

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成 25 年 5 月 31 日現在

機関番号：12201
研究種目：基盤研究(B)
研究期間：2010～2012
課題番号：22380140
研究課題名（和文） スペクトルイメージングによるイチゴの物理的損傷可視化及び損傷耐性
定量化技術の開発
研究課題名（英文） Development of damage visualization and quantification technology
for a strawberry
研究代表者
柏寄 勝 (KASHIWAZAKI MASARU)
宇都宮大学・農学部・准教授
研究者番号：00282385

研究成果の概要（和文）：

本研究では、イチゴ表面組織の変形による力学的特性と分光特性の経時的変化を詳細に把握し、イチゴ表面の吸光度が、軽微な物理的損傷であっても特定波長域の吸光度が増加し、時間経過と共に無損傷部位と同等な状態に戻る現象を明らかにした。さらに、イチゴの物理的損傷部位をより明確に可視化する方法として損傷可視化技術を考案し、実際のイチゴ流通過程に於いて目視では判別できない損傷部位の把握を可能にした。

研究成果の概要（英文）：

In this research, the absorbance characteristic on the surface of a strawberry was measured in detail first. And strawberry surface absorbance was increased by the mechanical damage, and it was shown clearly that the change arises in a specific wavelength band. The visualization technology of the damaged area of a strawberry was devised based on these character. By using this technology, we were able to specify the slight damage portion which occurs to the strawberry under transportation.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2010年度	10,000,000	3,000,000	13,000,000
2011年度	3,500,000	1,050,000	4,550,000
2012年度	1,500,000	450,000	1,950,000
年度			
年度			
総計	15,000,000	4,500,000	19,500,000

研究分野：農学

科研費の分科・細目：農業工学・農業情報工学

キーワード：非破壊計測，スペクトルイメージング

1. 研究開始当初の背景

超軟弱菜果であるイチゴは、収穫以降損傷等が生じ難い容器及び段ボール箱等に収められているが、その後の取り扱いや輸送時の振動や衝撃によるとみられる押し傷や擦り傷等の物理的損傷が発生し易い。特に、温暖期である3~5月には、損傷による廃棄率(ロス率)が30%にも達する場合がある。現在、イチゴの流通時に生じる損傷の評価指標として果実硬度が挙げられるが、果実硬度測定は破壊試験であるため全量検査は実施できず、また実際の生産および流通の現場では利用されていないのが現状である。

イチゴ果実の硬さは、取扱い、輸送、日持ち、食味などに影響し、特に食味に関わる部分は果肉の硬さ、日持ちに関しては果皮の硬さが関わると言われている(植松,1998)。よって、イチゴの果実硬度は、収穫後の品質を左右するため、糖度、酸度と並んで重要な因子であると考えられる。しかし、既往の研究では、イチゴ果実の糖度および酸度などの内部品質に関する非破壊測定事例はあるが、イチゴ果実硬度の非破壊測定に関する研究事例は見当たらない。

本研究担当者は、イチゴ果実硬度の主要因として細胞壁多糖類に注目し、イチゴ果実硬度とイチゴ表面分光特性の関係を細胞壁多糖類の変化を踏まえて把握し、イチゴの表面分光特性と果実硬度との関係を捉えたイチゴ果実硬度推定重回帰モデルを開発した。このモデルは、イチゴの硬さに関係が深いとされている内容成分である HSP(塩酸可溶性ペクチン)および PS(ペクチン様物質)、HC-II(ヘミセルロース第2分画)に関連する波長の吸光度を主に用いた推定モデルであり、イチゴの果実硬度を非破壊・非接触で推定する可能性を明らかにしたものである。

また、流通時に生じるイチゴの物理的損傷を踏まえ、イチゴに100gの荷重を掛けて物理的損傷を与え、これを可視光域および近赤外域(900~1600nm)のカメラで撮影し、近赤外域画像では物理的損傷を付加した部分(損傷部)が濃淡の差として表われることを明らかにした。損傷部位が濃色に表われる理由として、波長900~1600nmの近赤外域の反射率の差がその原因と考えられ、さらに特定波長域の光の吸収が変化していることも示唆された。

