 坂井 悦郎, 2006. 生コンと材料の品質検査法, 旺文社
- 12) Naes, T., Isaksson, T., Fearn, T., Davies, T., 2002. Multivariate Calibration and Classification, NIR Publications.
- 13) 戸田 勝哉, 西土 隆幸, 高岡 啓吾, 福岡 千枝, 倉田 孝男, 2006. マルチスペクトル法による中性化および塩害の診断手法に関する研究, 土木学会第61回年次学術講演会.
- 14) Williams, O., Norris, K., 1987. Near-Infrared Technology in the Agricultural and Food Industries, American Association of Cereal Chemists.
- 15) コンクリート診断技術'08[基礎編], 2008. (社)日本コンクリート工学協会
- 16) コンクリート診断技術'08[応用編], 2008. (社)日本コンクリート工学協会
- 17) コンクリート標準示方書 平成11年度版, 2000. 土木学会
- 18) JIS ハンドブック 2009 ⑩生コンクリート, 日本規格協会

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2報)

—環境条件が測定精度に与える影響—

鈴木ミチル*・設楽徹**・片平光彦*・夏賀元康*

The Diagnosis of Concrete Deterioration in Infrastructures Using Near-Infrared Spectroscopy (Part2)

-The Effects of Environmental Conditions on the Estimation Accuracy-

Michiru SUZUKI*・Toru SHITARA**・Mitsuhiko KATAHIRA*・Motoyasu NATSUGA*

Abstract

Recently, several attempts have been made for the diagnosis of deterioration of concrete structure using near-infrared spectroscopy (NIRS), which is a simple and low cost non-destructive analytical method. As concrete is usually exposed to the atmosphere and sunlight and is subject of their influence, so the NIRS is as well. In this study, we investigated how these environmental conditions affect the determination of concrete deterioration by NIRS. Deterioration factors such as carbonization (neutralization) and salt damage were introduced to samples (φ50mm, t=4mm) by exposing them to the atmosphere (carbonization) and adding salt water instead of distilled water (salt damage), respectively. In order to investigate the effect of environmental conditions, three moisture content samples (18, 10 and 5%) and three temperature samples (40, 25 and 10°C) were prepared. Spectra were obtained using a near-infrared spectrometer NIRS-6500 (Foss NIRSystems, USA) and calibration models were developed using PLS regression. Results showed that the less the moisture content, the better the calibration accuracy. Temperature affected the calibration accuracy although its effects were smaller than those of moisture content. Overall, calibrations which included every environmental condition, had accuracies of RPD=2.28-4.03 and could eliminate environmental effects within the investigation limits. Further investigation on the actual environmental conditions where concrete structures are constructed should be carried out.

[Keywords] near-infrared spectroscopy, concrete, deterioration, moisture, temperature

1. 緒言

近赤外分光法は1970年代に小麦タンパク質の公定法として認められた、迅速かつ簡便な非破壊分析法であり、穀物、果実、食品の成分と品質の測定に幅広く使われている。近年では、この手法をコンクリート構造物の劣化の診断に応用する試みはあるが、この手法は水分や温度などの環境条件の影響によって測定値が変動するという固有の問題があることが知られている。コンクリートはほとんどが屋外で使われることから、それらの影響について明らかにし、対応策を考えておく必要がある。そこで、本研究ではコンクリートの劣化推定に水分と温度がどのように影響するか、検討した。

2. 材料と方法

(1)供試体

供試体の作成は第1報と同様に、普通ポルトランドセメント(太平洋セメント, JIS R 5210)と、蒸留水を水セメント比W/C=50%で練り混ぜたセメントペーストにより作成した。作成した供試体は表1に示した区分及び方法により劣化因子の導入を行った。作成した供試体は、中性化のサンプルが54個、塩害のサンプルが72個であった。また、水分調整については表2に示した。

表1 劣化因子の導入方法

劣化現象	劣化因子	劣化因子の導入方法
中性化	炭酸イオン	大気中への曝露
塩害	塩化物イオン	塩化ナトリウム水溶液

表2 供試体の水分調整

水分区分	調整方法
封緘	大気中で養生し、ポリ袋で保存
乾燥	105°C-6h オープンで加熱し乾燥
湿潤	蒸留水に5分間浸漬

(2)スペクトル測定

スペクトル測定は第1報と同様に、近赤外分光分析装置NIRS6500 (Foss-NIR Systems, USA) で測定した。本実験では、供試体温度を①標準(25°C)、②高温(40°C)、③低温(10°C)の3段階に設定した。品温の管理は保冷温庫ACW-620(アピックスインターナショナル, 大阪)を使用した。

* : 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

(3)基準分析

1) 水分

水分の定量は105°C-48hの炉乾法により、wet basis で表記した。

2) 中性化

中性化の定量は熱示差熱重量分析器 DTG-60H (島津製作所, 京都) を用いて熱分析 (時差熱重量測定) により水酸化カルシウムと水酸化ナトリウムを定量した。また、一部の供試体の分析は山形県工業技術センターに委託し、示差熱重量分析器 TG8120 (リガク, 東京) により分析を行った。

3) 塩害

塩害の定量は、JISA 1154 により供試体粉末に含まれる塩化物イオンを抽出し、その濾液をチオシアン酸水銀(II)吸光度計 DR2800 (HACH,USA) により定量した。

(4)キャリブレーションの作成と検証

統計処理ソフトウェアには The Unscrambler v9.2 (CAMO, Norway) を使用し、Full-cross validation 法による PLS 回帰分析でキャリブレーションの作成と検証を行った。キャリブレーションの精度は決定係数 R² (大きいほど良い)、cross Validation 法による予測値の標準誤差 SECV (小さいほど良い)、試料成分の標準偏差と近赤外光による予測値の誤差の比 RPD (2.4 以上なら実用性があると判断される) により判断した。本研究では供試分光光度計の全測定波長範囲である 400-2498nm, 長波長領域のみの 1100-2498nm, 短波長領域のみの 700-1100nm でそれぞれキャリブレーションを作成した。なお、アウトライヤは適宜除外した。

3. 結果と考察

塩害供試体の原スペクトルを図 1~6 に示した。図 1~3 の温度条件別の原スペクトルにはあまり差が見られなかったが、図 4~6 の水分条件別の原スペクトルは明らかに波形が異なり、測定精度に影響を及ぼすことが示唆された。

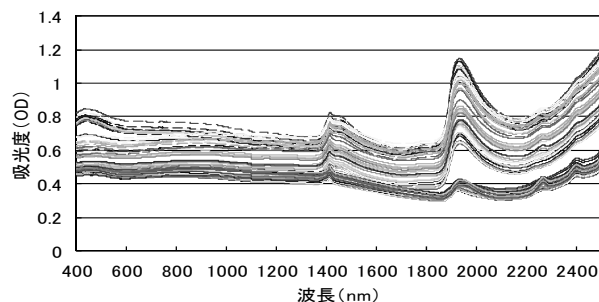


図2 高温時の塩害供試体のスペクトル (400-2498nm)

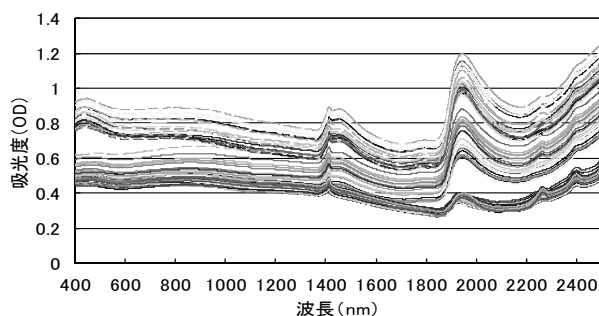


図3 低温時の塩害供試体のスペクトル (400-2498nm)

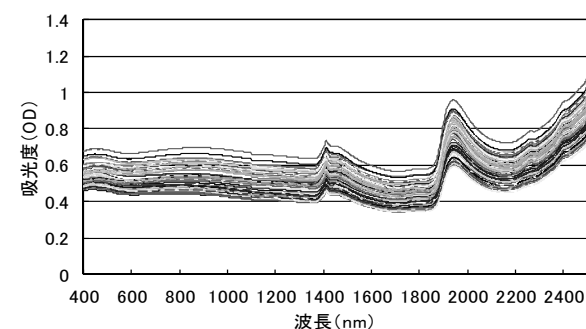


図4 封緘の塩害供試体のスペクトル (400-2498nm)

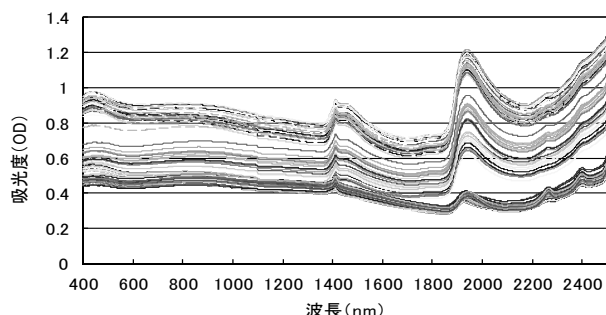


図1 標準の塩害供試体のスペクトル (400-2498nm)

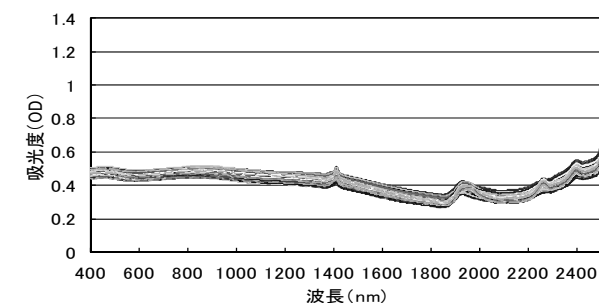


図5 乾燥の塩害供試体のスペクトル (400-2498nm)

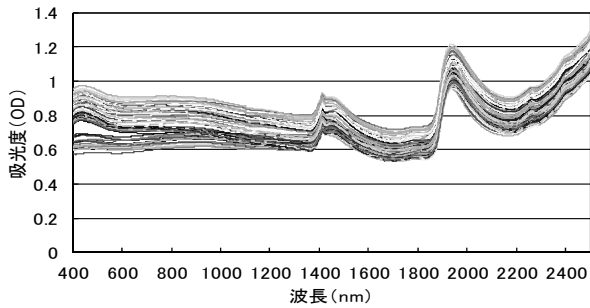


図6 湿潤の塩害供試体のスペクトル (400-2498nm)

次にキャリブレーション結果を表3と表4に示した。表3の水分条件の違いによるキャリブレーションの精度は、おおむね乾燥が高く湿潤が低い結果となった。また、中性化の指標である水酸化カルシウムと炭酸カルシウムはSECVの差が大きかった。また、水分特性について詳細に把握するために、水分の高低と使用した波長範囲との組み合わせにより、SECVの差の検定を行った結果、1100-2498nmでは全体的に有意な差が認められた。また、水分が高いと有意な差が認められる傾向であった。表4の温度条件の違いによるキャリブレーションの精度はおおむね高温が高く低温の精度が低い結果となったが、例外もあり水分ほど明確な傾向が見られなかった。水酸化カルシウム及び炭酸カルシウムはSECVの差が大きい水分ほどではなかった。また、塩化物イオンに着目するとSECVの差があまりなかった。水分と同様に、温度特性についても、温度の高低と使用した波長範囲との組み合わせにより、SECVの差の検定を行いその結果、全体的に有意な差はあまり認められなかった。水酸化カルシウムに着目すると比較的有意な差が認められた。温度に着目してみると低温が関係すると有意な差がある傾向であった。

環境条件で区別しての測定は精度を高めるのに有効であるが、前処理を行って環境条件を揃えたり、環境条件別にキャリブレーションを作成し使用する必要が生じるため、効率性及び利便性に欠ける。そこで、様々な水分・温度条件で測定した本実験の全スペクトルをマージしてキャリブレーションを作成し結果を表5に示した。その結果、中性化は水分を揃えたものは測定精度の差が大きかった。塩害の場合水分を揃えた場合に精度が劣ったが、その差は中性化ほど大きくはなかった。温度を揃えた場合は、中性化、塩害ともに測定精度の差はほとんど見られなかった。このキャリブレーションの散布図を図7~9に示した。これらのキャリブレーションはRPDが2.4以上であり、良好な結果が得られたと判断される。また、RPDが炭酸カルシウムでは2.28と少し精度が劣ったが、水酸化カルシウムと塩化物イオンではそれぞれ4.03と3.97であり、実用化が期待できる精度が得られた。この測定精度は水分を揃えたものより劣るが、環境条件の影響を受けないなど利便性が高く、また定性分析などの用途であれば十分に使用できる水準であると判断される。

表3 水分条件の違いによるキャリブレーション結果

成分	波長範囲 (nm)	水分		統計量				
		区分	水分範囲(%)	n	nF	R ²	SECV(%)	RPD
Ca(OH) ₂	1100-2498	封緘	3.78-14.03	54	5	0.97	0.62	5.74
		乾燥	2.46-4.34	54	5	0.99	0.39	8.49
		湿潤	17.04-19.00	54	3	0.95	1.08	4.32
CaCO ₃	1100-2498	封緘	3.78-14.03	54	8	0.95	1.69	4.57
		乾燥	2.46-4.34	54	8	0.97	1.29	5.55
		湿潤	17.04-19.00	54	6	0.91	2.97	3.24
Cl ⁻	1100-2498	封緘	13.40-16.90	72	7	0.95	0.07	4.58
		乾燥	4.99-6.11	72	4	0.97	0.05	6.17
		湿潤	16.58-18.70	72	9	0.97	0.07	5.36

表4 温度条件の違いによるキャリブレーション結果

成分	波長範囲 (nm)	温度		統計量				
		区分	測定温度(°C)	n	nF	R ²	SECV(%)	RPD
Ca(OH) ₂	1100-2498	標準	25	54	6	0.97	0.68	5.80
		低温	10	54	5	0.96	0.82	4.76
		高温	40	54	5	0.94	0.96	3.80
CaCO ₃	1100-2498	標準	25	54	6	0.86	3.19	2.65
		低温	10	54	9	0.84	3.43	2.46
		高温	40	54	14	0.87	3.08	2.75
Cl ⁻	1100-2498	標準	25	72	8	0.94	0.09	3.96
		低温	10	72	9	0.93	0.09	3.72
		高温	40	72	8	0.95	0.08	4.26

表5 全スペクトルをマージして作成したキャリブレーション結果

成分	波長範囲 (nm)	区分		統計量				
		水分区分	温度区分	n	nF	R ²	SECV(%)	RPD
Ca(OH) ₂	1100-2498	全供試体	全供試体	324	5	0.94	1.03	4.03
		封緘	全供試体	108	5	0.96	0.73	5.00
		乾燥	全供試体	108	5	0.97	0.59	6.16
		湿潤	全供試体	108	6	0.97	0.88	5.67
		全供試体	室温	108	6	0.94	1.00	4.17
		全供試体	低温	108	6	0.95	0.97	4.28
CaCO ₃	1100-2498	全供試体	全供試体	324	9	0.81	3.46	2.28
		封緘	全供試体	108	10	0.94	1.86	3.92
		乾燥	全供試体	108	10	0.97	1.36	5.35
		湿潤	全供試体	108	8	0.91	2.67	3.27
		全供試体	室温	108	7	0.79	3.62	2.18
		全供試体	低温	108	7	0.84	3.21	2.46
Cl ⁻	1100-2498	全供試体	全供試体	432	11	0.94	0.08	3.97
		封緘	全供試体	144	7	0.95	0.07	4.65
		乾燥	全供試体	144	5	0.95	0.08	4.29
		湿潤	全供試体	144	8	0.93	0.09	3.71
		全供試体	室温	144	9	0.94	0.08	3.96
		全供試体	低温	144	10	0.92	0.09	3.63
		全供試体	高温	144	8	0.92	0.09	3.62

4. 結論

環境条件の変化が測定精度にどの程度影響を与えるか、水分と温度について検証した。その結果、水分の影響が大きく、温度は水分より影響は小さかった。水分は水分が少ないほど精度がよく、温度は高温状態の場合が比較的測定精度がよかった。多様な環境条件により測定したスペクトルをマージしてキャリブレーションを作成することで、これらの影響は除去することが可能であった。今後は実際にコンクリート構造物が置かれる環境条件を考慮し、更なる検証を行っていく必要がある。

謝辞

本研究の遂行にあたって、秋田県立大学生物資源科学部応用生物科学科の陳先生には近赤外分光分析装置のご提供並びにご指導をいただきました。また、鶴岡工業高等専門学校物質工学科の清野先生、山形大学農学部食料生命環境学科の奥山先生には基準分析の分析装置をご提供並びにご指導をいただきました。さらに、生産機械システム工学研究室の学生諸君にはスペクトル測定並びに基準分析に多大なご協力をいただきました。ここに記して謝意を表します。

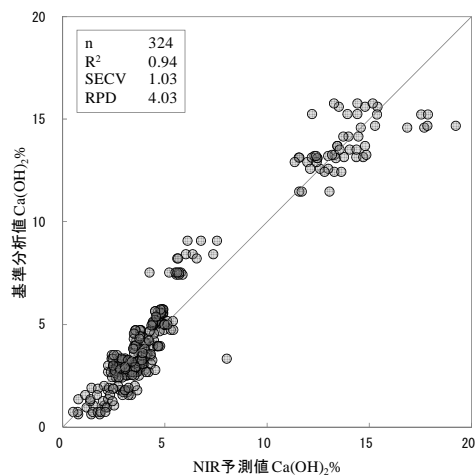


図7 Ca(OH)₂のキャリブレーション(1100-2498nm)

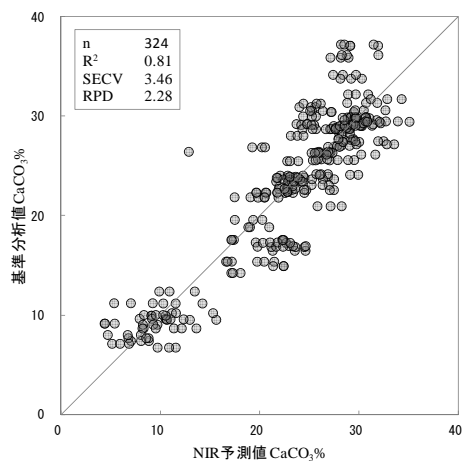


図8 CaCO₃のキャリブレーション(1100-2498nm)

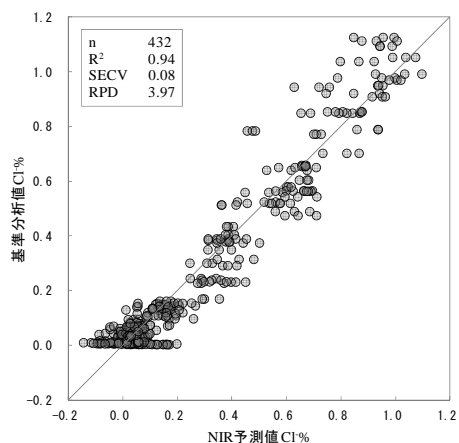


図9 Cl-のキャリブレーション(1100-2498nm)

参考文献

- 1) 石川 幸宏, 金田 尚志, 魚本 健人, 矢島 哲司, 2006. 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(1).
- 2) 岩元 睦夫, 河野 澄夫, 魚住 純, 1994. 近赤外分光法入門, 幸書房
- 3) 魚本 健人, 2007. コンクリート構造物の非破壊試験技術 旺文社
- 4) 金田 尚志, 2004. 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
- 5) 金田 尚志, 石川 幸宏, 魚本 健人, 2005. 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(3).
- 6) 倉田 孝男, 戸田 勝哉, 2008. ケモメトリックス手法を用いた近赤外線小型分光器によるコンクリート診断装置開発, IIC REVIEW
- 7) 郡 政人, 古川 智紀, 上田 隆雄, 水口 裕之, 2007. 近赤外分光法を用いたセメント硬化体中の塩化物イオンの検出, コンクリート工学年次論文集 Vol.29(2).
- 8) 郡 政人, 古川 智紀, 上田 隆雄, 水口 裕之, 2008. 近赤外分光法を用いたセメント硬化体中の塩化物イオン量の推定, Cement Science and Concrete Technology No.61.
- 9) 郡 政人, 古川 智紀, 上田 隆雄, 水口 裕之, 2008. 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.
- 10) 小林 一輔, コンクリート構造物の総合診断法, 2008. 旺文社
- 11) 十河 茂幸, 森野 奎二, 坂井 悦郎, 2006. 生コンと材料の品質検査法, 旺文社
- 12) Naes, T., Isaksson, T., Fearn, T., Davies, T., 2002. Multivariate Calibration and Classification, NIR Publications.
- 13) 戸田 勝哉, 西土 隆幸, 高岡 啓吾, 福岡 千枝, 倉田 孝男, 2006. マルチスペクトル法による中性化および塩害の診断手法に関する研究, 土木学会第61回年次学術講演会.
- 14) Williams, O., Norris, K., 1987. Near-Infrared Technology in the Agricultural and Food Industries, American Association of Cereal Chemists.
- 15) コンクリート診断技術'08[基礎編], 2008. (社)日本コンクリート工学協会.
- 16) コンクリート診断技術'08[応用編], 2008. (社)日本コンクリート工学協会.
- 17) コンクリート標準示方書 平成11年度版, 2000. 土木学会.
- 18) JISハンドブック2009 ⑩生コンクリート, 日本規格協会.

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3報)

—近赤外分光分析装置のコストダウンに関する検討—

設楽 徹*・鈴木 ミチル**・片平 光彦**・夏賀 元康**

The Diagnosis of Concrete Deterioration in Infrastructures Using Near-Infrared

Spectroscopy (Part3)

- An Investigation into the Cost Reduction of Near-Infrared Spectroscopic Instrument -

Toru SHITARA*・Michiru SUZUKI**・Mitsuhiko KATAHIRA**・Motoyasu NATSUGA**

Abstract

Although we concluded in part 1 that the concrete deterioration factors could be determined with sufficient accuracy using NIRS, high cost of NIRS instrument using the wavelength range of 400–2498 nm may prevent its dissemination. If we can obtain sufficient accuracy in the short wavelength range of 650–1100 nm where cheaper Si detector is used, then it can lead to great cost reduction. In this study we investigated the accuracy improvement through the modification of the optical layout. Results showed good calibration accuracy of $R^2=0.88$ and $RPD=2.88$ for the determination of calcium hydroxide. Even though we could not obtain a good result for chloride ion, its accuracy might be improved through adding VIS information into the calibration

[Keyword] near infrared spectroscopy, concrete, deterioration, carbonation, salt damage, layout, reference

1. はじめに

コンクリート構造物に代表される老朽化した社会資本の診断において、非破壊検査の重要性が指摘され、それにとめない多くの非破壊検査手法が開発されてきている。非破壊検査により現場で簡便・迅速・低コストにコンクリート構造物の情報を得ることができれば、将来の社会資本の維持管理において極めて有効であると考えられる。近年では、コンクリートの劣化情報を非破壊試験法である近赤外分光法を用いて診断する手法が試みられており、現場における簡便・迅速・低コストの診断技術として今後の展開が期待されている。

筆者らは第1報により、近赤外分光法はコンクリートの劣化因子を精度よく測定できることを明らかにしたが、研究で使用した近赤外分光分析装置は非常に高価であり、現場への普及の妨げになることが予想される。現在市販されている近赤外分光分析装置のディテクタは、1100nm以下の波長範囲ではSi(シリコン)ディテクタが、1100nm以上の波長範囲ではPbS(硫化鉛)またはInGaAs(インジウムガリウム砒素)ディテクタが一般的に使用されている。PbSまたはInGaAsディテクタはSiディテクタに比較して推定精度は勝るが高価であり、かつ温度特性が大きいので、ペルチエ素子を使用した電子冷却などによりディテクタを一定温度に冷却する必要があるため、分析装置のコストを引き上げる要因となっている。Siディテクタは推定精度が劣るものの、これらの欠点がなく低コスト

であるため、Siディテクタにより実用可能な推定精度での測定が可能となれば、分析装置の大幅なコストダウンが期待できる。

そこで、本研究では、近赤外分光分析装置のコストダウンを目的とし、コンクリートの主要な化学的劣化の劣化因子である塩化物イオン、水酸化カルシウム、炭酸カルシウムについて、Siディテクタによる波長範囲650-1100nmで十分な推定精度が得られるか、及び推定精度を向上させる方法について検討を行った。

2. 材料と方法

(1) 供試体

普通ポルトランドセメント(太平洋セメント,JIS R 5210)と、蒸留水を水セメント比W/C=50%で練り混ぜたセメントペーストにより、第1報と同様の寸法・手順で供試体を作成した。供試体は中性化測定用に54個、塩害測定用に72個作成した。作成した供試体は表1に示した区分及び方法により劣化因子の導入を行った。

また、中性化の劣化因子の導入は、第1報の結果により大気中へ曝露する方法に変更した。

表1 劣化因子の導入方法

劣化現象	劣化因子	劣化因子の導入方法
中性化	炭酸イオン	大気中への曝露
塩害	塩化物イオン	塩化ナトリウム水溶液

*:岩手大学大学院連合農学研究科

** :山形大学大学院農学研究科

(2) スペクトル測定

1) 市販分光光度計による測定

推定精度の比較のため、第1報及び第2報で使用した近赤外分光分析装置NIRS6500 (Foss-NIR Systems, USA) によりスペクトル測定を行った。

本研究では、測定波長範囲 400-2498nm で、反射レイアウトで測定を行った。

2) 自作分光光度計による測定

図1に示した近赤外分光分析装置は、分光計 SD1024DW(Ocean Optics Inc, USA), 光源 KBEX-151A 及び専用入力ファイバ $\phi 1000\mu\text{m}$ (相馬光学, 東京), 出力ファイバ $\phi 600\mu\text{m}$ (P600-2-VIS/NIR, Ocean Optics Inc, USA), データ解析用のパソコンから構成される。ファイバの使用により光学レイアウトの自由度が高く、透過・反射のいずれの測定にも対応できるほか、光軸・光路長・検出部形状・リファレンスなどを任意に設定することが可能である。

分光計 SD1024DW は回折格子を使用した master (200-800nm) と slave (650-1100nm) の2つの分光計から構成されており、ディテクタには Si アレイセンサが用いられている。本研究では 650-1100nm の slave 分光器を用いた。本分光器はこの波長範囲を 1024 ピクセルに分光するため、JIS Z 8724 に規定された方法により 1nm 間隔に波長変換を行った。



