

圃場センシングデータおよび高精細画像に基づく 栽培管理支援に関する研究

Cultivation Support System Based on Field Sensing Data
and High-definition Images

三重大学 大学院生物資源学研究科 共生環境専攻
自然環境システム学講座 水域環境学教育研究分野
509M235 山口千明
指導教員: 葛葉泰久教授, 伊藤良栄助教

目次

1. 序論	4
1.1. 日本農業の現状	4
1.2. 経験的農業と科学的農業	5
1.3. 三重県南紀地域におけるミカン栽培	6
2. 農業と情報技術	8
2.1. 圃場センシングシステムに関する既往の研究	8
2.2. 農業における画像利用に関する既往の研究	9
2.3. 研究目的	11
3. 圃場モニタリングシステム構築と現場設置	12
3.1. システム概略	12
3.1.1. 使用機器	12
3.1.2. 組み込み系 Linux	16
3.1.3. 使用ソフトウェア	18
3.2. システムフロー	19
3.3. 土壌水分センサの現場設置	20
3.4. 計測データの安全確実な転送	25
3.5. 結果・考察	27
4. フィールドでの実証実験	28
4.1. 目的	28
4.2. 予備実験	28
4.2.1. 実験方法	28
4.2.2. 実験結果	30
4.3. ミカン圃場での実証実験	33
4.3.1. 実験方法	33
4.3.2. 実験結果	34
4.4. 考察	38
5. 画像性能評価	39
5.1. 目的	39
5.2. 評価方法	39
5.3. 結果・考察	40

6. 画像解析	44
6.1. 目的	44
6.2. 使用データおよびライブラリ	44
6.3. 解析手法	45
6.4. 解析結果	50
6.4.1. 色彩比	50
6.4.2. エッジ検出	57
6.4.3. 最大値フィルタ	59
6.4.4. 画像の結合	62
6.5. 考察	64
7. まとめ	65
謝辞	66
引用文献・参考文献	67
引用 Web サイト	69

1. 序論

1.1. 日本農業の現状

現在の日本農業は、農業従事者の減少・高齢化、耕作放棄地の増加などの問題を抱えている。これら問題の中で有名かつ重大視されているものとして農業従事者の減少・高齢化が挙げられる。Table 1-1 に農林水産省発行の食料・農業・農村白書において纏められている日本と欧米諸国における農業就業者と平均年齢の推移を示す。農業就業者数の大幅な減少は欧米諸国等でも共通してみられる傾向であるが、平均年齢を見ると欧米諸国の上昇幅が最大 4.5 歳であることに比べ、日本のそれは 7.9 歳である。これらより、農業就業者の減少と高齢化が同時に進んでいることがわかる。近い将来高齢者の引退による農業労働力の急速な脆弱化が予測されていることから、農業従事者のノウハウや長年にわたり受け継がれた営農技術が失われる危険性が指摘されている。

また、白書は農業就業者が減少、高齢化しているなか、新規就農者は近年 6 万人～8 万人で推移していることも指摘している。Table 1-2 は 2008 年における新規就農者とその出身、就農形態、年齢で分類したものである。土地や資金を独自に調達して新たに農業経営を始めた新規参加者が農家子弟と非農家出身者の合計でも約 2000 と少ない理由として、営農技術の習得や資金の確保が難しいことが挙げられる。特に営農技術の習得は農業で利益を得るためには必要不可欠なものである。しかしながら、現行農業は長い年月をかけて習得した経験や勘を基に施業する「経験的農業」が主流であり、農業に携わっていない人間には分かりにくいものが多い。

Table 1-1 日本と欧米諸国における農業就業者数と平均年齢の推移
(農林水産省「平成 21 年度食料・農業・農村白書」より引用)

	農業就業者数 (万人)			平均年齢 (歳)			(参考) 農地10ha当たり 農業就業者数
	1990年	2007年	増減数 (増減率)	1990年	2007年	上昇幅	
日本	293	202	▲91 (▲31%)	56.7	64.6	+7.9	6.2人
イタリア	265	166	▲99 (▲37%)	57.3	60.4	+3.1	1.7人
フランス	53 *1	43	▲10 (▲19%)	50.7	51.6	+0.9	0.2人
ドイツ	65	37	▲28 (▲43%)	48.0	48.8	+0.8	0.3人
英国	23	28	+5 (+22%)	53.6	58.1	+4.5	0.4人
米国	222 *2	221	▲1 (0%)	54.0	57.1	+3.1	0.1人

資料：欧州委員会統計局「EUROSTAT」、米国農務省「CENSUS OF AGRICULTURE」、農林水産省「農林業センサス」、「農業構造動態調査」

注：1) 農業就業者は、EU諸国は「Agricultural holders being a natural person」、米国は「principal operator」、日本は「基幹的農業従事者」

2) EU諸国の平均年齢は、各年齢階層のデータの中央値をそれぞれ加重平均したもの

3) *1は2003年、*2は1997年の数値

4) ドイツの1990年の数値は旧西ドイツ地域の数値

5) 英国は、2003年に統計の定義を変更（2000年までは6ha以上の経営者を対象。2003年からは小麦換算で1.5ha以上の経営者を対象）したことにより、農業就業者（農業経営者）数が約5万人増加していることに留意

6) 農地は、耕地及び永年作物地の計であり、放牧・採草地を含まない。ドイツは2008年の数値、日本・イタリア・フランス・米国は2007年、英国は2004年の数値

Table 1-2 出身・就農形態・年齢別新規就農者数(2008年)
 (農林水産省「平成21年度食料・農業・農村白書」より引用)

(単位：人、%)

出身・就農形態		39歳以下	40～59歳	60歳以上	計	
農家子弟	自営農業	新規学卒	1,940 (3.2)	0 (0.0)	0 (0.0)	1,940 (3.2)
		離職	6,380 (10.6)	14,600 (24.3)	26,710 (44.5)	47,700 (79.5)
	雇用就農	新規学卒	300 (0.5)	0 (0.0)	0 (0.0)	300 (0.5)
		離職	690 (1.2)	350 (0.6)	90 (0.2)	1,110 (1.9)
	小計		9,310 (15.5)	14,950 (24.9)	26,800 (44.7)	51,050 (85.1)
	非農家出身	雇用就農	新規学卒	990 (1.7)	0 (0.0)	0 (0.0)
離職			3,550 (5.9)	2,010 (3.4)	430 (0.7)	5,990 (10.0)
小計		4,540 (7.6)	2,010 (3.4)	430 (0.7)	6,980 (11.6)	
新規参入		580 (1.0)	800 (1.3)	580 (1.0)	1,960 (3.3)	
計		14,430 (24.1)	17,760 (29.6)	27,800 (46.3)	60,000 (100.0)	

資料：農林水産省「新規就農者調査」

1.2. 経験的農業と科学的農業

現在の日本の農業は長年培われてきた「経験的農業」が主流である。「経験的農業」は、優良な作物を生育するための施業上のコツを取得するまでに数年以上という多大な時間がかかるため、若手農家や新規就農希望者が少なからず存在するにもかかわらず、担い手育成・確保が進まない原因となっている。

したがって、「経験的農業」から農業の ICT (情報通信技術:Information and Communication Technology) 化、つまり「科学的農業」への転換が提案されている。「科学的農業」とは、今までに培われた役立つ情報や施業上のコツなどを計測して蓄積し、これらのデータをもとに最適な栽培管理を行う農業形態である。「科学的農業」の例として、植物工場が挙げられる。植物工場とは、温度や人工光等を用いて高度な環境制御を行うことで野菜など作物の周年生産を可能にした栽培施設である。植物工場には、天候や季節に左右されず安定供給が可能となること、労働の軽量化、地域・土地の非選択性、養水分制御による農薬の使用量の低減等多くの利点があるが、現在の技術レベルでは栽培可能品目が少なく、維持管理費用やエネルギーがかかるという問題がある。したがって、現行技術では野菜など作物のすべてを植物工場のみで賄うことは費用的にも技術的にも難しい。よって、植物工場のみでは急速な農業労働力の脆弱化を食い止めることはできないと考えられる。

現在の食糧生産の大半は露地栽培で行われている。「科学的農業」の観点で言えば、露地栽培は開放系であるため生育環境を制御することは不可能であり、気象条件などの外的環境要因の影響を受けやすい。何が作物にどの程度影響を与えているのかが不明確であること、圃場における気象などのデータが存在しないことから、データを基に栽培管理を行うには難しい。しかしながら、多くの農業従事者が長年の経験や勘に基づいて施業を行い、安定的に高品質な作物の生産を行っている。この知恵を後世に残すためには、現在どういう状況下で施業しているのか、何を見、何を感じ取って判断を下しているのかをデータとして得る必要があると考えられる。したがって、科学的農業を実現するためには、気温・湿度・日射量などの環境情報を取得し施業状況を記録することで、圃場で何が起きているのか、何が施業に関わってくるかを知ることが重要である。

1.3.三重県南紀地域におけるミカン栽培

農林水産省果樹生産出荷統計によると、ミカンは平成 20 年産の収穫量 906,100 トン・出荷量 807,800 トンとリンゴの収穫量・出荷量に抜かされはしたが、国内で生産される果樹作物のうち収穫量・出荷量の高い作物である。ミカンと極早生ミカンの主な生産地における収穫量と出荷量、順位を Table 1-3 に示す。三重県は、ミカン収穫量全体では 11 位であるが、ミカンの収穫量のうち極早生ミカンの収穫量が 3 分の 1 を占めるほど極早生ミカンの生産割合が多いという特徴がある。

三重県におけるミカンの主な産地は御浜町、南伊勢町、熊野市であり、農林水産関係市町村別データによると平成 18 年産では 3 市町で県全体の半分以上を占めている。しかしながら、この地域は都市部から遠いこと、果樹園地が平地ではなく山麓に多く分布していることから高齢化が進み園地を手放す人も増えている。この結果、Fig. 1-1 に示すように、この地域の収穫量・出荷量ともに近年減少傾向である。

一方で、森永ら(2004)で開発された周年マルチ点滴かん水同時施肥法(以降マルドリ方式)を取り入れることで高品質なミカンの生産が行われている。マルドリ方式とは、カンキツ樹の圃場に透湿性マルチシートを敷き、そのシートの下に水と液体肥料を供給するための点滴灌水チューブを敷設することで、樹体の水分および栄養状態の制御を行う方法のことである。河合ら(1999)において、適度な水ストレスの付与によってミカンの果実糖度の上昇、着色促進、果実肥大の抑制などの効果がある半面、減酸遅延、果実肥大の抑制などの効果があることが示されている。特に成熟期や果実肥大樹の土壤水分を少ない状態に保つことによって果汁の糖度を高くすることができることが知られている。このようにミカンの高品質化には水管理が不可欠である。マルドリ方式では、透湿性マルチシートが土壤から蒸発する水を通し雨水を浸透させないシートであるため、点滴灌水チューブからの水分供給のみで樹体の水ストレスを調節可能である。このため、灌水を行うことで、ミカンが受ける水ストレスの調整が可能である。

しかしながら、灌水を行う判断基準は経験による。ミカンの水分状態を簡易に視覚的に判断する方法として、森永(1993)では葉身閉鎖度、佐々木(2005)では葉の巻き上げ度、中元ら(1998)では萎れ角度等を検討した事例があるが、農業に携わっていない人間には分かりにくく、簡便な方法とは言い難かった。このため新規就農者に技術伝達する際に障害となっている。このことから、「科学的農業」の導入が検討されてきている。

Table 1-3 平成 21 年産ミカンの収穫量・生産量とその都道府県別順位
 (農林水産省「平成 21 年産ミカンの結果樹面積、収穫量及び出荷量」参照)

全国・ 都道府県	ミカン				ミカンのうち極早生ミカン			
	収穫量		出荷量		収穫量		出荷量	
	トン	順位	トン	順位	トン	順位	トン	順位
和歌山	189 000	1	172 100	1	22 900	4	21 100	4
愛媛	159 400	2	145 300	2	25 900	3	24 000	3
静岡	122 100	3	107 300	3	3 880	11	3 420	11
熊本	93 000	4	85 800	4	27 000	2	25 300	2
長崎	72 200	5	64 600	5	16 400	5	14 800	5
佐賀	65 100	6	60 400	6	27 700	1	25 800	1
広島	40 700	7	33 600	7	5 120	10	4 280	10
福岡	35 300	8	32 400	8	9 390	7	8 590	7
愛知	31 900	9	28 000	9	281	16	265	16
神奈川	29 400	10	23 300	10	446	15	380	15
三重	23 400	11	20 000	11	8 000	9	7 170	8
大分	20 600	12	17 800	12	3 220	13	2 830	13
香川	18 600	14	16 800	13	3 520	12	3 260	12
鹿児島	20 100	13	16 500	14	8 780	8	7 040	9
全国	1 003 000		893 400		173 100		157 600	

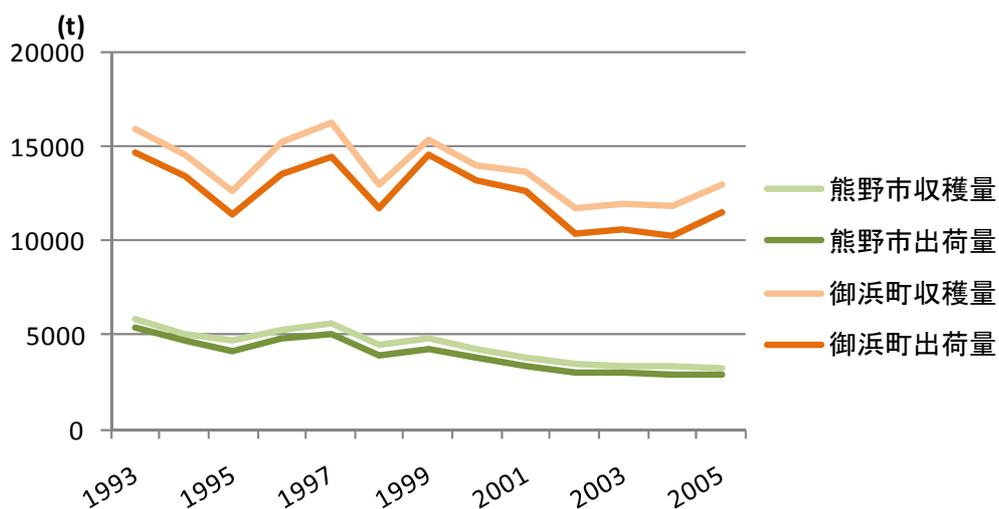


Fig. 1-1 三重県熊野市と御浜町のミカン収穫量
 (農林水産省「農林水産関係市町村別データ」参照)

2. 農業と情報技術

2.1. 圃場センシングシステムに関する既往の研究

圃場における環境情報の取得のために、多くの圃場センシングシステムが開発されている。有名なものとしてまず、深津・平藤(2003)で開発されたフィールドサーバ (Fig. 2-1) が挙げられる。フィールドサーバとは、温湿度や日射量のセンサ、ネットワークカメラ、無線 LAN 通信モジュールなど様々な電子機器を搭載し、フィールド(圃場)に長期間設置して、環境の計測、動植物のモニタリング、農園の監視等を行うための超分散モニタリングデバイスである。実際に日本各地やハワイ、ヒマラヤなどに設置され、運用されている他、Honda et al. (2009)によって簡単に設置・管理可能な、つまり Plug & Play を実現する関連システムの開発が行われる等、研究分野で多く利用されている。しかしながら、研究分野での導入はあるものの農業現場には殆ど普及していない。この理由として、フィールドサーバが多機能であるため現在 1 台約 40 万円と高価であること、農家にとって費用対効果が少ないことが挙げられる。

低価格版圃場センシングシステムとして、落合ら(2009)や Live E!(<<http://www.live-e.org/>>, 2011/01/30 参照)では、気象センサと独自に改良したルータなどのネットワーク接続機器を用いて安価版「デジタル百葉箱」を構築している。安価版「デジタル百葉箱」では、気温、湿度、気圧、雨量、風向、風速などが世界中約 100 台で計測され、データはインターネット経由でリアルタイムに収集されている。しかしながら、Live E!ではプロトコルの開発が関心の中心であり、収集したデータの利活用は 2 次的であったため、計測されたデータは一般公開されておらず、インターネットインフラの整備されていない土地ではデータの収集ができないという問題もある。

さらに低価格なシステムには、松生・浅井(2005)が開発したシステムがある。松生・浅井(2005)では、ワンチップマイコンで制御用ボードを作成し、センサを取りつけて無線センサネットワークの基本システムを構築している。このシステムでは受信側は RS-232C で PC に出力可能である上、低電圧のバッテリー駆動が可能となっている。松生(2006)、松生(2007)、松生・浅井(2008)では、このシステムを改良し、送信側で温度、照度、湿度を計測し中継機を経由して受信側に送信するほか、受信側から送信側に命令をおくり、温室のファン制御を行う等双方向での通信を可能にしている。しかし、電池の寿命により計測期間が 1 週間と短いこと、照度に関してはセンサの計測限界値を超えてしまうことが多々あったこと等、問題も多々ある。

これらに対して、搭載するセンサを少なくする単機能化で価格を抑える研究も多くなされている。最も多いものが画像収集システムである。岡・小野寺(2007)が一般的な栽培現場では、作物の生育状態を視覚的に判断し、施肥や灌水などの管理を行っていることを取り上げ、Nakamura(2006)は、農業では温度などの数値データよりもむしろ画像情報が重要であると指摘している。このため、Nakamura(2006)では市販のネットワークカメラを使用して安価な画像収集システムを作成している。さらに、デジタル表示の温度計を同時に撮影し、画像認識技術を用いることで、画像のみでなく、客観的なデータである気温もデータベース化されている。しかしながら、耐久性の低いネットワークカメラを使用しているため、防水や防砂、防熱などの対策として、屋内から撮影したり、簡易ビニールハウスを用いて外部を撮影したりしなければならず、圃場での耐候性に改良の余地があった。また、これら研究で使用されたカメラは室内用であるため、室内の照度で明瞭な画像を取得できるようになっていた。室内より明るい屋外で画像を取得した

際、明るさゆえに取得画像中の R, G, B 値が限界値を超えてしまった。このため、画像全体が白くなる現象である飽和現象等が取得画像中に発生してしまっていた。

これら先行研究より、圃場センシングシステムには、圃場で取得したデータを遠隔より取得するための通信手段や機器を動かす電源に関するインフラの整備や、圃場の高温・多湿な環境で使用するための耐環境性の使用が必要である。農業現場における普及をめざすなら、その上さらに農家が導入可能な数万円程度の低価格性も重要になってくると考えられる。



Fig. 2-1 フィールドサーバ

(左:Fukatsu and Hirafuji, 2005 より引用, 右:三重県熊野市金山パイロットにて撮影)

2.2. 農業における画像利用に関する既往の研究

作物の状態検知や農作業の自動化のために、作物を撮影した画像から解析する研究も近年多くなされている。作物の状態検知に関する研究には、水分ストレスの検知に関する研究が多い。この理由として、画像を用いることで非破壊かつ非接触、連続的に観測可能であること、適度な水分ストレスの付与が高糖度なトマトやミカンの生産に重要であること(河合ら, 1999 ; 早田ら, 1998)がある。

Takayama et al. (2007) では、鉢植えトマトの投影面積の変化から水ストレスの度合いを判断する手法を提案し、検証している。画像撮影の際には、背景にブルーシートを使用して背景によるノイズを除去し、水平方向から 30° 毎、垂直方向までの 4 視点から画像を撮影している。背景と植物体領域の分離には、色相による判別分析法が使用された。4 視点のうち初期のしおれでは垂直方向から撮影された画像が最も投影面積比が大きく低下し、第 2 段階でのしおれには 0° 及び 30° で投影面積比が大きく低下していると指摘している。Foucher et al. (2004) では、レンギョウという観賞用低木のを鳥瞰画像から水不足による形状の変化を検出する手法として、不変モーメント、フラクタル、骨組 (末梢枝数・末梢枝長) を利用した 3 つの方法を比較検証している。鳥瞰画像の取得には暗室を用い、一定条件下において画像が取得されている。

Takayama et al. (2007) や Foucher et al. (2004) の手法によって作物の水ストレスを検知することがある程度可能となったが、いずれも画像解析には背景を一定にしたものや一定条件下で撮影された画像を必要としている。これは背景や照度の変化によるノイズを抑えるためであるが、露地栽培ではこれら手法をそのまま屋外に利用するには難しい。

農作業の自動化に関する研究では、果実検出に関する研究が多い。これは果実の収穫において位置の特定や収穫判断を自動化するためである。ただ、前述の手法とは異なり自然背景中から果実を検出する必要がある。区別する方法として、まず可視光画像以外の画像を利用する方法がある。Jimenez et al. (1999) では、距離計内蔵の 3D センサを用いて可視光画像、レーザポインタで計測された距離画像、レーザポインタの減衰を表す減衰画像を取得し、3 画像からカンキツの果実の検出を行う手法を考案している。

しかしながら、それら特殊な画像などの取得には特殊な機器が必要な場合が多く、費用がかかる欠点がある。そこで、可視光画像のみを利用して作物や土壌を区別する手法もいくつか提案されている。Burgos-Artizzu et al. (2009) は自然光下で撮影された畑の鳥瞰画像から作物・土壌・雑草の分類を試みている。Case-Based Reasoning (CBR) という画像毎に最適な処理方法を決めるシステムを使用した結果、屋外の変化のあるところの画像でも適切に識別でき、違う圃場から得た画像でも相関係数の値が 0.8 程度の結果を得ている。Limsiroratana and Ikeda (2005) では自然背景中から木に実っているパパイヤの未熟果実を検出するために、エッジ検出、色彩比、最大値・最小値フィルタを利用した検出ロジックを開発している。

2.3. 研究目的

現在開発されている圃場センシングシステムにおいて、高価格、低耐久性、通信経路の確保が問題となっている。一般的な栽培現場では作物の生育状態を視覚的に判断し施肥や灌水などの管理を行っていること、生産物の出荷価格に影響を及ぼす色や形、画像を取得した周辺の状況や天候を得ることが出来ること、画像取得によるモニタリングは非接触・非破壊・連続的観測が可能という利点から画像取得に特化したシステムの需要も多い。しかしながら、カメラによっては画像の飽和が発生すること、画像を収集するのみでは利用性が低く画像からデータを読み取ることにも必要であることなど問題も多い。また、現場にシステムを設置する際に、センサや通信手段によっては設置方法にも留意事項が必要となってくる。