2. 研究の目的

本研究では、本研究担当者の研究成果である非破壊・非接触イチゴ果実硬度測定法を発展させ、イチゴの流通等で生じる物理的損傷の可視化方法および損傷定量方法を開発し、イチゴ果実硬度に起因する物理的損傷の個体差、即ち物理的損傷耐性を把握する計測システムを開発する。これに糖度・酸度、3次

元形状、着色程度、質量などのイチゴ品質評価要因を加えてイチゴの新たな総合品質評価測定システムの開発およびイチゴ高品質流通戦略モデルの考案につなげることを目的とした。さらに、イチゴの物理的損傷の程度、すなわち変形荷重と変形量の関係、そして被損傷部位の経時変化を把握し、物理的損傷の生じ難さ(損傷耐性)を数量的に表現する基盤理論を形成する。

3. 研究の方法

本研究における科学的且つ技術的な研究目的は次の4点である。

1) イチゴの物理的損傷の可視化および損傷定量化技術の開発

イチゴの物理的損傷をより明確に可視化する技術の開発、そして果実硬度の推定を用いて損傷程度推定する方法の開発、これらの技術を有効に用い新たなイチゴ総合品質評価計測システムにつなげる。物理的損傷計測技術の開発には、波長900~1700nmの近赤外域を撮影可能な InGaAs 素子のカメラ(新規導入物品)と波長域760~1600nmの任意の波長のうち指定した波長群の光を連続して発生することが可能な DLP 分光光源(新規導入物品)およびその光学的試験物品で構成するとしていたが、DLP 分光光源の性能が期待レベルに達しないことが判明したため、本研究担当者が開発に関与した複数波長を選択可能な LED 光源を用いて行うこととした。また、イチゴに対し一定圧力または一定変形量の損傷を与え、損傷の位置および程度と損傷部位について、特定波長の光源から得られる画像(スペクトルイメージ)を、光源波長を変化させながら取得することによってスペクトルイメージキューブを把握し、イチゴ果実の物理的損傷とスペクトルイメージ及びスペクトルイメージキューブの関係から、物理的損傷の位置および損傷程度を推定する技術を開発する。

2) イチゴ流通過程における物理的損傷発生メカニズムの解明

イチゴ流通時に生じる物理的損傷の要因を実測によって特定し、流通形態及び包装形態に基づくイチゴの物理的損傷と損傷要因との関係性を把握し、物理的損傷発生メカニズムを解明することを目的とする。なお、本研究におけるイチゴ流通過程は、生産から販売に至る間の全ての流通過程を想定している。特に、輸出における航空機による輸送、国内と国外での取り扱いの違いについて物理的損傷との因果関係を明らかにする。

3) イチゴの物理的損傷耐性の解明

本研究で開発した物理的損傷可視化システムを用いて個々のイチゴの果実硬度、損傷位置および損傷程度を非破壊・非接触で測定し、実測した物理的損傷要因(振動や衝撃)を

実験室内で再現して個々のイチゴに振動や衝撃を曝露し、生じた物理的損傷と果実硬度、果実硬度関連物質、果実硬度関連酵素及び総合品質評価との関係を個々のイチゴについて把握し、個々のイチゴの物理的損傷耐性の違いや要因を明らかにする。

4) イチゴの新たな総合品質評価システムおよび高品質流通戦略モデルへの展開

上記の 1),2),3)の成果をまとめ、イチゴ果実の果実硬度、物理的損傷耐性、糖度・酸度、3次元形状、着色程度、質量などの総合品質評価を同時に連続的に測定することが可能なイチゴ総合品質評価システムを設計する。さらに、測定した品質要因から従来の内部品質及び外観品質に基づく選別に加え、個々のイチゴ果実に適した流通条件を判別して輸送システムと直結するイチゴの高品質流通戦略モデルを考案し、イチゴの超高品質流通戦略を考案する。