図1 近赤外分光分析装置の外観

(3) 光学系の改良

1) レイアウトの改良

a) 平行型

入力用ファイバと出力側のファイバを平行に配置し、光軸をそれぞれ 30° ・ 45° ・ 60° に傾けたレイアウトを試作し測定を行った。

平行型レイアウトの外観を図2に、投光部を図3に示した。

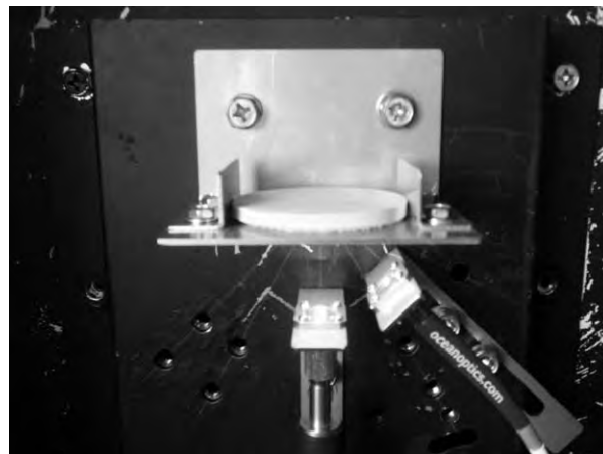


図2 平行型レイアウトの外観

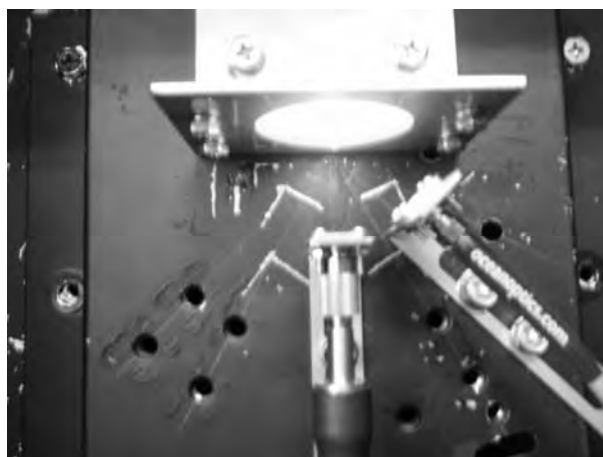


図3 平行型レイアウトの投光部

b) 同軸型

市販されているクボタ青果物品質評価装置フルーツセクター K-BA100R(クボタ,大阪)の投光部を使用した。出力用ファイバは $\phi 400\mu\text{m}$ (R400-7-VIS/NIR) を使用した。なお、アクリルにアルミシートを張り付けたカバーで投光部を覆い、測定時の光の漏れや外光の影響を極力除去した。

同軸型レイアウトの外観を図4に、投光部を図5に示した。



図4 同軸型レイアウトの外観

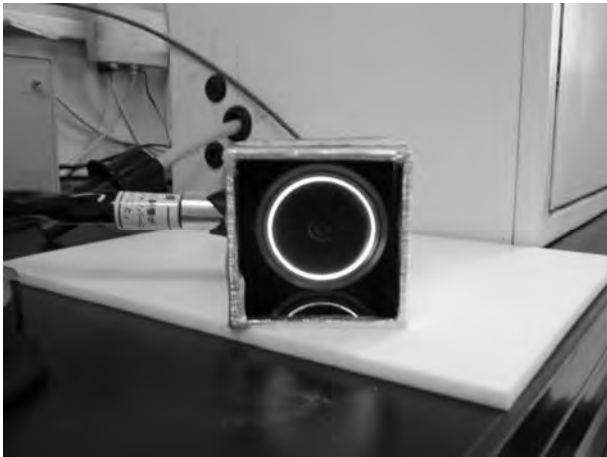


図5 同軸型レイアウトの投光部

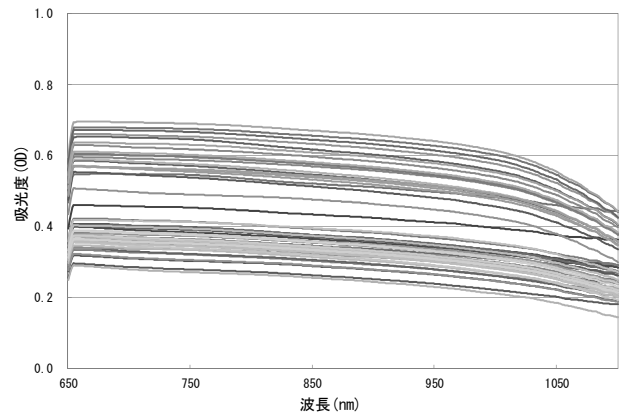


図6 平行型レイアウトによるスペクトル(650-1100nm)

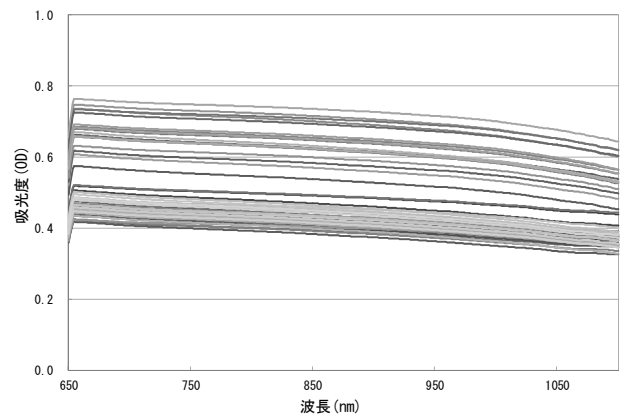


図7 同軸型レイアウトによるスペクトル(650-1100nm)

2) リファレンスの改良

近赤外分光法では、リファレンス（標準板）を用いて試料の見かけの吸光度を算出する。リファレンスは近赤外域に特異的な吸収がなく、長時間安定したものが望ましいため、セラミックなどが一般に用いられる。スペクトル測定において精度を向上させる方法のひとつに、信号が飽和しない範囲で出力光をできるだけ大きくし、S/N比を改善することが挙げられる。吸光度を算出するリファレンスが供試体と似た光学的性質を有していれば、出力光の強度を大きくすることができ、S/N比の低減により推定精度の向上が期待できる。

そこで、どのリファレンスがコンクリートの測定に適しているか検討するため、セラミック、テフロンおよび発泡スチロールを用いてスペクトルの測定を行った。

(3) 基準分析

第1報・第2報と同様に、中性化の劣化因子である水酸化カルシウムと炭酸カルシウムを熱分析（時差熱重量同時測定）で、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)吸光度法により分析・定量した。

(4) キャリブレーションの作成と検証

第1報及び第2報と同様に、統計処理ソフトウェア The Unscrambler v9.2(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) スペクトル

図6に平行型レイアウトで測定したスペクトルを、図7に同軸型レイアウトで測定したスペクトルを示した。

いずれのスペクトルもピークのほとんど見られないスペクトルを示した。また、検出限界付近の650-700nm及び1050-1100nmには、擬似的なピークやノイズが認められたため、それらを除いた波長範囲700-1050nmでキャリブレーションを作成し、その推定精度を検討した。

(2) キャリブレーション

1) レイアウト改良

レイアウトを改良して測定したスペクトルのキャリブレーション結果を表2に示した。

水酸化カルシウム及び炭酸カルシウムは同軸型で比較的精度よく測定でき、水酸化カルシウムは $R^2=0.86$, $SECV=1.60$, $RPD=2.66$, 炭酸カルシウムは $R^2=0.74$, $SECV=3.81$, $RPD=1.91$ であった。水酸化カルシウムについてはRPDが2.4を上回っていることから、実用化を期待できる推定精度が得られたものと判断された。塩化物イオンは総じて推定精度が低く、どのレイアウトを用いても精度よく測定することはできなかった。

以上より、光学レイアウトでは同軸型の推定精度が高かったが、塩化物イオンの測定については検討の余地があるものと判断された。

2) リファレンス改良

リファレンスを改良して測定したスペクトルのキャリブレーション結果を表3に示した。

水酸化カルシウムは、セラミックを使用した場合に $R^2=0.64$, $SECV=2.42$, $RPD=1.76$ と最も良好な結果が得られた。炭酸カルシウムについてもセラミックを使用した場合が最も精度が良好であり、 $R^2=0.67$, $SECV=4.30$, $RPD=1.70$ であった。塩化物イオンの測定精度はレイアウト改良の場合と同様に総じて低く、どのリファレ

ンスを用いても精度よく測定することはできなかった。

以上より、セラミックがリファレンスとして優れているものと考えられるが、レイアウト改良の場合と比較すると全体的に推定精度

向上への寄与は低かった。このことから、リファレンスの改良だけでは推定精度の大幅な改善を図ることは困難であると判断された。

表2 レイアウトを改良した場合のキャリブレーション (リファレンスはセラミックを使用)

測定成分	レイアウト	波長範囲	統計量				
			n	nF	R ²	SECV (%)	RPD
水酸化 カルシウム Ca(OH) ₂	平行型 45°	700-1050	52	4	0.64	2.42	1.76
	平行型 30°		53	4	0.62	2.66	1.60
	平行型 60°		53	4	0.61	2.69	1.58
	同軸型		53	6	0.86	1.60	2.66
炭酸 カルシウム CaCO ₃	平行型 45°	700-1050	52	5	0.67	4.30	1.70
	平行型 30°		53	4	0.63	4.49	1.63
	平行型 60°		53	5	0.63	4.57	1.60
	同軸型		53	6	0.74	3.81	1.91
塩化物 イオン Cl	平行型 45°	700-1050	72	3	0.05	0.31	1.02
	平行型 30°		72	3	0.11	0.30	1.06
	平行型 60°		72	3	0.13	0.29	1.08
	同軸型		72	3	0.14	0.29	1.07

表3 リファレンスを改良した場合のキャリブレーション (レイアウトは平行型 45° を使用)

測定成分	リファレンス	波長範囲 (nm)	統計量				
			n	nF	R ²	SECV (%)	RPD
水酸化 カルシウム Ca(OH) ₂	セラミック	700-1050	52	4	0.64	2.42	1.76
	テフロン		53	5	0.58	2.85	1.49
	発泡スチロール		53	5	0.62	2.68	1.59
炭酸 カルシウム CaCO ₃	セラミック	700-1050	52	5	0.67	4.30	1.70
	テフロン		53	4	0.55	4.96	1.47
	発泡スチロール		53	4	0.55	4.98	1.47
塩化物 イオン Cl	セラミック	700-1050	72	3	0.05	0.31	1.02
	テフロン		72	4	0.19	0.29	1.09
	発泡スチロール		69	3	0.10	0.30	1.03

3) 推定精度の比較

本研究において、SD1024DW で測定した短波長領域 650-1100nm を使用したキャリブレーションのうち、水酸化カルシウムの最も推定精度が良好だった散布図を図8に、NIRS6500 で測定した長波長領域 1100-2498nm を使用したキャリブレーション散布図を図9に示した。

これらを比較すると、その推定精度には大きな差があり、短波長領域 650-1100nm によるコンクリートの測定には、更なる検討が求められるものと考えられた。

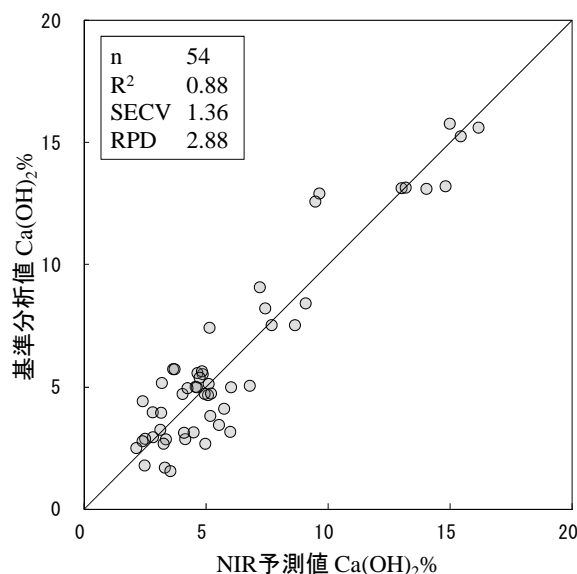


図8 水酸化カルシウムのキャリブレーション
(SD1024DW: 波長範囲 700-1050nm)

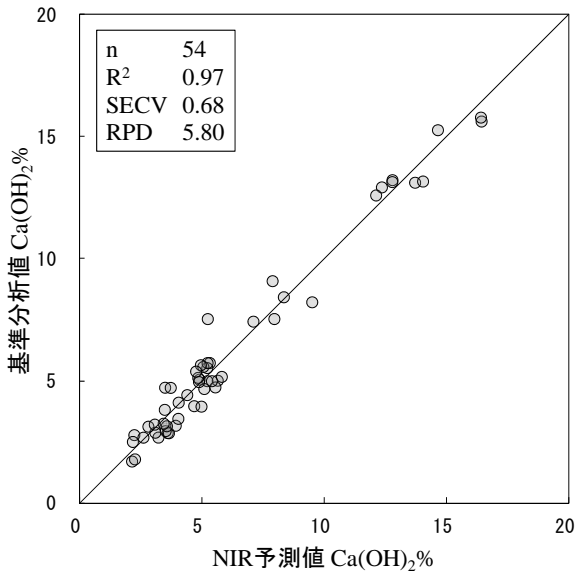


図9 水酸化カルシウムのキャリブレーション (NIRS6500: 波長範囲 1100-2498nm)

4) 塩化物イオン測定についての考察

本研究において、塩化物イオンはいずれのレイアウト・リファレンスでも推定精度が劣った。その原因として、SD1024DWの測定範囲650-1100nmに塩化物の吸収ピークが存在していないことが考えられる。

近赤外域には赤外域の基準吸収の倍音および結合音が現れる。倍音は様々な要因によりピークがシフトする性質を持つが、おおむね図10に示したように遷移すると考えられる。これにより、本研究で使用したSD1024DWの測定波長範囲には塩化物イオンの吸収ピークが含まれていない可能性があり、そのため推定精度が劣った可能性がある。

図11は塩化物イオンの相関スペクトルであるが、上記の推察を裏付けるように565nm、1130nmに塩化物イオンの吸収ピークと思われるピークが認められる。従って、565nmを含む可視領域を測定範囲に含めることで、塩化物イオンの推定精度を向上できる可能性が示唆される。

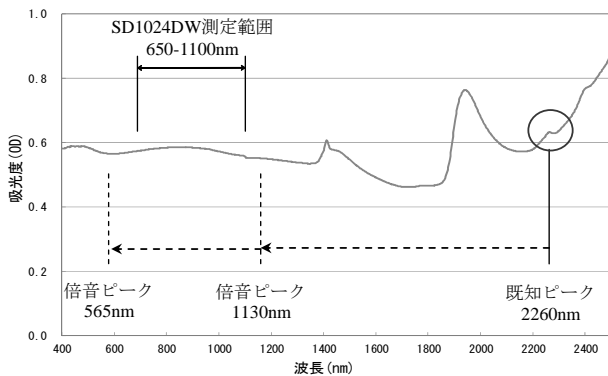


図10 既知ピークと倍音ピークの関係

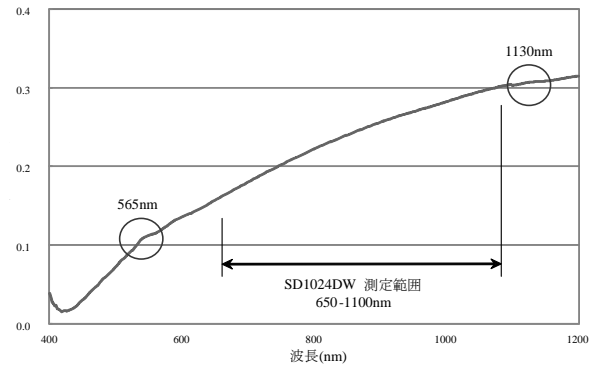


図11 塩化物イオンの相関スペクトル(400-1200nm)

4. まとめ

本研究では、近赤外分光分析装置のコストダウンを目的として、第1報で使用したNIRS6500(測定波長範囲400-2498nm)に比べ安価なSD1024DW(測定波長範囲650-1100nm)による、コンクリートの化学的劣化因子である水酸化カルシウム・炭酸カルシウム・塩化物イオンの推定精度、及びその推定精度を向上させる方法について検討した。その結果、

- (1) レイアウト、リファレンスの改良により推定精度を向上させることが可能であることがわかった。
- (2) 同軸型レイアウトを使用することにより、水酸化カルシウム及び炭酸カルシウムは、短波長領域650-1100nmでも比較的良好な結果が得られた。しかし、長波長領域1100-2498nmを使用した場合に比べ、その推定精度は大きく劣った。
- (3) 塩化物イオンについては、短波長領域では総じて良好な結果が得られなかった。
- (4) 塩化物イオンの測定において、可視領域を含めることで推定精度が向上する可能性が示唆された。

5. 謝辞

本研究の遂行にあたって、秋田県立大学生物資源科学部応用生物科学科の陳先生には近赤外分光分析装置のご提供並びにご指導をいただきました。また、鶴岡工業高等専門学校物質工学科の清野先生、山形大学農学部食料生命環境学科の奥山先生には基準分析の分析装置をご提供並びにご指導をいただきました。さらに、生産機械システム工学研究室の学生諸君にはスペクトル測定並びに基準分析に多大なご協力をいただきました。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, 2006. 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(1).
- 2) 岩元 睦夫, 河野 澄夫, 魚住 純, 1994. 近赤外分光法入門, 幸書房
- 3) 魚本 健人, 2007. コンクリート構造物の非破壊試験技術, 旺文社

- 4) 金田 尚志, 2004. 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
- 5) 金田 尚志, 石川 幸宏, 魚本 健人, 2005. 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(3).
- 6) 倉田 孝男, 戸田 勝哉, 2008. ケモメトリックス手法を用いた近赤外線小型分光器によるコンクリート診断装置開発, IIC REVIEW
- 7) 郡 政人, 古川 智紀, 上田 隆雄, 水口 裕之, 2007. 近赤外分光法を用いたセメント硬化体中の塩化物イオンの検出, コンクリート工学年次論文集 Vol.29(2).
- 8) 郡 政人, 古川 智紀, 上田 隆雄, 水口 裕之, 2008. 近赤外分光法を用いたセメント硬化体中の塩化物イオン量の推定, Cement Science and Concrete Technology No.61.
- 9) 郡 政人, 古川 智紀, 上田 隆雄, 水口 裕之, 2008. 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.
- 10) 小林 一輔, コンクリート構造物の総合診断法, 2008. 旺文社
- 11) 十河 茂幸, 森野 奎二, 坂井 悦郎, 2006. 生コンと材料の品質検査法, 旺文社
- 12) Naes, T., Isaksson, T., Fearn, T., Davies, T., 2002. Multivariate Calibration and Classification, NIR Publications.
- 13) 戸田 勝哉, 西土 隆幸, 高岡 啓吾, 福岡 千枝, 倉田 孝男, 2006. マルチスペクトル法による中性化および塩害の診断手法に関する研究, 土木学会第61回年次学術講演会.
- 14) Williams, O., Norris, K., 1987. Near-Infrared Technology in the Agricultural and Food Industries, American Association of Cereal Chemists.
- 15) コンクリート診断技術'08[基礎編], 2008. (社)日本コンクリート工学協会
- 16) コンクリート診断技術'08[応用編], 2008. (社)日本コンクリート工学協会
- 17) コンクリート標準示方書 平成11年度版, 2000. 土木学会
- 18) JISハンドブック 2009 ⑩生コンクリート, 日本規格協会

ステレオ視と KINECT センサによる栽培果菜類の 三次元距離計測の事例

野上規朗*・高橋照夫*・張 樹槐*

Three-Dimensional Range-Finding of the Cultivated Fruit Vegetables with Stereovision and the KINECT Sensor

Noriaki NOGAMI*・Teruo TAKAHASHI*・Shu-huai ZHANG*

[Keywords] stereovision, kinect sensor, image processing, 3d measurement

1. はじめに

野菜作は栽培期間全般にわたり水・肥培・防除等の管理作業や収穫作業に多大の労力が必要になる¹⁾ため、その機械化が大きな課題になっている。それらの作業の機械化のためには、実の色・形状・姿勢の認識、周囲の実や茎葉との識別、及びそれらの三次元位置関係の取得が可能でセンサシステムの開発が重要になる。これまで二次元・三次元の視覚センサや形状センサ²⁾³⁾、及びそれらを用いたロボットハンド等の研究⁴⁾⁵⁾が多数なされてきたが、実用的にはまだ十分ではない。そうした中で、近年オープンソースの画像処理ソフトウェア OpenCV が充実しステレオビジョン処理が容易になった。また最近ゲーム機用に市販された KINECT センサは安価な近赤外線投射方式の広角距離センサとしての利用が試みられている⁶⁾。

そこで、本報では果菜類の実や茎葉の三次元位置計測の性能向上のため、生育中のナス、キュウリ及びミニトマトを対象に、3D カメラを用いたステレオ視と KINECT センサとによる距離計測を行い、それぞれの処理過程と測定誤差について検討した。

2. 実験方法

(1) 供試果菜 市販の幼苗を購入し露地栽培で育てたナス(品種:長者)、キュウリ(女神2号)、及びミニトマト(ミニキャロル)の3品目を対象にした。測定時の性状は、ナスが草丈約520mm、実の平均径29mm、長さ113mm、キュウリが順に約930mm、26mm、180mm、ミニトマトが約1,015mm、26mm、24mmであった。

(2) 供試カメラとセンサ a. 3D カメラ 富士フィルム社製の FinePix REAL 3D W3 を供試した。平行な2個のレンズ(間隔75mm)を備え、それぞれの撮像素子が1/2.3型 CCD、有効画素数は1,017万画素である。三次元画像と動画の撮影が可能で内蔵 SD メモリカードに保存される。三次元の復元像は、カメラのモニターで直接見ることができるほか、左右のレンズ撮影画像に分割してステレオビジョン処理により得ることができる。

b. KINECT センサ Microsoft 社製のゲーム機用人物動作センサで、RGB カラーカメラ、近赤外線カメラ及び同用プロジェクタから成る。撮影範囲は0.5~6m、画像解像度は両カメラとも640×480画素、フレームレートは30fpsである。撮影操作は、付属

USB ケーブルで接続されたノートパソコンから行い、各カメラの画像はハードデスクに保存される。赤外線カメラによる距離測定原理は、図 2.1 のように、プロジェクタから投射されるランダム・ドット・パターンと赤外線カメラの撮影画像との間で予めステレオ幾何による三次元キャリブレーションを行っておき、測定撮影時に対象物への投射によって生じるプロジェクションパターンのシフト幅を撮影画像から統計処理で検出して三角測量の原理により広い角度範囲の奥行き画像を得る。なお、太陽光下では赤外線の外乱により測定不能になる。

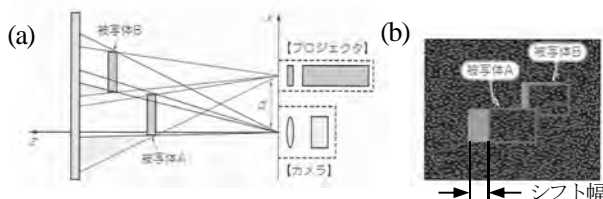


図 2.1 (a) KINECT センサの測定原理と (b) 赤外線カメラ画像のドット・パターン模式図⁶⁾

c. レーザ距離計 実距離測定用には、赤外線レーザー投射方式の Leica 社製携帯型距離計 DISTO plus を使用した。公称精度は100mで3mmである。

これらの機器は、図 2.2(a. 3D カメラ, b. KINECT センサ, c. レーザ距離計)のように、自作の一体型カメラヘッドのように、自作の一体型カメラヘッドにを固定し三脚に装着して使用した。

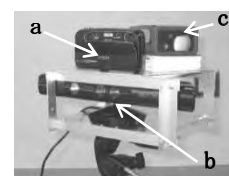


図 2.2 一体型カメラヘッドに装着状態

(3) 撮影方法 供試果菜は、ほ場で1株ずつポットに移して学部内実験室に運び、実や茎葉の撮影状態がほ場時に近似するように床に配置した。カメラヘッドは、各果菜の中央付近から斜め上方に約1.2m離れた位置に設置して、俯角を果菜により4~28度に設定した。3D カメラ撮影は画像サイズ1920×1080画素、露出・距離等を自動調節により行って3D静止画で保存し、KINECT センサでは30fpsで約10秒間連続撮影・保存した。その後、各果菜の実や茎葉に設けた複数の所定点までの距離をレーザー距離

*: 弘前大学農学生命科学部 〒036-8561 弘前市文京町3

計で測定した。照明は室内蛍光灯と外光(順光状態)のみとした。

(4)画像処理方法 a. ステレオ画像処理

3D カメラで撮影された左右画像から三次元空間を復元して距離を得るため、本報では OpenCV2.3⁷⁾に実装されたステレオ画像処理手法⁸⁾⁹⁾を用いた。予め供試3D カメラの左右2個のレンズによるステレオ視のカメラキャリブレーションを行うため、図2.3に示すチェックパターンを距離や向きを変えて撮影し、所定ライブラリで内部パラメータと外部パラメータを求めた。測定撮影によるステレオ画像については左右画像の平行化処理後にマッチング処理を行って視差画像を算出し、さらに視差を三次元座標に変換して距離画像を取得した。なお、所定点の距離値は平行化後の左画像上でその点の xy 座標を特定し、距離画像上でその座標に関する三次元座標値より算出した。

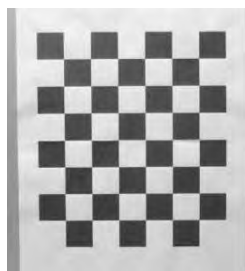


図2.3 チェックパターンの画像例

b. KINECT センサ 撮影したRGB カメラ画像、近赤外線カメラによる奥行き情報及び距離画像は付属ライブラリ OpenNI と OpenCV を用いて処理した。所定点の距離値算出は RGB 画像と距離画像よりステレオ処理の場合と同様に行った。

3. 実験結果と考察

ステレオ画像のマッチング処理は、OpenCV2.3 付属の関数 StereoSGBM を用いた。32bitCPU(3.0GHz)搭載のパソコンによる左右画像一組の処理時間は、約20秒であった。距離画像は、予備実験で得たスケール係数-16.138 を用いて視差を三次元座標に変換し、距離範囲を 0.5~2.5m に設定して近距離ほど高い明度で表した。一方、KINECT センサによる距離画像は、1回撮影分が15フレーム前後で連続表示されたが、各フレーム画面には不描画部分が現れて、それが変動する傾向が見られた。そこで、距離計算に当たっては最も不描画部分の少ないフレームを採用した。また、シェーディング処理を三次元座標の算出結果をもとに行った¹⁰⁾。

