

イチゴ果実の損傷特性の解明による輸送中の損傷発生抑制

2023

遠藤 みのり

目次

第1章	序論	1
第2章	イチゴ果実の損傷特性	
第1節	緒言	5
第2節	オセおよびスレの3次元微細構造	6
(1)	はじめに	
(2)	材料および方法	
(3)	結果	
(4)	考察	
第3節	オセ発生果実の内部構造	15
(1)	はじめに	
(2)	材料および方法	
(3)	結果	
(4)	考察	
第4節	摘要	18
第3章	見かけ弾性率を用いたイチゴ育種によるオセの発生抑制	
第1節	緒言	19
第2節	見かけ弾性率を用いた特性評価	20
(1)	はじめに	
(2)	材料および方法	
(3)	結果	
(4)	考察	
第3節	見かけ弾性率の遺伝特性の評価	38
(1)	はじめに	
(2)	材料および方法	
(3)	結果	
(4)	考察	
第4節	摘要	44
第4章	オセおよびスレの発生を抑制する包装および輸送技術の開発	

第1節 緒言	45
第2節 新型容器とMA包装の併用効果	47
(1) はじめに	
(2) 材料および方法	
(3) 結果	
(4) 考察	
第3節 船舶・航空複合一貫輸送技術の開発	60
(1) はじめに	
(2) 材料および方法	
(3) 結果	
(4) 考察	
第4節 摘要	75
第5章 総合考察	77
英文要約	80
引用文献	83
謝辞	90

第1章 序論

第1節 研究の背景

イチゴ (*Fragaria* × *ananassa* Duch.) は、バラ科の草本植物であり、偽果（以降、果実）を食用とする。世界で最も一般的に利用されている 8 倍体の栽培種は、共に野生種である *F. virginiana* および *F. chiloensis* が 1700 年代にヨーロッパにおいて交配されて誕生したとされ、野生種とは異なる大粒で香りの良い果実をもつ (Lee, 1966 ; 森下, 1994)。現在、イチゴの栽培および消費地域はアジアやヨーロッパ、アメリカ全土、オセアニア、アフリカなど広範囲に及び、全世界の年間果実生産量は約 8,89 万 t にのぼる (FAO, 2019)。

イチゴの果実は花托が肥大した偽果で、軟らかで果汁に富み、食感に優れるが、偽果表面（以下果皮という；イチゴの真の果実は偽果の表面に散在する瘦果であり、真の果皮〈pericarp〉は瘦果の表面に存在する。しかしながら、一般的には偽果の表面が果皮〈skin〉と呼ばれるため、本論文では偽果の表面組織を果皮とする）に硬い表皮組織を持たないことから、組織や内容成分が容易に損なわれやすい。このため、イチゴの栽培や消費が世界に広がった今日では、収穫後の品質低下抑制技術の確立が各地で求められている。例えば、北アメリカやヨーロッパ、オーストラリアなどでは、真菌類の増殖による果実腐敗を防ぐため、収穫前後に殺菌剤の散布が多用されてきた (Washington ら, 1992)。また、収穫後に二酸化炭素を処理して果実を硬化させたり (Larsen・Watkins, 1995 ; Pelayo ら, 2003)、食用被覆剤、食用フィルムで果実を被覆したりする技術が開発された (Wang・Gao, 2013)。近年では、特にキトサンなど天然由来の多糖類を用いた被覆処理の有効性が報告され (Duran ら, 2016 ; Han ら, 2004)、従来行われてきた殺菌剤散布に代わる、安全性の高い技術として注目されている (Tripathi・Dubey, 2004)。中国では、収穫後の果実を電解水や精油で処理することで、果実表面における真菌類の増殖を抑制し、品質低下を抑制する試みが始まっている (Ge ら, 2013 ; Cheng ら, 2011)。精油などには真菌類の成長を直接阻害する効果が認められ、イチゴ果実に付着する真菌類の増殖を特に強く抑制することが期待される (Shao ら, 2013)。一方、果実表面を硬化、被覆する処理や、高濃度の精油による処理は、少量ずつの果実に対し頻繁に行う場合、多くの手間や費用がかかる。また、果実表面におけるガス交換を阻害、あるいは新たな香气成分を付加し、イチゴ果実由来の香气成分を変質、減少させることから、食味を低下させるおそれが指摘されている (Ke ら, 1994 ; Larsen・Watkins, 1995 ; Martínez, 2018 ; Pérez・Sanz, 2001 ; Ueda・Bai, 1993 ; Vargas ら, 2008)。したがって、これらの技術は、大規模な露地栽培で晩春～夏秋を収穫期

とするとともに、国土が広く常温トラックなどによる長距離輸送が行われ、栽培および流通環境において真菌類が果実表面に付着、増殖しやすい国・地域や、イチゴ果実を加熱した状態など多様な形態で食べる国・地域では普及しているものの、日本のように、小規模な施設での促成栽培が主流かつコールドチェーンが発展した国・地域や、イチゴ果実をもっぱら生食する国・地域では、普及は限定的である。後者の日本をはじめとする国・地域では、果実表面の硬化、被覆、静菌処理とは異なる、独自の品質低下抑制技術が必要である。

阿部（1986）や緒方（1975）、西澤（2017）は、流通過程におけるコールドチェーンがおおむね整った状況下における青果物流通を俯瞰し、その上で青果物の品質に影響する要因として、品種や栽培、包装条件、流通中の振動や衝撃を挙げている。日本では特に、流通中の振動や衝撃に伴って発生する物理的損傷による品質低下が深刻であり（中村，2019；Nakamura ら，2007）、北アメリカなどで問題となりやすい真菌類の増殖は、むしろ物理的損傷の結果として発生することが多い（相川ら，2007）。日本において流通中のイチゴ果実の品質低下を抑制するためには、果実表面の殺菌や静菌を目的とした処理よりも、物理的損傷の発生抑制や回避を目的とした品種や、栽培、包装、輸送技術の選択が有効であると考えられる。実際に、日本では、物理的損傷の制御に主眼を置いたこれらの諸技術の開発が、既に半世紀以上前から開始されている（西澤，2017）。例えば、イチゴ果実の硬さの評価方法が開発されたのち（門馬ら，1977）、適度な食感と流通適性を両立する硬さやペクチン組成および含量を示す品種の開発が試みられ（佐藤・成河，1985；佐藤・山川，1989；佐藤ら，1986；佐藤ら，1987；柏寄ら；2007）、品種別に最適化された栽培技術とともに各地に普及している。また、フィルム包装や中敷きシートが果実硬度の維持や損傷発生の抑制に有効であることが示され、かつては無包装あるいは木箱など簡易包装へのバラ詰めであったイチゴ果実が、プラスチック製の容器に整然と並べられて流通するに至っている（平野ら，1988；中村ら，2008）。ただし、日本では、いまだ流通中におけるイチゴ果実の損傷発生は深刻な問題である。日本におけるイチゴ果実の損傷発生に伴う経済的損失を正確に把握することは難しいが、流通過程を想定した振動試験にパック詰めした果実を供試し、表面積の2割以上に物理的損傷が生じた果実を廃棄した場合、少なくとも約4割の果実が廃棄対象であったことや（大石ら，2009）、落下試験によって果実に明らかかな物理的損傷が生じる衝撃加速度を算出し、実際の流通過程で生じる衝撃加速度にあてはめた場合、福岡県内から千葉県内への輸送中にほぼすべての果実が廃棄対象となったこ

などが報告されている（北澤ら，2010）．すなわち，これまでに開発された品種や，栽培，包装，輸送技術による物理的損傷の発生抑制技術が，流通現場においていまだ何らかの課題を抱えているといえよう．

以上のイチゴ果実の流通現場を背景として，筆者は，日本においてイチゴ果実の物理的損傷の発生抑制を妨げる要因として，2つが挙げられると考えた．1つめは，イチゴの果実表面に生じる物理的損傷に関する理解が，いまだ乏しいことである．日本の生産および流通現場では，イチゴ果実の自重により果実が容器に圧迫されて生じる物理的損傷をオセ，他の物体との間に生じる摩擦による物理的損傷をスレとして，大別している（多々良ら，1999）．予冷低温輸送により果実表面の可塑性を変化させると，スレの発生は抑制されるが，オセの発生には大きく影響しないことから（大竹・田中，1988），両者は少なくとも発生機構や発生部位に差異があると考えられる．しかし，オセやスレが具体的にどのような形態的，生理的特徴を有する損傷かを詳細に調査した例はなく，発生機構や発生部位は明らかではない．オセやスレの特性が明らかでないために，日本における品種および，栽培，包装，輸送技術開発はターゲットが不明瞭なまま進められており，効率的な技術開発が妨げられていると考えられる．2つめは，様々な品種および，栽培，包装，輸送技術開発が同時多発的に行われているがゆえに，技術同士の併用効果の検証が不十分であることである．曾根（2011）はイチゴ果実の未熟果収穫技術および包装内の二酸化炭素濃度を高める MA（modified atmosphere）包装技術の併用効果を実証，報告したが，このような例は稀であり，既に開発された多くの技術間における相互作用が不明なままである．それぞれの物理的損傷発生抑制技術について，オセおよびスレのいずれに効果を有するかを明らかにし，効果的な組合せを見極めることで，生食用に耐えうる良食味を維持しつつ，手間や費用を最小限にする，日本に適した品質低下抑制技術を提示できるはずである．

本研究は，日本のイチゴの栽培，流通，消費環境を考慮しつつ，流通中におけるイチゴ果実の品質低下を抑制することを目的とした．まず，第 2 章では，形態的観点から，イチゴ果実に生じる物理的損傷であるオセとスレの発生特性の解明を行った．これにより，従来，発生機構や発生部位が十分理解されていなかったオセおよびスレが，果実のいずれの部位でどのように生じているかを見極め，それぞれどのような方策により発生を抑制することが効果的かを議論した．その結果，品種開発がオセの発生抑制に対し有効であると考えられたことから，第 3 章では，オセの発生が少ないと考えられるイチゴ個体を選抜する方法を確立するための育種的研究を行った．具体的には，イチゴ果実のオセに関与する新

たな評価指標として見かけ弾性率を提案し、見かけ弾性率の遺伝特性を解明した。一方、スレの発生抑制には包装および輸送方法の改良が有効であると考えられたことから、第 4 章では包装技術および輸送技術の開発を行った。具体的には、近年増えつつある航空輸送や海上輸送による長期、長距離輸送を想定し、スレの発生を抑制する包装方法を考案した。包装方法の考案にあたっては、従来、青果物流通において利用されている MA 包装と考案した包装容器とを組み合わせ、輸送方法別に最低限の手間、費用で物理的損傷の発生を抑制できることを実証した。輸送技術の開発では、第 3 章で提案した評価指標にもとづいてオセの発生が少ない品種を選定し、適切な品種と包装容器を組み合わせ、物理的損傷の発生を抑制できる長期、長距離輸送技術を提案した。

第2章 イチゴ果実の損傷特性

第1節 緒言

青果物の収穫から流通・貯蔵時に発生する物理的損傷は、発生原因により以下のようにいくつかに分類、定義される（モーセニン，1982）。

Abrasion	擦り剥いたような傷。収穫時には分かりづらいが、低湿度で1週間以上貯蔵すると簡単に観察できるようになる。
Bruising	植物の組織が外力により損傷を受け、その結果、組織構造の物理的変化、色沢、フレーバー、組織などの化学変化を起こしたもの。果皮の破損はない。
Distortion	形状が変化したもの。
Crack	完全には分割されていない裂け目。
Cut	鋭利な刃により切れ目の入ったもの、あるいは分割された状態。
Puncture	針状のものや他の果実の茎などによる果実表面の小さな穴や傷。
Shatter cracks	曲がりくねった割れ目で、衝撃点から四方に広がっているもの。
Skin break	果皮の破砕または割れ目。
Skinning and Feathering	ひっかき、擦りなどによる、果皮の分離。FeatheringはSkinningと同様であるが、果皮の一部が分離せずくっついた状態。
Split	いくつかに砕けたもの。
Stem and Tearing	果実から茎を収穫する際に、果皮が一緒に剥けたもの。
Swell-cracking	水分吸収による膨張により、ひび割れが生じたもの。

ただし、品目や品種の違いなどにより組織の構造や収穫、流通の工程が多様であるため、同一の原因で発生した損傷であっても、実際の形態は様々である。また、イチゴを含む一部の品目では、物理的損傷を受けた組織が大気に晒されることでさらに生理的に変化するなどの反応を示すことも報告されている（モーセニン，1982）。イチゴ果実の損傷発生の抑制方法を考案するためには、イチゴ特有の組織の構造や生産、流通、消費環境を踏まえた条件下における損傷の形態的・組織的な特徴を解明することが重要である。

本章では、共焦点レーザー走査型顕微鏡を用いて、損傷が発生したイチゴ果実の果皮および果肉、髓部の組織の形態的構造を調査した。共焦点レーザー走査型顕微鏡は、従来の走査型電子顕微鏡や透過型電子顕微鏡と異なり、試料を前処理する必要がないため、損傷を受けた組織をダイレクトに、3次元構造を破壊することなく果実の表面や断面を詳細に

観察することが可能である。観察で得られた形態情報にもとづき、イチゴ果実に発生する物理的損傷の発生メカニズムを推定し、物理的損傷の特性に基づく分類を試みた。

第2節 オセおよびスレの3次元微細構造

イチゴ果実に発生する損傷は、果実の自重に伴う圧迫によるものをオセ、手指および他の果実、包装容器などとの摩擦によるものをスレと呼び分けることが一般化している(多々良ら, 1999)。前者はモーセニン(1982)の分類のうち bruising や distortion に、後者は abrasion や crack, cut, puncture, skin break にそれぞれ近いと推測される。ただし、イチゴ果実は特有の表面構造および細胞特性を有することから、オセおよびスレの表面付近の形態は、一般的な損傷と異なる可能性がある。例えば、一般的な bruising は果皮の損傷を伴わないとされるものの(モーセニン, 1982)、イチゴの果皮は他の青果物に比べ非常に薄く損なわれやすいため、オセの発生時には果皮においても何らかの形態的变化が生じている可能性がある。また、リンゴ果実の bruising や crack, cut, puncture, skin break では細胞内容物の漏出が生じうるが(Holt・Schoorl, 1977; Ingle・Hyde, 1968)、イチゴ果実の細胞は外力が作用した際に破裂せずに分離する傾向があることから(Harkerら, 2000)、オセやスレに伴いこれらが生じない可能性がある。イチゴ果実における損傷範囲の特定および細胞破裂の有無の検証は、果皮細胞間の接着に関与するペクチン質や、細胞強度に関与するセルロースについて、損傷発生を抑制する上での最適含量および組成を果実の部位別に議論する上で重要である。また、果皮表面の形態は、植物と菌類の相互作用に重要な役割を果たす創傷揮発性化合物の生成や(Myungら, 2006)、果皮表面への微生物の付着、感染、除去に関与することから(Liao・Sapers, 2000; Wangら, 2009)、損傷が発生した果実における果皮細胞の状態は、損傷前後に殺菌剤を使用する必要性を議論する上でも重要である。

そこで、まず、オセおよびスレが発生した果実表面における3次元微細構造を観察し、オセおよびスレの発生範囲および、細胞の破裂や分離の有無などの形態学的特徴を明らかにした。

材料および方法

国立研究開発法人農業・食品産業技術総合研究機構西日本農業研究センター(香川県善通寺市)の農業用ポリオレフィン系特殊フィルム(以下農POという)を展開したパイプ

ハウスで栽培した‘恋みのり’，‘さちのか’および‘とよのか’の果実を供試した．2020年1月9および14日に20～30gの完熟した果実を収穫し，明らかな損傷がないことを目視で確認後，ただちに実験室に移した．無作為に選んだ品種当たり12果について，材料試験機（MCT-2150，（株）エー・アンド・デイ）を用いた貫入試験により，果実硬度を測定した．門馬ら（1977）に従い，プランジャーは先端直径3mmの円柱型，ロードセルは500Nとした．貫入速度は $100\text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$ ，貫入位置は果実のうち着果時に日光が最も当たった面（以下おもて面という）の赤道部とし，プランジャーの先端が瘦果に接触しないよう貫入させた．測定果数は品種当たり12果とした．また，硬度の測定に用いた果実とは別に，品種当たり12果を無作為に選び，宙吊り型容器（ゆりかごCタイプ，大石産業（株））に入れ，4°Cで貯蔵した．

貯蔵した果実は，収穫後0，5，11日目にそれぞれ取り出し，果実質量を測定した．また，果実表面積に占めるオセおよびスレの発生面積割合を，それぞれ目視で調査した．さらに，405nmの波長のレーザーを搭載した共焦点レーザー走査型顕微鏡（Optelics® Hybrid，レーザーテック（株））を用いて，オセの発生箇所（収穫後5，11日目），スレの発生箇所（収穫後5，11日目）および無傷の箇所（収穫後0，5，11日目）について表面の3次元微細構造を50倍の対物レンズを用いて観察した．果皮の表皮細胞（以下果皮細胞という）の最大高さ（ H_{\max} ），最低高さ（ H_{\min} ）を計測し，以下の式（1）により表面粗さ（ R_z ）を算出した．

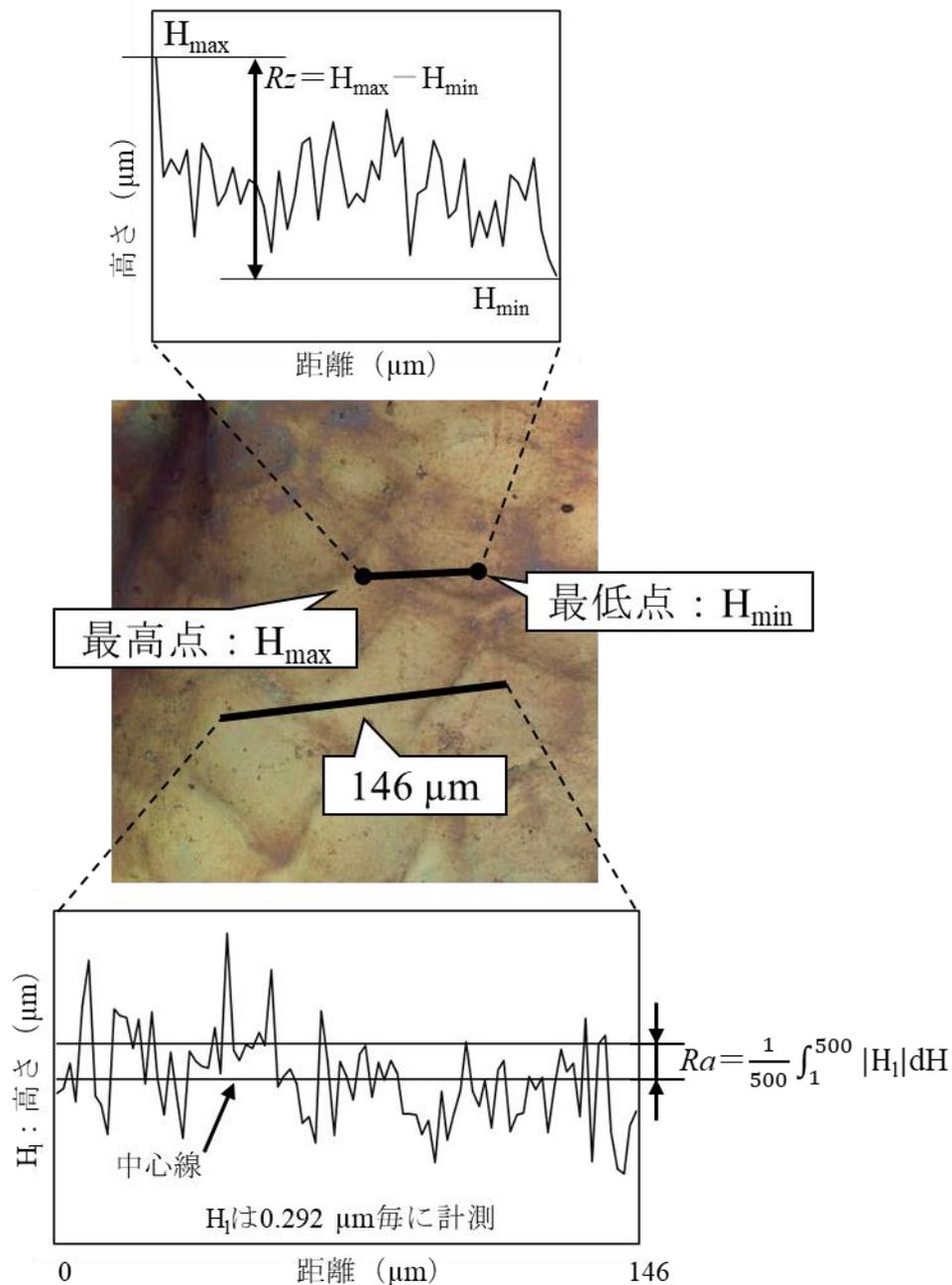
$$R_z = H_{\max} - H_{\min} \quad (1)$$

同様に，視野に任意の $146\text{ }\mu\text{m}$ の直線を引き， $0.292\text{ }\mu\text{m}$ 毎に細胞の高さ（ H_i ）を計測し，以下の式（2）により算術平均粗さ（ R_a ）を算出した（第1図）．

$$R_a = \frac{1}{500} \int_1^{500} |H_i| dH \quad (2)$$

なお，表面粗さは，観察範囲に極端な凹凸が1か所以上含まれる場合に大きくなる．一方，算術平均粗さは，設定した $146\text{ }\mu\text{m}$ の直線上における細胞の高さの絶対値を積分した値であるため，観察範囲に極端な凹凸が少数含まれても，大きくなりにくい．測定時には専用ソフトウェア（LMeye7，レーザーテック（株））を用いて水平面の補正を行った．観察位置は果実のうち，できるだけおもて面の赤道部に近い位置とし，瘦果を避けて観察した．すべての観察は室温19°C，湿度40%の実験室で行い，収穫0および5日後は，観察後の果実はただちに宙吊り型容器に戻し，4°Cで貯蔵を続けた．

すべての統計処理は，JMP ver. 8（SAS）を用いて行った．



第1図 イチゴ果実の表面粗さの測定方法

結果

供試品種における果実硬度は、‘恋みのり’で1.54 N、‘さちのか’で1.44 N、‘とよのか’で0.98 Nであり、‘恋みのり’および‘さちのか’では‘とよのか’に対し高かった。果実表面積に占めるオセおよびスレの発生面積割合は、収穫5日目には‘恋みのり’で6.2 および1.3%、‘さちのか’で6.0 および1.7%、‘とよのか’で14.1 および5.6%であり、‘恋みのり’および‘さちのか’では‘とよのか’に対しスレの発生面積割合が小さかつ

た. また, 収穫 11 日目には‘恋みのり’で 6.5 および 3.1%, ‘さちのか’で 8.2 および 2.1%, ‘とよのか’で 19.8 および 6.1%であり, オセの発生面積割合は‘恋みのり’および‘さちのか’で, スレの発生面積割合は‘さちのか’で, ‘とよのか’に対しそれぞれ小さかった. 質量減少率は, 収穫 5 日目には‘恋みのり’で 0.7%, ‘さちのか’で 1.2%, ‘とよのか’で 0.9%, 収穫 11 日目には‘恋みのり’で 1.7%, ‘さちのか’で 2.8%, ‘とよのか’で 2.3%であり, いずれも‘恋みのり’では‘さちのか’に対し小さく, ‘とよのか’はその中間であった (第 1 表).

第 1 表 供試品種における果実硬度, オセ, スレの発生面積割合および質量減少率

	収穫後 日数	恋みのり (n=12) ^z	さちのか (n=12) ^z	とよのか (n=12) ^z
果実硬度 (N)	0	1.54 ± 0.33 a	1.44 ± 0.17 a	0.98 ± 0.20 b
オセの発生面積割合 (%) ^y	0	-	-	-
	5	6.2 ± 4.5 b	6.0 ± 6.8 b	14.1 ± 12.2 ab
	11	6.5 ± 4.1 b	8.2 ± 6.4 b	19.8 ± 9.8 a
スレの発生面積割合 (%) ^y	0	-	-	-
	5	1.3 ± 1.1 b	1.7 ± 0.9 b	5.6 ± 3.2 a
	11	3.1 ± 1.9 ab	2.1 ± 2.0 b	6.1 ± 3.5 a
質量減少率 (%) ^y	0	-	-	-
	5	0.7 ± 0.2 e	1.2 ± 0.5 cd	0.9 ± 0.3 de
	11	1.7 ± 0.3 bc	2.8 ± 0.7 a	2.3 ± 0.5 ab

^z 数値は平均±標準誤差を示す. 異なる英小文字間には Tukey の HSD 検定で有意水準 5% で有意差があることを示す.

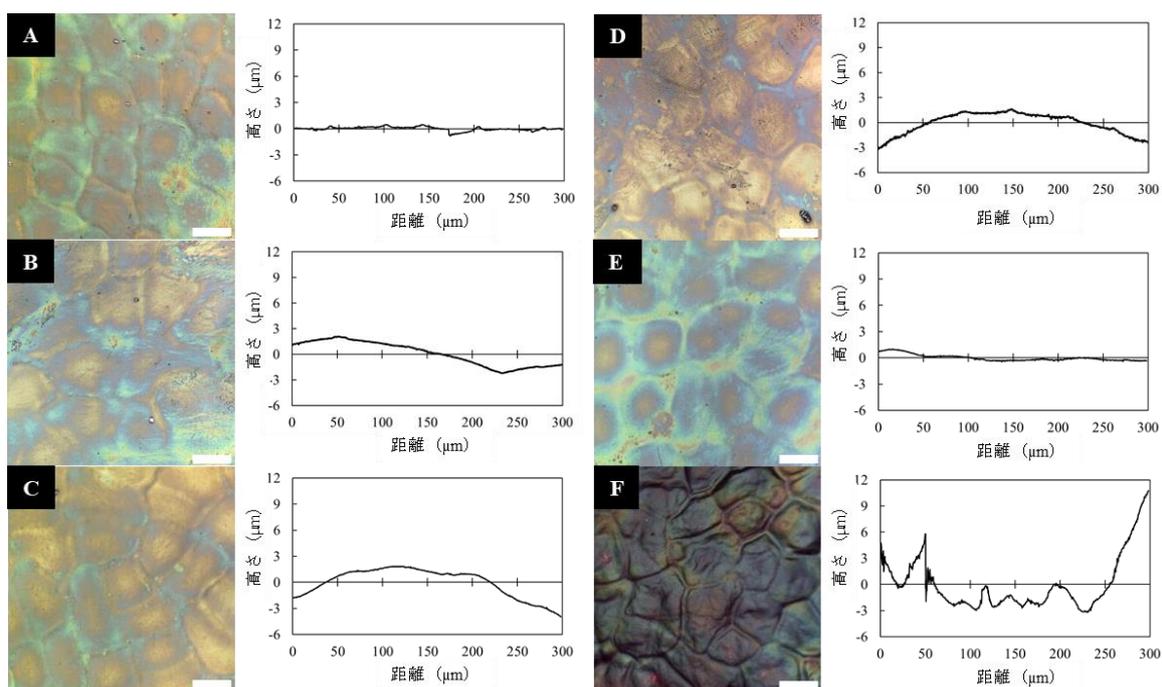
^y オセ, スレの発生面積割合および果実の質量減少率は, 角変換後に分散分析を行った.

果実表面の顕微鏡観察では, 収穫 11 日目に, すべての供試品種のスレの発生箇所において, 細かく複雑な皺が観察された. 皺の向きは, 一方向または多方向であった. この皺は収穫後 5 および 11 日目のオセの発生箇所や, 収穫後 0, 5 および 11 日目の無傷の箇所では観察されなかった (第 2~4 図).

