

2019（令和元）年度 修士学位論文

赤外線カメラを利用したハウス内のピーマンの検出

Detection of green pepper in house using infrared camera

2020 年 3 月 9 日

高知工科大学大学院 工学研究科基盤工学専攻
知能機械システム工学コース

1225036 多田 敬佑

指導教員 岡 宏一 教授
原田 明德 講師

目次

第1章 序論	1
1.1 研究背景と目的	2
1.2 ロボットによる自動収穫の現状	2
1.3 ピーマンを対象とした収穫ロボット	3
1.4 提案する検出方法	3
1.5 本論文の構成	3
第2章 赤外線カメラによる検出方法	4
2.1 蒸散による温度差の利用	4
2.2 熱容量の違いによる温度差の利用	4
第3章 夏場のハウスでの基礎実験	5
3.1 使用機材	5
3.2 実験方法	5
3.3 実験結果	6
3.3.1 6月25日 11:00 から 6月26日 10:59 の結果	6
3.3.2 6月26日 11:00 から 6月27日 10:59 の結果	8
3.3.3 考察	9
3.4 ハウスの室温を利用した果実の温度抽出	10
3.4.1 抽出結果	12
3.4.2 考察	13
3.5 画像処理による果実の検出	13
3.5.1 画像処理の手順	13
3.5.2 検出結果	13
3.5.3 考察	15
第4章 冬場のハウスでの実験	16
4.1 実験方法	16
4.2 実験結果	17
4.2.2 12月11日	18
4.2.3 12月12日	20
4.2.4 12月14日	22
4.2.5 12月17日	24
4.3 考察	26
第5章 実際のピーマンの検出	27
5.1 ハウスの室温を利用した果実の温度抽出	28
5.1.1 日中においての果実の温度抽出	28

5.1.2	抽出結果	28
5.1.3	夜間における果実の温度抽出	32
5.1.4	抽出結果	33
5.1.5	考察	34
5.2	画像処理による果実の検出	35
5.2.1	画像処理の手順	35
5.2.2	日中における果実の検出	35
5.2.3	検出結果	35
5.2.4	夜間における果実の検出	40
5.2.5	検出結果	40
5.2.6	考察	41
第6章	結論	42
6.1	研究のまとめ	42
6.2	今後の課題	42
Appendix		43
Appendix A	使用した実験機材	43
Appendix B	冬場のハウスでの実験結果	45
Appendix C	果実の温度抽出結果	53
Appendix D	果実の検出結果	57
参考文献		61
謝辞		63

第1章 序論

1.1 研究背景と目的

農林水産省が公表しているデータ⁽¹⁾⁽²⁾より図1に農業就業人口と65歳以上の人口のデータを抜粋したグラフを示す。図1より2015年では農業就業人口が209.7万人であったが2018年になると農業就業人口は175.3万人であり16%減少している。また、65歳以上の割合では2015年では約63.5%であったが2018年では68.5%と約5%上昇している。このデータより日本の農業において農業就業人口は年々減少しており深刻な人手不足であると考えられる。また、65歳以上の割合が50%を超えており高齢化であると考えられる。野菜栽培においては収穫作業が労働時間の中でも多くを占める。収穫作業が機械化や自動化されている野菜もあるが、いまだ多くが手作業であり人手不足や高齢化である農家にとっては大きな負担となることから作業の機械化・自動化が望まれている。

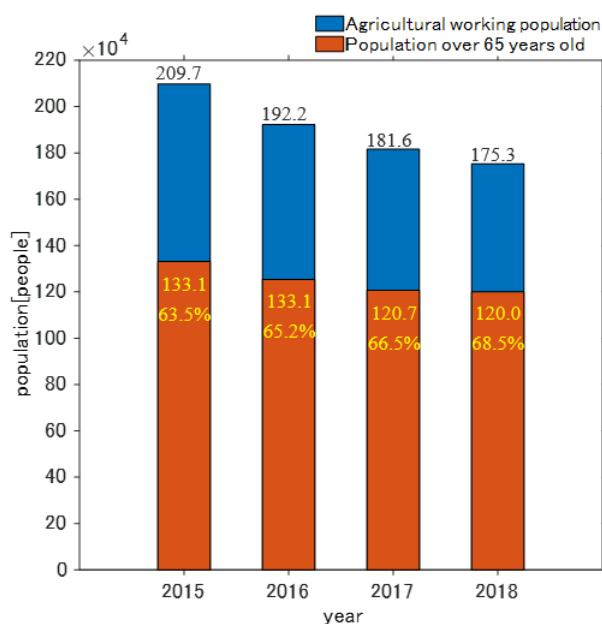


Fig 1.1 Agricultural working population⁽¹⁾

近年、作業の自動化や省力化のためにスマート農業と呼ばれるものが推進されている。スマート農業とは農林水産省によると「ロボット技術や ICT を活用して超省力・高品質生産を実現する新たな農業」⁽³⁾とされている。事例としては、トラクタや田植機などの作業機械の無人自動運転⁽⁵⁾⁽⁶⁾、ドローンによる調査⁽⁷⁾などが挙げられる。

本研究では、その中でもロボット技術による作業の省力化に注目した。人の腕と同じ形状のロボットを用いることで茎になっている果実等を収穫させることができるのではないかと

と考えた．特に施設園芸であれば外の環境に左右されず野菜を栽培できることからロボットも雨や風などの影響を受けないためハウス内で稼働する自動収穫ロボットの開発を目指す．

1.2 ロボットによる自動収穫の現状

ロボットによる自動収穫の現状としては、図 1 に示す夜間にハウス内で稼働しカメラを用いて果実を認識し収穫に適正な果実か判別した後、適正であった場合は自動で収穫を行う農研機構が研究・開発しているイチゴ収穫ロボット⁽⁸⁾やトマト自動収穫ロボット⁽⁹⁾などが挙げられる．ロボットによる自動収穫については、トマトやイチゴは色や形を利用することで果実の検出が比較的容易である．しかし、ピーマンのように果実の色が葉と似ていることや色だけでなく形状も似ている作物の場合、果実を検出することが難しいことが課題である．



Fig 1.3 Strawberry harvesting robot ⁽⁸⁾

1.3 ピーマンを対象とした収穫ロボット

果実を検出することが難しい野菜は数種類あると考えられるが高知県は「野菜園芸の中心である施設園芸は、海岸線に沿う平坦温暖部に産地が形成されており、なかでも安芸地区を中心とする県東部や高知地区などの中西部では、なす・きゅうり・ピーマン等を基幹品目とした大型産地が分布」⁽¹⁰⁾することより本研究では、野菜の中でも果実の検出が難しいと考えられるピーマンを対象としたハウス内で稼働するロボットによる収穫作業の自動化を目標とする．ロボットによる自動収穫を行うためには、収穫を行うために果実を検出する必要がある．本研究ではまずピーマンの果実を色以外で検出する方法について新たな手法を提案し検証を行う．

1.4 提案する検出方法

ピーマンを色以外で検出するために本研究では赤外線カメラと測域センサを用いる方法を提案する。赤外線カメラは物体の温度の情報に基づき画像が出力される。温度であればピーマンの葉と果実の間で違いがあるのではないかと考えた。検出の手順としては、まず赤外線カメラを用い果実がなっている大まかな範囲を特定する。次にその範囲内を測域センサにより計測することで果実の詳細な位置と姿勢を特定する。最後に特定した姿勢から摘み取り時に切断する茎の位置を特定する。

本報告では、赤外線カメラによる果実の特定についてその有効性を確認したのでこれについて述べる。

1.5 本論文の構成

本論文の第2章では、赤外線カメラによる果実の検出方法について述べる。第3章では基礎実験結果から画像処理による果実の検出に検証したことについて述べる。第4章では、冬場のハウスでの実験結果について述べる。第5章では、実際のピーマンの検出結果について述べる。第6章では、本論文のまとめと課題について述べる。

第2章 赤外線カメラによる果実の特定方法

赤外線カメラによる果実の特定には葉と果実の温度差を用いる。特定方法としては以下に示す2つを提案する。

2.1 蒸散による温度差を利用

植物生理学によると「土壌の水分は根によって吸収され、導管あるいは仮導管を通して上昇し、その過程で水は植物体の各部分に供給される。上昇した水は最終的には葉から蒸発して、大気中に水蒸気として放出される。この最後の蒸発の過程によって、植物体の温度の調節が行われる」⁽¹¹⁾、「蒸散は昼間盛んで、夜間はほとんど停止する」⁽¹²⁾、「蒸散を第一次的に規定しているのは特に光照射である」⁽¹²⁾、「蒸散が主に行われる気孔は一般に葉の裏面に多い」⁽¹³⁾とされている。この蒸散により日中は、葉の温度が抑えられるが果実は温度が上昇し葉と果実の間に温度差が生じることで果実が特定できる。以上が蒸散による温度差を利用した方法である。

2.2 熱容量の違いによる温度差を利用

ピーマンの葉は薄いことから熱容量が小さいため周囲の温度変化への反応が早いと考えられる。一方、果実は中が空洞で空気があることから熱容量が大きいため周囲の温度変化への反応が鈍いと考えられる。ハウスは夜間に温度が下がりすぎないようにボイラを炊くため、稼働するとハウスに温度変化が生じる。熱容量の違いから葉と果実に温度差が生じることで果実が特定できる。以上が熱容量の違いによる温度差を利用した方法である。

第3章 夏場のハウスでの基礎実験

第2章で提案した2つの特定方法についてハウスにて実験を行い有効性の確認を行った。

3.1 使用機材

実験には、葉と果実の温度測定するために optrix 社の赤外線カメラ：xi400，ハウス内の温度・湿度・照度・紫外線強度を測定するために株式会社ティアンドデイの高精度温湿度センサ：SHA-3151 と照度・紫外線センサ：ISA-3151，取得したデータの保存のために同社のデータロガー：TR-74Ui を用いた。また，ハウス内に温湿度センサを直接設置すると直射日光によりセンサが温められ正確な温度が測定できなくなるため，センサに直射日光が当たることを防ぎ測定している場所の空気の激みをなくすことで正確な温度や湿度を測定できるよう強制通風装置を製作した。使用機材の詳細については付録に示す。

3.2 実験方法

実験としては，ハウス内に赤外線カメラと温湿度センサ，データロガーを設置しピーマンの葉・果実，ハウスの室温を測定した。赤外線カメラの撮影間隔は30秒，温度等の測定間隔は1分とした。条件を表3.1，実験の様子を図3.1に示す。

Table 3.1 Experimental condition

Date	2019/6/25 11:00 to 2019/6/27 10:59 (48h)	
Weather	Sunny	6/25
	Cloudy Then rain	6/26
	rain	6/27
Place	Geisei Village, Aki County, Kochi Prefecture	



Fig 3.1 Experiment in green house

3.3 実験結果

実験結果について、ハウスの室温とピーマンの果実および葉の間にどのような関係があるか調べるためにそれぞれの温度をグラフ化した。果実および葉に関しては画像の中からそれぞれ1か所の温度を抜き出したものである。また、実験日のピーマンの様子が分かるように撮影画像を1時間ごとにまとめた。

3.3.1 6/25 11:00 から 6/26 10:59 の結果

結果について、図 3.2 に抜き出した場所、図 3.3 に一日を通しての時間と温度の関係、図 3.4 に 6 月 25 日 00:00 から 6 月 26 日 02:00 の間で拡大、図 3.5 に 6 月 25 日 08:00 から 6 月 25 日 17:00 の間で拡大、図 3.6 に 1 時間ごとの撮影画像を示す。図 3.4 より夜間は温度差が生じていなかった。図 3.6 の 23:00 から 02:00 の画像において葉も果実も白く映っており違いが表れていなかった。

図 3.5 より日中においては 15:00 までは果実はハウスの室温と同等の温度であるが葉は他の 2 つに比べて温度が低いため温度差が生じていた。その後、温度が低下していき葉と果実の温度差がほとんどなくなっていた。図 3.6 の 11:00 から 15:00 の画像においても果実が黒くはっきりと映っていた。

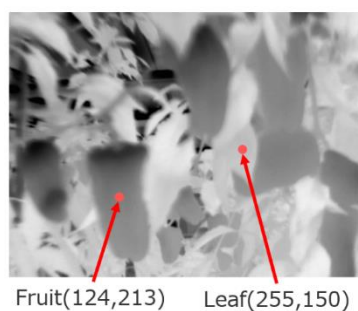


Fig 3.2 Extraction location

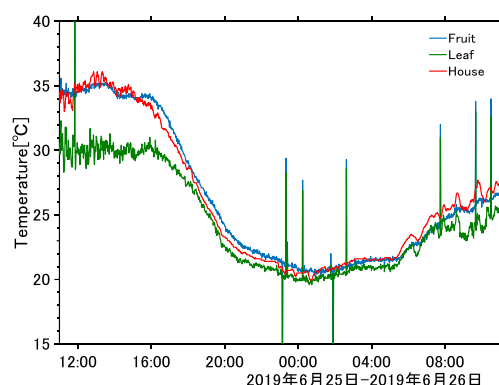


Fig3.3 Temperature and time

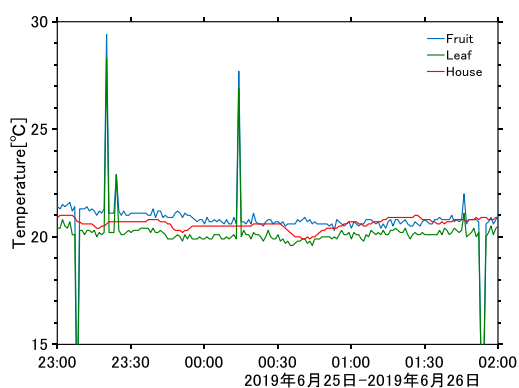


Fig 3.4 Expanded from 23:00 to 02:00

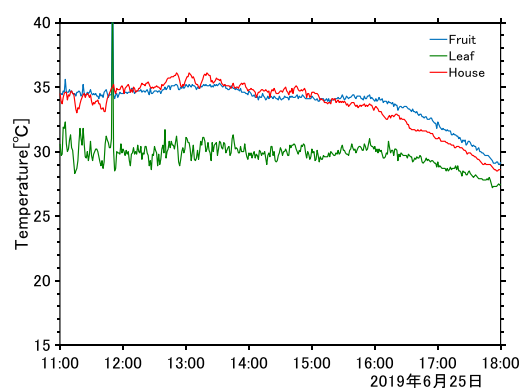


Fig 3.5 Expanded from 11:00 to 17:00



Fig 3.6 Image taken every hour on June 26 at 11:00 to June 27 at 10:59

3.3.2 6/26 11:00 から 6/27 10:59 の結果

結果について、図 3.7 に抜き出した場所、図 3.8 に一日を通しての時間と温度の関係、図 3.9 に 6 月 26 日 23:00 から 6 月 27 日 02:00 の間で拡大、図 3.10 に 6 月 26 日 08:00 から 6 月 26 日 17:00 の間で拡大、図 3.11 に 1 時間ごとの撮影画像を示す。図 3.9 より夜間は温度差が生じていなかった。図 3.11 の 23:00 から 02:00 の画像において葉も果実も白く映っており違いが表れていなかった。

図 3.10 より日中においては 15:00 までは温度差が生じていたがそれ以降は温度差が生じなくなった。図 3.11 の 11:00 から 15:00 の画像においても果実が黒くはっきりと映っていた。

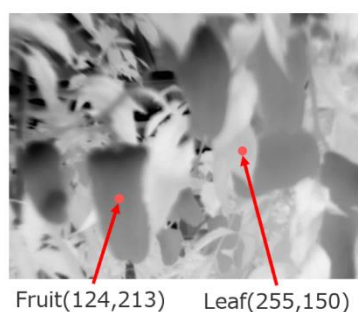


Fig 3.7 Extraction location

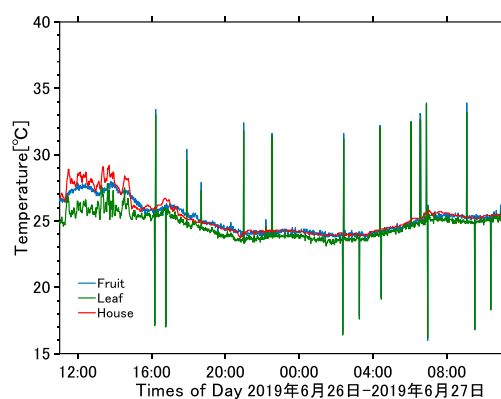


Fig 3.8 Temperature and time

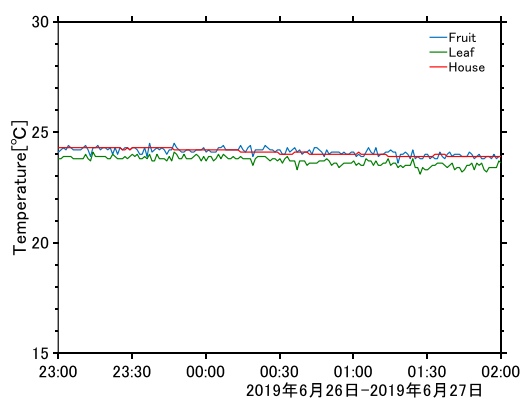


Fig 3.9 Expanded from 23:00 to 02:00

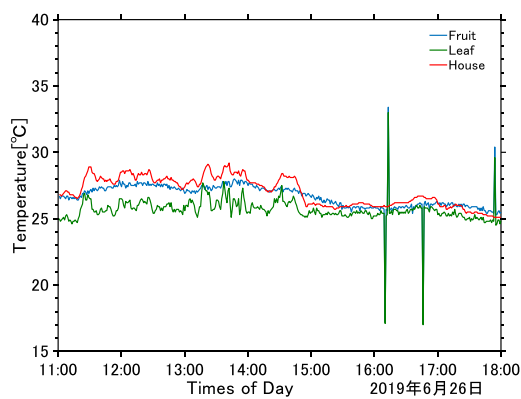


Fig 3.10 Expanded from 11:00 to 17:00

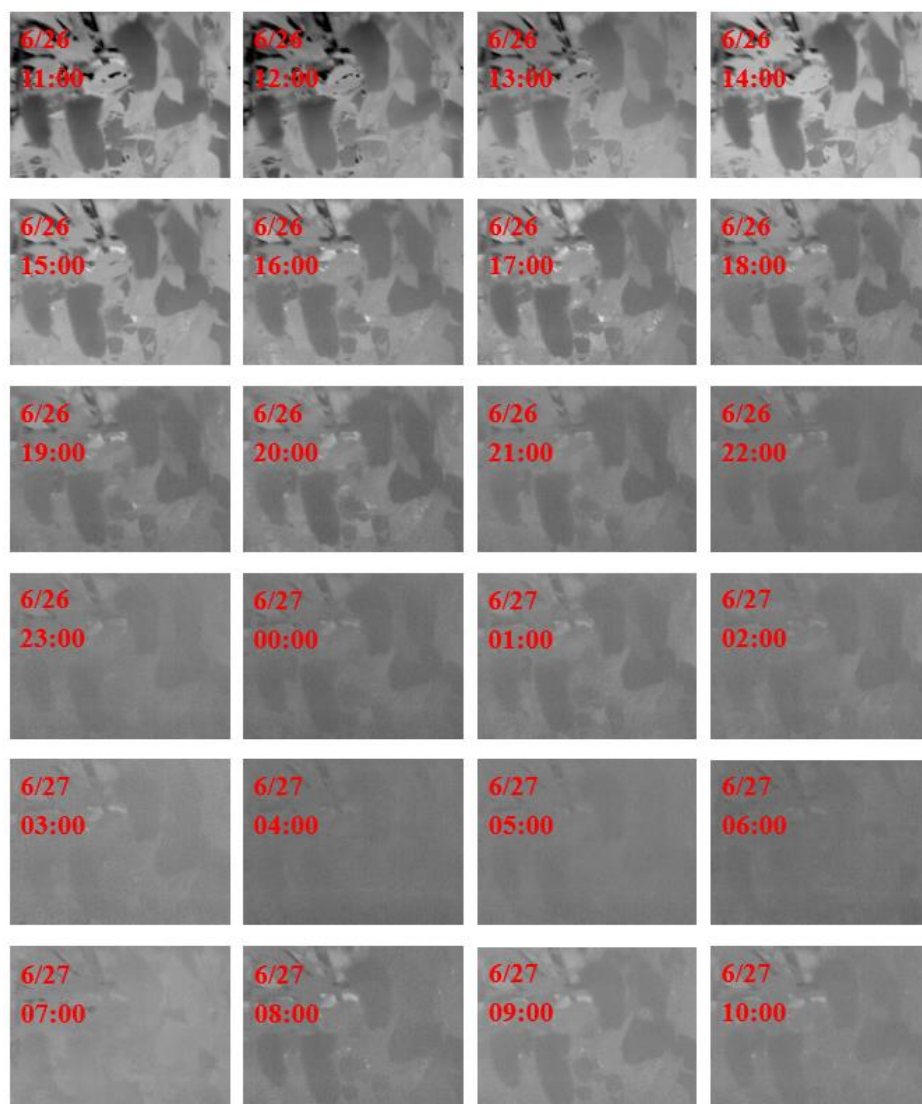


Fig 3.11 Image taken every hour on June 26 at 11:00 to June 27 at 10:59

3.3.3 考察

日中について 6 月 25 日 11:00 から 6 月 26 日 10:59 の天候は晴れであったため蒸散により葉の温度上昇が抑えられたため果実との間に温度差が生じていると考えられる。しかし、天候が曇りから雨に変わった 6 月 26 日 11:00 から 6 月 27 日 10:59 では蒸散が活発でなくハウスの室温も上昇しなかったことから温度差が生じていなかったと考えられる。曇りの時、温度差が生じているが晴れの日ほど果実ははっきりと映ってはいなかった。夜間については晴れ曇り、雨のどの天候においても果実がはっきりと映るほど温度差が生じることはなかった。

実験結果より日中であれば日差しの強さによるハウスの温度変化によって葉と果実の間に温度差が生じることから赤外線カメラによる果実の検出は可能であると考えられる。

3.4 ハウスの室温を利用した果実の温度抽出

3.3 節の実験結果より日中では葉はハウスの温度より低いが果実はハウスの温度と同程度である。この関係よりハウスの室温を利用することで果実の温度のみを抽出することができないのではないかと考えた。ハウスの温度から一定範囲内の温度だけを抽出し温度データを持つピクセルを抽出した。温度範囲は、ハウスの室温から $\pm 1^{\circ}\text{C}$ 、 $\pm 2^{\circ}\text{C}$ 、 $\pm 3^{\circ}\text{C}$ 、 $\pm 4^{\circ}\text{C}$ の4つとした。温度抽出はどの日においても 11:00, 12:00, 13:00, 14:00, 15:00 の画像とハウスの温度を用いた。

3.4.1 抽出結果

6/25 11:00 から 6/26 10:59 の結果を図 3.12, 6/26 11:00 から 6/27 10:59 の結果を図 3.13 に示す。図 3.12 よりどの時間においても $\pm 4^{\circ}\text{C}$ では温度範囲が広いため果実以外の部分が多く抽出されていた。一方、 $\pm 1^{\circ}\text{C}$ では温度範囲が狭いため果実以外の部分はほとんど抽出されていないが果実においても一部しか抽出されていなかった。

$\pm 2^{\circ}\text{C}$ では果実以外の部分については茎が抽出されているがそれ以外は抽出されていなかった。果実についても大部分が抽出されていた。 $\pm 3^{\circ}\text{C}$ では $\pm 2^{\circ}\text{C}$ と同じように抽出されているが果実以外の抽出されている部分が多くなっていた。