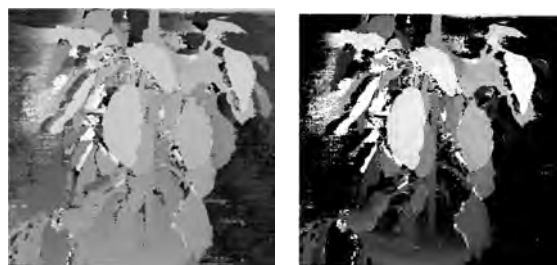
(1)ナス株の結果 外観は図3.1のように、緑色の葉と同色系の支柱が中央で支える株に、典型的なナス色の実が大小5個成り、下垂状態3個、着地2個で、実の一部が前側の葉の陰に隠れるものが多かった。そこで測定撮影は実の隠れ状態が異なるようにポットの向きを変えて2方向から行った。



図3.1 供試ナス株の画像

a. 処理過程 ステレオ画像処理の場合、視差画像では図3.2(a)の例に示すように、前側の葉や支柱の形状が概ね判別できたが、中ほどから後側や左上方では葉の形状が不鮮明なものや濃淡の異常なものがあった。実については、正面の実のように葉による隠れ部分が少ない場合に形状が比較的良好に判別できた。しかし、隠れ部分が多い左上の実や土の明度に近似の下部の実では周囲と同化して判別が困難であった。このように、重

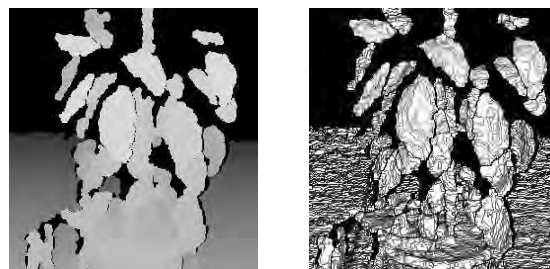
なりによる隠れや同色系範囲が横長の場合に、マッチング処理で誤対応が発生しやすいことがステレオ視計測の難しい理由である¹¹⁾が、StereoSGBM ではかなり改善されることが分かった。なお、図3.2(b)の距離画像で対象物の濃淡が視差画像より明瞭なのは、距離範囲を約半分を設定したためである。



(a) 視差画像 (b) 距離画像

図3.2 供試ナス株のステレオ処理結果

一方、KINECT センサの場合、距離画像では図3.3(a)に示す通り、葉や実のように画像内で表面積が比較的大きいものは濃淡で区別されたが、細い茎や左上のように枝葉が前後に入り組んだ箇所では描画されないことが多かった。これは統計処理によるプロジェクション・パターンのシフト幅検出が困難になるためと考えられる。この画像をシェーディング処理すると、図3.3(b)のように検出部分の輪郭が明瞭になるとともに視軸方向に対する表面の遠近が概略的に表示された。さらに下部のように距離画像では濃淡があまり変化しない箇所でも、実や葉などの輪郭が明確になり形状や姿勢がほぼ判別できることが分かった。



(a) 距離画像 (b) シェーディング処理

図3.3 KINECT センサ画像の処理結果

b. 実距離と測定値の関係 ナス株の距離測定点は、各実の先端側と付け根側の計10点、葉7枚の中央付近7点とした。2方向から撮影したそれらの測定点について、レーザ距離計による実距離と視差画像内の明度の関係を調べた結果、図3.4のようにほぼ直線的な減少傾向が見られ両者は強い相関関係にあった。

画像処理による測定値の実距離に対する誤差は、ステレオ処理の場合、図3.5(a)のように、距離900~1,400mmで-4~1%の範囲にあり平均-2.8%であった。-4%付近の誤差は実の方に多かったが、これは画像内で測定点を特定する際の位置のずれや、画像左上方や下部で発生した誤対応の影響によると思われる。一方、KINECT センサによる場合は、図3.5(b)のように誤差範囲は実、葉とも-2~+1%、平均約-1.0%であった。

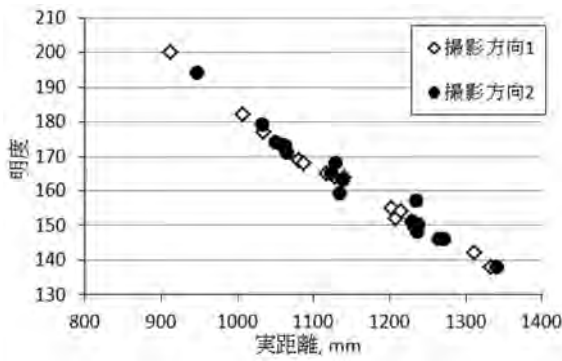


図3.4 ナス株の視差画像における実距離と明度の関係

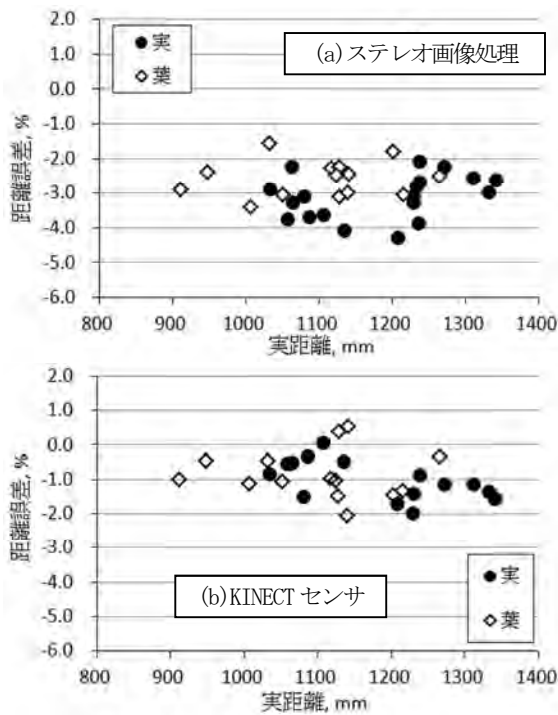


図3.5 供試ナス株の距離誤差

(2) キュウリ株の結果 草丈が長かったため上下に分けて撮影した。図3.6は下部の外観である。緑色支柱が中央で支える株に、標準的な色・形状の成熟実が下垂状態で1個、その上方に未熟な実が下垂から水平の状態で3個成り、葉に隠れたものはなかった。



図3.6 供試キュウリ株の画像

a. 処理過程 ステレオ処理の場合、距離画像では図3.7(a)のように、前側の葉や支柱の形状が概ね判別できた。正面の実や上部の横に伸びた未熟実は、葉との重なりが少ないため形状全体がほぼ判別できたが、中央上部の未熟実は支柱や葉と同化し判別が難しかった。KINECT センサによる距離画像では、葉や中央の成熟実の形状は濃淡で区別されたが、未成熟実や細い茎は正常に描画されない部分があった。これをシェーディング処理した結果、図3.7(b)のように距離画像では明瞭でなかった実や葉などの輪郭や形状がほぼ判別できるようになった。

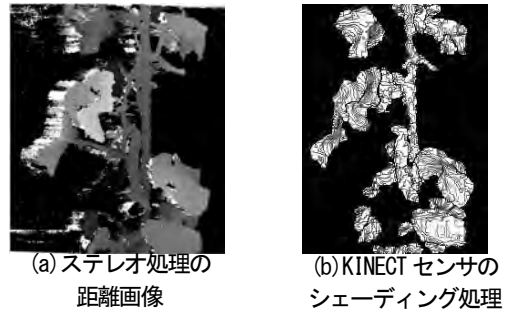


図3.7 供試キュウリ株の処理結果

b. 実距離と測定値の関係 各実の先端側と付け根側の計8点、各葉の中央付近と茎の計6点の測定点について上下2方向から撮影し、距離値を計算した結果、実距離に対する測定誤差は図3.8の通りであった。ステレオ処理の場合、同図(a)のように距離900~1,400mmで-3~-1%の範囲にあり、平均約-2.1%であった。KINECT センサによる場合は、同図(b)のように誤差範囲は-2.5~0%, 平均約-1.2%でやや散らばりが大きかった。

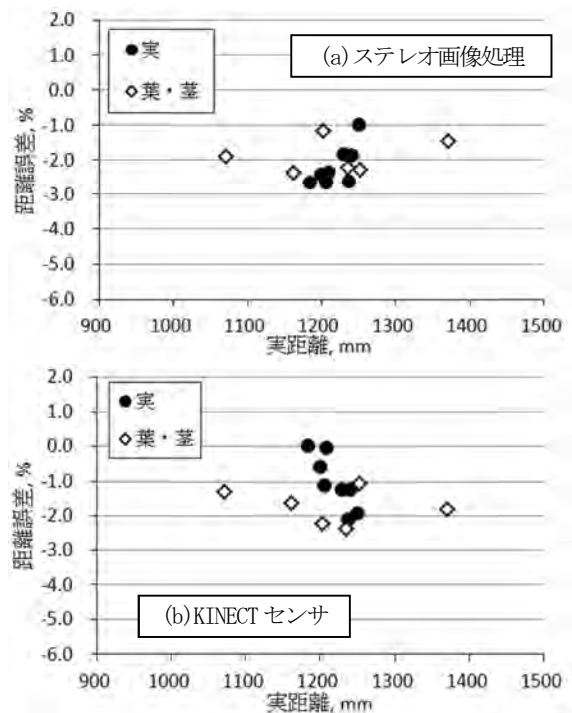


図3.8 供試キュウリ株の距離誤差

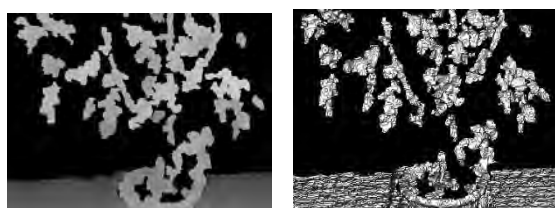
(3) ミニトマト 草丈が1m以上であったため上下に分けて撮影した。図3.9(a)は下部の外観である。支柱と太めの茎が支える株には赤色の成熟実が中央と上下部に房状に多数成り、左右には緑色の未熟実の小房もあった。また、実の周りに繁茂した実よりやや大きめの葉の陰に隠れたものも多く見られた。

a. 処理過程 ステレオ画像処理の場合、距離画像では図3.9(b)のように、中央付近では実や葉・茎などの一部は輪郭が描画されているが、全体的には周囲と同化して形状の不明瞭な部分が多かった。KINECT センサによる距離画像では、図3.10(a)に示すとおり実や葉・茎で描画されない範囲がかなり広がった。

た。これは実や枝葉が前後に混在した状態にあり、前述のようにパターンのシフト幅が検出できなかったためと推察される。同画像をシェーディング処理した結果は図3.10(b)であり、輪郭や形状は必ずしも明確ではなかった。



(a) 供試ミニトマト株の画像 (b) 距離画像
図3.9 供試ミニトマト株のステレオ処理結果



(a) 距離画像 (b) シェーディング処理
図3.10 KINECT センサ画像の処理結果

b. 実距離と測定値の関係 14個の実の中央付近に計14点、葉8枚の中央付近8点及び茎と支柱に各1点の計24点について距離を算出した結果、測定誤差は図3.11の通りであった。ステレオ処理の場合、測定できた点は22個で、誤差は同図(a)のように距離1,000~1,400mmで-4~0%, 平均約2.5%であった。誤差の理由は、測定点を特定する際の位置ずれや誤対応の影響と思われる。KINECT センサによる場合、測定できた点は19個で、誤差範囲は同図(b)のように-2~0%, 平均約-1.0%となり、ステレオ処理に比べ平均、散らばりともやや小さかった。

4. 摘要

生育中のナス、キュウリ及びミニトマトの各株を対象に、ステレオ視とKINECT センサによる三次元計測を行った。結果の概要は以下の通りである。

(1) 供試果菜から約1.2mの位置で撮影した3D画像について、OpenCV2.3の手法でステレオ処理を行った結果、画像内で表面積が比較的広い実や葉を持つナスとキュウリでは、距離画像でそれらの形状が概ね判別できた。一方、枝葉が繁茂し実が混在したミニトマト株では、前側の実や枝葉は描画されたものの境界の不明瞭が多く、中ほどより後ろ側ではそれらが同化した範囲が広がった。

(2) KINECT センサの場合、ナスとキュウリの距離画像では、未熟実や枝葉が混在した部分で不描画が見られたが、全体的には形状が概ね判別できる場合が多かった。枝葉が繁茂したミニトマト株では不描画の範囲が広範囲になった。これはKINECT センサの測距原理に関係すると推察された。

(3) 各果菜の実や葉の距離測定誤差は、距離900~1,400mmの範囲で、ステレオ処理では概ね-4~0%, KINECT センサでは-2

~+1%の範囲にあり、全体的に後者の誤差がやや小さかった。

今後の課題として、ステレオ処理ではStereoSGBM計算の高速化、KINECT センサでは施設栽培での利用を考慮し、枝葉が繁茂している場合の検出性能の向上、ステレオビジョンとの併用の検討などが挙げられる。

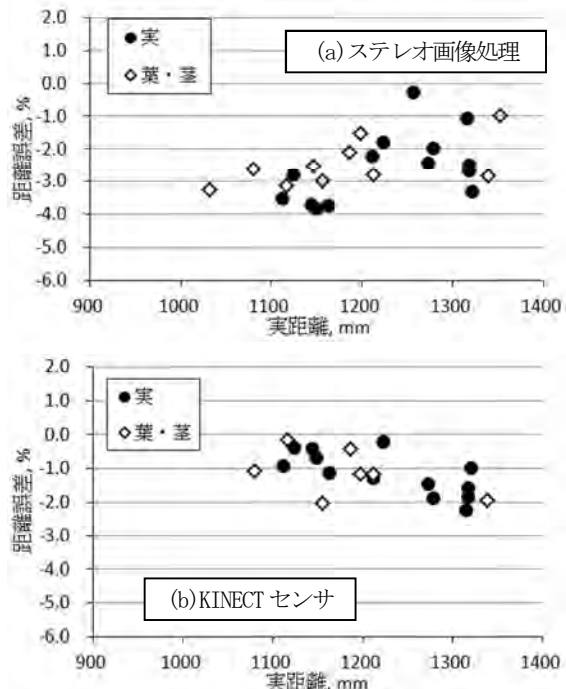


図3.11 供試ミニトマト株の距離誤差

参考文献

- 1) 政府統計, 2007. 野菜・果樹品目別統計
- 2) I. D. M. スプラタ 他, 1996. 三次元視覚センサを用いたミニトマト収穫ロボット(第1報), 農業機械学会誌, 58(4), 45-52.
- 3) 有馬誠一 他, 1995. キュウリ収穫ロボットの研究(第3報), 農業機械学会誌, 57(1), 51-58.
- 4) I. D. M. スプラタ 他, 1998. 三次元視覚センサを用いたミニトマト収穫ロボット(第2報), 農業機械学会誌, 60(1), 59-68.
- 5) 林茂彦 他, 2003. V字型整枝されたナスを対象としたロボット収穫システム(第1報), 植物工場学会誌, 15(4), 205-210.
- 6) 上田智章, 2012. 特集奥行きカメラ Kinect で3D計測, トランジスタ技術8月号, 62-68.
- 7) OpenCV サイト, 2011. <http://sourceforge.net/projects/opencvlibrary/files/opencv-win/2.3/>
- 8) プログラミング制作チーム, 2011. OpenCV2 プログラミングブック, マイナビ.
- 9) Gary. B., Adrian. K., (松田晃一 訳), 2010, 詳解 OpenCV, オライリー・ジャパン.
- 10) 谷尻豊寿, 2011. KINECT センサー画像処理プログラミング, カットシステム.
- 11) 高橋照夫 他, 2000. 両眼ステレオ視によるリンゴ園果実の距離測定(第2報), 農業機械学会誌, 62(3), 94-102.

Effect of the Narrow Ridge - Direct Sowing Technique of Saving Labor in Green Soybean (Edamame) Production

Tonny KINSAMBWE*, Mitsuhiro KATAHIRA*, Motoyasu NATSUGA*

Abstract

Growing Edamame conventionally is very labor intensive while diminishing labor availability in the agricultural sector has led to high production costs hence high prices. This situation therefore calls for sustainable means of production, minimizing the labor requirements while maximizing productivity. To examine the applicability of the narrow ridge – direct sowing technique to Edamame production, we employed a manual seeder and the ridge spacing of 30cm (narrow) instead of normal 75cm using 6 varieties. We carried out mechanical inter-cultivation twice in the normal ridge while no weeding for the narrow ridge. We investigated weed and plant growth and yield parameters. Results showed normal plant density by direct sowing, then, increased weed density, plant height, and total yield but decreased stem girth and quality in the narrow ridge significantly. Number of branches and nodes were not significantly different.

[Key words] Edamame, narrow ridge - direct sowing technique, saving labor, weeds, yields

I. Introduction

Green vegetable soybean (*Glycine max*), also known as Edamame in Japan, is a nutrient food crop that is gaining popularity in East Asia and America (Sciarappa, 2005). Edamame is a main vegetable among 28 appointed items cultivated in Japan, accounted for 13,300 ha total cultivated area, 72,500 t total yield, and 50,900 t total shipments in Japan in 2009. The total planted area increased to 102% of that in 2008. The main production prefectures in 2009 were Niigata, where the planted area was 1,550 ha, Yamagata (1,520 ha), Gunma (1,190 ha), Hokkaido (1,170 ha), Akita (990 ha), and Chiba (966 ha). These production prefectures accounted for 56% of all of the planted area in Japan (Statistics Department, 2009.)

Edamame is also called Dadachamame in Shonai area. Cultivation of Edamame in Shonai area normally involves sowing seeds in nursery pots/bed, transplanting, inter-cultivating, pest and weed control, harvest and processing activities between May and September. All these activities make the production of Edamame a very labour intensive. Furthermore, there is diminishing labor availability in the agricultural sector (Maximising Progress, 2012), as most youth prefer working in the services and industry sectors. This means that the farming community is aging and hence becoming less productive. Consequently, it has led to high production costs, which in turn have led to the increasing global food prices. (Food and Agricultural Organisation, 2012). This situation therefore calls for sustainable means of production minimizing the labor requirements while maximizing productivity.

The Narrow-ridge technique has been studied in soybean and maize with the benefits of increasing land productivity in both (Bullock, 1998), however, it has not been applied in Edamame production yet. The limitation of this technique is that it does not permit mechanized inter-cultivation for weed control. This study therefore specifically examined the applicability and effect of the narrow ridge – direct sowing technique to Edamame production including rate of labor saving, effectiveness of weed control, growth, yield and quality.

II. Methods and Materials

1. Test place

For this study, we used the Yamagata University Field Science Center upland field, Takasaka, Tsuruoka city. The test field was 11.9 m × 39 m (469 m²), divided into six blocks (3.75 m × 17.0 m per block; 63.75 m² each).

2. Materials

Edamame seeds used for these tests were of six varieties (green 75, an early-ripening variety; Shonai ichigou, a medium-ripening variety; Yuagarimusume, a medium-ripening variety; Shonai Sangou, an intermediate late-ripening variety; Akita-kaori-goyou, an intermediate late-ripening variety; Hiden, a late-ripening variety) to ascertain the availability of the narrow ridge-direct sowing technique.

3. Composition of test blocks

(1) Normal cultivation block: The normal cultivation block used direct

* Graduate School of Agricultural Science, Yamagata university 1-23, Wakabamachi, Tsuruoka, Japan

sowing with a belt type seeder, set up 75 cm at row space, 20–30 cm at hill space, 4.4–6.7 hills per square meter at plant density. That cultivation referred to the Shonai area cultivation conditions.



Fig.1 Sowing with a belt type seeder

(2) Narrow ridge cultivation block: The narrow ridge cultivation block used direct sowing with a belt type seeder, set up 30 cm at row space, 20–30 cm at hill space, and 11.1–16.7 hills per square meter at plant density.

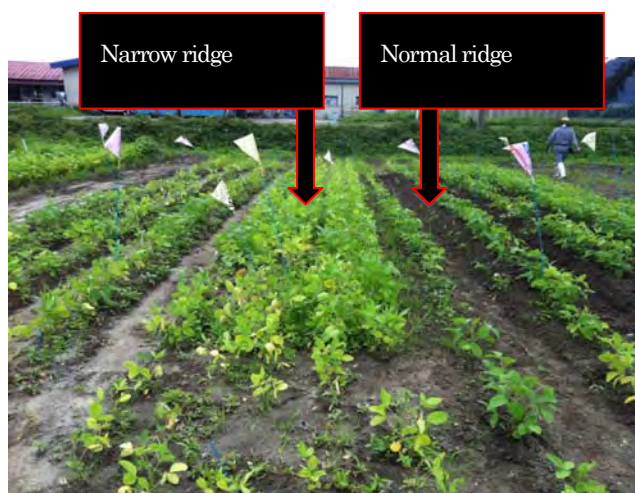


Fig.2 Field layout showing marked test blocks

Intercultivation, with the use of a power tiller, was conducted in the normal ridge block, but it was not done in the narrow ridge cultivation block.

4. Cultivation outline

These test blocks were fertilized with basal nitrogen at 4kg/10a for Green75 and Shounai-ichigou, and at 2kg/10a for the other varieties. Primary and secondary tillage were conducted using rotary tillers on the field.

5. Investigations

(a) Growth and yield: Growth was measured at 10 hills in investigation blocks. Investigation items were stem length (cm), number of nodes and the number of branches with two or more nodes.

Yield was measured as the weight of good pods (kg/10 a) from a harvest of all hills in the investigation block, after sorting of good pods from inferior ones.

(b) Weeds: The authors investigated the number of weeds of both broad-leaf and narrow-leaf varieties within 0.25 m². The investigation timing was at the 2–3 leaf and 5–6 leaf stages



Fig.3 Growth Check

III. Results and discussion

1. Growth and Yield

The plant density and germination rate are presented in Table 1, growth progress in Figs. 1–3, and yield components and yield results in Tables 2 and 3, respectively.

The germination rates of early-ripening green 75 and late-ripening Hiden were poorer than those of other varieties significantly. Consequently, direct sowing in the Shonai area shows as high aptitude as from medium-ripening and intermediate late-ripening varieties.

Table 1 Germination rate and Plant density of each variety

Test blocks	Green 75	Shounai- ichigou	Yuagari- musume	Shounai- sangou	Akita-kaori- goyou	Hiden
Normal	7.7 (69.0)	8.8 (89.5)	5.9 (83.6)	5.5 (90.8)	5.7 (83.6)	2.7 (56.2)
Narrow	11.6 (47.9)	12.8 (87.8)	9.7 (89.3)	12.0 (100.0)	10.7 (89.3)	5.3 (38.3)

1 : () values indicate germination rate(%)

2 : Values indicate plant density (hills/m²)

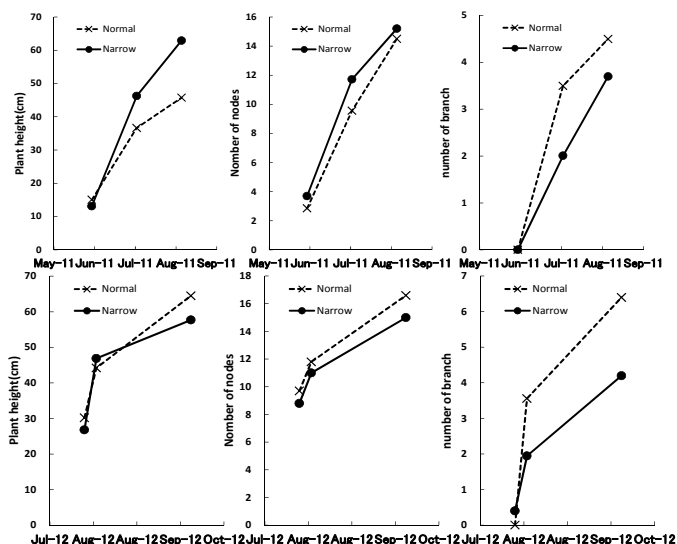


Fig.4 Growth Progress
(Above: Shonai ichigou, below: Hiden)

Growth progress was investigated for Shonai-ichigou, Shonai-sangou, and Hiden. Green 75 was not investigated for growth and yield because of damage caused by poor drainage. The plant height of Narrow blocks exceeded that of the Normal blocks at medium-ripening and intermediate late-ripening varieties. The number of nodes showed no difference in each block at medium-ripening variety. However, both the Narrow block of the intermediate late ripening varieties and the Normal block of the late ripening variety had increased one node more than the opposite test block. Medium ripening and inter-medium late ripening varieties of Narrow blocks showed longer node spaces than plants of Normal blocks did. Intermediate late ripening and late ripening varieties showed increased numbers of branches, which improved their ability to capture sunlight. The growth at the harvest timing showed a significant difference in plant height between those of Narrow and Normal blocks. Both the Narrow block of medium-ripening variety and the Normal block of late-ripening variety showed an increased number of nodes. The number of branches was not significantly different. Each normal block showed plants with larger plant diameter than narrow blocks. Narrow ridge techniques presented the danger of lodging because edamame of narrow ridge cultivation have long plant height and thin plant diameter attributable to their better sunlight.

Table 2 Growth components of each variety

Varieties	Plant height(cm)		Number of nodes		Number of branches		Plant diameter(mm)		weight of 100 pods(g)	
	Normal	narrow	Normal	narrow	Normal	narrow	Normal	narrow	Normal	narrow
Shounai-ichigou	—	—	—	—	—	—	—	—	125.0 ^a	124.7 ^a
Yuagarimusume	23.5 ^a (2.0)	31.5 ^b (3.9)	11.3 ^a (0.9)	12.5 ^b (0.8)	2.8 ^a (0.9)	3.5 ^a (0.8)	8.4 ^a (1.0)	7.8 ^a (0.9)	286.7 ^a (11.7)	239.3 ^b (15.5)
Shounai-sangou	45.8 ^a (6.6)	62.9 ^b (12.6)	14.5 ^a (2.1)	15.2 ^a (2.2)	4.5 ^a (1.4)	3.7 ^a (0.7)	10.0 ^a (1.9)	8.2 ^b (0.9)	100.0 ^a (141.4)	182.0 ^a (17.4)
Akita-kaori-goyou	29.4 ^a (5.9)	36.9 ^b (3.6)	9.9 ^a (1.4)	10.9 ^a (0.7)	3.0 ^a (0.8)	3.5 ^a (1.2)	8.9 ^a (2.5)	7.6 ^a (1.7)	258.0 ^a (18.0)	249.0 ^a (12.7)
Hiden	64.5 ^a (5.2)	57.7 ^b (5.6)	16.6 ^a (1.2)	15.0 ^b (1.2)	6.4 ^a (1.1)	4.2 ^b (1.2)	13.2 ^a (2.2)	9.9 ^b (1.5)	304.0 ^a (63.9)	268.0 ^a (19.8)

1 : () is standard deviation
2 : The author conducted t-tests of respective varieties. Different alphabets show significant difference at 5% level.