そこで本研究では、広く利用可能な圃場モニタリングシステムの構築、開発したシステムの耐環境性を見る実証実験の実施、取得画像の性能評価、画像内の対象物の検出ロジック構築の4点を進めていくことで、圃場で取得した画像データの解析結果や他現場発生データより、圃場を監視し、栽培管理を支援するシステムを構築することを最終目標とする。

具体的にはまず、圃場の過酷な環境においても安定的に稼働する耐環境性を持ち、各農家で導入可能な低価格で、リアルタイムでデータ収集可能な圃場画像モニタリングシステムの開発を行う。つぎに、開発したシステムを実際に圃場に設置し、耐環境性やシステムの安定性を検証する。画像解析に利用可能化を性能評価によって明らかにしたのち、ミカンを対象作物とし、現地で撮影された高精細なデジタルカメラ画像から自然背景中のミカン果実の検出ロジックの構築を目指す。

3. 圃場モニタリングシステム構築と現場設置

3.1. システム概略

3.1.1. 使用機器

本研究ではまず、圃場の過酷な環境においても安定的に稼働し、低価格な圃場モニタリングシステムを構築した。熊野市周辺の農家及び普及関係者への聞き取り調査の結果、目標価格は10万円以下と設定した。本システムにおいて圃場側で使用される機器は、圃場側システムの制御を担うLinux Box、画像収集用USBカメラ、温度や土壌水分量の測定機器や通信機器を含むその他機器の3つに大別できる。以下にシステムに利用したLinux Box、USBカメラ、その他機器を紹介する。

(1) Linux Box

Linux Boxは圃場側の機器の動作を制御する機器である。本モニタリングシステムでは、Linux BoxにASUSTeK Computer Inc. (略称ASUS)より販売されていたブロードバンドルータWL-500gPremium (以降w1500gp)とアイコップテクノロジー株式会社の超小型PCであるeBox-4300 (以下eBox)の2機種を使用した。この2機器をシステムに用いた理由として、USBポートが使用可能であること、w1500gpが約1万円、eBoxが約3万円と低価格であること、ハードディスクを利用せずにOSを導入可能であることが挙げられる。農地におけるハードディスクの利用はIto et al. (2006)によって検証されているが、圃場のような高温多湿な環境下ではハードディスク等の可動部品が故障しやすく、ハードディスクが長期的に屋外で使用することには向いていないことが示されている。したがって本システムでは、完全にソリッドステート化可能なこの2機種を選択した。以下に各機器の詳細を記す。

w1500gpは1万円程度で販売されていたUSBポートが内蔵されている商用無線ブロードバンドルータである。Fig. 3-1にw1500gpの外観を、Table 3-1にw1500gpの仕様を示す。販売されている状態では圃場側USB機器の制御は行えないため、w1500gpには組み込み系Linuxの1つであるOpenWrtをインストールした。組み込み系LinuxならびにOpenWrtの詳細については3.1.2で述べる。

eBoxは限られたスペースや高温での使用を想定して設計されたファンレスの超小型PCである。外観をFig. 3-2に、仕様をTable 3-2に示す。ハードディスクの代わりにコンパクトフラッシュを用いることでOSをインストールすることが可能である。この特性から、三重県熊野市金山パイロットに設置されたフィールドサーバにおいて、データ収集用に導入されている。本研究では、OSにDebianをインストールして使用した。

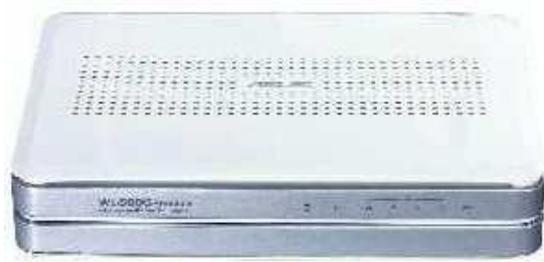


Fig. 3-1 wl500gp

Table 3-1 Specifications of wl-500gp (ASUS HP & OpenWrtDocs より抜粋)

Vendor	Broadcom
Bootloader	CFE
System-On-Chip	Broadcom BCM94704
CPU Speed	266Mhz
Flash size	8MiB (Spansion S29GL064M90)
RAM	32MiB
Wireless	MiniPCI Broadcom 802.11b/g BCM4318 802.11 Wireless LAN Controller
USB	USB 2.0 ×2
Ethernet	Robo switch BCM5325
Electrical Power Supply	+5V @2.3A



Fig. 3-2 eBox (eBox4300 HP より引用)

Table 3-2 Specifications of eBox (icop HP より引用)

CPU	VIA Eden ULV 500MHz
System Memory (DDR)	Onboard 512MB or 1GB DDRII
BIOS	AMI BIOS
USB	USB 2.0 port ×3
Flash Disc Support	Compact Flash (Type I/II)
LAN	10/100 Mbps Ethernet
On-Board IDE	E-IDE (UDMA 33/66/100)
Serial Port	RS232 (option) ×2
Operating Temperature	0~60°C (recommended usage 5~35°C)
Dimension (W×H×D)	115×115×35 mm
Weight	505g
Electrical power supply	+5V @3A

(2) USB カメラ

安価に圃場の状況を得るために、本システムは画像取得を主眼に設計した。画像取得用には安価な商用 USB カメラを使用した。使用した USB カメラは PlayStation2 用カメラである EyeToy と Logitech 社製の Qcam Orbit AF (以降 Qcam) である。以下に各機器の詳細を記す。

EyeToy はゲーム付き新品であれば 8000 円程度、中古であれば 1000 円を切るほどの低価格で入手可能であるにもかかわらず、最大 30 万画素(640×480)の画像を撮影することができる USB カメラである。Linux 用ドライバは ov51x が標準であるが、このドライバは JPEG 圧縮に対応していなかったため、JPEG 対応に改良された ov51x-jpeg を用いた。赤色と青色の 2 色の LED が装着されており、青色 LED は電源と連動しプログラムから制御不可能であったが、赤色 LED は自作プログラムによって点灯・消灯など制御することが可能であった。

Qcam は市販価格が 11,800 円と EyeToy に比べて高価であるが、200 万画素(1600×1200)の画像を取得することができる Windows 用のウェブカメラである。外観を Fig. 3-3 に示す。Qcam には Windows XP, Vista 対応のソフトウェアがあり、これを用いることで色調の調節、ズームなどをクリック 1 つで行うことができる。また、スカイプの高画質ビデオに対応しており、マイクも内蔵している。しかしながら、Linux では各種制御用のソフトウェアが用意されていなかったため、これらソフトウェアを介した機能は使用できなかった。したがって、今回は 200 万画素という高画質な画像を取得可能な USB カメラとして使用した。Linux 用ドライバには UVC を使用した。



Fig. 3-3 Qcam & EyeToy

(3) その他機器

USB カメラ以外の USB 機器として、NTT ドコモから発売されていた USB 接続型データ通信機器 FOMA A2502 HIGH-SPEED (以降 A2502)、株式会社ストロベリー・リナックスの USB 温度・湿度計モジュール(以降 USB 温湿度計)、USB メモリを使用した。また、計測機器として Decagon 社 土壌水分センサがある。以下に各機器の詳細を記す。

A2502 は AnyDATA 社の OEM で携帯電話網を通じてデータ通信を行うことが可能な USB 接続型データ通信モデムである。FOMA ハイスピードエリア、FOMA サービスエリア、FOMA プラスエリアに対応しているので、NTT ドコモの携帯電話網とほぼ同等なエリアでデータ通信が使用可能であった。接続にはダイヤルアップを用い、モデムで ISP(インターネットサービスプロバイ

ダ)に接続して通信を行うには、PPP(Point to Point Protocol)と呼ばれるデータリンク層のプロトコルを使用した。

USB 温湿度計はシステムを収納する筐体の内部温度を計測するために導入した。この機器は Sensiron 社の SHT11 チップ温度湿度センサによって温湿度を計測する。計測精度は温度が 25℃付近で±0.4℃である。インターネットで公開されているドライバを使用し、データ取得のスク립トも作成した。

USB メモリは追加のデータディスク領域として使用した。Linux Box に wl500gp, USB カメラに Qcam を使用し最高画質である 200 万画素(1600×1200)で撮影を行ったところ、wl500gP に内蔵されているメモリでは容量が足りず、処理が途中で終了してしまった。このため、USB メモリの一部を swap 領域としてマウントし、見かけ上のメモリ容量を増加させ撮影を可能にした。USB メモリの swap 化はデスクトップの Linux で行い、wl-500gp に差すだけで swap 領域を認識し即座に使用できるようにした。

デカゴン社の土壤水分センサ ECH2O EC-5 は誘電率を計測することにより土壤の体積含水率を求めるセンサである。およそ 10ms の持続時間で 2.5~5V の印加電圧を供給し、12 ビットまたはよりよい分解能で電圧レベル信号を読み込むことができるロガーであればどんなロガーでも互換性があるが、常時通電し続けるとセンサが壊れてしまう仕様であるため、今回は専用ロガー Em50 を使用した。Em50 は全天候型・耐 UV ケースで作られており、単三アルカリまたはリチウム電池 5 本で長期計測が可能なロガーである。Em50 には不揮発性フラッシュメモリが導入されており、5 分毎の計測で約 2 カ月半データを貯めることができる。RS-232C によってパソコンに接続可能であることから、専用ソフトを使用すればデータをパソコンに落とすことが容易である。

3.1.2. 組み込み系 Linux

組み込み系 Linux とは、組み込みシステムで使用されるソフトウェアに処理の仕組みを提供する OS の一つである。組み込みシステムを一言で単純にまとめると「必要最低限の装備で特定の機能を実現する機器・ソフトウェアのまとまり」である。尤も、組み込みシステムの定義は曖昧であり、高田ら(2003)では「機械や機器に組み込まれて、その制御を行うコンピュータシステム」、社団法人日本システムハウス協会エンベデッド技術者育成委員会(2003)では「マイクロチップとそれを制御するプログラムを組み込んだシステムもしくは IT(情報技術)を組み込んだシステム」、福田(2007)では「メモリ上にあるソフトウェアが CPU または MPU と呼ばれるプロセッサで実行されて動作して目的を達する、一連の機器」となるように、人によって様々な定義されている。しかし、それぞれに共通することとして、組み込みシステムは PC やワークステーションなどいわゆる汎用システムを除くほとんどのコンピュータシステムであること、パソコンなどの汎用コンピュータより記憶容量が少ない状況下で動作させるため、提供する機能や性質を限定し、特定用途に専用化されているコンピュータシステムということである。したがって、家電製品や通信機器など組み込みシステムは身の回りの様々な分野で適用されている。

組み込みシステムは、CPU や RAM などのハードウェアと、それらをコントロールするソフトウェアがセットになっている。この内、組み込みシステムに使用されるソフトウェアのみを指して「組み込みソフトウェア」と呼ぶ。

組み込みソフトウェアは汎用システムと同様に OS とアプリケーションの 2 つに大別することができる。組み込みシステムで利用するソフトウェアのうち、様々なシステムで共通して使われ、他のソフトウェアに処理の仕組みを提供するソフトウェアが組み込み OS、特定の問題をコンピュータで処理できるようにするためのソフトウェアが組み込みアプリケーションプログラムである。組み込みシステムが多様な特徴を持つように、組み込み OS も様々な特徴を持つものが存在する。組み込み OS の代表的なものを表にまとめたものが、Table 3-3 である。組み込み系 Linux は用途に応じて多種存在するが、今回のシステムでは、OpenWrt を導入した。

OpenWrt は多数の無線 LAN ルータで使用できる組み込み系 Linux のディストリビューションである。組み込み用に特化されている Linux であるが、ssh や cron, less などの Linux の基本的なプログラムが使用できること、Linux とほぼ同様な操作によって設定の変更や機能の追加が可能であること、時間の同期など様々な機能が使用可能であることなどが OpenWrt の長所として挙げられる。

今回 OpenWrt を圃場モニタリングシステムに使用した理由として、インターネット上で公開されており、無料で使用することができること、パッケージシステムを用いているため機能の追加が容易であること、OpenWrt ではサポートしていないソフトウェアや独自に作成したソフトウェアを OpenWrt 用に再構成して使用することができることなどが挙げられる。

Table 3-3 代表的な組み込み OS 及びプラットフォーム(福田(2007)より一部抜粋)

名前	特徴	リアルタイム処理	使用メモリ
μ ITRON	国産の組み込み向けリアルタイム OS 世界一のシェア 高速かつ軽量で、フットプリントが小さい	対応	少
REX	Qualcomm 者が主に携帯電話機向けに提供 W-CDMA/CDMA プロセッサとセットで利用	対応	少
VxWorks	WindRiver 社提供の UNIX ベースの組み込み OS 通信機器や制御系デバイスなどに広く利用される	対応	少
Windows CE Windows Mobile	Microsoft 社の PDA・スマートフォン向け OS リアルタイム処理能力は無い	非対応	中
Windows XP Embedded	Windows XP の組み込み向けサブセット版 小容量かつ堅牢なシステム	非対応	中
組み込み Linux	組み込み向け Linux ディストリビューション ROM での実行、極小化されたカーネルサイズなど 組み込み向けにチューニングされている	部分的に 対応	中

3.1.3. 使用ソフトウェア

(1) 画像取得

EyeToy を使用する際には、camE (<<http://linuxbrit.co.uk/camE/>>, 2009/03/02 参照) という画像取得ソフトウェアを使用した。camE は Linux 上でテレビ画像を表示するアプリケーションである xawtv のうち、画像取得を行う webcam のコマンドのみを取り出して改良を加えられたプログラムであり、インターネット上で公開され、無料で配布されている。xawtv はテレビの視聴が可能であるが、camE は画像取得のみの機能しか持たないため、プログラムが軽くなっている。また、camE には、図 4-3 の画像のように画像中に日付や題名などの文字を透過的に挿入する機能があり、コマンド操作のみで撮影を行うことができる。またこの他にも、画像の色調やカメラの撮影フレーム数、得られる画像の画素数、画像に入れる文字の色調・フォントなどを、設定ファイルを用いて調節したりすることができる。

しかしながら、camE は Qcam の使用する規格 Video for Linux 2(V4L2)に対応しておらず、camE では Qcam を利用して画像取得することが不可能であった。そこで、Qcam を使用する際には camE でなく fswebcam を使用した。fswebcam は webcam アプリケーションだけの簡単なソフトウェアであり、GD グラフィックライブラリを用いて JPEG 圧縮などを行う。最新規格である Video for Linux2(V4L2)にも旧規格の V4L1 にも対応しているため、様々な USB カメラを使用することが可能である。fswebcam を用いることで得られる画像は、camE と同様に画像中に日時や題名を挿入することができる。

(2) 転送

本システムで用いた Linux Box は、メモリを記憶領域に使用しておりに容量が少なかった。また、圃場における通信経路は不安定であり、取得された画像データや温湿度データは、転送用スクリプトを作成してサーバに転送を行うようにした。転送用スクリプトでは rsync と scp を選択的に使用可能にしている。rsync と scp はどちらも公開鍵の使用と暗号化通信を導入可能であるため安全性が高い。以下にそれぞれの特徴を示す。

scp はクライアントからサーバに安全に転送する転送プログラムである。rsync とは違い OpenWrt にも標準装備されているため、追加インストールが必要ないという利点がある。このため、限りなく使用容量を抑えたい場合に有用である。しかしながら、ログインできない場合は明確に判断できるものの、転送途中で失敗した場合を判断することができない。このため、画像を転送できなくなった場合に折角得た画像を消去してしまう可能性がある。

これに対して rsync はクライアントとサーバのファイルの同期を行い、相違部分だけを転送する転送プログラムである。scp の場合と異なり、成功時と失敗時の返り値が明確であるため、クライアント側である圃場の画像を転送したもののみ消去する処理を附属させることが可能である。このため、画像転送の途中で失敗した場合も画像を消去せずに残すことが可能である。但し、rsync は OpenWrt では追加パッケージとして存在しているため、容量がより少ない場合は対応できなくなる恐れがある。

3.2. システムフロー

本システムの概略図を示したものが Fig. 3-4 である。まず、画像取得ソフトウェアを使用して USB カメラで画像を、自作ソフトウェアを利用して温湿度計から温湿度データを取得する。取得したデータは一旦 Linux Box 内のフラッシュメモリに保存される。保存後、転送スクリプトにより研究室に設置されたサーバに向けて、インターネットを通じたデータの転送を試みる。転送が無事終了した場合、Linux Box 内のフラッシュメモリの容量を開けるために Linux Box に保存されているデータを消去して処理を終了する。転送に失敗した場合は、Linux Box に保存されているデータは消去せず処理を終了する。消去されなかったデータは、次回転送挑戦時に他のデータとともに転送される。これらの処理は cron によって一定時間ごとに行われるように設定した。

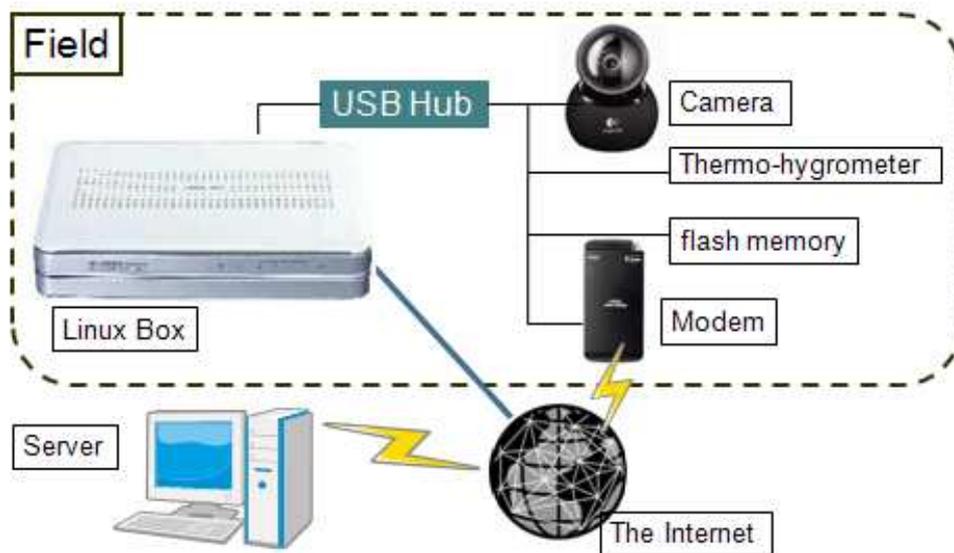


Fig. 3-4 The Schematic Diagram of the Field Monitoring System

3.3. 土壌水分センサの現場設置

本研究で使用した土壌水分センサ EC-5 は、畑地における埋設方法が Decagon 社の HP に紹介されている。この埋設方法は極めて単純で、周囲の土壌の構造を変化させないように、土壌に差しこんでいくという手法である。しかしながら、三重県熊野市金山パイロットの果樹園のような礫と粘土で構成された硬い土壌には上述の埋設方法を実行することは不可能である。このため、土壌の構造を出来るだけ変えずに EC-5 を埋設する手段の考案が必要であった。

いろいろと試行錯誤を重ねた結果、現段階で最適と思われる埋設方法は以下の通りである。まず埋設したい場所にセンサが入る程度の小型の穴を掘る。これは周囲の土壌を攪拌し、構造を壊すことを防ぐためである。穴にセンサを設置したのち、事前にふるいにかけて乾燥しておいた圃場の土壌で埋設する。この際、Fig. 3-5 のように水を加えながら空気を抜き空隙が発生しないように留意する。これは空隙により土壌中の水の移動経路ができてしまうのを防ぐことと周辺の土壌とセンサを密に接触させるためである。埋設が終了したら、ProCheck 等センサの値を読み込み可能な機器を用いてセンサの反応を検証する。センサ周辺に水を撒き、センサが水を検知し土壌水分量の値が上昇すれば埋設完了、時間がかかる等上手く水を感知しなかった場合は埋設からやり直しとした。

また、EC-5 は Decagon によってキャリブレーションを行うことが推奨されている。これは、EC-5 のように誘電率によって土壌中の水分状態を見る場合、土壌によって誘電率が変化するためである。EC-5 の日本代理店であるアイネクスでは黒ボク土や豊浦砂など代表的な土壌毎に回帰式を示している。本研究では、土壌水分センサを設置する三重県熊野市金山パイロットの土壌を使用して、EC-5 の圃場における換算式を得るためにキャリブレーション実験を行った。

(1) 蒸発実験

まず、斉藤ら(2008)がデカゴン社の ECH2O 土壌水分プローブ EC-20 のキャリブレーションで使用した蒸発法を行った。蒸発法はアクリルなどで作成された容器にセンサと土壌を充填し、土壌表面からの蒸発により水分量を調節する手法である。斉藤ら(2008)では、この手法の利点として、労力が少ない、充填毎の密度のムラの影響がない、用意する供試土が少量で済む点を挙げている。本実験では、以下のような手順で行った。

まず、Fig. 3-6 上段に示すアクリル容器に土壌を満たした。このアクリル容器には底面に浸水用の穴があいているため、穴からの土壌流出を防ぐためにストッキングの切れ端を底面に敷いた。また、センサは後に側面の穴から挿入するため、側面の穴には土壌流出防止用に仮止めをした。土壌を満たしアクリル板で容器に蓋をしたのち、側面の穴の仮止めを取りセンサを差し込んだ。センサをシリコン等で固定したのち、容器を水平にして水を貼ったトレイを用いて容器底面から水を浸透させて土壌を一旦飽和させた。飽和したところで水からあげ、底面を開放するように下駄をはかせて容器を置いた。時間変化とともに蒸発する水の量を求めるため、Fig. 3-6 中段右のように容器やセンサを含む全体の重さを計測して水分の減少量を計測した。

体積含水率を求めるには、充填した土壌の乾燥重量、土壌が占めていた体積、土壌を除いた部分の質量が必要である。蒸発実験終了後、センサをつけたままアクリル容器から土壌をトレイに洗い出し、アクリル容器底面をテープでふさいで充填した水の質量から土壌の体積が、アクリル容器をそのまま乾かせば土壌以外の質量が、トレイの土壌を 1 日炉乾させることで土壌の乾燥重

量が得られる。したがって、体積含水率 θ は、

$$\theta = \frac{V_m}{V} \times 100 = \frac{1}{\rho} \frac{X - M_o - M_s}{V} \times 100$$