図 3.13 より 12:00 のとき以外は温度範囲が $\pm 3^{\circ}\text{C}$ 、 $\pm 4^{\circ}\text{C}$ では画像のほとんどが抽出されていた。11:00 のとき $\pm 1^{\circ}\text{C}$ 、12:00 のとき $\pm 3^{\circ}\text{C}$ 、13:00 のとき $\pm 2^{\circ}\text{C}$ 、14:00 のとき $\pm 2^{\circ}\text{C}$ 、15:00 のとき $\pm 1^{\circ}\text{C}$ の温度範囲において果実の温度抽出ができていた。しかし、図 3.12 のように果実のみが映っていることはなく果実以外の部分も多く抽出されていた。

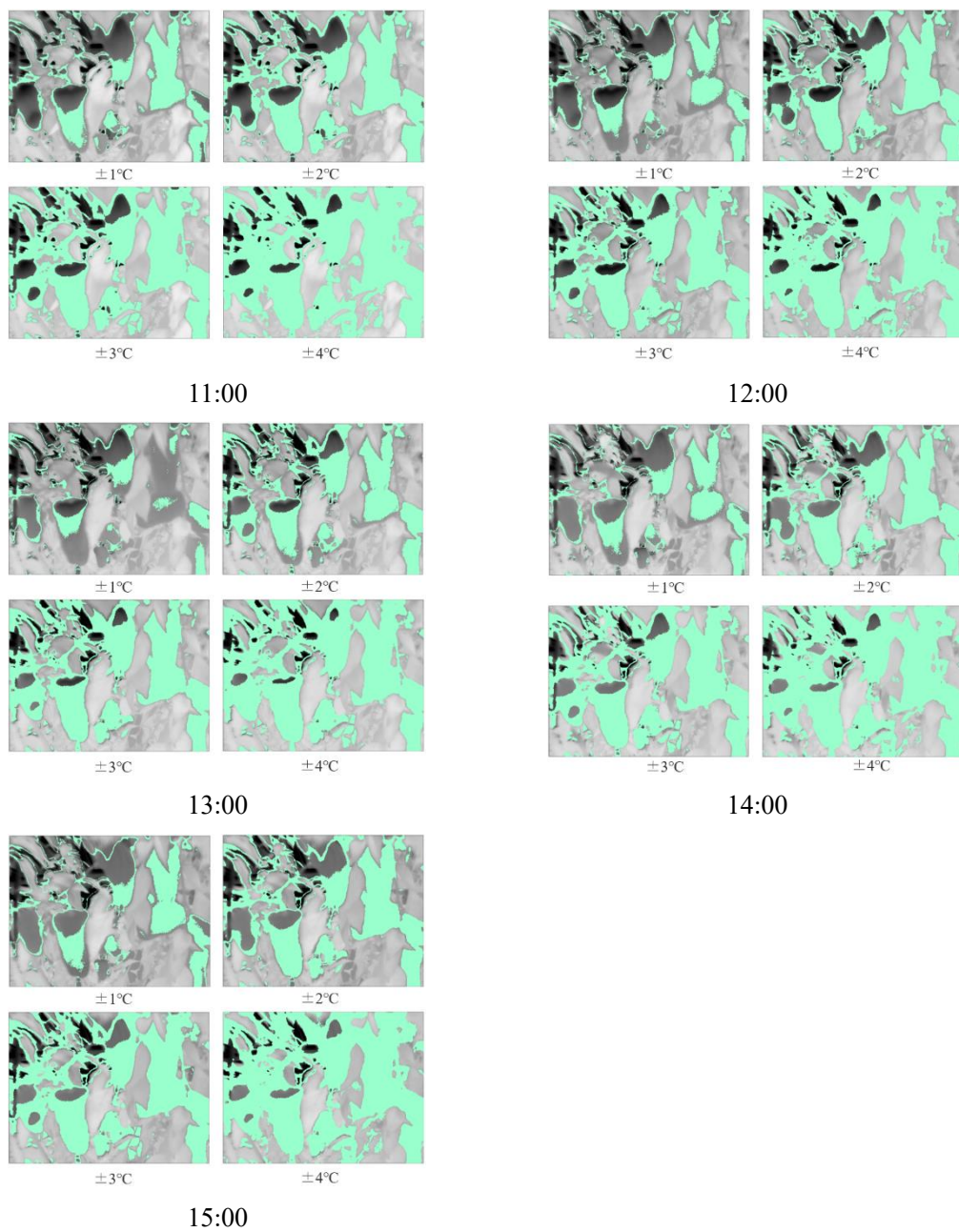


Fig 3.12 Temperature extraction result on June 25 at 11:00 to June 26 at 10:59

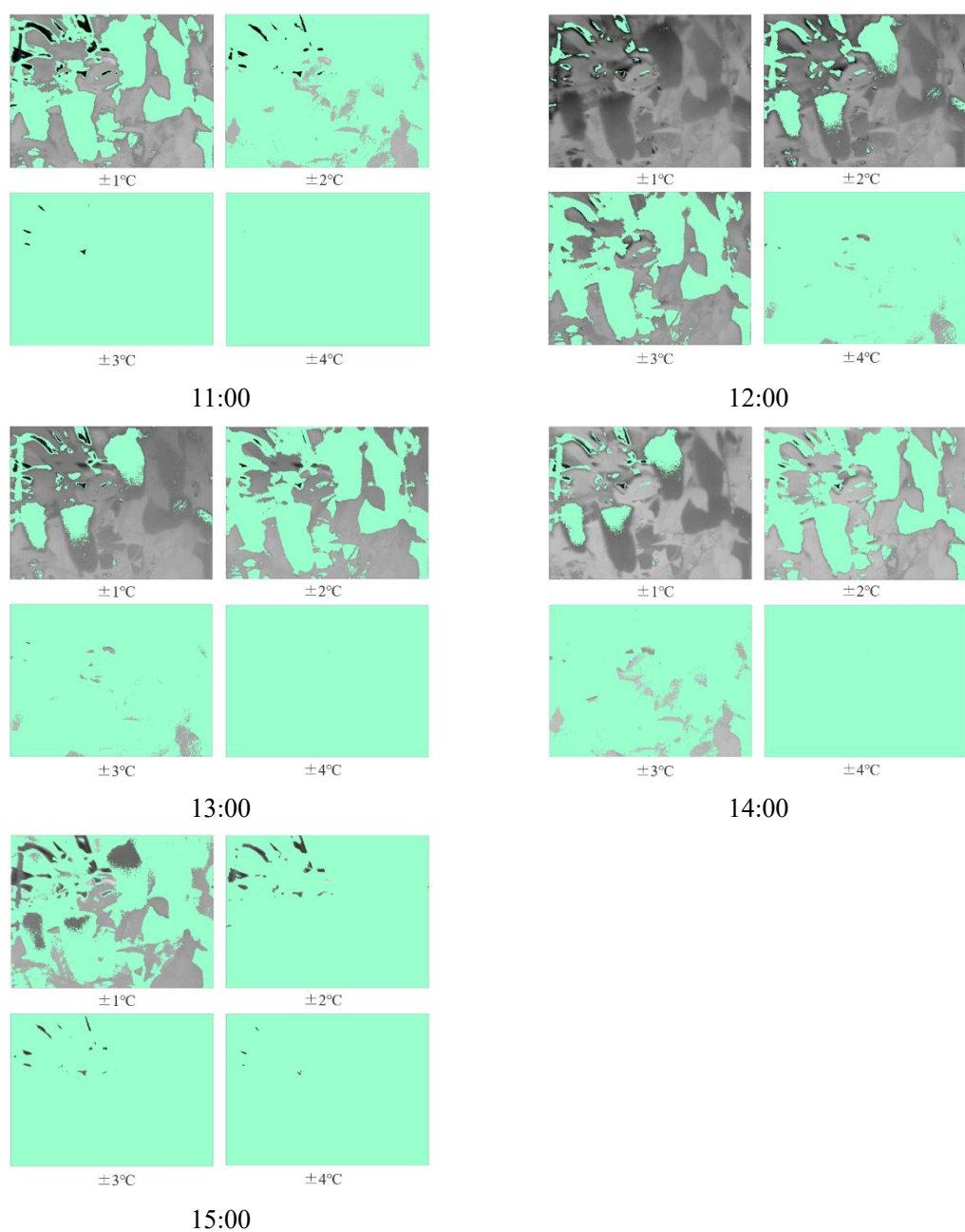


Fig 3.13 Temperature extraction result on June 26 at 11:00 to June 27 at 10:59

3.4.2 考察

果実の温度がハウスと同程度であり葉の温度が低いことからハウスの温度を基準とした果実の温度抽出を行ったが晴れの日であれば温度差が大きいため果実の温度抽出が行えていた。果実を検出しやすくするためにハウスの温度を基準とした温度抽出は有効であると考えられる。

3.5 画像処理による果実の検出

3.5 節にて果実の温度抽出を行った画像に対して画像処理を行い果実の検出を行うことができるか検証を行った。

3.5.1 画像処理の手順

画像処理は図 3.14 に示す手順に従い行った。初めに温度データによって白い部分と黒い部分がある画像を 0 と 1 に変換する 2 値化という処理を行う。次に 2 値化処理を行った画像は輪郭が不鮮明であったり内部が塗りつぶされていなかったりするため平滑化という処理を行う。その後、画像の中からピクセル面積が 1500 以上のもののみを画像に残す処理を行う。最後に残った部分が果実であるので元画像にて検出した部分を着色する。以上が果実を検出する画像処理の一通りの手順である。

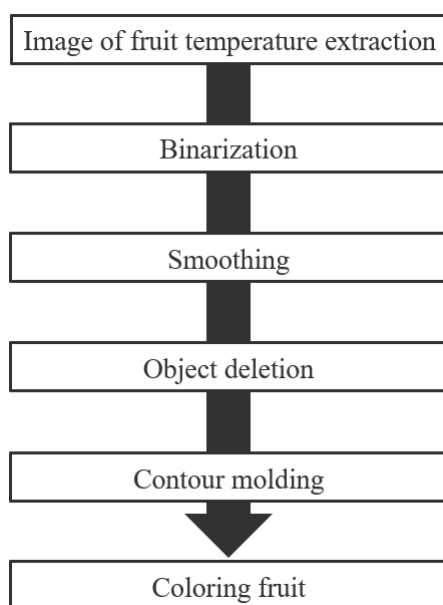


Fig 3.14 Image processing algorithm

3.5.2 検出結果

6/26 11:00 から 6/27 10:59 については果実の温度抽出の時点で果実以外の多くの部分が着されていることから、画像処理を行っても果実を検出できないため検出結果については 6/25 11:00 から 6/26 10:59 の抽出画像に対して処理を行った結果のみ示す。画像処理を行った結果を図 3.15 に示す。どの時間においても果実の検出はできていた。しかし、温度範囲が広い抽出画像から果実を検出した場合、果実以外の部分も果実として検出されていた。温度範囲が狭い場合は果実の部分を検出できていた。

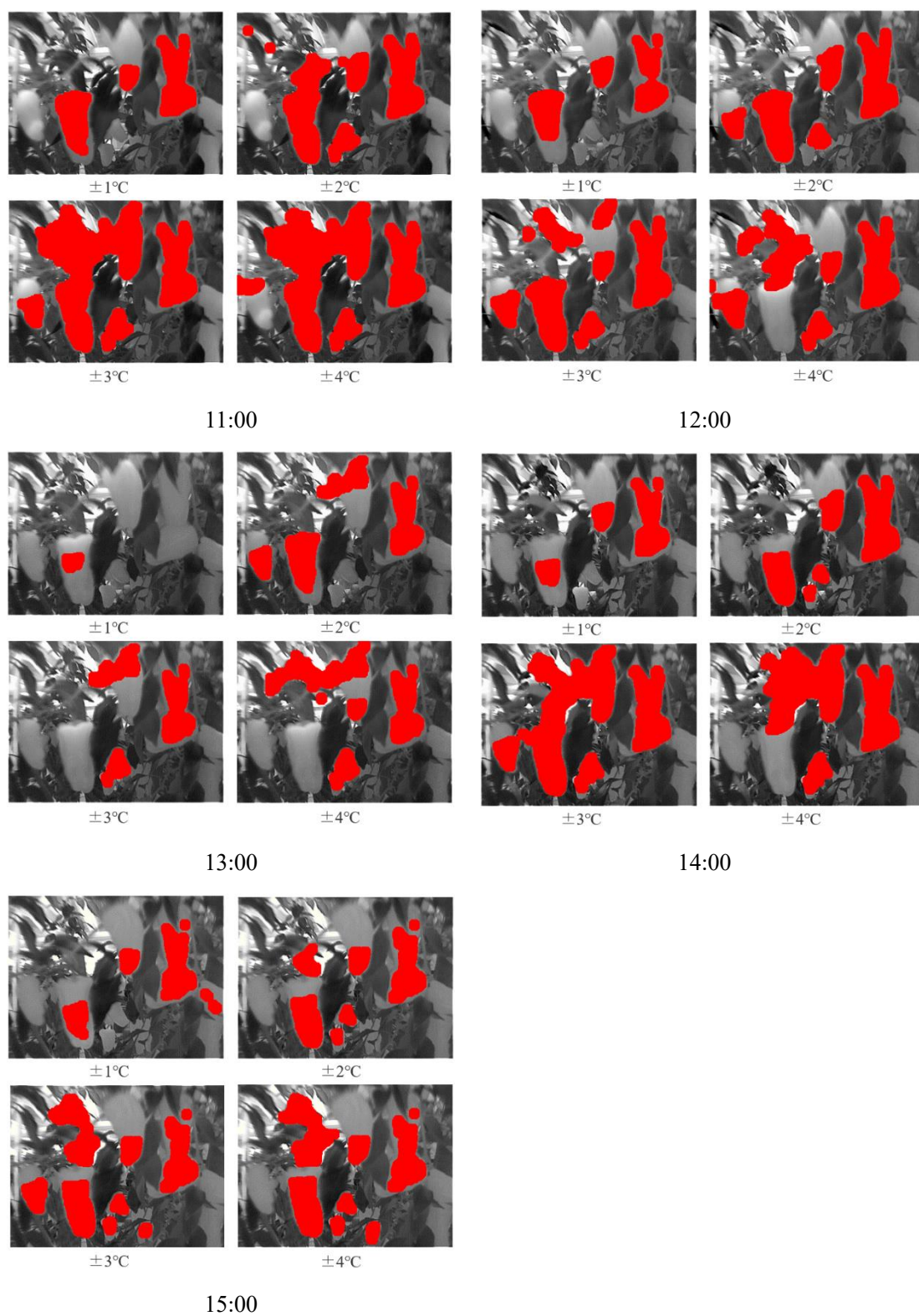


Fig 3.15 Detection result on June 25 at 11:00 to June 26 at 10:59

3.3.3 考察

温度抽出画像に対して画像処理を行うことで果実である部分が着色されていることから温度による果実の検出は可能であると考えられる。しかし、温度範囲や時間帯によっては果実以外の部分も果実として検出しているため画像処理のパラメタやアルゴリズムの見直しが必要であると考えられる。今回の実験では夏場のハウスであり温度差が大きくなりやすい環境での検証であった。今後は、実際に収穫が行われる冬場のハウスでの検証が必要であると考えられる。

第4章 冬場のハウスでの実験

第3章の結果より温度差を利用した方法の有効性が確認されたため収穫時期である冬場のハウスにて実際に検出が可能であるか実験を行った。使用機材については第3章 3.1節と同様である。

4.1 実験方法

第3章と同様にハウス内にて葉と果実の温度を赤外線カメラ、ハウス内の温度を温湿度センサにより計測した。赤外線カメラの撮影間隔は30秒、温度等の測定間隔は1分とした。条件を表4.1、赤外線カメラでの撮影の様子を図4.1、センサによる測定の様子を図4.2に示す。また、実験を行ったハウスの外観を図4.3、内観を図4.4に示す。

Table 4.1 Experimental condition

Date	2019/12/10 to 2019/12/17	
Weather	Sunny and then cloudy	12/10
	Cloudy	12/11
	Sunny	12/12 to 12/16
	Cloudy Then rain	12/17
Place	Geisei Village, Aki County, Kochi Prefecture	



Fig 4.1 State of shooting on infrared camera on winter house



Fig 4.2 Measurement by sensor on winter house



Fig 4.3 House exterior



Fig 4.4 House inside view

4.3 実験結果

第 3 章と同様に実験結果について、ハウスの室温とピーマンの果実および葉の間にどのような関係があるか調べるためにそれぞれの温度をグラフ化した。果実および葉に関しては画像の中からそれぞれ 1 か所の温度を抜き出したものである。また、実験日のピーマンの様子が分かるように撮影画像を 1 時間ごとにまとめた。晴れの日の結果は差異があまり見られなかったため 12 月 12 日と 12 月 14 日の結果について示す。他の記載していない結果については付録に示す。

4.3.1 12月11日の結果

結果について、図 4.5 に抜き出した場所、図 4.6 に一日を通しての時間と温度の関係、図 4.7 に 00:00 から 02:00 の間で拡大、図 4.8 に 08:00 から 17:00 の間で拡大、図 4.9 に 1 時間ごとの撮影画像を示す。図 4.7 より夜間においては葉と果実の間に温度差は生じていなかった。図 4.9 より 00:00 から 02:00 の画像においても果実がはっきりと黒く映っていなかった。

図 4.8 より日中においては果実と葉の間に温度差が生じていた。図 4.9 より 11:00 から果実が黒く映り始め 13:00 になると果実が黒くはっきりと映っていた。17:00 まで果実が黒く映っているがそれ以降は温度差がなくなり葉も果実も白く映り判別はできない。

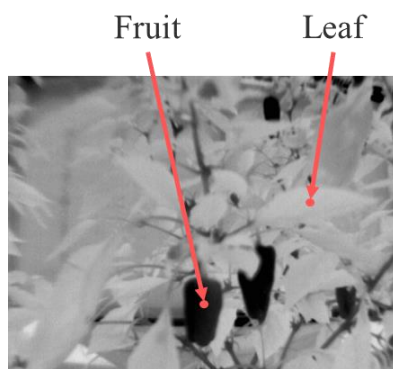


Fig 4.5 Extraction location

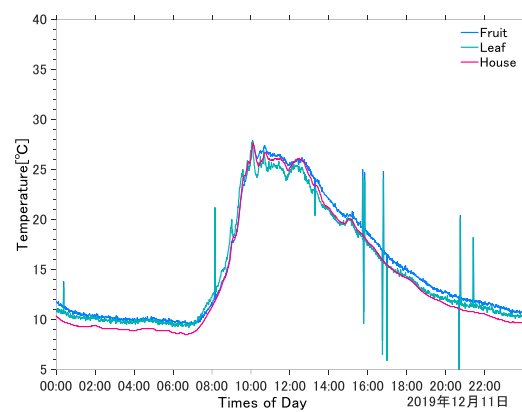


Fig 4.6 Temperature and time

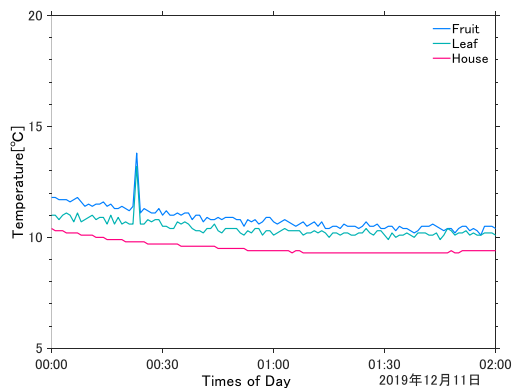


Fig 4.7 Expanded from 00:00 to 02:00

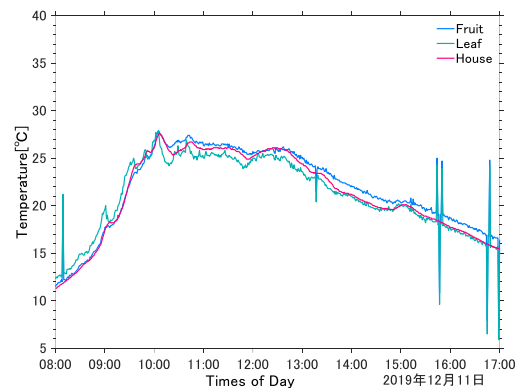


Fig 4.8 Expanded from 08:00 to 17:00

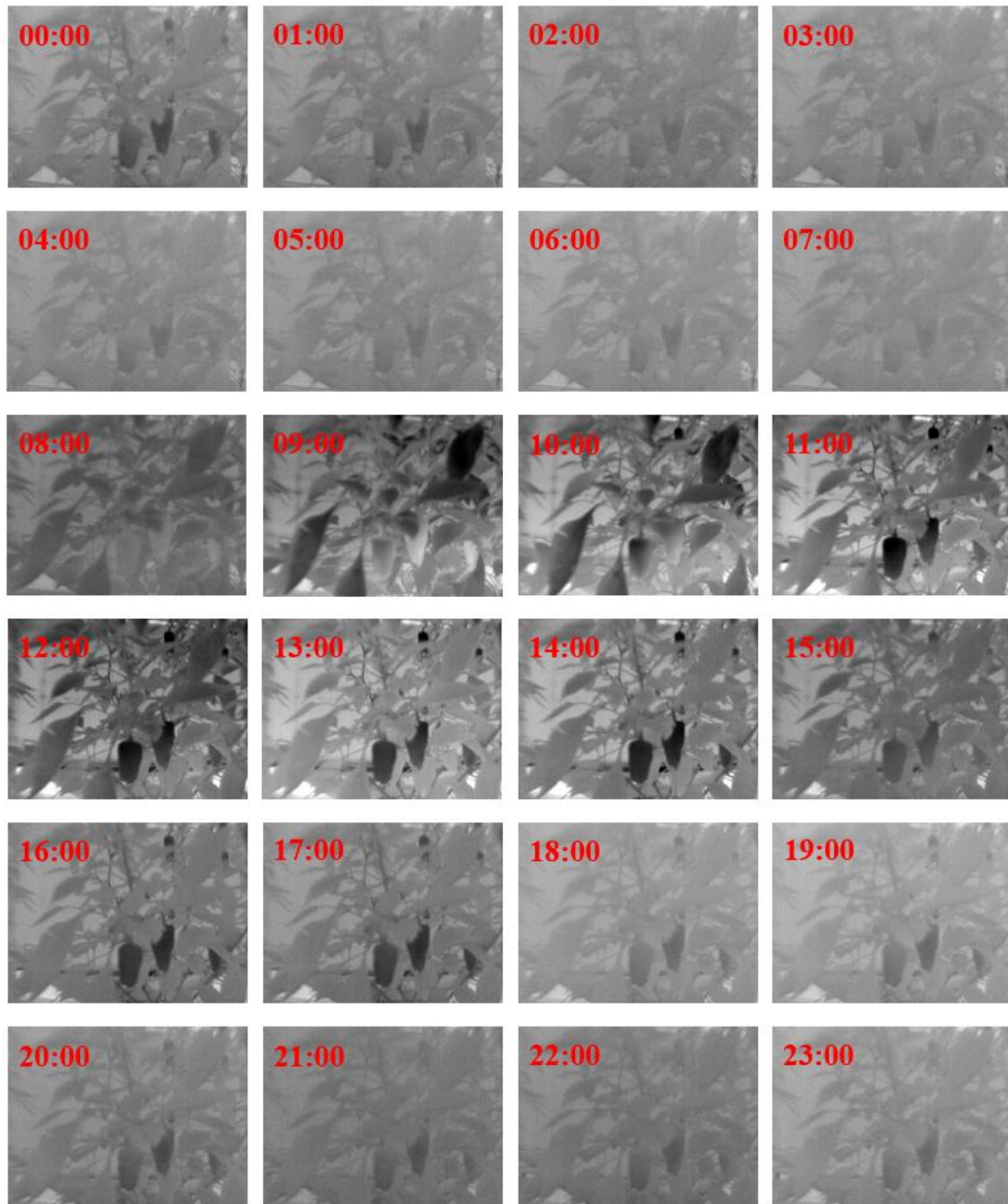


Fig 4.9 Image taken every hour on December 11

3.3.2 12月12日の結果

結果について、図 4.10 に抜き出した場所、図 5.11 に一日を通しての時間と温度の関係、図 5.12 に 00:00 から 02:00 の間で拡大、図 5.13 に 08:00 から 17:00 の間で拡大、図 5.14 に 1 時間ごとの撮影画像を示す。図 5.12 より夜間では温度差は生じていなかった。図 5.14 の 00:00 から 02:00 においても果実と葉は白く映っており果実の判別はできなかった。