Weight of 100 pods showed no difference among examination blocks. Narrow blocks showed higher yields than Normal blocks (as seen in table 3) of each variety. However, Narrow blocks showed greater variance of yield and fewer branches compared with those of Normal blocks.

Table 3 Yield of each variety

Test blocks	Shounai-ichigou	Yuagari-musume	Shounai-sangou	Akita-kaori-goyou	Hiden
Normal	135 ^a (100)	304 ^a (46)	220 ^a (37)	254 ^a (94)	544 ^a (72)
Narrow	297 ^a (110)	668 ^a (248)	437 ^a (186)	499 ^a (151)	809 ^b (65)

1 : Each Values are yield (kg/10a)
2 : () is standard deviation
3 : The author conducted t-tests of respective varieties. Different alphabets show significant difference at 5% level.

2. Weed check

The Narrow blocks showed increased amounts of total weeds by 1.4–3.8 times at the intercultivation stage, and 1.4–8.9 times at the flowering stage than the Normal blocks showed. Normal blocks with medium ripening varieties showed fewer total weeds between the intercultivation stage and flowering stage, reflecting the effects of intercultivation. Narrow blocks showed a few increase in the amount of total weeds between the intercultivate stage and flowering stage to increase plant height as from medium-ripening varieties.

	75 cm	30 cm	30 cm/75 cm		75 cm	30 cm	30 cm/75 cm
GREEN75	171	385	2.3	GREEN75	164	507	3.1
SHOUNAI ICHIGOU	121	296	2.4	SHOUNAI ICHIGOU	236	321	1.4
YUAGARIMUSU ME	288	504	1.8	YUAGARIMUSU ME	63	400	6.4
SHONAI SANGOU	124	200	1.6	SHONAI SANGOU	47	133	2.9
AKITA KAORI GOYOU	260	358	1.4	AKITA KAORI GOYOU	65	580	8.9
HIDEN	41	156	3.8	HIDEN	—	—	—

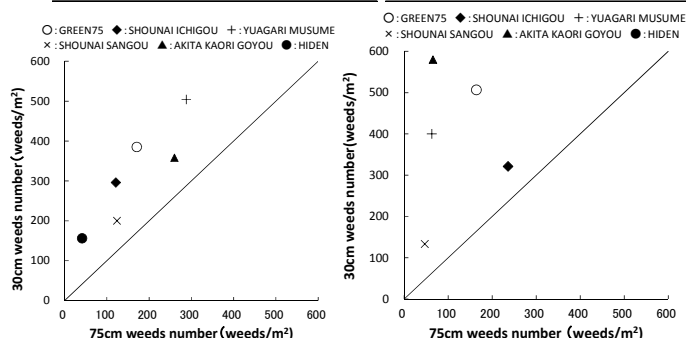


Fig.5 Weed density at Intercultivation stage (Left) and Flowering stage (Right)

Table 4 Amount of weeds at the intercultivation stage

varieties	item	broad leaf(weeds/m ²)			narrow leaf(weeds/m ²)		
		75 cm	30 cm	30 cm/75 cm	75 cm	30 cm	30 cm/75 cm
GREEN75		97	247	2.5	67	260	3.9
SHOUNAI ICHIGOU		137	223	1.6	99	99	1.0
YUAGARIMUSUME		17	157	9.1	45	243	5.4
SHONAI SANGOU		35	93	2.7	12	40	3.3
AKITA KAORI GOYOU		7	48	7.2	59	532	9.1
HIDEN		—	—	—	—	—	—
Average		59	154	2.6	56	235	4.2

Table 5 Amount of weeds in the flowering stage

varieties	item	broad leaf(weeds/m ²)			narrow leaf(weeds/m ²)		
		75 cm	30 cm	30 cm/75 cm	75 cm	30 cm	30 cm/75 cm
GREEN75		141	212	1.5	29	173	5.9
SHOUNAI ICHIGOU		97	201	2.1	24	95	3.9
YUAGARIMUSUME		96	215	2.2	192	289	1.5
SHONAI SANGOU		76	150	2.0	48	50	1.0
AKITA KAORI GOYOU		28	52	1.9	232	306	1.3
HIDEN		20	28	1.4	21	128	6.0
Average		76	143	1.9	91	174	1.9

Narrow blocks, at the intercultivation stage, had higher amount of weed varieties than Normal blocks: 1.4–1.5 times the broad-leaf weeds, 1.0–6.0 times the narrow-leaf weeds, and 1.9 times the narrow- and broad-leaf weeds at higher average values. Narrow blocks at the flowering stage showed similar but higher ratio for both broad and narrow-leaf weeds: 1.6–9.1 times the broad-leaf weeds, 1.0–9.1 times the narrow-leaf weeds, and 2.6 times the broad-leaf weeds at average values, and 4.2 times the narrow-leaf weeds the average values. Narrow blocks from the intercultivate stage showed more increased amounts of narrow-leaf weeds than broad-leaf weeds.

IV. Conclusion

- 1) The direct sowing technique had high potential for reducing requirements for planting labor without significantly affecting the planting density.
- 2) The narrow ridge technique also showed potential for increasing land productivity while reducing labor requirements for weeding.

Further research is required on the specific effect of the narrow ridge Edamame on the quality in which high variance was observed in this study.

References

- Bullock, D. S. (1998). Soybean response to narrow rows is largely due to enhanced early growth. *Crop Science*, 38, 1011-1016.
- Food and Agricultural Organisation. (2012, October 04). *World Food Situation*. Retrieved September 1, 2012, from FAO website: <http://www.fao.org/worldfoodsituation/wfs-home/foodpricesindex/en/>
- Maximising Progress. (2012, October 2012). *Maximizing progress website*. Retrieved September 31, 2012, from Maximising Progress: <http://www.maximizingprogress.org/>
- Sciarappa, W. J. (2005). *Edamame: The vegetable soybean*. New Jersey:

Rutgers cooperative extension.

Statistics Department, Ministry of Agriculture, Forestry and Fisheries 2009.

Statistics on Production and shipment of vegetables. 77.

ベニバナ花卉収穫機の開発

後藤克典*・長沢和弘*・勝見直行*・原田博行**

Development of Safflower Petals Harvester

Katsunori GOTO*・Kazuhiro NAGASAWA*・Naoyuki KATSUMI*・Hiroyuki HARADA**

Abstract

In this study, we worked on the development of safflower petals harvester that can reduce the harvest time, there will be less contamination of contaminants to the harvest. Cutting stress of safflower petals is smaller than the stress of bracts cut, even if the knob pulled together the petals and bracts, petals only to be disconnected. So, we have developed a harvester safflower petal pluck the petals in the corner facing the rubber roll. Its performance, there is no mixing of contaminants to the harvest, performance was better than the rotary blade of the expression safflower petals harvester has been developed previously. However, the efficiency of field work development machine is equivalent to hand-picked, the shortening of working hours was considered necessary to develop large-scale harvester harvest by applying the mechanism of the development machine.

[Keywords] safflower, flower petal, harvester

1. はじめに

現在、ベニバナは主に油糧作物として栽培されているが、近代日本においては、ベニバナ花卉から取った色素を、布や紙を染める染料、口紅などの化粧品として利用してきた。山形県内陸地方は、江戸時代に全国有数のベニバナ産地であり、乾燥されたベニバナ花卉が染料や口紅原料として京都方面へ送られ全国随一の生産と名声を誇っていた¹⁾。しかし、明治に入り中国産ベニバナの大量輸入や合成染料の導入、生糸生産の振興などがあり、明治10年頃から国産のベニバナ需要が減少し、国内のベニバナ産地は衰退していった²⁾。

近年、ベニバナ花卉（乱花や紅餅）は、高級食材や染色用として再び注目され、山形県産のベニバナは需要が高まってきている。しかし、ベニバナ花卉の収穫は、約2週間の開花期間中に適期に達した花を選んで夾雑物が混ざらないように手摘みで行われるため、収穫作業の人手が足りず規模拡大が難しかった。またベニバナの葉や苞葉にはトゲがあり、花卉の収穫は朝露でトゲが柔らかい短い時間に行われているが、厚手のゴム手袋をしても指にトゲが刺さることがある。さらに手摘み収穫を連続して行くと次第に手の握力がなくなり作業ができなくなるといった問題点が栽培農家から挙げられている。

この問題を解決するために山形県立農業試験場（現 山形県農業総合研究センター）では1973年に花卉収穫作業の機械化に取り組み、回転刃で花卉を切断して、それを掃除機で吸引・収納するベニバナ花摘機を開発した。これにより収穫時間は手摘みの1/5にまで短縮できたが、収穫された花卉に苞葉等の夾雑物が多く混入し、その除去作業

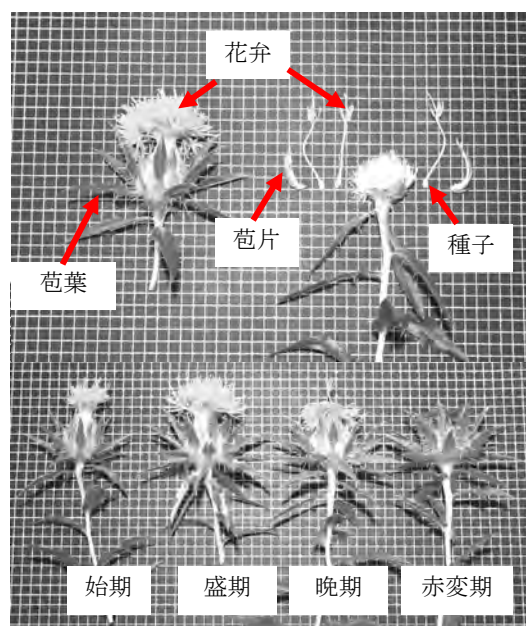


図1 花の形態と開花ステージ

に多大な労力と時間を要したため実用化には至らなかった³⁾。そこで本研究では、夾雑物の混入が少なく、かつ収穫時間を短縮できるベニバナ花卉収穫機の開発に取り組んだ。

2. 材料および方法

(1) ベニバナ花卉の特性

ベニバナ花卉収穫機の開発にあたり、ベニバナ花卉の特

性調査を行った。ベニバナの各開花ステージの呼称が定義されていないため、本報告では花卉抽出始めを“開花始期”，花卉が扇状に広がった時を“開花盛期”，花卉が萎れた時を“開花晩期”，花卉が黄色から赤色に変わった時を“赤変期”として示す（図1）。

調査は2008年7月に山形県農業総合研究センター（以下、山形農総研）のハウス内で栽培した「もがみべにばな」を供試して、開花ステージ毎に花卉を左右から挟んだ時の厚さ、花卉切断応力、苞葉切断応力を測定した。花卉切断応力は、1花の花弁全てをクリップで挟んで花卉の伸張方向へ引き、花卉が切断される際の最大応力をフォースゲージ（AND, AD-4932A）で測定した。苞葉切断応力も同じ方法で、花卉の伸長方向へ引いて切断応力を測定した。

(2) ベニバナ花卉収穫機の構造

ベニバナ花卉収穫機（以下、開発機）は、ベニバナの花弁を摘み取る収穫部と、花卉を吸引搬送するホースおよび掃除機で構成した。

収穫部の筐体は、軽量化を図るためにアルミニウム製のボックスを使用し、その下面に花卉を吸引するための開口部（幅15mm）を設け、さらに上面にはホースを装着するための丸パイプを取り付けた。この筐体の内部には20×20mmのアルミニウム製角パイプに、厚さ5mmのクロロブレンゴム（硬度A70°）を各面に接着して製作した30×30mmの角ゴムロール2本を軸距離40mmで並行に配置した。

この角ゴムロールは互いに逆方向に回転同期させて、その角の部分で左右から花卉を挟み取る構造とした（図2）。角ゴムロールの駆動には充電式のドリルドライバ（高儀, DDR-100Li）を使用した。吸引搬送用のホースには、内

径32mmのホース1.5mを使用し、吸引には100V電源で駆動する肩掛け式の掃除機（オーム電機, TV-5000DW）を使用した（表1）。

開発機のベニバナ花卉の収穫方法は次のとおりである。まず、掃除機を稼働させた状態で花に収穫部の開口部を近づけて花卉を吸着させて、次に、ドリルドライバの駆動スイッチを押して角ゴムロールを回転させて角ゴムロールの角で花卉を摘み取り、それを掃除機で吸引してのボックスに集める（図2）。

(3) 開発機の花弁収穫能力と所要トルクの把握

開発機のベニバナ花卉収穫能力を把握するため、“開花盛期”のベニバナの花弁を1花ずつ摘み取り、花卉収穫率と収穫物への夾雑物の混入割合を調査した。対照機として、1973年に開発されたベニバナ花摘機を使用した（図3）。

また、収穫部の所要トルクを把握するために、実測によるトルク測定を次の手順で行った。まず、収穫部の角ゴムロールの軸にプーリ（φ30mm）を取り付け、その円周にナイロン製の紐を重ならないように巻き付けて、紐の端にはフォースゲージを取り付けた。収穫部の開口部にベニバナの花を置き、フォースゲージを引いて角ゴムロールを回転させて、ベニバナ花卉が切断された時の力を測定した。収穫部の所要トルクは、この数値にプーリの半径15mmを掛けて算出した。

いずれの調査も、2009年7月に山形農総研のハウス内で栽培した“開花盛期”の「もがみべにばな」を使用して行った。

(4) 開発機の作業能率

表1 開発機の主要諸元

収穫部	サイズ (全体)	L240mm、W180mm、H95mm
	サイズ (ボックス)	L90mm、W60mm、H55mm
	ボックスの素材	アルミニウム板、厚さ2mm
	動力	ドリルドライバ、DC3.6V リチウムイオン電池 最大トルク4.3N・m 回転数250rpm
	質量	781g 内訳 ボックス：457g、 ドリルドライバ：324g
ホース	サイズ	内径32mm、長さ1.5m
	質量	175g
掃除機	サイズ	L340mm、W140mm、H220mm
	電力	100V、消費電力600W
	質量	2,100g

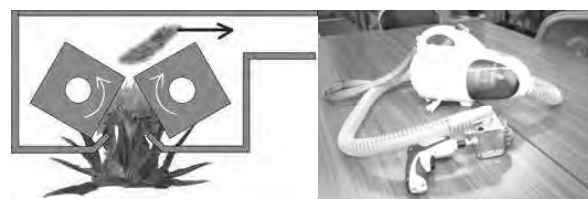


図2 開発機の構造

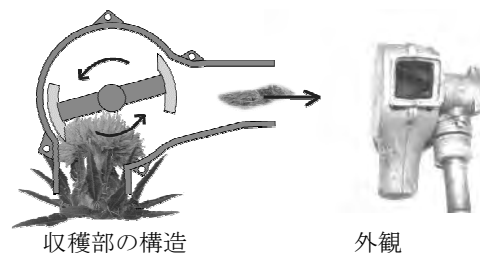


図3 回転刃式のベニバナ花摘機
(1973年 山形農試製作)

開発機の圃場における作業性能を把握するために、2010年7月に山形農総研圃場において「もがみべにばな」の花卉収穫を行い、収穫量、夾雑物混入割合、収穫した花卉の長さ、作業能率を調査した。開発機の稼働に必要な100V電源は、圃場内に設置した発電機（Honda, EB550）から供給し、40mの延長コードを使って作業者がベニバナ畝に沿って自由に動ける状態で収穫を行った。また、開発機での収穫作業は、収穫部で花を吸着した後にドリルドライバのスイッチを押す間欠駆動方法と、ドリルドライバのスイッチを押した状態で花を摘み取っていく連続駆動方法の2つの方法を試みて作業能率を比較した。対照は山形農総研職員13名による手摘み収穫とした。

3. 結果と考察

(1) ベニバナ花卉の特性

花卉を挟んだ時の厚さは開花盛期が最も厚く、その後、開花ステージが進むにつれて薄くなった（表2）。花卉切断応力は開花始期では2.8N/花であったが、開花盛期では5.9N/花、赤変期では11.5N/花と開花ステージが進むにつれて大きくなった。一方、苞葉切断応力は14.3N/葉で花卉切断応力と比べると開花盛期の2倍以上あり、花卉切断応力が最も大きかった赤変期よりも数値が高かった。赤変期以外の開花ステージでは全ての花卉が苞片の先端部で切断されていたが、赤変期では苞片内部で切断される花卉が多く、切断された花卉の長さは、開花盛期の14.7mmに対して赤変期では17.8mmと約3mm長かった。

ベニバナには1花あたり約80本の花弁がつくられ、それが伸長して苞片先端部から出ると開花に至る。開花始期においては、苞片からでた花弁数が少ないため花卉切断応力が小さく、赤変期においては花卉の水分が低下して繊維としての強度が増したために花卉切断応力が大きくなったと考えられた。

これらから、機械収穫に適している開花ステージは、花卉が上向きで把持しやすく、かつ切断応力が小さい開花盛期と判断された。また、花卉よりも苞葉の切断応力が大きいことから、花卉と苞葉を一緒に摘み引いても花卉だけが切断されると判断された。

(2) 開発機の花弁収穫能力と所要トルク

花卉の収穫率は対照機が88.8%、開発機が86.7%と差がなかったが、収穫物への夾雑物の混入割合は対照機が8.6%であったのに対して開発機では0%となり性能が優れていた（表3）。対照機ではベニバナ花卉に対して横から刃が当たるため、花卉だけでなく苞葉も一緒に刈り取ってしまうが、開発機では対向する角ゴムロールが苞葉の表面を撫でるように下から上に回転するため、苞葉を切断する可能性が低く、対照機と比べて夾雑物の混入割合が大幅に低下

表2 花卉の厚さと切断された花卉長さ

	花卉を挟んだ時の厚さ		切断された花卉の長さ (mm)
	苞片先端部 (mm)	花卉中央部 (mm)	
開花始期	1.4 a	1.3 a	—
開花盛期	1.7 a	2.5 b	14.7 a
開花晩期	1.0 b	1.2 a	—
赤変期	0.9 b	1.1 a	17.8 b

表中の異符号アルファベットは5%水準で有意差があることを示す(tukey-kramer法)。

表3 花卉収穫能力と所要トルク

	花卉 収穫率 (%)	収穫物への 夾雑物混入率 (%)	収穫部の所要トルク	
			平均 (N・m)	最大 (N・m)
開発機	88.8	0	0.33	0.42
対照機	86.7	8.6	—	—

$$\text{花卉収穫率} = W_1 / (W_1 + W_2) \times 100$$

W₁: 収穫した花卉の重量 (FW)

W₂: 花に残った花卉の重量 (FW)

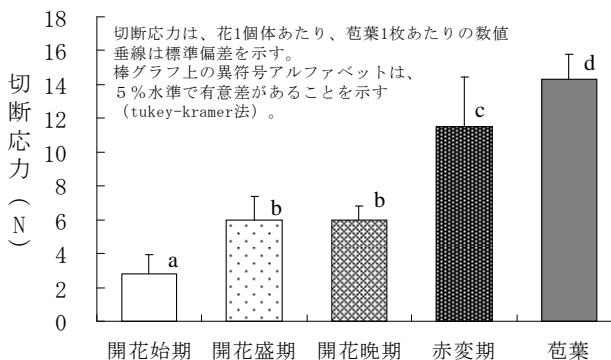


図4 花卉および苞葉の切断応力

表4 作業性能と能率

	花卉の長さ		夾雑物 (gFW)	作業能率	
	(mm)	s. d.		間欠	連続
開発機	22.1	2.5	0	450	570
手摘み	20.3	2.9	0	579	

注) 手摘みの作業能率は作業員13名の平均値

したと考えられた。

開発機の収穫部の所要トルクを把握するため、開花盛期のベニバナ 1 花の花弁を収穫した際のトルクを調べた結果、その値は平均 $0.33\text{N}\cdot\text{m}$ 、最大 $0.42\text{N}\cdot\text{m}$ であった (表 3)。開発機では、収穫部の駆動動力として最大トルク $4.3\text{N}\cdot\text{m}$ のドリルドライバを使用していたが、現状でも花弁収穫に十分対応できることが確認された。

(3) 開発機の作業能率

収穫した花弁の長さは、開発機を使った機械収穫で 22.1mm 、手摘み収穫で 20.3mm となり同等であり、また、夾雑物の混入割合は、いずれも 0% で差は無かった (表 4)。開発機で収穫した花弁には、収穫時についてと推察される

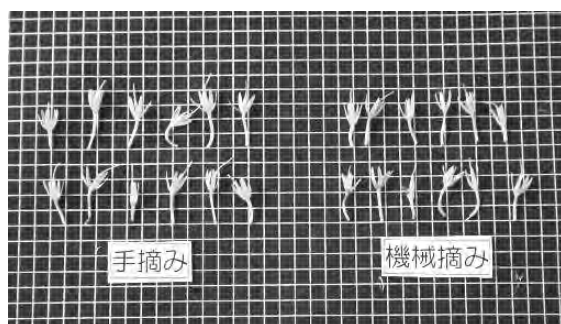


図 4 収穫された花弁



図 5 収穫作業

赤く変色した押し傷が確認された (図 4)。この傷は、黄色い花弁の外観を重視する食用 (乱花) としてはやや適性を欠くと判断されたが、花弁をすり鉢で搗いて作る染料原料の紅餅の材料としては支障がないと判断された。

作業能率は手摘みの 579gFW/h に対して、試作機では、ドリルドライバの間欠駆動の場合で 450gFW/h 、連続駆動の場合で 570gFW/h となった (表 4, 図 5)。間欠駆動はドリルドライバの駆動スイッチを押すのに時間を要したため能率が低下したが、連続駆動ではその時間が短縮されるため、手摘みと同等の能率となった。

開発機の利用によって、「ベニバナのトゲが手に刺さる」「指先に疲労が残る」などの問題は解決されたものの、本来の目的である作業能率の向上は実現できなかった。

4. まとめ

本研究では、夾雑物の混入が少なく収穫時間を短縮できるベニバナ花弁収穫機の開発に取り組んだ。ベニバナ花弁の切断応力は、苞葉の切断応力よりも小さく、花弁と苞葉を一緒に摘み引いた場合でも、花弁だけが切断されると見込まれた。そこで、対向する角ゴムロールで花弁を摘み取るベニバナ花弁収穫機構を考案し、その機構を搭載した収穫機を製作して作業性能を評価した。その結果、収穫物に対する夾雑物の混入がなく、以前に開発された回転刃式のベニバナ花摘み機よりも性能が優れていた。しかし、開発機は 1 花ずつ収穫する作業体系であるため、圃場作業能率が手摘みと同等となり、目標とした作業時間の短縮は達成できなかった。

夾雑物の混入防止と作業能率向上の両立を実現するには、本研究で開発した収穫機構を利用して、畝を跨いで収穫する茶園収穫機のような大型の収穫機を開発する必要があると考えられた。

引用文献

- 1) 今野 周, 2008, ベニバナ 農業技術体系, 5(9), 670.
- 2) 結城勇助, 1983, ベニバナ生産の現状と今後の課題, 農業および園芸, 58(1), 230-234.
- 3) 桃谷 英, 1975, ベニバナの生産と省力機械化技術, 農業および園芸, 50(1), 238-240.