ここで、 V_m =水の体積、 V =土壌の体積、 X =計測した重量、 M_o =土壌と水分以外の重量、 M_s =乾燥土壌の質量とする。

予備実験を砂で行ったところ、この手法でうまく水分動態が得られた。しかし金山パイロットの土壌で行った実験では、Fig. 3-6 下段のように水分を含むことによって土壌の体積が減少して体積が正確に測れなかったり、乾燥するとひび割れてしまったりしたため、正確な体積含水率を計測することができなかった。これは、金山パイロットで得た土壌が団粒化した粘土であったため、飽和させる際に団粒間の間隙が狭まったために体積が減少し、乾燥する際にさらに間隙が狭まった為であると考えられる。また、この手法のもう一つの問題点として、土壌から水分が蒸発しきるまでに2週間以上かかることも挙げられた。

(2) 加水実験

蒸発法で金山パイロットの土壌のキャリブレーションはできなかった。このため、Decagon社で紹介されている手法で実験を行った。手順は以下の通りである。

まず、圃場の土壌を Fig. 3-7 下段左のような乾土にした。この乾土に水を加えて水分状態が均等になるよう混ぜた後、Fig. 3-7 左上のような大きめの容器に土壌を詰めたのち、センサを差し込んで計測した。計測風景が Fig. 3-7 右上である。

体積含水率は Fig. 3-7 中央にあるような小型サンプラーによって取得した土壌から算出した。サンプラーで採取した湿潤土壌の質量を M_w 、1日炉乾させた乾燥土壌の質量を M_s 、サンプラーの体積を V とすると、体積含水率 θ は

$$\theta = \frac{M_w - M_s}{V} \times 100$$

で表すことができる。

この実験におけるセンサ出力値と体積含水率を比較したものが Fig. 3-8 である。この結果、センサの出力を x (mV)、体積含水率 θ とすると、金山パイロットの土壌における回帰式は

$$\theta = (0.0006x - 0.283) \times 100$$

となった。



Fig. 3-5 土壤水分センサ設置風景

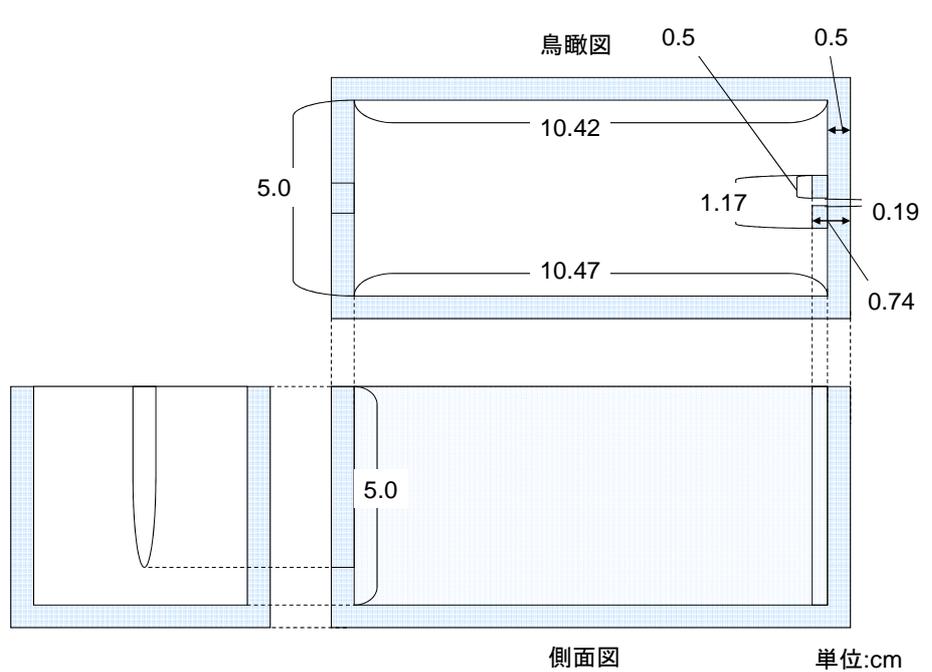


Fig. 3-6 蒸発実験の様子

(上段：アクリルボックスの概略図，中段左：蒸発乾燥の様子，中段右：重量測定
下段：金山パイロット土壌を用いた場合，左：浸水直後，右：浸水終了時)



Fig. 3-7 加水実験の様子（上段：実験手法，下段左：乾燥状態の土壌，
下段右：水を加え均等に混ぜた状態の土壌）

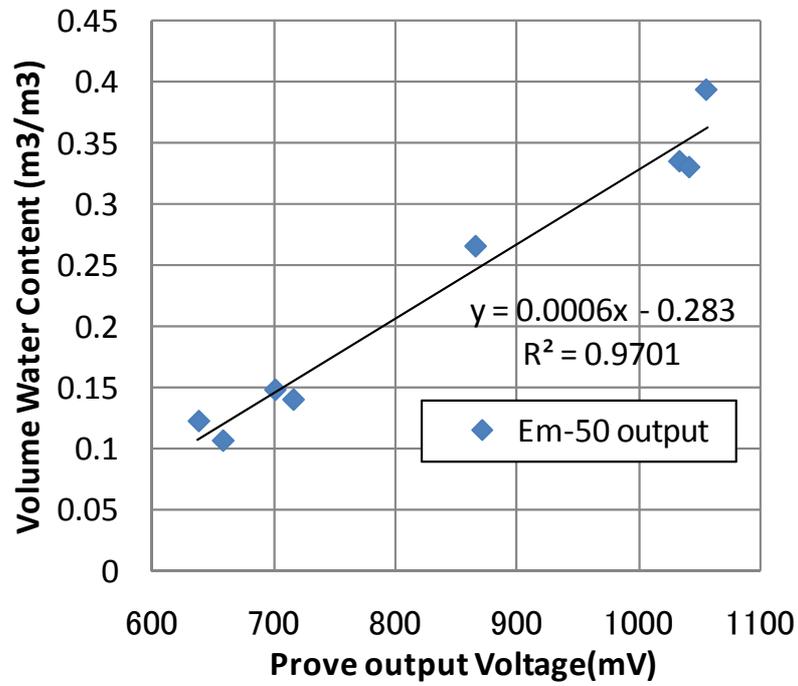


Fig. 3-8 三重県熊野市金山パイロットの土壌における土壌水分量回帰式

3.4. 計測データの安全確実な転送

リアルタイムに圃場のデータを収集し、即時対応するためには、圃場における通信経路の確保が必要である。しかしながら、民家に隣接している場合を除き、一般的な圃場には通信インフラが整っていない場合がほとんどである。例えば熊野市金山パイロットにフィールドサーバを設置した際には、基地局より遠すぎて ADSL が敷設できなかったことが理由で衛星通信を利用している。衛星通信は圃場の電源が落ちた時と豪雨の時に通信断が発生したもののそれ以外では安定的に通信可能であるが、月 6 万円程度の通信料がかかりコストが高い。このため、農業現場における衛星通信の恒常的使用は難しいのが現状である。

そこで、三重県熊野市金山パイロットにおいて、麓の小屋に敷設されている ADSL、衛星通信、携帯電話通信網を利用したデータ通信の通信速度の計測・比較を行い、有用性を検証した。データ通信には、NTT の FOMA 回線を利用する IIJ モバイルと b-mobile 3G の端末を使用した。回線速度の計測には、BNR スピードテスト(<<http://www.musen-lan.com/speed/>>), goo スピードテスト(<<http://speedtest.goo.ne.jp/>>), インターネット回線速度調査(<<http://junkhunt.net/icsi/>>), ブロードバンドスピードテスト (<<http://www.bspeedtest.jp/>>)の 4 つのサイトを利用した。

この検証結果を Table 3-4 に纏める。ADSL 回線での通信速度は実測で下り 160kbps, 上り 130kbps と極めて低速であった。これは金山パイロットの圃場が本来サービスエリア外であるためであると考えられる。対して FOMA や b-mobile の回線における通信速度は下り 370kbps, 上り 300kbps と ADSL 回線よりも高速であったことが判明した。また、携帯電話通信網を利用したデータ通信は無線であるため、ADSL 等固定回線より柔軟に圃場への設置に対応することが可能である。

携帯電話網を利用したデータ通信や無線 LAN を農業に利用する場合、最も問題になることが農作物による電波の減衰である。主な無線 LAN の規格には IEEE802.11a, IEEE802.11b, IEEE802.11g の 3 種類が存在するが、IEEE802.11b, IEEE802.11g の周波数帯が 2.4GHz であるため、水分子によって大きく減衰してしまう。対して IEEE802.11a は 5.2GHz と水分による減衰が発生しない周波数帯に属しているが、周波数が高いために減衰しやすい特徴がある。圃場には水分を多く含んだ作物があり、水分による減衰の影響が懸念されるため、今回は IEEE802.11a の圃場における有用性を検証した。

Fig. 3-8 にミカンの樹体を基地間に挟むことによって IEEE802.11a 規格電波の減衰を調べた結果を示す。この計測には三重大学農場のミカンを使用した。横軸には、無線 LAN ポイントとの間にミカンの樹が何本存在していたかを示している。この検証の結果、果樹を 1 本間に入れただけでも電波強度が半分に減少していることが分かった。三重大学圃場のミカン園は金山パイロットより葉や枝の密度が低いため、金山パイロットではさらに電波強度が減衰すると考えられる。したがって、圃場において携帯電話網を利用したデータ通信等無線を使用する場合、作物がポイント間に入らないよう作物より高くアンテナを置く等の処置が必要であることが判明した。

Table 3-4 金山パイロットにおける各通信サービスの速度・価格比較

通信方法	上り速度	下り速度	通信費
衛星通信	512 kbps (理論値)	2.5Mbps (理論値)	月約 6 万円 設置工事費約 100 万円
ADSL	130kbps	160kbps	ADSL 料金月 2,816 円 + インターネット料金年会費 15,750 円
モバイル通信 (FOMA, b-mobile)	300kbps	370kbps	月約 1 万円

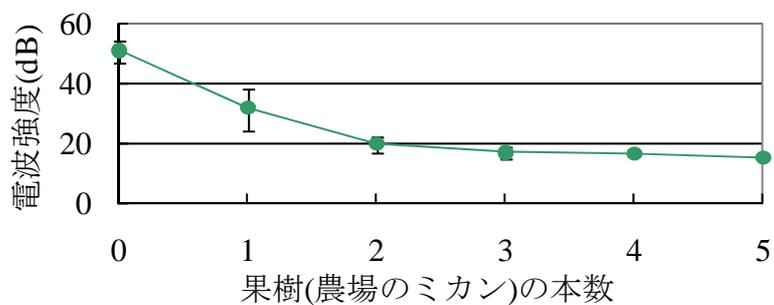


Fig. 3-8 ミカンによる電波の減衰

3.5. 結果・考察

三重県熊野市金山パイロットにおける ADSL、衛星通信、FOMA や b-mobile など携帯電話網を利用したデータ通信の 3 回線の通信速度を比較した。この結果、敷設されている ADSL 回線に比べ FOMA 回線や b-mobile 3G を利用する方が倍以上通信速度が速いことが判明した。金山パイロットの ADSL は本来サービスエリア外であるため、ADSL の通信速度が極端に遅かった。携帯電話網を用いたデータ通信の上り速度 300kbps は圃場から画像データや数値データを転送するには十分であった。

3 回線を価格で比較すると、通信費は ADSL が最も安かった。しかしながら、敷設費用を考えると携帯電話網を利用したデータ通信の方が低価格になった。回線速度測定時には FOMA 回線を利用した通信の使用料が月々約 1 万円であったが、2011 年 1 月現在では月約 5 千円に下落していること、通信キャリア各社の参入により使用可能エリアが農村地域にも広がってきている。また携帯電話網を利用したデータ通信は無線であることから、圃場への設置に柔軟に対応することが可能である。よって、今後農地での利用に携帯電話網を利用したデータ通信が利用される可能性が高い。

Table 3-4 に本研究で使用した Linux Box と USB カメラの費用を示す。これら最低限の機器のみならば、wl500gp を利用したシステムは約 2 万円、eBox を利用したシステムは約 3 万円と低価格でシステムを構築可能であった。十万円以内であったことから、このシステムは農家に導入可能な価格であると言える。通信費用はシステムの機器に比べて割高に思われるが、前述の通り今後より低価格なサービスが提供されている可能性が高いことより、今後低価格化が期待される。

Table. 3-4. システム主要機器の概算コスト

Linux Box	wl500gp	約 1 万円	
	eBox-4300	約 3 万円	
USB webcam	Qcam Orbit AF	約 1 万円	
	EyeToy	千～8 千円	
携帯電話通信利用料			約 1 万円/月

4. フィールドでの実証実験

4.1. 目的

圃場に精密機械を設置する際、降雨などによる水の侵入の防止、夏季の高温への耐熱性の確保、防塵対策が必須である。これらの対策が十分であることを検証し、システムの安定性を証明するため、圃場に本システムを設置し長期間動作させて予備実験を行った。また、予備実験で得られた問題点を改善し、実際の農業現場での稼働を検証するべく、三重県熊野市金山パイロットファームに圃場モニタリングシステムを設置した。金山パイロットファームにはフィールドサーバが設置され、衛星データ通信回線を通じて、気温、湿度、日射量と内蔵カメラで撮影された画像が定期的に三重大学のサーバに転送されている。また、土壌水分センサと土壌水分ポテンシャルセンサが接続されたデータロガーも設置され、不定期に計測データを PC に収集している。

4.2. 予備実験

4.2.1. 実験方法

予備実験は三重大学学内圃場において2回行った。学内圃場で実験を行った理由は、有線の LAN に接続可能であり、システムの不具合が発生した場合にすぐにメンテナンス可能な場所であったからである。先に行った実験を予備実験 1、後に行った実験を予備実験 2 とする。

予備実験 1 は、2008 年 8 月 1 日から 2009 年 1 月 27 日までの約 6 カ月間行った。予備実験を終了した理由は、システムメンテナンスとカメラの変更の為にシステムを回収したからである。設置した機器には、Linux Box として OpenWrt をインストールした wl500gp と、USB カメラとして EyeToy を使用した。これら機器は Fig. 4-1 のように市販の収納ケースを加工した筐体内に配置し、動作するようにした。この筐体にはカメラ用の窓になるよう穴をあけて透明アクリル板を貼り付けている。また、一部に配線用の穴を開けて穴から水等が侵入しないようパテで穴をふさいでいる。

予備実験 2 は 2009 年 8 月 18 日から 2009 年 9 月 9 日までの約 1 カ月間行った。システム回収理由は台風による水没を避けるためである。設置したシステムには、Linux Box に wl500gp、USB カメラに Qcam を使用した他、USB 温度・湿度計も導入した。これら機器は予備実験 1 と同じ筐体に入れ、圃場に設置した。

両実験では、Fig. 4-2 のように遮光シートをかぶせてシステムを設置した。通信には圃場に設置された機器から LAN ケーブルをひいた。

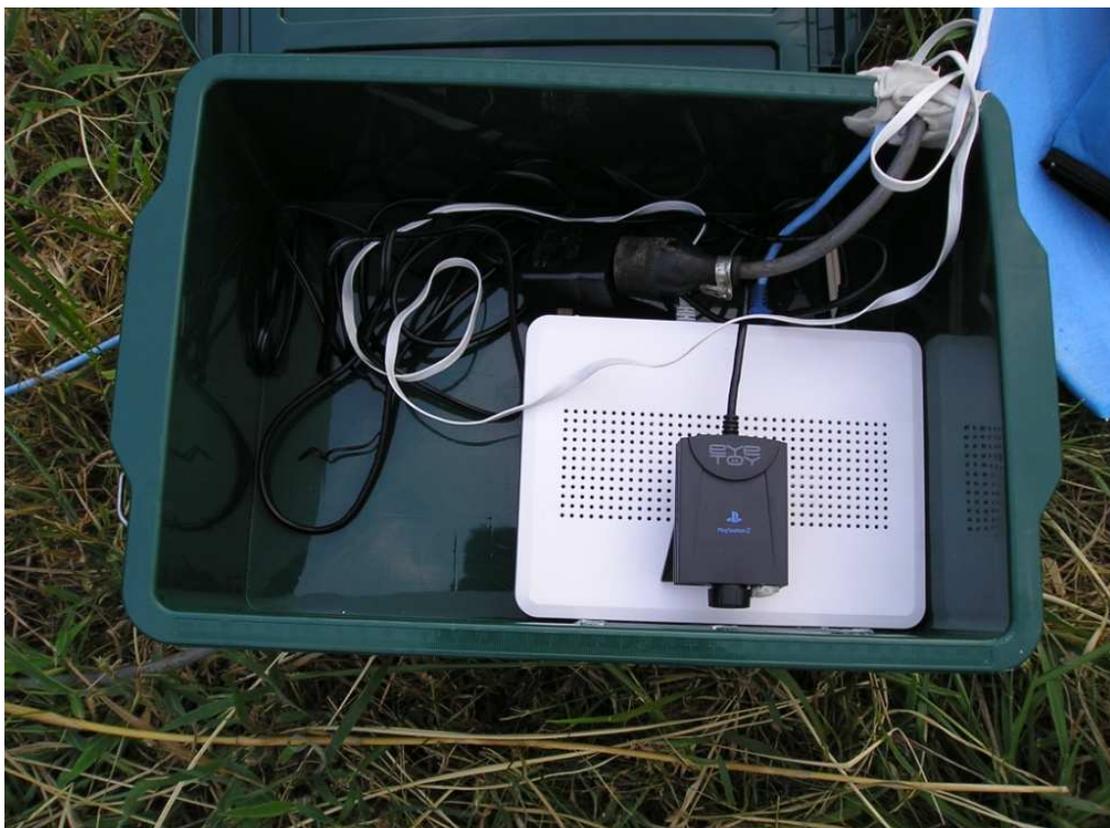


Fig. 4-1 予備実験 1 のシステム外観



Fig. 4-2 予備実験の実験風景

4.2.2. 実験結果

予備実験1では6カ月強システムを設置したところ、停電による停止以外は正常に動作していた。しかしながら、Fig. 4-3に示す通り、EyeToyによって得られた画像は日の出直後や日没前、曇天日など日光の弱い時間帯を除いてほとんどが白く飽和してしまっていた。設置したEyeToyの個体差の可能性があるので、室内で複数台EyeToyを用意して比較実験を行った。この結果、EyeToyの個体差もあるが、個体差以上にEyeToyが屋外撮影に向いていないことが判明した。このEyeToyの個体差は、設定ファイルである程度は調整することが可能であったが、屋外で撮影された画像の飽和が完全に無くなることはなかった。

予備実験2でカメラをQcamに変更したところ、取得画像に飽和は発生しなかった。取得画像をFig. 4-4に示す。また、予備実験2では、USB温湿度計を取り付けて筐体内の温湿度を計測し、Fig. 4-5のように24時間前までの計測結果とともにWeb上に表示するようにした。システム設置場所付近において計測された温度とUSB温湿度計によって計測されたシステム筐体内温度の時間変化をFig. 4-3に示す。2009年は冷夏であったため、圃場で観測された温度は最高気温が30℃程度であった。しかし、Fig. 4-6より筐体内温度が50℃に達する日が多かったこと、8月20日12時頃取得したFig. 4-5より約5時間50℃近い高温状態になっていたことが分かる。



Fig. 4-3 2008年8月13日における本システムの撮影画像（一部抜粋）



Fig. 4-4 2009年8月21日午前9時50分の取得画像

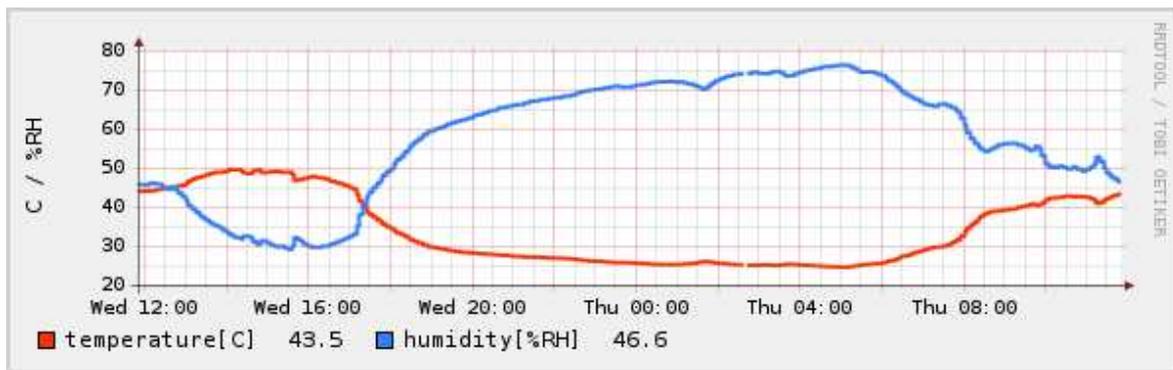


Fig. 4-5 2009年8月19日正午から20日正午までの温度と湿度の変化

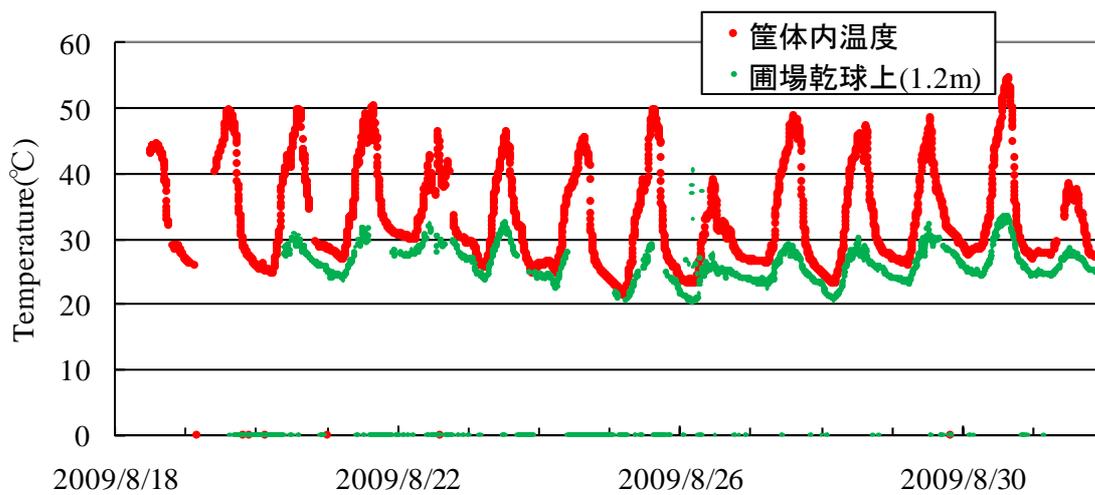


Fig. 4-6 三重大学学内圃場の温度と筐体内温度の時間変化

4.3. ミカン園場での実証実験

4.3.1. 実験方法

設置するシステムには、Linux Box として Debian をインストールした eBox, USB カメラとして Qcam を使用した。雨水や砂塵を防ぐために、Qcam を Fig. 4-4 のようなプラスチック容器で作成された筐体に、eBox を Fig. 4-5 のような筐体に固定し、配線はすべてフレキシ管によって外気にさらされないようにした。これら機器 2010 年 1 月 27 日に小屋脇のミカンの樹が撮影できる位置に設置し、撮影を開始した。小屋には ADSL 回線が敷設されているため、イーサネットケーブルと電源線を小屋から延長して使用した。本実証実験は 2010 年 1 月 27 日からの仮設置と 2010 年 4 月 30 日からの本実験に分けることができる。仮設置と本実験において異なるのは、USB カメラを収納する筐体のみである。