4. 研究成果

1) イチゴの物理的損傷の可視化および損傷定量化技術の開発

イチゴ果実に振動を負荷することで呼吸量が増加し、品質の劣化が進むことは一般的に知られていることである。しかし、輸送時におけるイチゴ果実に生じる損傷による品質劣化は、輸送及び流通に携わる者にとって大きな課題であり、包装容器の開発や輸送手段、例えば輸送トラックのエアサスペンションの改良など様々な試みが報告されている。しかし、損傷の評価に関する事例は現在までに無く、輸送改善などの試みも損傷を目視で評価するなどの感覚に頼っている。

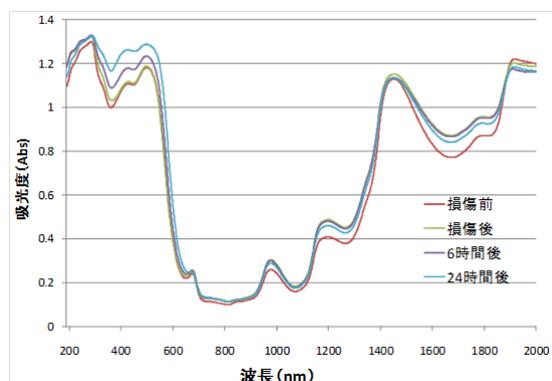
本研究ではイチゴ果実の高品質化を目指し、非接触による損傷評価の可能性について検討した。そして、近赤外領域におけるスペクトルイメージを用いることで劣化の原因となる物理的損傷(オセヤスレ)の定量評価に繋げることを目的とした。

まず、分光光度計を用いて 200~2000nm のイチゴの吸光度スペクトルを取得し、その取得部分に一定の圧力を与えて擬似的にイチゴに物理的損傷を生じさせた状態を作り、その吸光度スペクトルを損傷直後、6時間後、24時間後に測定し、イチゴの物理的損傷と関連がある波長域の検討を行った。イチゴ果実に損傷を与える方法として HIT-COUNTER を使った。条件として貫入速度を 25mm/min に設定し、直径 8mm のプランジャーでイチゴ果実の外面对して 1mm の変形及び荷重 600gf を付加して行った。なお、イチゴの着色設定は、100%、50%、0%着色の 3 段階とした。

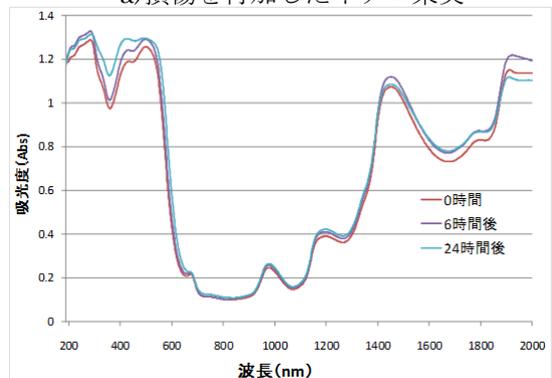
100%着色果と 50%着色果では、可視領域による変化が著しく、果実の色素の特徴を捉えていると考えられるが、白色果では損傷の

有無によって大きな吸光度の変化はない。また、損傷の有無関係なしに 200nm~400nm の近紫外域と 1500nm~2000nm の近赤外域において時間経過による吸光度の変化が見られた。損傷の有無で比較すると 1000nm~1500nm の波長域は損傷を与えた直後に吸光度が上昇するが、時間経過と共に低下した。

この現象はどの着色段階のイチゴ果実でも同様であった。永田ら(2002)の研究では 860nm の波長域の赤外線画像ではイチゴの損傷は捉える事ができないが、960nm の波長域における赤外線画像で損傷を捉える事が可能であるという報告があり、1000nm 付近の波長域において損傷を測定できる可能性があると考えられる。また、970nm 近辺と 1410nm 近辺に水に関する吸収帯域、1152nm 近辺に CH₃ に関する吸収帯域、1900nm 近辺に澱粉に関する吸収帯域があることから、損傷によってこれらの物質に変化を引き起こしている可能性がある。



a) 損傷を付加したイチゴ果実



b) 損傷を与えないイチゴ果実

図 1 損傷有無による吸光度スペクトルの経時変化

次に、イチゴに損傷を与え、暗所にて単波長の LED を光源として用いて NIR カメラで撮影し、イチゴのスペクトルイメージを取得した。イチゴ試料は、100%着色果に与える荷重を無荷重、100gf、200gf、400gf 設定し 4 試験区各 10 個、50%着色果には無荷重、400gf、600gf、800gf の 4 試験区各 10 個を設定した。スペクトルイメージの取得は、イ