寒冷地における耕作放棄地へのナタネ導入について

金井源太*・澁谷幸憲**・天羽弘一***・本田裕*・齋藤秀文*

Introducing rapeseed to abandoned field in *Tohoku* area

Genta Kanai, Yukinori Shibuya, Koichi Amaha, Yutaka Honda

[キーワード] 耕作放棄地, ナタネ, 播種, 省力作業, チゼルプラウシーダ

1. はじめに

2010年における耕作放棄地(耕作の意志なし)は, 39.6万ha¹⁾に及ぶ, 一方で景観作物や油糧作物としてナタネを耕作放棄地などで栽培する事例も増えており, 子実用ナタネの作付面積は平成11年の607haから平成22年には1690haまで増加している²⁾。

そこで本試験では, 寒冷地における耕作放棄地への適切なナタネ導入技術を明らかにすることを目的として, 慣行体系とチゼルプラウシーダ(以降, CPSと略す)を用いた体系について検討を行った。なお, 一般的にCPS³⁾は冬作と夏作の迅速な切替えのために用いる播種機であり, 本来は耕作放棄地の為の機械ではないが, 耕作放棄の要因として労働力不足も挙げられるため, ここでは省力作業機としてCPSの検討を行った。

2. 試験方法

(1) 試験地の概要

耕作放棄地へのナタネ導入試験を行うにあたり, 岩手県西和賀市の牧草地として利用されている圃場にて試験を行った。そのため, 正確には耕作放棄地ではないものの, 元々の田畑を10年以上牧草地として利用しており, 最低限の草刈(採草)はしているが, 近年では牧草更新などの手入れも滞りがちで多くの雑草が侵入している状況である。品種はキザキノナタネとし, 3年間に3回, 毎回, 新規の圃場にて導入試験を行った。

(2) 2009年(平成21年)試験

2009年の試験圃場は44.5aで, 道路から一段低くなっており, また, 東側, 南側が林地であり, やや水はけ, 日当りに難がある圃場であった。雑草植生として, ワラビおよびススキが見られた。

圃場の除草として, 8月にディスクモアによる刈倒し, ロールベアラによる持出しを行い, 除草剤(ラウンドアップ)散布を行った。その後, 9/8にサブソイラ施工により排水を確保し, 9/15にディスクハローによる整地後に土質改良資材(堆肥1.5t/10a(以降全て10a当り), 炭酸カルシウム肥料(アルカリ分55, 可溶性苦

土15)80kg, ようりん(リン酸20, 苦土12, ケイ酸20, ホウ素0.5, マンガン1)30kg}および元肥(8-8-6)80kgを施用後, CPSにより耕耘作業(CP施工)を行った後, 播種作業(播種量設定1.5kg/10a)を行った(写真1)。CPS区は30aとし, その周囲は慣行区として散播を行った。播種後に除草剤(トレファノサイド)をブームスプレイヤーにて散布した。なお, 圃場東側に明渠を施工した。

サブソイラ施工時にワラビの地下茎が引上げられたが, 手作業による持出しおよびディスクハローによる埋没により, 播種作業時に問題としないようにした(写真2)。

播種後は, 越冬, 雪解け後の2010/5/6に粒状散布機(イセキ製ブームタブラー)にて追肥(硫安(硫酸アンモニウム21.0)40kg)を行った。普通コンバイン(クボタARH380)にて, 7/23に収穫作業を行った。

(3) 2010年(平成22年)試験

2010年の試験圃場は30aで, 周囲の圃場よりやや高くなっており, 西側および北側が林地であった。雑草植生として, ススキおよびイタドリが見られた。

8月以前に一度ディスクモアによる刈倒し, ロールベアラによる持出しを行っていたため, 圃場の除草作業として, 8月に除草剤散布を行った。その後, 9/6にサブソイラを縦横に施工し, 粒状散布機にて土壌改良資材(炭酸カルシウム肥料107kg), 元肥(15-20-15:53.3kg, ようりん:26.7kg)を施用後, 9/8にCPSによる耕耘作業を行った後, 播種作業を行った(写真1)。

サブソイラ施工時に雑草がマット状になったものが, 作業機に抱込まれ, 作業上の問題となった(写真3)。雑草マットを圃場の端に寄せることで対応したが, 圃場表面には比較的大きな凹凸が残った。また, 2009年のワラビの地下茎と同様にイタドリの地下茎が引上げられた。

播種後は, 越冬後, 4/12に融雪剤を散布し, 雪解け後の2011/4/28に追肥(硫安40kg)を行った。普通コンバイン(クボタARH380)にて, 7/26に収穫作業を行った。また, 越冬前および越冬後に生育調査, コンバイン収穫前に坪刈収量調査を行った。

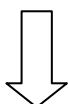
** (独)農業・食品産業技術総合研究機構 東北農業研究センター

** (独)農業・食品産業技術総合研究機構 北海道農業研究センター

*** (独)農業・食品産業技術総合研究機構 畜産草地研究所



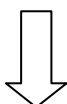
2009/8圃場耕作放棄状況



除草剤散布, モーア, 持出し



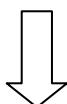
2010/8圃場耕作放棄状況



除草剤散布



2011/8圃場耕作放棄状況



除草剤散布, モーア



2009/9/8 サブソイラ施工



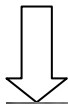
2010/9/6 サブソイラ施工



2011/8/31 プラウ施工



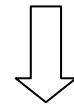
2009/9/15ディスクハロー整地



土改剤+元肥 施用



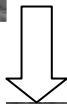
2010/9/8 CP施工~CPS播種



土改剤+元肥 施用



2011/9/5ディスクハロー整地



土改剤+元肥 施用



2010/9/15 CP施工~CPS播種



2011/9/8 資材混和~手撒き散播
~覆土(パディハロー)

写真1 耕作放棄地ナタネ播種までの作業



写真2 引上げられたワラビの地下茎



写真3 雑草マットの抱え込み

(4) 2011年（平成23年）試験

2011年の試験圃場は20aで、階段状の水田跡のうちの1枚であった。北東側に土手および背の高い雑草が繁茂しており、管理者によると採石業者が近辺に入った際に20~40cm径の石を多数圃場内に放置していったために、それ以来、水田としては利用していないとのことであった。また、水はけも悪くはないとのことであった。

8月以前に一度ディスクモアによる刈倒し、ロールベラによる持出し、8月に除草剤散布を行った。繁茂した雑草が残っていたため、ディスクモアによる刈倒しを再度行った。その後、8/31にプラウを施工し、9/5にディスクハローによる整地、9/8にマニユアスプレッダにて堆肥(1.5t/10a)、ライムソワにて資材および元肥(炭酸カルシウム:100kg, 苦土石灰:100kg, 15-20-15:50kg)、手撒きにて、よりん(20kg)の施用を行った。パディハローより土壌と資材、肥料を混和し、圃場が20aと狭いため、手撒きによる散播を行い、再度パディハローにより覆土を行った。播種後、9/9には除草剤(トレファノサイド)をブームスプレイヤーにて散布した。なお、圃場には額縁明渠を施工した。

圃場には石が多く、手作業にて大きなものは除いたものの、プラウ作業時にはヒューズボルトが3回ほど破断した。ディスクハローによる整地作業で一定程度埋没さ

せることができ、パディハローの破損等は生じなかった。

播種後は、越冬、雪解け後の2012/5/8に手撒きにて追肥(硫安40kg)を行った。7/12に坪刈調査を行った。その後、普通コンバイン(クボタARH380)にて、7/30に収穫作業を行った。

3. 結果および考察

(1) 2009年試験結果

越冬前生育調査の結果を表1に示す。ややCPS区の生育が良かった(表1)。

表1 越冬前生育調査(2009/11/27)

播種方法	播種日	草丈 cm	葉数 枚	葉長 cm	葉幅 cm	生重 g/個体
CPS	9/15	20.1	6.4	11.1	8.7	20.3
散播	9/16	16.9	5.6	8.4	6.7	9.7

越冬後は、残雪が比較的遅くまでであったため、追肥は5/6であった。収穫は7/23に行い、コンバイン収量は、CPS区が50.1kg/10a(水分8%w.b.換算、以下同様)、散播区が29.3kg/10aであった。

(2) 2010年試験結果

苗立数は156個体/m²で、越冬前生育調査の結果は表2のとおりであった。

表2 越冬前生育調査(2010/11/24)

播種方法	播種日	草丈 cm	葉数 枚	葉長 cm	葉幅 cm	生重 g/個体
CPS	9/8	24.6	8.2	12.1	9.1	15.2

また越冬後、融雪剤散布を行ったが、残雪状況について周囲の散布しなかった部分との明確な差は認められなかった。雑草マットの残存や水溜り跡など部分的に雑草が優勢な箇所が見受けられた。坪刈収量は23.0kg/a、コンバイン収量は80.8kg/10aであった。また、耕作後にも圃場表面には除草剤にて枯死した雑草マットが残存しており、後作を行う場合には、ディスクハローなどで埋没させる必要があると考えられた。

(3) 2011年試験結果

苗立数調査及び越冬調査は、積雪が例年より早かったため実施できなかった。坪刈収量は281kg/10aであった。

窪地や排水性の悪い部分では、ナタネの植生がない部分(約1.8a)もあったが、圃場全体でコンバイン収量138.3kg/10aであった。また、ナタネの、堆肥散布のムラが影響したと思われるような成熟のムラがあり、耕作放棄および耕耘により地力の低下が著しかったことによると思われた。

播種前のプラウ施工により圃場表面のルートマットは埋没されたが、ナタネ収穫後に地下でルートマットの分解がどの程度進んでいるかを採土器(大起理化製

表3 耕作放棄地におけるチゼルプラウシーダ体系とプラウ体系の作業時間比較(10a 当り)

チゼルプラウシーダ体系 (2010年西和賀播種)		プラウ体系 (2011年西和賀播種)	
ディスクモア:0.3h			
除草在散布(ブームスプレイヤー):0.3h			
サブソイラ:1.2h		プラウ:1h	
		ディスクハロー:1h	
資材+元肥施用:0.67h*1		資材+堆肥+元肥施用:0.8h*2	
チゼルプラウシーダ:(耕耘) 0.4h*3		パディハロー:0.5h	
チゼルプラウシーダ:(播種) 0.2h		播種:(手撒)0.5h	畦立て同時播種機:0.37h
		パディハロー:0.5h	
		除草在散布(ブームスプレイヤー):0.3h	
計	3.4h	5.2h	4.6h*4
苗立数	156 個体/m ²	データ無し	190 個体/m ²

*1:ブームタブラーにて資材(炭酸カルシウム:107kg), 元肥(15-20-15:53.3kg, ようりん:26.7kg)

*2:マニユアスプレッダにて堆肥 1.5t,

ライムソフにて資材および元肥(炭酸カルシウム:100kg, 苦土石灰:100kg, 15-20-15:50kg),

手撒きにて元肥(ようりん:20kg)

*3:雑草ルートマット処理のため, 耕耘目的でチゼルプラウ作業を行った。

*4:畦立て同時播種機のデータは, 2010年雫石のデータに拠った。

DIK-102A-G1)にて調査した。埋没ルートマットは, 分解が十分に進んでおり, 後作の耕耘作業への影響はないと判断できた。

(4) 考察

表3にて2010年試験と2011年試験を元に作成した作業時間比較を示す。なお, 畦立て同時播種機のデータは, 文献情報(2010年雫石)⁴⁾のデータに拠った。耕作放棄地においても, CPSを用いて, プラウ体系より作業時間を短くできることが確認された。

苗立の様子から見る限りでは, ナタネ導入技術として播種の方法については大きな問題はなかったと考えられるものの, 2009年試験で顕著なように3年間を通して越冬前の苗立を考慮すると収量が低かった。残雪による生育遅れ, また, 長年の耕作放棄に由来する地力不足などが要因として考えられた。

また, CPS体系では雑草ルート処理が不完全であるため, ナタネ以後の耕作においてはディスクハロー等により対応が必要であると考えられた。

一方, 作業時間がかかるが, プラウ体系では雑草ルートマットは埋没させることができた。しかしながら, プラウ作業により栄養分の乏しい土壌が反転されて表土となるため, 土壌資材や肥料の施肥で対応する必要がある。プラウ体系では収量が138.3kg/10aであり, CPS体系より高い結果となったが, 圃場条件が異なるため, 播種方法の違いによるものかどうかは判断できなかった。しかしながら, 安定した収量を重視する場合はプラウ体系の方が望ましいとの印象を持った。

ナタネの耕作放棄地への導入に当っては, CPS体系とプラウ体系の両者を各耕作放棄地の状況に応じて使い分けることが望ましい。

5. まとめ

岩手県西和賀町における耕作放棄地でナタネ栽培を行った。CPS体系では播種までの作業時間は3.6h/10a, プラウ体系では手撒き播種の場合は5.2h/10a, 畦立て同時播種では4.6h/10aであった。CPS体系は, 作業時間は短い, 雑草ルートマットが圃場表面に残り雑草繁茂の原因となることや, 後作における扱いなど問題が生じる。プラウ体系では作業時間がCPSより長い, 雑草ルートマットを埋没させることができる。しかし, 栄養分の乏しい土壌が反転されて表土となるため, 施肥などの必要がある。ナタネの耕作放棄地への導入に当っては, CPS体系とプラウ体系の両者を圃場条件に応じて使い分けることが望ましい。

謝辞

本研究は農林水産省委託プロジェクト「新たな農林水産政策を推進する実用技術開発事業『耕作放棄地を活用したナタネ生産及びカスケード利用技術の開発』」により行われました。ここに謝意を表します。

参考文献

- 1) 農林水産省, 2012. 「平成22年度の荒廃した耕作放棄地等の状況調査の結果」について, プレスリリース(平成24年1月13日)
- 2) 農林水産省大臣官房統計部, 2011. 「平成22年産なたねの作付面積及び収穫量(子実用)(平成23年3月31日)
- 3) 天羽弘一, 2011. 短期間で作目切替を行う簡易耕同時施肥播種技術, 機械化農業, 2011年2月号, 13-16.
- 4) 高橋昭喜, 扇良明, 澁谷幸憲, 金井源太, 本田裕, 2011. 極少量播種機構を備えたナタネの畦立て同時播種技術の開発, 平成22年度東北農業研究センター研究成果情報.

八郎潟干拓地水田における稲わら収集作業の特徴

齋藤雅憲*・進藤勇人*・片平光彦**・加藤良成***・山谷正治***

Characteristics of Rice Straw Collection System on Reclaimed Heavy Clay Paddy-Rice fields in Hachirogata

Masanori SAITO*・Hayato SHINDO*・Mitsuhiko KATAHIRA**・Ryosei KATO***・Shoji YAMAYA***

Abstract

This research investigated that relate to working time of rice straw collection system, analyze a possibility of adjusting factor and an involvement of each work. We investigated a rice straw collection system which was included by tedding, raking, packing, and bale handling transportation. The number of straight operation and windrow could be controlled by operators, but the number of bale could not be controlled by operators. Working distance were the most effective factor to shorten all working time. Any stationary work, contained in the packing and transporting work, could be reduced by low moisture content in rice straw with tedding and decreasing of the number of bales.

[Keywords] rice straw, collection system, working time, working distance, Hachirogata

1. はじめに

現在、秋田県では八郎潟干拓地水田において水稻収穫後の稲わらを原料とするバイオエタノール製造技術の実証に取り組んでおり、大区画水田において稲わらの効率的な収集運搬の実証試験を行っている。バイオエタノールをより低コストで製造するには、原料となる稲わらの効率的な収集運搬作業体系を構築することが必要である。

稲わら収集運搬体系には、気象条件、ほ場条件、使用機械などに応じて様々な方式があり、例えば、スクリー型脱穀機構を有する普通型コンバインで圧砕され排出される稲わらを、コンバインのクローラ輪距中央へ集め、高刈りした稲株の上で乾燥させてロールベアラで回収する方式が検討されている¹⁾。一方、秋田県は自脱型コンバインによる収穫が主流で水稻収穫後の天候が不安定な日本海側に位置している。このため、稲わらが乾燥し難く、さらに八郎潟干拓地は排水が悪い重粘土水田ほ場である。これらの条件に対応するため、トラクタは低圧ツインタイヤ、ロールベアラはクローラを装着した自走式による体系で試験を行った。なお、収集作業の高速化には各作業機の作業速度を上げることが考えられるが、土壌踏圧の問題や反転、集草、梱包作業での稲わらのピックアップロス増加による作業の精度の悪化が懸念されるため、作業速度を上げて作業時間を短縮することは困難であった。

収集運搬の作業行程を効率化・最適化するには、各作業の作業能率、作業精度を支配する主要な条件である作業距離、直進行程数、ウィンドロー数、時間内訳、作業速度などを正確に把握する必要がある²⁾。従来の手計測による作業計測では、点在する多数の大規模水田で複数

の作業計測を同時に行い、作業後にこれらの条件の検討を行うことは困難であった。これに対し、近年、農作業の見える化を目的として、ほ場内作業状況や、ほ場間移動の作業能率解析に小型 GPS ログを用いる事例が増えており³⁾、稲わら収集作業においても、計測が行われている⁴⁾⁵⁾。作業体系の中で流れ作業、組作業の状況を把握するには、多数の作業機の情報を同時に取得し解析する必要がある。

そこで本報では、効率的な稲わら収集運搬を実現するため、小型 GPS ログで作業計測を行い、各作業の作業時間に関わる要因を調査し、個々の作業要因が調節可能かについて検討し、作業の特徴と作業要因が作業時間に与える影響を検討した。

2. 試験方法

(1) 試験場所・調査圃場・年次

秋田県大潟村 秋田県農業公社ほ場

1. 25ha 区画(長辺×短辺=150m×80m)×5 筆(ほ場 A~E), 0.54ha 区画(長辺×短辺=150m×36m)×5 筆(ほ場 F~J)・2011~2012 年

(2) 作業体系・供試機械

作業体系は、図 1 のように反転作業→集草作業→梱包作業→運搬作業(ほ場からのベールの運搬)で行った。反転:トラクタ(NH 社, T4030SMC-4, 出力 56kW, 低圧ツインタイヤ:前輪 650/45-22.5(幅 650mm), 後輪 750/50-30.5(幅 750mm))+ヘイメーカ(S 社, MGH3100 型, 作業幅 3.1m), トラクタ+テッド(NH 社, HFT158 型, 作業幅 4.2m), 集草:トラクタ+レーキ(J 社, R3350S 型, 作業幅 3.4m), 梱包:自走式ロールベアラ(S 社, JRB3010 型, ベールサ

*秋田県農業試験場, **山形大学, ***秋田県農業公社

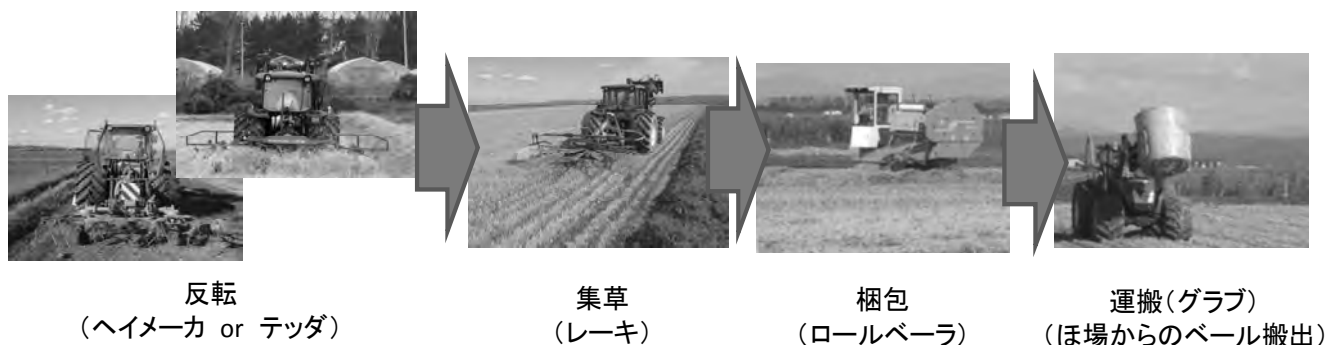


図1 作業体系の概略

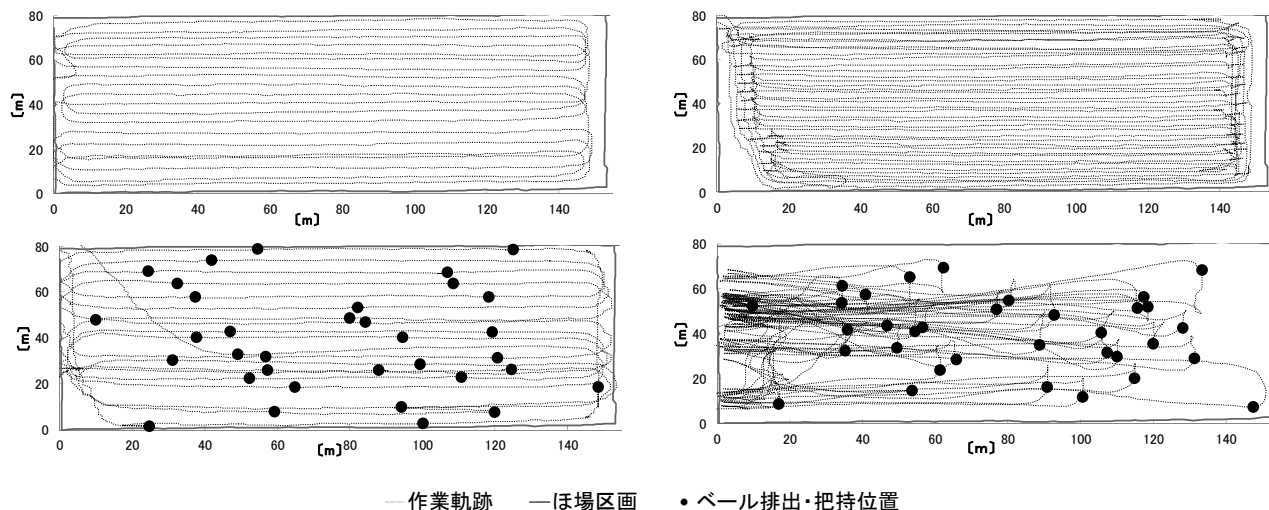


図2 各作業の作業軌跡 (ほ場D) (左上: 反転, 右上: 集草, 左下: 梱包, 右下: 運搬)

表1 各作業の1筆当たりの作業時間と作業距離

ほ場	面積 ha	反転 直進 行程 回/筆	有効 作業幅 m	反転作業		集草 直進 行程 回/筆	ウインド ロー数 列/筆	集草作業		梱包作業		梱包数 個/筆	運搬作業		
				作業 時間 h/筆	作業 距離 m/筆			有効 作業幅 m	作業 時間 h/筆	作業 距離 m/筆	作業 時間 h/筆		作業 距離 m/筆	作業 時間 h/筆	作業 距離 m/筆
A	1.2	-	-	-	-	38	19	2.1	1.24	6799	1.44	3157	26	0.45	2694
B	1.2	18	4.4	0.62	3122	43	19	1.9	1.83	7119	1.47	3564	27	0.45	2635
C	1.2	-	-	-	-	34	17	2.4	1.09	5950	1.23	3041	25	0.54	4916
D	1.2	20 20	4.0 4.0	0.81 0.69	3261 3349	40	19	2.0	1.82	6678	1.65	3727	32	0.77	6218
E	1.2	25 26	3.2 3.0	0.78 0.73	4463 4638	34	17	2.3	1.18	5946	1.46	2810	27	0.73	4814
F	0.5	8	4.4	0.33	1394	16	8	2.2	0.47	2695	0.59	1272	12	0.31	1780
G	0.5	9	4.0	0.38	1666	16	8	2.2	0.53	2600	0.62	1375	12	0.30	1748
H	0.5	-	-	-	-	12	4	3.0	0.50	2283	0.45	801	11	0.31	2343
I	0.5	-	-	-	-	12	6	3.0	0.48	2294	0.48	1094	12	0.35	2688
J	0.5	-	-	-	-	16	7	2.3	0.57	2888	0.66	1439	11	0.37	2381

注 ほ場Dの反転はテッタ2回, ほ場Eの反転はヘイメーカ2回で行った

イズ約φ1.2×1.2m),

運搬: トラクタ+ベールグラブ(M社, BGII-T070型)

(3) 調査項目・計測機器等

上記作業機に小型GPSログ(W社, WBT-202, サンプルング1Hz, 位置精度2.5m CEP(単独測位), 2.0m CEP(SBAS))を装着し, 以下の調査を行った。

1) 作業能率(h/ha)

実測値と小型GPSログから算出した時間をほ場面積で除して算出した。

2) 作業速度(m/s)

作業速度は, ストップウォッチで10m区間の走行時間

を計測して算出した。また, 小型GPSログで計測した直進区間の速度データの平均値を用いた。

3) 作業経路

走行経路は, GPSのログデータを直角座標に変換し解析した。ベール位置とベール分布は, 梱包作業と運搬作業に用いた機械の停止位置から推定した。

4) 作業距離(m)

小型GPSログの速度データ(1Hz)の積算値とした。

5) 有効作業幅

有効作業幅は, ほ場短辺長を反転・集草直進行程数で除した値を用いた。

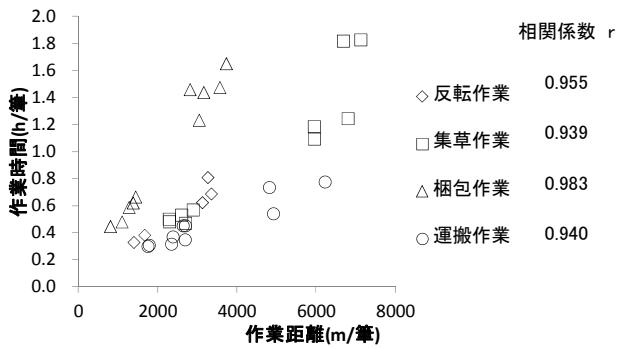


図3 作業距離と作業時間の関係

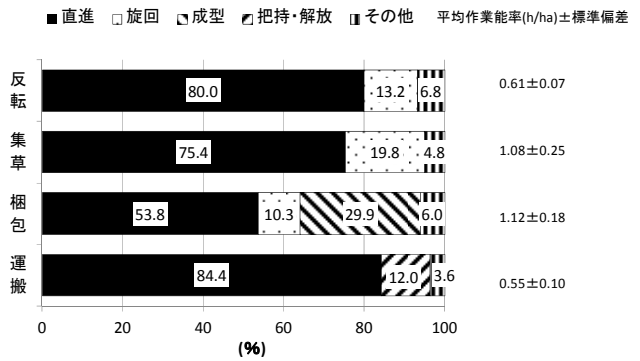


図4 各作業内訳の割合 (ほ場 A~J の平均)

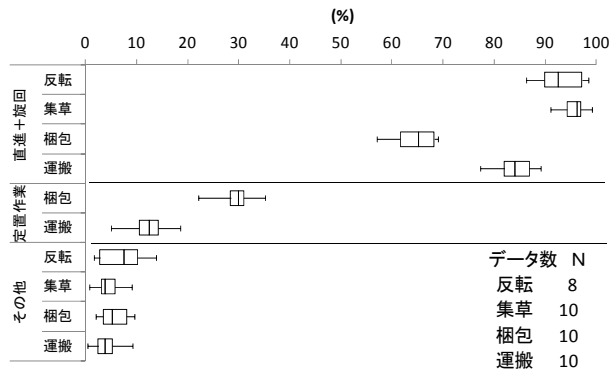


図5 各作業内訳の箱ひげ図

注 各要素は左から最小値, 第1四分位, 中央値, 第3四分位, 最大値を表す。

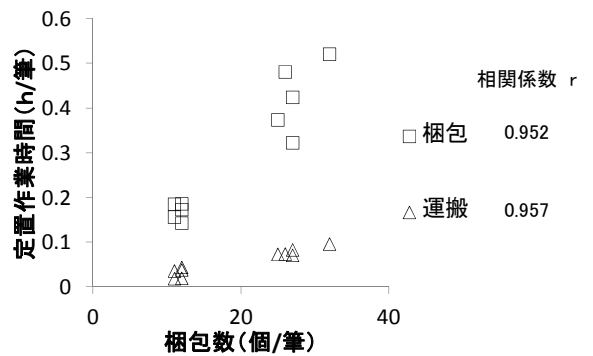


図6 梱包数と定置作業時間の関係

6) 作業時間の内訳

作業時間の内訳は、実測と小型GPSログの軌跡から判別した。

3. 結果及び考察

1) 作業時間に関わる条件

作業の軌跡は、反転作業、集草作業、梱包作業がで往復作業、運搬作業が梱包作業で排出されるバール配置に従い、任意の軌跡であった(図2)。

表1に手計測と小型GPSログにより得られた1筆当たりのデータを示した。直進行程は、反転、集草でそれぞれ、8~26回/筆、12~40回/筆であった。作業時間は、反転、集草、梱包、運搬でそれぞれ、0.33~0.81h/筆、0.47~1.83h/筆、0.45~1.65h/筆、0.30~0.77h/筆であった。作業距離は、反転、集草、梱包、運搬でそれぞれ、1394~4638m/筆、2283~7199m/筆、801~3727m/筆、1748~6218m/筆であった。ウィンドロー数と梱包数は、それぞれ4~19列/筆と11~32個/筆であった。

有効作業幅は、ヘイメーカによる反転、テッダによる反転、集草でそれぞれ、3.0~3.2m、4.0~4.4m、1.9~3.0mとなった。

作業距離は、直進行程数とウィンドロー数が増加するに伴い、増加する傾向であった。作業計測結果から、作業時間に影響する条件として、反転作業と集草作業では

直進行程数、梱包作業ではウィンドロー数、梱包数が増えられた。このうち、作業距離に関係している直進行程数、ウィンドロー数は調節可能な条件だと考えられた。梱包数は、バール密度と稲わら収量、稲わら水分の影響を受けるため調節困難な条件だと考えられた。