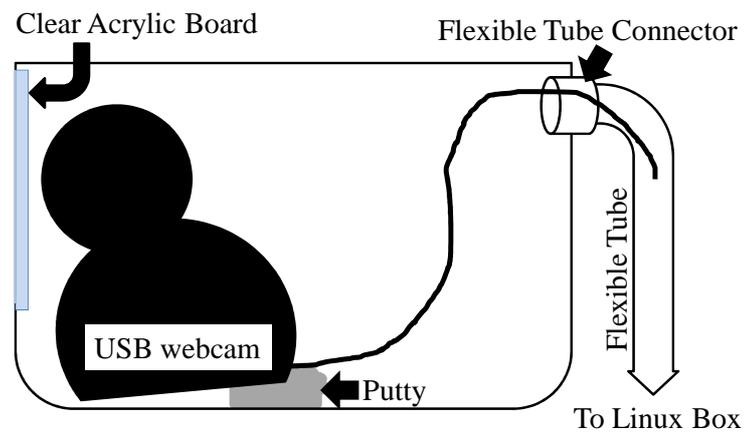


Fig. 4-4 仮設置時の USB カメラ用筐体の概略図



Fig. 4-5 実証実験時の Linux Box 用筐体

4.3.2. 実験結果

Fig. 4-6 の写真は、仮設置から約 3 カ月後の 4 月 30 日に同筐体を撮影したものである。筐体内部に水深 1cm ほどの水が溜まっていたことが見て取れる。幸い、USB カメラの回路部が比較的上部にあったため、システムは動作し続けていたが、至急改善する必要があったため、カメラの筐体を Fig. 4-7 で示す塩ビ管の筐体に変更した。筐体は市販されている塩ビ管で作成し、筐体底部は密閉せず防虫ネットのみとした。この結果、内部に水が溜まることなく 2011 年 2 月 8 日現在に至るまで稼働し続けている。また、筐体を変えるにあたり、カメラ用の窓をアクリル板からガラス板に変更した。これはアクリル板を使用しているフィールドサーバにおいて、写り込みや光の反射が報告されていること、Fig. 4-8 上画像にあるように旧筐体で撮影した画像にも反射と見られるものが写りこんでいたためである。ガラス板に変更した後の画像が Fig. 4-8 下の画像である。ガラス板に変更てからは、Fig. 4-8 のような現象は発生していない。

Fig. 4-9 にフィールドサーバで観測された 2010 年 4 月 28 日から 9 月 15 日までの気温変動を示す。通気性の悪い筐体内では、日射の吸収により Fig. 4-9 で示された温度より高くなっていると予想されるが、本システムはその間も不調無く動作していた。このことから、eBox を利用したシステムも耐熱性に優れていることが分かった。



Fig. 4-6 仮設置時の USB カメラ用筐体

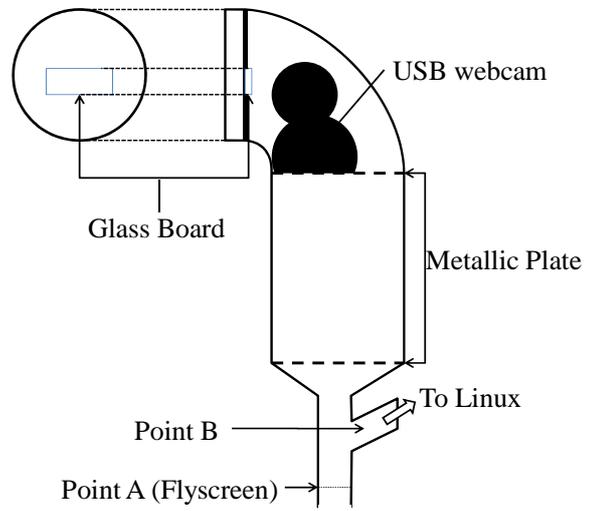


Fig. 4-7 本実験時の USB カメラ用筐体



Fig. 4-8 上：仮設置時である 2010 年 4 月 30 日 11 時に取得した画像,
下：本実験時である 2010 年 5 月 1 日 11 時に取得した画像

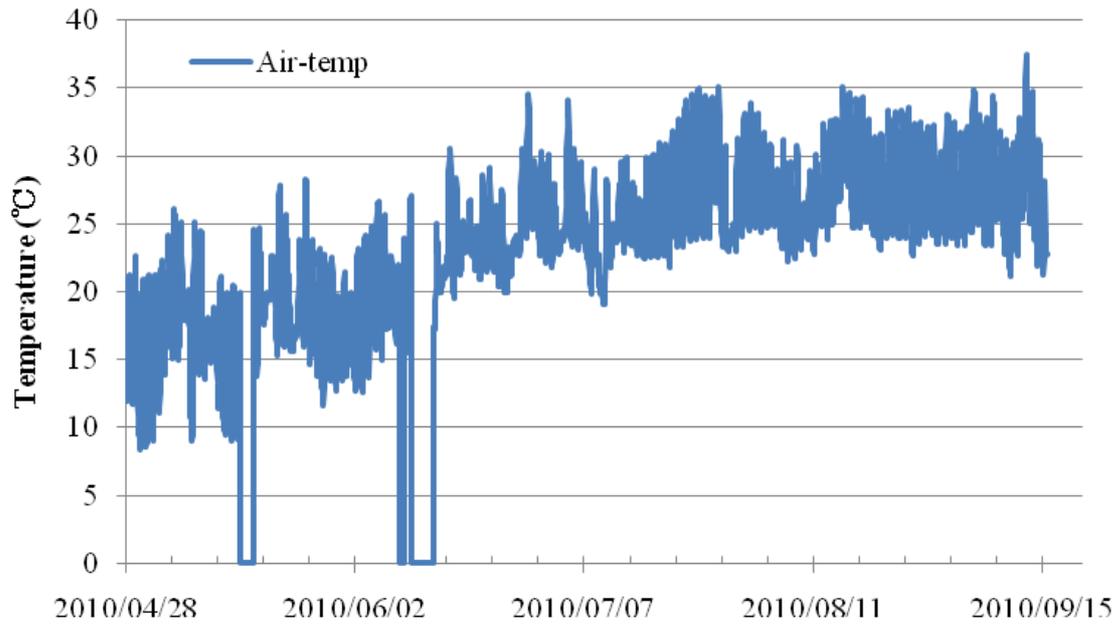


Fig. 4-9 金山パイロットのフィールドサーバが計測した温度の時間変化

4.4. 考察

予備実験 1 と 2 で EyeToy と Qcam の 2 つの USB カメラを使用した。この結果、EyeToy は飽和が発生しやすく、圃場への設置に向いていないことが判明した。対して、Qcam では画像の飽和は発生しなかった。したがって、圃場モニタリングシステムを構築する際、安価な USB カメラを使用するよりも、ある程度高く画像の質の劣化が少ない USB カメラを選択する必要があることが分かった。

Fig. 4-3 より、予備実験で計測された本システムの筐体内温度は、圃場で計測された温度に比べ最大温度が 10℃以上上昇していることが分かる。最低温度は数℃程度しか変わらず、連日 10℃以上の、時には 20℃近い温度変化にさらされていたことが分かる。また、筐体内温度は連日 40 度を超え、50℃に達する日も数日存在することが分かる。同時に、Fig. 4-2 より、8 月 19 日における筐体内温度は 50℃に近い状態が約 4 時間ほど維持されていることも分かる。したがって、この設置期間内に、設置されたシステムはかなり過酷な温度変化・高温状態にさらされていたことが判明する。しかしながら、システムはこのような過酷な温度変化や高温にさらされても安定的に稼働していた。このことから、本システムの圃場における耐熱性は万全であると言える。

Fig. 4-6 より、約 3 か月の間に筐体内に水が溜まっていることが確認できる。この水が溜まった原因には、密閉したと思っていた筐体に微小な穴が開いており外気が取り入れられたこと、カメラやフレキ管の先にある Linux Box が動作する際に熱を放出するため筐体内が外気に比べて暖かく、昼夜の寒暖差によって筐体内部で結露が発生したためと考えられる。筐体を Fig. 4-7 に変更してからは、筐体に結露水等が溜まることはなく、システムも安定的に稼働している。したがって、筐体を工夫したことで、耐水性等の耐環境性の条件を満たしたと言える。

5. 画像性能評価

5.1. 目的

画像から圃場の状態を評価する場合、画像が正確に物事をとらえているか否かが非常に重要になる。予備実験1を行った結果、EyeToyで取得した画像は飽和してしまい圃場の様子を見ることはできなかった。Qcamの画質は予備実験や実証実験を通じて目視では問題がないように見えたが、実際にどの程度の照度まで飽和せずに撮影可能であるのか、色を正しく取得しているのかを検証する必要があった。このため、Qcamの画像性能評価実験を行った。

5.2. 評価方法

三重大学大学院生物資源学研究科生物情報工学研究室の協力により撮影用暗室(Fig. 5-1)にQcamを固定し、90ルクスから500ルクスまで多段階に変化させてカラーチャートを撮影した。カラーチャートには赤、緑、青、白、黒のチャートから構成されているものを使用した。撮影には、光源となる蛍光灯が画像内に入るものと、蛍光灯が画像内に入らないものの2パターンを行った。また、より高い照度における性能評価のため、三重大学大学院生物資源学研究科棟廊下に設置された撮影台(Fig. 5-2)を用いて、日陰条件下(2,200ルクス、700ルクス)でも同様に撮影を行った。得られたカラーチャート画像と、同研究室より提供された自作プログラムにより、各照度におけるカラーチャートの各チャート内のRGB値を算出した。



Fig. 5-1 暗室での撮影風景



Fig. 5-2 廊下での撮影風景

5.3. 結果・考察

Fig. 5-3 に 100 ルクス下で撮影されたカラーチャートと 2200 ルクス下で撮影されたカラーチャートを示す。2つの写真を見比べると、2200 ルクスで撮影されたカラーチャートの赤チャートが 100 ルクスで撮影されたカラーチャートに比べて色が薄いことがわかる。これは 2200 ルクスで撮影されたカラーチャートにおいて赤が飽和に近い状態であるためである。Qcam で撮影したカラーチャートにおける赤、緑、青の各チャートの RGB 値と照度の関係を Fig. 5-4 に、一眼レフで撮影したカラーチャートにおける各チャートの RGB 値と照度の関係を Fig. 5-5 に示す。

Fig. 5-4 と Fig. 5-5 を比較すると、一眼レフの RGB 値が照度とともに増加することに対し、Qcam での RGB 値は 500 ルクス内であれば高い値でほぼ一定を保つことが分かる。また、Qcam は 2200 ルクス等 500 ルクスを超える照度で撮影した場合は、赤チャートがすべて最大値 255 に近くなるという飽和状態になっている。対して青チャートは大きく変動することはなかった。これは元々 Skype やビデオチャット用に作成された Qcam が、屋内で顔が認識可能なように内部で自動的に調整しているために 500 ルクス以下で変動が少なく、高い照度では自動調整の許容を超えてしまい飽和してしまうと考えられる。

高い照度の時に主に赤チャートで飽和が発生したが、緑や青チャートでは飽和には至らなかった。また、飽和が起こった際も自動調整の為か形状や輪郭は判別可能である。したがって、Qcam の屋外使用は、赤が飽和しやすいというデメリットはあるものの、屋外設置しても画像解析のソースとなりうると思われる。

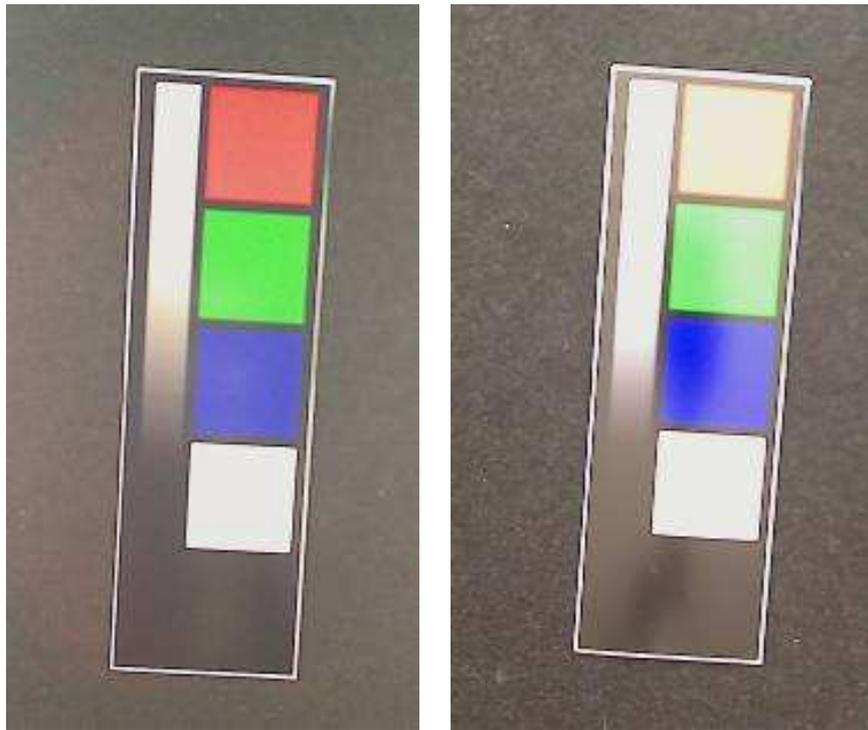


Fig. 5-3 カラーチャート画像 (左: 100lux; 右: 2200lux)

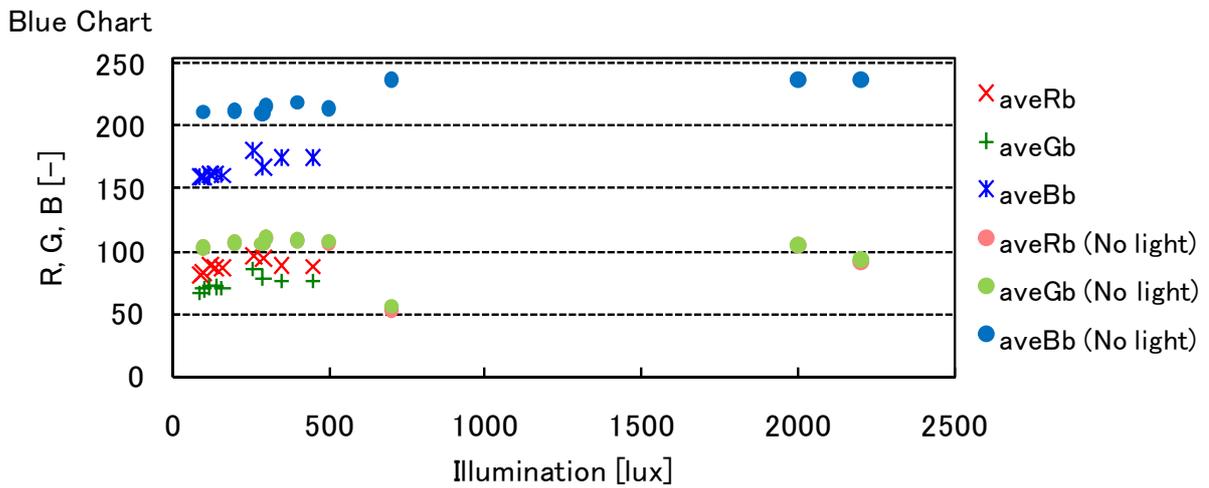
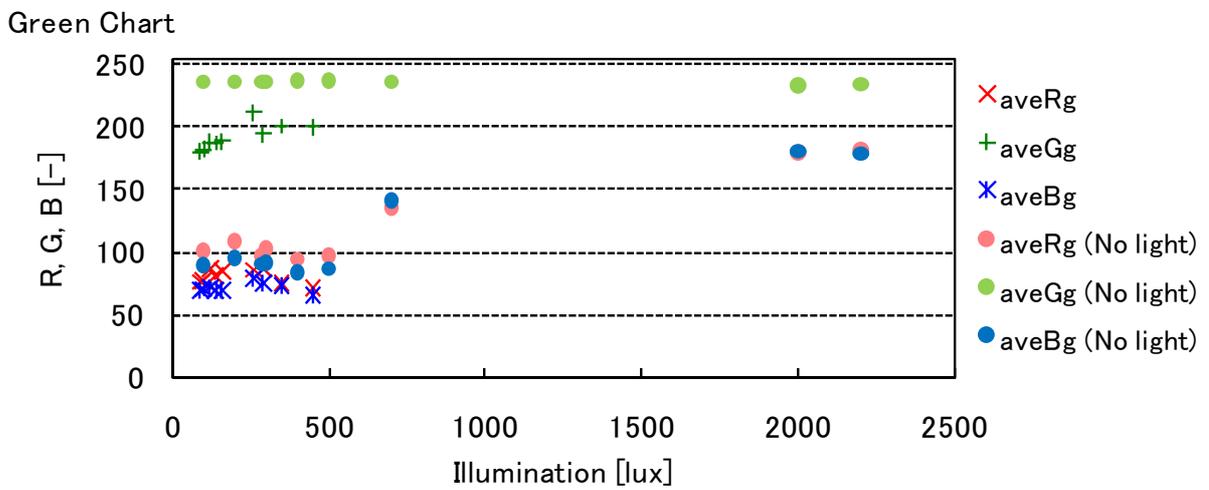
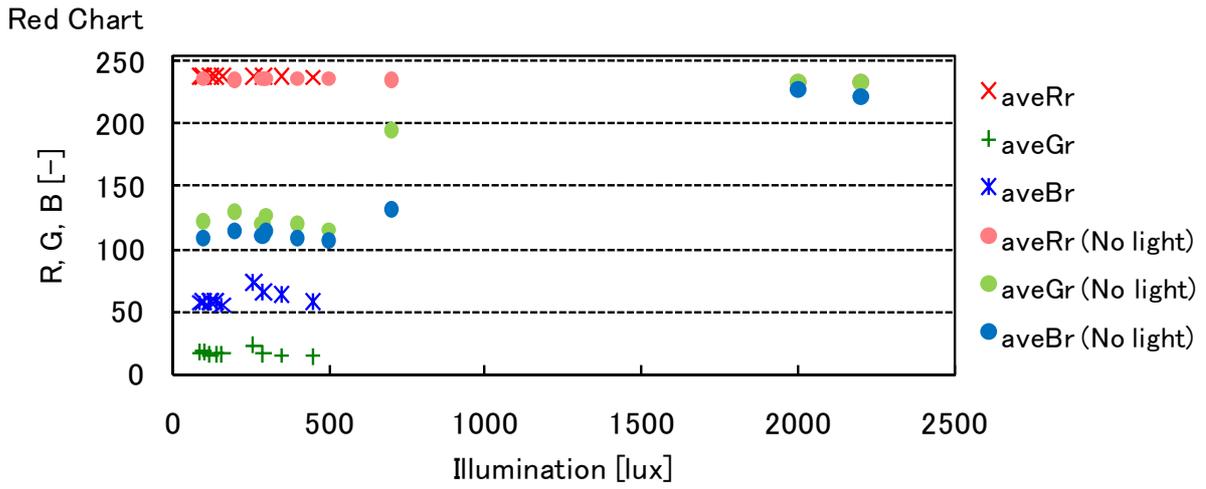


Fig. 5-4 Qcam で撮影した画像の R, G, B 値と照度の関係

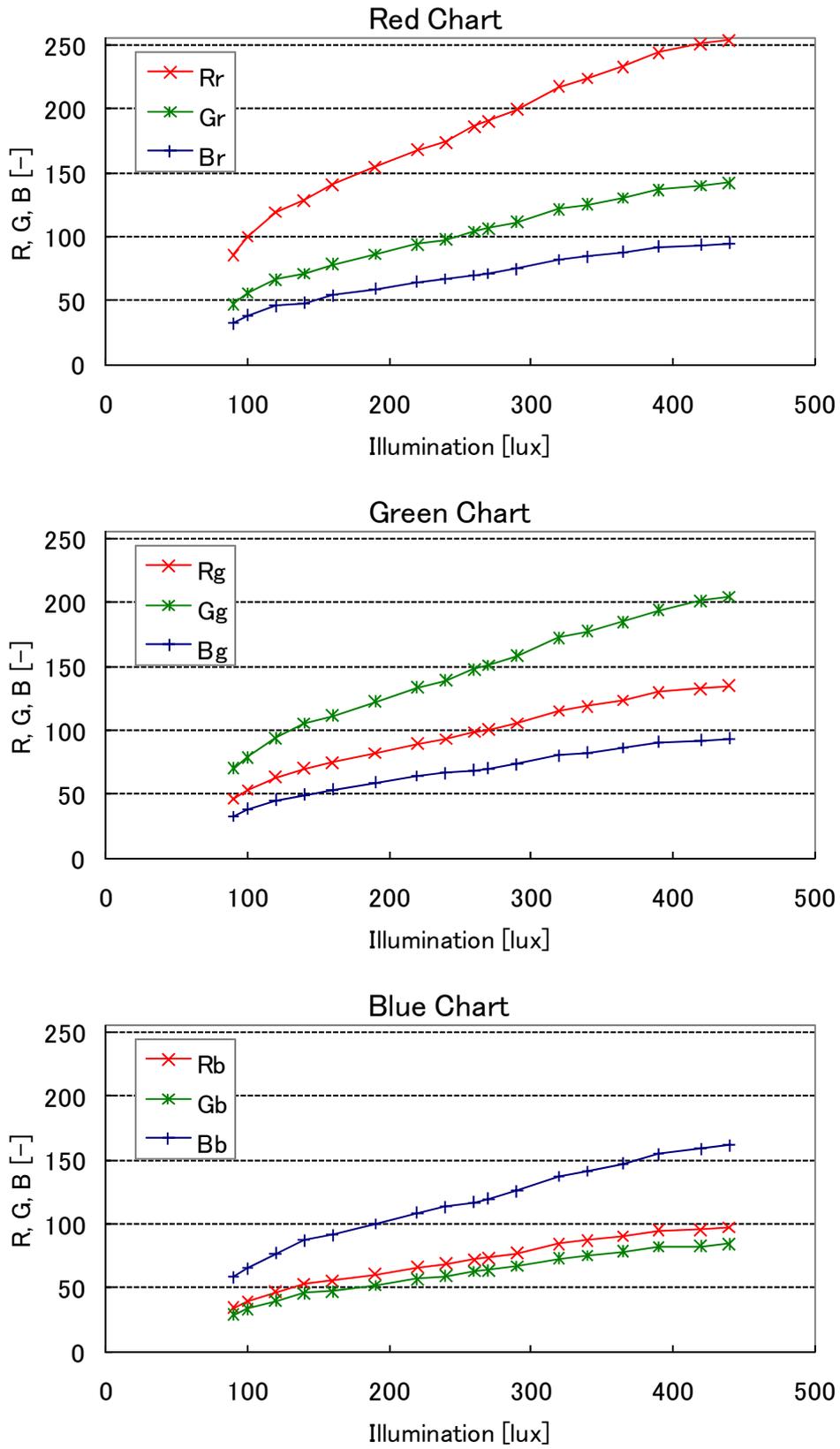


Fig. 5-5 一眼レフで撮影した画像における R, G, B 値と照度の関係

6. 画像解析

6.1. 目的

本研究で作成したシステムで、低価格で安定的に高精細な画像を取得可能になった。しかしながら、単に画像を収集しただけでは、圃場の変化や作物の成長を見るために多くの画像を見なければならぬ。したがって、画像から変化量を読み取る技術もまた必要になる。