イチゴ果実を収穫後、実験室でインキュベータの温度に馴染ませた後、荷重を与えた時点から24時間ごとに48時間後までの3回実施した。荷重付加方法は直径8mmプランジャーによるHIT-COUNTERで実施した。イチゴ果実の保存は15°C設定のインキュベータで行い、測定前および測定後のイチゴを静置した。NIRカメラとしてInGaAsカメラ、光源には単波長LEDを複数波長分設置し、イチゴ果実に対し均等照射できるようにした。

図2にデジタルカメラによるカラー画像、図3にLED光源によるNIRスペクトルイメージを示した。図2のイチゴは既に損傷を与えたものであるが、画像から損傷を確認することは難しい。しかし、NIRカメラで撮影した近



図2 供試イチゴの一例

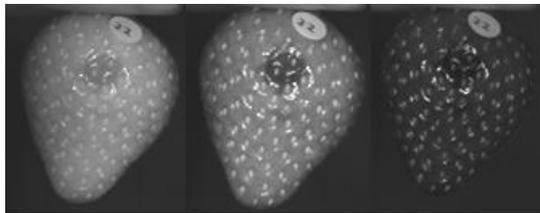


図3 NIRカメラによるスペクトルイメージ赤外線画像では損傷部が黒ずんで見えることから、損傷部が近赤外光の吸収率が増加していることが分かる。

また、損傷部が最も明確に判別可能な光源波長を用い、損傷負荷後の経時変化を図4に示した。

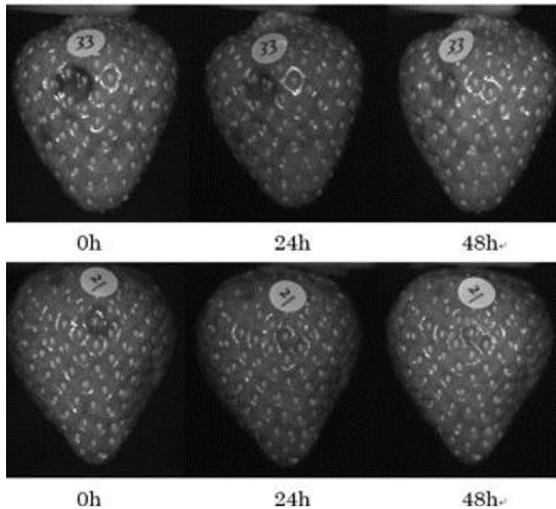


図4 損傷部スペクトルイメージの経時変化

NIRイメージは時間経過と共に損傷部位の特徴が捉えることが困難になる、つまり特定波長の吸光度が損傷直後は急激に上昇し、時間経過と共に損傷前の吸光度に戻る現象を把握した。

また、今回イチゴの損傷の進行にも注目し

ていたが、測定期間である0時間から48時間ではイチゴの損傷の進行は目視では大きな変化はなかった。また、上述の通り、損傷部位の吸光は時間経過と共に弱まるため、現行の方法では損傷の進行について言及することは難しいと考えられる。