表面粗さ (R_z) は, ‘恋みのり’では‘さちのか’および‘とよのか’に対し小さかった. また, スレの発生箇所では, スレが発生しなかった箇所, すなわち無傷の箇所およびオセの発生箇所に対し大きかった. さらに, 品種およびスレの発生の交互作用が認められた. 一方, 収穫後日数, オセの発生およびその他の交互作用による影響は認められなかった. 算術平均粗さ (R_a) は, スレの発生箇所では, スレが発生しなかった箇所, すなわち無傷の箇所およびオセの発生箇所に対し大きかった. 一方, 品種, 収穫後日数, オセの発

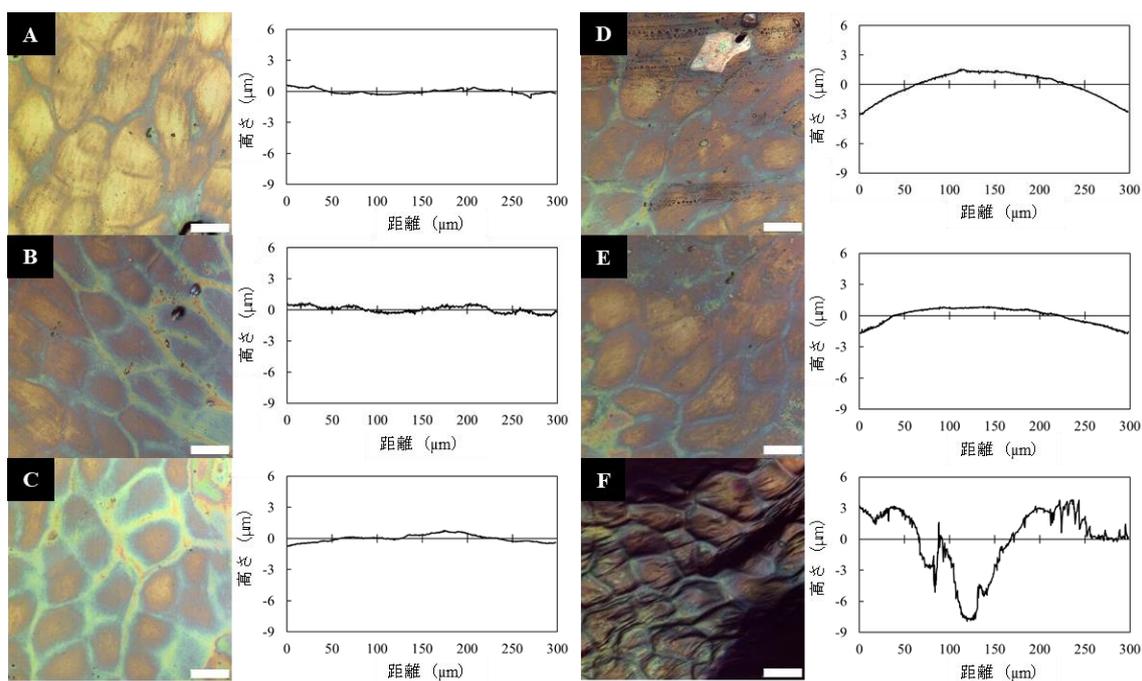
生およびそれらの交互作用による影響は認められなかった（第2表）。

二次元画像での果皮細胞の面積は、‘さちのか’では‘恋みのり’および‘とよのか’に対し小さかった。また、スレの発生箇所では、スレが発生しなかった箇所、すなわち無傷の箇所およびオセの発生箇所に対し小さかった。一方、収穫後日数、オセの発生およびそれらの交互作用による影響は認められなかった（第3表）。



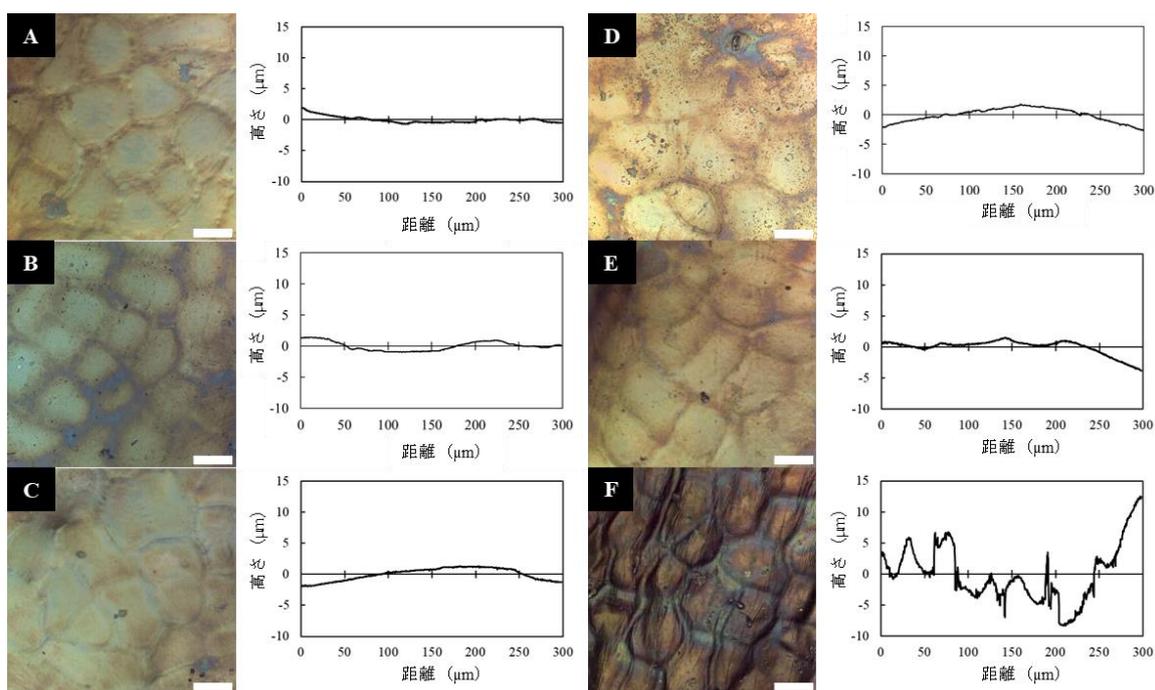
第2図 ‘恋みのり’における果実表面のレーザー顕微鏡写真

A：収穫0日目における無傷の箇所， B：収穫5日目における無傷の箇所， C：収穫5日目におけるオセの発生箇所， D：収穫11日目における無傷の箇所， E：収穫11日目におけるオセの発生箇所， F：収穫11日目におけるスレの発生箇所；図中の白いスケールバーは50 μm を示す



第3図 ‘さちのか’における果実表面のレーザー顕微鏡写真

A：収穫0日目における無傷の箇所， B：収穫5日目における無傷の箇所， C：収穫5日目におけるオセの発生箇所， D：収穫11日目における無傷の箇所， E：収穫11日目におけるオセの発生箇所， F：収穫11日目におけるスレの発生箇所；図中の白いスケールバーは50 μm を示す



第4図 ‘とよのか’における果実表面のレーザー顕微鏡写真

A：収穫0日目における無傷の箇所， B：収穫5日目における無傷の箇所， C：収穫5日目におけるオセの発生箇所， D：収穫11日目における無傷の箇所， E：収穫11日目におけるオセの発生箇所， F：収穫11日目におけるスレの発生箇所；図中の白いスケールバーは50 μm を示す

第2表 供試品種における果実表面の表面粗さおよび算術平均粗さ

要因		表面粗さ (R_z) ^z (μm)	算術平均粗さ (R_a) ^z (μm)
品種 (A) ^y	恋みのり	1.06 ± 0.11 b	1.23 ± 0.12
	さちのか	1.39 ± 0.20 a	1.45 ± 0.18
	とよのか	1.41 ± 0.21 a	1.31 ± 0.15
収穫後日数(B)	0	0.76 ± 0.04	0.62 ± 0.09
	5	0.71 ± 0.04	0.89 ± 0.07
	11	1.84 ± 0.19	1.86 ± 0.15
オセの発生(C)	有	0.78 ± 0.04	1.04 ± 0.06
	無	1.53 ± 0.15	1.47 ± 0.13
スレの発生(D) ^x	有	3.83 ± 0.40 a	3.47 ± 0.31 a
	無	0.78 ± 0.03 b	0.90 ± 0.04 b
交互作用(A×D) ^x	恋みのり × スレ有	2.73 ± 0.39 b	-
	恋みのり × スレ無	0.76 ± 0.05 c	-
	さちのか × スレ有	4.57 ± 0.67 a	-
	さちのか × スレ無	0.76 ± 0.05 c	-
	とよのか × スレ有	4.18 ± 0.82 a	-
	とよのか × スレ無	0.80 ± 0.06 c	-
三元配置分散分析 ^w			
	A	**	NS
	B	NS	NS
	C	NS	NS
	D	**	**
	A × B	NS	NS
	A × C	NS	NS
	A × D	**	NS
	B × C	NS	NS
	B × D	NS	NS
	A × B × C	NS	NS
	A × B × D	NS	NS

^z数値は平均±標準誤差を示す.

^y異なる英小文字間には Tukey の HSD 検定で有意水準 5% で有意差があることを示す.

^x異なる英小文字間には t 検定で有意水準 5% で有意差があることを示す.

^w**は 1% 水準で有意であることを, NS は有意でないことを示す.

第3表 供試品種における果実表面の細胞面積

要因		細胞面積 (μm^2) ^z
品種 (A) ^y	恋みのり	4212 ± 80 a
	さちのか	3810 ± 95 b
	とよのか	4305 ± 89 a
収穫後日数(B)	0	4198 ± 120
	5	4005 ± 77
	11	4149 ± 83
オセの発生(C)	有	4172 ± 84
	無	4078 ± 67
スレの発生(D) ^x	有	3578 ± 148 b
	無	4215 ± 53 a
三元配置分散分析 ^w		
	A	**
	B	NS
	C	NS
	D	**
	A × B	NS
	A × C	NS
	A × D	NS
	B × C	NS
	B × D	NS
	A × B × C	NS
	A × B × D	NS

^z 数値は平均±標準誤差を示す。

^y 異なる英小文字間には Tukey の HSD 検定で有意水準 5% で有意差があることを示す。

^x 異なる英小文字間には t 検定で有意水準 5% で有意差があることを示す。

^w **は有意水準 1% で有意であることを、NS は有意でないことを示す。

考察

オセおよびスレが発生したイチゴ果実表面の3次元微細構造を観察した結果、品種を問わず、スレの発生箇所では、表面構造に特徴的な変化が生じていることが明らかになった。すなわち、スレの発生箇所である果実表面では、無傷の箇所とは異なる、微細な皺からなる凹凸が生じていた(第2~4図)。通常、表面の凹凸は表面粗さ(Rz)および算術平均粗さ(Ra)などの指標を用いて評価され(吉田, 2012)、スレの発生に伴う凹凸の変化は、表面粗さおよび算術平均粗さのいずれにおいても評価可能であった(第2表)。また、スレ

の発生箇所では細胞面積が減少していた（第3表）。一方、顕微鏡観察した限りでは、スレの発生箇所に果皮細胞の破裂や分離は認められず、イチゴ果実の細胞は外力を受けても破裂しにくいとした Harker ら（2000）の報告を支持するものであった。以上を総合すると、スレとは、果皮と他の物体との間に発生した摩擦力により、果皮表面の細胞を、果皮と垂直および水平方向の両方向に変形させたものであると結論することができる。スレの発生を抑制するためには、果実表面のごく浅い範囲の細胞の変形を防ぐ必要がある。収穫後処理により果実表面を被覆、保護し滑らかにする、包装や輸送方法の改善により果実と他の物体との間の接触程度を低減するなどの対策は、いずれも果実と他の物体との間に生じる摩擦力を低減し、変形を抑制できる可能性がある。同時に、育種的手法により果実表面の細胞の物性を改善し、変形しづらい性質を付与できれば、スレの発生をより効果的に抑制できる可能性がある。ただし、イチゴ果実の表面の細胞は、非常に大きいとともに細胞壁が薄く（Szczesniak・Smith, 1969）、物理的強度に乏しい。スレが発生しにくいイチゴの育種に先だって、果皮細胞が小さい、あるいは細胞壁が厚く強靱な遺伝資源の探索が必要であると考えられる。

オセの発生箇所においては、スレの発生箇所を観察された皺は認められなかった。表面粗さおよび算術平均粗さ、果皮細胞の面積からは、オセの発生箇所と無傷の箇所との間に差異はいずれも認められず、イチゴ果実においてオセの発生は果実表面の形態変化を伴わないことが示された。スレが微視的には果実表面の細胞の変形による微細な皺であったのに対し、オセの傷害は果実表面とは異なる部位に生じるものと考えられる。

第3節 オセ発生果実の内部構造

前節で行った果実表面の顕微鏡観察により、スレの発生範囲および形態学的特徴が明らかになったが、オセの発生範囲および形態学的特徴は明らかにすることができなかった。イチゴ果実は表面の果皮と瘦果に加え、内部の皮層（以下果肉という）や維管束帯、中心部の髓部から構成される（Darrow, 1966；門馬ら, 1977）。そこで、本節では果実内部における形態変化の有無を調査した。

材料および方法

実験には、国立研究開発法人農業・食品産業技術総合研究機構西日本農業研究センター（香川県善通寺市）の農 PO を展張したパイプハウスで栽培した‘とよのか’、‘さちのか’

および‘恋みのり’の果実を供試した。2020年2月6日に20~30 gの完熟した果実を収穫し、明らかな損傷がないことを目視で確認後、ただちに実験室に移し、宙吊り型容器（ゆりかごCタイプ、大石産業（株））に入れ、4°Cで保管した。

収穫後0, 6, 12日目に品種当たり24個の果実を取り出し、12個ずつ無作為に以下の2群に分けた。まず、一方の群（以下、オセ区）で、万能試験機（MCT-2150, (株) エー・アンド・デイ）を用いて果実表面に加圧処理を行い、オセを発生させた。プランジャーは先端直径15 mmの円柱型、ロードセルは500 Nとした。加圧位置は果実おもて面の赤道部とし、加圧速度は100 mm・min⁻¹とした。また、プランジャーの先端にかかる力は7 Nとした。これは、予備試験の結果、イチゴ果実に20 N以上の力をかけるとほとんどが塑性変形し、崩壊したが、10 N以下の力では大半が弾性変形し、7 N以下の力では、塑性変形や崩壊、変色がまったく生じず、オセの発生が観察されたためである（データ省略）。残る一群（以下、無処理区）では、加圧処理は行わなかった。

両群の果実は、赤道部を鋭利なカミソリで果径方向に切断した。その後、果実断面の果肉および髓部を、405 nmの波長のレーザーを搭載した共焦点レーザー走査型顕微鏡（Optelics® Hybrid, レーザーテック（株））を用いて観察した。観察位置は、果肉は果皮から果実の中心方向に約4 mm、髓部は維管束帯から果実の中心方向に約4 mmの位置とし、いずれも任意の4視野とした。なお、本研究では、Szczesniak・Smith（1969）に従い、イチゴ果実の維管束帯の内側を髓部と定義した。1視野当たり10細胞の平均面積を測定し、さらに果実ごとの平均面積を算出した。対物レンズは50倍とし、専用ソフトウェア（LMeye7, レーザーテック（株））を用いて水平面の補正を行った。すべての観察は室温19°C、湿度40%の実験室で行った。

結果

果肉および髓部の顕微鏡観察では、収穫後日数および品種を問わず、無傷の供試果実とオセを発生させた供試果実のいずれにおいても、細胞の破裂は観察されなかった。

二次元画像での果肉および髓部の細胞面積は品種により異なり、果肉では‘とよのか’、‘恋みのり’が‘さちのか’に対し大きく、髓部では‘とよのか’が最も大きく、‘さちのか’が最も小さく、‘恋みのり’はその中間であった。また、果肉および髓部では、いずれも品種と収穫後日数との交互作用の影響も有意であった。さらに、果肉では、細胞面積に対する加圧処理の影響が有意であり、加圧処理した区は加圧処理しなかった区に対し

果肉の細胞面積が小さかった。一方、髓部では加圧処理による細胞面積への影響は認められなかった（第4表）。

第4表 供試品種における果肉および髓部の細胞面積

要因	細胞面積 (μm^2) ^z				
		果肉		髓部	
品種 (A)	恋みのり	47394 ± 965	b	42979 ± 1134	c
	さちのか	47533 ± 1324	b	50965 ± 1517	b
	とよのか	58901 ± 1560	a	58829 ± 1370	a
収穫後日数 (B)	0	51702 ± 1284		50939 ± 1732	
	6	48950 ± 1413		49927 ± 1549	
	12	53175 ± 1600		51907 ± 1334	
加圧処理 (C)	有	47802 ± 1079	b	51265 ± 1406	
	無	54749 ± 1194	a	50584 ± 1107	
交互作用 (A × B)	恋みのり × 0	45962 ± 1603	cd	38628 ± 1366	c
	恋みのり × 6	48122 ± 1664	bcd	42898 ± 1746	bc
	恋みのり × 12	48099 ± 1708	bcd	47410 ± 2250	abc
	さちのか × 0	52049 ± 1467	bcd	55468 ± 2942	ab
	さちのか × 6	42919 ± 2743	d	46612 ± 2271	abc
	さちのか × 12	47631 ± 2091	bcd	50816 ± 2296	abc
	とよのか × 0	57096 ± 2744	ab	58720 ± 2608	a
	とよのか × 6	55810 ± 2040	abc	60273 ± 2535	a
	とよのか × 12	63795 ± 2948	a	57494 ± 1870	a
三元配置分散分析 ^y					
	A		**		**
	B		NS		NS
	C		**		NS
	A × B		*		*
	A × C		NS		NS
	B × C		NS		NS
	A × B × C		NS		NS

^z 数値は平均±標準誤差を示す。異なる英小文字間には Tukey の HSD 検定で有意水準 5% で有意差があることを示す。

^y *および**はそれぞれ有意水準 5, 1% で有意であることを, NS は有意でないことを示す。

考察

オセを発生させたイチゴ果実では、髓部ではなく果肉に形態学的変化があらわれることが示された。興味深いことに、オセが発生した果肉細胞は破裂することなく変形しており、オセが発生した組織において細胞が破裂し果汁を放出するという仮説 (Holt・Schoorl,

1982) は否定された。また、変形した果肉細胞は、少なくとも顕微鏡で観察するまでは元の大きさに戻らず、可塑性が認められた。イチゴ果実ではオセはごく軽微な外力によって生じるが (Kohyamaら, 2013), ごく軽微な外力であっても、塑性変形が生じたことは特筆すべきである。イチゴ果実に加圧処理を行った際に得られた荷重 - 変位曲線には、加圧を開始した直後に見かけ上直線的な領域が観察された (データ省略)。金属材料などでは、この領域は弾性領域に相当するが、植物細胞は弾性体と塑性体の混合体であるため (野並, 2001), この領域においても塑性変形が生じたと考えられる。なお、髓部で細胞の変形が生じなかった理由は、髓の外側に存在する管束帯が強固であり、外力が内側に到達するのを阻んだためと考えられる。

以上、前節も踏まえたうえで本節を総合すると、イチゴ果実のオセは、微視的には、外力が果皮を変形させることなく果肉細胞に到達し、果肉細胞を変形させることであるといえる。果肉細胞の変形は品種、収穫後日数にかかわらず観察されたことから、本定義はイチゴにおいてある程度一般的であると考えられる。オセの発生を防ぐための方策としては、外力を果実内部に伝えにくい果皮や、変形しにくい果肉細胞を持つ品種を育成すること、あるいは包装や輸送方法の改善により、果実に作用する外力そのものを低減することが有効であろう。

第4節 適要

レーザー顕微鏡を用いた顕微鏡観察により、イチゴ果実におけるオセおよびスレの発生箇所における形態学的特徴を明らかにした。オセの発生箇所では、果皮には形態学的変化は認められなかったが、果肉細胞の面積が減少しており、オセとは外力が果肉細胞に到達したことによる果肉細胞の圧縮であることが示された。スレの発生箇所では果皮に微細な皺が発生して表面粗さと果皮細胞の面積が増加しており、スレとは外力による果実表面の変形であることが示された。オセの発生を抑制するためには、外力を果実内部に伝えにくい果皮や、圧縮しにくい果肉細胞を持つ品種を育成すること、あるいは包装や輸送方法の改善により、果実に作用する外力そのものを低減することが有効であることが示唆された。スレの発生を抑制するためには、収穫後処理により果皮を滑らかにしたり、包装や輸送方法を改善したりすることで、果実と他の物体との間の摩擦力を低減すること、変形しにくい果皮細胞を持つ品種を育成することが有効であることが示唆された。

第3章 見かけ弾性率を用いたイチゴ育種によるオセの発生抑制

第1節 緒言

前章において、オセおよびスレの発生箇所を調査したところ、スレの発生箇所は、果実表面のごく浅い範囲にあった。この箇所は元来、細胞の層が非常に薄いうえに細胞壁が薄く (Szczesniak・Smith, 1969)、体積当たりの細胞数も少ない。したがって、育種的改良が困難であることが想定される。一方、オセは果肉のいくらかの範囲に発生することが示された。この箇所は果実表面に比べ細胞が小さいものの層が厚く、体積当たりの細胞数が多い。つまり、オセは、スレに比べ育種的改良による発生抑制が有効である可能性がある。現在、損傷発生が少ないイチゴの育種は、オセおよびスレを区別することなく行われているが、オセおよびスレの特徴を考慮すると、オセの発生抑制に注力すべきであると考えられる。そこで、オセ発生を防ぐため、外力を通過させにくい果皮や変形しにくい果肉細胞を持つイチゴの育種方法を検討することとした。

一般的に、イチゴ品種におけるオセやスレの発生しやすさは、果実硬度により評価される。果実硬度は果実に細いプランジャーを貫入させた際の貫入抵抗値として定義され、材料試験機やプッシュプルゲージを用いた貫入試験により簡易に評価することができる (門馬ら, 1977)。「とちおとめ」や「福岡 S6 号」をはじめとする近年の主要イチゴ品種は、いずれも基本的な品種特性として果実硬度が評価されている (石原ら, 1996; 三井ら, 2003)。果実硬度は、貫入に対する果実の破壊されにくさを示す指標であり、果皮における外力の通過させやすさや果肉細胞における変形しやすさを示す指標ではない。すなわち、果皮硬度は、果皮の損傷であるスレの発生しやすさに関与する可能性はあるが、オセの発生しやすさに関与するかは疑問である。実際に、これまでにオセ、スレの発生しやすさと果実硬度との関係性を直接的に調査した研究は見当たらない。オセが発生しにくいイチゴを育種するためには、オセの発生しやすさの評価指標としての果実硬度の有用性の再検討および、その有用性が劣る場合には、果実硬度に代わる新たな評価指標の提案が望まれる。

弾性率 (elastic modulus) は、力学において極めて一般的に用いられる物性値であり、物体の変形しにくさを示す。弾性変形における応力とひずみの比例定数として定義され、貫入抵抗値と同様に貫入試験により評価が可能である。弾性率は、貫入抵抗値とは異なり物体の変形を考慮した物性値であるため、直感的には、オセの発生しやすさの評価指標としてより適すると推測される。ただし、イチゴ果実における弾性率の評価は、ごく一部の事例に限られる (金子ら, 1988; Kohyamaら, 2013)。弾性率を測定するために果肉の一部を

切り出して試験片とする場合、軟らかい果実を正確に切断するなどの前処理に労力がかかるなどの理由から、果実が小さいうえに軟らかく扱いにくいイチゴでは、弾性率の測定がほとんど行われてこなかったようである。

本章では、試験片に前処理を要さない簡易な方法として、無処理のイチゴ果実を用いて見かけ上の弾性率（以下、見かけ弾性率）の測定を試みた。また、オセの発生が少ないイチゴの選抜指標としての有用性を検討することで、見かけ弾性率および果実硬度を用いてオセが発生しにくいイチゴを育種できるかを検討した。

第2節 見かけ弾性率を用いた特性評価

無処理のイチゴ果実に細いプランジャーを貫入させた場合、プランジャーが果皮を貫通する際に高い貫入抵抗が生じる（門馬ら，1977）。この時、プランジャーが果皮に接触してから最大の貫入抵抗を得るまでの移動距離は、品種や果実の貯蔵条件にもよるが、数 mm 程度と小さいことが知られる（望月ら，2001）。プランジャーが果皮に接触してから最大の貫入抵抗を得るまでの領域を弾性領域とみなすと、最大の貫入抵抗および最大の貫入抵抗を得るまでの移動距離から、当領域における見かけ弾性率を算出することができるはずである。本節では、まず、以上の方法で多様な品種、条件下におけるイチゴ果実の見かけ弾性率を測定し、オセの発生しやすさとの関係性を明らかにした。また、貯蔵の有無や収穫時期が異なる条件下において、本指標による果実の物性の差異の検出精度を明らかにし、本指標の利用可能範囲を検討した。さらに、見かけ弾性率が高い育種素材を探索するため、国内外の遺伝資源における見かけ弾性率を評価し、育成地や季性と見かけ弾性率との関係性を明らかにした。

材料および方法

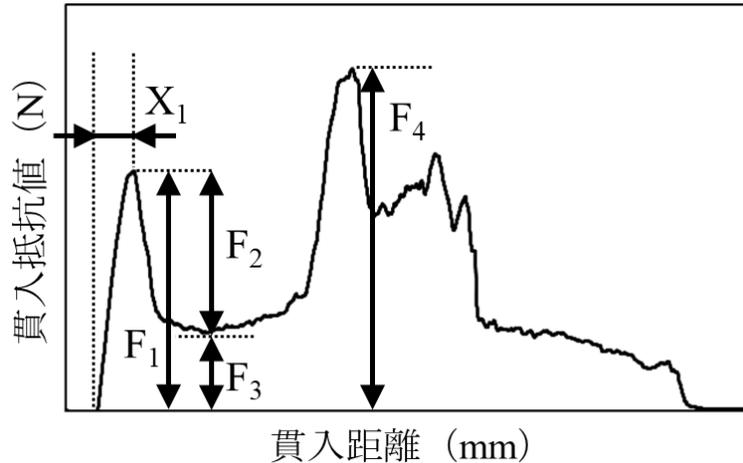
実験1 見かけ弾性率とオセ、スレの発生との関係

試験には、国立研究開発法人農業・食品産業技術総合研究機構（以下農研機構という）九州沖縄農業研究センター筑後・久留米研究拠点（久留米市）の露地で土耕栽培したイチゴ56品種・系統を用いた。2017年4月21日から5月19日にかけて収穫した6g以上の果実から奇形果、病気の出ている果実および明らかな傷みが認められるものを取り除き、完全に着色した正常果および乱形果を供試した。供試果実は収穫後、ただちにオートグラフ（EZ-SX, (株) 島津製作所）および専用ソフトウェア（TRAPEZIUM, (株) 島津製作所）

を用いた貫入試験を行い、果径、果皮硬度、果肉硬度、貫入変形量をそれぞれ測定した。ロードセルは 10 N とした。ロードスピードは門馬ら (1977) に従い $100 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ 、貫入させるプランジャーの直径は 3 mm とした。貫入箇所は果実おもて面の赤道部とし、プランジャーの先端は瘦果を避け果皮部に貫入するようにした。貫入抵抗値は同社の材料試験オペレーションソフトウェア TRAPEZIUM を用いて解析した。果皮貫入後の第 1 のピークを果皮硬度、果肉部を貫通する際のボトムを果肉硬度、次に管束帯および髓を貫通する際の第 2 から 4 のピーク (髓がない果実では 3) のうち最大のものを芯の硬度とした。また、門馬ら (1977) に従い、果皮硬度から果肉硬度を差し引くことで真の果皮硬度を求めたほか、望月ら (2001) に従い、貫入開始から第 1 のピークまでの貫入距離を貫入変形量とした (第 5 図)。さらに、以下の式 (3) により見かけ弾性率を求めた。なお、イチゴ果実は果形にばらつきがあるととも表面も平坦でない。したがって、本研究ではイチゴ果実にプランジャーを貫入した際の応力をひずみで除した値を、弾性率ではなく見かけ弾性率と称した。

$$\text{見かけ弾性率 [MPa]} = (\text{果皮硬度 [N]} / \text{プランジャーの断面積 [mm}^2]) / (\text{貫入変形量 [mm]} / \text{果径 [mm]}) \quad (3)$$

供試果数は、1 品種・系統当たり 6~34 果とした。また、5 月 7 日に 25 品種・系統について、5 月 13 日に 44 品種・系統について、6 g 以上の正常果または乱形果を収穫し、5 月 7 日は 5 月 9 日までに、5 月 13 日は 5 月 16 日までに、農研機構九州沖縄農業研究センターと農研機構野菜花き研究部門 (三重県津市) の間をトラックによる冷蔵宅配便 (ヤマト運輸 (株)) で往復輸送した。以下、5 月 7 日収穫分の輸送を輸送 1、5 月 13 日収穫分の輸送を輸送 2 と呼称する。輸送 1 はホールトレーに、輸送 2 は宙吊り型容器 (ゆりかご C タイプ、大石産業 (株)) に入れ、さらにそれぞれ 2 容器ずつイチゴ用ダンボール箱に入れ、5 箱ずつ PP 製のバンドで結束し、1 梱包とした。なお、宙吊り型容器は、ホールトレーに対し輸送振動をイチゴ果実に伝達しにくく、容器内における果実の回転 (以下玉まわりという) を生じにくいことから (馬場ら, 2012)、スレの発生が少ない容器として使用した。輸送中の衝撃加速度および温度は、ダンボール箱内に設置した輸送振動計 (G-MEN DR-10, (株) スリック) で計測し、専用ソフトウェア (G-TRACE Light, (株) スリック) で解析した。輸送後の果実は、目視により、損傷発生をオセとスレとに分けて果実当たりの発生面積割合として求めた。供試果数は 1 品種・系統当たり、輸送 1 は 4~20 果、輸送 2 は 4~26 果とした。



第5図 果皮硬度，真の果皮硬度，果肉硬度，芯の硬度および貫入変形量の測定
 F₁：果皮硬度，F₂：真の果皮硬度，F₃：果肉硬度，F₄：芯の硬度，X₁：貫入変形量

すべての統計処理は，JMP ver. 8 (SAS) を用いて行った．オセおよびスレの発生面積割合については，角変換後に統計処理を行った．

実験2 貯蔵が見かけ弾性率に及ぼす影響

試験には，農研機構九州沖縄農業研究センター筑後・久留米研究拠点（久留米市）の農POを展張したパイプハウスで促成作型にて土耕栽培した‘さちのか’，‘おいCベリー’，‘恋みのり’および‘とよのか’を用いた．‘さちのか’，‘おいCベリー’，‘恋みのり’は果実硬度が高い品種として，‘とよのか’は果実硬度が低い品種としてそれぞれ用いた．2015年1月16日から2月18日にかけて収穫した6g以上の果実から受精不良が起こっている奇形果，病気の出ている果実および明らかな傷みが認められるものを取り除き，完全に着色した正常果および乱形果を供試した．供試果実は約半数を収穫後直ちに調査した．残る果実は品種別に蓋付きプラスチック容器に入れ，望月ら（2001）に従い15°Cに設定した恒温庫で6日間貯蔵したのち調査した．貯蔵後に再度果実の外観を確認し，明らかなカビの発生が認められたものは，調査対象から除外した．

調査直前に色彩色差計（CR-13，コニカミノルタ（株））を用いて，CIELab表色系における明度（L*）および色度（a*値，b*値）を果実おもて面中央部および果実裏面中央部で測定し，それぞれについておもて面および裏面の平均値を求め，彩度（ $\sqrt{a^{*2} + b^{*2}}$ ）を算出した．続いて，実験1と同様の手順で果皮硬度，果肉硬度，芯の硬度，貫入変形量および

見かけ弾性率を測定した。また、果実硬度測定後直ちに、送風乾燥機 (SY-120HG, アルプ (株)) を用いて 90°C で約 48 時間, さらに 20°C で約 2 時間乾燥後, 以下の式 (4) により含水率を算出した。

$$\text{含水率 (\%)} = (\text{乾燥前の果実質量 (g)} - \text{乾燥後の果実質量 (g)}) / \text{乾燥前の果実質量 (g)} \times 100 \quad (4)$$

すべての統計処理は, JMP ver. 8 (SAS) を用いて行った。含水率については, 角変換後に統計処理を行った。

実験 3 収穫時期が見かけ弾性率に及ぼす影響

実験 2 と同様に, 試験には, 農研機構九州沖縄農業研究センター筑後・久留米研究拠点のビニルハウスで促成作型にて土耕栽培した ‘さちのか’, ‘おい C ベリー’, ‘恋みのり’ および ‘とよのか’ を用いた。2016 年 2 月 18 日から 3~4 日間隔で 4 月 21 日まで毎週 2 回程度, 全 18 回収穫を行い, 実験 1 と同様の手順で果皮硬度, 果肉硬度, 芯の硬度, 貫入変形量, 見かけ弾性率を測定した。すべての統計処理は, JMP ver. 8 (SAS) を用いて行った。

実験 4 イチゴの遺伝資源コレクションにおける果実の見かけ弾性率

試験には, 農研機構九州沖縄農業研究センター筑後・久留米研究拠点の農 PO を展張したパイプハウスで促成作型にて高設栽培したイチゴ 110 品種・系統を用いた。供試品種・系統のうち一季成り性は 100 品種・系統, 四季成り性は 10 品種, 日本で育成された品種・系統は 100 品種・系統, 海外で育成された品種は 10 品種であった。海外で育成された品種は, いずれも 1980 年代までに日本に導入されたものである。2018 年 12 月 8 日から 2019 年 2 月 28 日にかけて収穫を行い, 実験 1 と同様の手順で見かけ弾性率, 果皮硬度, 果肉硬度, 芯の硬度を測定した。供試果数は 1 品種・系統当たり 4~73 果とした。すべての統計処理は, JMP ver. 8 (SAS) を用いて行った。

結果

実験 1 見かけ弾性率とオセ, スレの発生との関係

供試した品種・系統の見かけ弾性率および各部位の硬度を第 5 表に示す。また, 56 品種・系統の見かけ弾性率と果皮, 果肉硬度との間にはそれぞれ正の相関が認められた ($r=0.61^{**}$, 0.31^{**} , $p<0.01$)。ただし, ‘さしま 1 号’ の果皮硬度は 1.21 N, 果肉硬度は 0.68

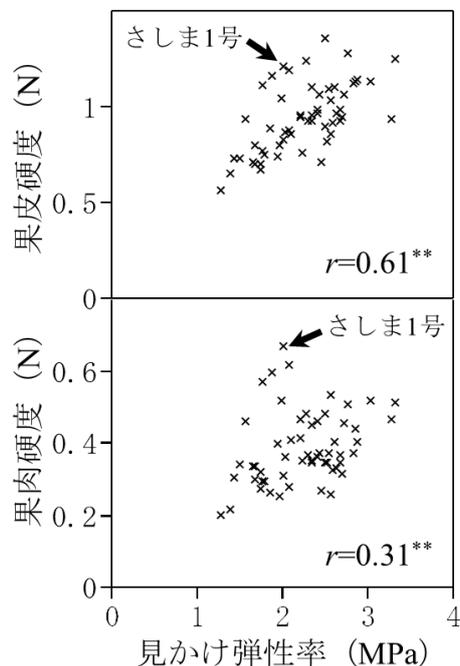
N と 56 供試品種・系統のうちそれぞれ 5 番目, 1 番目に高かったにもかかわらず, 見かけ弾性率 2.00 MPa で 56 供試品種・系統中 37 番目と比較的低かったなど, 見かけ弾性率と果皮, 果肉硬度の傾向が一致しない品種・系統も認められた (第 6 図).