背景で述べたとおり、高品質ミカンの栽培においては適度な水ストレスをミカンに与えることが必要である。水ストレスをかける時期は果実肥大期と成熟期であるため、水ストレスを与えることで果実の肥大が抑制される。つまり、未熟なミカン果実の肥大変化量によって水ストレスの程度をある程度知ることが可能である。したがって本章は、自然背景で撮影された温州ミカンの未熟果実から肥大量を得るために、未熟ミカン果実の検出を行う手法の検討を行った。

6.2. 使用データおよびライブラリ

温州ミカンの未熟果実の検出を行う画像には、本システムとは別に金山パイロットに設置された Birdcam から得られた画像(Fig. 10)を選択した。Birdcam とは WINGSCAPES 社が販売している鳥獣観察用屋外カメラである。仕様を Table 6-1 に示す。屋外用であるため耐環境性に優れており、単 1 電池 4 本で約 3 カ月間動作する。800 万画素と高精細な画像か音声付きのビデオを取得可能であり、設定すれば赤外線センサを用いて動物が来たときの写真・ビデオを取得することも可能である。

Birdcam の画像を用いた理由は、実証実験で設置したシステムの設置箇所が果樹と離れていたため、システムで得られた画像では果実肥大をとらえることが不可能であったためである。これからも、圃場モニタリングシステムの運用にあたり、電源や通信手段の確保が重要であることが再認識された。

画像解析プログラムの作成には、Microsoft Visual C++と OpenCV ライブラリ(<<http://opencv.jp/>>, 2011/01/31 参照)を使用した。OpenCV ライブラリとは、コンピュータビジョン用プログラム作成の為の無償ライブラリである。500 以上の解析用アルゴリズムを持つこと、Wiki などの知識ベースがインターネット上に多く存在していることから、OpenCV の利用を決めた。

Table 6-1 Birdcam の仕様(Birdcam 2.0 Web サイトより一部抜粋)

Photo Format	JPG files, 3264x2448, 2024x1536, 1024x768
Video Format	AVI files, 640x480
Image Output	USB, SD card (optional)
Built-in Memory	32MB
Power Supply	4 D-cell Batteries
Battery Life	12 weeks average



Fig. 6-1 画像解析用サンプル画像

6.3. 解析手法

果実検出手法には色彩比，エッジ検出，最大値フィルタ，最小値フィルタを利用して自然背景中からパパイヤの未熟果実の検出ロジックを提案している Limsiratana and Ikeda(2005)の手法を参考にした．Limsiratana and Ikeda(2005)の手法を視覚的に示した図が Fig. 6-3 である．それぞれの処理を以下に述べる．

(1) 色彩比

色彩比とは，各画素における R, G, B 値の比である．Limsiratana and Ikeda(2005)は，パパイヤの幹や土壌などの背景と果実や葉との間に色彩比の違いを発見したことから，土壌や幹における色彩比の範囲内ならば白(255)，範囲外ならば黒(0)に2値化させている．元画像から色彩比の処理が行われた画像が Fig. 6-3 の(b)にあたる．今回は Limsiratana and Ikeda(2005)の色彩比で範囲指定する方法と独自に考案した方法を比較した．

(2) エッジ検出

エッジ検出は，各画素値の変化の度合いから濃淡勾配を算出し，画像内のオブジェクトの端(エッジ)を検出する技法である．算出方法には数々の手法があるが，Limsiratana and Ikeda(2005)は Canny(1986)が提案したエッジ検出手法(以降 Canny エッジ検出法)を用いている．Canny エッジ検

出法の概略を以下に記述する。

Canny のエッジ検出の手法は大きく分けて平滑化，勾配検出，細線化処理，閾値処理(Double Thresholding)，ヒステリシスによるエッジ追尾(Edge Tracking by Hysteresis)の 5 段階に分けることができる。まず平滑化では，グレースケールに変換された画像をぼかすことが行われる。画像のぼかしには Equation (1)に示す標準偏差 $\sigma = 1.4$ のガウシアンフィルタが使用される。

$$B = \frac{1}{159} \begin{bmatrix} 2 & 4 & 5 & 4 & 2 \\ 4 & 9 & 12 & 9 & 4 \\ 5 & 12 & 15 & 12 & 5 \\ 4 & 9 & 12 & 9 & 4 \\ 2 & 4 & 5 & 4 & 2 \end{bmatrix} \quad (1)$$

その後，勾配検出では，Equation (2)の Sobel フィルタを用いて画像中の x 方向，y 方向の勾配が計算される。

$$B_x = \begin{bmatrix} -1 & 0 & 1 \\ -2 & 0 & 2 \\ -1 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad B_y = \begin{bmatrix} 1 & 2 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \\ -1 & -2 & -1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

x 方向，y 方向の勾配がそれぞれ算出された後，同時に勾配の大きさであるエッジ強度と勾配方向が計算される。x 方向の勾配を G_x ，y 方向の勾配を G_y とすると，エッジ強度 G と勾配方向 θ は Equation (3)，(4)の様になる。

$$G = \sqrt{G_x^2 + G_y^2} \quad (3)$$

$$\theta_a = \arctan\left(\frac{G_y}{G_x}\right) \quad (4)$$

ここで $12.5^\circ \leq \theta_a < 67.5^\circ$ ならば $\theta = 45^\circ$
 $67.5^\circ \leq \theta_a < 112.5^\circ$ ならば $\theta = 90^\circ$
 $112.5^\circ \leq \theta_a < 157.5^\circ$ ならば $\theta = 135^\circ$
 $0^\circ \leq \theta_a < 12.5^\circ$ または $157.5^\circ \leq \theta_a < 180^\circ$ ならば $\theta = 0^\circ$ とする。

細線化処理は非最大値抑制の手法を基に行われる。ある画素のエッジ強度が勾配方向前後にある画素のエッジ強度を共に下回った場合，そのエッジ強度を 0 にする処理が行われる。この結果，ぼかして太くなったエッジは細くなる。

次は閾値処理である。閾値 1 つでは判定するのは難しいため，閾値を 2 つ作成し，グレーゾーンを作ることによって判断を行う。2 つの閾値のうち，値の大きな閾値を(HT)，値の低い閾値を(LT)とすると，以下の条件よりエッジか否かを判定する。

1. HT より値の大きいエッジ強度の画素はエッジ
2. LT より値小さいエッジ強度の画素は非エッジ
3. LT 以上 HT 以下のエッジ強度の画素はグレーゾーン

このグレースケールがエッジか否かを判定するのが最後のヒステリシスによるエッジ追尾の処理である。この処理によって、グレースケールのうちエッジに結合している画素はエッジに、そうでないところは非エッジと判定される。これによりすべての画素でエッジか非エッジか分類され、エッジ検出の画像を取得可能である。

(3) 最大値フィルタ, 最小値フィルタ

Fig. 6-3 の (c) が (b) の画像に 13×13 画素の最大値フィルタをかけた画像, (e) が (d) の画像に 17×17 画素の最小値フィルタをかけた画像である。最大値・最小値フィルタは、ある画素において、その画素を中心としてそれぞれ指定した領域内で最も大きい値を中心画素に代入するものである。用例を Fig. 6-5 に示す。Limsiroratana and Ikeda (2005) ではエッジ検出後など 2 値化された画像を使用しているため、最大値フィルタを使用した場合はフィルタ内に白 (255) があればそれが代入され、最小値フィルタを使用した場合はフィルタ内に黒 (0) が含まれればそれが中心に代入される。最大値フィルタを使用した結果、パパイヤの葉などエッジが細かく作られている箇所が白で塗りつぶされ、最小値フィルタを使用した結果、最大値フィルタによって実際のパパイヤ果実の領域より小さくなっている領域を拡大することができる。

本研究では、まず、Fig. 6-4 のように圃場で撮影された高精細画像の一部分を切り出し、葉、土壌、果実の色彩比を比較することで、ミカンでも同様な違いが見られるかを試した。次に、Canny エッジ検出法と最大値フィルタを組み合わせることでパパイヤで得られた結果と比較した。最後に、上記 2 つの出力結果を合成し、未熟ミカン果実が検出可能か否かを検討した。

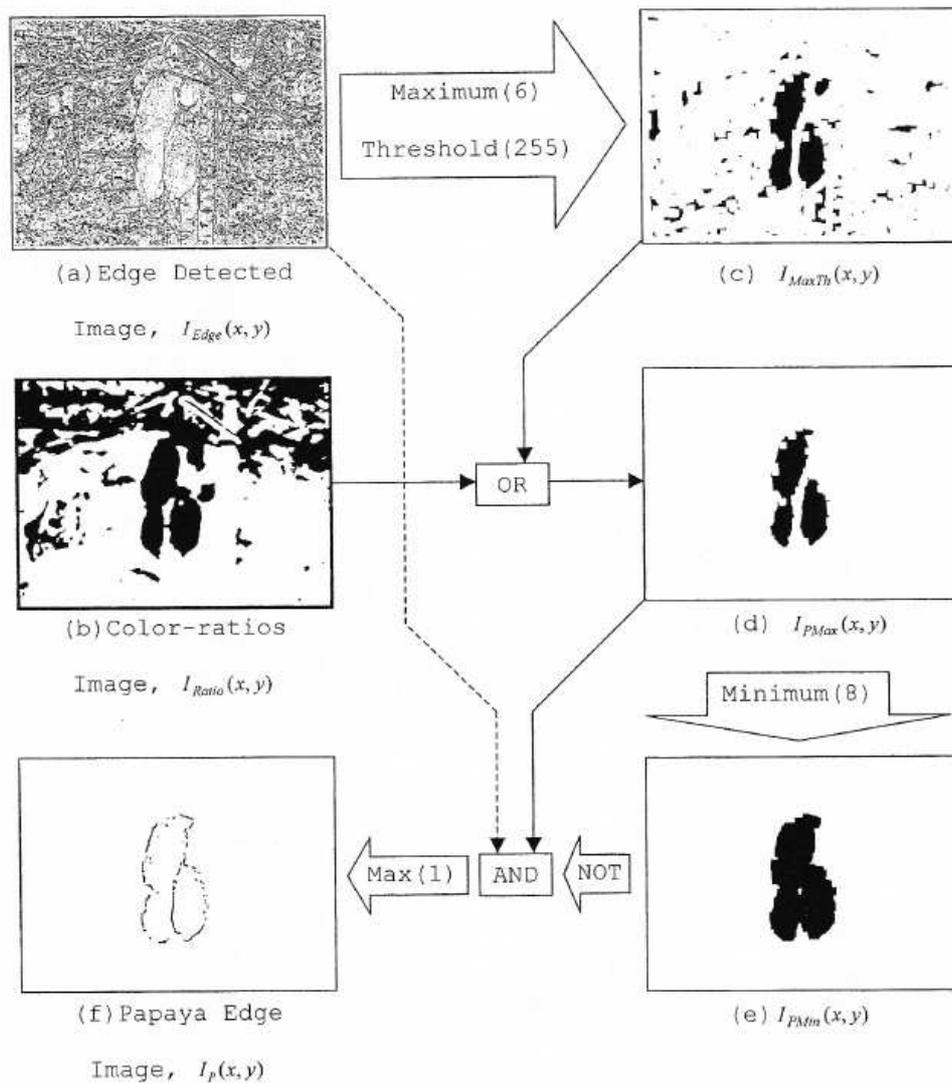


Fig. 6-3 パパイヤの未熟果実の検出手法 (Limsiroratana and Ikeda, 2005 より引用)

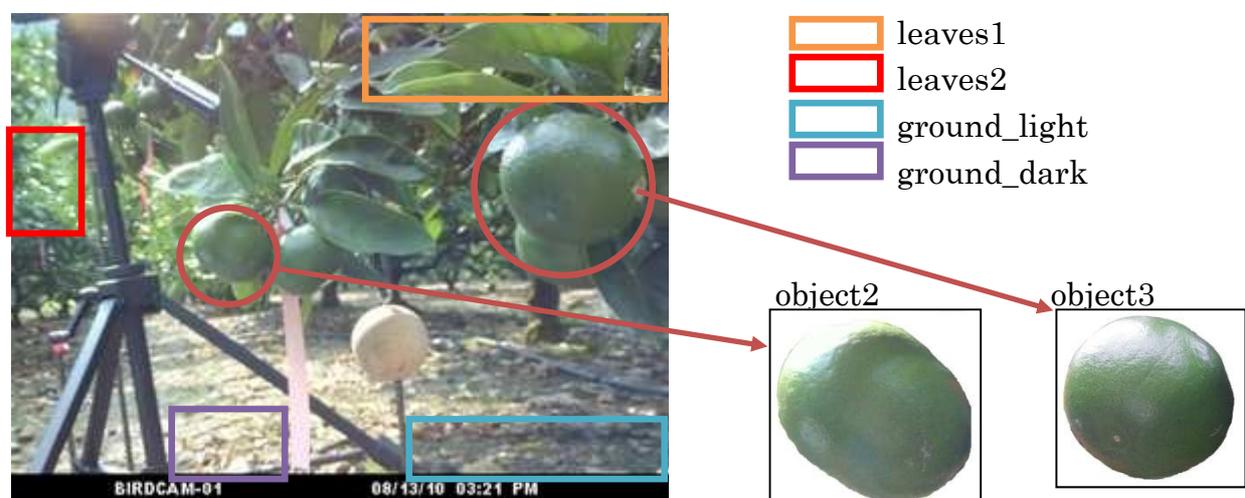
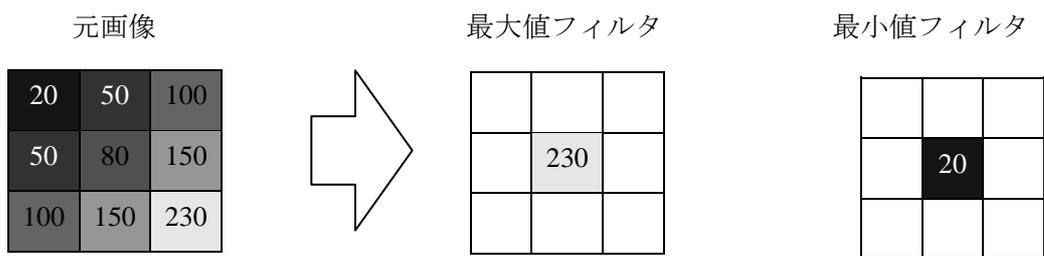


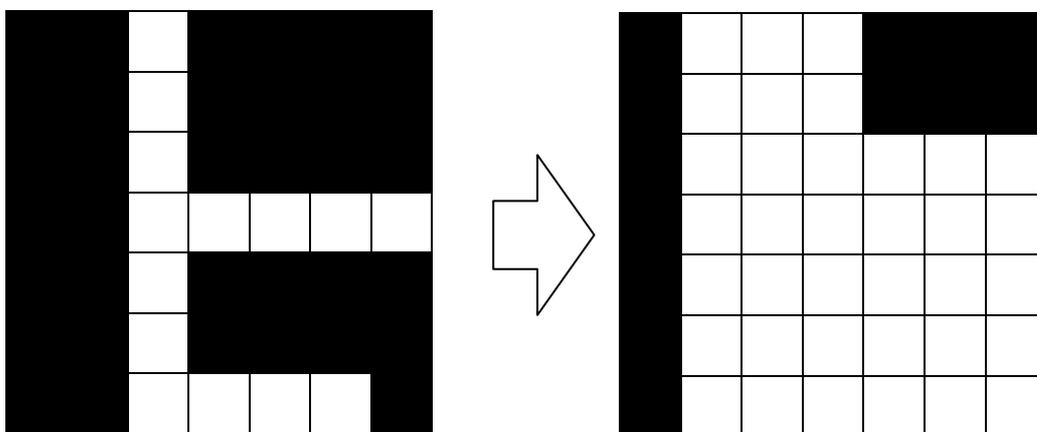
Fig. 6-4 サンプル画像の切り取り箇所

3×3 最大値・最小値フィルタの原理



2 値画像を用いた例

最大値フィルタ(3×3 の場合)



最小値フィルタ(3×3 の場合)

2 値画像の場合

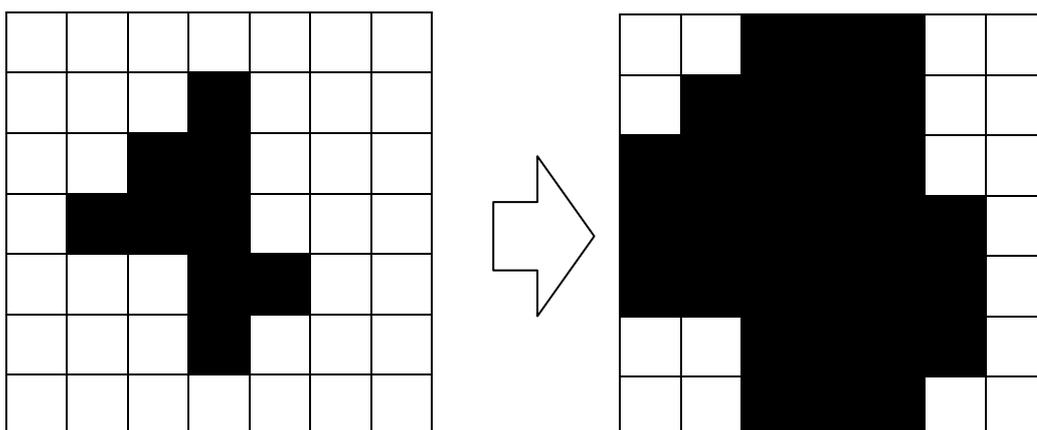


Fig. 6-5 最大値・最小値フィルタ模式図

6.4. 解析結果

6.4.1. 色彩比

葉、土壌、果実領域の色彩比をもとめ、ヒストグラムとして示したものが Fig. 6-6 である。x 軸は色彩比で、ヒストグラムの間隔は 0.05 である。object2 と object3 は果実領域以外を白く塗っているため、色彩比算出においては R, G, B 値がすべて 255 である画素はこのヒストグラム作成には除外している。したがって、y 軸は画像のうちヒストグラム作成に関与した画素の総数における割合を示している。

Fig. 6-6 の R/G のグラフより、土壌領域と未熟ミカン果実領域や葉の領域ではピークがずれていることが分かる。土壌のピークが若干ミカンの領域に近いが、この傾向は Limsiratana and Ikeda(2005)と同じである。G/B と R/B の日向土壌領域も同じ傾向を示した。しかしながら、R/B における日陰土壌領域では色彩比が 1 を下回り、日向土壌領域の色彩比がや Limsiratana and Ikeda(2005)の結果は 1 を上回っていた。そこで、今回は日陰土壌領域と日向土壌領域で色彩比の範囲を分けて定義し、土壌領域の除外を行った。色彩比の領域は、Limsiratana and Ikeda(2005)で行われている、各色彩比において頻度が 2%を超える領域とした。

この結果、日陰土壌領域と日向土壌領域の色彩比は以下ようになった。

日陰土壌領域： $0.70 < R/G < 1.16$

$0.60 < R/B < 1.3$

$0.71 < G/B < 1.13$

日向土壌領域： $0.80 < R/G < 1.19$

$0.74 < R/B < 1.45$

$0.90 < G/B < 1.38$

上記領域に合致する画素を白、合致しない画素を黒にした出力画像が Fig. 6-7 である。土壌領域に属する箇所は半分程度は白くなっているものの、土壌領域すべてを白にすることはできなかった。

そこで、より果実以外の領域を除外するために新しい方法として色分布を基に分類を行う手法を考案した。Fig. 6-8 から Fig. 6-10 に各種サンプル画像の色分布を示す。x 軸、y 軸に R, G, B の値のいずれか 1 つずつをとり、それら 2 つの値に該当する個所には画素の個数に対応した色を塗った、黒線は色彩比 1 の関係を示している。

Fig. 6-8 にミカンの未熟果実画像である object2 と object3 の色分布を示す。object3 が近景のミカン、object2 が遠景のミカンである。グラフより、どちらも R/G が色彩比 1 以上の個所に多く分布していること、B/G が色彩比 1 以下の領域に大半の画素が含まれていることが分かる。これは、ミカンの未熟果実は G の値が R, B の値より若干大きいためであると考えられる。また、遠景になるほど R, G, B の値がすべて大きくなるが、上記のような傾向は変わらないことが分かる。

Fig. 6-9 は圃場土壌、Fig. 6-10 は葉の領域の色分布である。ground_light が日向、ground_dark が日陰、leaves1 が近景の葉、leaves2 が遠景の葉に対応している。どちらもミカンの未熟果実同様ほぼ色彩比 1 付近に分布しているが、ミカンの未熟果実に比べて分散していることが判明した。