2) イチゴ流通過程における物理的損傷発生メカニズムの解明

イチゴは果皮が軟弱であり、他の果実と比較しても傷つきやすいことは幾度も述べてきた。一般的にイチゴ果実における振動加速度の限界点は1Gと言われており、カキや柑橘類の3Gやリンゴ、トマト(成熟)の2.5Gと比較しても輸送が難しい果実であることがわかる。しかし、イチゴの損傷がどのようにして発生するかは未だ明らかではない。加えてイチゴの傷みを評価する手段は人間の目視によって行われている。そのため、明らかに傷が進行したものしか評価することができず、果実一つ一つが商品価値を持つイチゴにとって損傷の定量評価は大きな課題である。梱包のクッション性や輸送トラックのサスペンションの工夫など対策は取られているが、今後はそれらの効果を数値的に評価する方法が必要であると考えられる。

劉ら(2001)が行ったイチゴの模擬振動実験によると14段積みイチゴダンボールを加振したところ、下段のものほど振動強度が高くなり、商品価値がかなり小さくなると報告している。小林ら(2007)が行った輸送時の再現によるイチゴの振動試験では、イチゴの傷みはパックに接している部分の方が、内部よりも早く傷みが生じることがわかっている。また小林らはイチゴの損傷と振動のSN曲線から「損傷度」を算出する方法を提案し、傷みの定量評価を目指している。また、イチゴ果実は損傷により電気伝導率が変化することが知られており、それを利用したイチゴの損傷評価方法などが研究されている。

本研究では、イチゴの損傷可視化技術を用いて損傷部位を特定し、輸送時に生じる振動・衝撃などの物理的損傷発生要因とその発生頻度をより詳細に把握・蓄積し、物理的損傷を生じる要因と損傷パターンについて果実硬度の観点を踏まえて明らかにする。

小型3軸加速度計測装置とプラスチック製のイチゴモデル内に小型3軸加速度センサを組み込んで作成したイチゴ振動センサを用いて、イチゴを輸送するトラック荷台、包装箱の3軸方向の加速度を測定する。さらに、イチゴ振動センサを他の生イチゴとともにパック内に通常包装状態と同様に設置し、イチゴに生じる3軸方向の加速度を測定し、加速度及び変位から実際のイチゴに作用する力及び動きを把握する。さらに、生じた損傷部位を検知し、イチゴ・イチゴ及びイチゴ・



a) イチゴ型 3 軸加速度センサの設置状態



b) 箱網包状態

図 5 イチゴ輸送試験の状態

パックの相互位置関係や干渉関係を把握し、物理的損傷との関係性を追求する。イチゴに定量的な物理的損傷を与える損傷試験を行い、イチゴの変形に伴う力学的特性から果実硬度を推定する可能性を検討する。これらを総合してイチゴの果実硬度と物理的損傷との関係性を明らかにすることを目的とした。

栃木県真岡市のイチゴ生産農家から東京都新宿区の百貨店までの輸送経路について、流通環境と輸送前後の品質変化を把握した。試験数 23 個を 2 パックに分けて図 5 の状態で通常出荷品と混載して輸送した。

供試したイチゴの品種はロイヤルクイーンである。ロイヤルクイーンはとちおとめに比べて果皮が柔らかく、傷みやすい性質を持つため、本試験では明確な損傷を捉えられると判断した。

供試試料収穫時の糖度は 8.3%Brix(標準偏差 0.2)、収度 0.697%(標準偏差 0.064)、貫入硬度 63gf(標準偏差 8)であった。輸送後は、糖度 9.0%Brix(標準偏差 0.7)、重量減少率 0.34%(標準偏差 0.35)であった。