図 5.13 より日中においては葉と果実の間に温度差が生じていた。果実はハウスの温度上昇が止まった後も温度が上昇し続けていた。その後、温度が低下しハウスの温度と同等の温度となった。図 5.14 の 08:00 から 17:00 において 10:00 の時、果実と一部の葉が黒く映っていた。その後、15:00 になると果実が黒くはっきりと映っていた。

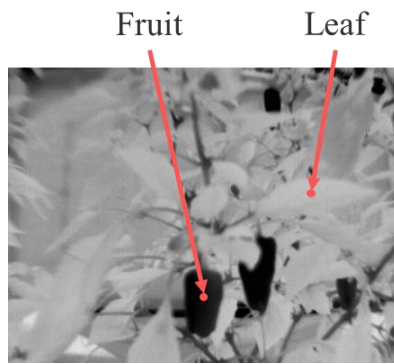


Fig 4.10 Extraction location

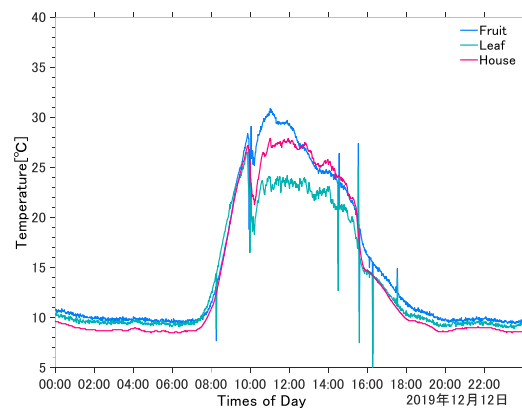


Fig 4.11 Temperature and time

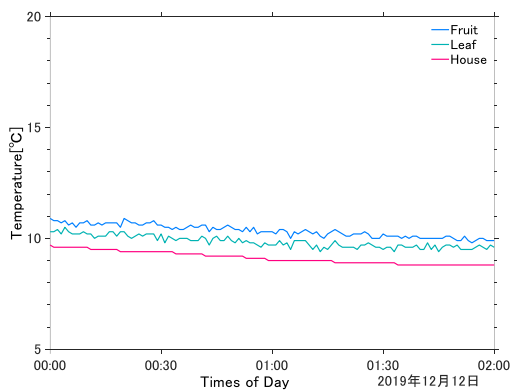


Fig 4.12 Expanded from 00:00 to 02:00

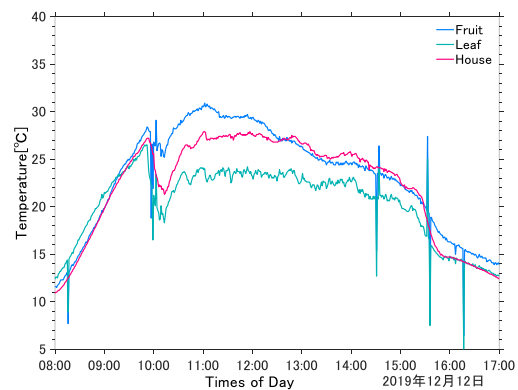


Fig 4.13 Expanded from 08:00 to 17:00

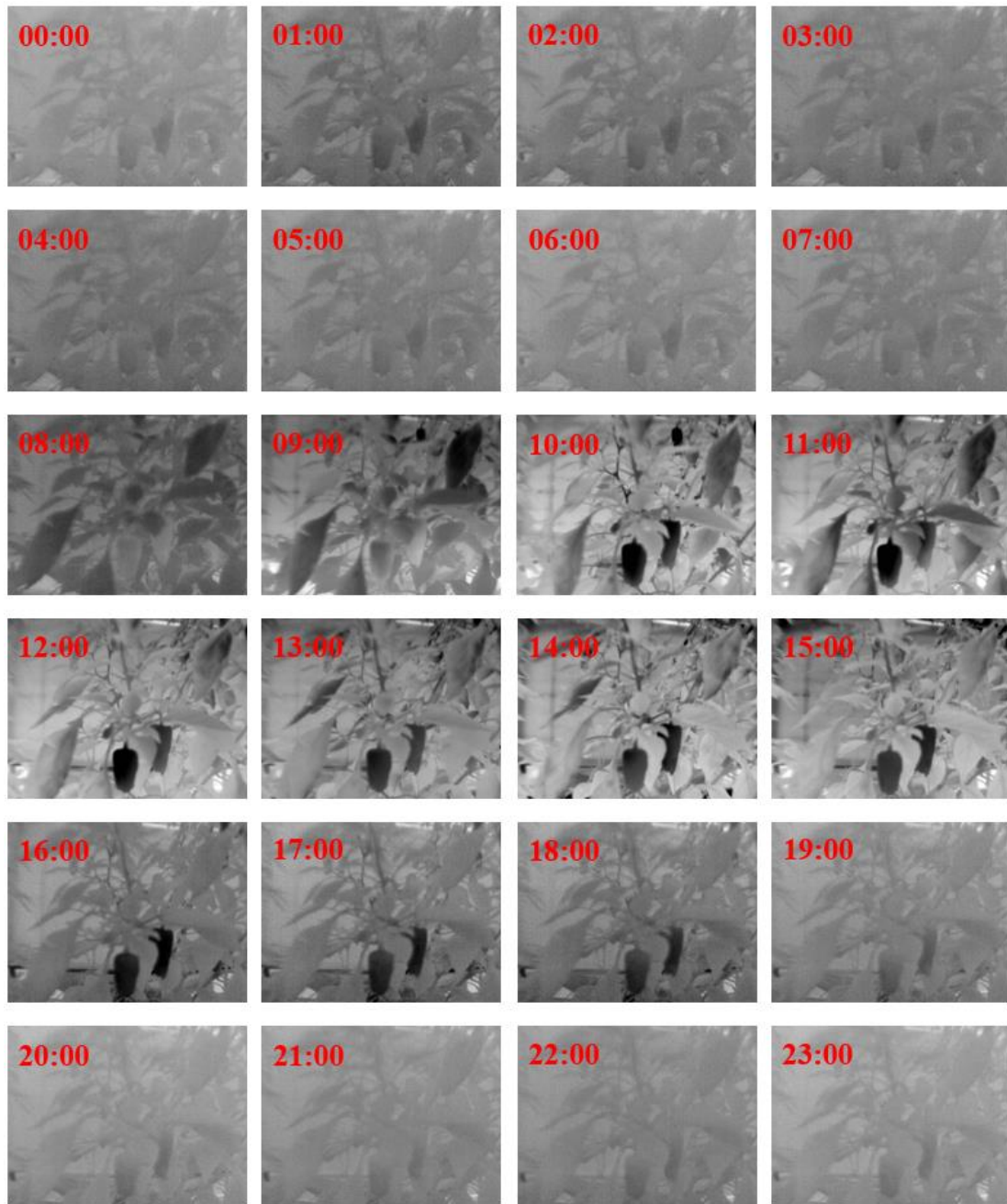


Fig 4.14 Image taken every hour

3.3.5 12月14日の結果

結果について、図 4.15 に抜き出した場所、図 4.16 に一日を通しての時間と温度の関係、図 4.17 に 00:00 から 02:00 の間で拡大、図 4.18 に 08:00 から 17:00 の間で拡大、図 4.19 に 1 時間ごとの撮影画像を示す。図 4.17 より未明においてボイラが稼働したときハウスの温度は上昇していた。それに伴い葉と果実の温度も上昇していた。ボイラが停止しハウスの温度が低下しているとき葉の温度は追従するように低下しているが果実は緩やかに温度が低下していた。図 4.19 の 00:00 から 02:00 において果実と葉が白く映ったり黒く映ったりしていた。

図 4.18 より日中においては果実と葉の間に温度差が生じていた。果実は、ハウスの温度上昇が止まった後も温度が上昇していた。昼過ぎから夕方にかけて果実と葉の間の温度差が最も大きかった。図 4.19 の 08:00 から 17:00 において 11:00 の時、果実と一部の葉が黒く映っていた。その後、15:00 になると果実が黒くはっきりと映っていた。

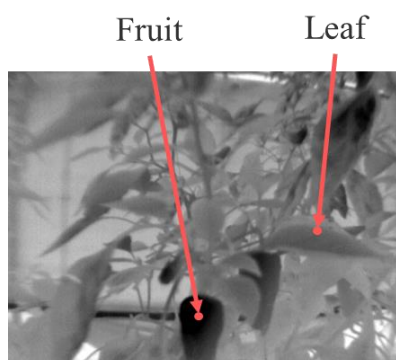


Fig 4.15 Extraction location

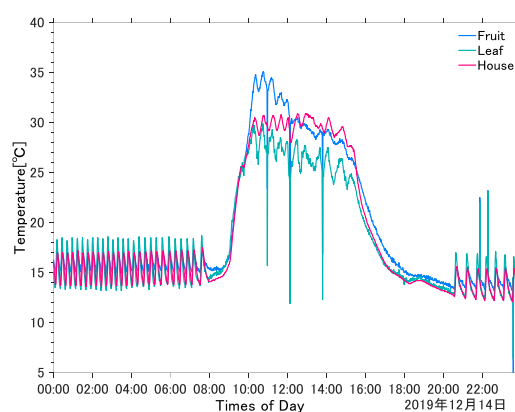


Fig 4.16 Temperature and time

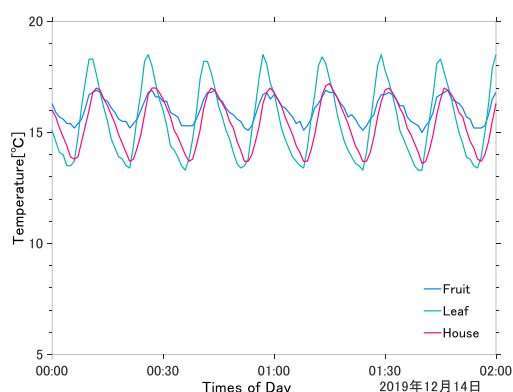


Fig 4.17 Expanded from 00:00 to 02:00

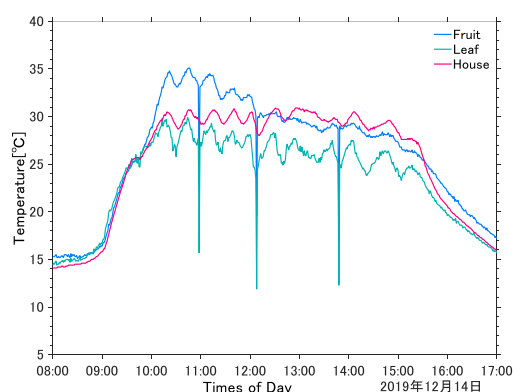


Fig 4.18 Expanded from 08:00 to 17:00

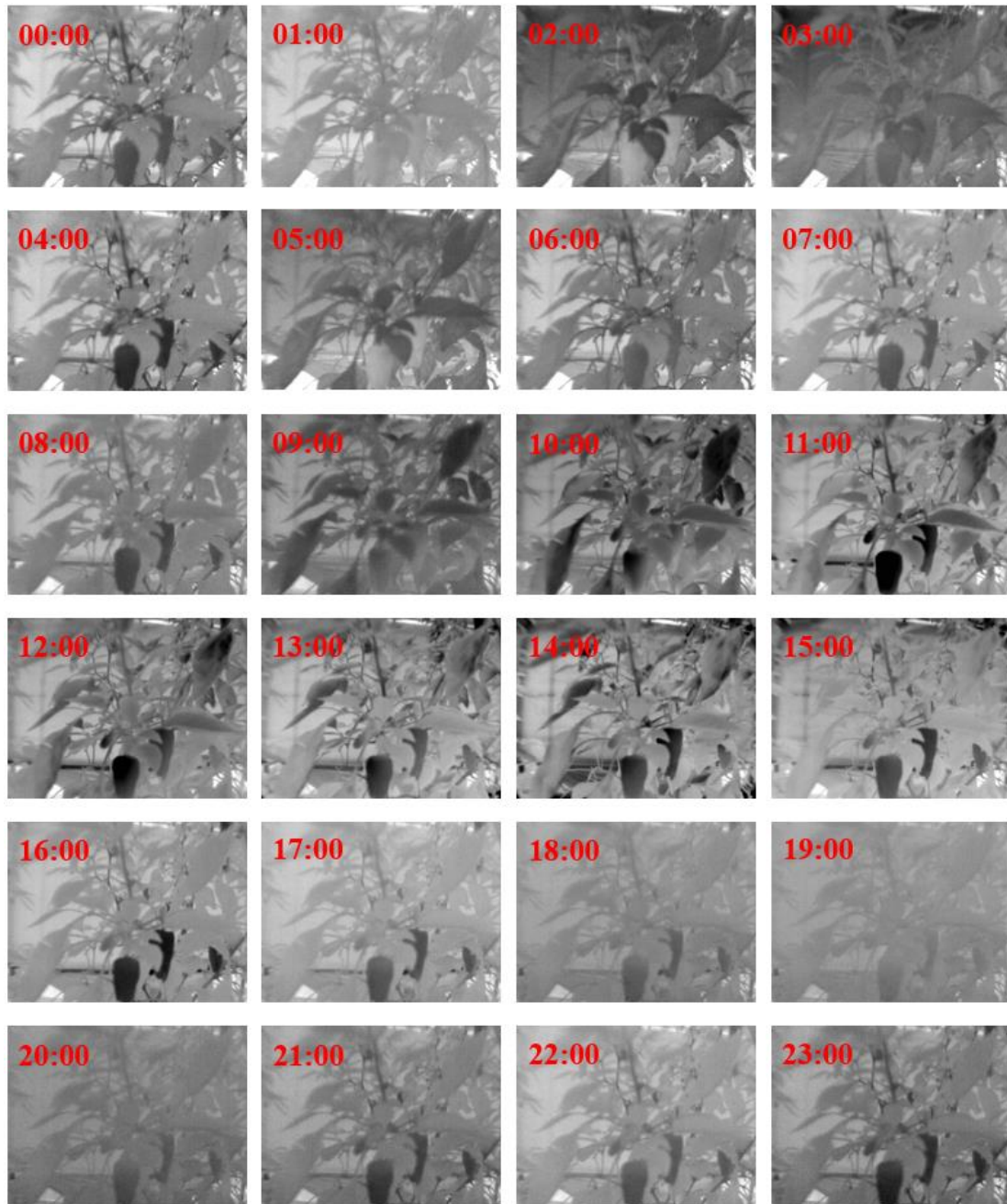


Fig 4.19 Image taken every hour

3.3.8 12月17日の結果

結果について、図 4.20 に抜き出した場所、図 4.21 に一日を通しての時間と温度の関係、図 4.22 に 00:00 から 02:00 の間で拡大、図 4.23 に 08:00 から 17:00 の間で拡大、図 4.24 に 1 時間ごとの撮影画像を示す。図 4.22 よりボイラの稼働回数は 2 回であり再稼働までの時間が長いが葉はハウスの温度に追従しているが果実は緩やかに温度が低下しており葉と果実に温度差が生じていた。

図 4.24 の 00:00 から 02:00 において 00:00 の時、果実が少し黒く映っていたがその後徐々に白くなっていった。図 4.23 よりハウスの温度が上昇しておらず果実と葉の間に温度差が生じている時間が短かった。14:00 のときが一日を通して最も葉と果実の間に温度差が生じていた。図 4.24 の 08:00 から 17:00 においても 14:00 の時、果実が黒くはっきりと映っていた。

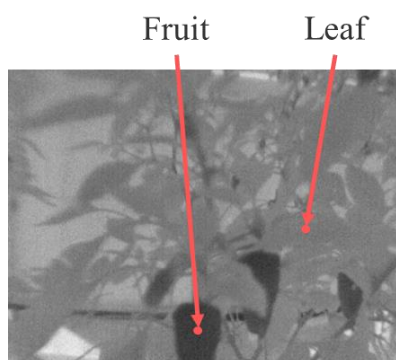


Fig 4.20 Extraction location

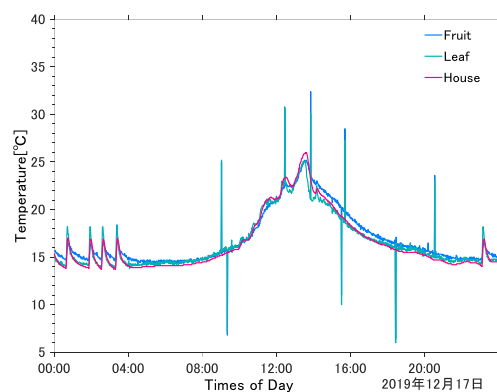


Fig 4.21 Temperature and time

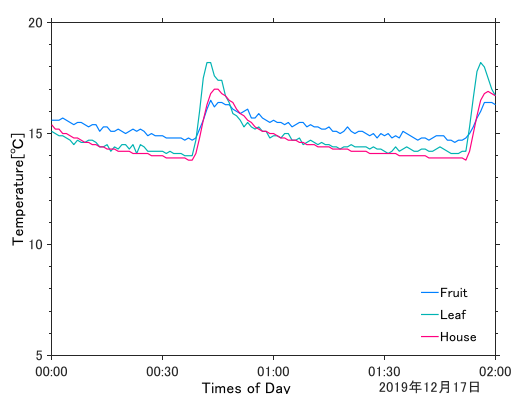


Fig 4.22 Expanded from 00:00 to 02:00

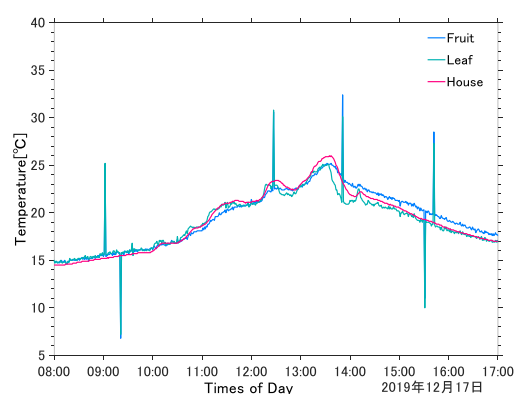


Fig 4.23 Expanded from 08:00 to 17:00

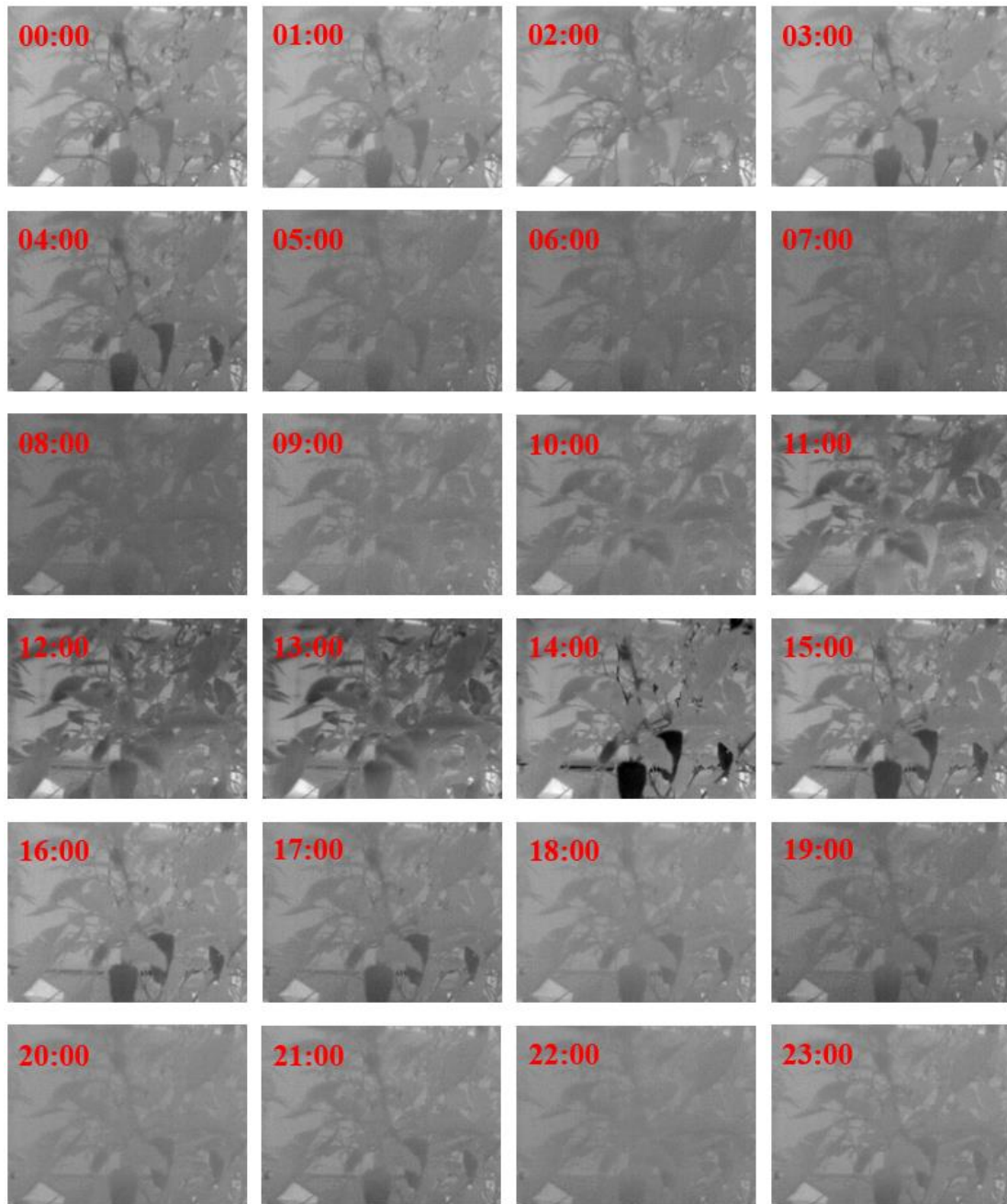


Fig 4.24 Image taken every hour

3.3.9 考察

蒸散による温度差について曇りの日だった 12 月 11 と雨の日だった 12 月 17 日は、日差しが弱かったためハウスの温度も上昇しておらず蒸散も活発ではないため葉と果実の間に温度差が生じなかったと考えられる。そのほかの日は、晴れだったため日差しが強くハウスの温度も上昇していたと考えられる。また、葉については蒸散が活発だったため温度上昇が抑えられハウスの温度よりも低い温度となったと考えられる。一方、果実は蒸散をほとんど行わないため温度の上昇が抑えられずハウスの温度上昇が止まった後も温度が上昇し続けていたのではないかと考えられる。晴れの日の日中においては、葉は蒸散により温度が低い。ため果実との間に温度差が生じていることから蒸散による温度差を利用した果実の特定は有効であると考えられる。

熱容量の違いによる温度差についてボイラが稼働するとハウス内に温度変化が生じ葉と果実の温度も上昇する。その後、ボイラが停止しハウスの温度が低下するとき葉は追従するように温度が低下していた。一方、果実はハウスの温度に追従せず緩やかに温度が低下しており葉との間に温度差が生じていた。また、曇りと雨の日はボイラの稼働回数が少ないが稼働後は葉と果実の間に温度差が生じていることから熱容量の違いによる温度差を利用した果実の特定は有効であると考えられる。