この分散が R, G, B の値が比較的高い箇所に分布しているため、色彩比を用いるとこの分散のみを消し、果実領域を残すことは難しい。したがって、R, G, B の範囲を

$$R+50 < G < R-40$$

$$R+40 < B < R-60$$

$$G+20 < B < G-60$$

と定め、の3つの条件を満たす場合は黒、1つでも満たさない場合は白として塗り分けた。画像を塗り分けた結果が Fig. 6-11 である。色彩比を用いた場合とは逆に、土壌領域はほとんど白とすることができなかったが、色彩比を用いた場合に比べ、葉など土壌以外の領域を除外できることが判明した。

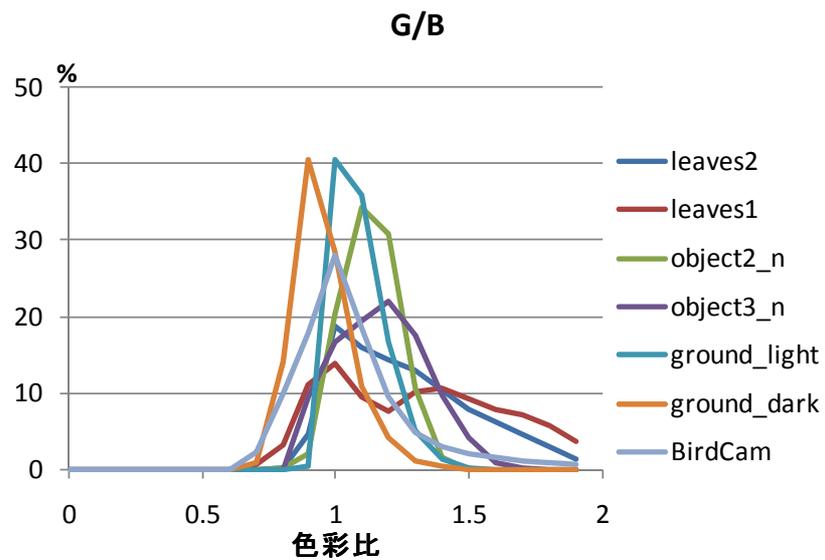
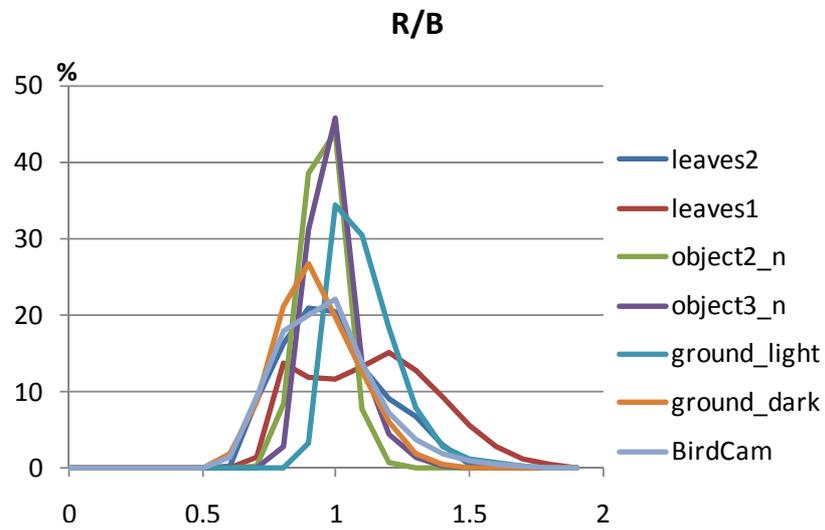
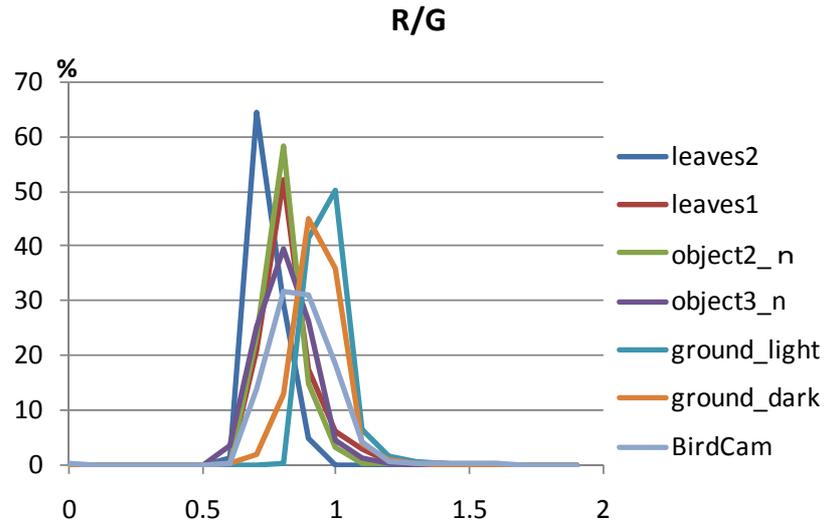


Fig. 6-6 高精細画像における，葉，土壤，果実の色彩比



Fig. 6-7 色彩比に基づいて2値化された画像

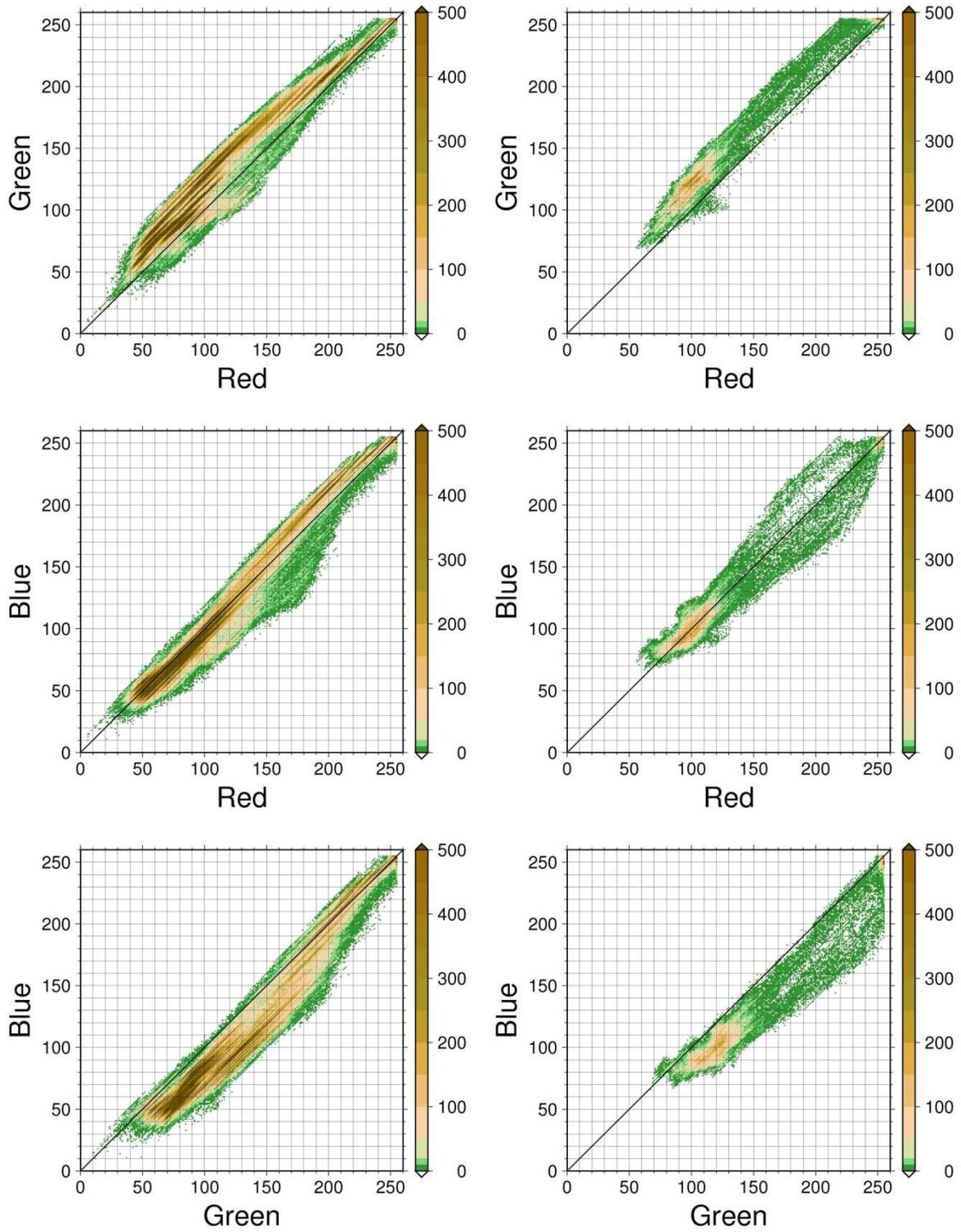


Fig. 6-8 ミカンの未熟果実の色分布 (左:object3 右:object2)

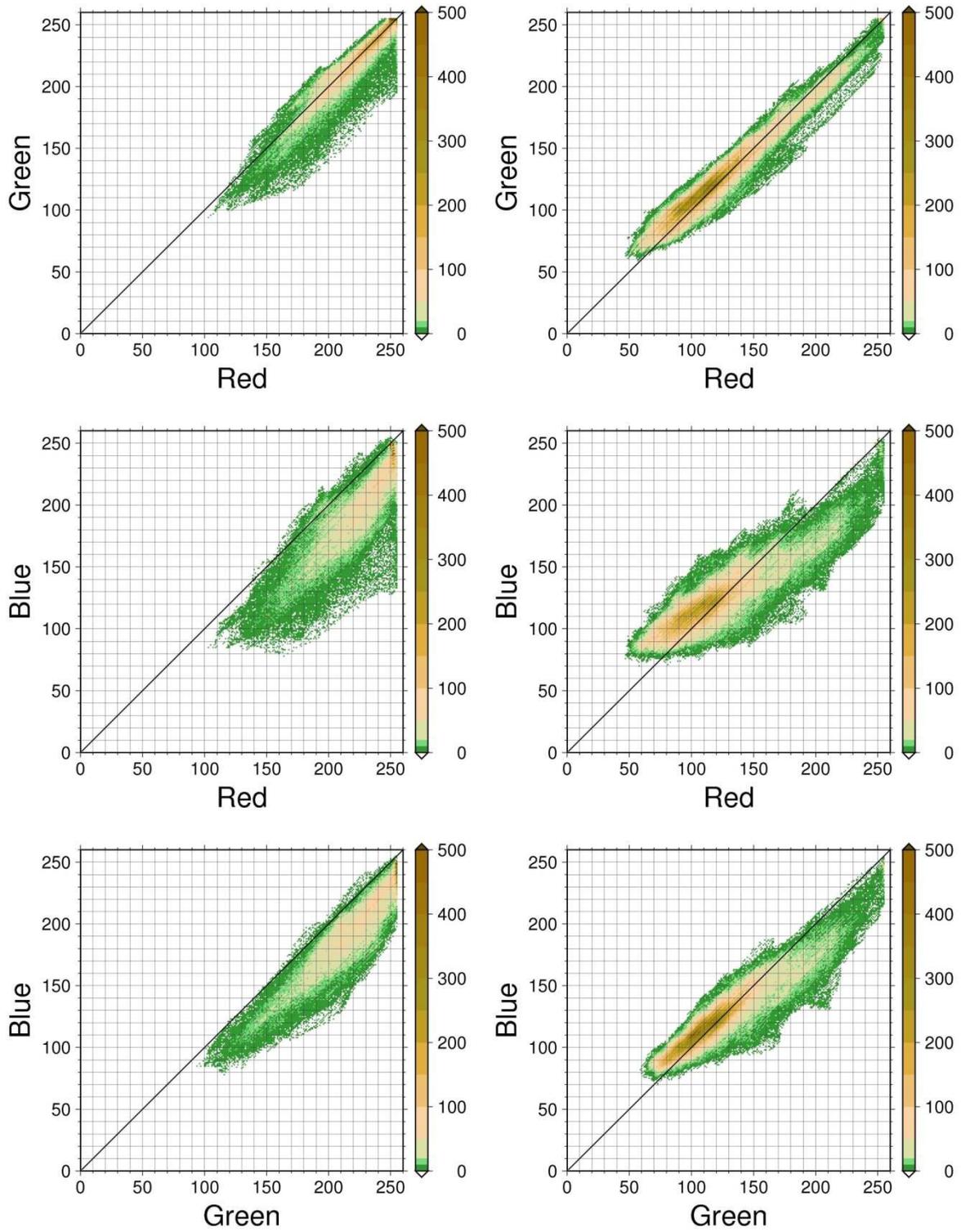


Fig. 6-9 土壤の色分布 (左:日向土壤領域 右:日蔭土壤領域)

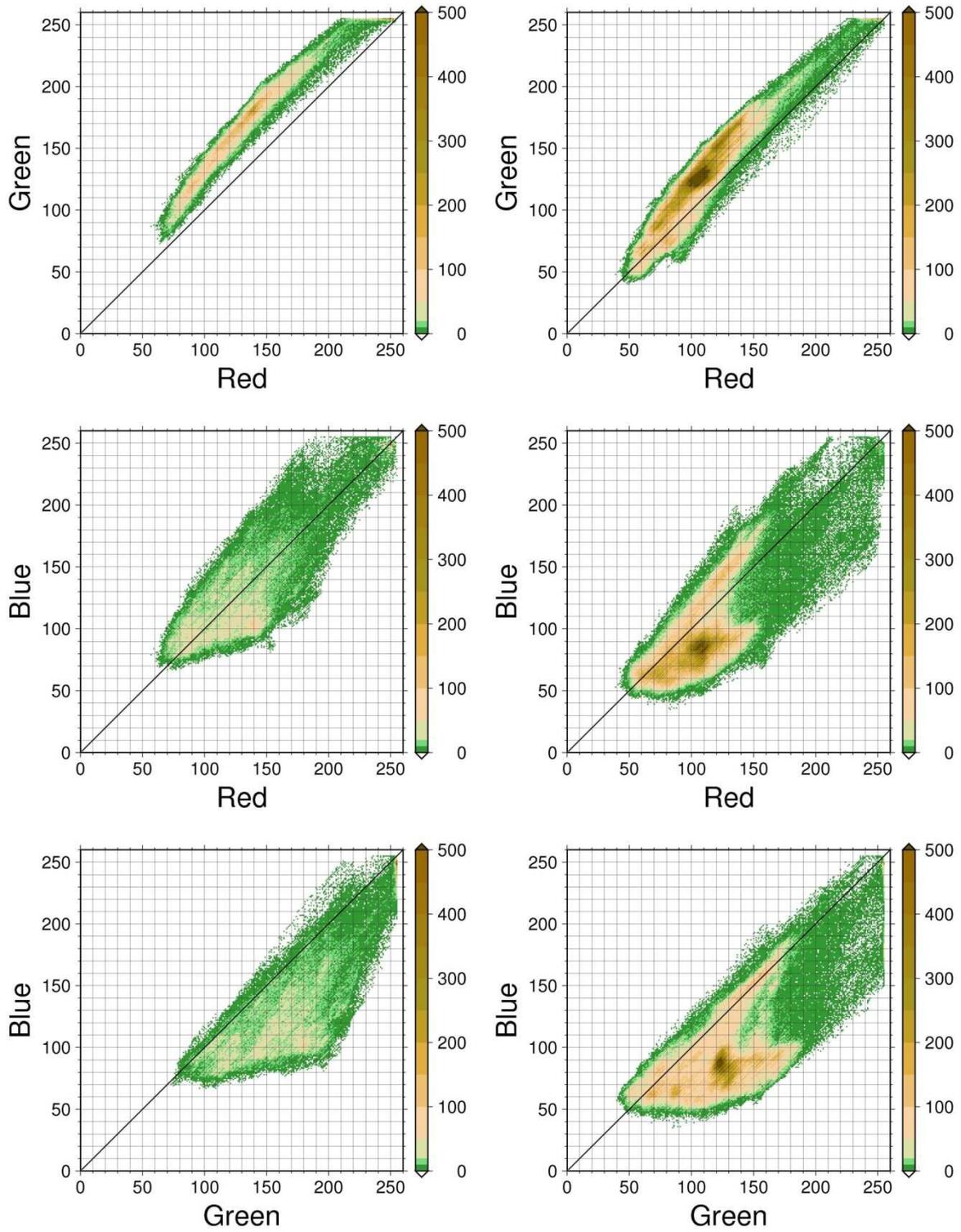


Fig. 6-10 葉の色分布 (左:leaves2, 右:leaves1)



Fig. 6-11 色に基づいて 2 値化した Birdcam の画像

6.4.2. エッジ検出

つぎにエッジ処理の結果である。エッジ検出には Limsiroratana and Ikeda (2005) と同様に Canny のエッジ検出法を用いた。Canny エッジ検出には OpenCV 内の関数を利用した。Canny のエッジ検出法には 2 つの閾値があり、閾値の取り方によって結果が変わる。また、Birdcam の画像と Birdcam を 100 分の 1 に圧縮した画像を同じ閾値でエッジ検出を行った場合、結果が大きく異なってしまう(Fig. 6-12)。これは圧縮することで隣接する画素間の勾配が激しくなったためであると考えられる。今回は任意に選んだ閾値(10, 50), (60, 100), (100, 150)の画像を使用した。

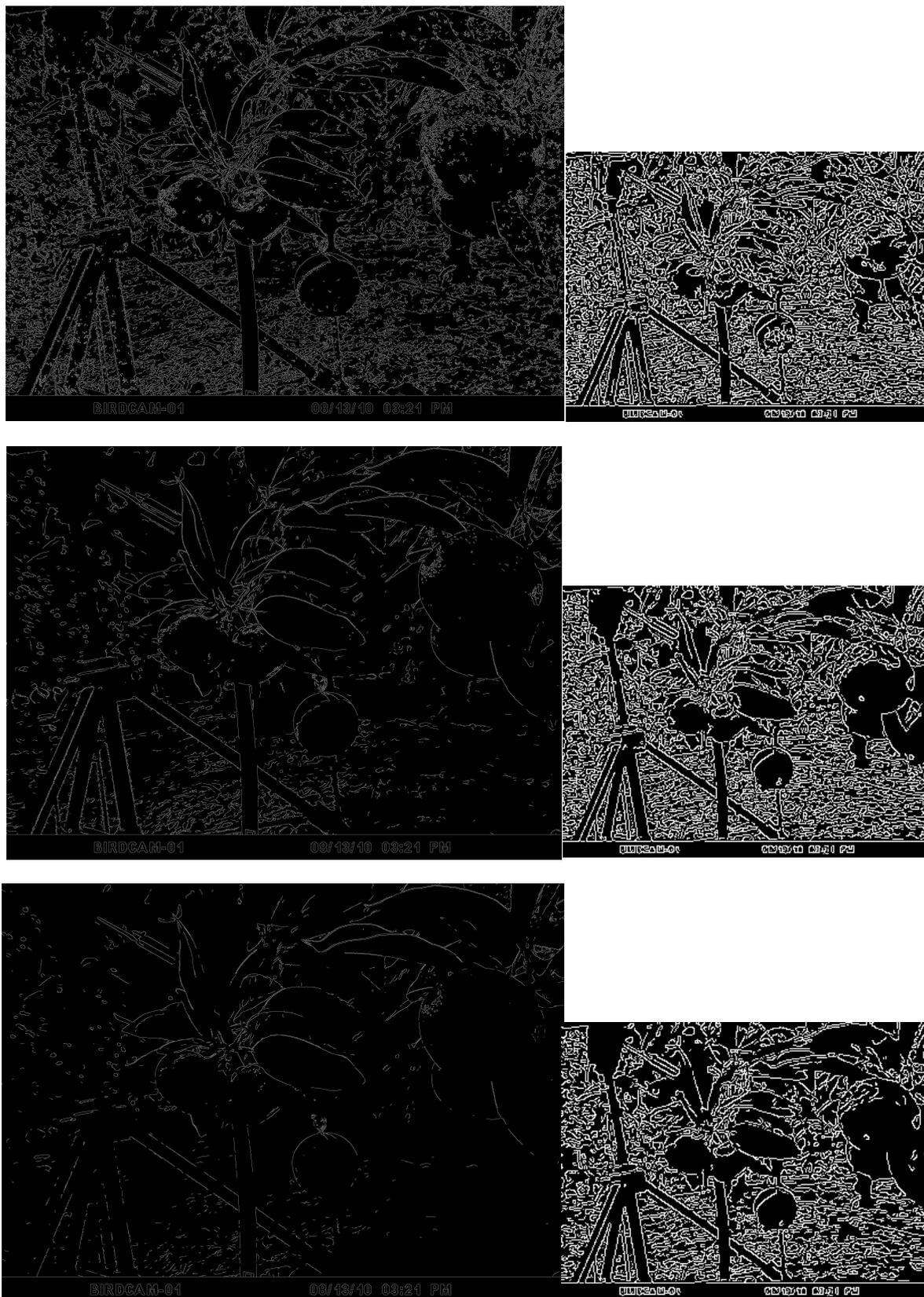


Fig. 6-12 Canny エッジ検出法における同一閾値時に発生する解像度による処理の差
 (左 : Birdcam 画像, 右 : Birdcam 画像を 100 分の 1 に圧縮した画像,
 上段 : Canny エッジ検出法での閾値(10,50), 中段 : 同閾値(60, 100), 下段 : 同閾値(100, 150))

6.4.3. 最大値フィルタ

Canny エッジ検出法の実行後の画像に、最大値フィルタをかけた。最大値フィルタには OpenCV 内の関数を使用した。この関数ではフィルタの形状を定義可能であるが、今回は正方形のフィルタを使用した。Canny エッジ検出法で閾値(10,50)で処理した画像、閾値(60, 100)で処理した画像、閾値(100, 150)で処理した画像に最大値フィルタをかけた結果が Fig. 6-13, Fig. 6-14, Fig. 6-15 である。