第5表 輸送試験を実施した品種・系統における見かけ弾性率および果皮、果肉硬度

品種・系統 番号	品種・系統	n	見かけ弾性率 (MPa)	果皮硬度 (N)	果肉硬度 (N)
1	とちおとめ ^y	12	3.31	1.26	0.52
2	ゆうか ^z	6	3.26	0.94	0.47
3	熊本 VS03 ^z	14	3.02	1.14	0.52
4	もういっこ ^y	19	2.88	1.15	0.41
5	久留米 67号 ^y	11	2.85	1.14	0.45
6	あすかるビー ^{zy}	15	2.83	1.12	0.37
7	いちご中間母本農 2号 ^z	12	2.75	1.29	0.51
8	いちご中間母本農 1号 ^y	10	2.70	1.07	0.46
9	福岡 S7号 ^y	20	2.69	0.95	0.32
10	島系 22-111 ^{zy}	14	2.67	0.93	0.37
11	みやざきなつはるか ^y	11	2.67	0.99	0.35
12	春訪 ^y	14	2.63	0.97	0.34
13	スイートベビー ^y	17	2.60	1.11	0.41
14	とよのか ^z	15	2.58	0.92	0.33
15	純ベリー ^y	15	2.55	1.04	0.54
16	ビバローザ ^z	7	2.55	0.86	0.26
17	ルビークイーン ^z	19	2.53	1.10	0.38
18	なつあかり ^y	25	2.52	0.83	0.35
19	静紅 ^z	14	2.49	1.36	0.49
20	サマープリンセス ^{zy}	14	2.48	0.91	0.35
21	ニュージャンボ ^y	13	2.44	0.72	0.27
22	さちのか ^z	24	2.42	1.07	0.38
23	あかしゃのみっこ ^y	17	2.40	0.97	0.36
24	スーパージャンボ ^{zy}	14	2.39	0.99	0.47
25	はつくに ^y	24	2.34	1.11	0.46
26	スイートメモリー ^y	19	2.34	0.96	0.35
27	宝交早生 ^y	9	2.32	0.94	0.36
28	麗紅 ^{zy}	22	2.29	0.93	0.37
29	長崎クイーン ^y	14	2.27	1.25	0.49
30	女峰 ^y	19	2.23	0.76	0.35
31	Dover ^{zy}	31	2.20	0.95	0.47
32	砂丘 S2号 ^y	17	2.20	0.96	0.42
33	カレンベリー ^y	12	2.10	0.86	0.42
34	大村朱 ^{zy}	25	2.08	1.20	0.62
35	ひみこ ^z	13	2.07	0.89	0.28
36	夢つづき ^{zy}	26	2.02	0.88	0.37
37	さしま 1号 ^y	21	2.00	1.21	0.68
38	讚紅 ^{zy}	23	2.00	0.84	0.31
39	八千代 ^y	16	1.97	1.05	0.53
40	アマテラス ^z	19	1.96	0.80	0.26
41	ピーストロ ^y	10	1.94	0.75	0.40
42	たかね ^{zy}	18	1.87	1.17	0.60
43	てるのか ^{zy}	11	1.85	0.89	0.27
44	サマードロップ ^y	22	1.77	0.75	0.30
45	ジャンボピュアベリーレッド ^y	34	1.77	1.11	0.57
46	久留米 48号 ^y	48	1.75	0.78	0.30
47	東北 13号 ^z	16	1.74	0.67	0.28
48	盛岡 16号 ^y	12	1.74	0.71	0.32
49	盛岡 18号 ^y	11	1.68	0.80	0.31
50	堀田ワンダー ^{zy}	15	1.67	0.71	0.34
51	久留米 30号 ^y	15	1.64	0.72	0.34
52	湯姫 ^y	7	1.55	0.94	0.46
53	久留米 9号 ^y	12	1.48	0.73	0.34
54	東北 18号 ^y	15	1.43	0.73	0.31
55	紅露 ^{zy}	16	1.37	0.66	0.22
56	東北 14号 ^z	13	1.26	0.57	0.20

^z輸送1の供試品種・系統

^y輸送2の供試品種・系統



第6図 見かけ弾性率と果皮硬度，果肉硬度との相関関係

図中の**は，有意水準1%で相関が有意であることを示す

輸送中の温度は，輸送1では2～12℃，輸送2では4～14℃程度であり，輸送2の方がわずかに高温で推移したものの，衝撃加速度は両輸送ともに最大14 G程度であった。したがって，輸送1，2における振動条件の差異は，主に使用した容器の違いに起因すると考えられた。

輸送1，2における輸送後の損傷発生を第6，7表に示す。輸送後における玉まわりの発生は輸送1で多く，輸送2では少ない傾向にあった（データ省略）。オセの発生面積割合は，輸送1では1.0～58.5%（角変換後：0.098～0.871），輸送2は4.8～80.8%（角変換後：0.221～1.117）であった。スレの発生面積割合は，輸送1では0.3～18.8%（角変換後：0.052～0.448），輸送2では0.0～5.2%（角変換後：0.000～0.230）であった。宙吊り型容器を利用した輸送2では，ホールトレーを利用した輸送1に対し，スレの発生が少ない傾向にあった一方で，輸送1，2共にオセ，スレの発生面積割合には幅広い品種・系統間差異が認められた（ $p < 0.01$ ）。

第6表 輸送1における供試品種・系統の損傷発生面積割合

品種・系統 番号	品種・系統	n	発生面積割合 (%)	
			オセ	スレ
35 ^z	ひみこ	5	58.5	8.5
24	スーパージャンボ	4	57.5	6.3
56	東北14号	9	54.4	2.7
55	紅露	16	44.1	5.2
43	てるのか	7	43.6	6.1
6	あすかるビー	8	40.0	8.1
47	東北13号	4	39.4	18.8
10	島系22-111	7	38.9	13.9
40	アマテラス	4	37.5	8.9
50	堀田ワンダー	4	35.1	5.0
3	熊本VS03	7	34.3	6.4
42	たかね	9	28.6	0.7
38	讚紅	7	27.4	13.2
34	大村朱	20	26.1	2.4
20	サマープリンセス	9	24.2	15
17	ルビークイーン	9	22.9	6.9
16	ビバローザ	4	18.8	5.6
14	とよのか	12	17.0	2.1
31	Dover	8	14.7	1.4
7	いちご中間母本農2号	7	12.5	5.0
28	麗紅	6	11.8	2.2
36	夢つづき	6	11.3	4.2
22	さちのか	5	3.9	0.5
2	ゆうか	4	3.1	4.0
19	静紅	11	1.0	0.3

^z第5表の番号に対応する.

第7表 輸送2における供試品種・系統の損傷発生面積割合

品種・系統 番号	品種・系統	n	発生面積割合 (%)	
			オセ	スレ
49 ²	盛岡 18 号	8	80.8	0.1
43	てるのか	4	79.4	2.3
25	はつくに	8	70.3	3.1
46	久留米 48 号	10	65.9	1.5
45	ジャンボピュアベリーレッド	16	62.6	1.3
5	久留米 67 号	11	60.1	2.9
55	紅露	14	56.4	0.9
12	春訪	6	52.8	1.3
54	東北 18 号	8	50.5	5.2
48	盛岡 16 号	9	50.4	2.3
24	スーパージャンボ	5	49.0	3.0
15	純ベリー	5	47.5	0.5
30	女峰	5	46.0	3.0
44	サマードロップ	6	45.8	0.4
34	大村朱	10	45.8	0.8
50	堀田ワンダー	15	45.1	2.4
41	ピーストロ	6	44.8	0.4
18	なつあかり	6	42.9	3.9
31	Dover	24	40.2	2.2
8	いちご中間母本農 1 号	5	40.0	2.5
38	讚紅	10	37.5	0.7
52	湯姫	5	36.5	3.0
11	みやぎきなつはるか	10	36.3	1.0
4	もういっこ	16	29.4	2.2
6	あすかるビー	8	28.9	0.9
9	福岡 S7 号	11	28.8	3.6
51	久留米 30 号	8	27.9	0.6
21	ニュージャンボ	5	26.6	1.1
39	八千代	8	25.8	0.4
36	夢つづき	17	25.1	1.0
42	たかね	8	24.6	0.0
1	とちおとめ	5	20.3	0.0
32	砂丘 S2 号	16	19.3	0.8
53	久留米 9 号	9	19.2	1.6
33	カレンベリー	5	18.4	1.8
26	スイートメモリー	10	18.1	1.8
27	宝交早生	6	13.3	0.0
20	サマープリンセス	6	13.2	0.6
23	あかしゃのみつこ	7	12.6	0.0
13	スイートベビー	6	11.3	0.4
28	麗紅	26	7.0	0.4
37	さしま 1 号	7	6.7	0.7
10	島系 22-111	8	5.5	1.9
29	長崎クイーン	7	4.8	0.4

²第5表の番号に対応する.

見かけ弾性率および果皮、果肉硬度と、オセ、スレ発生面積割合との関係性を第 8 表に示す。輸送 1 では、見かけ弾性率は果皮硬度と同様に、オセ発生面積割合との間に負の相関を示した ($r = -0.51^{**} \sim -0.47^{**}$, $p \leq 0.01$)。しかしながら、見かけ弾性率は果皮、果肉硬度とは異なり、スレ発生面積割合との間には相関を示さなかった。また、輸送 2 では、見かけ弾性率はオセ発生面積割合との間に負の相関を示したが ($r = -0.30^*$, $p \leq 0.05$)、スレ発生面積割合との間には相関を示さなかった。一方、果皮、果肉硬度と損傷発生との間には相関は認められなかった。

第 8 表 見かけ弾性率および果皮、果肉硬度と損傷発生との相関係数

変数	輸送 1			輸送 2		
	見かけ弾性率	果皮硬度	果肉硬度	見かけ弾性率	果皮硬度	果肉硬度
オセ発生面積割合	-0.47*	-0.48*	-0.38	-0.30*	-0.27	-0.21
スレ発生面積割合	-0.00	-0.40*	-0.42*	-0.07	-0.25	-0.21

*および**は、それぞれ有意水準 1, 5% で相関が有意であることを示す。

実験 2 貯蔵が見かけ弾性率に及ぼす影響

供試果実の果実質量、果径、果皮色および含水率を第 9 表に示す。すべての項目において品種間差異が認められ、果実質量および果径は‘とよのか’および‘恋みのり’で大きく、果皮色の貯蔵による果皮色の彩度の変化には品種間差異があり、‘恋みのり’で大きく上昇したが、‘とよのか’では低下した。また、含水率は‘とよのか’および‘恋みのり’で高い傾向にあり、‘とよのか’では貯蔵後にさらに増加した。一方、‘おい C ベリー’では低かった。

調査項目ごとに品種および貯蔵を要因とした二元分散分析の結果、各部位の硬度と同様に、見かけ弾性率および貫入変形量は品種および貯蔵の影響が見られた。また、見かけ弾性率、貫入変形量、果皮硬度および真の果皮硬度においては、品種と貯蔵の交互作用も有意であった。すなわち、見かけ弾性率および各部位の硬度には品種間差異があること、貯蔵により変化するとともに一部では変化程度にも品種の違いが影響することが明らかになった。したがって、それぞれの品種間差異および貯蔵による変化について以下に詳しく検討することとした。

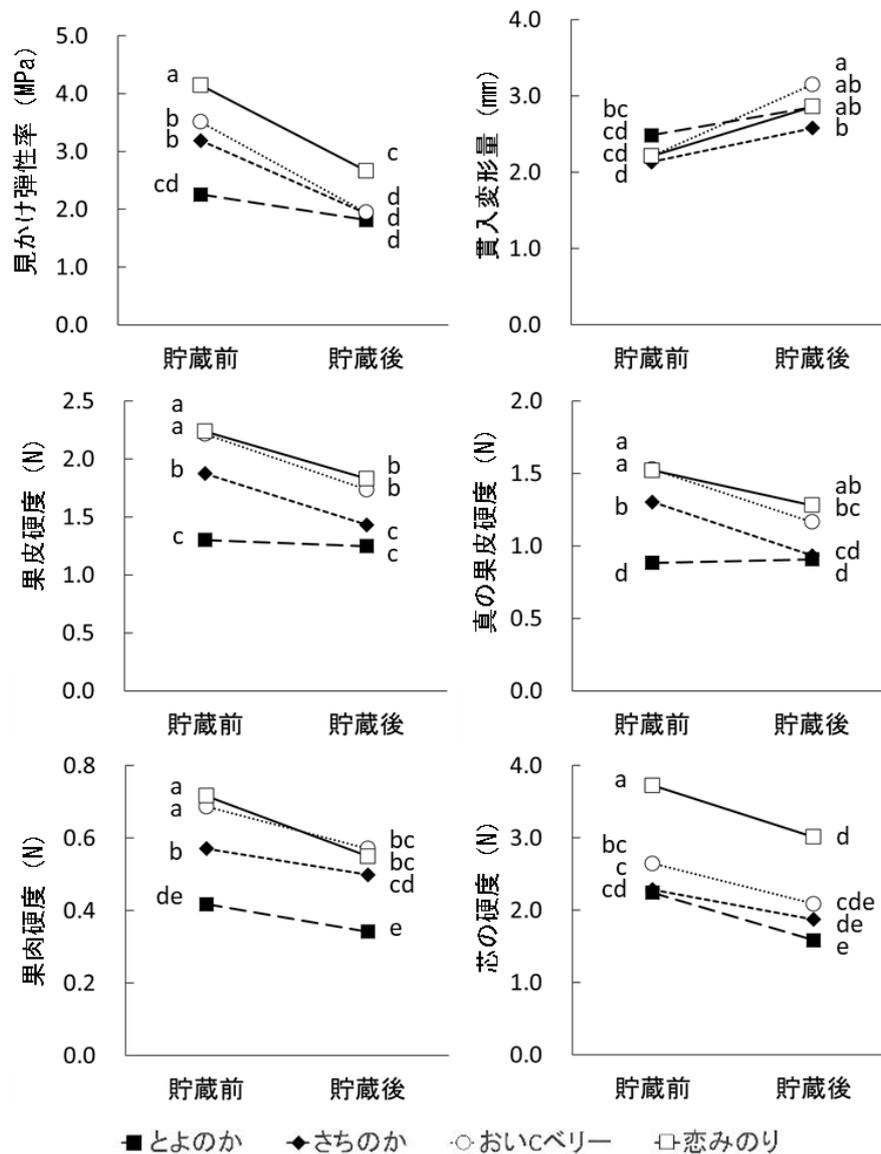
供試品種別に貯蔵に伴う見かけ弾性率、貫入変形量および各部位の硬度の変化を検討し

たところ、見かけ弾性率は、貯蔵前は‘恋みのり’で最も高く、‘おい C ベリー’および‘さちのか’、‘とよのか’の順となった（第7図）。貯蔵後は‘とよのか’を除くすべての品種で低下したが、‘恋みのり’では他の品種に比べ高く維持されていた。貫入変形量は、貯蔵前には‘とよのか’で大きく、‘さちのか’で小さく、貯蔵後では‘とよのか’を除くすべての品種において増加した。一方、芯を除くすべての部位において、貯蔵前の硬度は‘恋みのり’と‘おい C ベリー’で高く、次いで‘さちのか’、‘とよのか’で最も低くなった。貯蔵後は低下したが、概ね果実硬度はこの順序のままであった。

第9表 イチゴ果実の貯蔵による果重、果皮色および含水率の変化

品種	n	果重 (g) ^z	果径 (mm) ^z	果皮色		含水率 (%) ^z
				明度 ^z	彩度 ^z	
とよのか	貯蔵前	75	15.9 ab	33.7 a	43.1 ab 42.0 bc	88.4 b
	貯蔵後	46	16.9 ab	34.6 a	44.8 a 40.4 c	89.5 a
さちのか	貯蔵前	157	12.2 c	30.0 b	39.4 ab 43.1 ab	86.9 d
	貯蔵後	108	12.2 c	30.0 b	36.6 b 44.7 a	87.3 cd
おい C ベリー	貯蔵前	67	12.6 bcc	30.2 b	40.0 ab 40.2 c	84.8 e
	貯蔵後	53	12.1 bcc	29.3 b	36.3 b 41.5 bc	84.9 e
恋みのり	貯蔵前	87	18.3 a	35.9 a	44.2 a 40.3 c	87.8 bc
	貯蔵後	41	17.9 a	35.3 a	42.8 ab 43.6 ab	87.4 bcd

^z異なる英小文字間には Tukey の HSD 検定で有意水準 1% で有意差があることを示す。含水率については、角変換後に統計処理を行った。



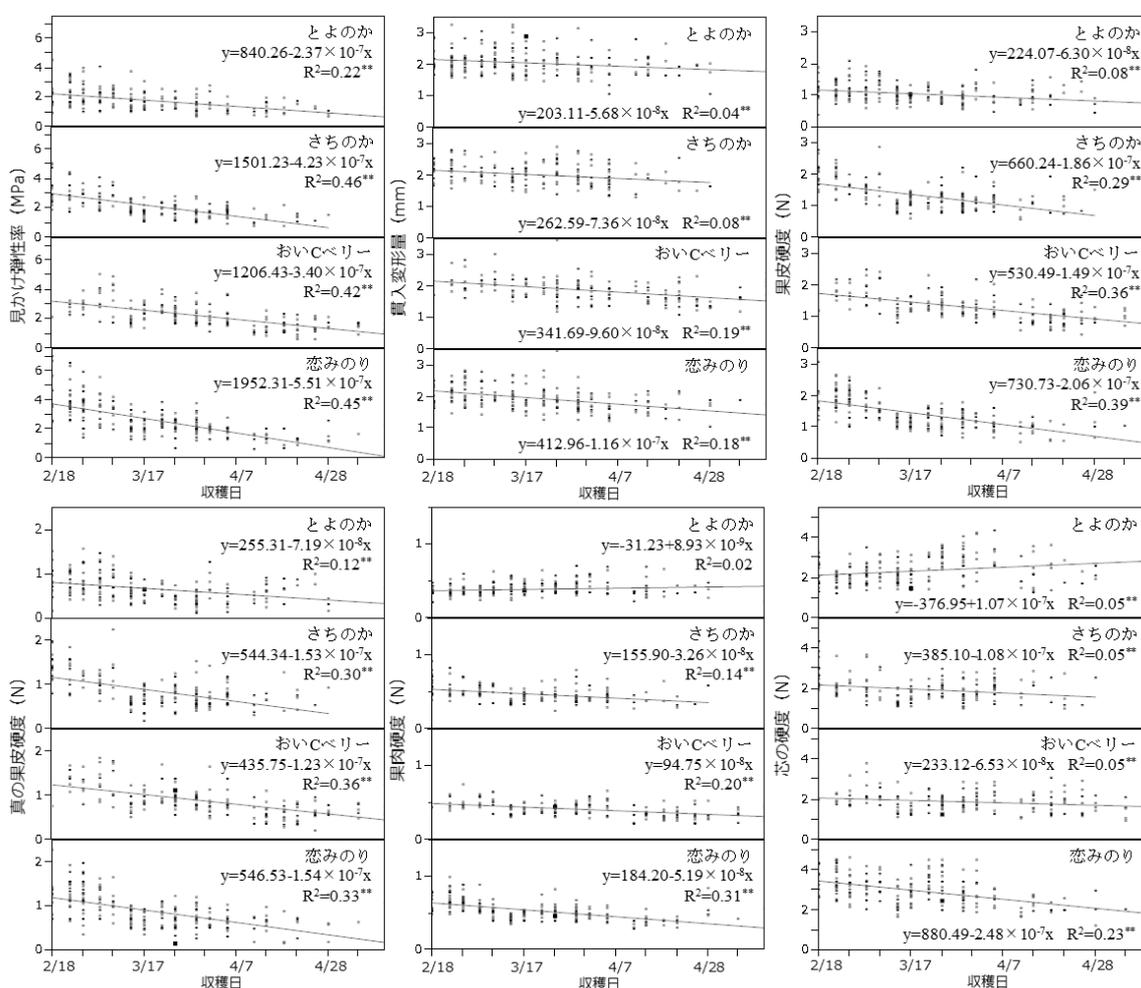
第7図 供試品種における見かけ弾性率，貫入変形量および各部位別硬度の貯蔵に伴う変化

異なる英小文字間には Tukey の HSD 検定で有意水準 1% で有意差があることを示す

実験3 収穫時期が見かけ弾性率に及ぼす影響

収穫日（2月18日をゼロとし，そこからの日数）を説明変数に見かけ弾性率，貫入変形量，各部位の硬度を被説明変数として一次回帰を行った場合の，回帰式，決定係数を第8図に示す．見かけ弾性率，果皮硬度，真の果皮硬度および芯の硬度はすべての品種において収穫日により変化した．貫入変形量および果肉硬度は，一部の品種において，収穫日に

より変化した。見かけ弾性率，貫入変形量および各部位の硬度はいずれも収穫日が進むにつれ低下する傾向を示した。そこで，異なる時期に見かけ弾性率を用いてイチゴの選抜を行うことを想定し，供試した 4 品種間について，収穫月別に見かけ弾性率や各部位の硬度における品種間差異の有無を検討した。その結果，見かけ弾性率および果皮，真の果皮および果肉硬度における品種間差異はいずれも 2，3 月には認められたが，4 月には品種間差異が認められなくなった。なお，貫入変形量については 3，4 月に，芯の硬度は 2～4 月のすべてにおいて品種間差異が認められた（第 10 表）。



第 8 図 収穫日と見かけ弾性率，貫入変形量，各部位の硬度との関係およびそれらの回帰式，決定係数

図中の**，*はそれぞれ有意水準 1%，5%で有意であることを示す

第 10 表 貫入試験で得られた測定値の収穫月別品種間差異

調査項目	2月	3月	4月
見かけ弾性率	**	**	NS
貫入変形量	NS	**	**
果皮硬度	**	**	NS
真の果皮硬度	**	**	NS
果肉硬度	**	**	NS
芯の硬度	**	**	*

** , *および NS はそれぞれ有意水準 1%, 5% で供試品種間に有意差があることおよびないことを示す。

実験 4 イチゴの遺伝資源コレクションにおける果実の見かけ弾性率

供試した品種・系統の見かけ弾性率および各部位の硬度を第 11 表に示す。供試した品種・系統における見かけ弾性率は 0.47~6.85 MPa で大きな幅があった。見かけ弾性率が最も高かったのは‘恋みのり’であり、最も低かったのは久留米 17 号であった。日本で育成された品種・系統や四季成り性品種・系統は、海外で育成された品種や一季成り性品種・系統に対し見かけ弾性率がそれぞれ高かった。また、日本で育成された品種・系統は海外で育成された品種に対し果皮、果肉および芯の硬度が、一季成り性品種・系統は四季成り性品種・系統に対し芯の硬度が、それぞれ高かった。

第 11 表 イチゴの遺伝資源コレクションにおける果実の見かけ弾性率および果皮、果肉、芯の硬度

品種・系統	季成性	育 成 地	n	見かけ 弾性率 (MPa)	果皮 硬度 (N)	果肉 硬度 (N)	芯の 硬度 (N)
恋みのり	一季成り	日本	35	5.97	2.44	0.77	3.32
平田いちご	一季成り	日本	18	5.27	2.19	0.60	2.82
久留米 68 号	一季成り	日本	23	5.23	1.89	0.69	5.43
おいCベリー	一季成り	日本	15	4.91	2.48	0.59	3.29
花笠おとめ	一季成り	日本	10	4.64	2.63	0.64	3.03
紅ほっぺ	一季成り	日本	30	4.63	1.64	0.46	3.39
いちご中間母本農 1 号	一季成り	日本	10	4.56	2.12	0.73	3.94
高原の乙女	四季成り	日本	5	4.35	2.16	0.44	4.47
ジャンボピュアベリーレッド	一季成り	日本	23	4.35	2.17	0.58	3.15
久留米 55 号	一季成り	日本	33	4.33	1.82	0.52	2.28
みずのまる	四季成り	日本	13	4.32	2.26	0.65	2.90
久留米 10 号	一季成り	日本	26	4.28	2.13	0.65	2.62
さがほのか	一季成り	日本	24	4.24	1.66	0.48	1.64
スイートベビー	四季成り	日本	11	4.19	1.86	0.55	2.37
Aliso	一季成り	海外	7	4.19	1.94	0.58	3.14
ゆうか	一季成り	日本	17	4.13	1.93	0.47	3.00
甘糖朱	一季成り	日本	8	3.94	1.91	0.55	2.12