各作業の作業時間は、作業距離の増加に伴い増加し、相関係数rは、反転、集草、梱包、運搬でそれぞれ、0.955、0.939、0.982、0.940となり、正の相関があった。したがって、作業時間を短縮するには作業距離の低減が重要である(表1、図3)。

2) 各作業の作業内訳

平均作業能率は、反転、集草、梱包、運搬でそれぞれ、0.61、1.08、1.12、0.55h/haであった。

各作業は、直進、旋回、成型、把持、解放、その他(入出のため移動、調整)の作業内訳によって構成された。このうち、梱包作業の成型と運搬作業の把持・解放は作業機的位置が変わらない定置作業であった。各作業の走行割合(直進+旋回)は、反転作業で平均93.2%(最小86.2%~最大98.4%)、集草作業で平均95.2%(最小91.0%~最大97.2%)、梱包作業で平均64.1%(最小57.0~68.4%)、運搬作業で平均83.7%(最小77.4%~89.1%)であった。また、定置作業割合は、梱包作業で平均29.9%(最小22.1%~最大35.2%)、運搬作業で平均12.1%(最小5.1%~最大18.5%)であった。

作業内訳の平均値は、反転の直進、旋回でそれぞれ 80.0, 13.2%, 集草の直進、旋回でそれぞれ 75.4, 19.8%, 梱包の直進、旋回、成型でそれぞれ、53.8, 10.3, 29.9%, 運搬の走行、把持・解放でそれぞれ、84.4, 12.0%であった。

以上から、梱包作業と運搬作業で定置作業の割合が高いことが特徴的であった(図4, 5, 6)。

3) 各作業の特徴と作業時間短縮

反転作業の有効作業幅はそれぞれ、3.0~3.2m, 4.0~4.4m であった。特に、テグダの理論作業幅は、4.2m であることから、作業幅を十分に使って作業が行われていた。反転作業では、作業速度を増加し、作業時間を短縮する事で作業時間の短縮が期待できる。しかし、作業速度の増加は作業の精度上困難であるため、反転作業での作業時間短縮が困難であると判断できた(表1)。

集草作業で作成するウィンドローは、梱包作業でロールベアラが回収する集草量にあわせて集草作業幅の重なりを調整しながら、直進行程数 2~3 回で 1 列を作成しており、その有効作業幅は 1.9~3.0m であった。集草作業距離の低減には、梱包時にロールベアラが収集可能なウィンドローを作成できる限り、有効作業幅を大きくすることが重要である(表1)。

梱包作業は、走行作業と定置作業で構成された。定置作業時間は、梱包数の増加に伴い増加し、相関係数 r は 0.952 となり、正の相関があった。梱包数は、調節困難な条件であったため、成型は作業時間における固定値と考えられた。例としてほ場 A, B, D はウィンドロー数が 19 列と同じだが、梱包数の増加に伴い作業時間が増加する傾向であった。梱包作業時間を短縮するには、固定値を小さくする事が困難であるため、集草で作成されるウィンドロー数を低減し、走行作業の作業距離を削減する必要があると考えられた(表1, 図4, 5, 6)。

運搬作業時間は、梱包数の増加に伴い、定置作業時間が増加した。梱包数と定置作業時間の相関係数 r は、0.957 となり、正の相関があった。梱包数は、調節困難な条件であったため、把持・解放は作業時間における固定値と考えられた。運搬作業距離は、梱包作業時のべール数とべール配置によって決まるため、運搬作業単体で調整可能な条件は、走行速度のみであった。しかし、作業速度段が一定であるため、速度による大幅な作業時間短縮は困難であると考えられた。すなわち、運搬作業を効率化するには、作業距離を低減するため、梱包作業時にべールを運搬に有利な位置に配置する技術の開発や集草作業計画が必要であると考えられた(表1, 図4, 5, 6)。

以上から、各作業に共通して、作業時間の短縮には作業距離を短くすることが有効であることが明らかとなった。また、反転、集草作業には作業距離、走行速度に関係する走行が多く含まれ、梱包、運搬作業には梱包数に関係する定置作業が含まれた。集草作業距離は、直進行程数を少なくすることで有効作業幅が大きくなり、短縮可能であると

いえる。梱包作業距離は、集草作業で作成されるウィンドロー数によって制約されるため、梱包作業単体での調節が困難であった。運搬作業距離は、梱包数によって変化するため、梱包作業単体での、作業距離短縮が困難であり、前作業の梱包時にべール運搬に有利なように配置する技術の開発が必要である。

4. 摘要

本研究では、作業毎に作業時間に関わる要因を小型 GPS ロガで作業計測を行い調査した。また、個々の要因について調節の可能性と作業ごとの関わり合いを検討し、各作業の特徴を解析した。その結果、作業距離に関係している直進行程数とウィンドロー数は調節可能な条件であり、梱包数は調節困難な条件と考えられた。各作業の作業時間を短縮するには作業距離の短縮が最も有効であると考えられた。また、梱包作業と運搬作業に含まれる固定値の短縮には、反転時に稲わら水分を下げ、梱包数をできるだけ少なくすることが重要である。

謝辞

本研究は、農林水産省「ソフトセルロース利活用技術確立事業」の助成を受けて実施しました。また、小型 GPS ロガのデータ整理法について、九州沖縄農業研究センターの大嶺政朗氏に多大な協力をいただきました。関係各位に御礼申し上げます。

参考文献

- 1) 葉師堂謙一ら: 特集 稲わら収集の最新技術, 農機誌, 74-5, 228~248, 2012
- 2) 農業技術協会, 農作業試験法, 10-20, 1987
- 3) 大嶺政朗, 杉本光穂: 小型 GPS ロガによる小区画分散圃場における圃場間移動と作業能率の関係, 農作業研究, 45-別, 101-102, 2010
- 4) 齋藤雅憲, 進藤勇人, 片平光彦, 山谷正治, 加藤良成: 小型GPSによる大区画水田ほ場における稲わら収集作業の計測, 農機東北支部報, 58, 9-12, 2011
- 5) Mitsuhiro Katahira, Hayato Shindo, Masanori Saito, Shinpei Nakagawa, Ryosei Kato, Shoji Yamaya, Motoyasu Natsuga: An investigation into the optimization of rice straw collection system for bioethanol fuel production from reclaimed heavy clay paddy-rice fields in Hachirogata, An ASABE Meeting Presentation Paper Number 11, 2011

八郎潟干拓地稲わら収集作業における稲わら水分の変動要因 —反転作業と土壤水分が稲わら水分に及ぼす影響と高周波容量式水分計による稲わら水分の簡易推定—

進藤勇人*・齋藤雅憲*・片平光彦**・加藤良成***・山谷正治***

Changing Factor of Rice Straw Moisture with Rice Straw Collection Work on Reclaimed Heavy Clay Paddy-rice Fields in Hachirogata

Effect of Turing Work and Soil Moisture on Rice Straw Moisture and Simple Method of measuring Rice Straw Moisture by Ratio Frequency Capacity Type Water Meter for Soybean Grain

Hayato SHINDO*・Masanori SAITO*・Mitsuhiko KATAHIRA**・Ryosei KATO***・Shoji YAMAYA***

[キーワード] 稲わら水分、反転作業、土壤水分、高周波容量式水分計、八郎潟干拓地

1. 緒言

八郎潟干拓地（秋田県大潟村）では1筆1.25haを基本とした大区画圃場で大型農業機械による効率的な水田作が行われている。地域の多くはスメクタイト主体とした粘土含量50%を超える排水不良の重粘土水田で、作物の生産性が高い一方で土壤が乾きにくく、地耐力が低い¹⁾、²⁾。そのため、圃場は現在でも安定した基盤の確保に、補助暗きよなどの営農排水を進めている。

水稻の稲わらは有用な有機資源であるが、地力増進を目的とした圃場還元が主体で、畜産や園芸品目への積極的な活用が少ない現状である。米生産の副産物である稲わらを積極的に活用することを目的に、稲わらを原料とするエタノール製造の取り組みを始めている。稲わらをエタノールの原料とするには、製造コストを低減するため、大区画水田におけるコンバイン収穫後の稲わらの効率的収集運搬作業体系を構築する必要がある。

エタノール原料としての稲わらには、周年原料として供給するための保管性や乾式粉碎機への適性が高いことなどが求められ、水分が低いことが条件となる（水分目標値30%以下）。また、水分の低い稲わらは、バールの梱包密度増加による収集運搬作業効率の向上をもたらす。稲わらの乾燥を促進しながら、稲わらを効率的に収集できる体系として、スクリュウ型脱穀機構を有する汎用型コンバインを用いた体系や自脱型コンバインにスクリュウ式稲わら圧砕装置を取り付けて行う体系が報告されている³⁾、⁴⁾。しかし、大潟村では水稻収穫用に汎用型コンバインを利用する事例は少なく、また、自脱コンバインに稲わら圧砕機を取り付けることは、耕種農家の負担となるため、導入が困難な現状にある。そのため本試験では、牧草の集草体系と同様にテッダによる反転とレーキ

による集草で乾燥を促進し、稲わらを収集する体系を実施し、作業の効率化について検討している⁵⁾。牧草収集では反転、集草による予乾体系について多くの知見があり、反転、集草や気象要因、土壤水分が牧草の乾燥に及ぼす影響や水分変化の予測モデルが報告されている⁶⁾、⁷⁾、⁸⁾。しかし、稲わらの乾燥についての知見は少なく、圃場で稲わら水分を迅速に推定する方法も検討されていない。

また、稲わら水分を圃場で把握することは作業計画の策定に当たり重要な要素である。しかし、炉寛保では24時間以上の時間を要し、赤外線水分計等は短時間で測定が可能であるが、サンプル量が少なく、精度を高めるために反復数が増加するといった問題がある。作物の茎葉等の水分を簡易に推定する方法では、立ち毛の大豆茎の水分を予測するため、大豆子実用高周波容量式水分計を利用する方法が報告されている⁹⁾、¹⁰⁾、稲わらに適應した事例はない。

そこで本報では、反転および土壤水分が八郎潟干拓地水田におけるコンバイン収穫時に排出された稲わらの乾燥に及ぼす影響と大豆子実用高周波容量式水分計を用いた稲わら水分の簡易推定法を検討したので報告する。

2. 試験方法

(1) 試験場所・土壤条件

秋田県大潟村秋田県農業公社水田2圃場(1.25ha区画、長辺150m×短辺75.5m、10mピッチで8本の本暗きよが施工されている)・細粒質斑鉄型グライ低地土、強粘質

(2) 供試機械

1) 供試機械：反転：トラクタ（ニューホランド、T4030SMC-4、出力56kW、低圧ツインタイヤ：前輪

*：秋田県農業試験場 秋田県秋田市雄和相川字源八沢 34-1

**：山形大学農学部 山形県鶴岡市若葉町 1-23

***：秋田県農業公社 秋田市土崎港北 2-17-70

650/45-22.5、後輪 750/50-30.5) + テッダ (ニューホランド, HFT158 型)、2) 集草: トラクタ (ニューホランド, T4030SMC-4, 出力 56kW、低圧ツインタイヤ: 前輪 650/45-22.5、後輪 750/50-30.5) + レーキ (JF-STOLL, R3350S 型)。

(3) 作業体系と試験区の設定

1) 作業体系: A、B 圃場はそれぞれ、2011 年 10 月 10 日、10 月 9 日に自脱型コンバインにより稲わら裁断長さ 20cm で水稻 (品種「めんこいな」) の収穫を行った。A 圃場は 10 月 13 日 13 時と 10 月 14 日 10 時 45 分に反転作業を行い、10 月 14 日 13 時に集草作業を行った。B 圃場は 10 月 13 日 11 時 20 分と 10 月 14 日 10 時に反転作業を行い、10 月 14 日 11 時に集草作業を行った。

2) 試験区の設定: A 圃場では圃場を長辺方向に 4 分割し (1 区約 30a)、集草の前日反転区、当日反転区、前日当日 2 回反転区、反転なし区の 4 区を設定した。B 圃場では圃場を長辺方向に 2 分割し (1 区約 60a)、集草の前日当日 2 回反転区と反転なし区を設定した。また、B 圃場では土壌水分、反転の有無と稲わら水分変動の関係を調査するために、土壌水分の異なる地点から継時的に土壌と稲わらを採取し、それぞれの水分を測定した。

(4) 調査項目

1) 調査時の気象条件: 圃場の地上高 20cm に温湿度記録

計 (T 社製、TR-74Ui 型) を設置し、気温及び相対湿度を測定した。風速、日照時間及び降雨はアメダス大瀧の時刻別データを用いた。

2) 稲わら水分及び土壌水分: 反転及び集草作業時と日中約 3 時間おきに 1 区 4 カ所から稲わらを 500~1200g 採取し、稲わら水分を測定した (80°C 通風、48 時間)。また、稲わらを採取した地点の土壌を深さ 0~5cm から採取し、水分を測定した (105°C 乾熱、24 時間)。

3) 大豆子実用高周波容量式水分計を用いた稲わら水分の簡易推定: 圃場で乾燥過程の稲わらを適時採取し (N=49)、10~15mm に細断し、付属の計量カップで計量後、大豆子実用高周波容量式水分計 (K 社製) で測定した。同一サンプルを 3 回測定し、読み値の平均値を算出した。水分計により測定した後、105°C 乾熱 (24 時間) 法で水分を測定した (図 6)。

3. 結果及び考察

(1) 調査時の気象条件と稲わら水分の変化

試験を行った 2011 年 10 月 13、14 日は両日も深夜、早朝から相対湿度が 90% 以上となり、朝露が稲わらに付着した状態であった。2 日間とも日中は晴れで、風速はおおむね 2m/s 以下で経過した。なお、12 日は 14 時に 10mm の降雨 (アメダス大瀧) があつた (図 1)。稲わら水分は両日

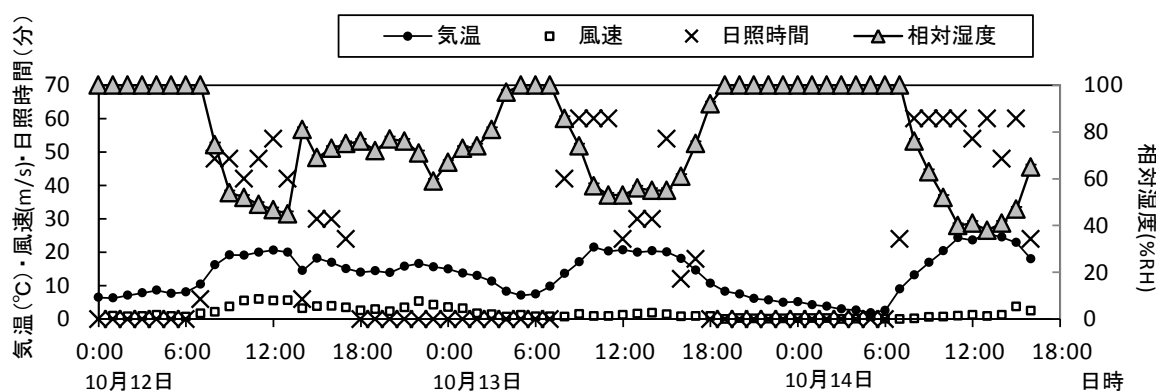


図 1 調査時の気象条件

注 1) 10 月 12 日 14 時に 10mm の降雨があつた

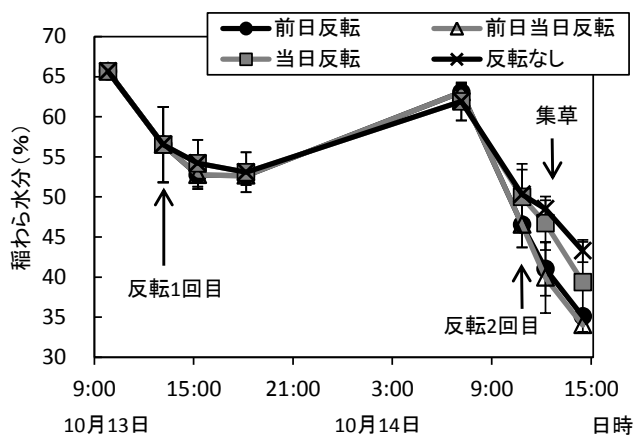


図 2 反転作業が稲わら水分に及ぼす影響 (A 圃場)

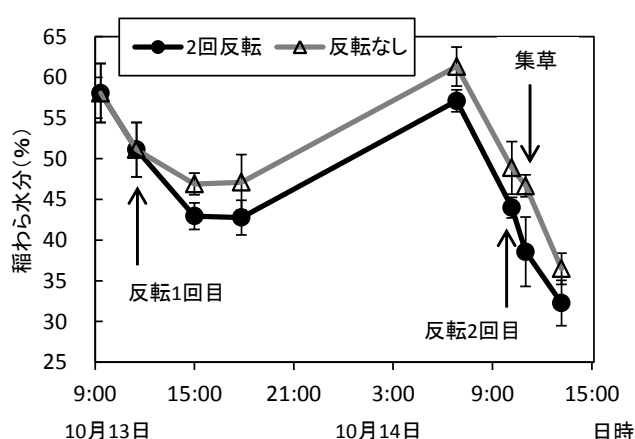


図 3 反転作業が稲わら水分に及ぼす影響 (B 圃場)

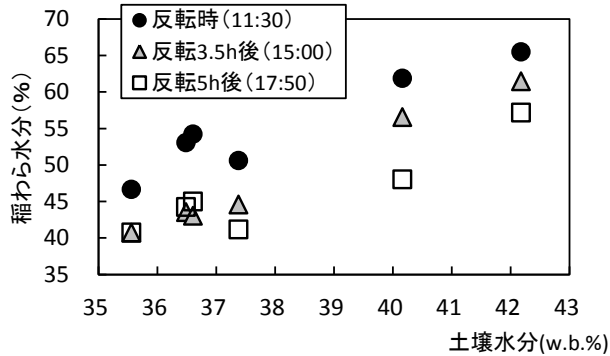


図4 土壌水分と稲わら水分の関係 (10月13日調査、反転あり、B圃場)

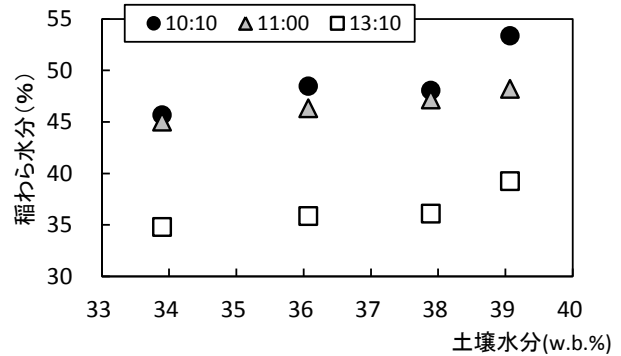


図5 土壌水分と稲わら水分の関係 (10月14日調査、反転なし、B圃場)

とも朝露により早朝 55%以上に上昇し、その後 15 時頃まで低下する推移を示した。10 月 14 日は 13 日に比べ、水分の低下速度が速かった。これは、14 日は日照時間が 13 日より 2 時間長く、9 時から 15 時までの平均気温が 2.6°C 高く、最小相対湿度が低かったことにより蒸発散位が高かったためと考えられ、糸川ら⁶⁾の報告と一致した。(図 2、3)。

(2) 反転が稲わらの乾燥に及ぼす影響

A、B の圃場では、いずれも反転作業により、稲わら水分が早く低下した。その低下速度は 1 時間あたり 1 ポイント程度あり、水稻収穫後の日本海側の気象条件でも反転は稲わらの乾燥を促進できる(図 2、3)。両圃場の反転の効果は同程度であったため、反転作業を早い時刻に行った B 圃場のほうが A 圃場より水分の低下が大きかった。また、前日に反転作業を行った区の稲わら水分は、朝露により上昇するが、朝露が乾燥すると前日反転を行っていない区より低かった。これらのことから、降雨のない条件では、限られた時間で効率的に大規模の稲わら収集作業を行うためには、反転作業後の乾燥時間を長く取るために前日に行うことも有効な手段といえる。さらに、2 回目の反転作業は、前日反転と同等の乾燥促進効果が認められるため、稲わら水分が 40%以上であれば複数回反転作業を行うことで乾燥促進が可能といえる。しかし、牧草の乾燥作業では、テッド、レーキによる反転、集草作業を増やすことにより乾物損失率が高くなることが指摘されていることから⁷⁾、反転回数に留意が必要である(図 2、3)。

(3) 土壌水分が稲わらの乾燥に及ぼす影響

土壌水分が高い地点から採取した稲わらは水分が高い傾向であった(10 月 13 日反転時 $r=0.948^{**}$ 、10 月 14 日 10:10 $r=0.863$)。また、反転作業の有無にかかわらず土壌水分の高い地点では、稲わら水分の低下も遅かった(図 4、5)。牧草収集の予乾体系では、土壌含水率が 30%程度までは土壌水分にかかわらず、牧草は乾燥することが報告されているが⁸⁾、本試験圃場である干拓地水田が、土壌水分が 30%以上での調査であるため稲わらが乾きにくくなり、異なる結果になった。また、水田圃場での稲わら水分の低下は、水稻収穫時の刈り高さや稲わらの土壌への付着の影響についても検討する必要があると考えられた。さらに八郎潟

干拓地での稲わら収集は、土壌水分が高い地点では矩形板沈下量が大きく、少ない踏圧回数でも作業機による踏圧深度が大きくなることが指摘されている¹¹⁾。土壌を乾かすことで稲わらは乾燥が促進され、圃場の損傷も軽減できることから、排水を促進させる補助暗きよの施工や溝切り等により水稻作付け期間中から土壌水分を低下させる管理が重要と考えられた(図 2、3、4、5)。

(4) 高周波容量式水分計による稲わら水分の簡易推定

図 6 に大豆子実用高周波容量式水分計で稲わら水分の推定法のフローを示した。高周波容量式水分計により測定した稲わら水分の読み値と稲わら水分には正の相関が認められた。両者には単回帰で $Y=3.761X-13.324$ ($R^2=0.8943$) が得られ、圃場で採取した稲わらの水分を簡易に推定できる精度を有している。本方式は、圃場で 1 地点の測定にかかる時間が 5 分程度と短く、付属の計量カップで約 9 g の稲わら(水分 0%換算)と比較的多量のサンプルを測定できることから、大区画圃場でも圃場全体の稲わら水分の把握し、作業計画の立案に活用可能といえる(図 7)。高周波容量式水分計を用いた大豆茎水分の推定では、品種や作期で測定値と水分の関係が異なることが指摘されている⁹⁾、¹⁰⁾。精度を高めるためには、稲わらの水分推定でも、精度を高めるために異なる品種や栽培法の条件下で検討する必要がある。

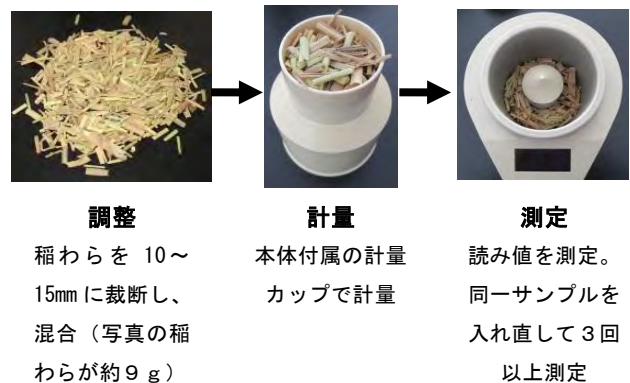


図6 大豆子実用高周波容量式水分計(K社製)を用いた稲わら水分の推定法フロー

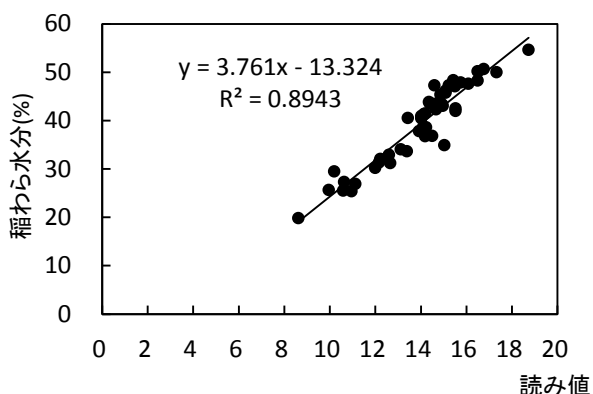


図7 高周波容量式水分計 (K社製) の読み値と稲わら水分の関係 (品種: めんこいな、n=49)

4. 摘要

本報では、八郎潟干拓地水田におけるコンバイン収穫時に排出された稲わらの乾燥に対する反転および土壤水分及ばす影響と大豆子実用高周波容量式水分計を用いた稲わら水分の簡易推定法を検討した。その結果、水稻収穫後の日本海側の気象条件でも反転は稲わらの乾燥を促進可能で、その乾燥促進効果は1時間あたり1ポイント程度であった。そのため、反転作業を早い時刻に行うことが乾燥促進に有効であった。また、前日に反転作業を行った稲わらの水分は、朝露により上昇するが、朝露が乾燥すると前日反転を行っていない場合より低かった。これらのことから、降雨のない条件では、限られた時間で効率的に大規模の稲わら収集作業を行うため、反転作業後の乾燥時間を長くできるように、前日の反転も有効な手段と考えられた。

土壤水分が高い地点から採取した稲わらは水分が高く、反転の有無にかかわらず稲わら水分の低下も遅かった。これらのことから稲わら水分を効率的に低下させるには、排水を促進させる補助暗きょの施工や溝切り等で水稻作付け期間中から土壤水分を低下させる管理が重要といえる。

大豆子実用高周波容量式水分計による稲わら水分の推定は、単回帰での推定が可能であり、圃場で迅速に稲わら水分を把握できることが明らかになった。その利用は、稲わら水分の状況把握と作業計画の策定に活用可能と考えられた。

エタノール原料としての稲わらはその適性と収集運搬低コスト化のために、より水分を低下させることが必要である。その方策として、反転作業と土壤を乾燥させることが有効である。反転作業では、反転後の乾燥時間をできるだけ長くとることが重要であり、土壤水分は水稻作付け期間中からの対策が有効な手段と考えられた。さらなる低コスト化には、高周波容量式水分計を用いた稲わら水分の推定法を活用し、稲わら水分の状況を把握しながら、作業計画の策定し、効率的収集体系を構築する必要があるといえる。

謝辞

本研究は、農林水産省「ソフトセルロース利活用技術確立事業」の助成を受けて実施しました。関係各位に御礼申し上げます。

参考文献

- 1) 佐藤敦・高橋正: 秋田県八郎潟干拓地における低湿重粘土の粘土組成、塩基状態と物理性とくにコンシステンシー、土肥誌、55、109-116、1984
- 2) 金子淳一: 八郎潟干拓地へドロにおける機械化適応性の向上と耕地化過程に関する研究、秋田農試研報、22、1977
- 3) 大谷隆二: 汎用コンバインを活用した稲わらの迅速乾燥・収集体系、農機誌、74(5)、348-352、2012
- 4) 日高靖之・野田崇啓・横江未央・橋保宏・川出哲生・梅田直円・栗原英治・嶋津光辰: 自脱コンバインと汎用飼料収穫機を利用した稲わら収集体系、農機誌、74(5)、343-347、2012
- 5) 齋藤雅憲・進藤勇人・片平光彦・加藤良成・山谷正治: 八郎潟干拓地水田における稲わら収集作業の特徴、農機東北支部報、59、2012
- 6) 糸川信弘・本田善文・馬場武志: 牧草類の圃場乾燥特性および乾燥過程の予測、日草誌 41(4)、336-344、1996
- 7) S. Elawad, H. Kumagai and K. Mitani: Measurement and Estimation of Dry Matter Losses during Hay and Silage Making in Field Curing, Grassland Science, 48(2)、110-119、2002
- 8) 増田治作・芝宏道・高木文男・橋本政雄・宮越秀一・日野亮・鈴木義則・谷口利策・松田昭美・沢田耕尚・日高操・犬童幸人・中村光義・山下義行: 牧草の乾燥生産に関する研究、九州農研報告、20(1、2)、1-111、1978
- 9) 北野順一・橋尚明・横山幸徳: 大豆の茎水分変化からみたコンバイン収穫適期の品種間差および茎水分の簡易推定法、三重科技セ農業研究部報告、29、25-32、2002
- 10) 星信幸: 高周波容量式水分計による大豆茎水分の簡易判定、東北農業研究、54、89-90、2001
- 11) 進藤勇人・中川進平・齋藤雅憲・片平光彦・加藤良成・山谷正治: 八郎潟干拓地水田における稲わら収集作業による土壤踏圧の実態、農機東北支部報、58、13-16、2012

近接リモートセンシングによるブタナ頭花の検出

鈴木由美子*・升本義丈*・小泉佑太**・田中勝千*・杉浦俊弘*

Detection of Flower Head of Haier ear's cat Using Proximal Remote Sensing

Yumiko SUZUKI*・Yoshitake MASUMOTO*・Yuta KOIZUMI**・Katsuyuki TANAKA*・Toshihiro SUGIURA*

Abstract

Hairy cat's ear (*Hypochoeris radicata* L.) is non-native species in Japan. It has been widely distributed throughout Tashirotai Farm, where its disturbance of the ecosystem is a severe issue. After investigation of vegetation, and we developed a classification method to distinguish flower head of *H. radicata* from grass (Japanese lawngrass and orchardgrass) using proximal remote sensing as the basic study for ascertaining the distribution area of *H. radicata*. RGB color images were used for the robust classification algorithm. By mowing, biomass of *H. radicata* has decreased 20%. However, population density of *H. radicata* shows an increase of 60%. Therefore, it is assumed that individual of *H. radicata* has been steadily increasing, and prompt measures should be taken to deal with the ever-increasing quantities of *H. radicata*. Classification between flower head of *H. radicata* and grass was performed with high accuracy by waveband value in red light region and the ratio of normalized light region red to normalized blue light region. Coverage of the flower head was estimated with high accuracy (correlation coefficient was 0.91) by color density index which was calculated by normalized light region red and blue.