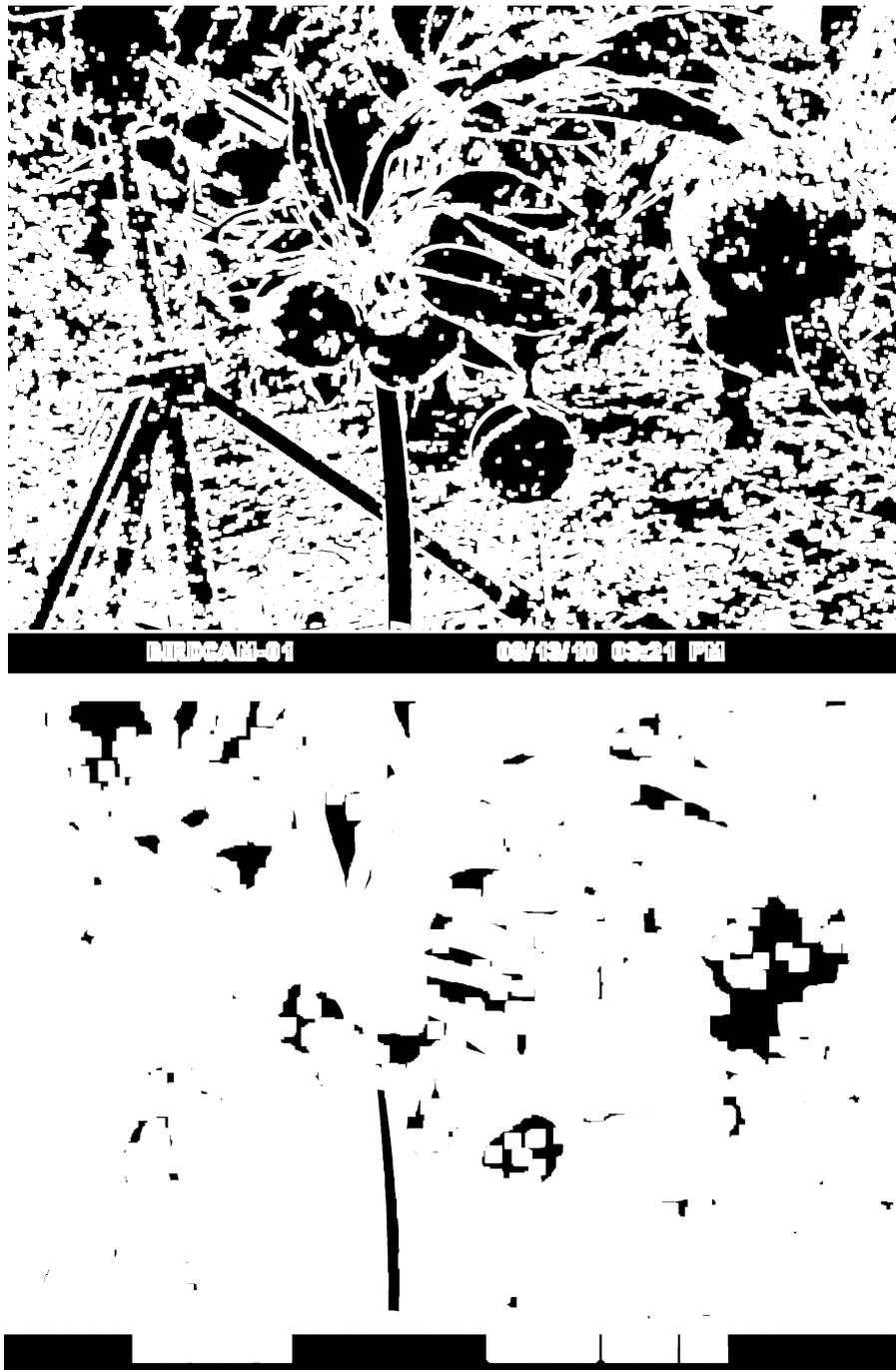


Fig. 6-13 閾値(10, 50)の Canny エッジ検出画像に最大値フィルタをかけた結果
(上 : 11×11 最大値フィルタ, 下 : 17×17 最大値フィルタ)

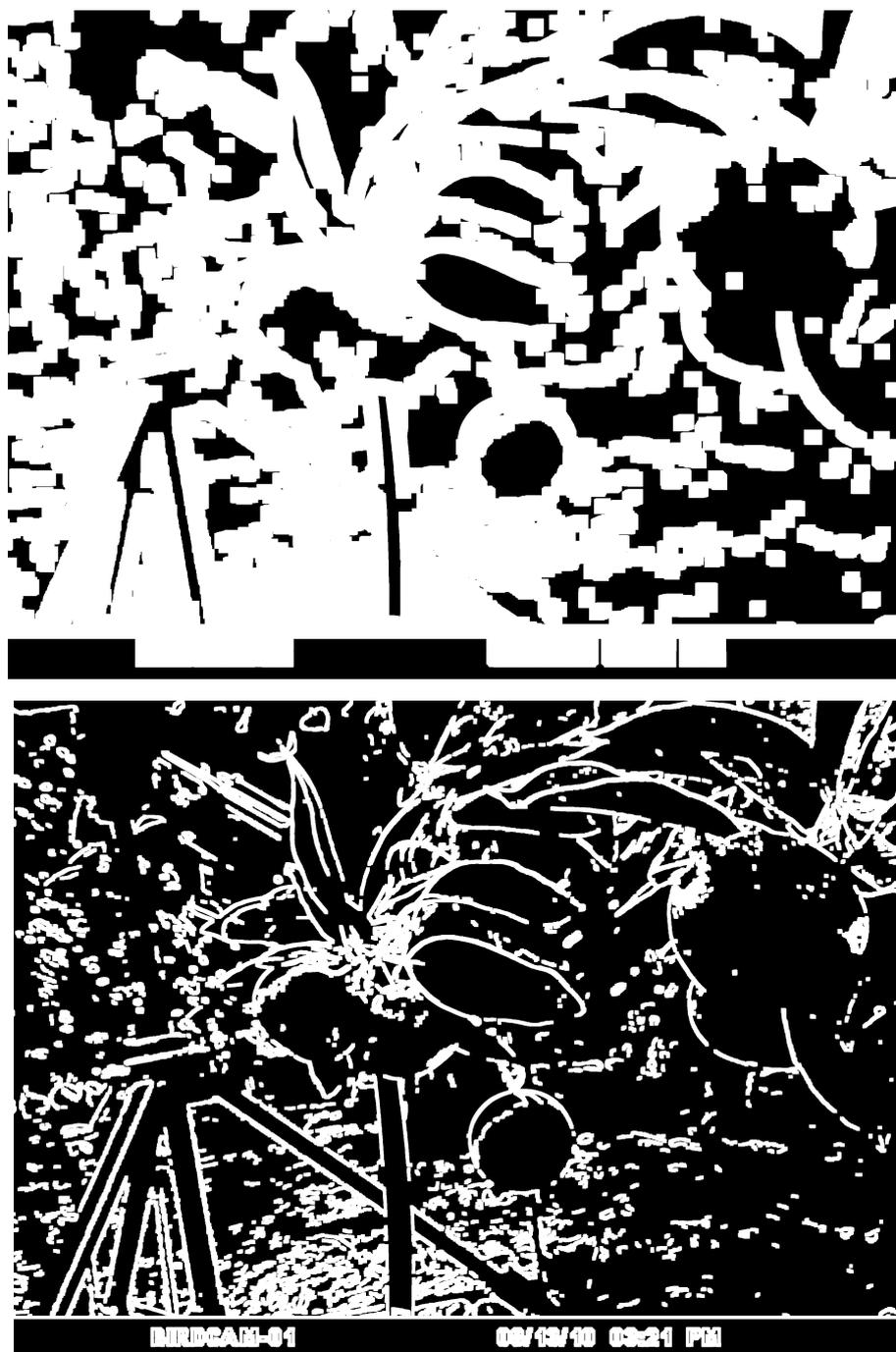


Fig. 6-14 閾値(60, 100)の Canny エッジ検出画像に最大値フィルタをかけた結果
(上 : 11×11 最大値フィルタ, 下 : 17×17 最大値フィルタ)

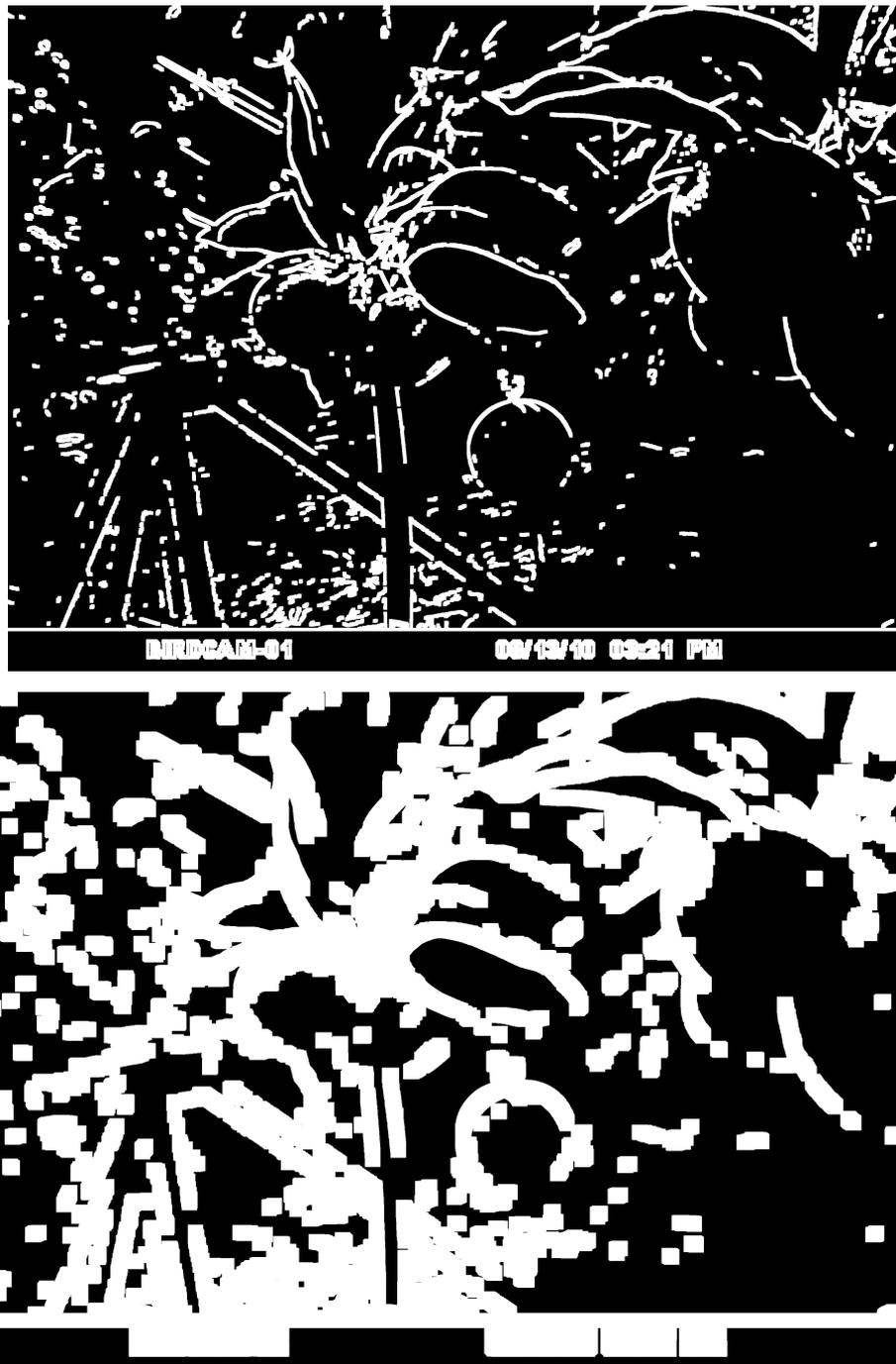


Fig. 6-15 閾値(100, 150)の Canny エッジ検出画像に最大値フィルタをかけた結果
(上 : 11×11 最大値フィルタ, 下 : 17×17 最大値フィルタ)

6.4.4. 画像の結合

色彩比や色分布で2値化した画像と、Cannyエッジ検出法の後最大値フィルタをかけた画像で、ある画素が両画像ともに黒であれば黒、どちらか一方でも白であれば白としたものが Fig. 6-16, Fig. 6-17 である.

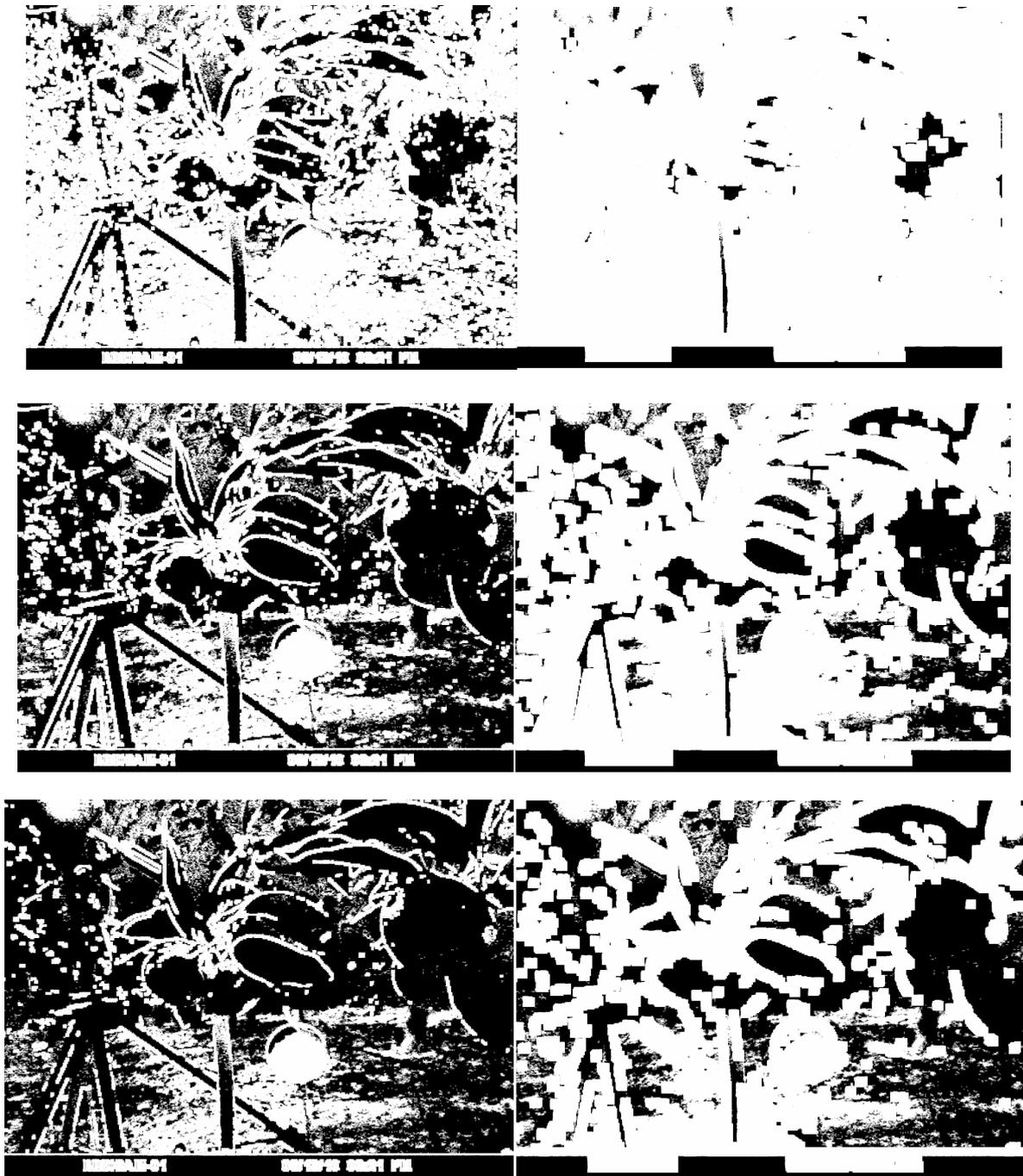


Fig. 6-17 最大値フィルタ結果と色彩比結果の結合画像

(左：最大値フィルタ 11×11, 右：最大値フィルタ 17×17,

上段：Canny エッジ検出法での閾値(10,50), 中段：同閾値(60, 100), 下段：同閾値(100, 150))

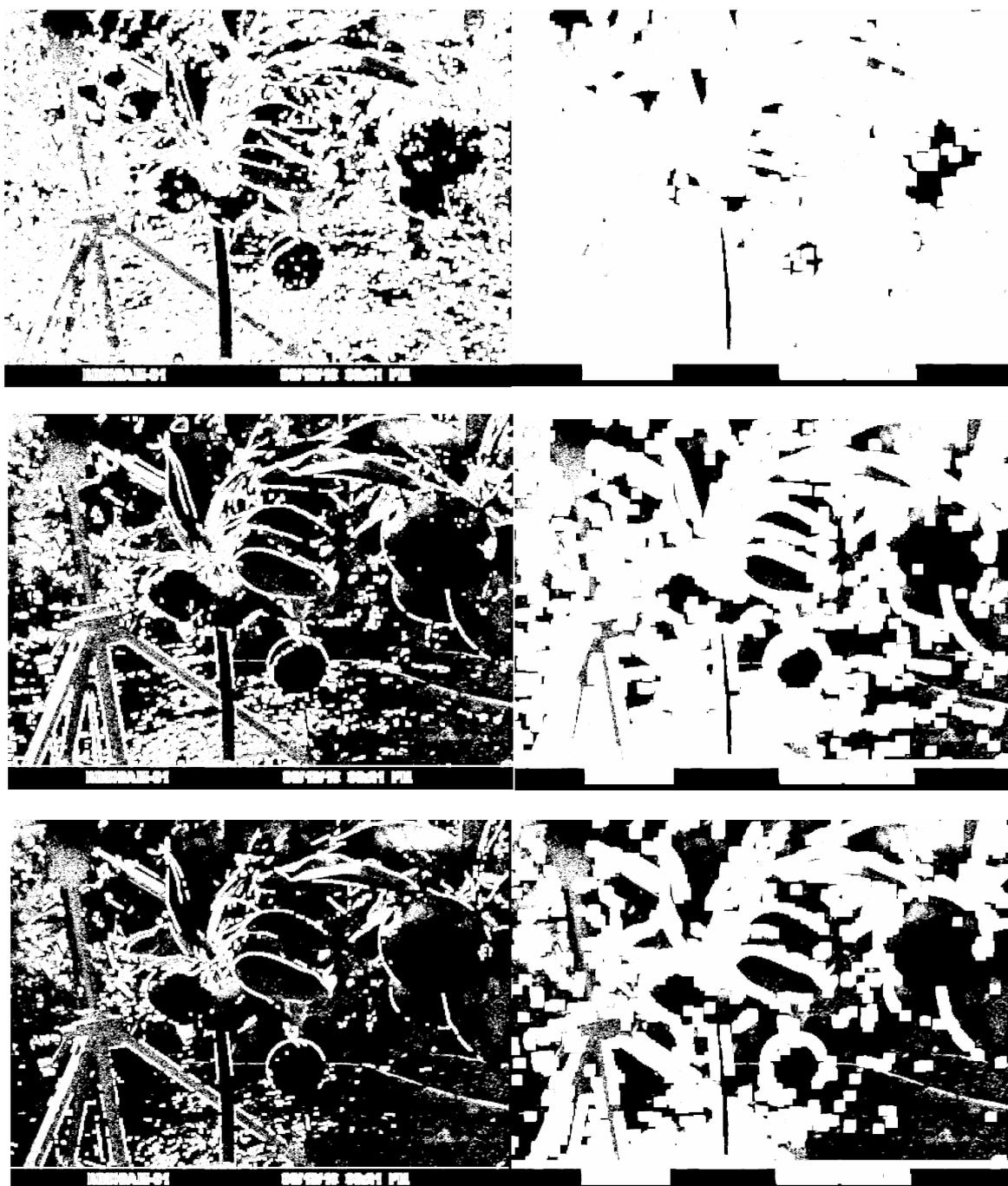


Fig. 6-18 最大値フィルタ結果と色分布結果の結合画像

(左：最大値フィルタ 11×11, 右：最大値フィルタ 17×17,

上段：Canny エッジ検出法での閾値(10,50), 中段：同閾値(60, 100), 下段：同閾値(100, 150))

6.5. 考察

Fig. 6-17, Fig. 6-18 より, Limsirratana and Ikeda (2005) の手法では Birdcam の画像から未熟ミカン果実のみを検出することは不可能であることが判明した。この原因として、ミカン果実表皮の凹凸、ミカン果実表面で発生しているハレーション、ミカンの葉の単純さ・滑らかさの3点を挙げることができる。

Limsirratana and Ikeda (2005) では果実表皮が滑らかなパパイヤの果実の検出をおこなっているが、今回はミカン果実の表皮に凹凸がある。ミカン果実は果実表皮に微小ながら凹凸を持っているため、Canny エッジ検出法でエッジが検出されてしまう。これにより、ミカン果実の領域内にもかかわらずミカン果実の領域ではない白い領域が発生してしまったと考えられる。

ハレーションとは、ミカン表皮に発生している照り返しである。今回、object2, object3 ともに果実右上付近にハレーションが発生していた。ハレーションは限りなく白に近いため、果実の色との差が発生し、Canny エッジ検出法においてエッジと認定されてしまう。この結果、ミカン果実表皮の凹凸と同様に、ミカン果実の領域内にもかかわらずミカン果実の領域でないことを示す白い領域が発生してしまったと考えられる。

Limsirratana and Ikeda (2005) で解析対象となっているパパイヤの葉は葉柄が長く掌状になっているように複雑であるため、Canny エッジ検出法と最大値フィルタの組み合わせによりパパイヤの葉の領域を消去することができた。対して、ミカンの葉は楕円形であり、クチクラ層が発達しているため表面がとても滑らかである。この結果、葉の中央部ではCanny エッジ検出法でエッジが検出されず、最大値フィルタをかけても葉の領域を完全に消すことができなかった。このため、Fig. 6-11 では葉の領域が多く残っていたと考えられる。

これらのことより、自然背景中から未熟ミカン果実を検出する場合、Limsirratana and Ikeda (2005)の手法をそのまま使用することは不可能であった。したがって、ミカンの果実にあった検出方法を考案する必要があるといえる。具体的には、途切れた果実輪郭の補間、機械学習による果実の認識などの手法が考えられる。

7. まとめ

本研究では、圃場で利用可能なモニタリングシステムに要求される条件を整理し、画像モニタリングシステムを構築した。具体的には、USBカメラを用いた低価格で耐環境性の高い圃場画像モニタリングシステムを開発し、開発したシステムの耐環境性を見る実証実験を行った。次に、USBカメラのQcamで取得した画像の性能評価を行い、最終的には画像からミカンの未熟果実の検出を試みた。

まず、圃場画像モニタリングシステムとして、Linux BoxとUSBカメラを軸にしたシステムを構築した。Linux BoxとUSBカメラの合計価格は3万円程度となり、熊野市周辺の農家および普及関係者の聞き取り調査で得られた10万円以下という条件を達成した。