第 11 表の続き

品種・系統	季成性	育成地	n	見かけ 弾性率 (MPa)	果皮 硬度 (N)	果肉 硬度 (N)	芯の 硬度 (N)
久留米 67 号	一季成り	日本	40	3.83	1.63	0.63	4.40
レッドパール	一季成り	日本	24	3.80	1.79	0.49	1.75
はるよい	一季成り	日本	14	3.74	2.15	0.59	2.34
ピュアベリー	一季成り	日本	26	3.72	1.45	0.43	2.28
あまえくぼ	一季成り	日本	30	3.70	1.38	0.45	3.36
エバーベリー	四季成り	日本	21	3.60	1.62	0.50	3.03
島系 22-111	一季成り	日本	35	3.55	1.25	0.36	2.61
夏の輝	四季成り	日本	39	3.45	1.69	0.43	2.87
盛岡 20 号	一季成り	日本	8	3.45	1.49	0.48	2.34
あまおとめ	一季成り	日本	26	3.44	1.34	0.45	2.86
なつあかり	四季成り	日本	5	3.43	1.39	0.46	2.55
島系 22-148	一季成り	日本	28	3.43	1.59	0.51	2.41
久留米 49 号	一季成り	日本	10	3.43	1.73	0.50	2.11
こいのか	一季成り	日本	32	3.39	1.59	0.49	2.48
とよのか	一季成り	日本	22	3.34	1.81	0.47	1.62
久留米 37 号	一季成り	日本	9	3.33	1.23	0.33	1.59
Ladette	一季成り	海外	25	3.33	1.59	0.47	2.27
サマーベリー	四季成り	日本	17	3.32	1.47	0.44	3.32
とよひめ	一季成り	日本	21	3.28	1.53	0.45	2.15
とちおとめ	一季成り	日本	21	3.24	1.50	0.56	3.38
麗紅	一季成り	日本	11	3.21	1.43	0.40	2.43
桔梗 5 号	一季成り	日本	20	3.18	1.73	0.49	1.91
福岡 S6 号	一季成り	日本	4	3.14	1.77	0.45	1.66
純ベリー	四季成り	日本	23	3.13	1.91	0.71	2.79
長崎クイーン	一季成り	日本	4	3.11	3.29	1.20	2.57
芳玉	一季成り	日本	16	3.09	1.81	0.50	2.93
女峰	一季成り	日本	13	3.08	1.59	0.49	2.08
みやぎきなつはるか	四季成り	日本	10	3.05	1.43	0.37	4.08
ふさの香	一季成り	日本	4	3.03	1.53	0.45	2.67
ビバローザ	一季成り	日本	41	2.98	1.28	0.31	1.36
さしま 1 号	一季成り	日本	11	2.77	1.96	0.55	3.10
盛岡 16 号	一季成り	日本	27	2.69	1.31	0.46	2.45
PM12	一季成り	日本	22	2.57	1.03	0.36	1.55
春訪	一季成り	日本	8	2.55	1.20	0.32	1.12
スイートチャーミー	四季成り	日本	22	2.53	1.08	0.32	1.46
東北 10 号	一季成り	日本	18	2.47	1.20	0.43	2.05
Sunraku	一季成り	日本	7	2.47	1.40	0.34	2.19
阿賀	一季成り	日本	18	2.43	1.38	0.48	2.54
アイベリー	一季成り	日本	19	2.43	2.06	0.56	1.44
章姫	一季成り	日本	21	2.42	1.17	0.34	1.66
ピーストロ	一季成り	日本	11	2.41	1.14	0.40	1.93
大村朱	一季成り	日本	4	2.37	1.64	0.54	3.06
さちのか	一季成り	日本	6	2.35	1.71	0.47	1.11
ベルルーージュ	一季成り	日本	11	2.34	1.17	0.30	1.94
促成 3 号	一季成り	日本	73	2.30	1.33	0.45	2.53
濃姫	一季成り	日本	17	2.26	1.16	0.40	1.42
アマテラス	一季成り	日本	28	2.25	0.98	0.27	1.18
久留米 9 号	一季成り	日本	6	2.20	1.30	0.32	1.81
久留米 IH1 号	一季成り	日本	24	2.15	0.99	0.33	1.98
久留米 48 号	一季成り	日本	55	2.14	1.08	0.42	1.52
ハートアクア	一季成り	日本	13	2.04	0.90	0.28	1.52
Kurou	一季成り	海外	16	2.04	1.22	0.34	0.98

第 11 表の続き

品種・系統	季成性	育成地	n	見かけ 弾性率 (MPa)	果皮 硬度 (N)	果肉 硬度 (N)	芯の 硬度 (N)
熊本 VS02E	四季成り	日本	20	2.03	1.01	0.40	2.12
宝交早生	一季成り	日本	16	2.03	1.01	0.37	1.57
大和	一季成り	日本	25	2.00	1.15	0.54	1.33
スイートメモリー	一季成り	日本	7	1.96	1.16	0.26	1.73
東北 18 号	一季成り	日本	14	1.88	1.20	0.31	0.86
ニュージャンボ	一季成り	日本	6	1.88	1.51	0.41	1.24
ふじさき	一季成り	日本	28	1.87	0.85	0.28	1.87
Cambridge Prizewinner	一季成り	海外	13	1.86	1.09	0.33	1.17
明宝	一季成り	日本	22	1.85	0.81	0.33	1.27
堀田ワンダー	一季成り	日本	29	1.83	0.61	0.27	2.18
うずしお	一季成り	日本	37	1.82	0.92	0.37	1.14
Florida 693	一季成り	海外	11	1.82	0.96	0.30	0.93
千鶴	一季成り	日本	13	1.82	0.81	0.26	1.21
紅光	一季成り	日本	8	1.81	1.16	0.37	3.08
てるのか	一季成り	日本	33	1.76	0.79	0.28	1.40
冷凍加工育成系統	一季成り	日本	34	1.75	1.19	0.42	1.90
紅雀	一季成り	日本	22	1.70	0.98	0.41	1.29
興津 14 号	一季成り	日本	20	1.68	1.30	0.48	1.90
盛岡 19 号	一季成り	日本	17	1.67	1.10	0.41	2.23
紅姫	一季成り	日本	14	1.67	1.12	0.49	1.46
媛育	一季成り	日本	6	1.66	0.61	0.25	3.18
紅露	一季成り	日本	8	1.65	1.61	0.45	2.86
Belrubi	一季成り	海外	15	1.64	1.00	0.26	1.01
紅富士	一季成り	日本	4	1.60	1.29	0.54	1.64
川人四季	四季成り	日本	19	1.56	0.88	0.29	1.64
東北 8 号	一季成り	日本	8	1.50	0.81	0.37	1.42
北の輝	一季成り	日本	13	1.50	0.96	0.38	1.04
興津 6 号	一季成り	日本	19	1.41	1.03	0.42	2.06
Bemanil	一季成り	海外	8	1.35	0.75	0.30	3.02
湯姫	一季成り	日本	14	1.34	0.98	0.34	1.24
はるのか	一季成り	日本	12	1.32	0.79	0.30	1.14
久留米 103 号	一季成り	日本	37	1.17	0.95	0.36	1.03
筑紫	一季成り	日本	7	1.16	0.81	0.38	1.10
Excelsior	一季成り	海外	21	1.07	0.62	0.25	1.77
Marshall	一季成り	海外	6	0.85	0.54	0.17	1.49
秋香	一季成り	日本	9	0.83	0.42	0.16	1.48
アップルキング	一季成り	日本	7	0.76	0.48	0.19	1.36
久留米 19 号	一季成り	日本	9	0.66	0.40	0.15	0.86
久留米 16 号	一季成り	日本	12	0.64	0.43	0.16	0.78
Blakemore	一季成り	海外	4	0.60	0.37	0.14	0.73
久留米 17 号	一季成り	日本	4	0.48	0.45	0.16	1.02
平均							
	季性	一季成り	100	2.58	1.34	0.42	2.04
		四季成り	11	3.23	1.53	0.46	3.00
	育成地	日本	101	2.74	1.39	0.44	2.20
		海外	10	1.87	1.01	0.31	1.65
Wilcoxon の検定 ^z							
	季性			*	NS	NS	**
	育成地			*	*	**	*

^z **, *および NS はそれぞれ Wilcoxon の検定により有意水準 1%, 5% で有意であることおよびないことを示す。

考察

実験 1 では、イチゴ果実における見かけ弾性率は、果実の損傷発生のうちスレの発生とは関係しないが、使用する容器を問わずオセの発生と関係することが示された。一方、現在、イチゴ果実の損傷発生に関する選抜指標として利用されている果皮、果肉硬度は、ホールトレーによる輸送では、オセ、スレ両方の発生と関係した。見かけ弾性率および果皮、果肉硬度における損傷発生との関係性の差異は、主に 2 つの理由によるものと推察される。1 つめは、オセおよびスレの原因となる力の方向の差異である。見かけ弾性率は果実表面に対し垂直方向の物性値であることから、果実表面に対し水平方向に作用する摩擦力によって生じるスレとは、関係性が弱いと考えられる。2 つめは、オセおよびスレが発生する領域の差異である。材料力学において、弾性率は弾性域における物体の変形しにくさを表す物性値であるのに対し、硬度は物体表面の傷つきにくさなどを表す物性値である。イチゴ果実は内部が不均一であるため、一定以上の応力の影響下では厳密な弾性変形をしないと考えられるものの、自重や微振動からなる微小な応力のみが影響する条件下では、わずかな歪みのみが発生し、弾性域に比較的近い変形をすることが想定される。イチゴ果実における損傷発生機構には不明な点も多いが、以上の考察から、自重に起因するオセ（多々良ら、1999）は主に弾性域で発生するために、見かけ弾性率と強く関係し、弾性域外にも関係する物性値である果皮、果肉硬度とは関係性が弱かったと推察される。なお、宙吊り型容器を用いた輸送 2 では果皮、果肉硬度とオセおよびスレの発生面積割合との間に関係性が認められなかったことから、果皮、果肉硬度は、果実にかかる応力が小さい、あるいは加速度や振動周波数が低いなどの条件下では、オセやスレの発生しやすさとの関係性が弱い可能性がある。現在、オセが少ないイチゴの選抜には果皮、果肉硬度が用いられているが、今後、容器や輸送方法が改良され、果実にかかる応力が減少、あるいは加速度や振動周波数が低下することを想定すれば、見かけ弾性率の利用が推奨されるべきといえる。ただし、近年、容器を改良するうえで、果実を縦置きする包装形態（北澤ら、2008）などが採用される場合がある。本試験で求めた見かけ弾性率は果実の赤道方向の物性値であることから、果実の設置方向が異なる容器では、損傷発生との関係性が変化する可能性があることに注意する必要がある。

オセが少ないイチゴの選抜における見かけ弾性率の利用の可能性が示されたことから、実験 2 および 3 では、見かけ弾性率の利用可能範囲を見極めるため、果実の物性に差異の

あるイチゴ 4 品種について、貯蔵や収穫時期が見かけ弾性率に及ぼす影響を検討した。その結果、まず、実験 2 では、見かけ弾性率においては果実硬度と同様に、貯蔵の有無にかかわらず品種間差異を検出可能であったが、貯蔵による低下程度に品種間差異があるため、‘とよのか’と‘さちのか’、‘おい C ベリー’のように貯蔵前に見かけ弾性率に差異が認められた品種間においても、貯蔵後には差異が認められない場合が見受けられた（第 10 表、第 7 図）。見かけ弾性率を用いてイチゴ果実におけるオセの発生しやすさを評価する場合、果皮、果肉硬度の場合（望月ら、2001）と同様に、収穫直後に測定を行うべきであろう。なお、本実験では、貯蔵前後ともに‘恋みのり’は‘おい C ベリー’と同程度の果皮、果肉硬度であったが、見かけ弾性率は‘おい C ベリー’よりも大きく、見かけ弾性率の品種間差異の検出能力が貯蔵の有無を問わず果皮、果肉硬度よりも高くなる例が示された。また、見かけ弾性率は‘恋みのり’で最も高く、次いで‘おい C ベリー’、‘さちのか’、‘とよのか’の順となったが、果皮色や含水率の順位はこれとは一致せず（第 9 表、第 7 図）、果皮色や含水率といった品種固有の特性は、見かけ弾性率と独立していることが示唆された。

実験 3 では、見かけ弾性率が果皮、果肉硬度や貫入変形量と同様に、収穫時期が進むにつれて低下することが示された（第 8 図）。イチゴ果実の見かけ弾性率を比較する場合、果皮、果肉硬度を比較する場合と同様に、供試材料の収穫時期を揃える必要がある。なお、見かけ弾性率と果皮、果肉硬度のいずれにおいても 4 月以降は品種間差異の検出は困難であった（第 10 表）。一般に促成栽培の収穫終期となる晩春期には、イチゴは高温による影響で果実が著しく軟化し、品種間の比較が困難となる。見かけ弾性率を用いてオセの発生が少ないイチゴを選抜する場合、3 月頃までに選抜を完了する必要があると考えられる。

最後に、実験 4 では、多様なイチゴ遺伝資源の促成栽培条件下における見かけ弾性率を調査し、日本で育成された品種・系統や、四季成り性品種・系統の見かけ弾性率が高い傾向にあることを明らかにした（第 11 表）。1980 年代に行われた試験では、日本で育成されたイチゴ品種は、海外で育成されたイチゴ品種に対し軟らかいことが指摘されていた（森下、1994）。一方、本試験において当時導入された海外品種と現在の日本の育成品種を比較した場合、見かけ弾性率だけでなく、果皮や果肉、芯の硬度の点からも、当時の海外品種が有していた果実の硬さは既に失われていることが示唆された。これまで、イチゴ果実の物理的性質を改善する上では海外の育成品種が良い育種素材となると考えられてきたが（森下、1994）、今後は、‘恋みのり’を始めとする日本の育成品種・系統が育種素材にな

り得ると考えられる。なお、果実の見かけ弾性率は四季成り性イチゴ品種・系統においても高いことが認められたことから、現在日本において一般的にイチゴ育種に用いられる、一季成り性品種・系統のほかに、四季成り性品種・系統も育種素材として利用できることが示唆された。日本では寒冷地や民間企業を中心に独自の四季成り性品種の育種が行われており、毎年いくつかの新品種が公表されている。これらの新品種も、今後、物理的損傷の発生が少ないイチゴの育種素材候補となる可能性があるといえる。

第3節 見かけ弾性率の遺伝特性の評価

果実特性の評価指標を育種上の選抜指標として利用するためには、利用する指標の遺伝率が十分に高い必要がある。また、同時に利用する他の選抜指標の形質との間の相関は正である必要があり、なおかつ高すぎない方が、選抜指標を併用する意義が高まるため望ましい。これまでに、果皮、果肉硬度については、門馬・上村（1985）や森（2000）、佐藤・山川（1989）により、遺伝率、選抜反応や他形質との相関が報告されている。しかしながら、見かけ弾性率に関して遺伝的な解析を行った例はなく、遺伝特性および選抜指標としての実用性は未知である。そこで、本節では、イチゴ育種において見かけ弾性率を選抜指標として利用できるか検討を進めるため、見かけ弾性率の遺伝特性を明らかにした。

材料および方法

試験には、‘恋みのり’、‘おい C ベリー’、‘かおり野’および‘紅ほっぺ’を用いた。2017年春に4品種の総当たり交配を行い、得られたF₁およびS₁実生16組合せの種子を5月23日に播種した。6月中旬に育苗用セル成型トレーに鉢上げして育苗し、9月20日～22日に1組合せ当たり6～115個体、平均69個体を農研機構九州沖縄農業研究センター筑後・久留米研究拠点の農POを展張したパイプハウス内の高設栽培槽に定植した。また、交配親とした品種は、6月中旬にトレー（24穴空中ポットレストレー、（株）阪中緑化資材）にランナーを採苗し、育苗したのち、1品種当たり6株を9月22日に実生と同様に定植した。株間は15 cmとし、2条植えとした。2018年2月14日～4月30日に完全着色となった6 g以上の正常果または乱形果を収穫し、第2節と同様の方法で果重、果径、果皮硬度、果肉硬度、貫入変形量をそれぞれ測定するとともに、見かけ弾性率を算出した。供試果数は、実生、交配親共に、1個体当たり3～14果とした。見かけ弾性率および果皮、果肉硬度について、子房親と花粉親を要因とした分散分析を行うと同時に、実生集団と両親との分散の

比較にもとづき、広義の遺伝力 H^2 および表現型相関 r_p を、森下（1994）に従い次式（5，6）により求めた。

$$H^2 = \{V_{F1} - (V_{P1} + V_{P2}) / 2\} / V_{F1} \quad (5)$$

$$r_p = W_{F1AB} / \sqrt{V_{F1A} \times V_{F1B}} \quad (6)$$

ただし、 V_{F1} は F_1 または S_1 における表現型分散、 V_{P1} 、 V_{P2} は親個体における表現型分散、 W_{F1AB} は F_1 または S_1 における A、B 両形質間の表現型分散、 V_{F1A} 、 V_{F1B} は F_1 または S_1 における A、B 形質の表現型分散を表す。同様に、表現型分散の子房親間成分 σ_f^2 、花粉親間成分 σ_m^2 、交互作用成分 σ_{fm}^2 、相加的遺伝分散 σ_A^2 および優性分散 σ_D^2 を、森（2000）に従い次式（7，8，9，10，11）により求めた。

$$\sigma_f^2 = (MS_1 - MS_3) / rm \quad (7)$$

$$\sigma_m^2 = (MS_2 - MS_3) / rf \quad (8)$$

$$\sigma_{fm}^2 = (MS_3 - MS_4) / r \quad (9)$$

$$\sigma_A^2 = 2 (\sigma_f^2 + \sigma_m^2) \quad (10)$$

$$\sigma_D^2 = 4 (\sigma_{fm}^2) \quad (11)$$

ただし、 MS_1 、 MS_2 、 MS_3 および MS_4 はそれぞれ分散分析から得た子房親間、花粉親間、交互作用および残差の平均平方を、 r 、 f および m は反復数、子房親数および花粉親数を示す。すべての統計処理は、JMP ver. 8 (SAS) を用いて行った。

結果

供試品種における見かけ弾性率および果皮、果肉硬度を第 12 表に示す。見かけ弾性率は‘恋みのり’で高く、他の品種で低かった。また、果皮硬度は‘恋みのり’および‘おい C ベリー’で、果肉硬度は‘恋みのり’、‘おい C ベリー’および‘かおり野’で高かった。供試実生個体における見かけ弾性率および果皮、果肉硬度別の頻度分布を第 9，10，11 図に示す。供試実生個体における見かけ弾性率は、果皮、果肉硬度と同様に、多くの交配組合せにおいて、両親の中間より低い方に偏り、単峰型に近い連続的な頻度分布を示した。分散分析を行った結果、見かけ弾性率は果皮、果肉硬度と同様に、子房親、花粉親間で有意な差が認められたが、交互作用は有意でなかった。本結果から計算した相加的遺伝分散 σ_A^2 は見かけ弾性率では 3.89、果皮硬度では 0.23、果肉硬度では 0.03 であり、優性分散 σ_D^2 は見かけ弾性率では -0.10、果皮硬度では 0.02、果肉硬度では 0.00 であった。

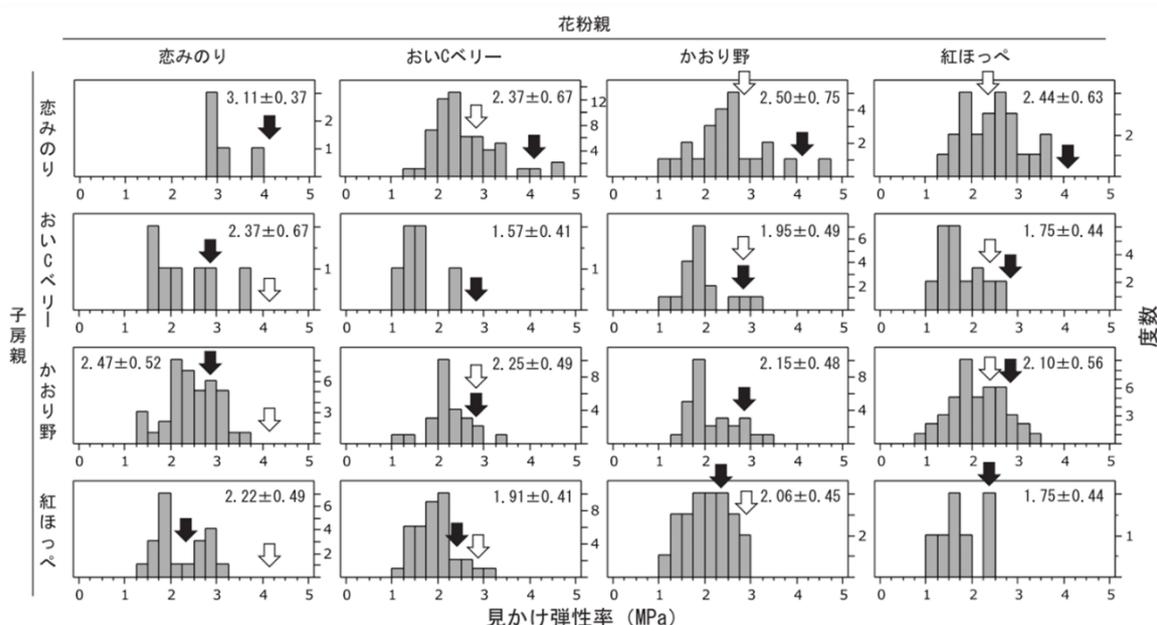
各両親間における見かけ弾性率および果皮、果肉硬度の広義の遺伝率 H^2 を第 13 表に示す。見かけ弾性率の広義の遺伝率 H^2 は 0.50~0.90 であり、いずれの交配組合せにおいても高かった。16 組の交配組合せのうち、見かけ弾性率は果皮硬度に対しては 10 組合せにおいて、果肉硬度に対しては 8 組合せにおいて、より高い遺伝率 H^2 を示した。

各両親間における見かけ弾性率と果皮、果肉硬度との表現型相関 r_p を第 14 表に示す。見かけ弾性率と果皮硬度との相関係数は 0.53**~0.95** であり、16 交配組合せ中 15 組合せにおいて比較的強く有意な正の相関が認められた。また、見かけ弾性率と果肉硬度との相関係数は 0.17~0.87* であり、16 交配組合せ中 13 組合せにおいて有意であったが、‘紅ほっぺ’ × ‘恋みのり’ を除くすべての組合せにおいて、果皮硬度との相関係数に比べ小さかった。

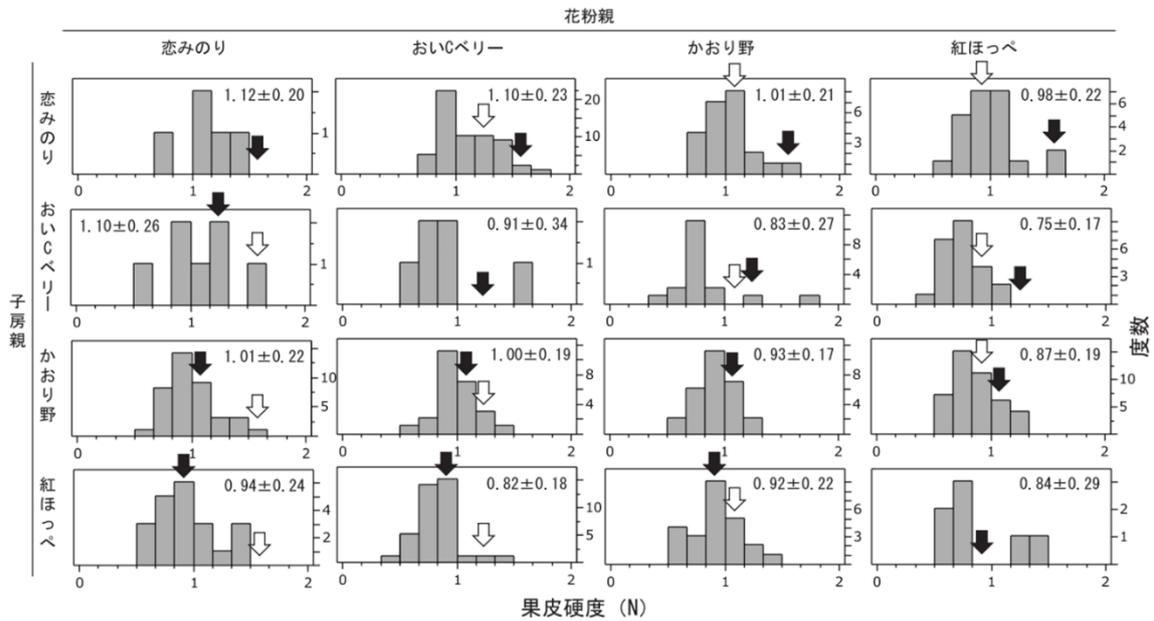
第 12 表 遺伝特性の評価に用いた交配親品種における果実の見かけ弾性率および果皮、果肉硬度

品種	見かけ弾性率 (MPa) ^z	果皮硬度 (N) ^z	果肉硬度 (N) ^z
恋みのり	4.06 a	1.53 a	0.54 a
おいCベリー	2.82 b	1.41 a	0.50 a
かおり野	2.81 b	1.10 b	0.47 a
紅ほっぺ	2.47 b	0.84 b	0.38 b

^z異なる英小文字間には Tukey の HSD 検定で有意水準 1% で有意差があることを示す。

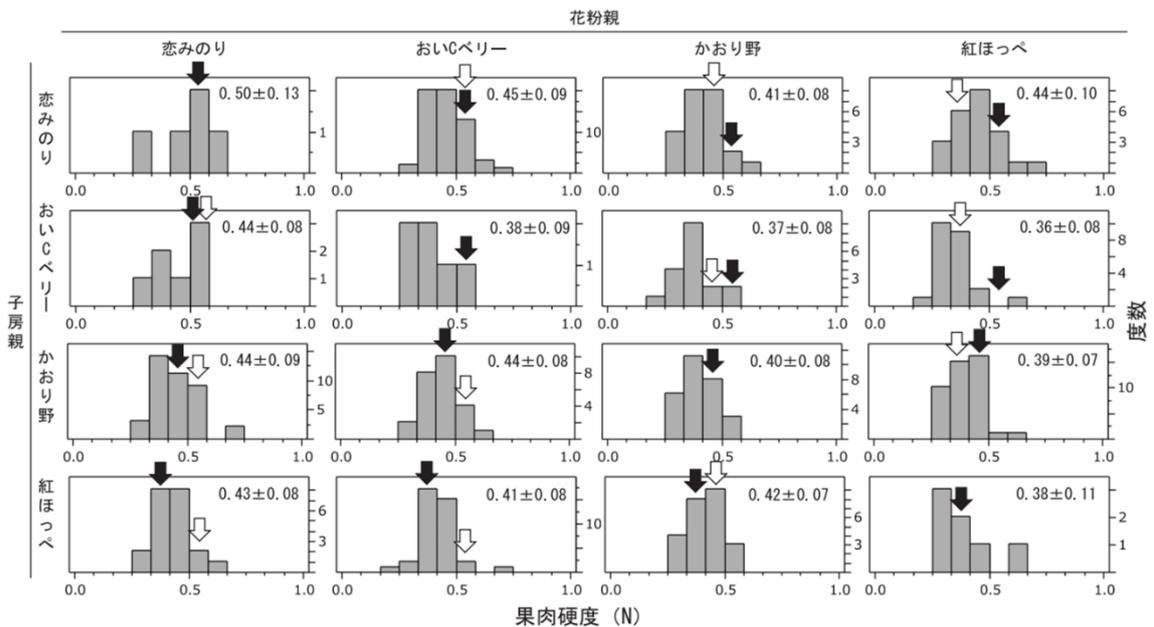


第 9 図 F₁ および S₁ 実生個体における果実の見かけ弾性率の頻度分布図中の数字は平均値 ± 標準偏差を、黒矢印は子房親を、白矢印は花粉親を示す。自殖は子房親のみを示す。



第 10 図 F₁および S₁実生個体における果皮硬度の頻度分布

図中の数字は平均値±標準偏差を，黒矢印は子房親を，白矢印は花粉親を示す．自殖は子房親のみを示す．



第 11 図 F₁および S₁実生個体における果肉硬度の頻度分布

図中の数字は平均値±標準偏差を，黒矢印は子房親を，白矢印は花粉親を示す．自殖は子房親のみを示す．

第 13 表 各交配組合せにおける見かけ弾性率および果皮，果肉硬度の広義の遺伝率 H^2

交配組合せ		n	見かけ弾性率	果皮硬度	果肉硬度
‘恋みのり’	× ‘恋みのり’	5	0.65	0.92	0.99
‘恋みのり’	× ‘おいCベリー’	59	0.84	0.27	0.40
‘恋みのり’	× ‘かおり野’	23	0.90	0.82	0.09
‘恋みのり’	× ‘紅ほっぺ’	23	0.84	0.91	0.98
‘おいCベリー’	× ‘恋みのり’	7	0.85	0.43	0.31
‘おいCベリー’	× ‘おいCベリー’	6	0.50	0.35	-0.09
‘おいCベリー’	× ‘かおり野’	18	0.69	0.39	0.32
‘おいCベリー’	× ‘紅ほっぺ’	23	0.59	-0.39	0.28
‘かおり野’	× ‘恋みのり’	39	0.80	0.82	0.94
‘かおり野’	× ‘おいCベリー’	25	0.70	-0.23	0.21
‘かおり野’	× ‘かおり野’	28	0.73	0.55	0.87
‘かおり野’	× ‘紅ほっぺ’	43	0.78	0.73	0.90
‘紅ほっぺ’	× ‘恋みのり’	21	0.73	0.92	0.96
‘紅ほっぺ’	× ‘おいCベリー’	38	0.51	-0.31	0.34
‘紅ほっぺ’	× ‘かおり野’	24	0.65	0.81	0.89
‘紅ほっぺ’	× ‘紅ほっぺ’	7	0.59	0.94	0.98

第 14 表 各交配組合せにおける見かけ弾性率と果皮，果肉硬度との表現型相関 r_p

交配組合せ		n	見かけ弾性率と果皮硬度 ^z	見かけ弾性率と果肉硬度 ^z
‘恋みのり’	× ‘恋みのり’	5	0.67	0.40
‘恋みのり’	× ‘おいCベリー’	59	0.68**	0.55**
‘恋みのり’	× ‘かおり野’	23	0.80**	0.61**
‘恋みのり’	× ‘紅ほっぺ’	23	0.75**	0.42*
‘おいCベリー’	× ‘恋みのり’	7	0.84*	0.68
‘おいCベリー’	× ‘おいCベリー’	6	0.95**	0.87*
‘おいCベリー’	× ‘かおり野’	18	0.83**	0.61**
‘おいCベリー’	× ‘紅ほっぺ’	23	0.83**	0.49*
‘かおり野’	× ‘恋みのり’	39	0.75**	0.60**
‘かおり野’	× ‘おいCベリー’	25	0.68**	0.54**
‘かおり野’	× ‘かおり野’	28	0.64**	0.17
‘かおり野’	× ‘紅ほっぺ’	43	0.77**	0.49**
‘紅ほっぺ’	× ‘恋みのり’	21	0.61**	0.62**
‘紅ほっぺ’	× ‘おいCベリー’	38	0.76**	0.61**
‘紅ほっぺ’	× ‘かおり野’	24	0.53**	0.42*
‘紅ほっぺ’	× ‘紅ほっぺ’	7	0.83*	0.82*