どの実験結果においてもハウスの温度が上昇していると葉と果実も温度が上昇し、ハウスの温度が低下していると葉と果実も温度が低下していることからハウスの温度と葉・果実の温度は同一ではないが温度変化は対応していると考えられる。

晴れの日においてはどの実験結果においてもハウスの温度上昇が止まった後も果実の温度は上昇し続け昼前に温度上昇が止まり昼過ぎ頃にハウスの温度まで低下しその後は夜のはじめまでハウスの温度と同等の温度を維持することから果実の温度によりその日の天候が晴れであるとするパラメタとして用いることができるのではないかと考えられた。

第5章 実際のピーマンの検出

5.1 ハウスの室温を利用した果実の温度抽出

5.1.1 日中における果実の温度抽出

第4章の結果より第3章の基礎実験で得られた葉はハウスの温度より低いが果実はハウスの温度と同程度である関係が見受けられたため、同様にハウスの温度から一定範囲内の温度データを持つピクセルを抽出した。温度範囲は、ハウスの室温から $\pm 1^{\circ}\text{C}$ 、 $\pm 2^{\circ}\text{C}$ 、 $\pm 3^{\circ}\text{C}$ 、 $\pm 4^{\circ}\text{C}$ の4つとした。温度抽出はどの日においても11:00、12:00、13:00、14:00、15:00の画像とハウスの温度を用いた。

5.1.2 抽出結果

図5.1に12月11日、図5.2に12月12日、図5.3に12月14日、図5.4に12月17日の結果を示す。抽出結果について晴れの日には複数あったが差異がほとんどなかったため12月12日と12月14日の2つを示す。他の記載していない結果については付録に示す。

曇りの日であった図5.1では温度範囲が $\pm 2^{\circ}\text{C}$ 以上になると果実の温度以外も含まれてしまい画像全体が抽出された。 $\pm 1^{\circ}\text{C}$ のとき14:00と15:00では画像全体ではないがほとんどの部分が抽出されていた。11:00、12:00、13:00では抽出された部分は少なくなっているが果実以外の部分も多くあり果実の温度抽出はできていなかった。

晴れの日であった図5.2、図5.3では、どの時間においても $\pm 4^{\circ}\text{C}$ だと果実以外の部分が多く抽出されていた。また、 $\pm 1^{\circ}\text{C}$ では果実の部分も抽出されておらず一部分しか抽出されていなかった。しかし、図5.2の15:00のとき果実が抽出できていた。 $\pm 2^{\circ}\text{C}$ では12:00、13:00、14:00、15:00のとき果実以外の大部分は抽出されなかったがハウスの骨組みなど果実と同等の温度であった部分が抽出されていた。 $\pm 3^{\circ}\text{C}$ では12:00のとき一部果実以外の温度が抽出されていたがおおむね果実の抽出ができていた。それ以外の時間では $\pm 2^{\circ}\text{C}$ より果実以外の部分が多く抽出されていた。

雨の日であった図5.4では13:00、14:00の $\pm 1^{\circ}\text{C}$ のとき温度が抽出されているが果実の以外の部分が多く果実の抽出とはならなかった。 $\pm 1^{\circ}\text{C}$ 以外の温度範囲ではどの時間においても画像内のほぼすべての温度が抽出されており果実の抽出はできていなかった。

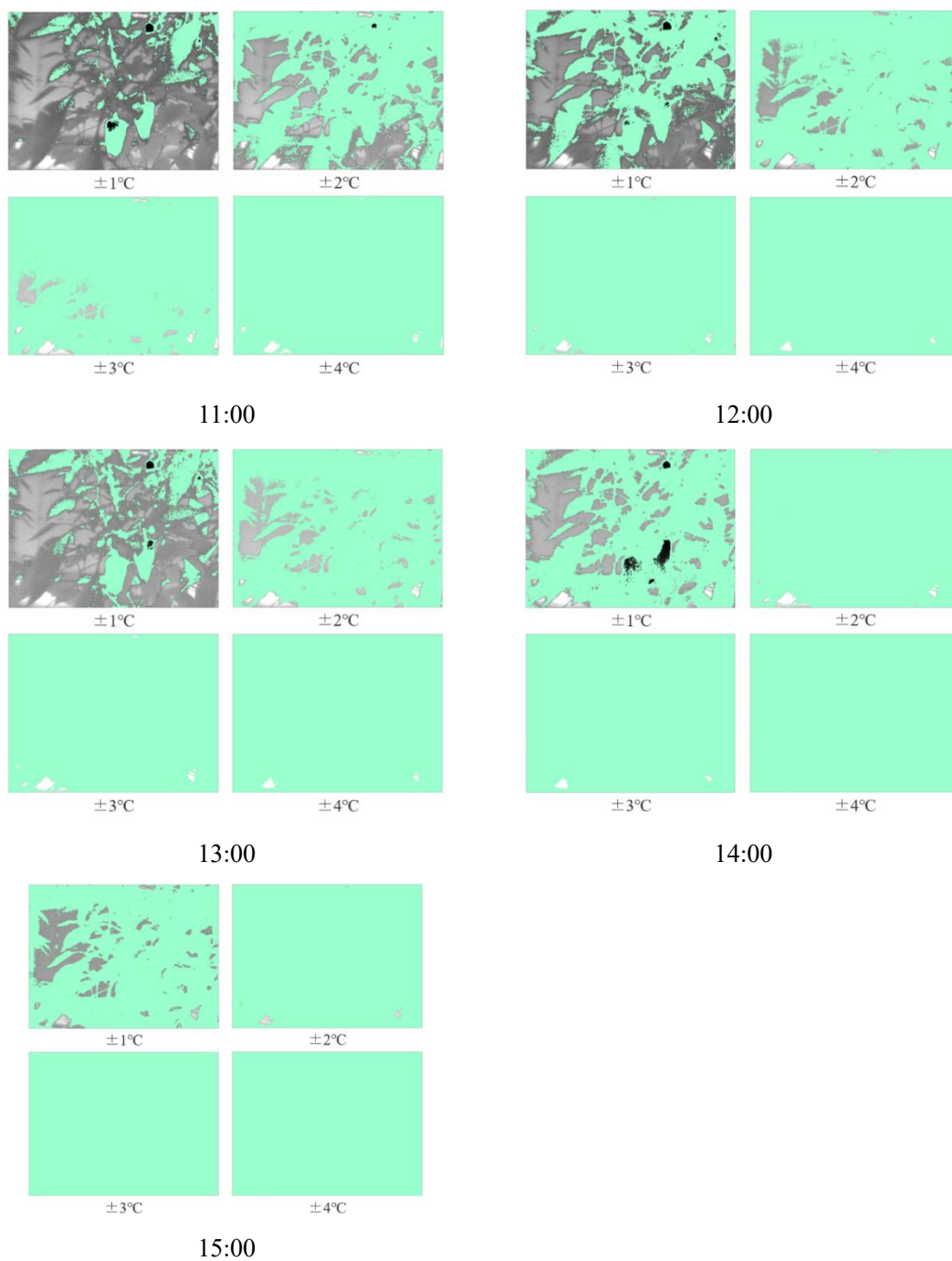


Fig 5.1 Daytime temperature extraction results on December 11

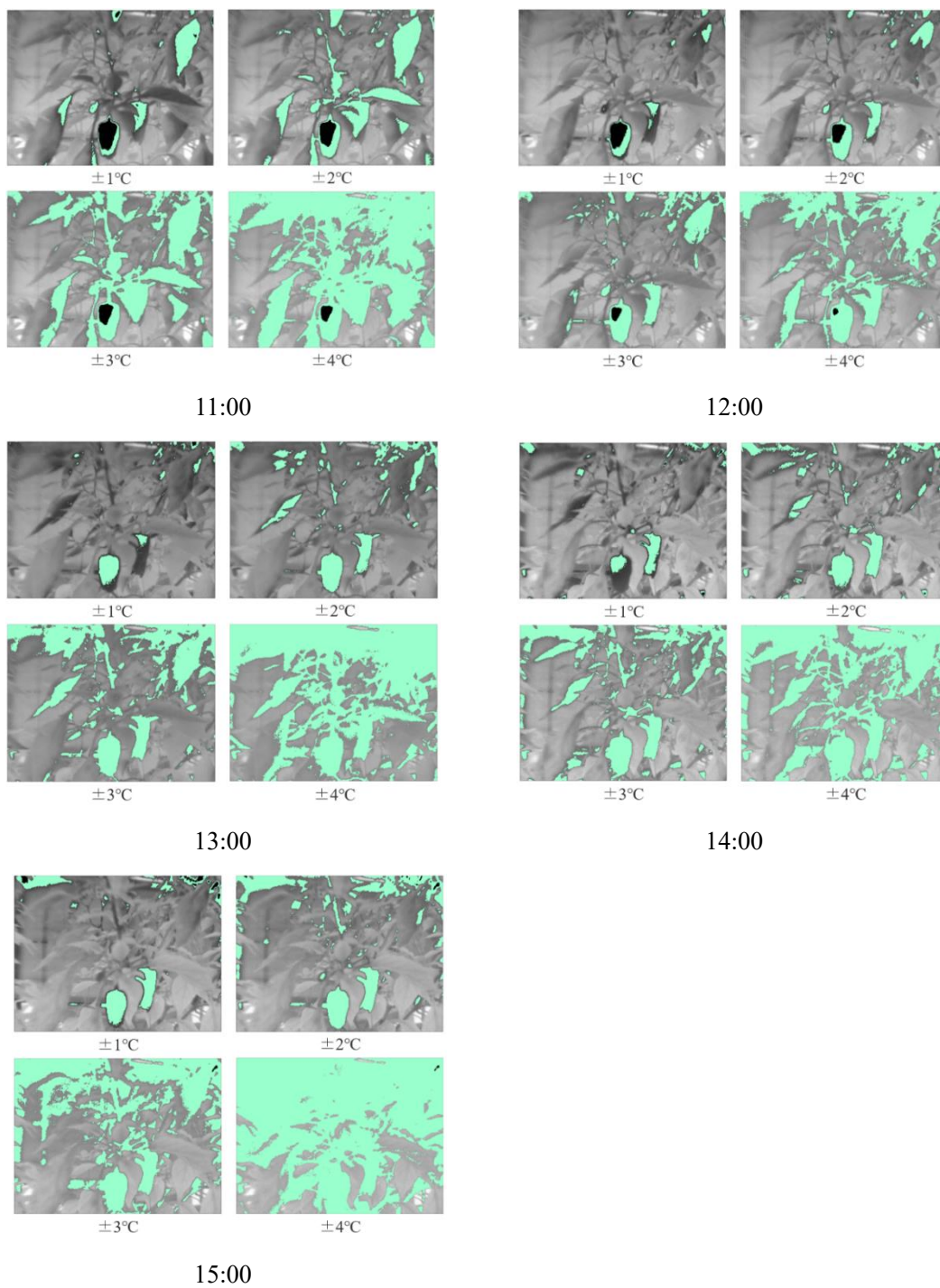


Fig 5.2 Daytime temperature extraction results on December 12

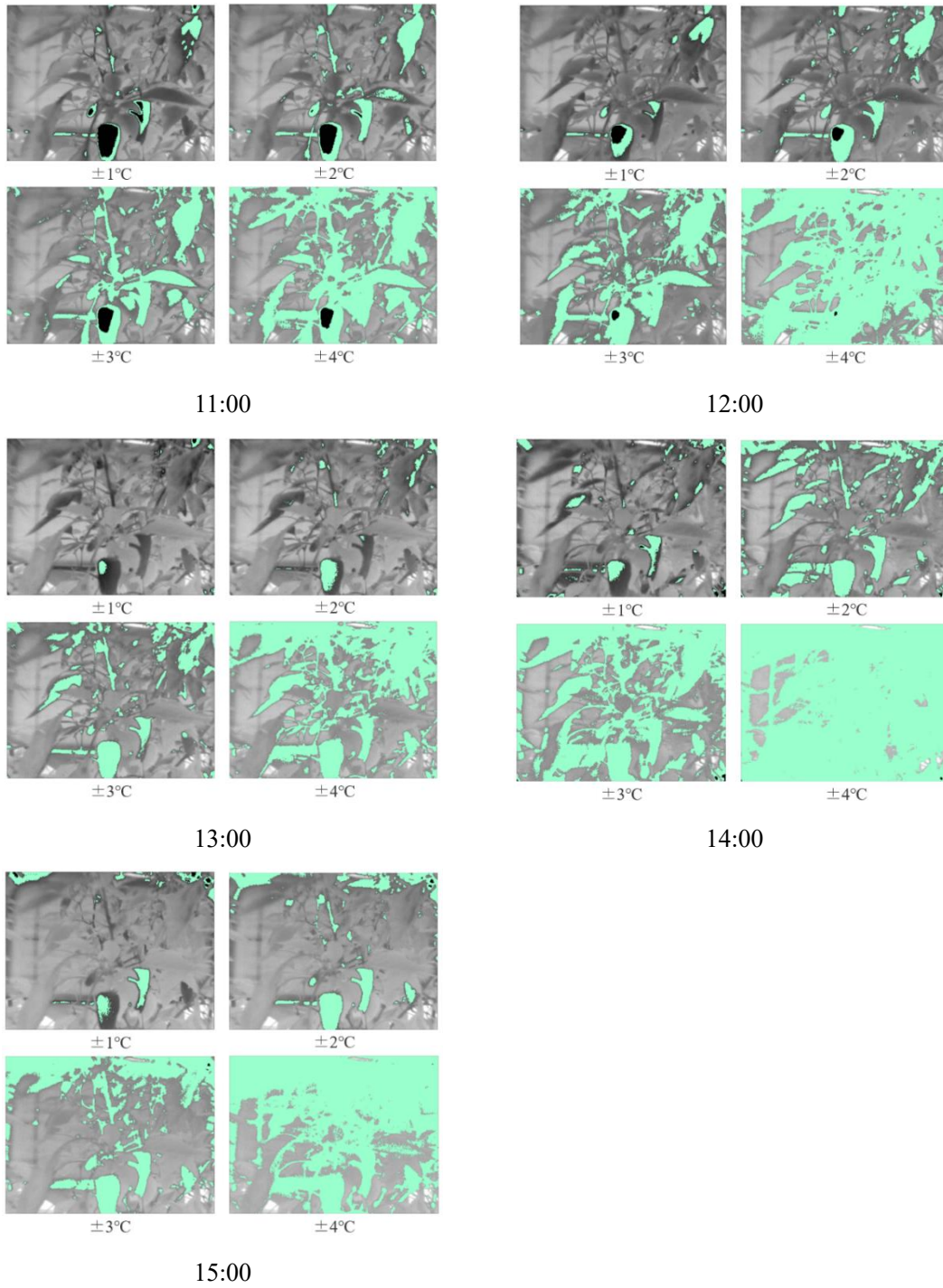


Fig 5.3 Daytime temperature extraction results on December 14

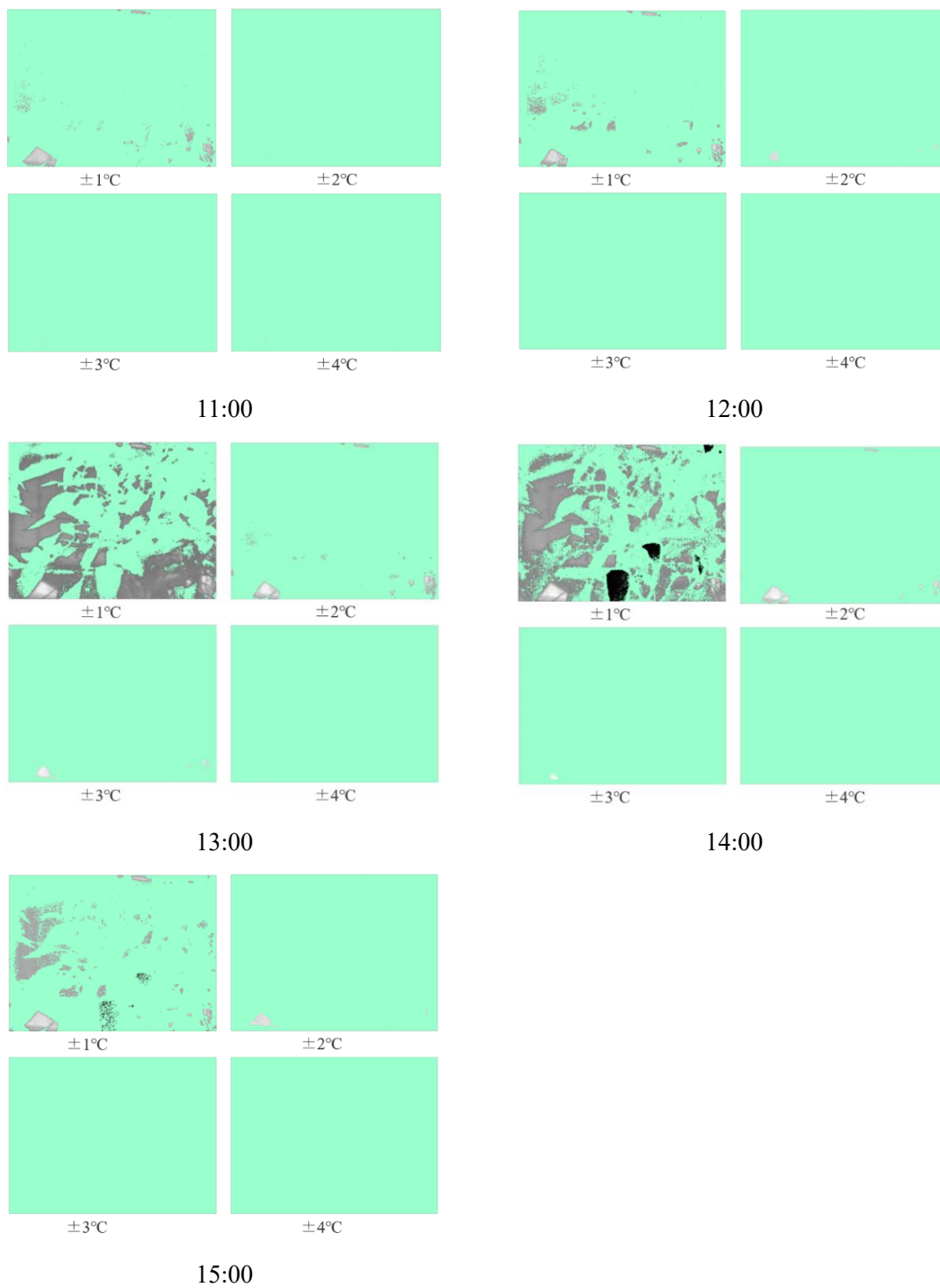


Fig 5.4 Daytime temperature extraction results on December 17

5.1.3 夜間における果実の温度抽出

第4章の実験結果より夜間ではボイラが稼働することによりハウスに温度変化が生じ、葉と果実に温度差が生じていた。ボイラが稼働していたどの日においても葉の温度はハウスの温度より低くなっていたが果実の温度はハウスの温度を下回ることにはなかった。この関係から、ハウスの温度から一定範囲以上の温度を果実の温度として抽出を行った。また、ボイラが稼働するタイミングは日によって異なるためハウスの温度から図5.5に示すように極小値を見つけその時間の画像に対して温度抽出を行った。温度範囲は、ハウスの温度から $+0.5^{\circ}\text{C}$ 、 $+1.0^{\circ}\text{C}$ 、 $+1.5^{\circ}\text{C}$ 、 $+2.0^{\circ}\text{C}$ の4つとした。同じ日の中で極小値は複数あったが図5.5より傾向が同じだったため抽出に用いた画像は各日において以下に示すハウスの温度が極小となった時間とした。

12月14日 00:37, 01:24

12月15日 00:28, 01:23

12月16日 00:21, 01:29

12月17日 00:37, 01:52

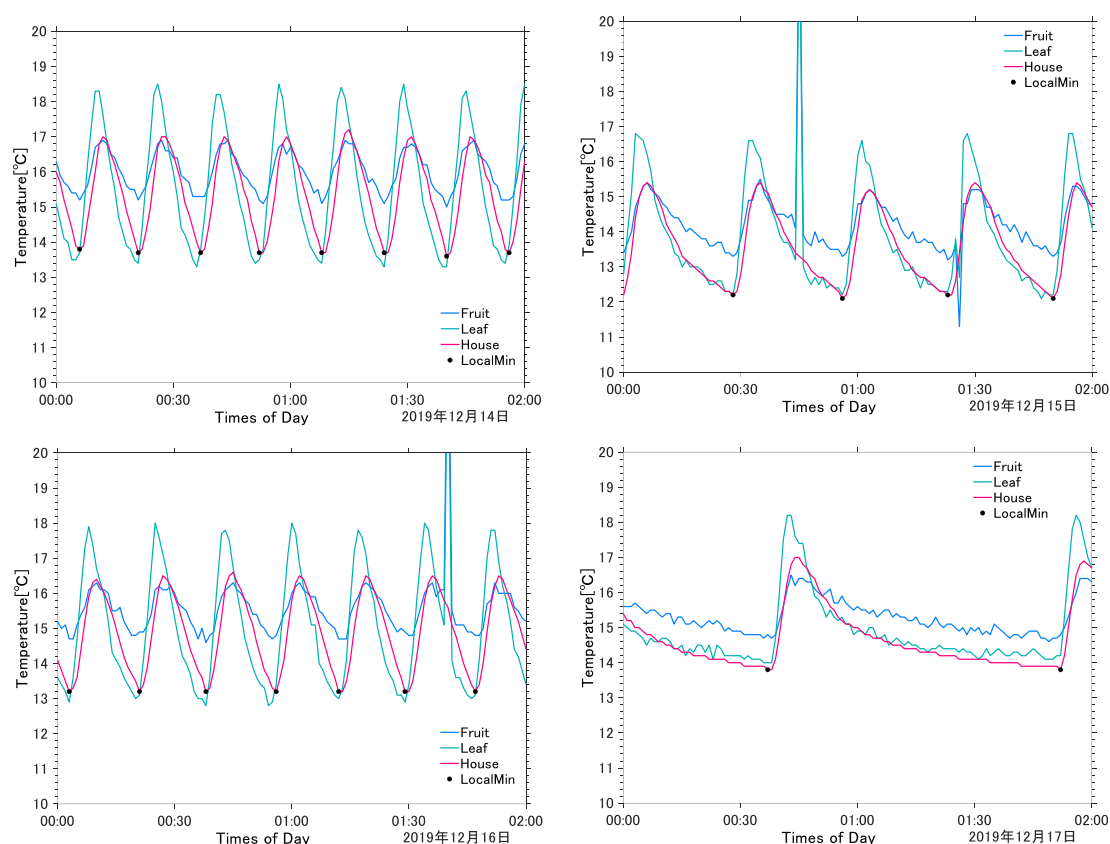


Fig 5.5 Minimum value search

5.1.4 抽出結果

図 5.6 に 12 月 14 日, 図 5.7 に 12 月 15 日, 図 5.8 に 12 月 16 日, 図 5.9 に 12 月 17 日の結果を示す. ボイラが稼働しているどの日においても温度範囲を $+2.0^{\circ}\text{C}$ とすると図 5.8 の 00:21 と 01:29 のとき温度が一切抽出されていなかった. それ以外の日ではどの時間帯でも画像内のすべての温度が抽出されていた.

$+1.5^{\circ}\text{C}$ では図 5.6, 図 5.7, 図 5.8 で果実の一部が抽出された. 図 5.9 の 00:37 のときでは温度が一切抽出なかったが 01:52 のときでは画像内のすべての温度が抽出された.