また、圃場における通信経路として衛星通信、ADSL、携帯電話通信網を利用したデータ通信の3回線を三重県熊野市金山パイロットにおいて比較・検討した。現在はADSLが最も低価格な通信経路であるが、民家から離れた圃場であるとサービスエリアを外れてしまう可能性が高い。一方携帯電話通信網を利用したデータ通信は、まだ月あたり5千円と高価であるが、ADSLサービスエリア外の金山パイロットでADSLより通信速度が速いこと、インフラの整備の費用がかからないこと、今後安くなる可能性があることから、今後農業現場に広く利用可能であると考えた。

次に、システムの耐環境性の実証実験について述べる。耐環境性については、1日10°C以上の温度差がありかつ日中は50°Cを超える温度条件下でもシステムが動作し続けていること、金山パイロットにおいて実証システムが設置から1年経過した現在でも安定的に動作していることから、本研究で開発したシステムは耐環境性が高いと言える。

これらの結果より、本研究で開発した圃場画像モニタリングシステムは、圃場のいかなる環境においても安定的に稼働し、数万円台の低価格で、遠隔からリアルタイムにデータ収集可能なシステムであると言える。

画像の性能評価では、Qcamで撮影された画像のR, G, B値と一眼レフカメラのR, G, B値の照度変化を比べた。結果、Qcamで得られた画像は低い照度でも高い照度と同等な値を取っていた。このことから、Qcam内で画像取得の設定が自動調整されていると推定した。高い照度の時に主に赤チャートで飽和が発生したが、緑や青チャートでは飽和には至らないことをしめした。また、飽和が起こった際も自動調整の為に形状や輪郭は判別可能である。したがって、Qcamの屋外使用は、赤が飽和しやすいというデメリットはあるものの、屋外設置しても画像解析のソースとなりうると思われる。

画像解析の結果、ミカン果実表皮の凹凸や葉表面のなめらかさ等により、Limsiratana and Ikeda (2005)の手法を用いて自然背景中からミカンの未熟果実を検出することは不可能であることが判明した。今後、途切れている果実輪郭の補間や機械学習による果実の認識などの手法や撮影方法の工夫により新たな検出ロジックを編み出す必要がある。

謝辞

本研究に取り組むにあたり、多くの方々にご支援・ご協力を戴きました。

三重大学大学院生物資源学研究科水域環境学研究室伊藤良栄助教，葛葉泰久教授には，研究室分属から4年間，指導教員として厚く親身にご指導いただきました。

同研究室清澤秀樹准教授には，ゼミで数多くの助言・指導をしていただいたほか，予備実験や土壤水分センサのキャリブレーションにおいてご協力いただきました。

三重大学大学院生物資源学研究科自然環境システム学講座の教員ならびに学生の皆様には，合同ゼミにおいて様々な角度から助言や意見を数多くいただきました。

土壤水分センサのキャリブレーション実験にあたり，同研究科流域環境学研究室大学院生廣住豊一氏に機材を貸していただき，実験手法を御指導いただきました。

三重県熊野市金山パイロットにおける実証実験にあたり，三重県熊野農林商工環境事務所中村元一主査，藤田絢香技師，金山パイロットやJA 三重南紀の職員の方々，三重大学大学院生物資源学研究科食・環境・文化情報学研究室の亀岡孝治教授，同研究分野の方々の協力を得ました。

USBカメラの性能評価実験において，三重大学大学院生物資源学研究科生物情報工学研究室橋本篤教授，大学院生古澤健太郎氏に暗室や解析ソフトを提供していただき，お忙しい中指導をしていただきました。

画像解析では，三重大学大学院生物資源学研究科エネルギー利用工学研究室鬼頭孝治准教授，生物環境制御学森尾吉成准教授に画像処理の手法についてアドバイスを戴きました。

この場を借りてみなさまに厚く御礼申し上げます。

最後に，研究を行うにあたり，精神的に支えてくださった水域環境学研究室の院生，学部生，卒業生の皆様に感謝いたします。

引用文献・参考文献

- Burgos-Artizzu, X. P., A. Ribeiro, A. Tellaeché, G. Pajares and C. Fernández- Quintanilla (2009): Improving weed pressure assessment using digital images from an experience-based reasoning approach, *computers and electronics in agriculture* 65 176–185
- Canny, John (1986): A Computational Approach to Edge Detection, *IEEE transaction on pattern analysis and machine intelligence*. PAMI-8(6), 679-698
- Foucher, P., P. Revollon, B. Vigouroux, G. Chasseriaux (2004): Morphological Image Analysis for the Detection of Water Stress in Potted Forsythia, *Biosystems Engineering* Vol.89, Issue 2, pp131-138
- Fukatsu, Tokihiro and Masayuki Hirafuji (2005): Field Monitoring Using Sensor Nodes with a Web Server, *Journal of Robotics and Mechatronics*, Vol. 17, No. 2 pp.164-172
- Honda Kiyoshi, Aadit Shrestha, Apichon Witayangkurn, Rassarin Chinnachodteeranun, Hiroshi Shimamura (2009): Field servers and Sensor Service Grid as Real-time Monitoring Infrastructure for Ubiquitous Sensor Networks, *sensors*, Vol.9, 2363-2370
- Ito, R., T. Hirozumi and Y. Nagaya (2006): Modification of Inexpensive NAS Devices for Field Monitoring, *Proc. of 4th World Congress on Computers in Agriculture (WCCA)*, 72-77, 2006.
- Jimenez, A.R., A.K. Jain, R. Ceres, J.L. Pons (1999): Automatic fruit recognition: a survey and new results using Range/Attenuation image, *Pattern Recognition* 32 1719-1732
- Limsiroratana, S. and Y. Ikeda (2005): Detection of Fruits in Natural Background (Part 1) –Image Analysis for Detection of Fruits Edge-, *Journal of JSAM* 67(4): 73-80
- Norihiro Nakamura (2006): Construction of a field image monitoring system and an application of image recognition technology, *Proc. of 4th World Congress on Computers in Agriculture (WCCA)* pp78-83
- TAKAYAMA, Kotaro and Hiroshige NISHINA (2007): Early Detection of Water Stress in Tomato Plants Based on Projected Plant Area, *Environment Control in Biology* Vol. 45, No. 4, pp241-249
- 岡正明, 小野寺俊一(2007):作物画像情報取得に用いるネットワークカメラの検討, *日本作物学会東北支部会報* No.50 pp149-150
- 落合秀也, 松浦知史, 山内正人(2009):センサネットワークキングの新たな展開を目指して～Live E! Workshop in APNG Camp 活動報告～, *情報処理*, Vol.50, No.1, pp55-63
- 河合義隆, 塚本太郎, 中西さくら, 河瀬幸浩, 前川豊孝(1999):露地における温州ミカンのポット栽培とマルチの影響, *三重大学生物資源学部附属農場研究報告*
- 斉藤忠臣, 藤巻晴行, 安田裕(2008):導電率水分計の温度依存性の校正, *土壌の物理性*, 第 109 号, pp. 15-26
- 佐々木俊之(2005):秋季における温州ミカンの水ストレスの指標としての葉の巻上げ度(葉身の閉鎖程度), *園芸学雑誌* 74(別 2), 114
- 社団法人日本システムハウス協会エンベデッド技術者育成委員会(2003):組み込みシステム開発のためのエンベデッド技術, *電波新聞社*
- 高田広章, 岸田昌巳, 宿口雅弘, 南角茂樹(2003):リアルタイム OS と組み込み技術の基礎, *CQ 出版株式会社*
- 中元勝彦, 平尾晃, 湯浅哲信(1998):ワセウンシュウの葉の調位運動を利用した水管理指標が樹体

および果実形質に及ぼす影響, 園芸学雑誌 67(別 2), 194
農林水産省(2010), 平成 21 年度食料・農業・農村白書
早田 保義, 田部 敏子, 近藤 悟, 井上 興一(1998): 水分ストレスがミニトマト果実の発育と糖および窒素含量に及ぼす影響, 園芸学会雑誌 67(5), 759-766
深津時広, 平藤雅之(2003): 圃場モニタリングのためのフィールドサーバの開発, 農業情報研究 12(1), pp. 1-12.
福田英徳(2007):C/C++による組み込みソフトウェア開発技法—オブジェクト指向を取り入れた理論と実践, ソフトバンククリエイティブ株式会社
松生秀正, 浅井徹(2005):計測用センサネットワークの構築, 愛知県産業技術研究所研究報告
松生秀正, 浅井徹(2008):農業用センサネットワークシステムの開発, 愛知県産業技術研究所研究報告
松生秀正(2006):無線センサネットワークシステムの開発, 愛知県産業技術研究所研究報告
松生秀正(2007):農業用無線センサネットワークシステムの開発, 愛知県産業技術研究所研究報告
森永邦久(1993):カンキツ光合成の向上と果実生産に関する研究, 四国農業試験場報告 57, 135-205
森永 邦久, 吉川 弘恭, 中尾 誠司, 村松 昇, 長谷川 美典(2004):露地栽培ウンシュウミカンにおける周年マルチ点滴かん水同時施肥法の開発, 園芸学研究, 3(1), 45-49

引用 Web サイト

- ASUSTek Computer Inc. -ASUS WL-500g Premium- <http://www.asus.com/product.aspx?P_ID=8e12DcrRjLoHNdQ8> (2011/01/29 参照)
- Birdcam 2.0 <<http://www.wingscapes.com/birdcameras/birdcam-20>> (2011/02/08 参照)
- BNR スピードテスト <<http://www.musen-lan.com/speed/>> (2011/02/06 参照)
- camE <<http://linuxbrit.co.uk/camE/>> (2009/03/02 参照)
- Decagon Calibrating ECH2O Soil Moisture Sensors < <http://www.decagon.com/education/calibrating-ech2o-soil-moisture-sensors-13393-04-an/>> (2010/01/30 参照)
- eBox-4300 <<http://www.icop.co.jp/ja/products/compact-pc/ebox-43004310>> (2011/01/29 参照)
- eBox-4300 SPEC <<http://www.icop.co.jp/sites/default/files/datasheets/eBox-4300-SPEC.pdf>> (2011/01/29 参照)
- eBox_4300_Manual <http://www.icop.co.jp/sites/default/files/manuals/eBOX_4300_Manual__v0r0.pdf> (2011/01/29 参照)
- Field Server <<http://model.job.affrc.go.jp/FieldServer/default.htm>> (2011/01/29 参照)
- fswebcam <<http://www.firestorm.cx/fswebcam/>> (2011/01/29 参照)
- goo スピードテスト <<http://speedtest.goo.ne.jp/>> (2011/02/06 参照)
- Live E! <<http://www.live-e.org/>>, (2011/01/30 参照)
- Logicool>ウェブカメラ&コミュニケーション > ウェブカメラ > Qcam Orbit AF <<http://www.logicool.co.jp/index.cfm/38/3480&cl=jp.ja>> (2011/01/29 参照)
- NTT ドコモ FOMA A2502 取扱説明書<http://www.nttdocomo.co.jp/binary/pdf/support/trouble/manual/download/relate/a2502/A2502_J_All.pdf> (2009/03/02 参照)
- OpenCV <<http://opencv.jp/>>, (2011/01/31 参照)
- OpenWrtDocs/Hardware/Asus/WL500GP <<http://wiki.openwrt.org/OpenWrtDocs/Hardware/Asus/WL500GP>> (2011/01/29 参照)
- OpenWrt <<http://openwrt.org/>> (2011/01/29 参照)
- rsync <<http://samba.anu.edu.au/rsync/>> (2011/01/29 参照)
- USB 温度・湿度計モジュール<<http://strawberry-linux.com/catalog/items?code=52002>> (2011/01/29 参照)
- xawtv homepage <<http://linux.bytesex.org/xawtv/>> (2011/01/29 参照)
- インターネット回線速度調査 <<http://junkhunt.net/icsi/>> (2011/02/06 参照)
- 農林水産省果樹生産出荷統計(平成 21 年産) <<http://www.e-stat.go.jp/SG1/estat/List.do?lid=000001061928>>
- 農林水産省農林水産関係市町村別データ(平成 18 年産) <<http://www.e-stat.go.jp/SG1/estat/List.do?lid=000001060567>>
- ブロードバンドスピードテスト <<http://www.bsppedtest.jp/>> (2011/02/06 参照)
- 平成 21 年産ミカンの結果樹面積, 収穫量及び出荷量 <http://www.maff.go.jp/j/tokei/kouhyou/sakumotu/sakkyou_kazyu/index.html#y1> (2011/02/07 参照)

戴いたコメントと回答

1. 熟した果実を利用した方が、検出は容易ではないだろうか

確かに熟した果実ならば、画像から境界線を抽出しやすいため検出が容易である。しかし今回はミカン果樹が受けている水ストレスの検出の為に果実の検出を行っており、水ストレスに最も重要な時期は果実が肥大する時期であることから、本研究では未熟果実の検出を行った。

2. 未熟果実と葉の色が同じならば、未熟果実を検出するには色彩よりも形状が重要なのではないかな

その通りである。今回色彩比を用いた理由は背景等果実や葉ではない箇所の除去が目的であるが、今後果実を検出するために形状解析を進める必要があるだろう。

3. 果実検出にエッジの曲率を利用すればいいのではないかな

Cannyのエッジ検出法では閾値が大きければ果実の輪郭のエッジが途切れ、閾値が小さければエッジが多くなり判別しにくいことから、今回はエッジの曲率の利用は断念した。多数のエッジから果実のエッジを検出する方法や途切れたエッジの補間の手法が確立できれば、曲率を利用して果実検出ができると考える。

4. 赤外線カメラを使用した方が、精度よく果実の検出が行えるのではないかな

赤外線カメラを用いてオレンジを検出する研究がなされているように、赤外線カメラを用いた方が精度は高くなると予想される。しかしながら、赤外線カメラは高価であるため、熊野での聞き取り調査で得られた十万円以内という条件から外れてしまう。このため本研究では可視画像から果実を検出する方法を考察した。ただ、一部のUSBカメラでは、内部の赤外線フィルタを外すことで赤外線カメラのように扱うことが可能なので、精度を上げるためには導入を検討すべきかもしれない。

5. 色彩比 R/G, R/B, G/B よりも、色を表す R/(R+G+B) 等の方が正確に色を表し、抽出可能なのではないかな

各領域における $R/(R+G+B)$, $G/(R+G+B)$, $B/(R+G+B)$ の分布を Fig. 1, Fig. 2 に示す。Fig. 1 において、x 軸は R, G, B の合計値を 3 で割った値、y 軸がそれぞれの値、色が個数を示す。色彩比を用いた場合と比較すると、全体的に分散が少なくなり集約しているように見えるが、全体的な傾向は変わらないことが判明した。

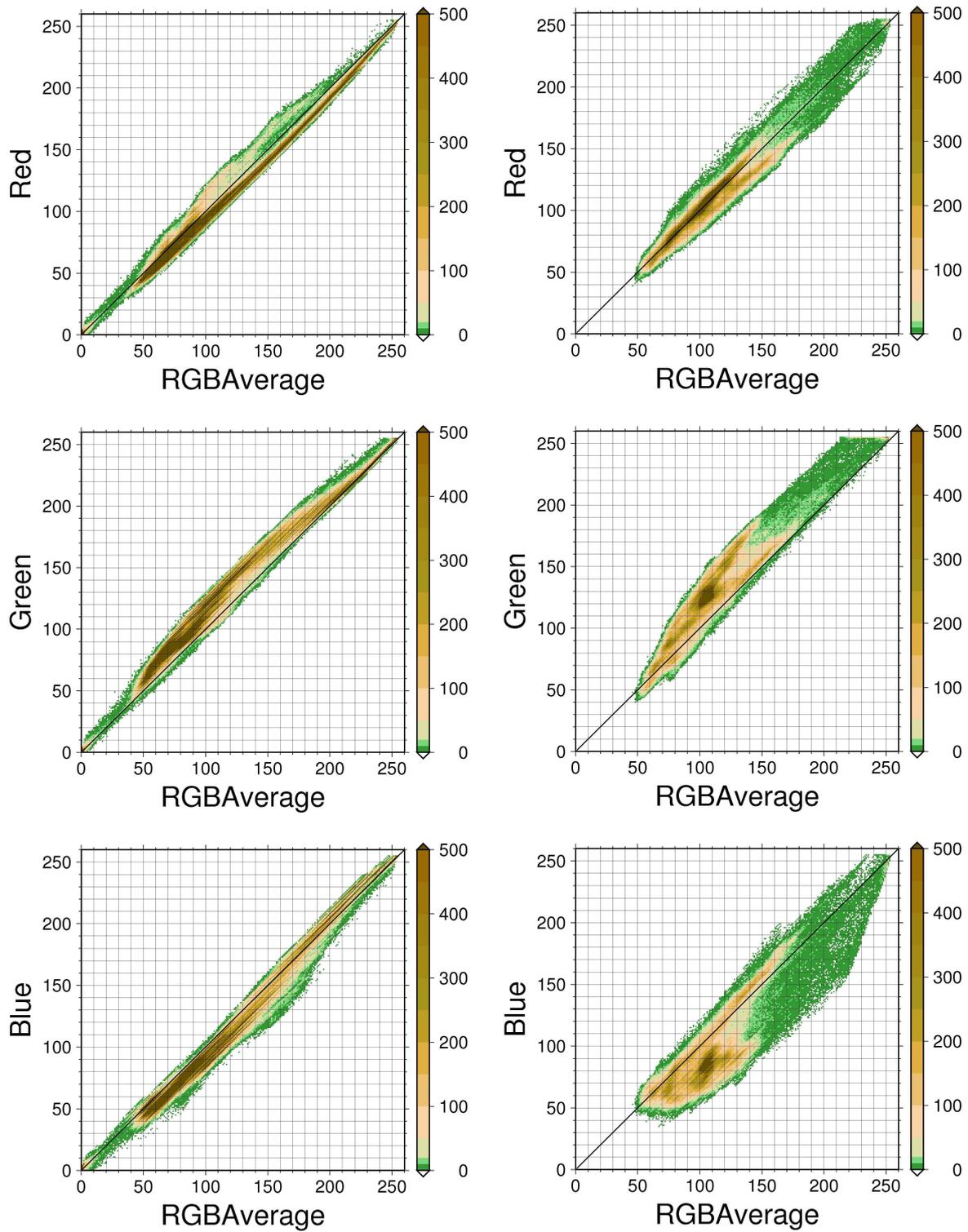


Fig.1 R, G, B 値平均値と各色の分布(左:果実領域(object3), 右:葉の領域(leaves1))

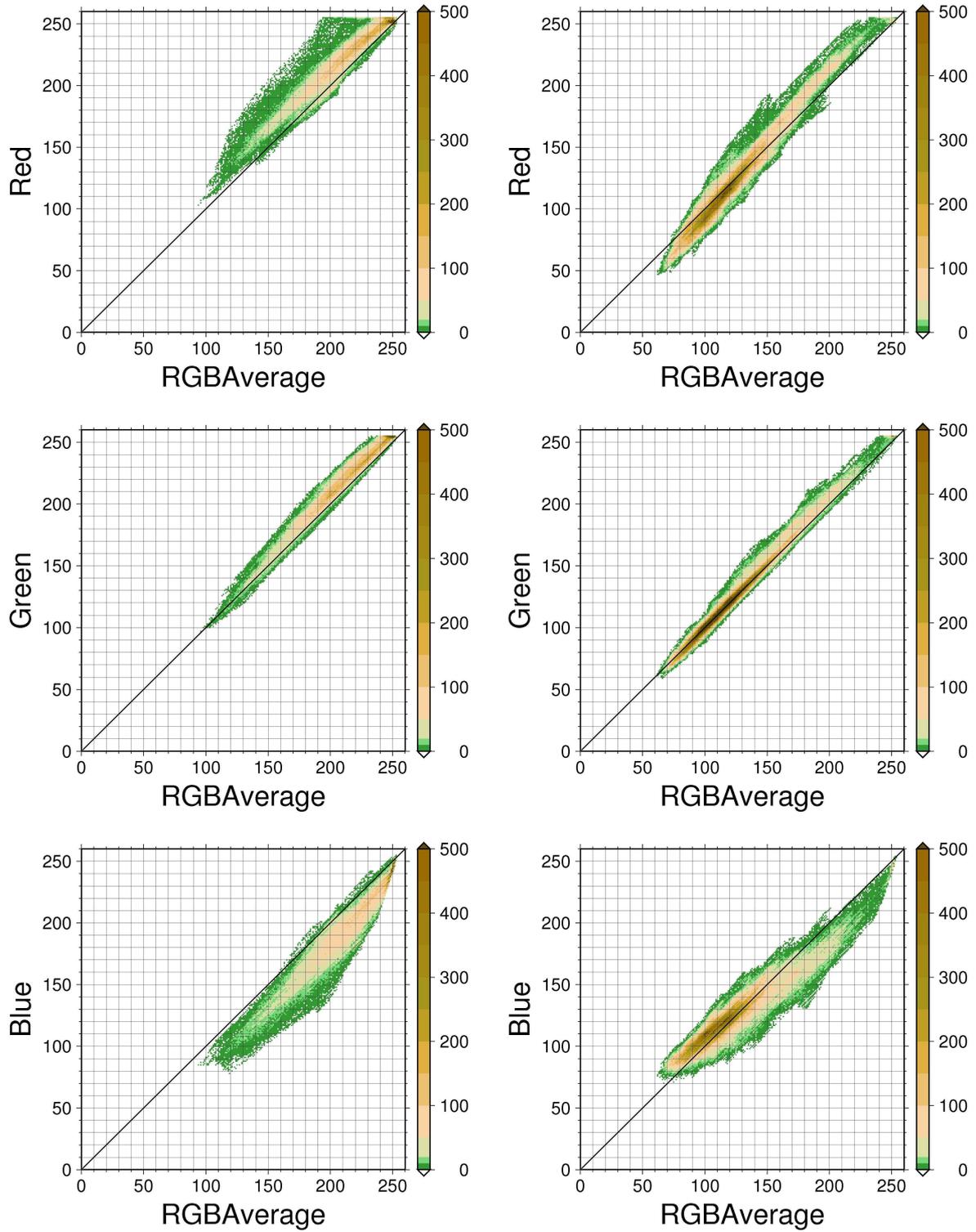


Fig.1 R, G, B 値平均値と各色の分布
 (左:日向土壤領域(ground_light), 右:日蔭土壤領域(ground_dark))