^z** , *は 1, 5%水準で相関がそれぞれ有意であることを示す。

考察

見かけ弾性率をオセの発生が少ないイチゴの選抜指標として利用できるか、利用できる場合はどのように利用すべきか検討するため、見かけ弾性率の遺伝特性を評価した。一般的に、ある形質を選抜指標として利用するためには、選抜精度に関与する数値である広義の遺伝率が高く、個体選抜の効果が高いことなどが重要である（森下，1994）。見かけ弾性率の広義の遺伝率は、交配親にもよるが、果皮、果肉硬度の広義の遺伝率と同程度に高く（第 15 表）、選抜指標として利用可能であると考えられた。ただし、供試品種の F_1 における見かけ弾性率の分布傾向は、果皮、果肉硬度における分布傾向（門馬・上村，1985；森，2000）と同様に、両親の中間より低い方に偏ったことから（第 9，10，11 図）、 F_1 世代において見かけ弾性率が優れた個体の出現率は低いことが示唆された。森（2000）は、このような場合、自殖などによる世代促進により遺伝子を集積したのち、優良個体同士を交配し、選抜するなどの手法が有効であると述べている。近年、イチゴでは遺伝子を集積した優良母本の育成の事例が散見されるようになりつつあるが（北村ら，2015；森ら，2000）、見かけ弾性率を用いてオセの発生が少ないイチゴを開発する場合も、先だって優良母本を育成することが望ましいであろう。なお、栄養繁殖性であるイチゴはヘテロ性が高いため、 F_1 では本来の優性効果の逆方向かつ $1/2$ にあたる効果が観察されることがある（森下，1994）。見かけ弾性率の優性分散 σ_D^2 は、果皮硬度および果肉硬度に対し小さかったことから、見かけ弾性率における優性効果は、果皮、果肉硬度と同等もしくはそれ以上に小さく、相加的遺伝効果が大きいと推測された。つまり、見かけ弾性率を選抜指標として利用する場合、優性効果による影響を考慮する必要性は低いと考えられる。

現在選抜指標として利用されている果皮、果肉硬度と見かけ弾性率との併用の可能性については、選抜指標間の表現型相関を比較することで検討した。見かけ弾性率と果皮、果肉硬度との表現型相関は強いことから（第 14 表）、ホールトレーや宙吊り型容器など様々な容器を利用した輸送を想定し、オセの発生が少ないイチゴを育種目標とする場合、選抜指標としては見かけ弾性率を単独で利用すれば十分であると考えられた。ただし、果実の物理的性質は損傷発生だけでなく、食感や加工適性とも関係する。もし、食感や加工適性に特徴を有する品種を開発するなどの目的のもと、見かけ弾性率と果皮や果肉硬度を選抜指標として併用する場合は、形質間相関が強い果皮硬度よりも、やや弱い果肉硬度を重視すべきである。

なお、見かけ弾性率に関する量的形質遺伝子座（以下 QTL という）の解析や関連遺伝子の同定は、今後の課題である。イチゴの果皮および果肉の硬さは独立に遺伝するとされているものの（門馬・上村，1985），果皮の厚みや組織の軟化程度など諸条件の関与のもと，両者はよく似た傾向を示すことが報告されている（森，2000）。すなわち，果皮，果肉の硬さには同一の遺伝子が関係している可能性がある。見かけ弾性率についても，QTL の解析や関連遺伝子の同定を進めることで，果皮，果肉硬度との関係性をさらに整理できると考えられる。同時に，見かけ弾性率の高さに連鎖した選抜マーカーが開発されることで，オセ，スレの発生が少ないイチゴ品種が，より迅速かつ高い精度で選抜，育成されるようになることが期待される。

第4節 摘要

オセが少ないイチゴを育種するためには，オセの発生しやすさとの関係性が強い選抜指標が必要である。輸送試験により，果実表面積に占めるオセやスレの発生面積割合を求めたところ，現在，一般的に利用されている選抜指標である果皮，果肉硬度は，輸送条件により，オセの発生面積割合との相関が認められなかった。また，オセだけでなくスレの発生面積割合とも相関を示す場合が認められた。一方，果皮硬度に貫入変形量およびプランジャーの断面積を加味して算出した見かけ弾性率は，輸送条件を問わずオセの発生面積割合のみと相関を示し，オセが少ないイチゴの選抜指標として利用できる可能性が示された。続いて，貯蔵および収穫日が見かけ弾性率に及ぼす影響を検討したところ，貯蔵した果実および収穫日が進んだ果実では，いずれも見かけ弾性率が低下し，品種により低下程度が異なることが示された。すなわち，見かけ弾性率を指標として個体を選抜する場合，貯蔵条件や収穫日が異なる果実を比較すべきではないと考えられる。さらに，遺伝資源における見かけ弾性率を調査したところ，見かけ弾性率は近年育成された品種・系統において高い傾向があることが示された。最後に，4 品種の総当たり交配により見かけ弾性率の遺伝特性を検討したところ，見かけ弾性率は広義の遺伝率が高く， F_1 における選抜効果が高いことが期待された。また，優性効果が小さく，相加的遺伝効果が大きいことが示唆された。見かけ弾性率と果皮，果肉硬度との表現型相関は強いことも示され，見かけ弾性率を選抜指標として利用する場合，果皮，果肉硬度との併用効果は低いことが予想された。

第4章 オセおよびスレの発生を抑制する包装および輸送技術の開発

第1節 緒言

前章では、育種的手法によりイチゴ果実の物理的性質を改善することで、オセの発生を抑制する方策を提案した。一方、スレは、発生箇所がごく狭い範囲に限られることなどから、育種的手法による発生抑制が困難であると考えられる。また、イチゴ果実の物理的性質には、遺伝的要因だけでなく、栽培中や流通段階での温湿度、水分条件なども影響する（青柳・牧野，1981；Darrow，1966；野口，2002）。輸送中に果実に作用する外力が大きい、あるいは天候不順などにより栽培中や輸送中の環境条件が好適でない場合には、育種的手法による果実の物理的性質の改善のみでは、損傷の抑制が困難であると懸念される。物理的性質に優れた果実を持つイチゴ品種の育種に加え、包装、輸送技術の改善による、振動、衝撃の頻度や大きさの低減、損傷発生に影響する振動の加速度や周波数、振動方向（岩元ら，1980；中村ら，2007）の制御が必要であると考えられる。ただし、新たな包装や輸送技術の導入は、新品種の導入に比べ、手間や費用がかかることが多い。イチゴ生産には10 a当たり年間2092時間もの労働時間、170万円もの農業経営費を要し（農林水産省，2007）、ベネフィットを上回る手間や費用の増大は経営管理上問題である。新たな包装、輸送技術を導入するにあたって、オセ、スレの発生抑制、あるいはその他の品質低下抑制にどの程度有効であるかを精査し、損傷発生を抑制しつつも手間や費用を必要最小限とする、包装、輸送方法を提示する必要がある。

ここで、現在の日本における包装、輸送技術の開発、利用状況とそれらの問題点を俯瞰する。現在、イチゴの流通では、二段詰めトレーや平詰めトレーなどのプラスチック容器を使用し、これを段ボール箱に詰め、国内向け出荷ではトラックによる陸上輸送、輸出向け出荷では航空輸送の利用が一般的である。いずれの包装、輸送方法においても、輸送前段階を含め、強制通風冷却による低温高湿条件の維持が行われている（長谷川，1998）。低温高湿条件の維持は果実表面の硬化を促し、損傷発生を抑制することが明らかであるが（大竹・田中，1988；多々良ら，1999；王ら，1997）、それにもかかわらず輸送中に損傷が発生する理由は、主に以下の2点にあると推測される。1点めは、容器性能の問題である。二段詰めトレーや平詰めトレーを用いた輸送では、周波数10～20 Hz程度の鉛直振動において共振が発生する（中村ら，2008）。トラック輸送では鉛直方向に波数10 Hz程度をピークとする強い振動が（中村ら，2019）、航空輸送では貨物の積み替え時などに大きな衝撃が発生することから（Ishikawaら，2009；北澤ら，2010）、二段詰めトレーや平詰めト

レーでは、輸送中に共振や大きな衝撃から果実を保護することができないとみられる。実際に、二段詰めトレーや平詰めトレーとトラック輸送を併用した実輸送試験や輸送環境再現試験において、振動や共振に伴うとみられる果実の移動、回転および果実同士や容器との接触、それらに起因する果実の呼吸速度の増加、果実表面の物理的強度の低下などが観察されている（馬場ら，2012；北澤ら，2008；多々良ら，1999）。2点めは、輸送の長期化や長距離化である。近年，日本国内では労働力不足を背景に，トラック輸送を始め輸送期間の長期化が問題となっている（三菱UFJリサーチ&コンサルティング，2019）。また，日本産イチゴ果実の輸出が拡大し，航空輸送を利用したアジア向け輸送が急増した一方で，アジア向け就航路線はむしろ一部が廃止されている。このため，関東，関西から遠方の九州などのイチゴ産地からは，輸出のために関東や関西の空港を使う必要性が生じており，長期間，長距離の輸送を強いられることとなっている（中川・甲斐，2020）。長期間，長距離の輸送では，振動や衝撃が繰り返し発生することにより，果実が移動，損傷，変形し，果実に損傷が生じやすくなることが報告されている（中村ら，2008）。

容器性能および輸送の長期化，長距離化に問題があるならば，容器性能を高めるとともに，長期間，長距離間の輸送に適した包装資材を導入する，あるいは輸送環境を改善することで，輸送中におけるイチゴ果実の損傷発生を抑制できる可能性がある。宙吊り型容器，伸縮性フィルム容器は，いずれも近年提案された新たな容器である。両容器はともに果実同士を分離する穴構造に加え，内部にポリエチレン（PE）製フィルムの緩衝材を有する。容器内部に緩衝材を設置すると，共振を抑制し，損傷発生を抑制するうえで有効であることが報告されている（中村ら，2008）。前者の緩衝材は果実を柔軟なフィルムで宙吊りにする構造（馬場ら，2012；車ら，2010），後者の緩衝材は果実を展張したフィルムからなるエアキャップで保持する構造である（曾根ら，2010）。これらの容器は二段詰めトレーや平詰めトレーに対し，損傷発生を抑制するうえでより優れた性能を持つことが期待される。また，MA包装は，PEやポリプロピレン（PP）製の包装資材であり，内容物の呼吸による袋内の酸素濃度低下と二酸化炭素の蓄積により，包装した内容物の代謝活性を抑制し品質を保持することができるとされている（飯村ら，2017；曾根，2011；山下，1998）。輸送距離が長く輸送期間が長期間に及ぶ場合，代謝により果実内容物に変化するとともに，果実表面の物理的強度が低下することが想定されるが，MA包装を利用することで，それらを防ぎうる可能性がある。さらに，より長期の品質管理が実現すれば，長距離輸送においては，航空輸送のほかに，海上輸送を利用することが可能であると想定される。海上輸

送は航空輸送に対し輸送期間が大幅に長いものの、振動や衝撃の発生が少ない（独立行政法人日本貿易振興機構，2013；石川ら，2013）。したがって、適切な包装資材などを用いることで、イチゴ果実の品質を保持したまま輸送できる可能性がある（兼田ら，2021）。

以上のこれまでの技術開発や知見を基礎として、本章では、新たに開発された容器および MA 包装，海上輸送などを適切に組み合わせることで、イチゴ果実の輸送中における損傷発生を抑制する方法の開発を目指した。容器および MA 包装材は個別に開発された資材であり、併用による相互作用は不明である。また、イチゴ果実の輸送における海上輸送の利用は、ごく一部の報告を除きほとんど例が見当たらない（兼田ら，2021）。ここでは、既に開発された諸技術を比較するとともに、併用による相互作用を明らかにすることで、輸送中におけるイチゴ果実の損傷発生を抑制するための適正包装および輸送方法を検討した。なお、本章における技術の検討にあたっては、前章までに得られた知見にもとづき、物理的損傷が発生しにくいイチゴ品種を可能な限り利用した。

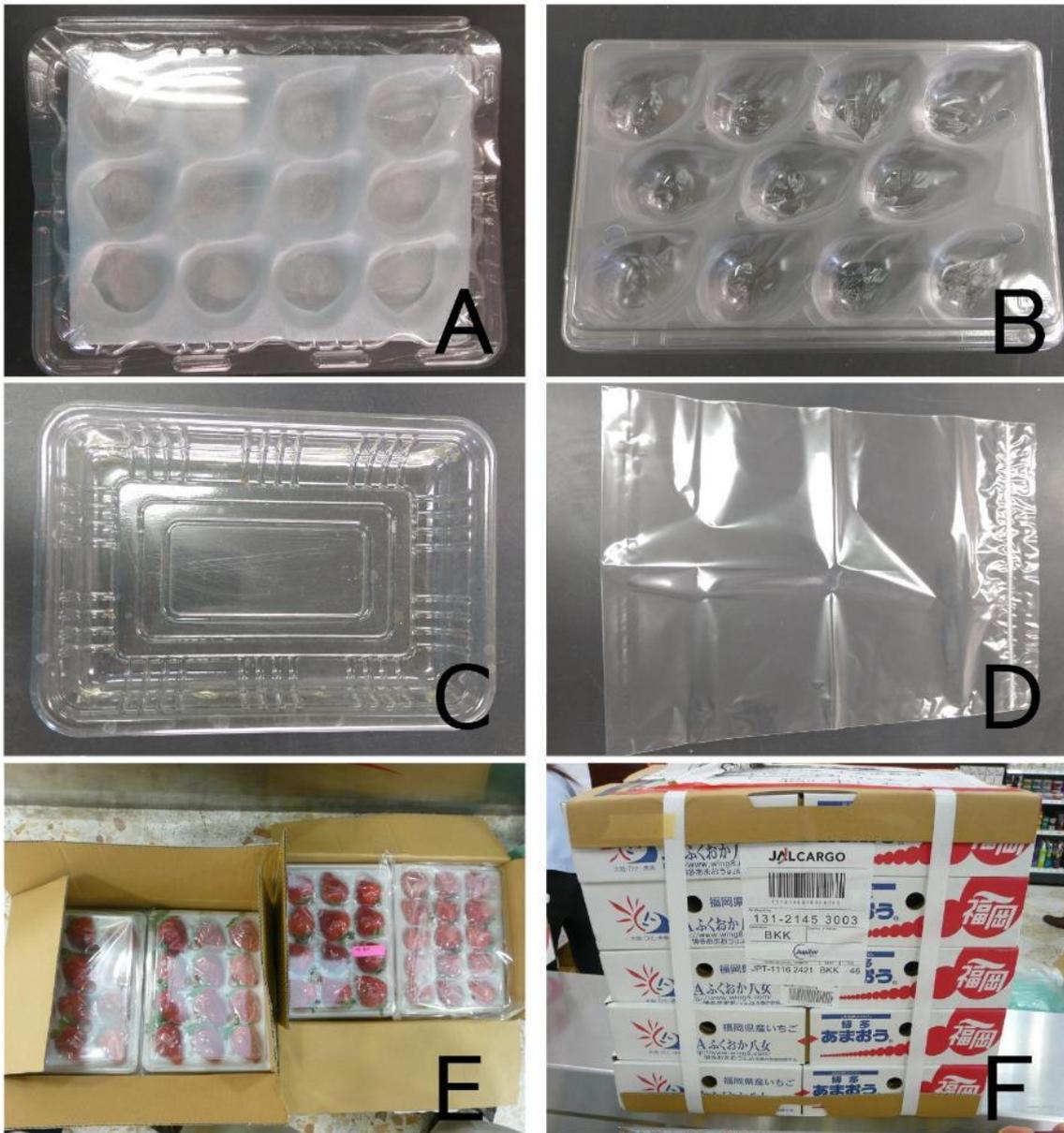
第2節 新型容器と MA 包装の併用効果

これまでに開発された容器のうち、物理的損傷の発生を防ぐという観点では、二段詰めトレイや平詰めトレイおよびホールトレイは、伸縮性フィルム容器および宙吊り型容器に劣る可能性が高い。一方、貨物の積み替え時に振動，衝撃が多発する航空輸送（Ishikawara，2009；北澤ら，2010）や，輸送期間が長い海上輸送（独立行政法人日本貿易振興機構，2013）では，両容器を利用しても，輸送中の振動により，果実の呼吸速度が増加することが懸念される。呼吸速度は MA 包装を利用することで抑制が可能であると考えられるが（飯村ら，2017；Li・Kader，1989；曾根，2011），袋内のガス濃度の変化を内容物の呼吸のみに依存する passive MA 包装では，品質保持効果が得られるまでに時間を要するため，輸送方法によっては輸送中に呼吸速度を十分に抑制できない可能性がある。また，伸縮性フィルム容器は果実を振動や衝撃から保護するために通気性を損なっているとする報告もあり（江嶋ら，2012），容器との併用条件下では MA 包装による品質保持効果が想定どおり発揮されない可能性も考えられる。

本節では，長期間，長距離間の輸送において，新型容器である伸縮性フィルム容器および宙吊り型容器と，MA 包装とを併用した輸送試験を実施し，包装条件が果実品質に及ぼす影響を明らかにした。

材料および方法

試験には、‘おいCベリー’および‘福岡S6号’（商標名：あまおう、以下‘あまおう’）を供試した。‘おいCベリー’は果実硬度および見かけ弾性率が高くオセ、スレが発生しにくい品種として供試した。‘あまおう’は果実硬度および見かけ弾性率が低いものの、代謝による品質低下が目視で達観評価可能な品種として、MA包装が及ぼす影響を評価するため供試した（データ省略）。長崎県内の農家で栽培された‘おいCベリー’および福岡県内の農家で栽培された‘あまおう’の完熟した果実を2015年2月下旬の各試験区の発送前日に収穫し、明らかな損傷がないことを目視で確認した。伸縮性フィルム容器（フルテクター、（株）コバヤシ）、宙吊り型容器（ゆりかごA、B、Cタイプ、大石産業（株）；以下宙吊り型容器A、B、Cという）および対照区として底面にスポンジを敷いた1段詰め平詰めトレー（以下平詰めトレーという）にそれぞれ果実を9から15個ずつ詰め、一部をさらにMA包装資材（P-プラス、住友ベークライト（株））に封入した。伸縮性フィルム容器および宙吊り型容器は専用ダンボール箱に、平詰めトレーはイチゴ用段ボール箱にそれぞれ詰め、タイ向け航空輸送、シンガポール向け航空輸送、シンガポール向け海上輸送の3つの輸送試験に供試した（第12図）。供試果数は、試験区当たり8～132果とした。



第 12 図 輸送試験に供試した包装資材と荷姿

A：伸縮性フィルム容器，B：宙吊り型容器，C：平詰めトレー，D：MA 包装資材，E：伸縮性フィルム容器および宙吊り型容器の荷姿，F：平詰めトレーの荷姿

タイ向け航空輸送は 2015 年 2 月 23 日から 28 日にかけて，福岡県久留米市または長崎県南島原市から宅配便によりトラックにて東京まで 0～10℃で陸上冷蔵輸送したのち，羽田空港からタイ王国バンコク市のスワンナプーム空港まで 5℃で航空輸送後，トラックにて同市内の店舗まで 5℃で陸上輸送した．シンガポール向け航空輸送便は 2015 年 2 月 28 日から 3 月 3 日にかけて，福岡県久留米市または長崎県南島原市から宅配便によりトラックに

て東京まで 0～10℃で陸上冷蔵輸送したのち、羽田空港からシンガポール共和国のチャンギ空港まで 5℃で航空輸送後、トラックにて同国内の店舗まで 5℃で陸上輸送した。シンガポール向け海上輸送は 2015 年 2 月 14 日から 3 月 3 日にかけて、福岡県久留米市から宅配便によるトラックにて東京まで 0～10℃で陸上冷蔵輸送したのち、東京港からシンガポール共和国まで 5℃で海上輸送後、トラックにて同国内の店舗まで 5℃で陸上輸送した。詳細な輸送経路および手段を第 15 表に示す。なお、輸送中の各容器にかかる衝撃加速度および容器内の温度は、容器内に設置した輸送振動計（G-MEN DR-10, (株) スリック）で計測し、専用ソフトウェア（G-TRACE Light, (株) スリック）で解析した。宙吊り型容器については、容器内にイチゴ果実用ホールを有するため、サイズおよび形状が同じポリエチレンテレフタレート（PET）製の容器内に輸送振動計を設置し、試験区に混ぜて輸送することとした。MA 包装を行った容器については、現地着荷時に包装資材内における酸素および二酸化炭素の割合を O₂/CO₂分析計（Check Point II, PBI Dansensor）を用いて計測した。

第 15 表 日本産イチゴ果実の輸出に向けた輸送試験の経路および輸送方法

輸送先 および 輸送方法	月日 ^z	行程		輸送 手段	温度 設定 (℃)
		‘おいCベリー’	‘あまおう’		
タイ 航空輸送	2/23	収穫・梱包・発送 (長崎県南島原市)	収穫・発送 (福岡県広川町)	自家用車	0～10
	2/24		梱包・発送 (福岡県久留米市)	トラック	0～10
	2/26	羽田空港着(東京都大田区), 羽田空港発 スワンナプーム空港着(タイ国バンコク都),		航空機	5
	2/28	スワンナプーム空港発, 現地百貨店着, 果実品質調査		トラック	∅
シンガポール 航空輸送	2/27	収穫・梱包・発送 (長崎県南島原市)	収穫・発送 (福岡県広川町)	トラック	0～10
	3/2	羽田空港着(東京都大田区), 羽田空港発 チャンギ空港着(シンガポール),		航空機	5
	3/3	チャンギ空港発, 現地百貨店にて果実品質調査		トラック	∅
シンガポール 海上輸送	2/14	—	収穫・発送 (福岡県広川町)	自家用車	0～10
	2/15	—	梱包・発送 (福岡県久留米市)	トラック	0～10
	2/17	東京港着(東京都江東区), 東京港発		船舶	5
	3/1	シンガポール港着, 保管(シンガポール)		-	5
	3/3	シンガポール港発, 現地百貨店にて果実品質調査		トラック	∅

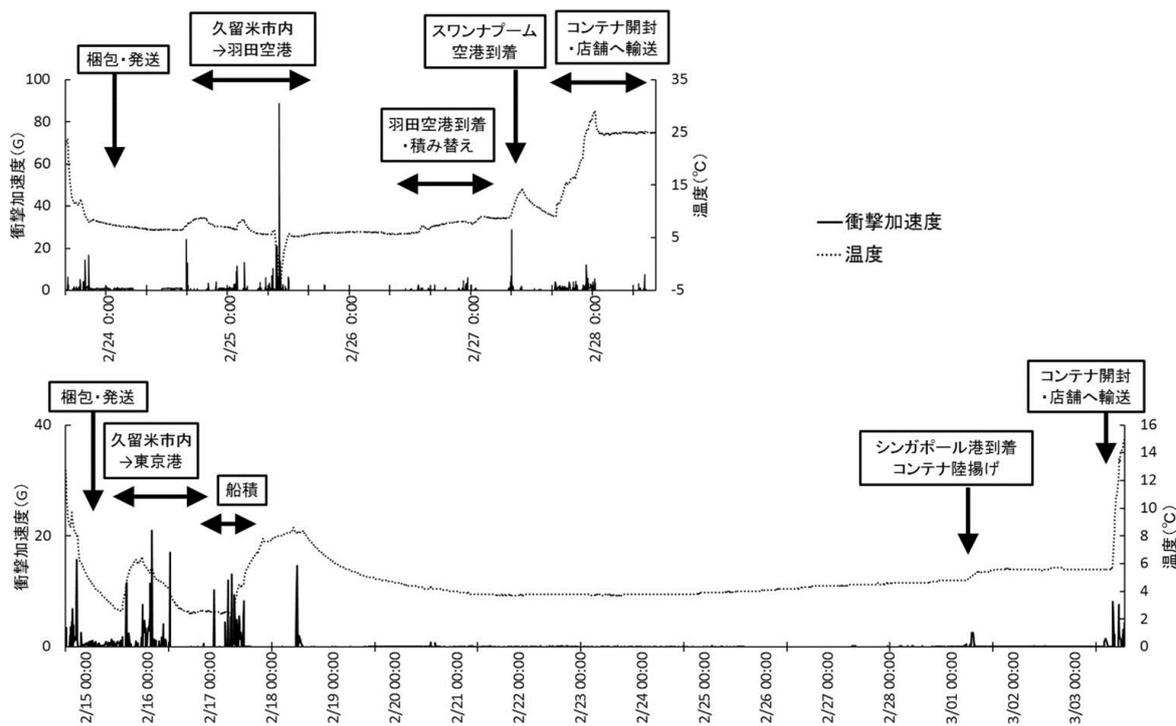
^z 日本時間。

^y 設定せず。

調査項目はオセおよびスレの発生面積割合、果皮色（明度、彩度）、果実硬度、糖度、萼片の状態、果肉断面の状態、輸送に伴い玉まわりを生じた果実の割合、他の果実または容器と接触した果実の割合、損傷した果実の割合とした。オセおよびスレの発生面積割合、萼片の状態、果肉断面の状態、輸送に伴い玉まわりを生じた果実の割合、他の果実または容器と接触した果実の割合、損傷した果実の割合はいずれも目視により評価した。果皮および果肉硬度は、プッシュプルゲージ（RX-1、アイコーエンジニアリング（株））および先端の直径が 3 mm のプランジャーを用いて測定し、プランジャーの先端約 5 mm が果実に貫入する際の最大抵抗値を果皮硬度、プランジャーが果実中央部まで貫入する際の最大抵抗値を果実硬度とした。貫入箇所は果実の赤道部の瘦果を避けた部位とし、貫入方向を 90° 変えて 2 度測定した平均値を用いた。糖度は、糖度計（PAL-1、（株）アタゴ）を用いて測定した。オセおよびスレの発生面積割合、萼片の状態は全果について、果皮、果実硬度および果実糖度は試験区当たり任意の 4~24 果について調査した。果皮、果実硬度および果実糖度を調査しなかった果実については縦方向に二等分し、肉眼で果肉断面を観察した。

結果

各輸送過程における衝撃発生状況および箱内温度の推移の一例を第 13 図に示す。航空輸送では、日本国内でのトラック輸送における積み替え時に衝撃加速度が最大 50 G 程度の大きな衝撃が生じたほか、日本および輸送先国の空港における積み込み、積み替え時や離着陸時に最大 90 G 程度の衝撃、輸送先国でのコンテナ開封時、空港から現地百貨店までのトラック輸送において最大 10 G 程度の衝撃が生じたが、空輸中における衝撃はほぼ生じず、箱内温度は約 7°C で推移した。海上輸送では、航空輸送同様に日本国内でのトラック輸送における積み込み、積み替え時に衝撃加速度が最大 22 G 程度の衝撃が生じた他、日本での船積時、輸送先国でのコンテナの陸揚げ時、コンテナ開封時に最大 15 G 程度の衝撃が生じた。また、海上輸送での輸送期間中には 1 G 程度の微衝撃が継続的に観察され、箱内温度は約 4°C で推移した。なお、包装資材の違いによる衝撃加速度および温度の大きな差異は認められなかった。また、現地着荷時における MA 包装資材の袋内ガス組成は、酸素濃度 8.1~15.8%（平均 11.5%）、二酸化炭素濃度 7.1~14.9%（平均 11.5%）であった。

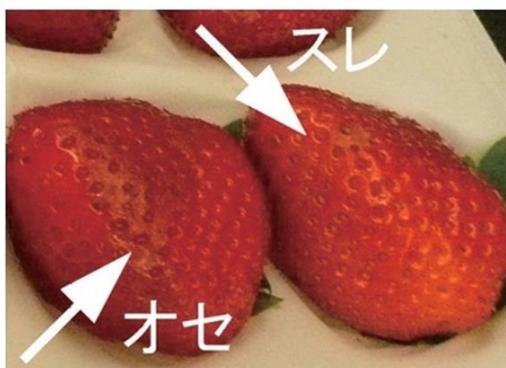


第 13 図 タイへの航空輸送およびシンガポールへの海上輸送イチゴ輸送試験時における衝撃加速度および箱内温度の変化

上段：タイ向け航空輸送（平詰めトレー），下段：シンガポール向け海上輸送（平詰めトレー）

輸送後における‘おい C ベリー’果実の損傷発生を第 14 図および第 16 表に示す。オセおよびスレの発生面積割合を分散分析した結果，タイ向け航空輸送の裏面の一部を除き，容器による効果が有意であった。すなわち，伸縮性フィルム容器および宙吊り型容器 A，C を使用した区では裏面において対照区に比べオセの発生が，おもて面またはおもて面と裏面の両面においてスレの発生が抑制された。また，MA 包装および容器と MA 包装の交互作用による効果には有意性は認められなかった。輸送後における果皮硬度，果実硬度，糖度を第 17 表に，玉まわり，接触および損傷を生じた果実の割合を第 15 図に示す。‘おい C ベリー’では包装資材により果皮硬度および果実硬度に差異が認められた。果皮硬度はタイ向け航空輸送において宙吊り型容器 A または C を単用した区および MA 包装と宙吊り型容器 A を併用した区において対照区よりも，シンガポール向け航空輸送において宙吊り型容器 C を単用した区および MA 包装と宙吊り型容器 A を併用した区において伸縮性フィルム容器を単用した区よりも，それぞれ有意に高かった。果実硬度は，シンガポール向け

航空輸送において宙吊り型容器 C を単用した区において対照区に比べ有意に高かった。一方、糖度は‘おい C ベリー’においても‘あまおう’と同様に包装資材の違いによる差異が認められなかった。また、回転、接触および損傷した果実の割合には‘あまおう’同様に包装資材の違いにより差異が見られ、対象区や宙吊り型容器 A を使用した区では玉まわりが多く発生する傾向であった。