[Keywords] remote sensing, image processing, non-native species

1. はじめに

青森県八甲田連峰の山麓に広がる田代平は、明治時代初年頃から牛馬の放牧により、ノシバ (*Zoysia japonica* Steud.) を主体とした半自然草地を形成・維持してきた¹⁾。1953年8月には、広大な牧野景観が評価されて十和田国立公園（現在、十和田八幡平国立公園）の一部に指定された。その後、放牧利用の拡大に伴い外来牧草を導入した人工草地が造成された。しかし、近年では放牧利用の減少に伴い、草地植生が荒廃し、非意図的導入種である外来植物が確認されるようになった。中でも、要注意外来生物であるブタナ (*Hypochoeris radicata* L.) (図1)²⁾ は、人工草地だけでなく半自然草地にも生育が確認され始めた³⁾。ブタナは、綿毛のついた種子(そう果)を飛ばすことで分布域を広範囲にするため、田代平における牧野景観の荒廃、競合による在来植物の駆逐および生態系基盤の損壊などを引き起こす可能性がある。そのため、ブタナの定着経路の特定および分布拡大の抑制を図るための前提として、ブタナの分布域の把握が必要不可欠となる。そこで、本研究では、広域性に優れ、情報取得技術および分析手法の向上により、生態系観測に応用され始めているリモートセンシングを用いて田代平におけるブタナの分布域の把握を目指した。本報では、ブタナの分布域把握の基礎研究として、ブタナの個体数密度および乾物重の生育情報を調査した後、近接リモートセンシングによるブタナ頭花の検出および頭花被度の推定を試みた。



図1 ブタナ

(出典：改訂版原色牧野大圖鑑)

2. 材料と方法

(1) 調査対象

青森県八甲田連峰の北部にある田代牧野畜産農業協同組合田代平牧場内（牧場面積：1658 ha、草地面積：141.0 ha）の採草地で、2011年6~9月に調査を実施した（1番草刈取り日：2011年7月12日）。調査対象草地の面積は7.8 ha、植生はノシバ、オーチャードグラス (*Dactylis glomerata* L.) のイネ科草を主体である。

*：北里大学獣医学部 青森県十和田市

**：北里大学大学院獣医学系研究科 青森県十和田市

(2) 植生調査

調査対象地の任意の箇所にコドラート (0.5×0.5m) を設置し、ブタナの被度および個体数 (株数) を測定した。本研究では、ブタナの個体数とコドラートの総面積をから、式1によりブタナの個体数密度を求めた⁴⁾。その後、コドラート内の植物を地際で刈取り、ブタナ、ノシバ、オーチャードグラス、シロクロバ、枯死部およびその他の植物 (雑草) に分類し、通風乾燥機で70°C 48時間以上乾燥させて、対象ごとの乾物現存量 (以下、現存量) を測定した⁴⁾。

$$D = \frac{n}{s} \quad \text{式1}$$

ここで、 D : 個体数密度

n : 個体数

s : 調査総面積

(3) 近接リモートセンシングによるブタナの頭花検出および頭花被度の推定

近接リモートセンシングには、RGB カラー画像を利用した。この画像の各画素には、可視光域の青 (B)、緑 (G) および赤 (R) の3バンド情報が含まれる。画像は、植生調査用のコドラート内を対象に、地上1.0mの高さからデジタルカメラ (S90, cannon) により取得した。この画像の地上分解能は、約2.89 mm²である。

頭花被度の推定では、まず、取得画像からブタナの頭花、ブタナの葉、その他の緑葉 (ノシバ、オーチャードグラス、シロクロバ、ブタナ以外の雑草)、枯死部・土壌の画素の3バンド情報すなわち画素情報を抽出した。抽出した画素情報は、画像撮影時の照度の違いにより、同一個体の同一部でも濃度値レベルが大きく変動するため、式2により正規化処理を施した⁵⁾。対象ごとの画素情報 (B, G および R) および正規化画素情報 (B', G' および R') を比較し、ブタナ頭花検出のためのしきい値を決定した。その後、決定したしきい値を基に、ブタナ頭花検出画像を作成した。

$$V'_i = \frac{V_i}{sum} \quad \text{式2}$$

ここで、 V' : 正規化画素情報

V : 画素情報

i : バンド番号 ($i=1-3$)

V_{sum} : 色濃度の合計 ($V_{sum} = V_1 + V_2 + V_3$)

頭花被度の推定では、まず画像中のブタナ頭花の画素数と画像の総画素数からブタナ頭花被度を求めた。その後、画像から平均画素情報および平均正規化画素情報を求め、ブタナ頭花被度と正規化画素情報または濃度指数とを比較し、頭花被度推定の可能性を検討した。

画素情報の抽出には自作の画像処理ソフトウェアを使用した。ソフトウェア開発環境として Microsoft Visual Studio 2010, プログラミング言語として C# を採用した。

3. 結果と考察

(1) ブタナの現存量および個体数密度

刈取りによるブタナの現存量および個体数密度の変動を確認するため、1番草 (6月から7月上旬) と2番草 (7月中旬から9月) に分けて検討した。現存量の割合は、1番草でブタナ34%、ノシバ25%、オーチャードグラス15%、2番草でブタナ11%、ノシバ28%、オーチャードグラス10%であった (図2)。刈取りによりブタナの現存量は、3分の1に減少した。この要因として、刈取り後は群落の下層付近にも光が届くようになり、匍匐茎を持ち、草高が比較的低いノシバの生育が促進され、ブタナの生育が抑制されたと推測する。一方、ブタナの個体数密度は、1番草81 count m²、2番草178 count m²となり、刈取りにより個体数密度が2倍以上となった (図3)。この要因として、ブタナの新しい個体の増加が考えられる。草地の刈取りは、ブタナの種子が散布された後に行われたため、上方に伸長したブタナやオーチャードグラスが刈取られることで、下層や群落の地際付近にも光が届くようになり、拡散したブタナの種子の発芽が促進されたと考えられる。

以上のことから、ブタナは刈取りにより現存量が少なくなったものの、適期以降 (種子の風散布以降) の刈取りであったため、ブタナの個体数を増加させたと推察する。ブタナの分布域拡大は、他の植物との光、養分および水分の競争を引き起こすため、在来種のノシバの生長の妨げ、飼料生産性の低下を招く要因となる。このことから、ブタナを抑制するためには、頭花の形成直後に刈取りを行うことが必要と考えられる。

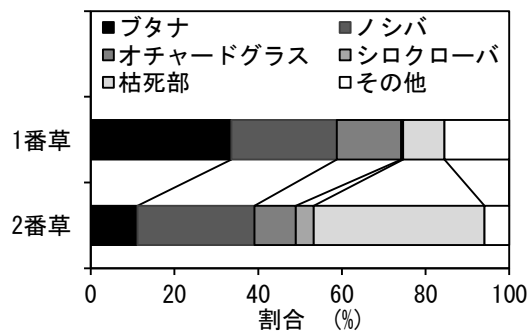


図2 1番草および2番草の草種別現存量割合

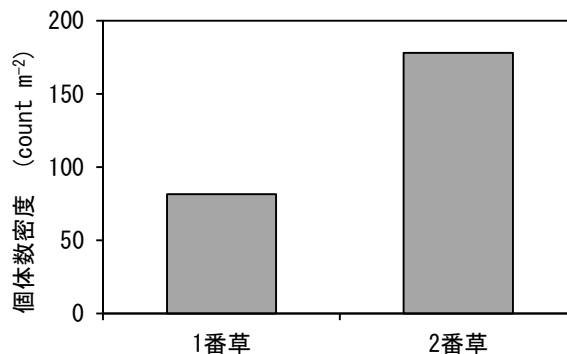


図3 1番草および2番草のブタナ個体数密度

(2) ブタナ頭花の検出

抽出した各対象の画素情報より、ブタナ頭花のBは58, Gは221, Rは225, その他の対象はBが73-132, Gが146-194, Rが120-158であった(図4)。全てのバンドで、ブタナ頭花はその他の対象と有意な差が確認された ($P < 0.05$)。しかし照度の変化を考慮すると、GおよびBではデータの重なりが見られた。それに対して、Rでは明確な差が見られたため、ブタナ頭花の検出しきい値としてRが適していると判断した。正規化画素情報より、ブタナ頭花のB'は0.11, G'は0.44, R'は0.45, その他の対象はB'が0.20-0.29, G'が0.24-0.45, R'が0.27-0.38であった(図5)。ブタナ頭花は、B'がその他の対象よりも低く、R'が高い値を示した。B'とR'の比は、ブタナが3.97, その他が0.93-1.67と明確な差が確認され($P < 0.05$) (表1)、B'とR'の比もブタナ頭花検出のためのしきい値として適していると判断した。2つのしきい値 ($R=200, R'/B'=2$) を取得画像に適用することで、ブタナ頭花は正確に検出でき(図6)、本手法によるブタナ頭花検出の可能性が示された。但し、本手法は高い地上分解能の画像にのみ適用可能であると考えられるため、異なる分解能の画像を扱う場合は、再度しきい値を検討する必要がある。

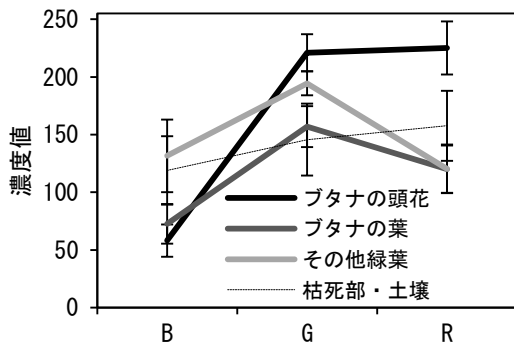


図4 各対象の画素情報

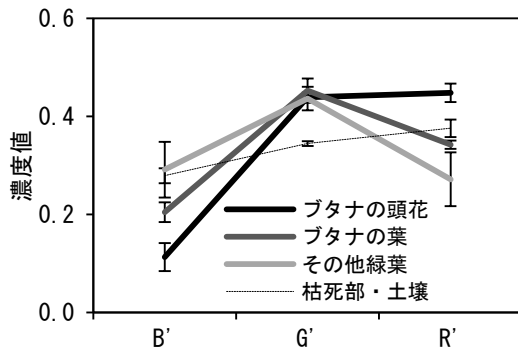
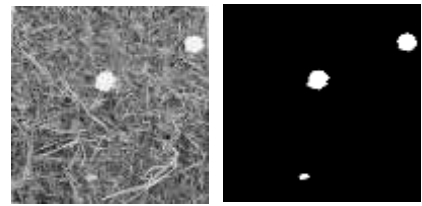


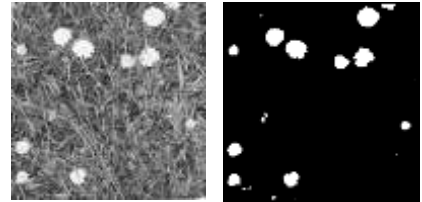
図5 各対象の正規化画素情報

表1 各対象のB' と R' の比

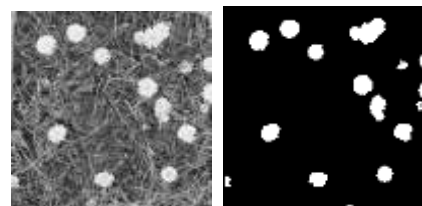
	R' / B'
ブタナ頭花	3.97
ブタナの葉	1.67
その他緑葉	0.93
枯死部・土壌	1.35



(a) 検出前画像と検出画像(頭花被度:1.8%)



(b) 検出前画像と検出画像(頭花被度:5.6%)



(c) 検出前画像と検出画像(頭花被度:8.4%)

図6 ブタナ頭花検出画像の例

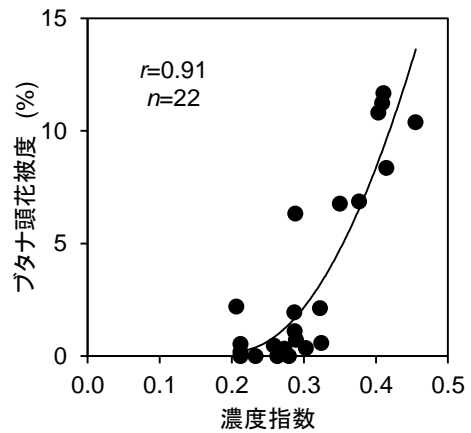


図7 濃度指数とブタナ頭花被度との関係

(3) ブタナ被度の推定

取得した画像(面積:0.25 m²)の頭花被度は、0-12%であった。頭花被度と平均正規化画素情報の関係は、B'では頭花被度の増加に伴い画素情報は減少し、相関係数(r)は-0.91であった。G'およびR'は、頭花被度の増加に伴い画素情報の増加し、 r は0.83および0.85であった。全ての画素情報で高い相関係数が得られたものの、近似線から外れた値がいくつか見られた。安定性に優れた推定手法確立のため、相関係数が高いB'およびR'から濃度指数(濃度指数= $(R'-B')/(B'+R')$)を算出し、頭花被度と比較したところ、 r は0.91で高い相関関係が確認された(図7)。よって、ブタナの頭花被度はB'およびR'から算出した濃度指数により、概ね把握できると考えられた。

4. まとめ

本研究では、十和田八幡平国立公園内の田代平牧場に繁茂する要注意外来植物ブタナの分布域を推定するため、ブタナの生育状況の調査、および近接リモートセンシングによるブタナ頭花の検出・頭花被度の推定を試みた。採草地でのブタナの現存量比は、刈取りにより約20%減少した。しかし、刈取りはブタナの種子が散布された後に行われたため、刈取り後の個体数は約60%増加した。そのため、牧草の刈取りをブタナの種子散布前に行う必要があると考えられた。近接リモートセンシングによるブタナ頭花の検出では、ブタナ頭花とその他の対象に有意な差が見られたRおよびR'とB'の比をしきい値とした。これらのしきい値を用いることで、ブタナ頭花は正確に検出することができた。また、0.25 m²のコドラート内のブタナ頭花被度とR'とB'により算出した濃度指数との相関係数は0.91となり、強い相関関係が確認できた。よって、リモートセンシングにより取得した画像からブタナの分布域推定の可能性が示唆された。但し、取得する画像の地上分解能が異なる場合は、検出および推定手法の再検討が必要となる。

参考文献

- 1) 吉井義次, 吉岡邦二, 1941. 牧野の生態学的研究 (3) - 田代放牧地一, 生態学研究 7 (2), 74-88.
- 2) 牧野富太郎 (編), 1996. 改訂版原色牧野大圖鑑 (合弁花・離弁花編), 北隆館, 東京都, 113
- 3) 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, 2010. 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, P2.
- 4) 岡本智伸, 2004. 草地科学実験・調査法, 9 草地植生の組成と構造に関する調査法 (日本草地学会編), 全国農村教育協会, 192.
- 5) 高木幹雄, 下田陽久 (監修), 2004. 新編画像解析ハンドブック 第II部 認識 1. 分類, 財団法人東京大学出版会, 1564.

田代平地域におけるブタナ分布域推定のための草種判別

小泉佑太*・田中勝千**・鈴木由美子**・杉浦俊弘**・皆川秀夫**・升本義丈**

Plant Classification for Estimating Spatial Distribution of Hairy Cat't Ear in Tashirotai Area

Yuta KOIZUMI*・Katsuyuki TANAKA**・Yumiko SUZUKI**・Toshihiro SUGIURA**・

Hideo MINAGAWA**・Yoshitake MASUMOTO**

Abstract

Hairy cat's ear (*Hypochoeris radicata* L.; adventive Species) has been distributed in Towada-hachimantai National Park. We developed a classification method to discriminate between *H. radicata* and grass (Japanese lawngrass and orchardgrass) using hyperspectral imaging as the basic study for estimating the distribution area of *H. radicata* by unmixing method. The spectra of *H. radicata* and grass vary in regions of green, red and near infrared. Classification success rates ascertained by linear discriminant analysis using forward selection method were 98%. Therefore, classification was performed with high accuracy.

[Keywords] exotic plant, hairy cat's ear, hyperspectral imaging, plant classification

1. はじめに

1936年、十和田湖と八甲田連邦（八甲田山）の景観が際立っていたことから十和田国立公園として指定された。その後、秋田・岩手両県にまたがる八幡平を統合して十和田八幡平国立公園として現在に至っている¹⁾。八甲田山の北東部に位置する田代平は、明治初年頃から牛馬の放牧に利用されてきたことから、ノシバ (*Zoysia japonica* Steud.) 主体の天然シバ草が維持されてきた。田代平が国立公園の指定地域に含まれることになったのは天然シバ草の牧野景観が評価されたからである^{2) 3)}。

1960年代には外来牧草を導入した人工草が造成され、日本短角種の放牧利用が拡大した。しかし、牛肉輸入自由化を契機に2,000年以降人工草地における放牧利用が減少したことで草地生態系の維持が困難になり、ブタナ (*Hypochoeris radicata* L.) などの外来植物が繁殖しやすい環境となった³⁾。ブタナは、キク科エゾコウゾリナ属の多年草で、葉は放射状に広がるロゼット葉である (図1)。繁殖方法には、種子の風散布と根茎による栄養繁殖の2種類ある。また、ブタナは1940年代に全国的にその分布が拡大したことにより、外来生物法により要注外来生物に指定された。ブタナが牧草地に繁茂すると牧草の生長抑制することが知られている⁴⁾ ため、ブタナの生息地拡大は牧野景観を乱すことや草地生態系へ悪

影響をおよぼす可能性がある。

本研究では、衛星リモートセンシングを用いたブタナ分布域推定方法を開発することでブタナ抑制のための資料を提供することをねらいとした。しかし、衛星画像での分布域推定では空間分解能が低いため、一つの画素内部に複数のカテゴリーのエンドメンバーが存在するミクセル⁵⁾解析が課題となる。そのため本報では、ブタナと現地植生のエンドメンバーを取得するために、ブタナと現地植生の判別手法を開発することを目的とした。

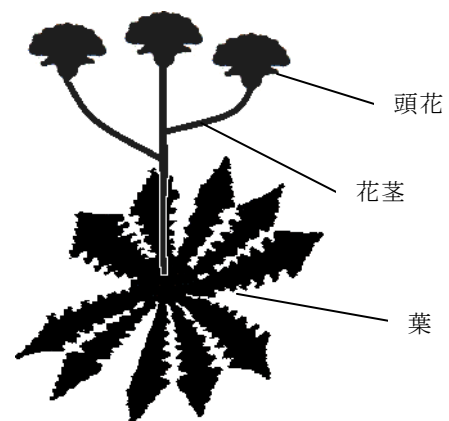


図1. ブタナの模式図

* : 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

2. 材料および方法

(1) 調査対象

田代平牧野畜産農業協同組合が管理する田代平牧場内のノシバとオーチャードグラス (*Dactylis glomerata* L.) 主体の面積 7.6 ha の採草地 (標高約 600 m) を対象に、2011 年 6 月から 9 月にかけて現地調査を実施した。今年度、組合員によって一番草は 7 月 13 日に、二番草は 9 月以降に刈り取られた。

(2) ハイパースペクトルカメラによるブタナとイネ科牧草のスペクトル情報の取得

供試したハイパースペクトルカメラ (ImSpector V10, Specim) は、観測波長域 400–1000 nm (60 バンド)、波長分解能 6 nm である。供試カメラはラインセンサとして機能するため、対象物全体の画像を取得するためには、カメラの光軸または撮影対象を移動させる必要がある。そこで本研究では、センシングシステム⁶⁾を用いてハイパースペクトル画像を取得することとした (図 2)。撮影に当たり、イネ科牧草のみの場所からブタナが優占する場所までを数段階に変えて測定場所を選び、コードラート (0.5 m×0.5 m) を置いて撮影対象全体がセンシングできるようにセンシングシステムを設置した。撮影時のカメラの高さは約 1.0 m、電動雲台の回転速度は 1 degree s⁻¹、レンズの視野角 71.6° であるため、取得画像の地上分解能は 1.3 mm×1.0 mm となった。

ブタナとイネ科牧草の判別モデル開発のため、取得画像からそれぞれの分光スペクトルデータを、専用のソフトウェア^{6) 7)}により抽出した。データ数は、ブタナとイネ科牧草のどちらも 200 画素とした。抽出したデータは、画像撮影時の光環境によって同一個体の同一部分であっても受光強度が変動するため、正規化処理を施した⁷⁾。

正規化した受光強度は、判別モデルの作成用データとモデル評価用データに分け、それぞれ 100 画素に二分した。ブタナとイネ科牧草の判別モデルは、変数増加法 (偏 F 値=4) を用いた線形判別分析により作成した。線形判別関数の評価として判別率を算出した (式 1)。なお、本研究は線形判別分析に Microsoft Excel のアドインソフト MULCEL を用いた。

$$D = A/n \times 100 \quad \text{式 1}$$

D : 判別率 (%)

A : 正答数

n : データ数



図 2. センシングシステムの模式図

(3) 水分測定

コードラート内の植物を地際で刈取り、ブタナ、イネ科牧草 (ノシバ、オーチャードグラス)、枯死部およびその他 (マメ科草、雑草) に分けた。その後、ブタナおよびイネ科牧草は通風乾燥機により、75°C で 48 時間以上乾燥させ、水分を式 2 により算出した⁸⁾。データ数は、ブタナ 47 カ所、イネ科牧草 86 カ所である。

$$M(w.b.) = (W_1 - W_2)/(W_1 - W_0) \times 100 \quad \text{式 2}$$

M : 水分 (%)

W_0 : 秤量缶の重量 (g)

W_1 : 乾燥前の試料 + 秤量缶重量 (g)

W_2 : 乾燥後の試料 + 秤量缶重量 (g)

3. 結果と考察

(1) ブタナとイネ科牧草の水分

ブタナの平均水分は 85.1% (標準偏差: 13.4%) で、イネ科牧草の 71.5% (標準偏差: 6.9%) と比べ高く、両者には有意な差がみられた ($P < 0.01$) (図 3)。ブタナは葉に無数の毛を有していることから、乾燥地でも生育できるように体内に水分を多く蓄え、さらに毛茸によって水分を保有しやすい構造となっていると考えられる。

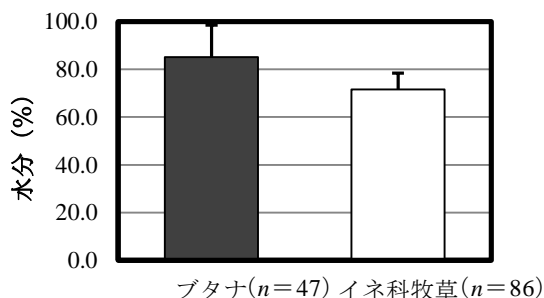


図 3. ブタナとイネ科牧草の含水率

(2) ブタナとイネ科牧草の分光スペクトル特性

ブタナの葉の分光スペクトル特性は、イネ科牧草と同様に、一般的な植物の分光スペクトル特性を示した⁹⁾。しかし、イネ科牧草に比べてブタナの受光強度は、500–700 nm (緑色域および赤色域) で高く、700 nm 以降 (近赤外域) で低い値を示した (図 4)。この 2 つの領域は、クロロフィル濃度に関係している⁹⁾ ため、ブタナとイネ科牧草の受光強度の差は、クロロフィルなどの光合成色素濃度の違いによって現れたと考えられる。