図 6 に輸送時のパワースペクトル密度を示した。約 3Hz ± 1Hz の低周波数

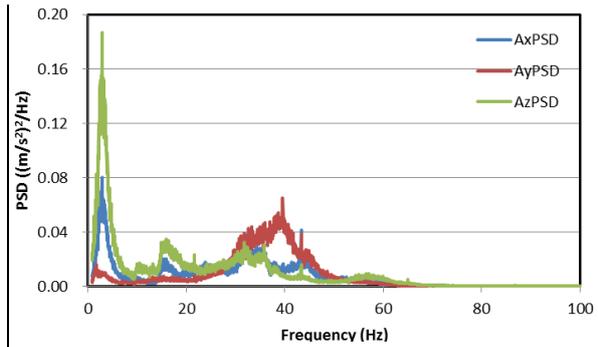


図 7 輸送時振動の PSD

域に特徴的なピークが生じていることが分かった。

NIR 技術を用いたイチゴの損傷可視化技術を用いて損傷部位を特定し、輸送時に生じる振動・衝撃などの物理的損傷発生要因とその発生頻度をより詳細に把握・蓄積し、物理的損傷を生じる要因と損傷パターンについて果実硬度の観点を踏まえて明らかにする。個別にパック内の位置と発生した損傷の状況を確認した(表 1)。目視では確認が困難な損傷も検出できるため、包装フィルムおよびパック壁面との干渉による軽微な損傷、イチゴの重なり部分の大きな損傷を確認できた。

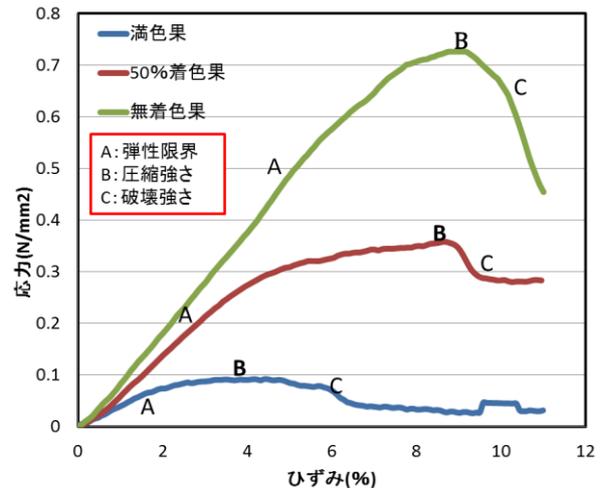


図 6 イチゴ変形時の応力と歪の関係

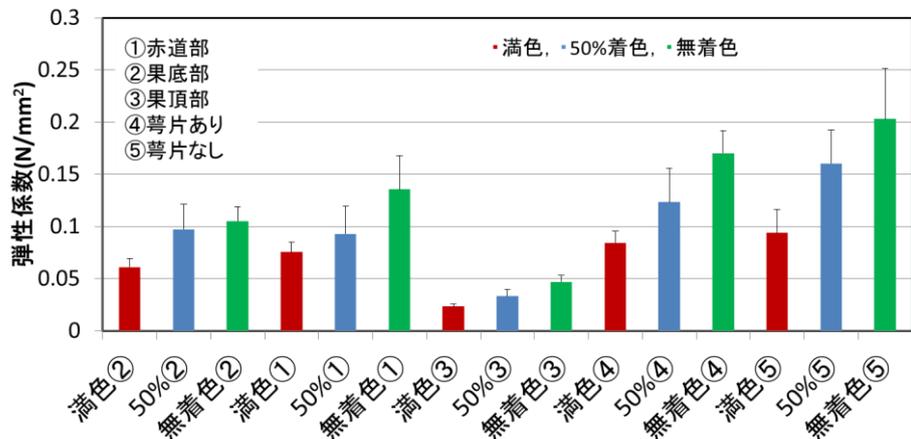


図 8 イチゴの着色および部位を弾性係数の関係

特にイチゴの先端部分の損傷が多く、今後イチゴの先端部分を如何に守るかが課題である。

3) イチゴの物理的損傷耐性の解明

イチゴに定量的な物理的損傷を与える損傷試験を行い、イチゴの変形に伴う力学的特性を検討した。イチゴの損傷発生状況をより詳細に把握するためにφ2mmプランジャー貫入時の応力と歪および破壊の関係を求めた(図 7)。満色果では明確な弾性限界が見つけ難いが、歪 1%程度で応力 0.4N/mm²を生じている。この程度の応力および歪がイチゴに損傷を生じさせるか、つまり弾性限界とイチゴの物理的損傷との関係について精査する必要がある。また、イチゴの個体差のため応力-歪線図の形状が大きく変化することも判明した。今後、物性値を含めた応力歪線図の形状と果実硬度および物理的損傷の関係についてより詳細に把握し、イチゴ自体が持つ物理的損傷の発生要因について明らかにする必要がある。