第 14 図 タイおよびシンガポールへの輸送後の‘おい C ベリー’において観察された損傷

第 16 表 タイおよびシンガポールへの輸送後における‘おい C ベリー’の損傷発生

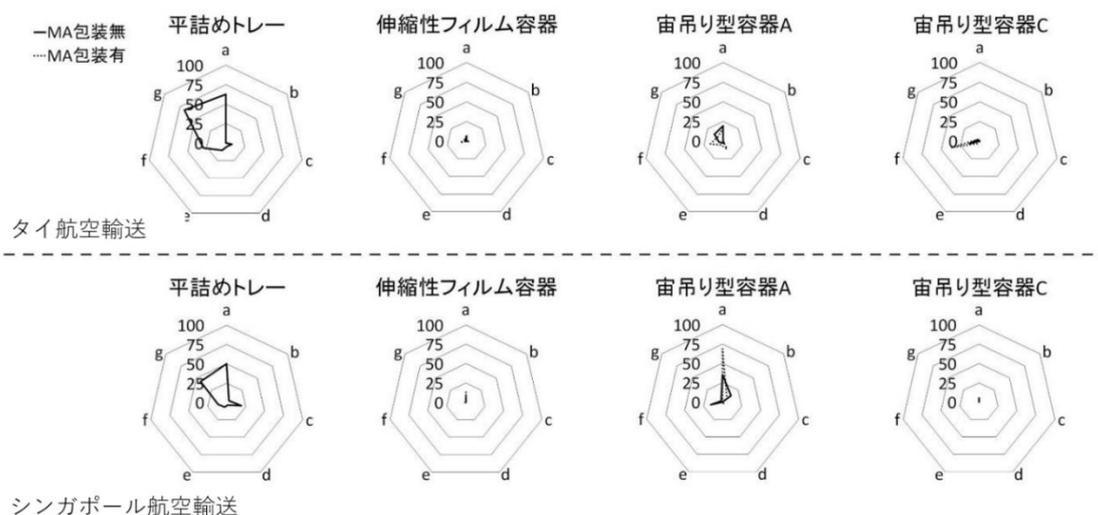
容器	MA 包装	タイ航空輸送				シンガポール航空輸送					
		n	オセ発生 面積割合 (%) ^z		スレ発生 面積割合 (%) ^z		n	オセ発生 面積割合 (%) ^z		スレ発生 面積割合 (%) ^z	
			おも て面	裏面	おも て面	裏面		おも て面	裏面	おも て面	裏面
平詰めトレー (対照区)	無	84	1.3	7.1	2.1	0.7	105	1.2	3.4	1.8	1.7
伸縮性 フィルム容器	無	42	0.0	0.1	0.1	0.0	45	0.0	0.0	0.0	0.1
	有	36	0.3	0.1	0.4	0.0	45	0.0	0.0	0.1	0.0
宙吊り型容器 A	無	36	0.0	0.1	0.4	0.6	84	1.1	0.1	0.0	0.0
	有	36	0.6	0.3	0.3	0.1	90	0.5	0.0	0.1	0.0
宙吊り型容器 C	無	26	0.0	0.0	1.0	0.4	30	0.0	0.0	0.0	0.0
	有	26	0.0	0.0	2.3	0.2	30	0.0	0.0	0.0	0.0
二元配置分散分析 ^z											
容器 (A)			NS	NS	**	NS		**	NS	NS	NS
MA 包装有無 (B)			-	-	-	-		-	-	-	-
A×B			NS	NS	NS	NS		NS	NS	NS	NS

^z角変換後に分散分析を行った。**は有意水準 1% で有意であることを、NS は有意でないことを示す。

第17表 タイおよびシンガポールへの輸送後における‘おいCベリー’の果皮硬度、果実硬度および糖度

容器	MA包装	タイ航空輸送			シンガポール航空輸送				
		n	果皮硬度 (N)	果実硬度 (N)	糖度 (°Brix)	n	果皮硬度 (N)	果実硬度 (N)	糖度 (°Brix)
平詰めトレー (対照区)	無	18	1.78	3.30	12.4	9	2.10	4.08	12.2
伸縮性フィルム容器	無	6	1.99	4.16	12.4	6	1.91	3.65	11.7
	有	6	2.06	3.97	12.6	6	2.09	3.79	12.2
宙吊り型容器A	無	6	2.25	4.08	12.4	6	2.24	4.34	11.3
	有	6	2.75	4.23	12.4	6	2.40	4.70	12.1
宙吊り型容器C	無	4	2.33	4.20	11.9	4	2.44	5.05	13.3
	有	4	2.23	3.57	12.1	4	2.33	4.82	11.9
二元配置分散分析 ^z									
容器 (A)			**	NS	NS	**	**	NS	
MA包装有無 (B)			-	-	-	-	-	-	
A×B			NS	NS	NS	NS	NS	NS	

^z**は有意水準1%で有意であることを、NSは有意でないことを示す。



第15図 タイおよびシンガポールへの輸送後における‘おいCベリー’の玉まわり、接

触および損傷を生じた果実の割合

- a : 玉まわりを生じた果実の割合 (%)， b : 接触した果実の割合 (おもて面側面部) (%)，
 c : 接触した果実の割合 (裏面側面部) (%)， d : 接触した果実の割合 (おもて面先端部) (%)，
 e : 接触した果実の割合 (裏面先端部) (%)， f : 損傷した果実の割合 (おもて面) (%)，
 g : 損傷した果実の割合 (裏面) (%)

輸送後における‘あまおう’果実の損傷発生を第 16 図および第 18 表に示す。海上輸送において MA 包装を用いた区では成熟に伴う果実の着色進行（黒ずみ）の抑制が、MA 包装を用いなかった区では果実断面において維管束周辺の果肉の水浸状化、萼片の褐変がそれぞれ観察された（第 17 図）。オセおよびスレの発生面積割合を分散分析した結果、容器による効果がすべての試験区で、MA 包装による効果および容器と MA 包装の交互作用が一部の試験区で有意であった。すなわち、伸縮性フィルム容器を使用した区では対照区に比べおもて面、裏面ともにオセおよびスレの発生面積割合が小さかった。また、宙吊り型容器 A および C はおもて面を中心に一部でオセおよびスレの発生面積割合が抑えられたものの、宙吊り型容器 C を使用したタイ向け航空輸送のおもて面、宙吊り型容器 A および C を使用したシンガポール向け航空輸送のおもて面および裏面において、対照区と同等のオセやスレが生じた。オセおよびスレの発生面積割合に対する MA 包装の効果は認められず、タイ向け航空輸送の一部において容器と MA 包装の相互作用が認められた。輸送後における果皮硬度、果実硬度、糖度を第 19 表に、玉まわり、接触および損傷を生じた果実の割合を第 18 図に示す。‘あまおう’では、包装資材の違いによる果皮、果実硬度および糖度の差異はいずれも認められなかった。一方、回転、接触および損傷した果実の割合には包装資材および部位の違いにより差異が見られ、対照区や宙吊り型容器 A、B を使用した区では、玉まわりが多く発生する傾向であった。



第 16 図 タイおよびシンガポールへの輸送後の‘あまおう’において観察された損傷

第 18 表 タイおよびシンガポールへの輸送後における‘あまおう’の損傷発生

容器	MA 包装	タイ航空輸送								シンガポール航空輸送				シンガポール海上輸送													
		n	オセ 発生面積割合(%) ^z				スレ 発生面積割合(%) ^z				n	オセ 発生面積割合(%) ^z				スレ 発生面積割合(%) ^z											
			おもて 面		裏面		おもて 面		裏面			おもて 面		裏面		おもて 面		裏面									
平詰めトレー (対照区)	無	33	11.8	a	17.3	a	9.0	abc	1.9	b	122	4.5	a	7.7	a	4.2	a	3.3	a	132	8.2	a	21.9	a	1.2	2.2	a
	有	44	8.0	ab	21.1	a	9.1	ab	2.2	b	-	-	-	-	-	-	-	-	-	77	6.3	a	22.6	a	0.4	3.0	ab
伸縮性 フィルム容器	無	54	0.9	c	4.7	bc	7.1	a	1.9	ab	27	0.6	b	1.7	b	1.1	ab	0.7	ab	39	0.4	bc	2.1	c	0.8	0.5	ab
	有	27	9.0	c	2.6	bcd	10.7	a	4.8	a	27	0.7	b	1.9	b	0.6	b	0.2	b	36	1.4	bc	3.6	c	0.4	0.8	ab
宙吊り型容器 A	無	42	1.5	c	6.2	b	1.7	bc	0.4	b	39	1.8	b	7.1	ab	0.0	b	0.5	b	-	-	-	-	-	-	-	
	有	42	1.8	c	2.4	cd	0.6	c	2.1	ab	42	2.7	ab	5.1	ab	0.6	b	0.0	b	-	-	-	-	-	-		
宙吊り型容器 B	無	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	27	4.2	ab	9.0	b	0.6	0.0	b
	有	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	27	1.9	bc	4.4	bc	0.4	0.0	b
宙吊り型容器 C	無	17	0.0	c	0.0	d	4.1	abc	3.2	ab	8	3.1	ab	2.8	ab	1.1	ab	0.0	b	36	1.7	bc	3.0	c	1.9	0.3	b
	有	24	3.5	bc	0.2	d	3.3	abc	1.0	ab	20	3.5	ab	3.0	ab	1.0	ab	0.0	b	39	0.0	c	2.3	c	2.2	0.0	b
二元配置分散分析 ^y																											
容器 (A)			**		**		**		*		NS	**		NS		NS		NS		**	**		**		**		**
MA 包装有無 (B)			NS		NS		NS		NS		-	-		-		-		-		NS	NS		NS		NS		NS
A×B			*		**		NS		**		NS	NS		NS		NS		NS		NS	NS		NS		NS		NS

^z異なる英小文字間には Tukey の HSD 検定で有意水準 5% で有意差があることを示す。

^y角変換後に分散分析を行った。**, *はそれぞれ有意水準 1%, 5% で有意であることを, NS は有意でないことを示す。



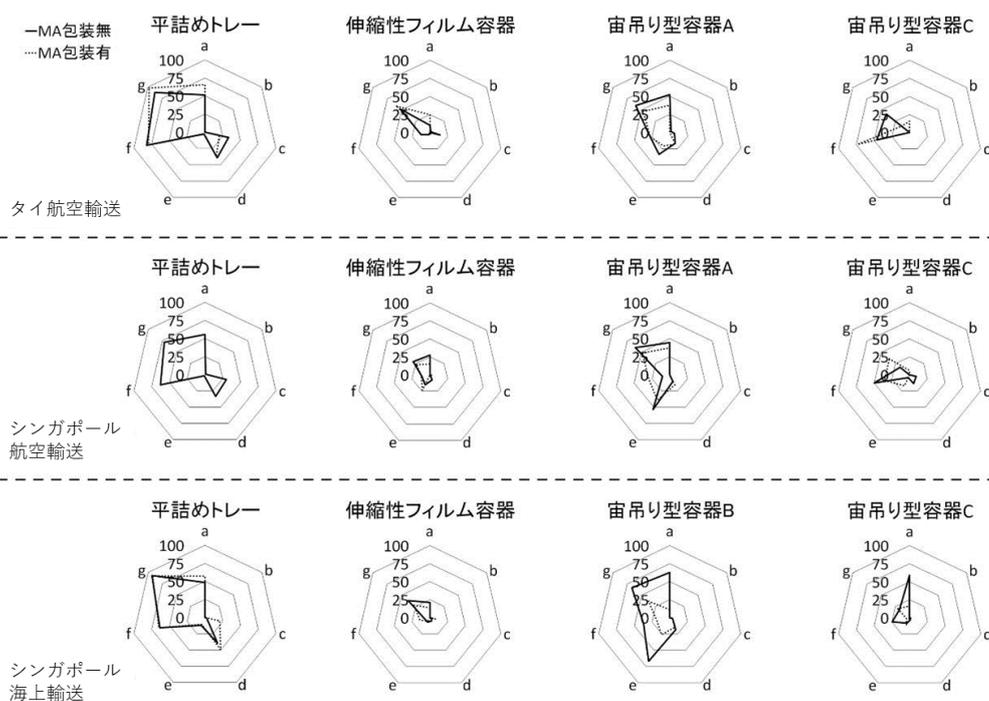
第 17 図 シンガポールへの海上輸送後の‘あまおう’において観察された黒ずみおよび断面の水浸状化

MA 包装を用いなかった区では、黒ずみ（上段：楕円で囲った部位を中心に全体に広がる）および断面における水浸状化（下段）が観察された（写真は平詰めトレーを用いて輸送した果実）

第 19 表 タイおよびシンガポールへの輸送後における‘あまおう’の果皮硬度，果実硬度および糖度

容器	MA 包装	タイ航空輸送			シンガポール航空輸送			シンガポール海上輸送					
		n	果皮硬度 (N)	果実硬度 (N)	糖度 (°Br ix) ^z	n	果皮硬度 (N)	果実硬度 (N)	糖度 (°B rix) ^z	n	果皮硬度 (N)	果実硬度 (N)	糖度 (°B rix) ^z
平詰めトレー (対照区)	無	6	1.24	1.73	9.5	20	1.28	1.91	8.8	24	1.30	2.07	10.0
	有	8	1.17	1.86	9.0	-	-	-	-	17	1.35	2.07	9.9
伸縮性フィルム容器	無	6	1.33	2.27	9.1	4	1.26	1.98	8.7	9	1.28	2.01	10.3
	有	6	1.42	2.22	9.2	4	1.40	2.25	8.4	6	1.15	1.78	10.7
宙吊り型容器 A	無	9	1.38	2.09	9.7	6	1.27	2.29	8.8	-	-	-	-
	有	6	1.37	2.22	10.4	6	1.25	2.28	8.7	-	-	-	-
宙吊り型容器 B	無	-	-	-	-	-	-	-	-	8	1.33	1.99	9.7
	有	-	-	-	-	-	-	-	-	6	1.46	2.08	9.1
宙吊り型容器 C	無	4	1.44	2.05	10.3	4	1.26	2.24	8.9	8	1.37	1.97	9.6
	有	4	1.42	2.23	10.0	4	1.27	2.15	9.3	7	1.37	2.14	9.7
二元配置分散分析 ^x													
容器 (A)			NS	NS	NS		NS	NS	NS		NS	NS	NS
MA 包装有無 (B)			NS	NS	NS		-	-	-		NS	NS	NS
A×B			NS	NS	NS		NS	NS	NS		NS	NS	NS

^z NS は有意でないことを示す。



第 18 図 タイおよびシンガポールへの輸送後における‘あまおう’の玉まわり，接触および損傷を生じた果実の割合

a : 玉まわりを生じた果実の割合 (%)， b : 接触した果実の割合 (おもて面側面部) (%)，
 c : 接触した果実の割合 (裏面側面部) (%)， d : 接触した果実の割合 (おもて面先端部) (%)，
 e : 接触した果実の割合 (裏面先端部) (%)， f : 損傷した果実の割合 (おもて面) (%)，
 g : 損傷した果実の割合 (裏面) (%)

考察

現在一般的に用いられている平詰めトレーを使用した輸送では、‘おいCベリー’、‘あまおう’ともにいずれの輸送先および輸送方法においてもオセおよびスレが多く発生した（第 16, 18 表）。馬場ら（2012）が指摘した通り、平詰めトレーでは玉まわりが多く発生し、果実のおもて面先端部や裏面側面部が他の果実などと接触することで、損傷を生じると考えられた（第 15, 18 図）。イチゴ果実の長期、長距離輸送においては、容器の早急な改善が必要であることが改めて示された。

伸縮性フィルム容器および宙吊り型容器は、‘おいCベリー’、‘あまおう’および航空輸送、海上輸送いずれにおいても多くの場合においてイチゴ果実のオセおよびスレの発生を抑制した（第 16, 18 表）。特に宙吊り型容器は、果実が硬い‘おいCベリー’における果皮硬度や果実硬度の維持効果が優れたことから、‘おいCベリー’と宙吊り型容器を組合せることで、十分に商品性のある果実を航空輸送によってタイやシンガポールに届けうることが明らかとなった。宙吊り型容器は、軟らかいフィルムで果実を比較的緩やかに固定する構造であり、展張したフィルムにより果実を厳密に固定する伸縮性フィルム容器とは異なり、輸送中に玉まわりや果実と容器との接触を生じる場合がある（第 15, 18 図）。本特性は果実の品質低下を抑制する上では一見不利であるようにも考えられるが、実際には、容器が受ける衝撃や振動がそのまま果実に伝達しないよう寄与していると推察され（馬場ら, 2012）, ‘おいCベリー’における果皮硬度や果肉硬度の低下を抑制したと考えられる。なお、‘あまおう’の輸送では、輸送後の果皮硬度や果実硬度が伸縮性フィルム容器および宙吊り型容器で同程度であったが、これは伸縮性フィルム容器が‘あまおう’の果皮硬度や果実硬度を維持したというよりも、‘あまおう’の果実が軟らかいために、伸縮性フィルム容器および宙吊り型容器のいずれにおいても同程度に果実硬度が維持されなかったと捉えるべきであろう。

MA 包装および MA 包装と容器の併用による効果は‘あまおう’を用いた海上輸送において認められ、果実における外観品質の低下を防止した（第 17 図）ほか、一部の容器で果実裏面におけるオセおよびスレの発生を抑制した（第 18 表）。MA 包装との併用効果が認められた、タイ向け航空輸送における宙吊り型容器 A と MA 包装を併用した区の果実裏面のオセの発生は、他の容器を単独で用いた場合と同程度であったことから、海上輸送においても航空輸送同様、第一義的に使用すべき包装資材は各品種に適した容器であると考えられる。しかしながら、青果販売店によれば果実断面における水浸状化は輸送後の果実可

販期間や果実購入後の消費者評価に影響する要素であり（YAOYA Fresh energy PTE. LTD, 私信），見過ごすことはできない．多々良ら（1999）はイチゴ果実の呼吸速度は，わずか0.2～0.5 G の微細な衝撃を受けることによっても上昇すると報告している．輸送期間が長く微細な衝撃が発生し続ける海上輸送において，衝撃による損傷発生は容器により防止することができると考えられるが，呼吸速度の上昇は容器で防ぐことは困難である．従って，ブランディングのために長期間の品質保証を目指すうえで，容器に加えた MA 包装の併用が第二義的に推奨される．一方，イチゴ航空輸送においては MA 包装による果実の外観品質の低下抑制効果は認められなかったことから，適正包装の観点から，MA 包装は不要であることが示された．

第3節 船舶・航空複合一貫輸送技術の開発

現在，輸出をはじめとする長距離輸送において選択可能なイチゴ果実の輸送手段は，主に航空輸送もしくは海上輸送のいずれかである．一方，地方のイチゴ産地にとって，航空輸送および海上輸送は，果実品質を保持する上で必ずしも最適な輸送方法ではない．航空輸送に関しては，近年，産地近郊の空港発輸出先国向けの航路の一部が廃止され，代わりに関東や関西の空港を利用せざるをえない状況にある（中川・甲斐，2020）．また，海上輸送においても，日本には年間取扱いコンテナ数が100万TEU（Twenty-foot Equivalent Unit）を超えるコンテナターミナルが関東，関西および名古屋にわずか計5港しかないことから（国土交通省，2020），地方においては産地近郊から遠方のコンテナターミナルへ陸送するか，抜港などにより輸送スケジュールに遅延が生じやすい近郊の小規模コンテナターミナルを利用する必要が生じている．言うまでもなく，遠方の空港や港湾を経由してイチゴ果実を輸送すると，輸送過程および日数の増加によりイチゴ果実にかかるストレスが増加し，さらなる損傷が発生する恐れがある．イチゴ果実における損傷発生を抑制するためには，地方のイチゴ産地から目的地へ直接，迅速に輸送する独自のロジスティクスが必要である．

そこで本節では，海上輸送に代わるさらに新しい輸送方法として，複合一貫輸送（シー・アンド・エア輸送）により，産地近郊の港湾を利用してイチゴ果実を目的地へ直接輸送する技術の開発に取り組んだ．複合一貫輸送とは，海上輸送と航空輸送を併用する輸送方法で，ここでは発地から経由地までを海上輸送，経由地から着地までを航空輸送とするものである．複合一貫輸送は，近年では輸送コスト削減およびモーダルシフトや環境負荷

の観点で注目され、国内外の特定航路が振興しているものの（国土交通省航空局，2009；岡田，2012；大北・雨宮，2010），日本では工業製品における利用が主体であり，宮古島産マンゴーなどで検討された（広瀬ら，2011）他は，青果物における利用はほとんど見当たらない．本輸送方法では中継地点で貨物の積み替えを行うため，単純な海上，航空輸送に比べ積み替え回数が多いうえ，天候不順で航空機が欠航するなど，海上輸送した貨物の全量をただちに航空輸送できない場合は，海上輸送から航空輸送への積み替え時に数時間から数日間程度の待ち時間が発生する可能性が否定できないことから，流通中に品質が低下しやすい青果物では，利用が避けられてきたのであろう．一方，前節までにおいて，流通中にイチゴ果実に生じる損傷や水浸状化は，適切な品種や包装形態の選択，低温の維持により低減可能であることが示された．適切な包装形態や品種を使用するとともにコールドチェーンを維持することで，イチゴにおいても海上輸送と航空輸送を併用した複合一貫輸送が利用可能であることを実証できれば，関東や関西，名古屋から遠く遠距離輸送に不利な地方においても，輸送中におけるイチゴ果実の損傷発生を抑制できる可能性がある．

イチゴ果実の複合一貫輸送技術の開発に当たり，本節では，第一に，イチゴ果実の船舶・航空複合一貫輸送に適した包装形態を提示した．海上，航空輸送を問わず，イチゴの長距離輸送では，損傷発生を低減する包装容器の利用が必要である．また，輸送期間が長い海上輸送では，包装容器に加え MA 包装の利用が推奨される．一方，海上および航空輸送の両工程および中継地での積み替えからなる船舶・航空複合一貫輸送では，包装容器の利用は必須であることが想定されるものの，MA 包装の必要性は不明である．そこで，複合一貫輸送を想定した貯蔵試験を行い，貯蔵後の果実品質から見た MA 包装の必要性を検討した．第二に，提示した包装形態を用いて，九州内の小規模コンテナターミナルから沖縄県内の物流拠点を経由した，アジアへの九州産イチゴ果実の船舶・航空複合一貫輸送を行い，本輸送方法および包装形態が損傷発生に及ぼす影響を明らかにした．第三に，本輸送方法において偶発が懸念される，海上輸送から航空輸送への積み替え時における短期間の貯蔵が，イチゴ果実の損傷発生に及ぼす影響を明らかにした．

材料および方法

実験 1 船舶・航空複合一貫輸送を想定した期間の貯蔵において MA 包装が‘恋みのり’の損傷発生に及ぼす影響

試験には，福岡県広川町のイチゴ生産者が栽培した‘恋みのり’を用いた．2019年2月

8日に収穫した果実をただちに九州沖縄農業研究センター筑後・久留米研究拠点の20℃程度に設定した実験室に持ち帰り、2Lサイズ(20g程度)の果実から、受精不良の奇形果、病気の出ている果実および明らかな傷みが認められるものを取り除き、完全に着色した正常果および乱形果を供試した。まず、一部果実を取り出して果実品質を調査した。第2節の‘おいCベリー’の結果を参考に、残った果実はすべて宙吊り型容器(ゆりかごCタイプ、大石産業(株))に1パック当たり9果入れた。宙吊り型容器の半数はMA包装(P-プラス、住友ベークライト(株))に入れ、残る半数は入れずに、4℃で貯蔵した。以下、MA包装した容器をMA包装区、しなかった容器を非MA包装区とする。貯蔵後2日目以降、15日目まで毎日、MA包装区については容器内、非MA包装区については袋外の大気に占める酸素および二酸化炭素の割合を、O₂/CO₂分析計(Check Point II, PBI Dansensor)を用いてそれぞれ計測した。また、5、10日目に両試験区から2パックずつを、15日目に3パックずつを取り出し、MA包装および宙吊り型容器を開封し、イチゴの果実品質をパック毎に調査した。調査項目は果皮色(明度・彩度)、果皮硬度、果肉硬度、芯の硬度、見かけ弾性率および糖度とした。果皮色は、色彩色差計(CR-13, コニカミノルタ(株))を用いて、CIEL*a*b*表色系における明度(L*)および色度(a*値, b*値)を果実おもて面中央部および果実裏面中央部で測定し、それぞれについておもて面および裏面の平均値を求め、彩度($\sqrt{a^{*2} + b^{*2}}$)を算出した。果皮、果肉および芯の硬度は、果実おもて面中央部の瘦果を避けた位置について、材料試験機(EZ-SX, (株)島津製作所)および専用ソフトウェア(TRAPEZIUM, (株)島津製作所)を用いた貫入試験により測定した。ロードセルは10Nとし、ロードスピードは門馬ら(1977)に従い、10mm・min⁻¹、貫入させるプランジャーの直径は3mmとした。また、第1のピークを果皮硬度、果肉部を貫通する際のボトムを果肉硬度、次に管束帯および髓を貫通する際の第2から第4のピークのうち最大のものを芯の硬度とした。さらに、望月ら(2001)に従い、貫入開始から第1のピークまでの貫入距離を貫入変形量とし、以下の式(6)により貫入変形量、果皮硬度、果径、プランジャーの断面積から見かけ弾性率を算出した。

$$\text{見かけ弾性率 (MPa)} = (\text{果皮硬度 (N)} / \text{プランジャーの断面積 (mm}^2)) / (\text{貫入変形量 (mm)} / \text{果径 (mm)}) \quad (6)$$

糖度は糖度計(PAL-BX ACID4マスターキット, (株)アタゴ)を用いて測定した。

実験2 船舶・航空複合一貫輸送が‘恋みのり’の果実品質に及ぼす影響

試験には、熊本県宇城市内のイチゴ生産者が栽培した‘恋みのり’を供試した。2018年3月6日に収穫した2Lサイズ（20g程度）の果実から、奇形果、病気の出ている果実および明らかな傷みが認められるものを取り除き、完全に着色した正常果および乱形果をただちに宙吊り型容器（新ゆりかご、大石産業（株））に6〜7果ずつ入れたのち、12パックずつ汎用A式段ボール箱に入れ、博多港コンテナターミナル（福岡県福岡市；以下博多港という）へ冷蔵トラックにて陸上輸送した。3月8日に段ボール箱をパレットサイズして-1℃に設定した冷蔵コンテナ（fresh bank, 日通商事（株））に入れ、香港港コンテナターミナル（香港；以下香港港という）へ海上輸送し、以上を海上輸送区とした。同様に、3月15日に収穫した2Lサイズ（20g程度）の果実から、奇形果、病気の出ている果実および明らかな傷みが認められるものを取り除き、完全に着色した正常果および乱形果を、宙吊り型容器に6〜7果ずつ入れたのち、12パックずつ汎用A式段ボール箱に入れ、博多港へ冷蔵トラックにて陸上輸送した。3月17日に1℃に設定した冷蔵倉庫内で段ボール箱をパレットサイズしたのち、3℃に設定した冷蔵コンテナに入れ、ベンチレーションを閉め、沖縄港（沖縄県那覇市）へ海上輸送、3月19日に那覇空港（沖縄県沖縄市）から香港国際空港（香港）へ航空輸送し、以上を複合一貫輸送区とした。3月21日に、両試験区の果実を香港港および香港国際空港から1℃に設定した冷蔵倉庫（香港；以下倉庫という）へ冷蔵トラックにて陸上輸送し、5時間以上貯蔵後、一部の果実を抜き取り、ただちに室温20℃、湿度52%程度の室内にて果実品質を調査した。また、3月23日に、残りの果実を倉庫から香港内の小売店へ冷蔵トラックにて陸上輸送し、到着直後に一部の果実を抜き取り、ただちに室温23℃、湿度57%程度の室内にて果実品質を調査した。さらに残った果実は、7℃程度に管理された小売店の青果物用バックヤード内で貯蔵を続け、3月26日に回収後、ただちに室温24℃、湿度64%程度の室内にて果実品質を調査した。実験2における輸送工程を第22表に示す。

第 20 表 海上輸送および船舶・航空複合一貫輸送の過程

月日 ^z	海上輸送区	複合一貫輸送区	温度設定 (°C)
3/6	収穫・発送 (熊本県宇城市)		5
3/7	博多港倉庫着 (福岡県福岡市)		4
3/8	パレットイズ, バンニング, 船積, 博多港発		-1
3/15		収穫・発送 (熊本県宇城市)	5
3/16		博多港倉庫着 (福岡県福岡市)	4
3/17		パレットイズ, バンニング, 船積, 博多港発	1
3/18		沖縄港着 (沖縄県那覇市)	4
3/19		航空機積載手続き	- ^y
3/20	香港港着 (香港), 倉庫着, デバンニング	航空機積載, 那覇空港発, 香港国際空港着 (香港), 放射能検査, 倉庫着	1~5
3/21	放射能検査, 倉庫にて果実品質調査 (1 回目)	倉庫にて果実品質調査 (1 回目)	1
3/23	現地小売店へ輸送, 小売店にて果実品質調査 (2 回目)		7
3/26	小売店にて果実品質調査 (3 回目)		7

^z 日本時間.

^y 設定せず.

調査項目はオセおよびスレの発生面積割合, 果皮色 (明度, 彩度), 果実硬度, 糖度, 酸度および萼片の状態とした. 果実硬度は, 先端の直径が 3 mm のプランジャーを用いて測定し, プランジャーが果実中央部まで貫入する際の最大抵抗値とした. 貫入箇所は果実の赤道部の瘦果を避けた部位とし, 貫入方向を 90° 変えて 2 度測定した平均値を用いた. 酸度は, 糖酸度計 (PAL-BX ACID4 マスターキット, (株) アタゴ) により測定した. 萼片の状態は, 目視により, 明らかな褐変や枯損の有無を観察した. 果皮色および糖度の調査方法は実験 1 に準じた. 調査果数は調査日当たり 6~30 果とした. 輸送中における衝撃加速度および温度は, 容器内に設置した輸送振動計 (G-MEN DR-10, (株) スリック) で計測し, 専用ソフトウェア (G-TRACE Light, (株) スリック) で解析した.