$+1.0^{\circ}\text{C}$ では図 5.6, 図 5.7 では果実の温度のみの抽出ができていた. 図 5.8 では果実の温度が抽出できていたが一部果実以外も抽出されていた. 図 5.9 では果実の一部しか抽出されなかった.

$+0.5^{\circ}\text{C}$ では果実の温度が抽出されているが $+1.0^{\circ}\text{C}$ に比べて果実以外の部分が多く抽出された. 図 5.9 の 01:52 では果実以外の部分が多く果実の抽出とはなっていなかった.

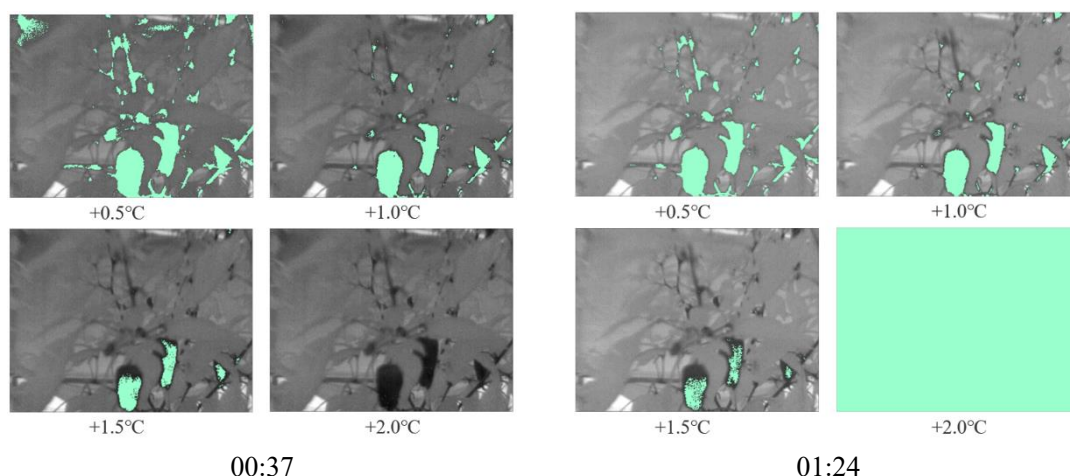


Fig 5.6 Night temperature extraction results on December 14

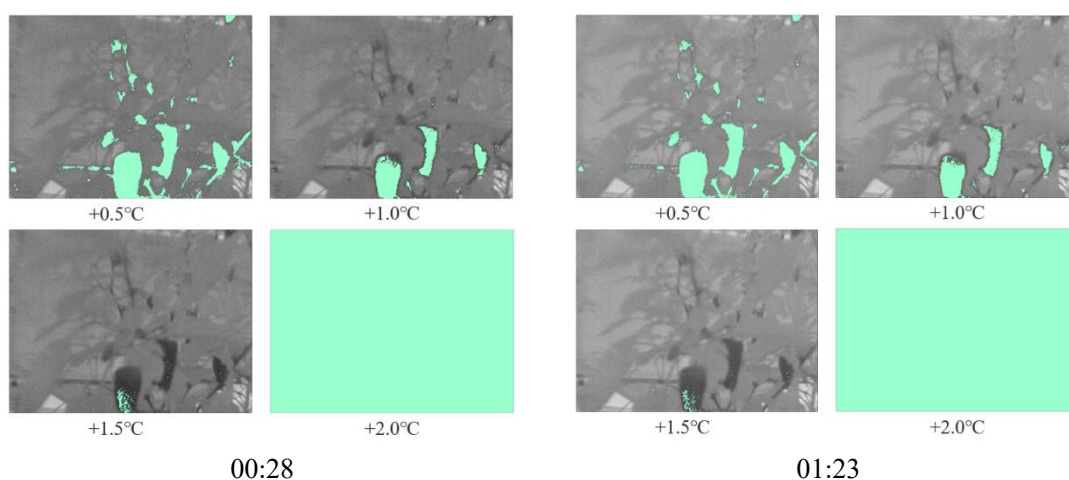


Fig 5.7 Night temperature extraction results on December 15

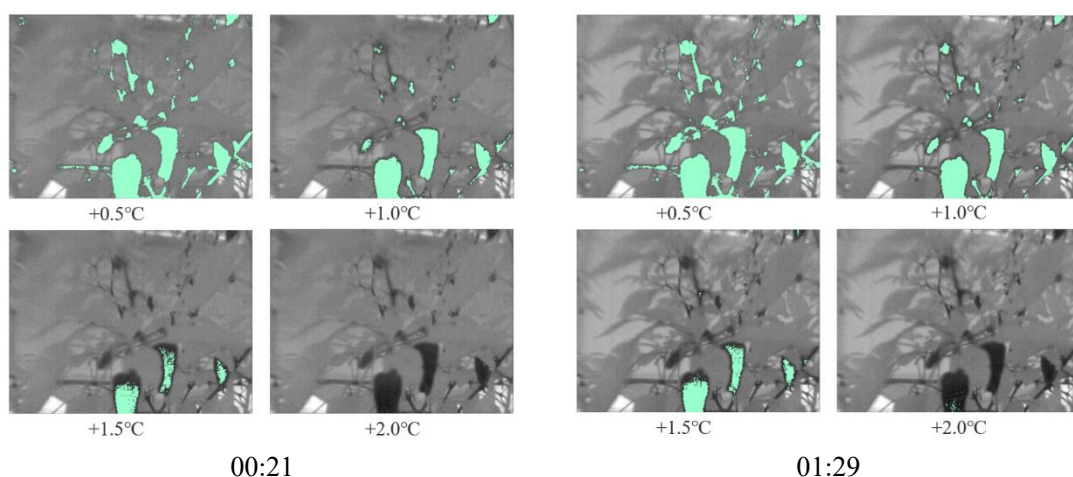


Fig 5.8 Night temperature extraction results on December 16

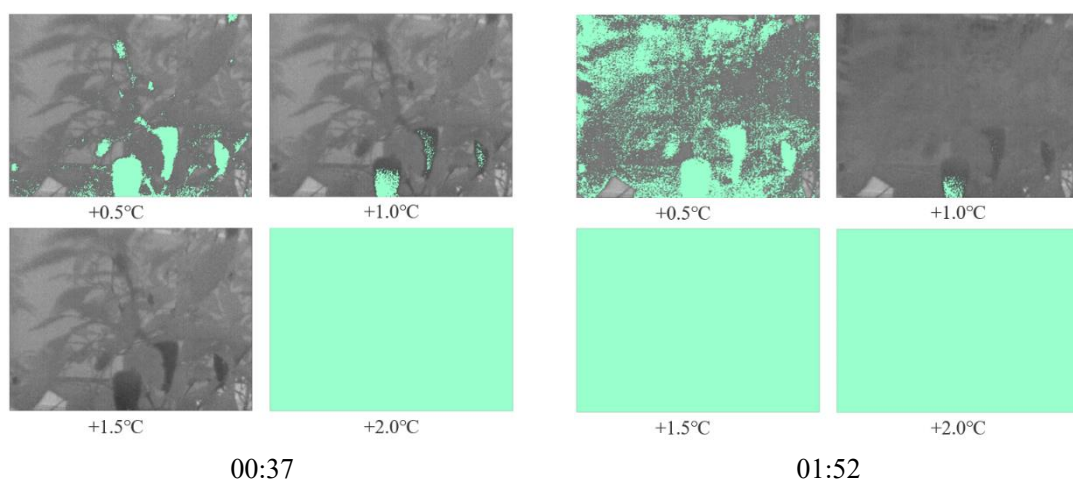


Fig 5.9 Night temperature extraction results on December 17

5.1.5 考察

図 5.1, 図 5.2, 図 5.3, 図 5.4 について日中であつたが晴れの日であれば葉と果実の間に温度差が生じておりハウスの温度と同等まで果実の温度が上昇しているおりハウスの温度を基準とした果実の温度抽出は可能であつた. しかし, 晴れの日でも同じ温度範囲を用いても日によって果実の温度抽出の度合いが異なっていた. ハウスの温度変化が日によって異なり一定でないことから検出する時間を決定する条件をハウスの温度の変化から別途設定することが必要であると考えられる. また, 雨の日と曇りの日では晴れの日と同じ温度範囲では範囲が広すぎるため果実の温度が抽出できていないことからそれぞれ別の温度範囲を設定する必要があると考えられる. また, 天候によって抽出する温度範囲を変更するためには天気予報等からその日の天候の情報を取得し晴れである場合の温度範囲, 曇りである場合の温度範囲, 雨である場合の温度範囲などとパターン分けしておく必要があると考えられる.

図 5.6, 図 5.7, 図 5.8, 図 5.9 は夜間であったが温度範囲が $+2.0^{\circ}\text{C}$ では果実の温度以上になり全く抽出されないかすべてが抽出されるかとなっていたことから温度差はどの日においても 2°C 以内であったと考えられる. 図 5.9 は雨であったため夜間の温度があまり下がらずボイラの稼働回数が少なくなっていたと考えられる. しかし, 日中は温度変化がほとんど生じなかったが夜間はボイラの稼働後に温度変化が生じ果実の温度抽出ができていたことから夜間であれば検出が可能であると考えられる. 夜間の温度抽出においては, どの日においても果実の温度が抽出できている温度範囲である $+0.5^{\circ}\text{C}$ と $+1.0^{\circ}\text{C}$ が有効ではないかと考えられる.

5.2 画像処理による果実の検出

5.1 節にて果実の温度抽出を行った画像に対して画像処理により果実の検出を行った.

5.2.1 画像処理の手順

画像処理の手順は第 3 章 3.4.1 節と同様であるがピクセル面積から画像内に残すものを選別する処理のパラメタを第 3 章 3.4.1 節では 1500 以上としたが今回は 500 以上 2500 以内のもののみを残すパラメタとした.

5.2.2 日中における果実の検出

5.2.3 検出結果

画像処理を行った結果について図 5.10 に 12 月 11 日, 図 5.11 に 12 月 12 日, 図 5.12 に 12 月 14 日, 図 5.13 に 12 月 17 日を示す. その他の日の結果については付録に示す.

図 5.10 より曇りの日だった場合, 11:00 の温度範囲が $\pm 1^{\circ}\text{C}$ のときしか果実の検出ができていなかった. しかし, 果実だけを検出できていたわけではなく果実以外の部分も検出されていた. それ以外の時間ではどの温度範囲においても果実以外の部分が果実として検出されていた.

図 5.11 では 11:00 のとき $\pm 2^{\circ}\text{C}$, 12:00 のとき $\pm 1^{\circ}\text{C} \cdot \pm 2^{\circ}\text{C} \cdot \pm 3^{\circ}\text{C}$, 13:00 のとき 4 つすべての温度範囲, 14:00 のとき $\pm 1^{\circ}\text{C} \cdot \pm 2^{\circ}\text{C} \cdot \pm 3^{\circ}\text{C}$, 15:00 のとき 4 つすべての温度範囲で果実の検出ができていた. しかし, 果実のみを検出できていたのは 12:00 のときの $\pm 1^{\circ}\text{C}$, 13:00 のときの $\pm 1^{\circ}\text{C}$, 15:00 のときの $\pm 1^{\circ}\text{C}$ だけであった. それ以外では果実以外の部分も果実として検出されていた.

図 5.12 では, 11:00 のとき $\pm 1^{\circ}\text{C} \cdot \pm 2^{\circ}\text{C}$, 12:00 のとき $\pm 1^{\circ}\text{C} \cdot \pm 2^{\circ}\text{C}$, 13:00 のとき $\pm 2^{\circ}\text{C} \cdot \pm 3^{\circ}\text{C} \cdot \pm 4^{\circ}\text{C}$, 14:00 のとき $\pm 1^{\circ}\text{C} \cdot \pm 2^{\circ}\text{C}$, 15:00 のとき 4 つすべての温度範囲で果実の検出ができていた. しかし, 果実のみを検出できていたのは 12:00 のときの $\pm 2^{\circ}\text{C}$, 13:00 のときの $\pm 2^{\circ}\text{C}$, 15:00 のときの $\pm 1^{\circ}\text{C}$ だけであった. それ以外では果実以外の部分も果実として検出されていた.