また、イチゴの着色状態と各部分の弾性係数を求めた(図 8)。着色状態に関わらず低い弾性係数になるのは果頂部であり、赤道部の約 1/3 程度である。また、萼片部分は萼片の有無に拘わらず最も高い値であった。

4) イチゴの新たな高品質流通戦略モデルへの展開

本研究では、イチゴの新たな高品質流通の基盤的技術としてイチゴの損傷可視化技術を開発し、その効果や可能性について検討した。この技術を用いると損傷直後の目視では確認不可能な軽微な損傷を可視化できることが判明した。これは損傷部分の特定波長における吸光度が増加する現象を映像化したものである。しかし、損傷映像は時間経過とともに判別できなくなり、約 48 時間後には全く判別できない状態になった。物理的な損傷は残存しているにも係わらず、特定波長の吸光度のみが他の無損傷部分と変わらない状態に戻る現象は今後追究すべき課題と考えている。

また、陸上輸送時のイチゴに生じる振動を把握し、約 3Hz±1Hz の低周波数域に特徴的なピークが生じていることが分かった。そして、損傷可視化技術及び目視でイチゴの損傷部位について把握し、パックへのイチゴ充填状態と損傷の関係について検討したが、損傷発生を十分説明できる科学的根拠の特定には出来なかった。これは、先ず個々のイチゴの 3次元形状を十分に把握しなければなら

Pack	Sample No	イチゴ上側の損傷	イチゴ下側の損傷
Pack1 	1	2ヶ所スレ	中心に広くオセ
	2	2ヶ所スレ	2ヶ所にオセ、1ヶ所シル、一部腐敗?
	3	3ヶ所オセ、1ヶ所シル	全体的にオセ
	4	全体的	先端と側面
	5	1ヶ所オセ	表面全体、両側面オセとシル
	6	表面全体	先端と左側面シル
	7	表面全体	右側面シル
	8	表面全体	先端
	9	中央	先端~中央、左側面
	10	中央・左側面	中央やや下に若干
	11	中央やや上に若干、左側面シル	左側面と先端
Pack2 	12	全体、右側面・中央下にシル	先端
	13	表面全体、右側面シル	先端にシル、全体的にオセ
	14	先端、中央下オセ	先端オセ、左側面オセ
	15	表面全体	左側面シル、全体的にオセ
	16	表面全体、両側面シル、左陥没	全体的にオセ
	17	表面全体	全体、左側面陥没&シル
	18	表面全体	先端と左側面シル、右側面オセ
	19	中央・やや先端	全体的にオセ、先端&両サイドシル
	20	表面全体、先端腐敗?	左側面オセ
	21	表面全体、右下シル	左側面オセ
	22	表面全体	全体、先端にシル
	23	表面全体	全体

表 1 イチゴの損傷位置と損傷状態の把握

いこと、イチゴ表面の物理性をイチゴ-イチゴ間、イチゴ-パック間の相互関係性を踏まえて把握する必要があること、そしてこれらの関係性を非接触で推定する方法の開発が必要であることを提起する。そして、この技術によってイチゴ流通に於ける新たな高品質化戦略に寄与することができると考えられる。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 0 件)

[学会発表] (計 2 件)

- ① 柏寄 勝、イチゴの損傷部位検出技術の開発— 損傷部位の分光特性と経時的変化—、農業機械学会 2010 年次大会、2010
- ② 柏寄 勝、青山リエ、イチゴの物理的損傷に関する基礎的研究—貫入試験による組織の変形と破壊—、農業環境工学関連学会 2012 年合同大会、2012

[図書] (計 0 件)

[産業財産権]

○出願状況 (計 0 件)

○取得状況 (計 0 件)

[その他]

ホームページ等：掲載なし

6. 研究組織

(1) 研究代表者

柏寄 勝 (KASHIWAZAKI MASARU)

宇都宮大学・農学部・准教授

研究者番号：00282385