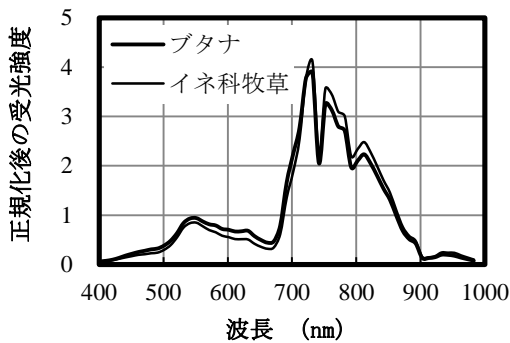


図4, ブタナとイネ科牧草の分光スペクトル特性

表 1, ブタナとイネ科牧草の判別結果

対象	サンプル数	判別率 (%)	総合判別率 (%)
ブタナ	100	100	98
イネ科牧草	100	96	

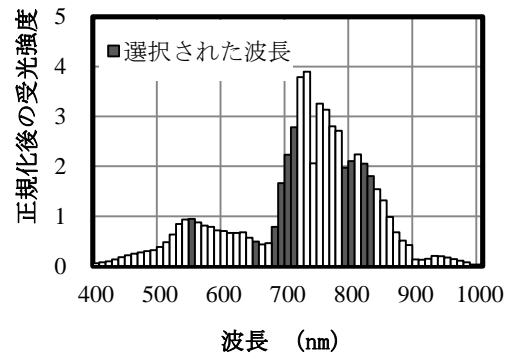


図5, 変数増加法により選択された波長バンド

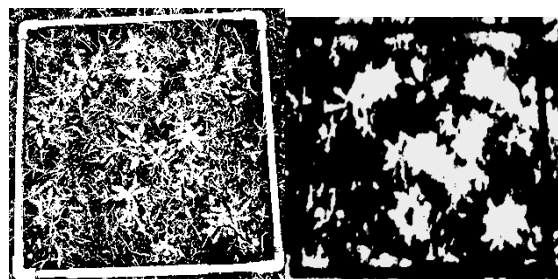
(3) ブタナとイネ科牧草の判別

線形判別関数の検証時判別率は、ブタナが 100%、イネ科牧草が 96% で、総合判別率が 98% であった (表 1)。変数増加法により選択された波長バンドは、10 バンドあり、それらはカロチノイドの吸光領域 (551 nm)、クロロフィル吸光領域 (赤色領域)、レッドエッジ周辺のクロロフィル濃度と高い相関がある領域 (690–710 nm)、クロロフィル吸光領域と反対の動きをする領域 (800–900 nm)^{10) 11)} で選択された (図 5)。

選択された領域は、ブタナとイネ科牧草の受光強度 (図 4) に差異がみられた領域と同様であった。そのため、ブタナとイネ科牧草にはクロロフィルやカロチノイドなど光合成色素の濃度の違いによって判別できると考えられる。また、ブタナとイネ科牧草で葉の水分に有意な差があり、植物の水分は 800 nm と 680 nm の反射率比と高い相関がある¹¹⁾ ため、水分による違いも反映していると考えられる。

線形判別関数をハイパースペクトル画像に適用して作成した判別画像は、ブタナとイネ科牧草が重なる領域や影の領域で誤判別がみられたものの、ブタナとイネ科牧草は概ね正しく判別されていた (図 6)。誤判別が生じた要因として、異なる草種の葉が重なりスペクトルが混合したことが考えられる。すなわちミクセル問題が生じているためであると言える。

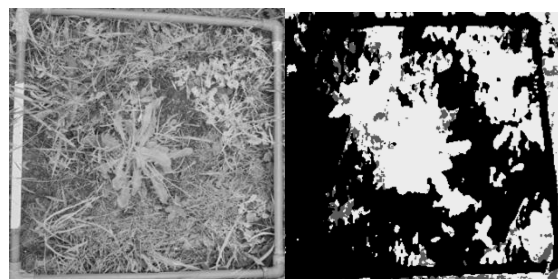
(a) ブタナ優占画像



元画像

判別画像

(b) ブタナとイネ科牧草の混在画像



元画像

判別画像

図 6, ブタナとイネ科牧草の判別画像

(白: ブタナ, 灰色: イネ科牧草, 黒: その他)

4. まとめ

十和田八幡平国立公園内にある田代平に繁茂する要注意外来生物であるブタナの分布域推定のために、ブタナの水分およびブタナの葉の分光スペクトル特性を把握した後、ブタナとイネ科牧草の草種判別の可能性を検討した。ブタナの平均水分は85.1%であり、イネ科牧草と有意な差があった ($P < 0.01$)。ブタナの葉の分光スペクトル特性は、イネ科牧草と比べ緑色領域と赤色領域で高く、近赤外域で低い値であった。ブタナとイネ科牧草の判別では、カロチノイドやクロロフィルなど光合成色素および水分に関わる領域の波長バンドが選択された。これらの波長バンドから作成された線形判別関数は、総合判別率98%と高精度であった。このことからブタナとイネ科牧草の判別には光合成色素濃度や葉水分の違いで判別できると考えられる。

今後広範囲を対象とした分布域推定を目指すためミクセル問題を解決することが課題となる。そのため、選択された波長帯を用いたミクセル解析の検討を進めたい。また、今回用いた変数増加法による波長選択では、多重共線性の問題が解決されていないため主成分分析等を用いた判別手法での検討が必要と考える。

5. 謝辞

本研究の遂行に当たって、田代平牧場を提供して頂いた田代平牧野畜産農業協同組合の皆様にご心よりお礼申し上げます。また、有益なご助言を賜りました本学大学院獣医畜産学研究所生物生産環境学修士課程緑地環境学修士の十亀彩様に記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 環境省編, 2011. 十和田八幡平国立公園 (十和田・八甲田地域) の公園区域及び公園計画の変更に関する意見の募集 (パブリックコメント) について, http://www.env.go.jp/press/file_view.php?serial=3866&hou_id=3587. 2011年7月20日参照.
- 2) 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.
- 3) Aya Sogame, Toshihiro Sugiura, Kumiko Ogawa, Kazuhiro Kato, Keisuke Kumada, Ayaka Saito, Mitsuhi Baba, 2012. Growth characteristics and control measures for *Hypochoeris radicata* L. on the Zoysita-type grassland, Proceeding of the 4th Japan-China-Korea Grassland Conference, 96-97.
- 4) 国立環境研究所編, 2011. 侵入生物 DB, <http://www.nies.go.jp/biodiversity/invasive/DB/detail/80570.html>. 2011年11月21日参照.
- 5) 北本朝展, 高木幹雄, 1995. ミクセルの存在する場合の混合分布推定, 電子情報通信学会技術報告, PRU 95-202, 33-40.
- 6) 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開発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.
- 7) 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.
- 8) 自給飼料品質評価研究会編, 2001. 改訂 粗飼料の品質評価ガイドブック, 社団法人日本草地畜産種子協会, 7.
- 9) Hoffer.R.M, 1978. Biological and physical considerations in applying computer-aided analysis techniques to remote sensor data. In Remote Sensing: The quantitative approach, McGraw-Hill, Inc., New York, 227-289.
- 10) 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.
- 11) 伊藤健吾, 江塚友康, 大槻恭一, 神近放男, 2003. 反射スペクトルによる芝の塩・水ストレス診断, 農業気象, 59(2), 199-204.

クロロフィル蛍光を用いた水稻の塩ストレス評価

渡邊翔太*・田中勝千**・皆川秀夫**・杉浦俊弘**・鈴木由美子**・岩崎 悠*・中坪あゆみ**

Evaluation of Salt Stress on paddy rice with Method of Chlorophyll Fluorescence

Shota WATANABE*・Katsuyuki TANAKA**・Hideo MINAGAWA**・Toshihiro SUGIURA**

Yumiko SUZUKI**・Yu IWASAKI*・Ayumi NAKATSUBO**

Abstract

We evaluated salt stress on paddy rice from aspects of growth and photosynthetic activity. The paddy rice growth at salt concentration more than 1,000 ppm was significantly decreased than that of the control after transplantation. Photosynthetic activity was effected by salt stress in the fluorescence (F_s , F_m') and in the quantum yield of open photosystem II (PS II) under actinic illumination (F_v'/F_m'). The low fluorescence (F_s , F_m') in vegetative stage was suggested that there was some possibility of being early warning system and wide area monitoring to extreme salt stress on paddy rice. In addition, the low F_v'/F_m' in reproductive stage was suggested that there was some possibility of being early warning system and wide area monitoring more than vegetative stage because it would grasp of the salt stress include 1,000 ppm.

[Keywords] chlorophyll Fluorescence, chlorophyll intensity, paddy rice, photosynthetic activity, salt stress

1. はじめに

平成 23 年 3 月 11 日、東北地方太平洋沖地震による津波で、青森県では 76 ha の水田が冠水し、土壌中に塩類が集積した¹⁾。水稻は塩耐性が低いため、生育限界 (1,000 ppm 以上の塩濃度)²⁾ では、生育量の低下³⁾ 並びに蒸散速度の低下⁴⁾ という影響が生じるとされる。蒸散は大気中の二酸化炭素を取り入れる植物の生理反応であり、植物が行う光合成と密接な関係がある。そのため、光合成系に生じる影響と草丈・茎径などの生育量を同時に把握することができれば、衛星画像や空撮画像を利用した高位リモートセンシングによって塩ストレスを受けた水稻の検出と迅速な診断方法の確立の一助になると考える。本研究では基礎実験として土壌中の初期塩 (NaCl) 濃度が水稻の生育量と光合成系のどの部位に影響を及ぼしているのかを明らかにすることを目的とした。

2. 材料および方法

(1) ポット培地と初期塩 (NaCl) 濃度の設定

土壌として「黒ボク土」を選定した。目開き 4.75mm の篩を用い、夾雑物を取り除き、粒径を整えたものを供試土壌とした。供試土壌に塩濃度を調整した溶液を散布した後、1/5,000 a ワグネルポットに 3.0 L 充填した。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で栽培された主力品種の一つである「まっしぐら」の成苗 (播種後 65 日) 4 株を移植し、ポットの約 8 合目まで灌水させた。施肥は N:P:K=8:14:8 (kg/10 a) を基準量とし、そ

のうちの 7 割を基肥として供試土壌に混ぜ込んだ。残りの 3 割は播種後 103 日 (7 月 25 日) に追肥として用いた。塩濃度については水稻の生育限界である 1,000 ppm を基準に、0 ppm (対照区)、500 ppm、1,000 ppm、2,000 ppm および 4,000 ppm の 5 条件を設定した。各条件ともに 3 連とし、合計 15 ポットを用意した。実験期間は平成 23 年 6 月から 10 月までの約 5 ヶ月間とした。

(2) 測定項目

生育量 (草丈、茎径)、蛍光強度 (F_s , F_m')、光合成指標 (F_v'/F_m') を測定項目とした。光合成蒸散測定装置 (Li-Cor, Li-6400) を用いて蛍光強度を求め、得られた蛍光強度から光合成指標 (F_v'/F_m') を算出した。

蛍光強度の測定では励起光 $500 \mu\text{molquanta m}^{-2}\text{s}^{-1}$ 、飽和光 $1,800 \mu\text{molquanta m}^{-2}\text{s}^{-1}$ とした。また、各項目の測定値には各条件の平均値を代表値として用いた。

(3) パルス変調クロロフィル蛍光測定

植物は吸収した光エネルギーを用いて光合成を行うが、吸収した光エネルギーの全てを光合成に利用できるわけではない。余剰エネルギーは熱として捨てられる (熱放散) か、吸収した光よりも波長が長い光 (クロロフィル蛍光) として捨てられる (再発光される)⁵⁾ (図 1)。一般的にクロロフィル蛍光は 680 nm 付近にピークをもつ赤色光であるといわれている⁶⁾。

* : 北里大学大学院獣医学系研究科 青森県十和田市東二十三番町 35-1

** : 北里大学獣医学部 青森県十和田市東二十三番町 35-1

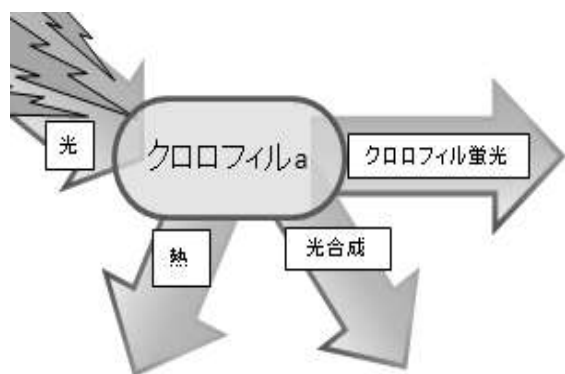


図1. クロロフィル蛍光発光の概念図
(大政ら 2007⁶⁾ より引用・改変)

図2にクロロフィル蛍光測定における蛍光強度の典型例を示す⁶⁾。光化学系の状態を全て酸化状態(暗反応)とした時、蛍光強度は0となる。酸化状態に測定光を照射した時の蛍光強度を F_0 と呼ぶ。この際、飽和光を当て、電子受容体を全て還元状態とすると、最大蛍光強度(F_m)が得られる。その後、励起光を当て、光合成速度を定常状態(明反応)に導いた状態で測定光を照射した時の蛍光強度を F_s と呼ぶ。ここで再度飽和光を当てると、蛍光強度が増加する(F_m')。ただし、 F_m' は F_m ほど高い値を示さない。 F_m と F_m' の比は非光化学消光(qN : non-photochemical quenching)すなわち、熱放散によるエネルギー消尽の比率を示し、 F_m' と F_s との比は光化学消光(qP : photochemical quenching)すなわち光化学系II以降にあるエネルギーの比率を示す。

最後に励起光を消すと、蛍光は大きく低下し(F_0')、再び F_0 に戻る。これらの蛍光強度を用いて光合成指標(F_v/F_m')を(1)式より算出する。 F_v/F_m' はある一定の励起光が当たっている状態の量子収率で、光化学系IIの量子収率を示す⁷⁾。

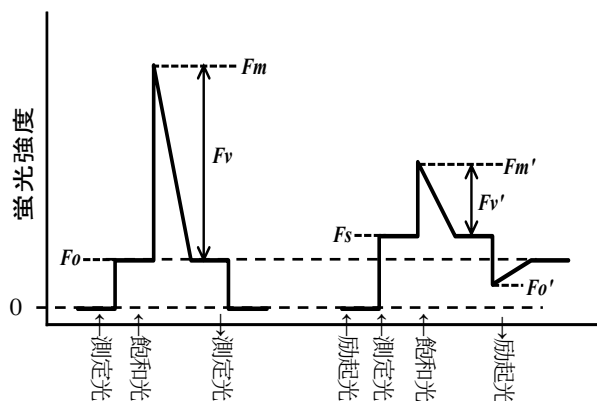


図2. 蛍光強度の典型例
(村岡ら 2003⁶⁾より引用・改変)

$$\frac{F_v'}{F_m'} = \frac{F_m' - F_s}{F_m'} \dots (1)$$

3. 結果および考察

(1) 生育量の評価

対照区と比べて塩濃度が高いほど生育量(草丈, 茎径)は小さく、播種後89日(移植後24日)に対照区とその他の区で有意な差が確認された($P < 0.05$) (図3, 図4)。これは根からのNaイオンおよびClイオンの吸収に伴う塩ストレスにより、根の発根ならびに伸長が抑制されたことが要因と考えられる⁸⁾。

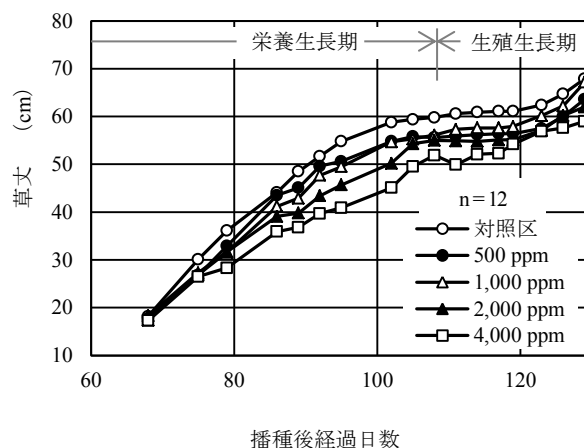


図3. 播種後経過日数毎の草丈の変化

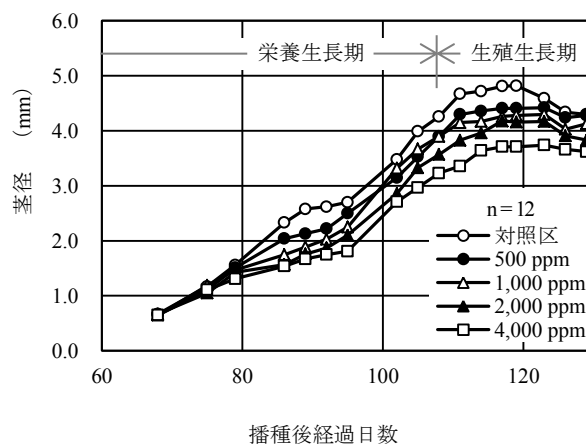


図4. 播種後経過日数毎の茎径の変化

(2) 蛍光強度 (F_s , F_m') による塩ストレスの評価

測定期間中、蛍光強度 F_s 変化から塩ストレスを受けた水稻は放出されるクロロフィル蛍光の量が対照区に比べて低下傾向にあることが読みとれる。とくに、栄養生長期に1,000 ppm以上の塩濃度で対照区よりも明らかに小さい状態が確認された。また、2,000 および4,000 ppmにおいては有意な差が確認された ($P < 0.05$) (図5)。なお、500 ppmでは対照区と比べ F_s の値に多少の変動が見られたが有意な差は確認されなかった。そのため、図5以降から割愛した。

蛍光強度 F_m' においても F_s と同様の傾向を示したが、対照区と1,000 ppm以上の塩濃度では有意な差がみられなかった (図6)。

F_s は通常環境においてクロロフィル蛍光として放出される量を示し、 F_m' は蛍光収率に影響を与える2つ(光化学的要因および非光化学的要因)のうち、非光化学消光の影響を示す⁷⁾。対照区に比

べて、 F_m' が低下することは、吸収した光エネルギーが光合成に利用されずに熱放散として放出されていることを示す。これが、蛍光強度 F_s の低下の原因となっていると推察する。 F_s の変化から、1,000 ppm以上の塩濃度では栄養生長期にクロロフィル蛍光として放出される量が低下していると推察されたため、この時期に水稻の分光反射スペクトルを測定した場合、680 nmの赤色領域において影響の有無を観察できる可能性がある。

(3) 光合成指標 (F_v'/F_m') による塩ストレスの評価

図7に、生殖生長期の F_v'/F_m' の推移を示す。今回の実験結果では、 F_v'/F_m' は播種後114日目では増加傾向を示すこと、また、4,000 ppmを除いて、それ以降では減少傾向を示すことが分かる。特に、生殖生長期に1,000 ppm以上の塩濃度で対照区よりも有意に減少した ($P < 0.05$)。

F_v'/F_m' は光化学系IIの反応中心が利用できる光エネルギーの割合(量子収率)に関連しているため、その減少は反応中心における量子収率が低下していることを示す。このことは、結果として熱放散量の増加となり、すなわち、植物が周辺集光装置内の色素(キサントフィル類)の性質を変化(脱エポキシ化およびエポキシ化)させ、反応中心へのエネルギー供給を停止し、余分な光エネルギーを熱として積極的に捨てていることに相当する⁹⁾。キサントフィル色素の脱エポキシ化とエポキシ化は531 nmにおける葉面反射率の変動に関わる⁹⁾。

光化学系IIの反応中心はP680と呼ばれる波長680 nmを特異吸収する部位である。反応中心の量子収率が変化(低下)することは、680 nmの赤色光の吸収量が変化していることを示す。したがって、塩ストレスを受けた水稻の分光反射スペクトルは赤色領域において変化が現れる可能性が高いと思われる。同様に、 F_v'/F_m' の変化から1,000 ppm以上の塩濃度では、生殖生長期にキサントフィル色素の脱エポキシ化とエポキシ化による光合成量の低下が生じていると推察され、この時期に水稻の分光反射スペクトルを測定した場合、531 nmの緑色領域において影響の有無を観察できる可能性がある。

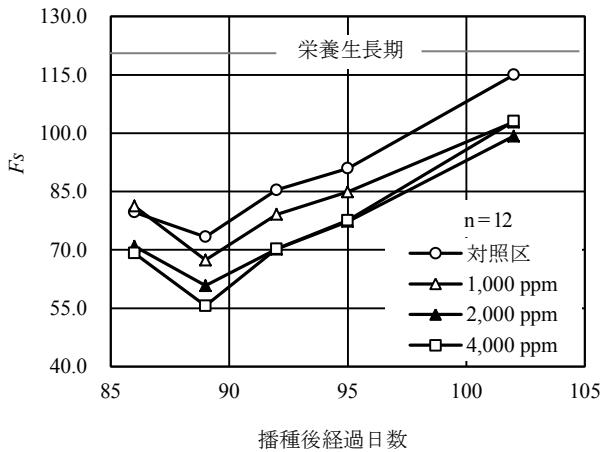


図5, 播種後経過日数毎の F_s の変化

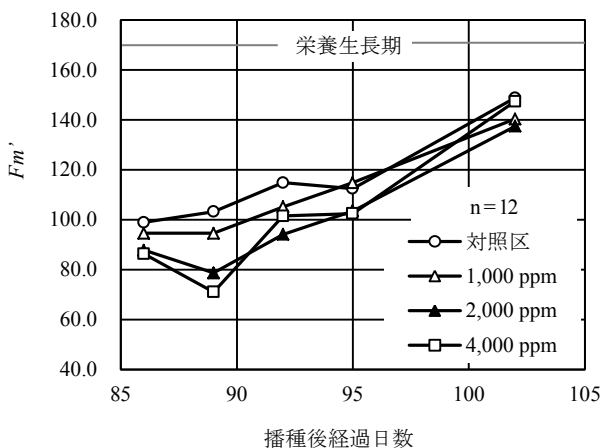


図6, 播種後経過日数毎の F_m' の変化

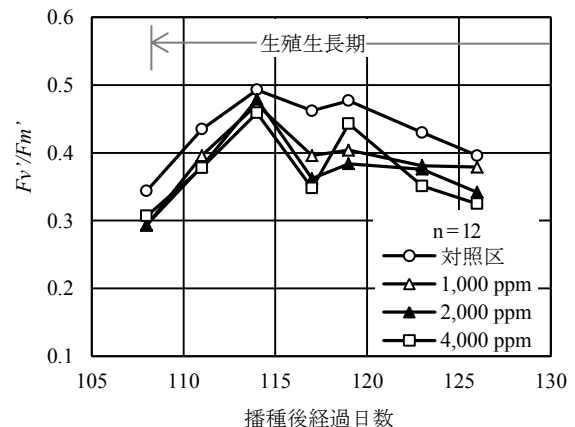


図7, 播種後経過日数毎の F_v'/F_m' の変化

**TOHOKU BRANCH REPORT
OF
THE JAPANESE SOCIETY OF AGRICULTURAL MACHINERY**

CONTENTS

RESEARCH PAPERS

WU , Y., KATAHIRA ,M., NATSUGA , M., YOSHIDA , N. :	
Constituent Content Determination of Goat Raw Milk Using Near-Infrared Spectroscopy (Part 2)	3
SHITARA , T., KATAHIRA , M., NATSUGA , M. :	
The Diagnosis of Concrete Deterioration in Infrastructures Using Near-Infrared Spectroscopy (Part 1)	7
SUZUKI , M., SHITARA , T., KATAHIRA , M., NATSUGA , M. :	
The Diagnosis of Concrete Deterioration in Infrastructures Using Near-Infrared Spectroscopy (Part 2)	13
SHITARA , T., SUZUKI , M., , KATAHIRA , M., NATSUGA , M. :	
The Diagnosis of Concrete Deterioration in Infrastructures Using Near-Infrared Spectroscopy (Part 3)	17
NOGAMI , N., TAKAHASHI ,T., ZHANG, S. :	
Three-Dimensional Range-Finding of the Cultivated Fruit Vegetables with Stereovision and the KINECT Sensor	23
KINSAMBWE , T., KATAHIRA , M., NATSUGA , M. :	
Effect of the Narrow Ridge - Direct Sowing Technique of Saving Labor in Green Soybean (Edamame) Production	27
GOTO , K., NAGASAWA , K., KATSUMI , N., HARADA , H. :	
Development of Safflower Petals Harvester	31
KANAI , G., SHIBUYA , Y., AMAHA , K., HONDA , Y. :	
Introducing Rapeseed to Abandoned Field in <i>Tohoku</i> area	35
SAITO , M., SHINDO , H., KATAHIRA , M., KATO , R., YAMAYA , S. :	
Characteristics of Rice Straw Collection System on Reclaimed Heavy Clay Paddy-Rice fields in Hachirogata	39
SHINDO , H., SAITO , M., KATAHIRA , M., KATO , R., YAMAYA , S. :	
Changing Factor of Rice Straw Moisture with Rice Straw Collection Work on Reclaimed Heavy Clay Paddy-rice Fields in Hachirogata	43
SUZUKI ,Y., MASUMOTO , Y., KOIZUMI ,Y., TANAKA , K., SUGIURA , T. :	
Detection of Flower Head of Haier ear's cat Using Proximal Remote Sensing	47
KOIZUMI , Y., TANAKA , K., SUZUKI , Y., SUGIURA , T., MINAGAWA , H., MASUMOTO , Y. :	
Plant Classification for Estimating Spatial Distribution of Hairy Cat't Ear	51
WATANABE , S., TANAKA , K., MINAGAWA , H., SUGIURA , T., SUZUKI , Y., IWASAKI , Y., NAKATSUBO , A. :	
Evaluation of Salt Stress on paddy rice with Method of Chlorophyll Fluorescence	55
TOPICS	59
NOTES	63
ORGANIZATION DIRECTORY	81

TOHOKU BRANCH OF THE JAPANESE SOCIETY OF AGRICULTURAL MACHINERY

c/o Faculty of Agriculture, Yamagata University
1-23 wakaba-cho, Turuoka, Yamagata 997-8555, JAPAN