図 5.13 より雨の日は 14:00 のとき $\pm 1^{\circ}\text{C}$ で果実のほんの一部が検出されていた. それ以外

ではどの時間においても温度抽出の段階で果実が分からなかったため画像処理を行っても果実を検出することはできなかった。

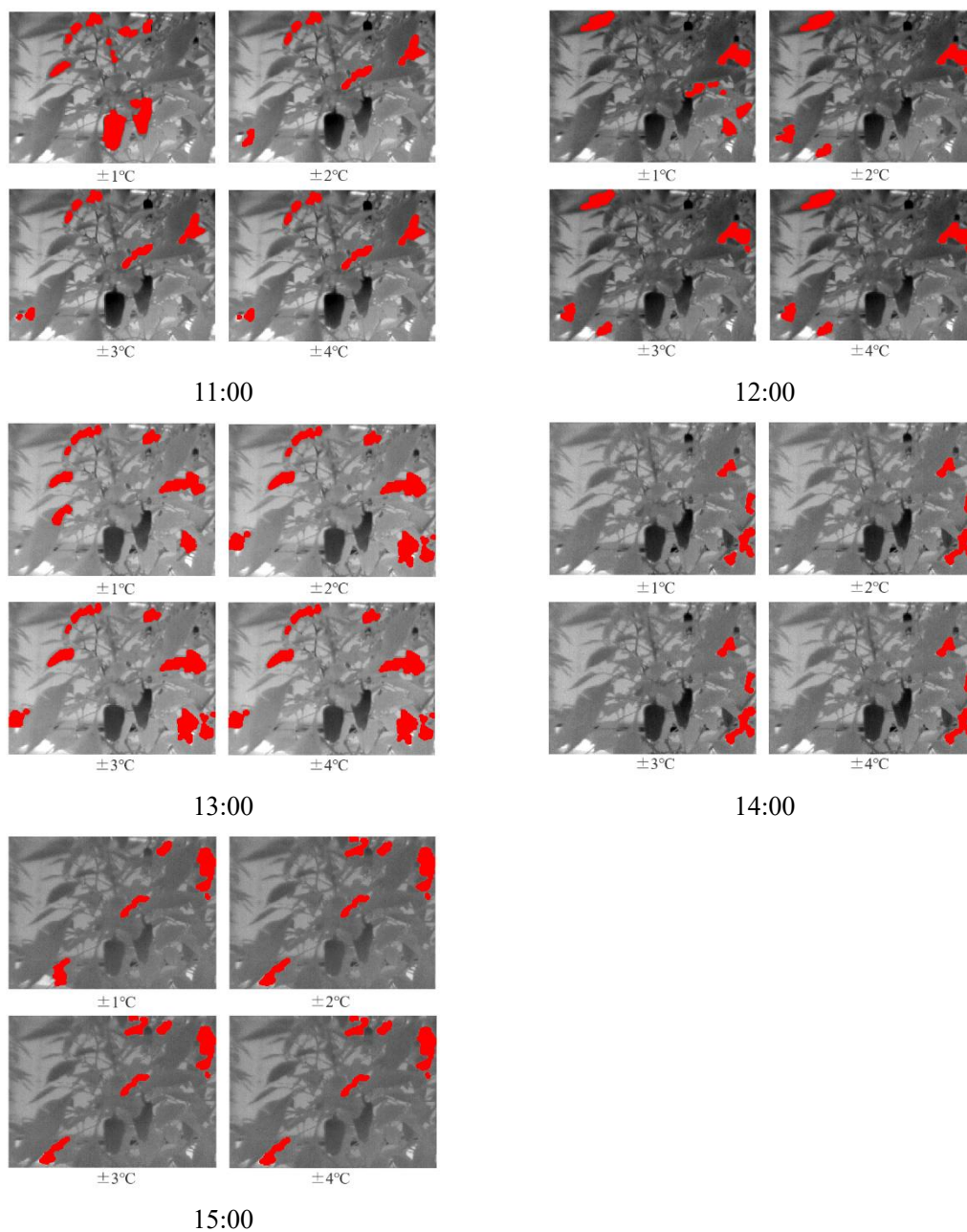


Fig 5.10 Daytime image processing results on December 11

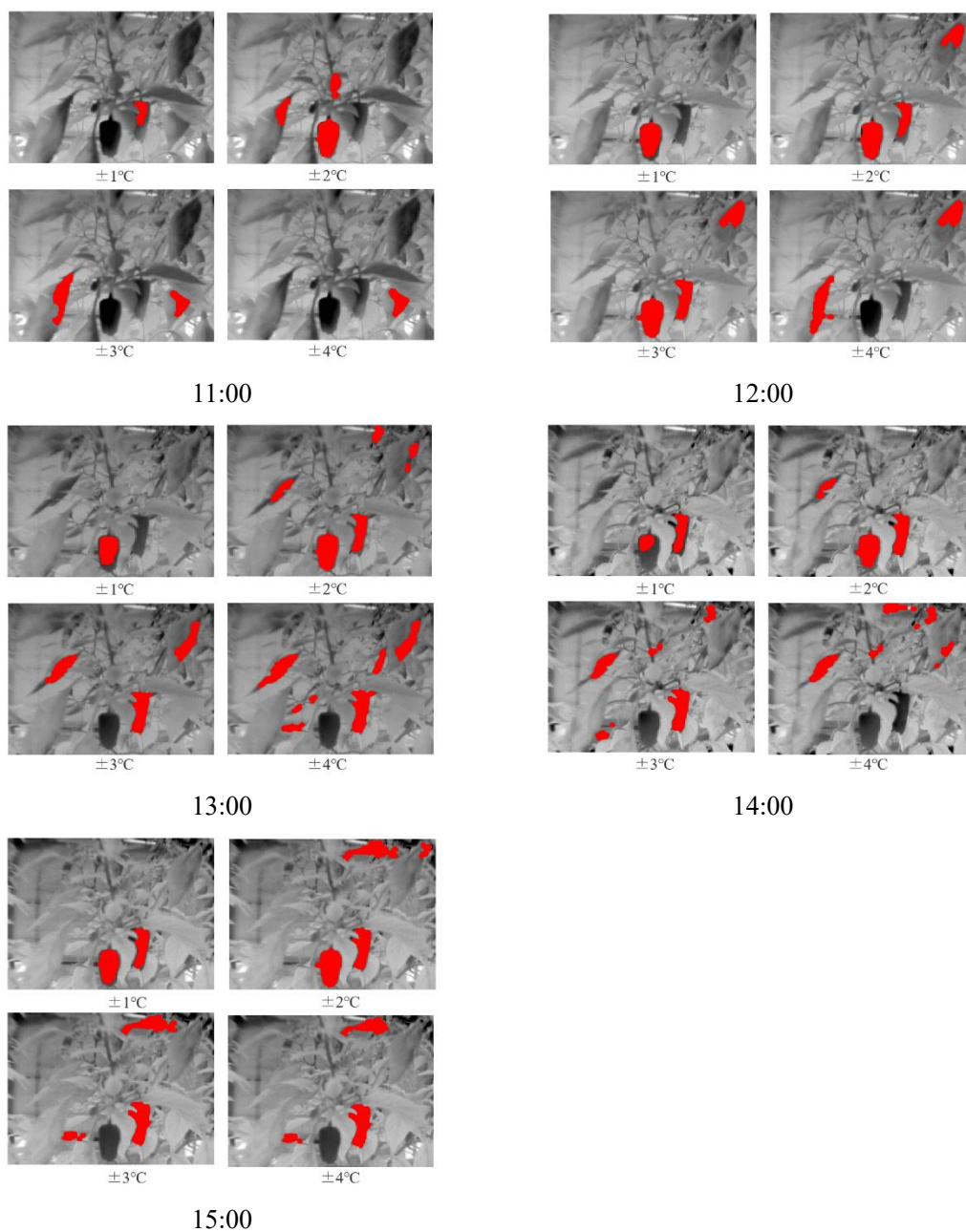


Fig 5.11 Daytime image processing results on December 12

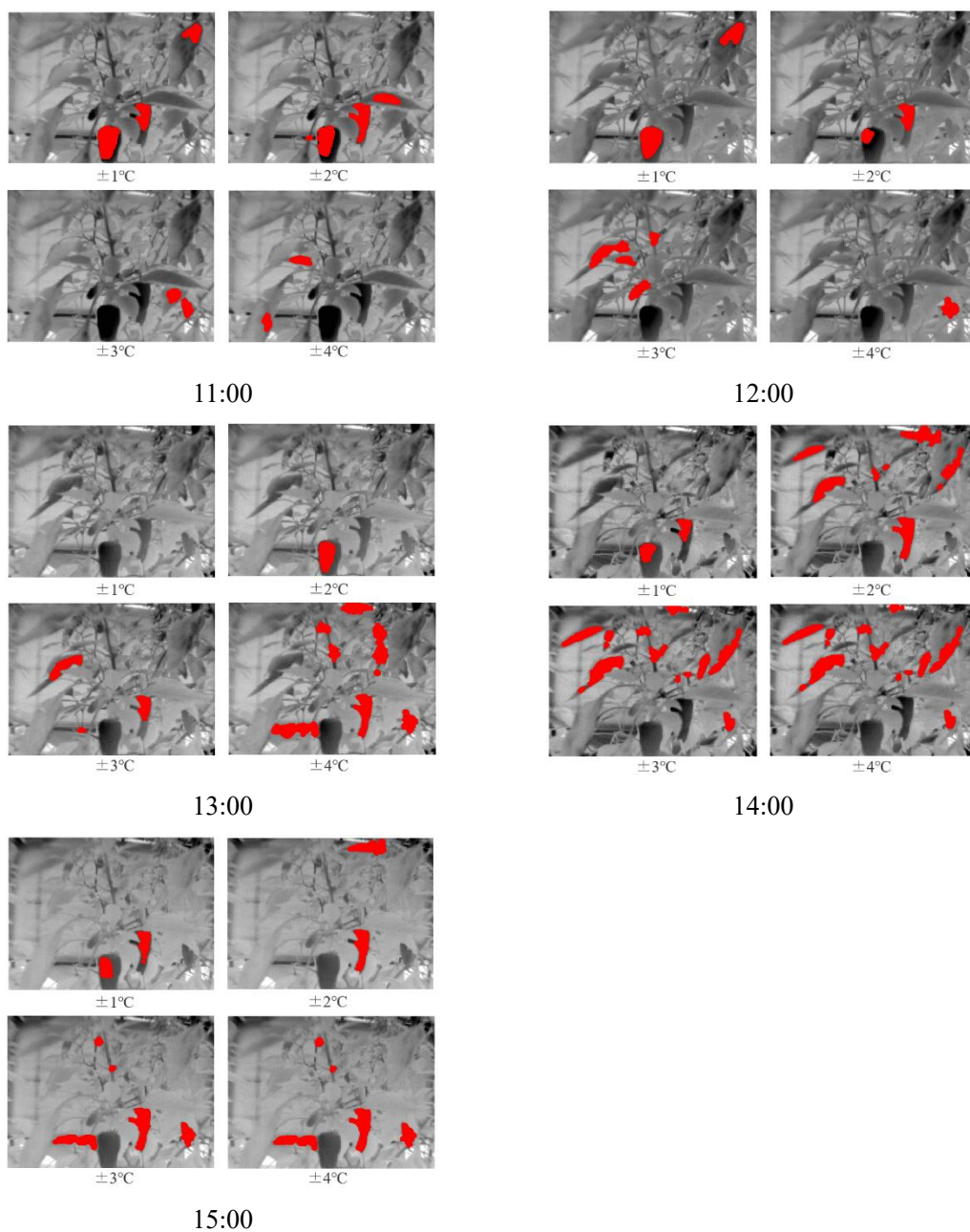


Fig 5.12 Daytime image processing results on December 14

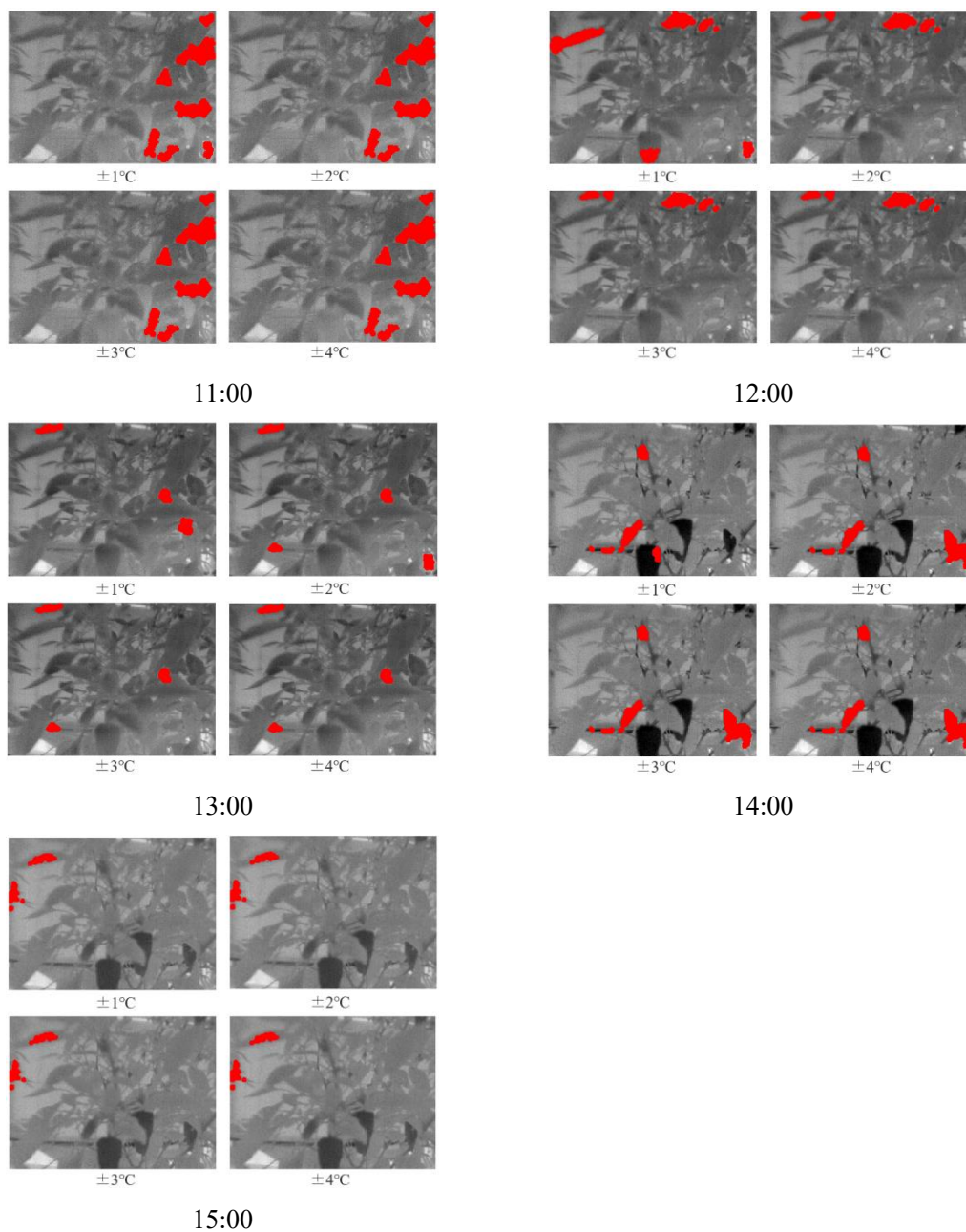


Fig 5.13 Daytime image processing results on December 17

5.2.4 夜間における果実の検出

5.2.5 検出結果

画像処理を行った結果について図 5.14 に 12 月 14 日, 図 5.15 に 12 月 15 日, 図 5.16 に 12 月 16 日, 図 5.17 に 12 月 17 日を示す. 図 5.14 では, どちらの時間でも $+0.5^{\circ}\text{C}$ ・ $+1.0^{\circ}\text{C}$ ・ $+1.5^{\circ}\text{C}$ で検出できていた. 図 5.15 では, どちらの時間でも $+0.5^{\circ}\text{C}$ ・ $+1.0^{\circ}\text{C}$ ・ $+1.5^{\circ}\text{C}$ で検出できていた. 図 5.16 では, どちらの時間でも $+0.5^{\circ}\text{C}$ ・ $+1.0^{\circ}\text{C}$ ・ $+1.5^{\circ}\text{C}$ で検出できていた. 図 5.17 では, 00:37 のとき $+1.0^{\circ}\text{C}$, 01:53 のとき $+0.5^{\circ}\text{C}$ ・ $+1.0^{\circ}\text{C}$ で検出できていた. また, 果実のみを検出できていたのは図 5.14, 図 5.15, 図 5.16 では検出できていたすべての温度範囲であった. 図 5.16 ではどちらの時間も 1.0°C ・ $+1.5^{\circ}\text{C}$ であった. 図 5.17 ではどちらの時間も $+1.5^{\circ}\text{C}$ であった. どの図においても温度範囲が 2.0°C になると果実は検出されていなかった.

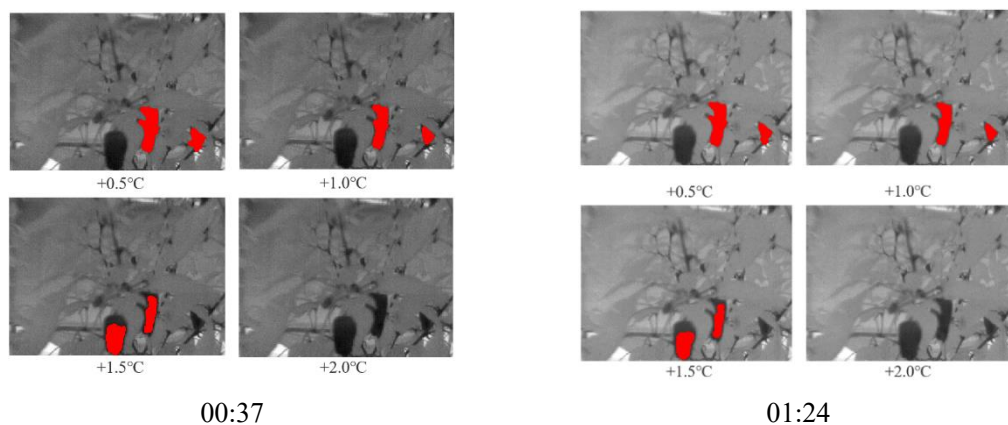


Fig 5.14 Night image processing results on December 14

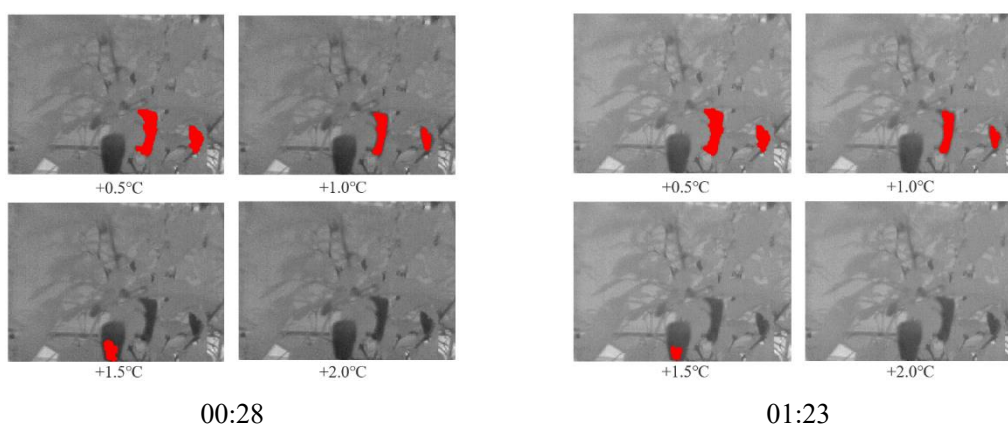


Fig 5.15 Night image processing results on December 15

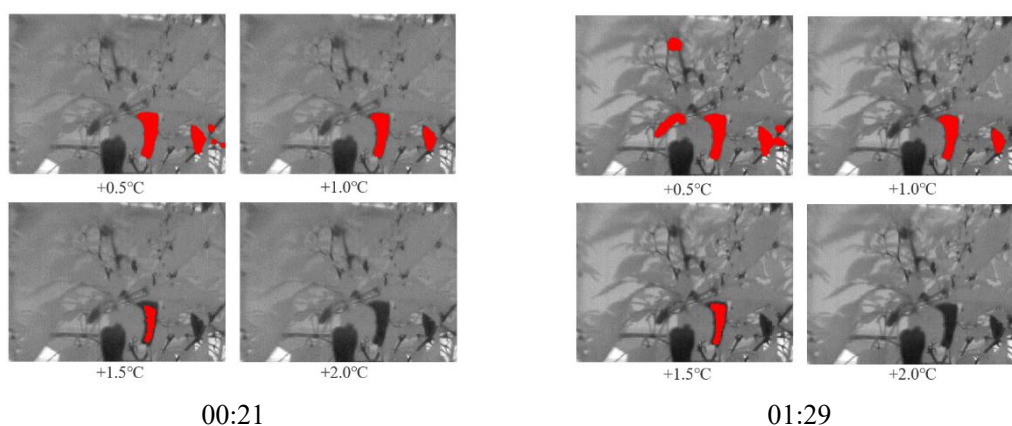


Fig 5.16 Night image processing results on December 16

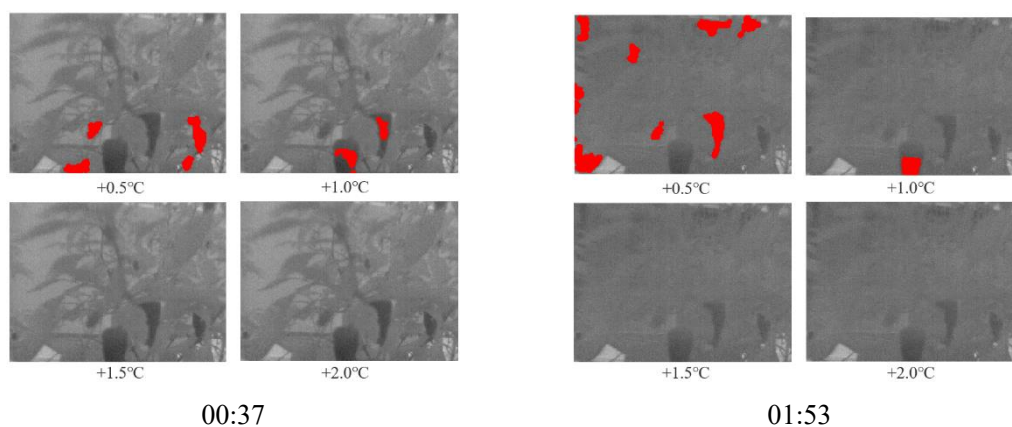


Fig 5.17 Night image processing results on December 17

5.2.6 考察

日中において晴れの日であればどの時間においても果実を検出できていたが温度範囲が同じ天候でも同一の温度範囲では検出結果が変わっていたことからハウスの温度等のデータから温度範囲を自動的に設定できるシステムが必要であると考えられる。雨の日のとき日中は温度差がなく果実を検出できなかったがボイラ稼働による温度差によって検出することができていたことから夜間であれば天候に関係なく検出可能ではないかと考えられる。

日中、夜間のどちらにおいても温度抽出においては果実の温度抽出ができていたが画像処理によって検出を行うと片方の果実もしくは全く検出しないについては画像処理のアルゴリズムやパラメタによってうまく検出できていなかったと考えられる。

第 6 章 結論

6.1 研究のまとめ

本論文では、赤外線カメラを利用した温度によるピーマンの果実の検出方法について提案し検証を行った。夏場のハウスでの基礎実験によってハウスの温度、果実と葉の温度をグラフ化した結果、果実と葉の間には温度差が生じていることが分かった。この温度差を利用することで果実を検出できたことから温度による果実検出の有効性を確認した。実際に収穫が行われるのは冬場のハウスであることから収穫のとき有効であるか検証を行うため夏場のハウスと同様の実験を行った。日中においては果実とハウスの温度が同程度まで上昇していることからハウスの温度から一定範囲内の温度を果実とした温度抽出を行った。夜間については葉の温度がハウスの温度に追従していたことからハウスの温度から一定範囲上の温度を果実とした温度抽出を行った。温度抽出では範囲が狭すぎると果実の温度も抽出できていなかった。また、温度範囲が広すぎると葉の温度まで抽出されていた。日中では $\pm 2^{\circ}\text{C}$ のとき夜間では $+1^{\circ}\text{C}$ のとき果実の温度抽出ができていた。画像処理による果実の検出では、日中・夜間ともに検出することはできた。しかし、温度抽出では果実のみが抽出されていたが画像処理を行うと検出されない場合や果実以外の部分が検出されることがあった。

6.2 今後の課題

天候によって抽出する温度範囲を変更する必要があるため天気予報等からその日の天候の情報を取得しパターン分けできるよう改善することが考えられる。また、温度抽出で果実が抽出できているのに画像処理を行うと検出されない場合があったため手法の見直しやパラメタの変更を行うことでより正確な検出を行えるように改善する必要がある。

Appendix

A 使用した機材

ハウスでの実験を行うにあたり使用した機器について示す.

A.1 赤外線カメラ

図 A.1 に optrix 社の赤外線カメラ:xi400 を示す. 装着されているレンズは F08:f=7.7mm:53°×38°である. 専用ソフト:PIX-Connect を用いることで画像から 1 ピクセルごとの温度を CSV ファイルに出力できる.



Fig A.1 Infrared camera

A.2 各センサとデータロガー

図 A.2 に温湿度センサ, 図 A.3 に照度・紫外線センサ, 図 A.4 にデータロガーを示す.



Fig A.2 Temperature and humidity sensor



Fig A.3 Illuminance / UV sensor



Fig A.4 Data logger

A.3 温湿度センサ用通風装置

ハウス内に温湿度センサを直接設置すると直射日光によりセンサが温められ正確な温度が測定できなくなる。センサに直射日光が当たることを防いだり測定している場所の空気の澱みをなくしたりすることで正確な温度や湿度を測定できるよう強制通風装置を製作した。製作した装置を図 A.5 に示す。日光を防ぐ傘には、植木鉢の下に置く水受け皿を用いた。送風には図 A.6 に示す三洋電機株式会社の AC ファンを用いた。



Fig A.5 Ventilation equipment



Fig A.6 DC fan

B 冬場のハウスでの実験結果

第5章 5.2節で記載しなかった実験結果を B.1~B.20 に示す.