実験 3 船舶・航空複合一貫輸送における沖縄県内での短期間の貯蔵が ‘恋みのり’ の損傷発生に及ぼす影響

試験には、熊本県玉名市内のイチゴ生産者が栽培した‘恋みのり’を供試した。2019年1月17日に収穫した2Lサイズのイチゴ果実について、明らかな損傷があるものおよび奇形果を除いたうえで、ただちに6~8果ずつ宙吊り型容器に入れたのち、8パックずつ汎用A式段ボール箱に入れ、博多港へトラック輸送した。1月19日に1℃に設定した冷蔵倉庫内で段ボール箱をパレット化し、3℃に設定した冷蔵コンテナに入れてベンチレーションを閉め、1月20日に沖縄港へ海上輸送した。沖縄港への発送時に一部の果実を抜き取り、ただちに室温20℃、湿度50%程度の室内にて果実品質を調査した。1月21日に沖縄港に到着した段ボール箱を3つに分け、1つは1月21日にただちに、1つは那覇市内で貯蔵したのち1月22日に、1つは同じく貯蔵したのち1月23日にそれぞれ香港国際空港へ航空輸送し、以降はそれぞれを0日貯蔵区、1日貯蔵区、2日貯蔵区とした。那覇市内での貯蔵は、4℃に設定した冷蔵倉庫内で行った。0日貯蔵区は1月22日に、1日貯蔵区は1月23日に、2日貯蔵区は1月24日に、香港国際空港から冷蔵トラックにて陸上輸送したのち1℃に設定した倉庫へ入庫し、入庫時点で一部の果実を抜き取り、ただちに室温22℃、湿度56%程度の室内にて果実品質を調査した。また、0、1日貯蔵区は1月24日に、2日貯蔵区は1月25日に、果実を倉庫から香港内の小売店へ冷蔵トラックにて陸上輸送し、7℃程度に管理された青果物用バックヤード内で貯蔵した。1月27日にすべての区について果実を抜き取り、ただちに室温23℃、湿度55%程度の室内にて果実品質を調査した。実験3における輸送過程を第23表に示す。

第21表 海上輸送および一時貯蔵を含む船舶・航空複合一貫輸送の過程

月日 ^z	0日貯蔵区		1日貯蔵区		2日貯蔵区	
	工程	温度 設定 (°C)	工程	温度 設定 (°C)	工程	温度 設定 (°C)
1/17	収穫，果実品質調査（1回目）， 発送（熊本県玉名市）	5	収穫，果実品質調査（1回目）， 発送（熊本県玉名市）	5	収穫，果実品質調査（1回目）， 発送（熊本県玉名市）	5
1/19	倉庫着，果実品質調査（2回目）， パレットサイズ，バンニング， 倉庫発（福岡県福岡市）	4	倉庫着，果実品質調査（2回目）， パレットサイズ，バンニング， 倉庫発（福岡県福岡市）	4	倉庫着，果実品質調査（2回目）， パレットサイズ，バンニング， 倉庫発（福岡県福岡市）	4
1/20	博多港発	3	博多港発	3	博多港発	3
1/21	沖縄港着（沖縄県那覇市） 航空機積載手続き	4 4	沖縄港着（沖縄県那覇市） 倉庫にて保管	4 4	沖縄港着（沖縄県那覇市） 倉庫にて保管	4 4
1/22	航空機積載，那覇空港発， 香港国際空港着（香港）， 放射能検査，倉庫着， 倉庫にて果実品質調査（3回目）	1～5	航空機積載手続き	- ^y	倉庫にて保管	4
1/23	-	-	航空機積載，那覇空港発， 香港国際空港着（香港）， 放射能検査，倉庫着， 倉庫にて果実品質調査（3回目）	1～5	航空機積載手続き	- ^y
1/24	現地小売店へ輸送， 小売店にて果実品質調査（4回目）	7	現地小売店へ輸送， 小売店にて果実品質調査（4回目）	7	航空機積載，那覇空港発， 香港国際空港着（香港）， 放射能検査，倉庫着， 倉庫にて果実品質調査（3回目）	1～5
1/25	-	-	-	-	現地小売店へ輸送， 小売店にて果実品質調査（4回目）	7
1/27	小売店にて果実品質調査（5回目）	7	小売店にて果実品質調査（5回目）	7	小売店にて果実品質調査（5回目）	7

^z 日本時間.

^y 設定せず.

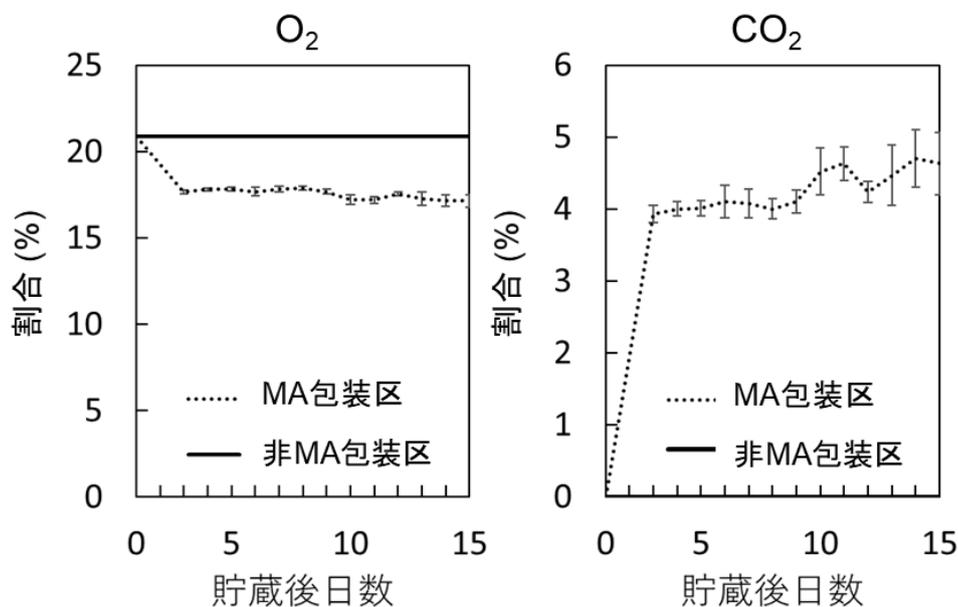
調査項目はオセおよびスレの発生面積割合，果皮色（明度，彩度），果実硬度，糖度，酸度および萼片の状態とし，調査方法は試験 2 に準じた．調査果数は調査日，試験区当たり 12~32 果とした．輸送中における衝撃加速度および温度は，容器内に設置した輸送振動計（G-MEN DR-10，（株）スリック）で計測し，専用ソフトウェア（G-TRACE Light，（株）スリック）で解析した．

すべての統計処理は，JMP ver. 8（SAS）を用いて行った．損傷発生面積割合については，角変換後に統計処理を行った．

結果

実験 1 船舶・航空複合一貫輸送を想定した貯蔵において MA 包装が‘恋みのり’の果実品質に及ぼす影響

貯蔵中の MA 包装内大気に占める酸素および二酸化炭素の割合を第 19 図に示す．MA 包装区における袋内気相は，貯蔵開始後，2~3 日以内に酸素割合約 18%，二酸化炭素割合約 4%に達し，以降はおおむね安定した．一方，非 MA 包装区における袋外大気は，貯蔵中を通じ酸素濃度 21%，二酸化炭素濃度 0%であった．



第 19 図 輸送シミュレーション中の MA 包装内気相に占める酸素および二酸化炭素の割合

バーは標準誤差を示す (n=3~7)

貯蔵中における‘恋みのり’の果実品質を第 24 表に示す。貯蔵後 10 日目までは、試験区による果皮色（明度，彩度），硬度，見かけ弾性率および糖度の差異は認められなかった。一方，貯蔵後 15 日目では，非 MA 包装区は MA 包装区に対し果皮および果肉硬度，見かけ弾性率が有意に低かった。貯蔵後 15 日目においても，果皮色，芯の硬度および糖度は試験区による差異が認められなかった。

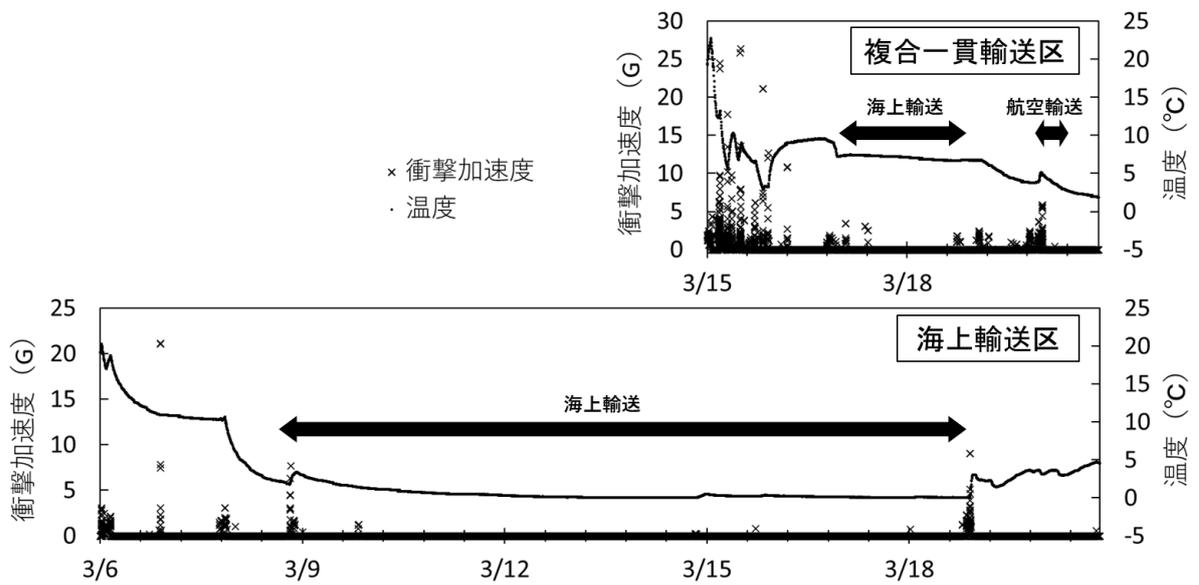
第 22 表 貯蔵中における‘恋みのり’の果実品質

貯蔵後 日数	試験区	n	果皮色		果実硬度 (N) ^z			見かけ 弾性率 (MPa) ^z	糖度 (°Brix)
			明度	彩度	果皮	果肉	芯		
0	-	2	42.7	38.8	1.52	0.58	3.18	3.57	9.1
5	MA 包装	2	47.6	37.3	2.06	0.82	3.61	4.75	9.3
	非 MA 包装	2	45.9	38.5	1.71	0.70	3.31	4.17	8.8
10	MA 包装	2	46.5	36.5	2.03	0.85	3.91	4.65	9.2
	非 MA 包装	2	46.1	36.9	1.86	0.71	3.75	4.08	9.0
15	MA 包装	3	42.2	39.0	2.11	0.90	3.90	4.45	8.9
	非 MA 包装	3	41.7	39.9	1.85	0.73	3.18	3.76	8.9

^z**は t 検定にて有意水準 5% で有意差があることを示す。

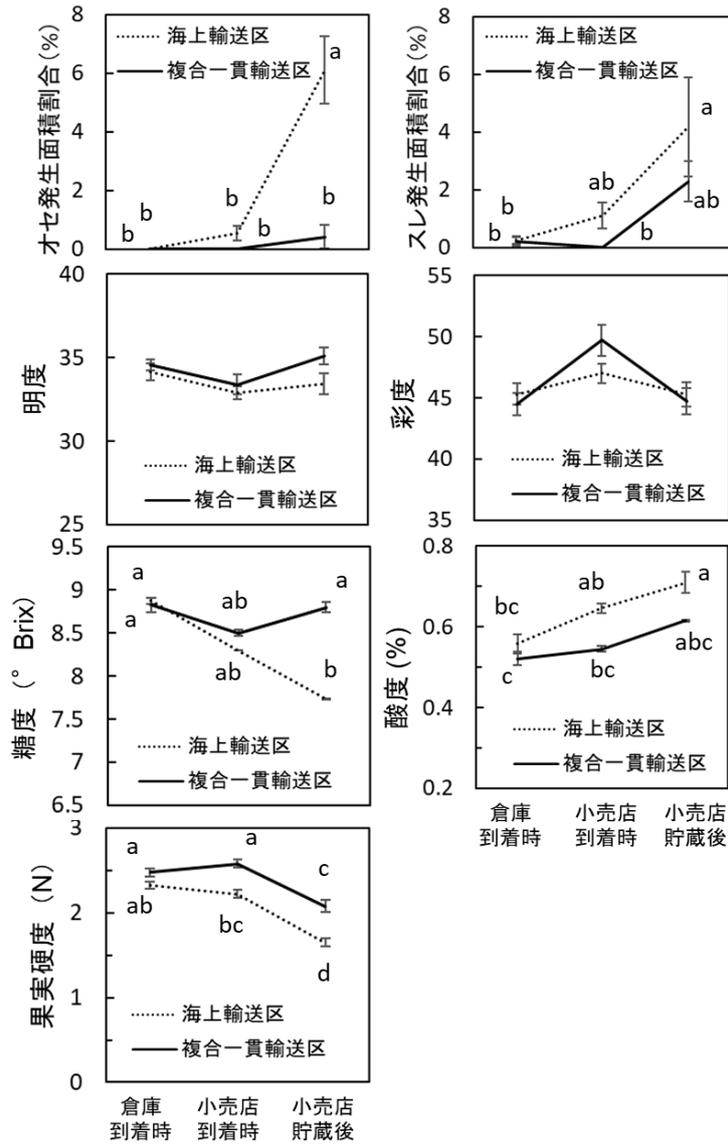
実験 2 船舶・航空複合一貫輸送が‘恋みのり’の果実品質に及ぼす影響

輸送中における衝撃加速度および温度の変化を第 20 図に示す。輸送中の容器内温度は，複合一貫輸送区では約 7 °C，海上輸送区では約 0 °C で推移した。また，いずれの試験区においても発送や船積，荷揚げ時に最大 15~25 G 程度の衝撃加速度が観察されたほか，複合一貫輸送区では沖縄での積み替え時にも最大 3 G 程度の衝撃加速度が観察された。



第 20 図 船舶・航空複合一貫輸送中における衝撃加速度および温度の変化

輸送後におけるイチゴ果実のオセおよびスレの発生面積割合，果皮色，糖度，酸度および果実硬度の変化を第 21 図に示す。倉庫および小売店到着時には、オセおよびスレの発生面積割合，果皮色，果実硬度，糖度および酸度について，試験区間に差異は認められなかった。小売店での貯蔵後には，いずれの試験区においてもオセおよびスレの発生面積割合が増加，果実硬度が低下したが，複合一貫輸送区では海上輸送区に対し損傷発生面積割合は小さく，低果実硬度は高かった。また，小売店での貯蔵後は，海上輸送区では糖度が低下，酸度が増加したが，複合一貫輸送区では糖度及び酸度の変化は認められなかった。



第 21 図 船舶・航空複合一貫輸送後におけるイチゴ果実のオセおよびスレの発生面積割合，果皮色，糖度，酸度および果実硬度の変化

エラーバーは標準誤差を示す；異なる英小文字間には Kruskal-Wallis 検定（損傷発生面積割合）もしくは Tukey の HSD 検定（その他）で有意水準 5% で有意差があることを示す（n = 6~30）

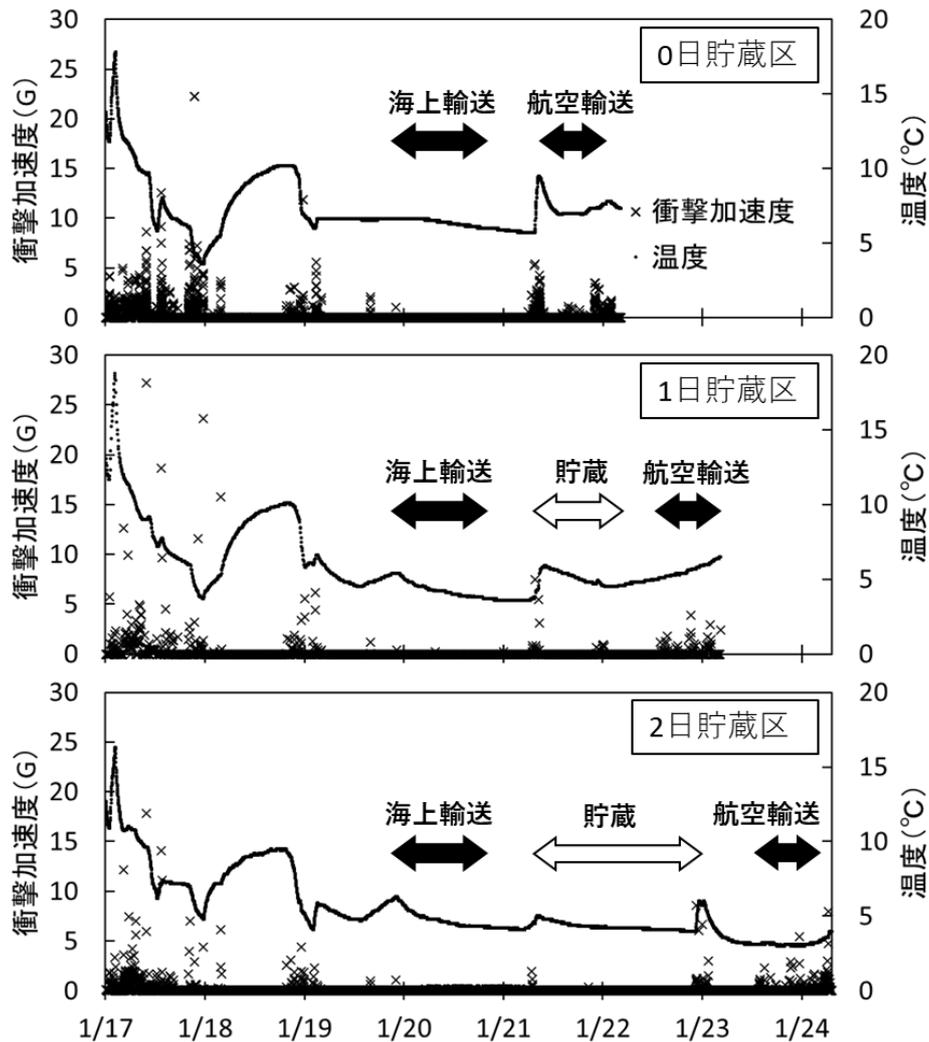
萼片の状態を第 22 図に示す。倉庫および小売店到着時には、いずれの試験区においても萼片の褐変，枯損は認められないか，軽微であった。小売店での貯蔵後には、複合一貫輸送区では萼片の状態には変化が認められなかった一方で、海上輸送区では、半数程度の果実において萼片に乾燥に伴う褐変および枯損が認められた。



第 22 図 船舶・航空複合一貫輸送後におけるイチゴ果実の萼片の外観
矢印は乾燥に伴い褐変や枯損が進行した萼片を示す

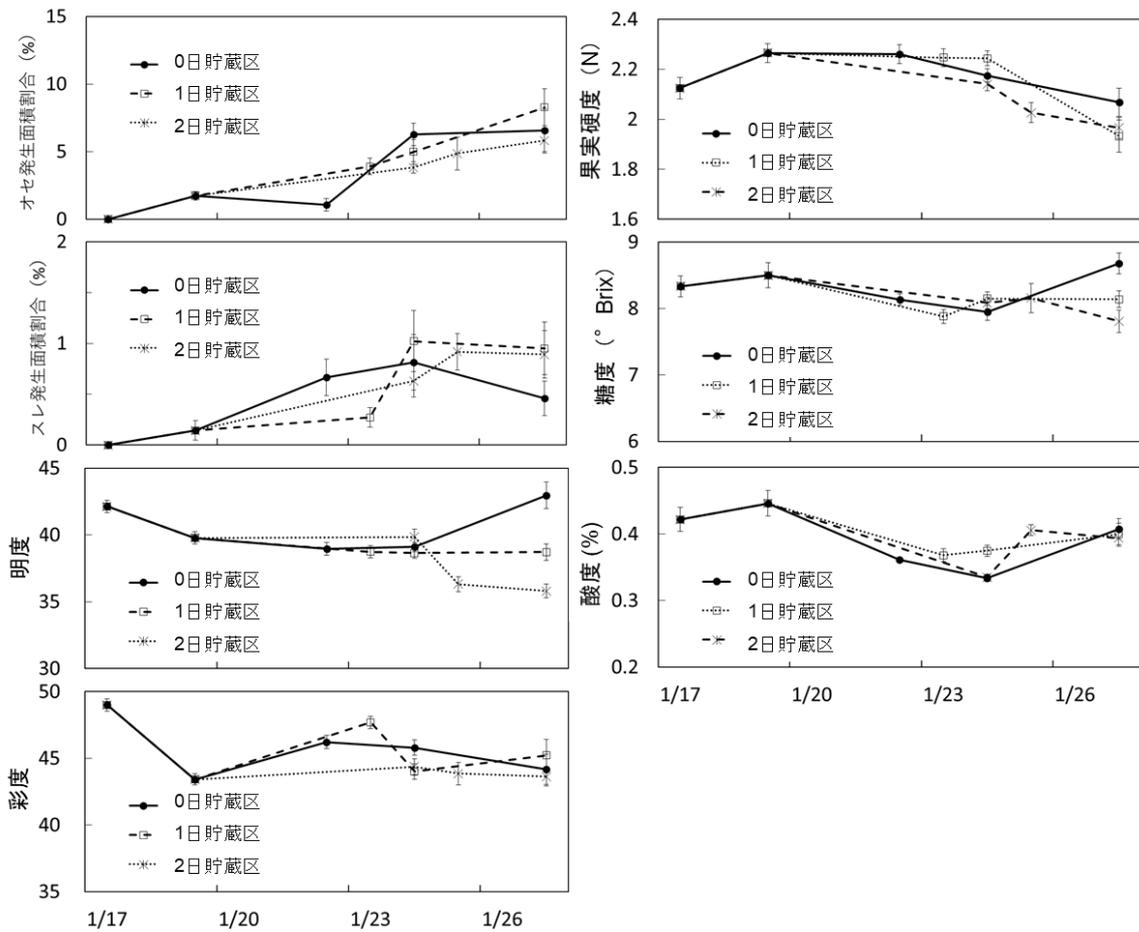
実験 3. 船舶・航空複合一貫輸送における沖縄県内での短期間の貯蔵が‘恋みのり’の果実品質に及ぼす影響

輸送中における衝撃加速度および温度の変化を第 23 図に示す。海上、航空輸送中における衝撃発生及び温度変化は実験 2 とおおむね同様であった。また、1、2 日貯蔵区では、沖縄での貯蔵中における衝撃発生は皆無であったものの、貯蔵前後に最大 9 G 程度の衝撃が発生したほか、輸送中は約 4 °C であった容器内温度が貯蔵開始時にただちに約 6 °C に上昇し、その後約 5 °C まで緩やかに下降した。



第 23 図 船舶・航空複合一貫輸送中における衝撃加速度および温度の変化

イチゴ果実のオセおよびスレの発生面積割合，果皮色，果実硬度，糖度および酸度の変化を第 24 図に示す．1 月 24，27 日ともに，試験区間によるオセおよびスレの発生面積割合，果皮色（彩度），果実硬度，糖度および酸度の差異は認められなかった．果皮の明度は 0 日貯蔵区では 1 月 24 日から 27 日にかけて増加，2 日貯蔵区では減少し，27 日には沖縄県内での貯蔵期間が長い試験区ほど高かった．果実硬度は 1，2 日貯蔵区では 1 月 24 日から 27 日にかけて減少したが，27 日にも試験区間における差異は認められなかった．また，萼片の褐変，枯損は，いずれの試験区においても認められないか軽微であった（データ省略）．



第 24 図 一時貯蔵を含む船舶・航空複合一貫輸送後におけるイチゴ果実のオセおよびスレの発生面積割合、果皮色、果実硬度、糖度および酸度の変化
エラーバーは標準誤差を示す

考察

海上輸送と航空輸送を併用した複合一貫輸送は、海上輸送の低コスト性と航空輸送の迅速性を併せ持ち、世界的には約半世紀の歴史を持つ（岡田，2012）。しかしながら、輸送中に品質が低下しやすい青果物における利用は少なく、イチゴにおける検討例は皆無である。本研究では、船舶・航空複合一貫輸送に適するイチゴの包装形態を提示するとともに、本輸送方法がイチゴの長距離輸送において品質保持上有用であることを実証した。

複合一貫輸送を想定した貯蔵試験（実験 1）の結果、MA 包装は貯蔵に伴うイチゴ果実の見かけ弾性率の低下防止に有効であり、一方で果皮色、果皮、果肉および芯の硬度、糖度には影響しなかった（第 22 表）。ただし、MA 貯蔵による見かけ弾性率の低下防止効果は、

貯蔵後 15 日目までは認められず、九州からアジアへの船舶・航空複合一貫輸送の輸送期間に相当する数日から 1 週間程度程度の範囲では、MA 包装の利用の有無による見かけ弾性率を含む果実品質の明確な差異は認められなかった。以上より、MA 包装はイチゴの果実品質維持に有効であるものの、九州からアジアへ複合一貫輸送する場合には、輸送期間が短く十分な品質維持効果を得られないことから、不要であると考えられた。

実験 1 を踏まえ、MA 包装を利用せず、損傷を低減する包装容器のみを利用して、九州から香港までイチゴ果実の船舶・航空複合一貫輸送を実証し、海上輸送と比較した（実験 2）。複合一貫輸送は収穫から倉庫到着までの日数が 6 日間と、海上輸送に対し 9 日間短く、迅速であったものの、中継地での積み替え時および航空輸送の前後に、加速度が 3 G 程度の衝撃が発生した（第 20 図）。しかしながら、香港到着直後における損傷発生は軽微であり、着荷数日後には複合一貫輸送した果実は海上輸送した果実に対し損傷発生面積割合が低く、果実硬度も高いなど、高い果実品質を維持することが明らかになった（第 21, 22 図）。また、果皮色、果実硬度、糖度はともに、海上輸送と同程度であった。イチゴ果実の貯蔵過程では、果実硬度はただちには低下しないものの（Kohyama ら, 2013）、果実硬度に関与する物質であるペクチン（柏寄ら, 2009）は、微生物の資化により徐々に分解され、収穫直後とは異なる組成比を示すことが知られている（余・邨田, 1994）。輸送期間が長い海上輸送では、時間経過に伴いペクチンの変質や振動、衝撃による疲労の累積、微生物の繁殖などが進行し、輸送後の短期間に品質低下および軟化に伴う損傷を生じやすい。一方で、輸送期間が短い船舶・航空複合一貫輸送を利用することで本現象を回避できる可能性がある。今後、輸送中の成分変化や物理的性質の微細な変化、微生物の繁殖などが着荷後の品質低下に及ぼす影響について、輸送環境を再現する室内実験により詳細に検討する必要がある。

船舶・航空複合一貫輸送において偶発が懸念される、海上輸送と航空輸送の積み替えに際して必要となる短期間の貯蔵および貯蔵前後の衝撃発生は、果皮色を除くイチゴの果実品質に対し明確な影響を及ぼさなかった（実験 3；第 24 図）。前澤・秋元（1995）は、5℃以下で 6 時間以上予冷し、果実硬度を上昇させたイチゴ果実において、予冷終了後に果実硬度が徐々に低下する様子を報告している。実験 3 では、船舶・航空複合一貫輸送では、輸送過程の性質上、中継地での積み替えに際して温度上昇および衝撃発生は、いずれも 6 時間以上にわたる低温遭遇の直後に発生した。航空輸送に比べ輸送期間が長い複合一貫輸送では、海上輸送期間および積み替え時の貯蔵期間が、イチゴ果実に予冷中の果実硬度上昇効

果をもたらすこと、および海上輸送または積み替え時の貯蔵期間終了から、積み替え前による温度上昇、衝撃発生直前までの期間が比較的短いことが、積み替えによる衝撃や温度変化の影響による品質低下を抑制している可能性がある。なお、予冷により上昇したイチゴの果実硬度は、予冷終了後に低下するものの、0～15℃の範囲では、予冷温度が低温であるほど低下が緩やかである（前澤・秋元，1995）。商取引の観点からは、積み替えに際し、一時的な貯蔵を行わないことが理想的ではあるものの、やむを得ず貯蔵が必要となる場合は、あらかじめ適切な包装や品種を用いるとともに、十分な低温条件下で貯蔵することで、イチゴの品質低下を防ぐことが可能であると考えられる。

以上により、船舶・航空複合一貫輸送が、イチゴの長距離輸送に有用であることが実証された。本試験結果から、複合一貫輸送は、輸送後のイチゴの棚もち性が高い点において、海上輸送に対し優位であるだけでなく、海上輸送から航空輸送への積み替えに際し1～2日間程度の貯蔵を行うこともできる偶発的なトラブルへの対応が可能なイチゴの輸送方法であるといえる。現在、青果物の船舶・航空複合一貫輸送は、博多港発沖縄経由アジア向けだけでなく、鹿児島港発沖縄経由を始めとするアジア向け航路でも取り組みが始まりつつある。関東や関西の空港から遠く、航空輸送や海上輸送に不利な地方のイチゴ産地では、各地の小規模コンテナターミナルを経由する本輸送方法を活用することで、低コストなイチゴの長距離輸送を実現することができると考えられる。なお、複合一貫輸送を利用するイチゴ果実の流通業者は、輸送先のイチゴ販売小売店に対し、海上輸送した果実と複合一貫輸送した果実の棚もち性の差異の理解を促し、適切な販売順序や販売形態を考案する必要がある。イチゴにおける船舶・航空複合一貫輸送の活用促進に向けては、このような認識の共有が求められる。

第4節 摘要

イチゴ果実を異なる包装資材を用いてアジア2か国へ航空および海上輸送し、輸送方法別に包装条件が果実品質に及ぼす影響を明らかにした。その結果、航空輸送では、宙吊り型容器を用いることで‘おいCベリー’の果実における損傷発生の低減効果や果実硬度低下の抑制効果が期待できることが示された。海上輸送においては、損傷程度は伸縮性フィルム容器や宙吊り型容器により低減されるものの、MA包装を併用することにより果肉断面の水浸状化などが防止できることが明らかになり、新型容器に加えてMA包装の使用が推奨された。