B.1 12月10日の結果

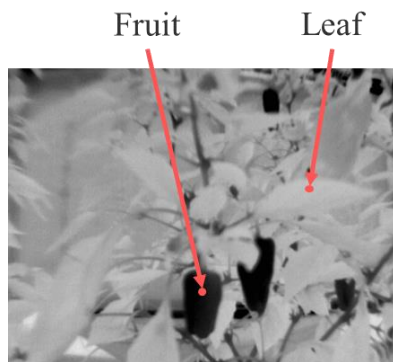


Fig B.1 Extraction location

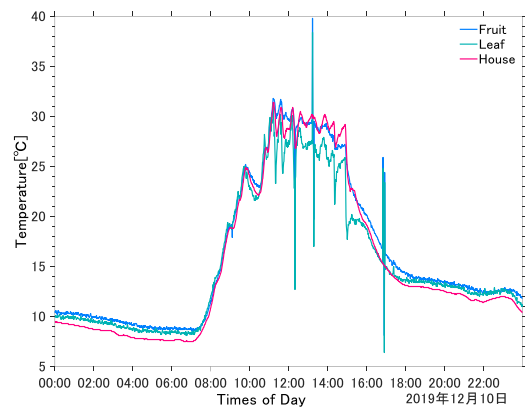


Fig B.2 Temperature and time

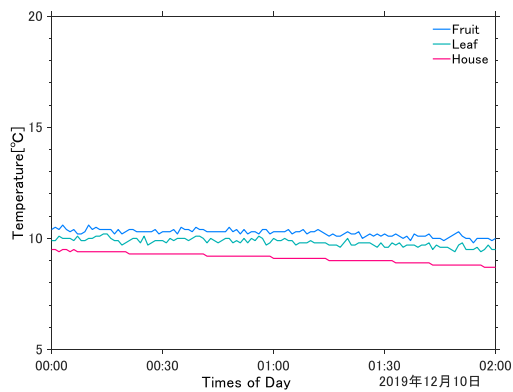


Fig B.3 Expanded from 00:00 to 02:00

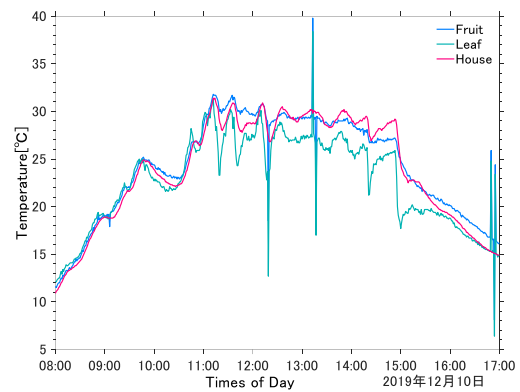


Fig B.4 Expanded from 08:00 to 17:00

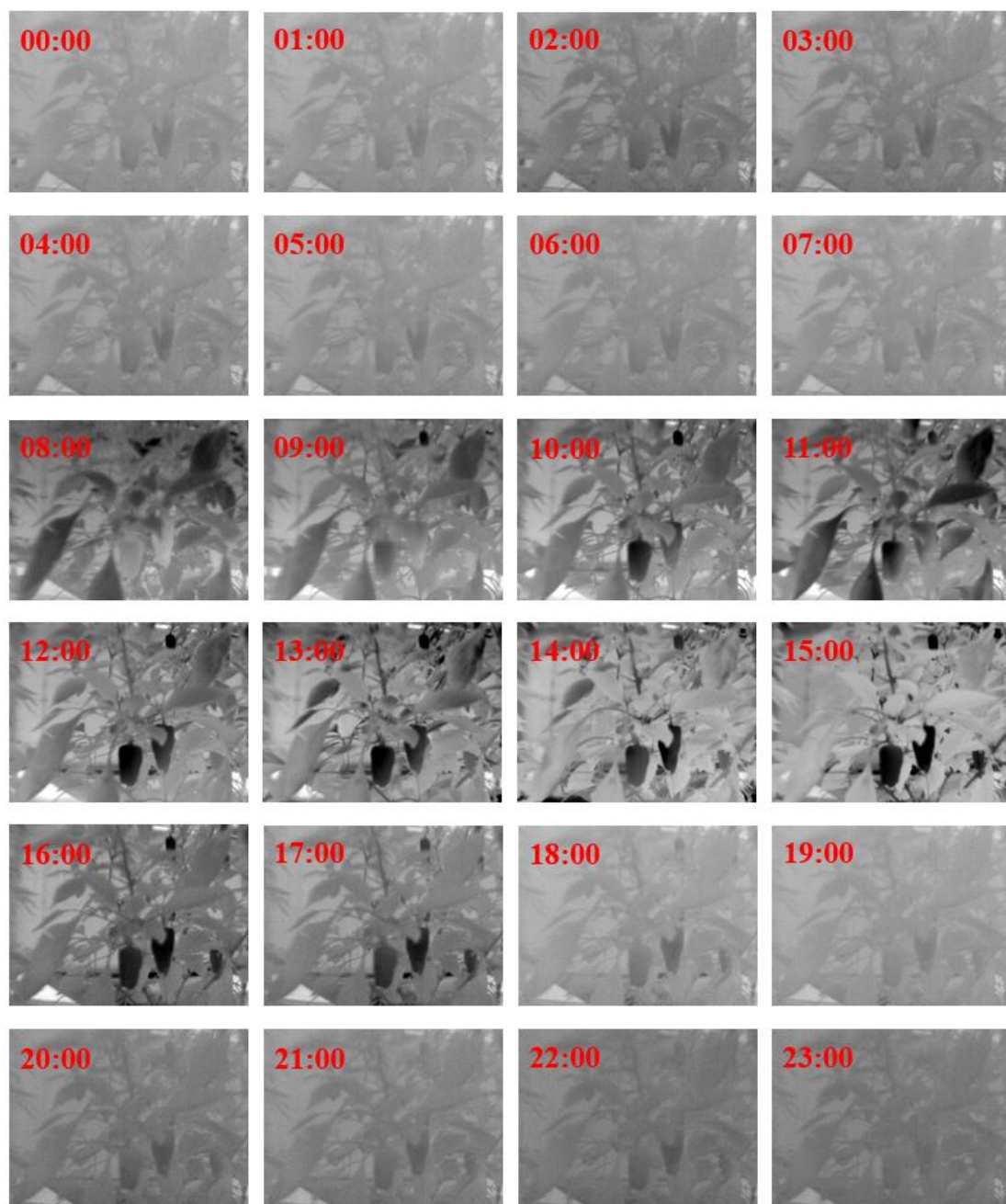


Fig B.5 Image taken every hour

B.2 12月13日の結果

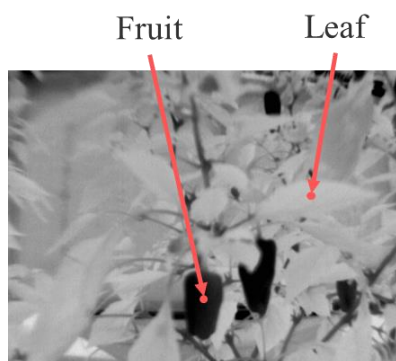


Fig B.6 Extraction location

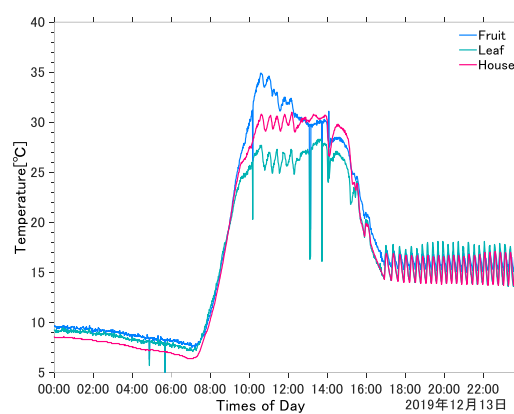


Fig B.7 Temperature and time

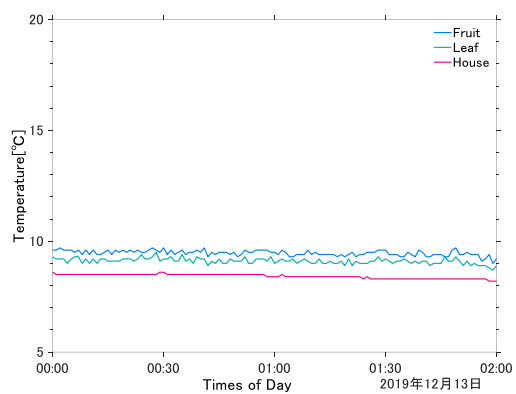


Fig B.8 Expanded from 00:00 to 02:00

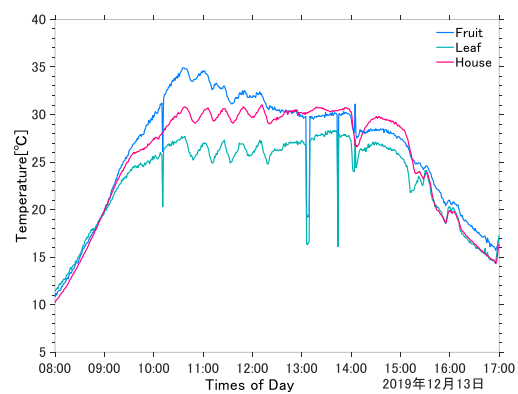


Fig B.9 Expanded from 08:00 to 17:00

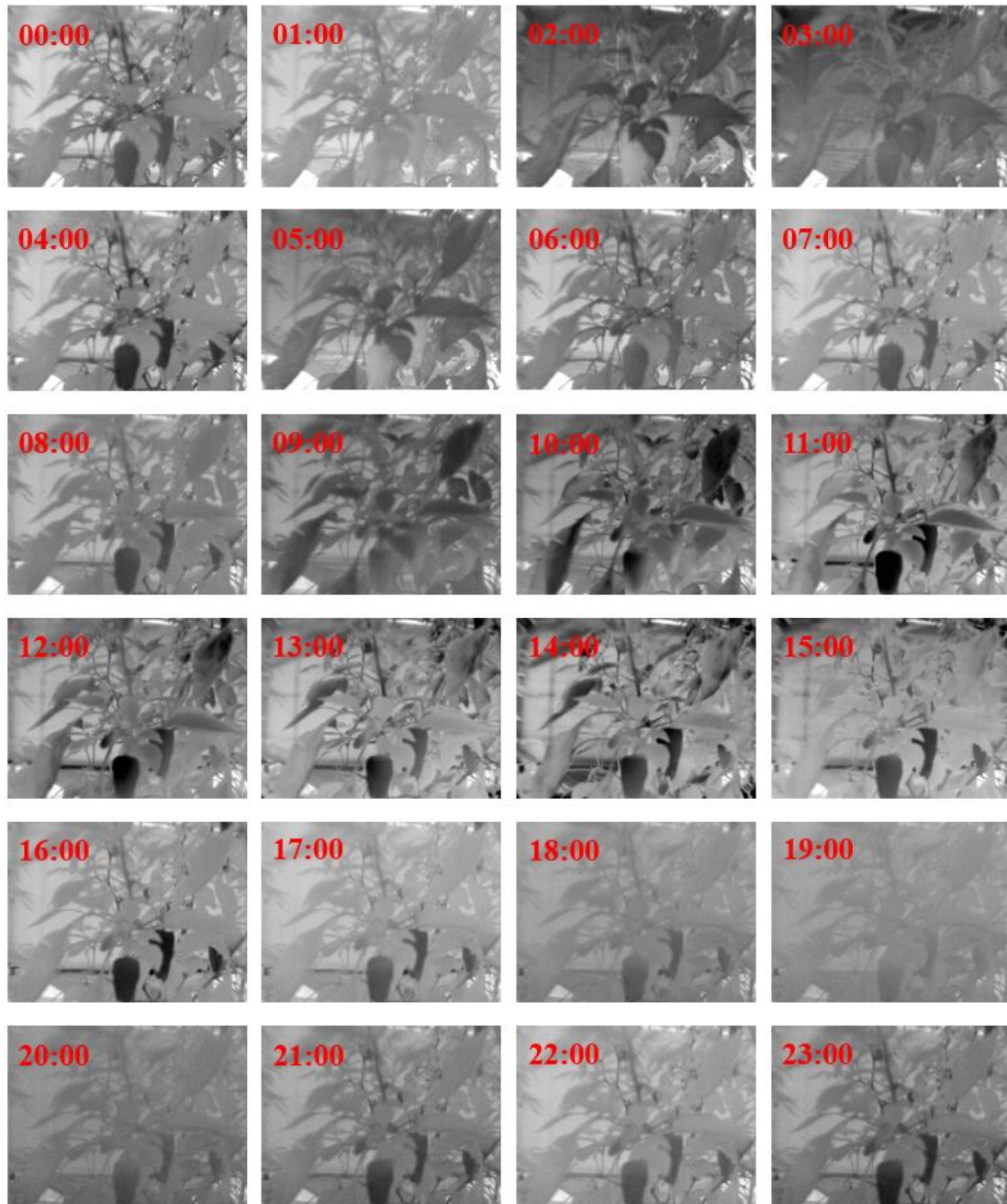


Fig B.10 Image taken every hour

B.3 12月15日の結果

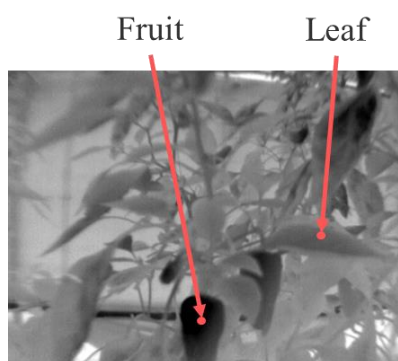


Fig B.11 Extraction location

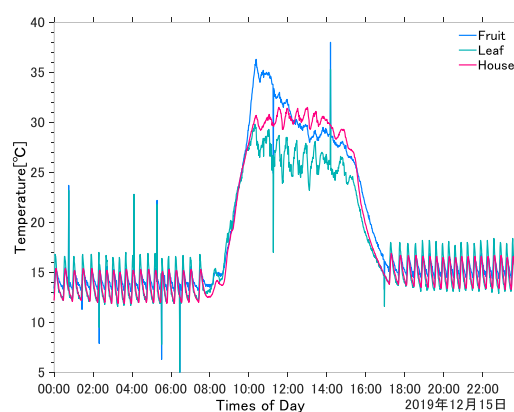


Fig B.12 Temperature and time

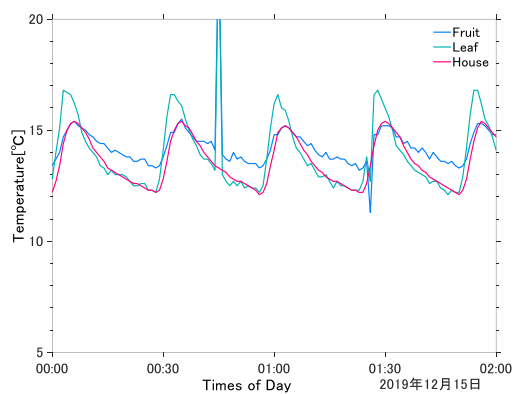


Fig B.13 Expanded from 00:00 to 02:00

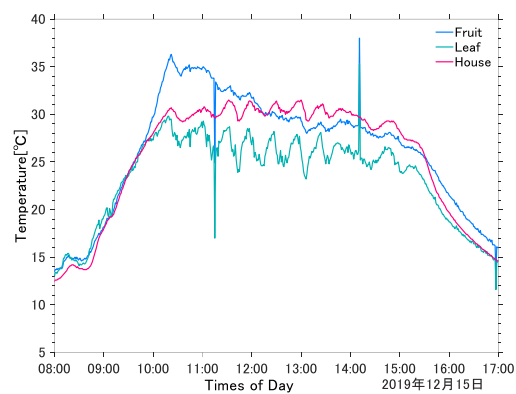


Fig B.14 Expanded from 08:00 to 17:00

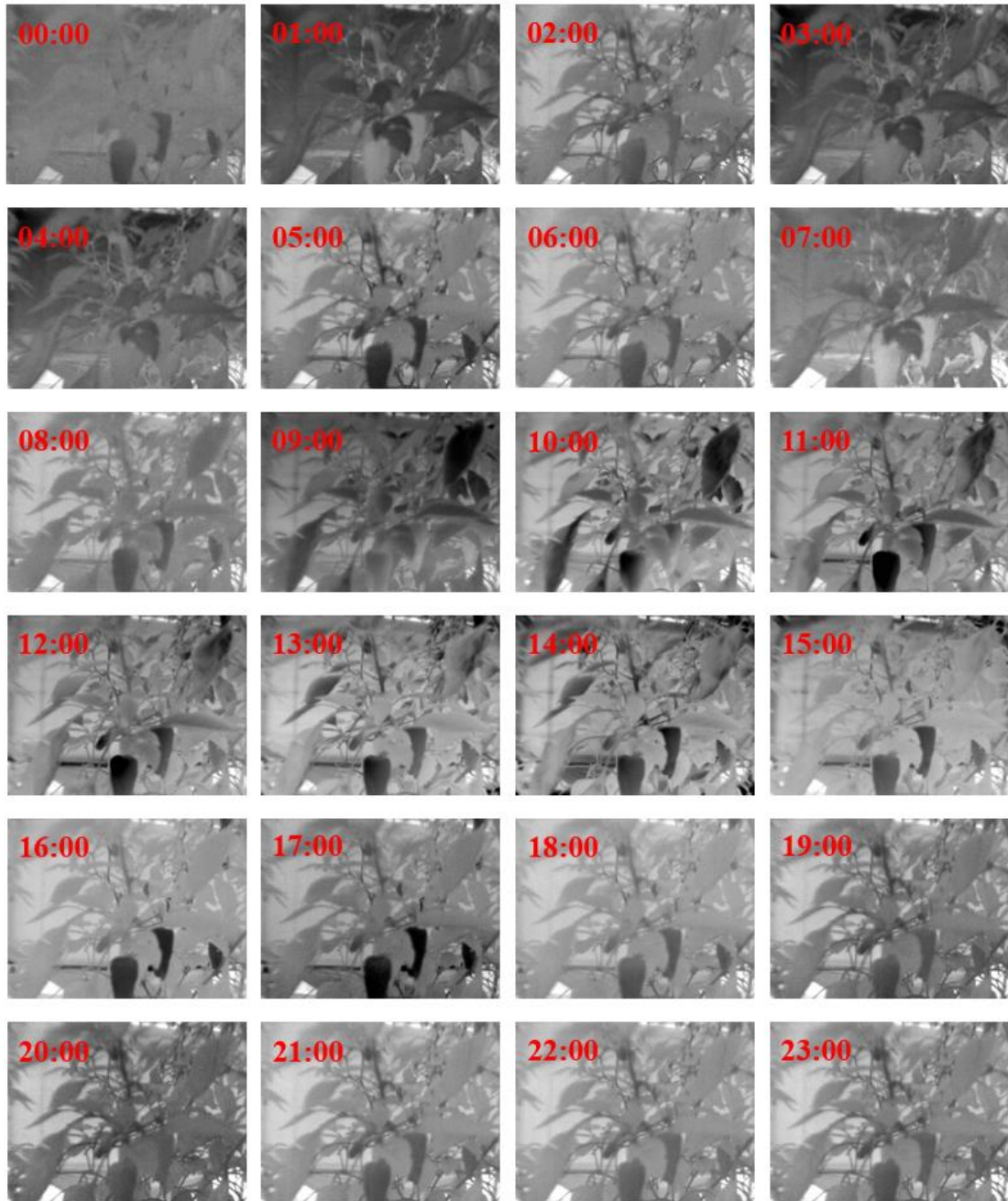


Fig B.15 Image taken every hour

A.4 12月16日の結果

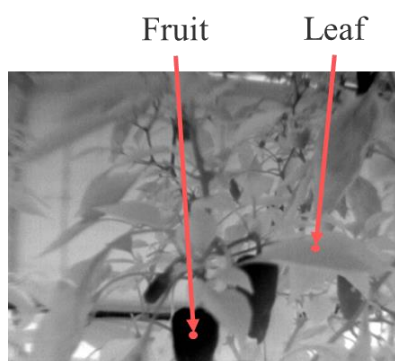


Fig B.16 Extraction location

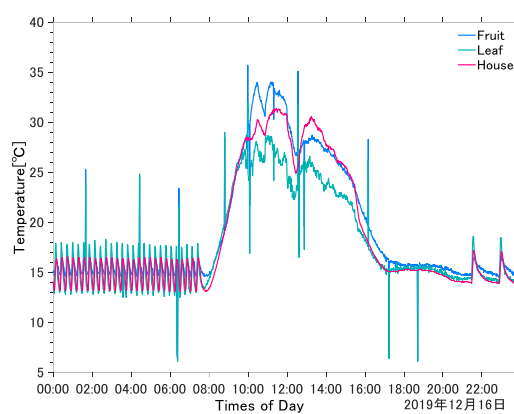


Fig B.17 Temperature and time

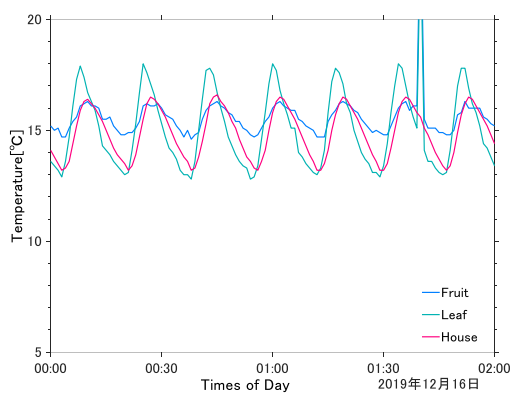


Fig B.18 Expanded from 00:00 to 02:00

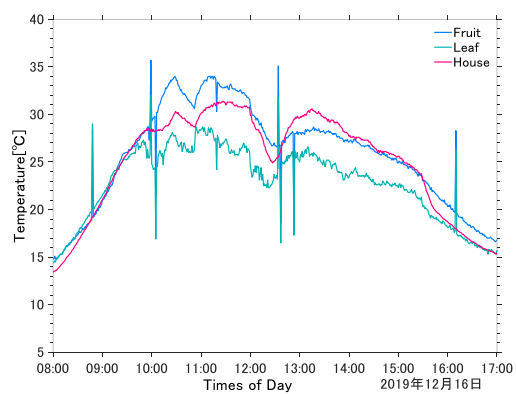


Fig B.19 Expanded from 08:00 to 17:00

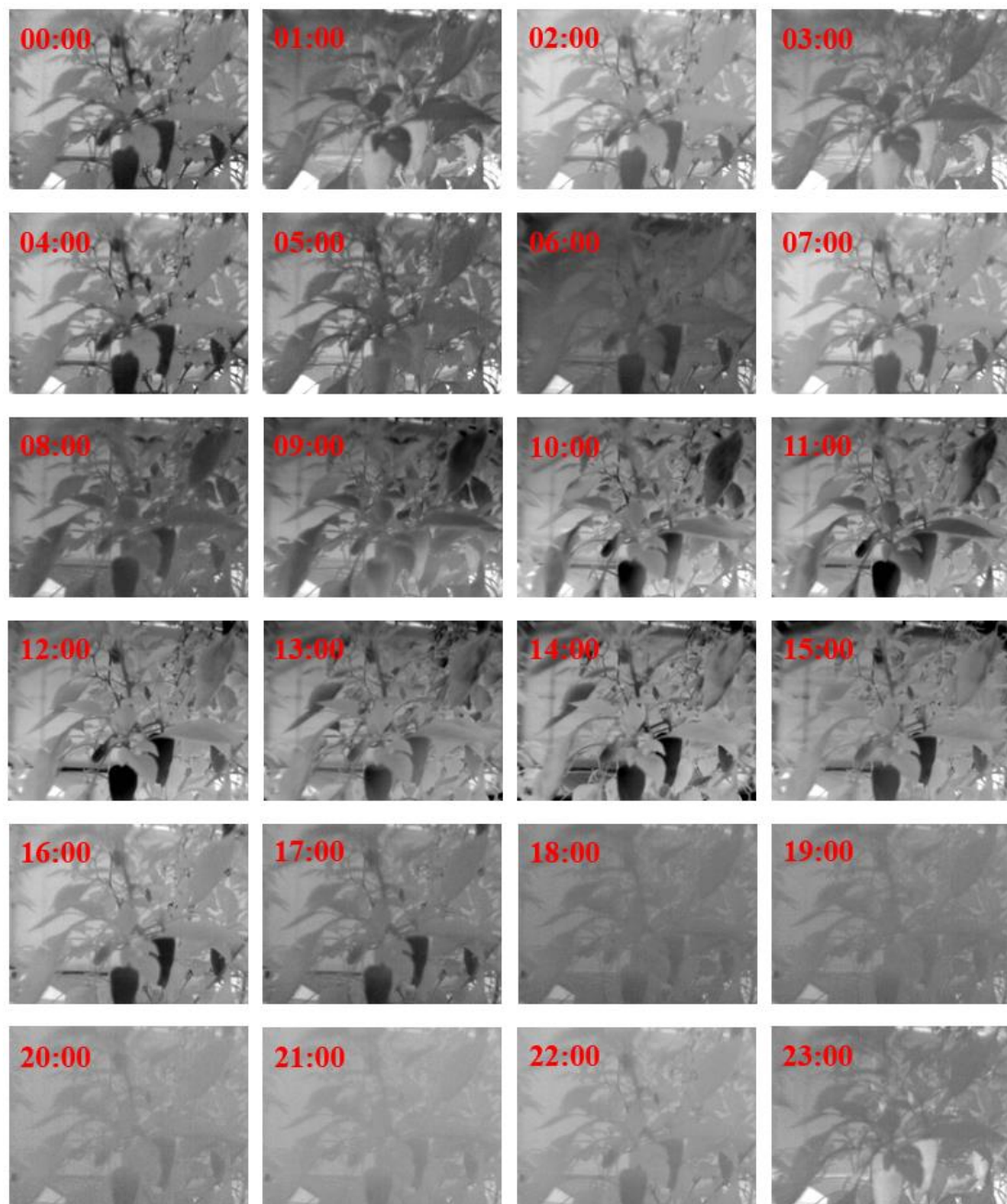


Fig B.20 Image taken every hour

C 果実の温度抽出

第 6 章 6.1.1 節の果実の温度抽出の結果について記載しなかった結果を図 C.1~図 C.4 に示す.

C.1 12 月 10 日の結果

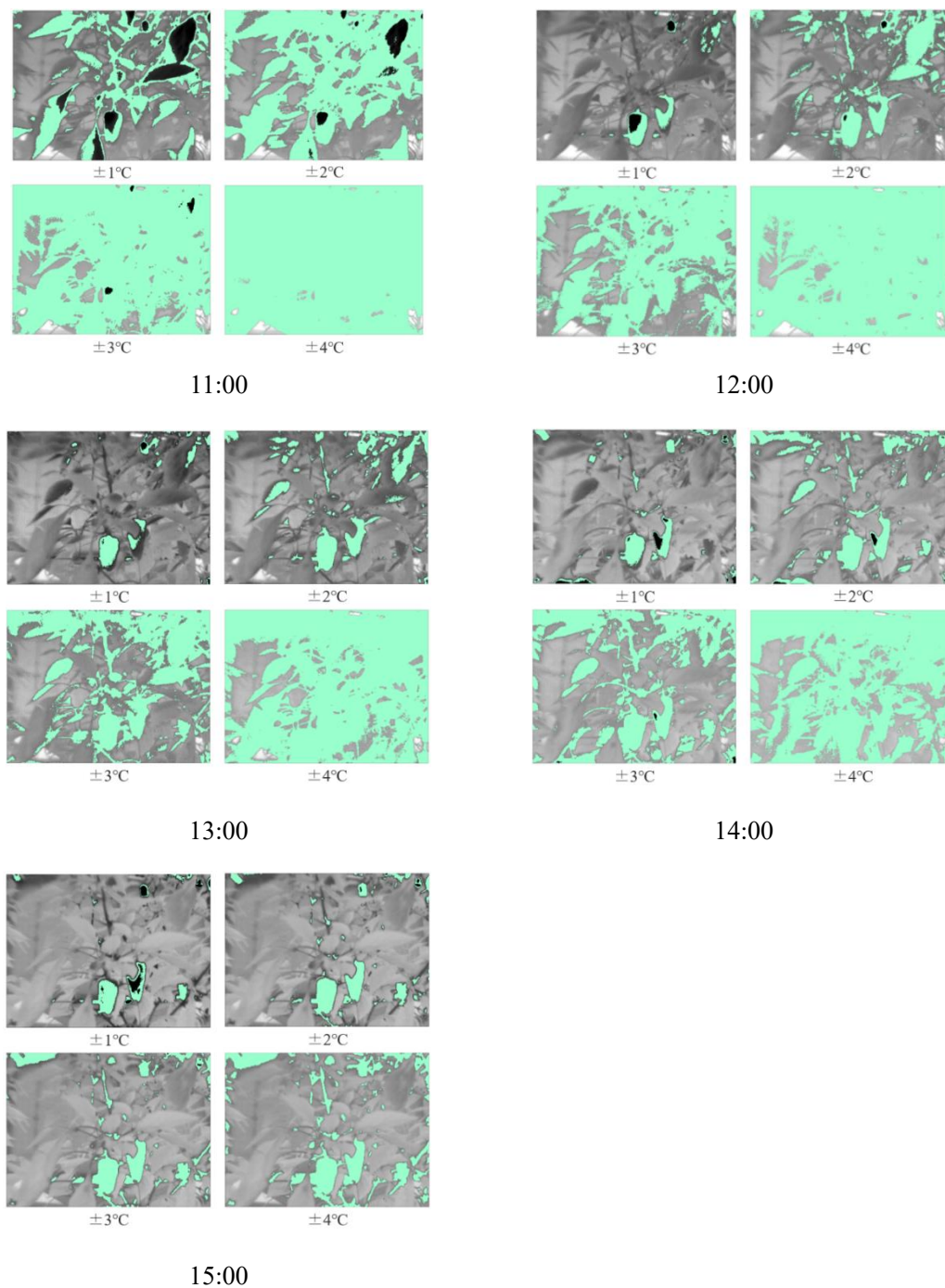


Fig C.1 Daytime temperature extraction results on December 10

C.2 12月13日の結果

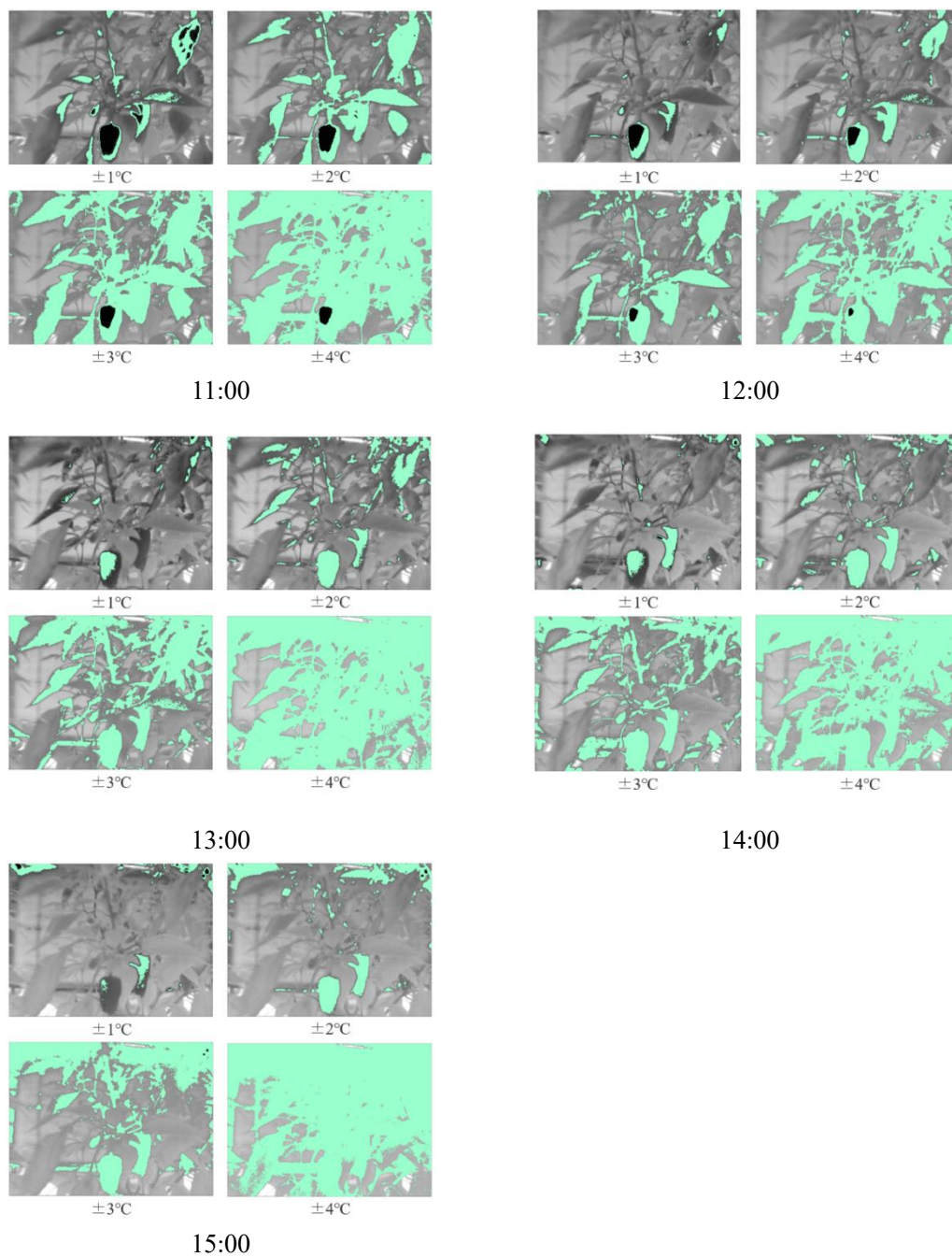


Fig C.2 Daytime temperature extraction results on December 13

C.3 12月15日の結果

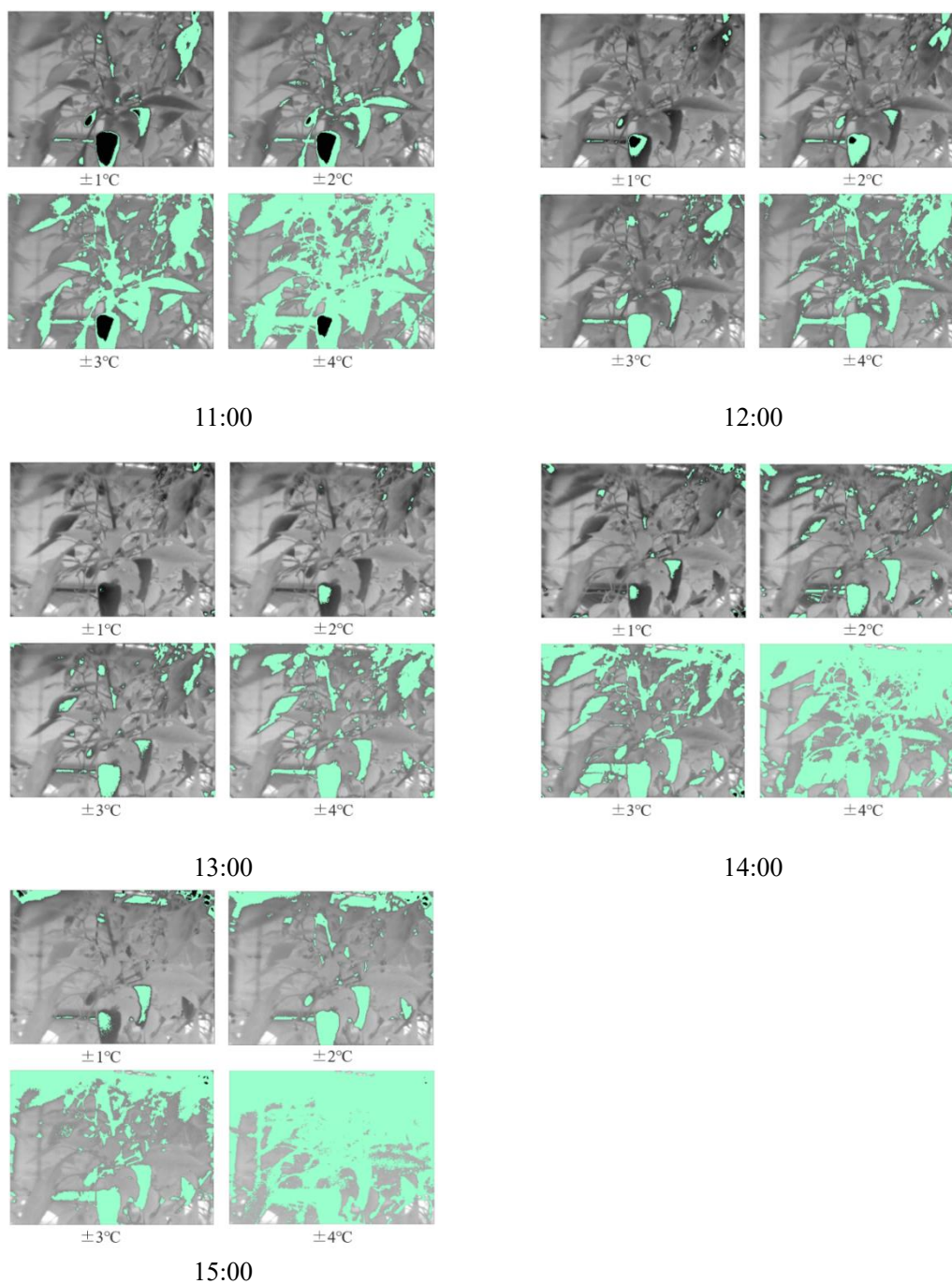


Fig C.3 Daytime temperature extraction results on December 15

C.4 12月16日の結果

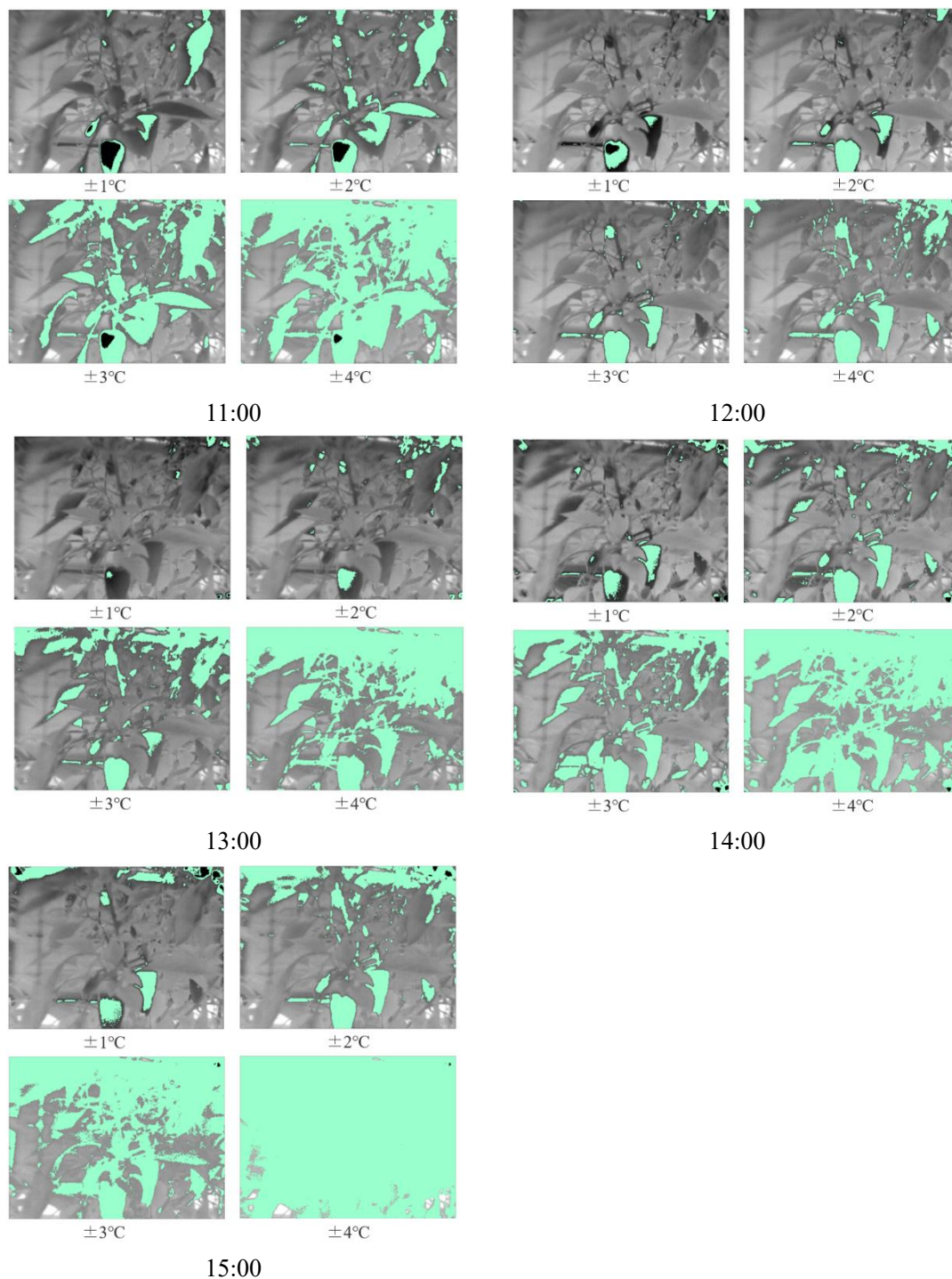
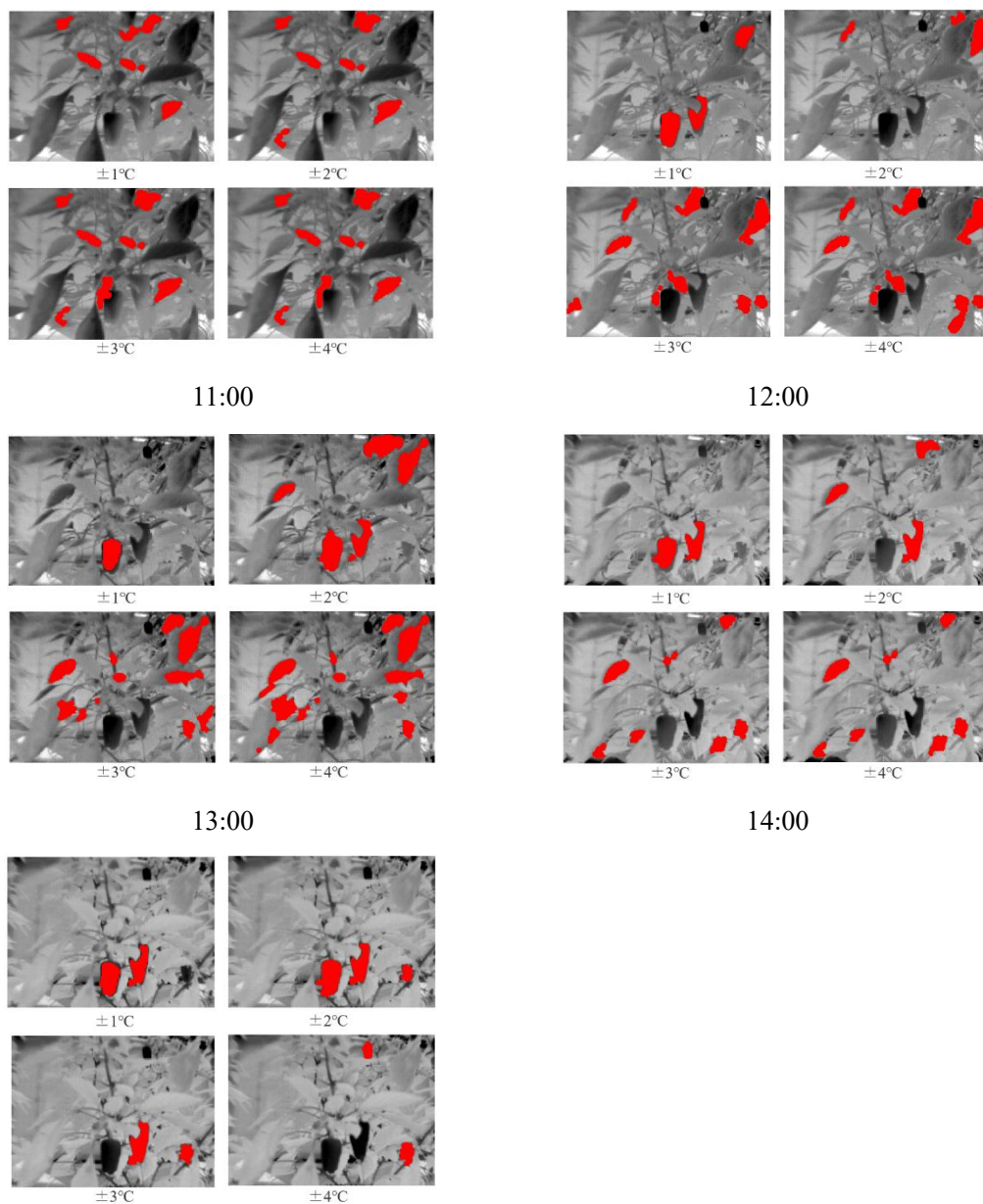


Fig C.4 Daytime temperature extraction results on December 16

D 果実の検出

第 6 章 6.2.3 節にて記載しなかった果実の検出結果について図 D.1 から 図 D.4 に示す.

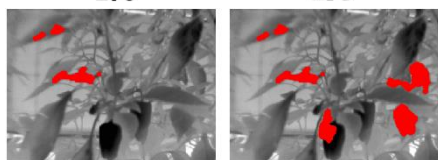
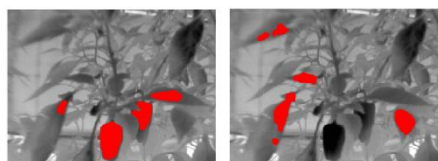
D.1 12 月 10 日の結果



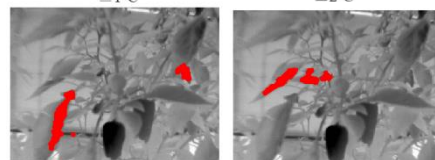
15:00

D.1 Daytime image processing results on December 10

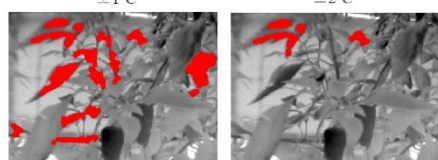
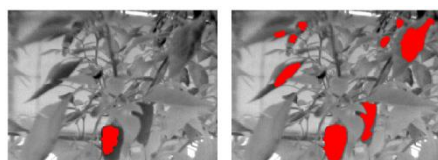
D.2 12月13日の結果



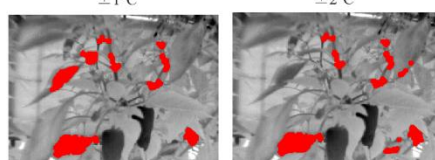
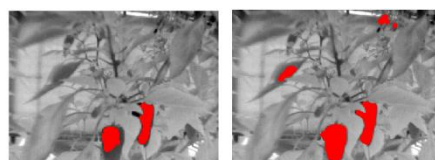
11:00



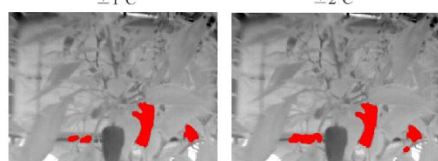
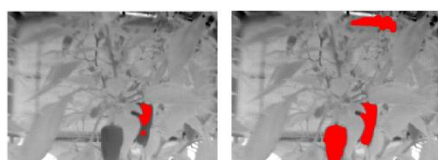
12:00



13:00



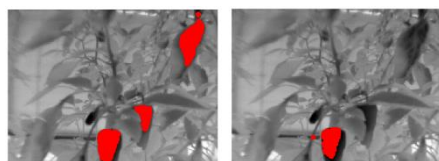
14:00



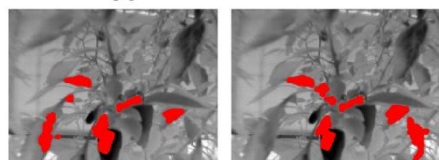
15:00

D.2 Daytime image processing results on December 13

D.3 12月15日の結果



$\pm 1^{\circ}\text{C}$ $\pm 2^{\circ}\text{C}$

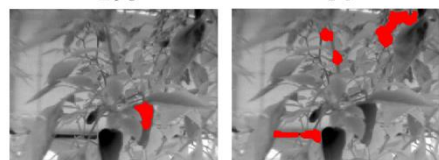


$\pm 3^{\circ}\text{C}$ $\pm 4^{\circ}\text{C}$

11:00



$\pm 1^{\circ}\text{C}$ $\pm 2^{\circ}\text{C}$

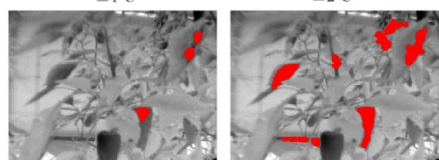


$\pm 3^{\circ}\text{C}$ $\pm 4^{\circ}\text{C}$

12:00

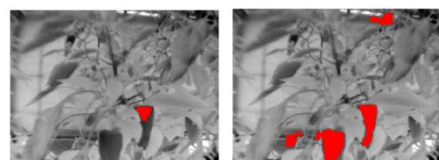


$\pm 1^{\circ}\text{C}$ $\pm 2^{\circ}\text{C}$

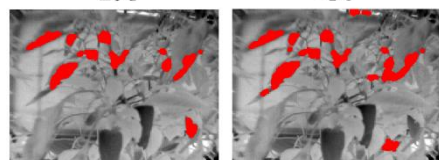


$\pm 3^{\circ}\text{C}$ $\pm 4^{\circ}\text{C}$

13:00

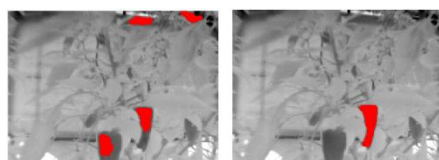


$\pm 1^{\circ}\text{C}$ $\pm 2^{\circ}\text{C}$

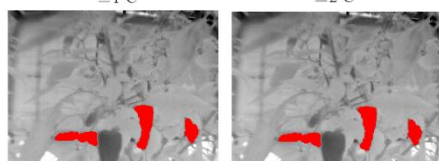


$\pm 3^{\circ}\text{C}$ $\pm 4^{\circ}\text{C}$

14:00



$\pm 1^{\circ}\text{C}$ $\pm 2^{\circ}\text{C}$

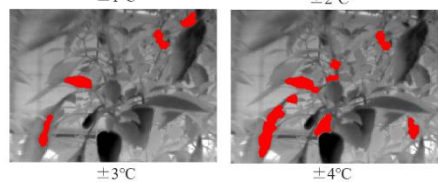
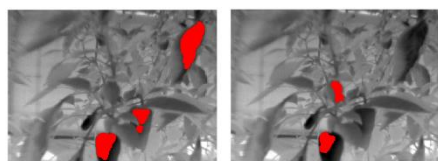


$\pm 3^{\circ}\text{C}$ $\pm 4^{\circ}\text{C}$

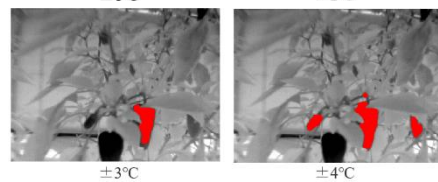
15:00

D.3 Daytime image processing results on December 15

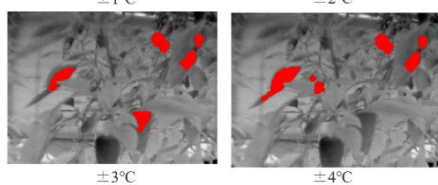
D.4 12月16日の結果



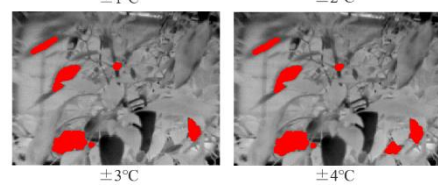
11:00



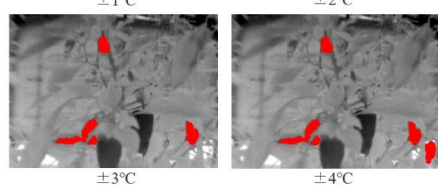
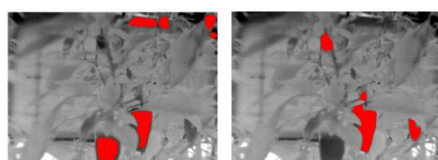
12:00



13:00



14:00



15:00

D.4 Daytime image processing results on December 16

参考文献

- [1] 農林水産省ホームページ：農業労働力に関する統計
<http://www.maff.go.jp/j/tokei/sihyo/data/08.html>
(参照日 2020 年 1 月 19 日)
- [2] 農林水産省ホームページ：農業就業者の動向
https://www.maff.go.jp/j/wpaper/w_maff/h23_h/trend/part1/chap3/c3_3_02.html
(参照日 2020 年 2 月 3 日)
- [3] 農林水産省ホームページ:スマート農業
<https://www.maff.go.jp/j/kanbo/smart/>
(参照日 2020 年 2 月 6 日)
- [4] 農林水産省ホームページ：スマート農業
「スマート農業の展開について（令和元年 12 月更新）」
<https://www.maff.go.jp/j/kanbo/smart/attach/pdf/index-64.pdf>
(参照日 2020 年 2 月 5 日)
- [5] 株式会社クボタホームページ：AgriRobo
<https://agriculture.kubota.co.jp/product/tractor/agrirobo/overview.html>
(参照日 2020 年 2 月 6 日)
- [6] ヤンマー株式会社：田植機 YR8D 自動運転
https://www.yanmar.com/jp/agri/products/riceplanter/riceplanter/yr8da/self_driving.html
(参照日 2020 年 2 月 6 日)
- [7] ファームアイ株式会社：ファームアイの独自技術
<https://www.farmeye.co.jp/technology/>
(参照日 2020 年 2 月 6 日)
- [8] 農研機構ホームページ：イチゴ収穫ロボット
<https://www.naro.affrc.go.jp/laboratory/brain/iam/urgent/urgent100/043434.html>
(参照日 2020 年 1 月 18 日)
- [9] 矢口裕明, 長谷川貴臣, 長濱虎太郎, 稲葉雅幸, “収穫装置と視覚認識に着目したトマト自動収穫ロボットの構成法”, 日本ロボット学会誌 Vol.36 No.10(2018), pp.693-702
- [10] JA 高知県ホームページ：JA の特徴
<https://ja-kochi.or.jp/agriculture/method/>
(参照日 2020 年 1 月 18 日)
- [11] 増田芳雄, “植物生理学[改訂版]”, (2001), 培風館, p123
- [12] 増田芳雄, “植物生理学[改訂版]”, (2001), 培風館, p129
- [13] 増田芳雄, “植物生理学[改訂版]”, (2001), 培風館, p130

- [14] 大崎貴士，岡宏一，“ピーマン収穫ロボットの収穫率向上”，2009 年度計測自動制御学会四国支部学術講演会
- [15] 多田敬佑，岡宏一，原田明德，“ハウス内における赤外線カメラを利用したピーマンの検出”，第 62 回自動制御連合講演会(2019 年)

謝辞

本研究を進めるにあたり，終始丁寧なご指導をしてくださった指導教員の岡宏一教授ならびに原田明德講師に心から感謝いたします。研究を手伝ってくれた研究室の先輩，同期，後輩の皆様に感謝いたします。また，実験を行うにあたり協力していただいた北村さんならびに松本さんに感謝いたします。

本研究は，高知県プロジェクト[「“IoP (Internet of Plants)”が導く「NEXT 次世代型施設園芸農業」への進化」]の助成を受けたものです。