次に、大規模コンテナターミナルを有さず、海上輸送の利用が困難な地方向けの輸送技術として、イチゴ果実の船舶・航空複合一貫輸送技術を開発した。あらかじめ行った室内貯蔵試験により、MA 包装は 10 日以内にはイチゴ‘恋みのり’の果実品質に影響を及ぼさないことが示され、本輸送方法の輸送日数では、MA 包装は不要であると考えられた。そこで、MA 包装を利用せず、宙吊り型容器を利用して九州産‘恋みのり’を香港へ複合一貫輸送したところ、香港到着直後には海上輸送と同程度の、到着数日後には海上輸送以上の高い果実品質が維持された。また、海上輸送から航空輸送への積み替え時における 1~2 日間の貯蔵も、香港到着後の果実品質には影響しないことが示された。本研究により船舶・航空複合一貫輸送に適したイチゴ果実の包装条件が示されるとともに、本輸送方法が棚もち性の観点からは海上輸送に対し優れること、輸送中の一時貯蔵も可能であることなどから、イチゴの長距離輸送に有効であることが示唆された。

第5章 総合考察

日本産イチゴ果実の流通中における物理的損傷の発生を抑制するため、損傷の特性解明およびその特性にもとづいた発生抑制技術の開発に取り組んだ。

まず、第2章において、イチゴ果実に生じる二つの主要な物理的損傷であるオセとスレについて、損傷特性を解明した。従来、オセはイチゴ果実の自重に伴う容器への圧迫により発生するもの、スレはイチゴ果実同士や果実と容器などとの摩擦により発生するもの（多々良ら、1999）として理解されているが、発生機構および発生箇所の詳細は不明である。レーザー顕微鏡を用いてオセおよびスレが発生した果実の表面および内部の形態を詳細に観察した。オセの発生に伴い果肉細胞の面積が減少しており、果肉細胞が圧縮されていることが示された。一方、スレの発生に伴い果実表面に微細な皺が発生し、果実の表面粗さと果皮細胞の面積が増加しており、果実表面が変形していることが示された。興味深いことに、オセが発生した果実では、果皮細胞が変形することなく果肉細胞のみが変形しており、果実に作用した外力が、果皮には大きな影響を及ぼすことなく果肉に作用していることが示された。加えて、これまでに、イチゴ果実にオセが発生した場合、発生箇所の細胞は破裂し内容物を放出していると推測されていたが（Holt・Schoorl, 1982）、オセおよびスレのいずれにおいても、発生箇所の細胞における内容物の放出は認められなかった。オセおよびスレがいずれも微視的には細胞の変形であり、破壊ではないということは、イチゴ果実の細胞が、果皮、果肉を問わず、外力により崩壊しにくい性質を持つこと、オセやスレの発生を抑制するためには、果皮や果肉細胞の変形を抑制する必要があることを示していると考えられる。

第3章では、オセが発生しにくいイチゴ品種を育成する方法として、新たな選抜指標を提案した。一般的に、果実に損傷が発生しにくいイチゴを育種する場合、果実硬度にもとづいた選抜が行われる（森、2000）。一方、オセは外力による果肉細胞の圧縮であり、果皮や果肉の破壊ではない。したがって、果実の破壊されにくさをあらわすと考えられる果実硬度は、オセとさほど深く関係していないとの仮説を立てた。実際に、2つの包装条件下にて国内外のイチゴ遺伝資源を用いた輸送試験を実施し、果実硬度とオセの発生しやすさとの関係を調査したところ、片方の包装条件では両者は無関係であった。新たな選抜指標として、見かけ弾性率、すなわち果実の変形しやすさを提案して検討したところ、いずれの包装条件においてもオセの発生しやすさとの間に関係性が検出され、果実硬度に代わる選抜指標として見かけ弾性率を利用できる可能性が示された。なお、見かけ弾性率は、

果実硬度とは異なり、スレの発生しやすさとの間には関係が認められなかった。大竹・田中（1988）は、スレの発生には果実表面のうちごく薄い範囲の物理的性質が関与していると指摘している。現在、果実表面および内部の物理的性質を区別して評価する方法として、果皮硬度および果肉硬度を測定する方法（門馬ら，1977）や、果実硬度および Thumb rubbing test を併用する方法があり、日本の育種現場では前者が、欧米の育種現場では後者がしばしば利用されている（Lewers ら，2017；門馬・上村，1985；森，2000；Whitaker ら，2011）。一方、これらはいずれもオセおよびスレの発生しやすさを直接区別するものではない。今後、イチゴ育種における選抜指標として見かけ弾性率と果皮硬度を併用することで、果実のオセおよびスレの発生のしやすさを区別して評価し、選抜を行える可能性がある。

見かけ弾性率をイチゴの選抜指標として利用する場合、選抜を行う条件を適切に定める必要がある。そこで、貯蔵および収穫時期による見かけ弾性率の変動を調査した。貯蔵した果実および収穫時期が進んだ果実では、いずれも見かけ弾性率が低下すること、品種により低下程度が異なることが明らかになった。つまり、見かけ弾性率を選抜指標として利用する際、貯蔵条件や収穫日が異なる果実を比較することは不適切であるといえる。加えて、見かけ弾性率の遺伝特性を検討したところ、見かけ弾性率の広義の遺伝率は高く、優性効果は小さく、 F_1 において選抜効果が高いことや、相加的遺伝効果が大きいことが期待された。これらの遺伝特性は、過去に報告された果実硬度の遺伝特性とおおむね同傾向である。見かけ弾性率を用いた選抜を行う場合、果実硬度を用いる場合と同様に、遺伝子を集積した優良母本の作出および利用（森，2000）が有効であると考えられる。さらに、見かけ弾性率と果皮、果肉硬度との表現型相関は強かった。見かけ弾性率を選抜指標として利用する場合、果皮、果肉硬度との併用効果は低いと推測された。

日本では損傷が発生しにくいイチゴの育種が遅れていることが指摘されている（望月，2000；森下，1994）。現在、日本で商用栽培されているイチゴ品種は数十品種あり、このうち本章で供試した‘恋みのり’のほか、‘やよいひめ’、‘ゆめのか’などで見かけ弾性率が高いことが明らかになりつつある（安部ら，2020）。見かけ弾性率を選抜指標として、これらの品種を育種素材としてそれぞれ利用した育種が早急に進むことが望まれる。

育種的手法による発生抑制が困難と考えられるスレに関しては、第 4 章において、包装や輸送方法の改善による発生抑制を試みた。包装、輸送技術は、天候不順や高温などによりイチゴ果実の物理的性質が悪化する場合や、輸送が長期間、長距離間に及ぶ輸出などの場合を考慮すると、スレの発生抑制だけでなくオセの発生抑制の観点からも必要性が高い。

まず、航空輸送および海上輸送による長距離輸送において、新型容器および MA 包装の併用が損傷発生に及ぼす影響を検討した。その結果、いずれの輸送方法においても、新型容器による損傷発生抑制効果が認められた。これまでに、イチゴの輸送では水平方向の振動が損傷発生に大きく影響すること、振動により果実同士が接触すると接触面において損傷およびカビが発生することが指摘されていた（相川ら，2008；中村ら，2007；多々良ら，1999）。本章で用いた新型容器はいずれも、水平方向に加振しても果実同士が接触しない構造であり、既報が指摘した接触面の損傷やカビを回避するものであった。ただし、輸送期間が長い海上輸送では、物理的損傷の発生に加え、呼吸によるとみられる果実断面の劣化が認められた。このため、新型容器に加え MA 包装を併用し、果実の代謝を抑制する必要性が示唆された。以上、イチゴの長距離輸送時の包装技術として、航空輸送では新型容器、海上輸送では新型容器と MA 包装の併用が適切であることを整理した。現在、輸送コスト削減や輸送能力向上のため、新型容器の寸法の見直しが行われ、航空輸送や海上輸送におけるパレット積載効率の改善が進められている（大石ら，2020）。また、本章で用いた MA 包装は新型容器を 1 個ずつ包装するものであったが、多数の新型容器をまとめて包装するバルクタイプの MA 包装の検討が進みつつある（私信）。今後は、適切な包装を用いて輸送中におけるイチゴ果実の損傷発生を抑制すると同時に、これらの輸送効率や省力性を向上させる取り組みを加速させることが重要である。

また、近年では、航空輸送、海上輸送ともに、空港および港湾のインフラストラクチャーが脆弱な地方においては、輸送日数がいっそう長大となることが問題となっている（中川・甲斐，2020）。そこで、航空輸送、海上輸送に代わるイチゴの新たな輸送方法として、地方の小規模コンテナターミナルおよび国際物流拠点を利用した船舶・航空複合一貫輸送を試みた。これまでに青果物の複合一貫輸送はほとんど例がないが（広瀬ら，2011）、福岡発香港向けの輸送試験において、見かけ弾性率や果皮硬度が高い品種および新型容器を用いることで、損傷発生を海上輸送と同等程度に抑制できること、着荷後の果実品質低下を海上輸送に比べより抑制できることが認められた。また、海上輸送から航空輸送への積み替えに際し、果実を 2 日間程度一時貯蔵できることも実証された。船舶・航空複合一貫輸送は、海上輸送に対し輸送期間が短いため、果実の呼吸による品質低下が生じにくく、MA 包装を必要としない。船舶・航空複合一貫輸送は輸送経路の一部に航空輸送と利用するため、海上輸送に対し輸送コストは増えるものの、MA 包装が不要となることで、包装の手間や資材コストの削減が見込まれる。また、イチゴ果実に対する MA 包装は、二酸化

炭素濃度の上昇に伴う不快臭の発生原因となるとの指摘もあることから（飯村ら，2017），MA包装を省略して輸送した果実は，品質面でも優れる可能性がある．MA包装を必要としない船舶・航空複合一貫輸送は，航空輸送，海上輸送に続くイチゴ果実輸送の新たな選択肢となることが期待される．

本研究を通じ，オセおよびスレの発生機構が明らかになり，損傷が発生しにくい品種を育成し適切な包装，輸送方法を利用することで，輸送中の損傷発生を抑制できることが明らかとなった．

英文要約

To prevent physical damage to strawberry fruits, such as bruises and scratches, during distribution, it is necessary to identify the characteristics of the possible damage and take measures accordingly. This study aimed to elucidate the characteristics of bruises and scratches on strawberry fruits and develop breeding, packaging, and transportation techniques based on the identified characteristics.

The morphological characteristics of physical damage in strawberry fruits were clarified using a laser microscope. No morphological change was observed in the fruit skin at the bruised area, but the cell area of fruit flesh was reduced, indicating that the bruise was caused by compression of flesh cells, when they encountered external forces. In contrast, scratches included fine wrinkles on the fruit skin, indicating that they were a deformation of the fruit surface. To reduce bruises, it may be effective to breed varieties with skins that are less likely to transmit external forces to the fruit inside and flesh cells that are less likely to be compressed. To reduce scratches, it may be effective to reduce the frictional force between the fruit and other objects by smoothing the fruit skin via postharvest treatment. Alternatively, varieties with skin cells that are less susceptible to deformation can be bred to reduce scratches. In addition, improving packaging and transportation methods can help reduce both bruises and scratches by reducing the force acting on the fruit.

To breed strawberries that are less susceptible to bruising, a selection index that has a strong relationship with bruising susceptibility is needed. The generally used selection indices, namely skin firmness and flesh firmness, showed weak or no correlation with the percentage of bruises in the fruit surface area; this depended on the transportation conditions. In some cases, the percentage of not only bruises but also scratches showed correlation with skin and flesh firmness. In contrast, the apparent modulus of elasticity—which was calculated by adding the penetration deformation and the cross-

sectional area of the plunger to the skin firmness—was correlated with the area proportion of bruises regardless of the transportation conditions, suggesting that it could be used as a selection index for strawberries with fewer bruises. However, the apparent modulus of elasticity decreased in both stored and harvested fruits, and the degree of decrease differed among varieties. This means that fruits with different storage conditions and harvest dates should not be compared when using apparent modulus as a selection index. Apparent elasticity tended to be higher in recently bred Japanese varieties and lines and showed a high heritability, which will likely exhibit a high selection effect in F1. The results also indicated that the dominance effect was small, and the additive genetic effect was large. Further, the phenotypic correlation between apparent elasticity and skin and flesh firmness was also strong, suggesting that the combined effect of apparent elasticity and skin and flesh firmness is expected to be low when apparent elasticity is used as a selection index.

In the present study, strawberry fruits were transported by air and sea to two Asian countries using different packaging materials, and the effects of packages on fruit quality were investigated. The results showed that the use of hammock packages for 'Oishi Berry' were effective in reducing the fruit damage and suppressing the decline in fruit firmness during air transportation. In the case of transportation via sea, the degree of damage was generally reduced by using elastic film packages and hammock containers; however, the use of MAP prevented the deterioration of flesh cross-sectional appearance, suggesting that the use of MAP in addition to packages can be beneficial. The degree of damage was highly correlated with the percentage of damaged fruit regardless of the presence or absence of MAP, variety, or transportation methods.

Next, we developed an intermodal transportation technology for strawberry fruits by sea and air for regions that do not have large container terminals and where sea transportation is difficult. Laboratory experiment showed that MAP did not affect the quality of 'Koiminori' strawberries within ten days, suggesting that MAP is not necessary for the number of days required for this transportation method. Thereafter, we conducted an intermodal transportation of 'Koiminori' strawberries from Kyushu to Hong Kong using a hammock package without MAP and found that the quality of fruit transported via this method was same as the level obtained immediately after arrival via sea transportation in Hong Kong. Moreover, the fruit quality using our transportation method was higher than that achieved via sea transportation several days after arrival. The results also indicated that one to two days of storage during transshipment from sea to air did not affect fruit quality after arrival in Hong Kong. This study

showed that the packages of strawberry fruits are suitable for sea and air transportation, and that the intermodal transportation method developed in the present study is superior to sea transportation in terms of shelf-life and is flexible in terms of temporary storage during transportation, suggesting that our method is effective for the long-distance transportation of strawberries.

引用文献

- 阿部一博. 1986. 都市近郊農業とコールドチェーン. 食品と低温. 12: 63–69.
- 安部良樹・佐野一成・高木喜保・鶴岡克彦・櫛野智也. 2020. イチゴ新品種の流通加工品質向上に関する研究. 大分産技セ研報. <<https://www.oita-ri.jp/kankoubutu/kenkyuuhoukoku-r1/>>. 2022年10月19日閲覧.
- 相川勝弘・浅井良夫・高橋孝則. 2007. 25°Cで保存したイチゴおよびチェリーにおけるカビの発育状況. 食衛誌. 49: 106–110.
- 青柳光昭・牧野 朗. 1981. イチゴ果実の品質保持に対する収穫熟度と低温流通の効果. 園学雑. 49: 583–591.
- 馬場紀子・江嶋亜祐子・大石高也・折野太陽・車 政弘・安武正剛・宮崎良忠・樺島勝・渡邊健太郎. 2012. 宙吊り型イチゴ用出荷容器の開発 第1報 宙吊り型容器の傷防止効果. 福岡農総試研報. 31: 27–31.
- Cheng, S., X. Shao, A. Guo and Y. Song. 2011. Effects of tea tree oil fumigation on disease and quality of postharvest strawberry fruits. TCSAE. 27: 383–388.
- Darrow G. M. 1966. The Morphology and Physiology of the Strawberry. p. 314–334. The Strawberry: History, Breeding, Physiology. Holt, Rinehart and Winston. New York.
- 独立行政法人日本貿易振興機構. 2013. 2012年度主要国・地域における流通構造調査 イチゴ編. <https://www.jetro.go.jp/ext_images/jfile/report/07001110/strawberry-rev.pdf>. 2022年7月22日閲覧.
- Duran M., M.S. Aday, N.N.D. Zorba, R. Temizkan, M.B. Büyükcan and C. Caner. 2016. Potential of antimicrobial active packaging ‘containing natamycin, nisin, pomegranate and grape seed extract in chitosan coating’ to extend shelf life of fresh strawberry. Food Bioprod. Process. 98: 354–363.
- 江嶋亜祐子・馬場紀子・大石高也・折野太陽. 2012. 宙吊り型イチゴ用出荷容器の開発 第2報 通気性の改善. 福岡農総試研報. 31: 32–35.
- FAO. 2019. FAOSTAT. <<https://www.fao.org/faostat/en/#home>>. 2021年11月30日閲覧.
- Ge, Z., D. Liu, T. Ding, Y. Xu and J. Zhong. 2013. Ultrasound combined with slightly acidic electrolyzed water treatment improves quality of immature strawberry. TCSAE. 29: 265–270.
- Han C., Y. Zhao, S.W. Leonard and M.G. Traber. 2004. Edible coatings to improve storability and

- enhance nutritional value of fresh and frozen strawberries (*Fragaria × ananassa*) and raspberries (*Rubus ideaus*). *Postharvest Biol. Technol.* 33: 67–78.
- Harker, F. R., H. J. Elgar, C. B. Watkins, P. J. Jackson and I. C. Hallett. 2000. Physical and mechanical changes in strawberry fruit after high carbon dioxide treatments. *Postharvest Biol. Technol.* 19: 139–146.
- 長谷川美典. 1998. 青果物品質保持の新技术. 農機学誌. 60: 174–180.
- 平野稔彦・茨木俊行・山下純隆・馬場紀子・松本明芳. 1988. イチゴの流通技術 第3報 低温及び包装が鮮度保持に及ぼす影響. 福岡農総試研報 B. 8: 59–62.
- 広瀬直人・前田剛希・宮城聡子・照屋 亮・大城良計. 2011. 宮古島産マンゴの船舶・航空複合輸送試験. 沖縄農研セ研報. 5: 32–38.
- Holt, J. E. and D. Schoorl. 1977. Bruising and energy dissipation in apples. *J. Texture Stu.* 7: 411–432.
- Holt, J. E. and D. Schoorl. 1982. Strawberry bruising and energy dissipation. *J. Texture Stu.* 13: 349–357.
- 飯村一成・大橋 隆・小林泰弘・大橋幸雄・重野 貴・中西達郎. 2017. 長期輸送に対応できるイチゴの鮮度および品質保持技術. 栃木農試研報. 75: 45–53.
- Ingle, M. and Hyde, J. F. 1968. The effect of bruising on discoloration and concentration of phenolic compounds in apple tissue. *Proc. Am. Soc. Hort. Sci.* 93: 739–745.
- 石原良行・高野邦治・植木正明・栃木博美. 1996. イチゴ新品種「とちおとめ」の育成. 栃木農試研報. 44: 109–123.
- 石川 豊：北澤裕明・今野 勉. 2013. 航空便と船便による果実輸出中に発生する衝撃比較, 日食保科誌. 39: 25–30.
- Ishikawa, Y., H. Kitazawa and T. Shiina. 2009. Vibration and shock analysis for fruit and vegetables transportation— Cherry transport from Yamagata to Taiwan by airplane—. *JARQ.* 43: 129–135.
- 岩元睦夫・河野澄夫・早川 昭. 1980. 青果物輸送の等価再現化に関する研究 (第3報) —-損傷に影響する振動衝撃加速度パワースペクトルの評価—-. 農機学誌. 42: 69–74.
- 兼田朋子・中村宣貴・安永円理子・志水基修・馬場 正・福田文夫・中野龍平. 2021. イチゴの東南アジア向け海上輸出実現に向けた輸送環境および包装による品質保持効果. 日食保科誌. 47: 221–231.

- 金子勝芳・橋詰和宗・小沢百合子・増田亮一. 1988. イチゴの凍結および凍結貯蔵中における品質変化. 食総研報. 52: 18–24.
- 柏寄 勝・永末 健・五月女英平・中島教博・大森定夫. 2007. イチゴ果実硬度の非破壊測定に関する基礎的研究（第1報）果実硬度と細胞壁構成成分の関係. 農機学誌. 69: 49–56.
- 柏寄 勝・永末 健・五月女英平・中島教博・大森定夫. 2009. イチゴ果実硬度の非破壊測定に関する基礎的研究（第2報）果実表面吸光度スペクトルを用いた果実硬度推定モデルの開発. 農機学誌. 71: 90–97.
- Ke, D., L. Zhou and A. A. Kader. 1994. Mode of oxygen and carbon dioxide action on strawberry ester biosynthesis. J. Amer. Soc. Hort. Sci. 119: 971–975.
- 北村八祥・森 利樹・小堀純奈・山田信二・清水秀巳. 2015. 極早生性を有するイチゴ炭疽病抵抗性品種‘かおり野’の育成と普及. 園学研. 14: 89–95.
- 北澤裕明・石川 豊・中村宣貴・椎名武夫. 2008. イチゴ輸送中の損傷を防止する新たな包装形態. 日食保科誌. 34: 19–23.
- 北澤裕明・石川 豊・路 飛・胡 耀華・中村宣貴・椎名武夫. 2010. イチゴ輸送中の衝撃解析と損傷発生予測. 園学研. 9: 221–227.
- Kohyama K., T. Masuda, H. Shimada, T. Tanaka and Y. Wada. 2013. A simple mechanical index of storage quality of strawberry fruits. Rep. Nat'l Food Res. Inst. 77: 1–11.
- 国土交通省. 2020. 港湾別コンテナ取扱量（TEU）ランキング（2020年速報値）. <<https://www.mlit.go.jp/common/001358394.pdf>>. 2022年7月26日閲覧.
- 国土交通省航空局. 2009. Sea&Air 輸送の推進に関する調査・検討業務報告書. <<http://www.mlit.go.jp/common/000040217.pdf>>. 2022年7月26日参照.
- モーゼニン N. N. 1982. 機械的損傷. 食品の物性（林 弘通訳）. p. 370–479. 光琳出版. 東京.
- Larsen, M. and C. B. Watkins. 1995. Firmness and concentrations of acetaldehyde, ethyl acetate and ethanol in strawberries stored in controlled and modified atmospheres. Postharvest Biol. Technol. 5: 39–50.
- Lee, V. 1966. Early history of the strawberry. p. 15–23. Darrow G. M. (ed). The Strawberry: History, Breeding, Physiology. Holt, Rinehart and Winston. New York.
- Lewers, K. S., Castro, P. R., Enns, J. M., Hokanson, S. C., Galletta, G. J., Handley, D. T., Jamieson A.

- R., Newell M. J., Samtani J. B., Flanagan R. D., Smith B. J., Snyder J. C., Strang J. G., Wright S. R. and Weber, C. A. 2017. 'Flavorfest' strawberry. *HortScience* 52: 1627–1632.
- Li, C. and A. A. Kader. 1989. Residual effects of controlled atmospheres on postharvest physiology and quality of strawberries. *J. Amer. Soc. Hort. Sci.* 114: 629–634.
- Liao, C. H. and G. M. Sapers. 2000. Attachment and growth of *Salmonella* Chester on apple fruits and in vivo response of attached bacteria to sanitizer treatments. *J. Food Prot.* 63: 876883.
- 前澤重禮・秋元浩一. 1995. イチゴ果実のポストハーベスト品質に及ぼす収穫熟度と予冷条件の影響. 岐阜大農学部研報. 60: 65–73.
- Martínez, K., M. Ortiz, A. Albis, C. Gilma Gutiérrez Castañeda, M. E. Valencia and C. Grande Tovar. 2018. The effect of edible chitosan coatings incorporated with *Thymus capitatus* essential oil on the shelf-life of strawberry (*Fragaria × ananassa*) during cold storage. *Biomolecules* 8: 155.
- 三菱 UFJ リサーチ&コンサルティング. 2019. 平成 30 年度農産物等の物流拠点等に関する調査委託事業調査報告書. <<https://www.maff.go.jp/j/shokusan/ryutu/attach/pdf/buturyu-107.pdf>>. 2022 年 7 月 25 日閲覧.
- 三井寿一・藤田幸一・末吉孝行・伏原 肇. 2003. イチゴ新品種 '福岡 S6 号', '福岡 S7 号' の育成. 福岡農総試研報. 22: 61–68.
- 望月龍也. 2000. わが国におけるイチゴ育種研究の成果と展望. 育学研. 2: 155–163.
- 望月龍也・稲川 裕・船倉英一郎・野口裕司・曾根一純. 2001. 促成イチゴ果実における日持ち性の評価方法と品種間差異. 野菜試報. 16: 1–7.
- 門馬信二・上村昭二. 1985. イチゴ果実における果皮及び果肉の硬さの遺伝. 野菜試報 B. 5: 49–59.
- 門馬信二・上村昭二・吉川宏昭. 1977. イチゴ果実の硬さ測定法と品種間差異. 野菜試報 B. 1: 1–11.
- 森 利樹. 2000. イチゴの果実硬度に関する遺伝率と選抜の効果. 園学雑. 69: 90–96.
- 森 利樹・戸谷 孝・藤原孝之. 2000. 炭そ病抵抗性イチゴ新品種 'サンチーゴ' の育成. 三重農技セ研報. 27: 27–36.
- 森下昌三. 1994. イチゴの品質・収量に関する育種学的研究. 野菜茶試研報 A. 8: 1–53.
- Myung, K., T. R. Hamilton-Kemp, D. D. Archbold. 2006. Biosynthesis of *trans*-2-hexenal in response to wounding in strawberry fruit. *J. Agric. Food Chem.* 54: 1442–1448.

- 中川敬基・甲斐 諭. 2020. 日本産イチゴの香港向け輸出の現状と今後の課題：あまおうを中心として. 流通科学研究. 20: 9–18.
- 中村宣貴. 2019. 青果物の輸送時の振動損傷に関する研究の現状. 日食科工誌. 66: 397–407.
- 中村宣貴・坂本宏平・兼田朋子・永田雅靖・椎名武夫. 2019. イチゴ果実輸出における国内トラック輸送中の振動特性評価および3次元ランダム振動試験の実施. 農業施設 50: 99–106.
- 中村宣貴・梅原仁美・根井大介・岡留博司・石川 豊・中野浩平・前澤重禮・椎名武夫. 2008. 包装条件の違いがイチゴ果実の損傷に及ぼす影響. 農業施設 39: 1–18.
- 中村宣貴・梅原仁美・岡留博司・中野浩平・前澤重禮・椎名武夫. 2007. 振動周波数及び振動方向がイチゴ果実の損傷に及ぼす影響. 農業施設 38: 101–108.
- Nakamura, N., Y. Inatsu, S. Kawamoto, T. Shiina, K. Nakano and A. Maezawa. 2007. Effect of vibration on the bacterial growth on strawberry fruits. J. Food, Agric. Environ., 5: 44–48.
- 西澤 隆. 2017. イチゴの作型. まるごとわかるイチゴ. 誠文堂新光社. 東京. p. 52–130.
- 野口裕司. 2002. 日本の温暖地域におけるイチゴ促成栽培の安定化と適性品種育成に関する基礎的研究. 野茶研報. 1: 37–95.
- 野並 浩. 2001. 細胞壁の構造と細胞壁伸展. 植物水分生理学. 養賢堂. 東京. p. 179–201.
- 農林水産省. 2007. 品目別経営統計. <<https://www.maff.go.jp/j/tokei/kouhyou/noukei/hinmoku/index.html>>. 2022年7月15日閲覧.
- 緒方邦安. 1975. コールドチェーンにおける青果物の品質保持に関する諸問題. コールドチェーン研究 1(2): 3–11.
- 大石高也・松本 亨・瀬脇康弘・馬場紀子・江嶋亜祐子・白石敏則・新谷亮介・椎木伸幸. 2009. 超小型センサを利用した農産物用流通資材の機能性及び環境負荷評価. 第4回日本LCA学会研究発表会講演要旨集. 10–11.
- 大石高也・曾根一純・小林俊裕・田中慎司. 2020. イチゴの高鮮度保持・低コスト海上輸送技術. <https://www.naro.go.jp/laboratory/brain/h27kakushin/chiiki_2020_result-c211-y04.pdf>. 2022年8月5日閲覧.
- 岡田夕佳. 2012. シー・アンド・エア輸送と港. 池上 寛編. 『アジアにおける海上輸送と主要港湾の現状』調査研究報告書. 日本貿易振興機構アジア経済研究所. 千

葉. p. 19–28.

大北勝久・雨宮 孝. 2010. 複数モードを利用した国際複合一貫輸送システムの最適化のための基礎的考察. 経営情報研究 18: 93–114.

大竹良知・田中喜久. 1988. パック詰め前予冷によるイチゴ果実の鮮度保持. 愛知農総試研報. 20: 260–268.

Pelayo, C., S. E. Ebeler and A. A. Kader. 2003. Postharvest life and flavor quality of three strawberry cultivars kept at 5 C in air or air+ 20 kPa CO₂. Postharvest Biol. Technol. 27: 171–183.

Pérez, A. G. and C. Sanz. 2001. Effect of high-oxygen and high-carbon-dioxide atmospheres on strawberry flavor and other quality traits. J. Agric. Food Chem. 49: 2370–2375.

佐藤 裕・成河智明. 1985. イチゴの品質育種に関する研究 第 1 報 ペクチン質の品種間差異と硬度. 九農研. 47: 218.

佐藤 裕・山川 理. 1989. 生食用イチゴ果実の品質評価と選抜法. 野茶試研報 D. 2: 19–27.

佐藤 裕・山川 理・本多藤雄. 1986. イチゴ果実成熟過程における品質の品種間差異. 野菜試報 C. 9: 23–30.

佐藤 裕・山川 理・野口裕司. 1987. イチゴの品質育種 第 3 報 果実内成分と果肉硬度および肉質との関係. 九農研. 49: 218.

Szczesniak, A. S. and B. J. Smith. 1969. Observations on strawberry texture a three-pronged approach. J. Texture Studies 1: 65–89.

車 政弘・安武正剛・大石高也・折野太陽・馬場紀子・宮崎良忠・松本 亨. 2010. 福岡県産イチゴ「あまおう」の長距離輸送用パッケージデザイン開発. 日本デザイン学会研究発表大会概要集. 57: 228–229.

Shao X., H. Wang, F. Xu and S. Cheng. 2013. Effects and possible mechanisms of tea tree oil vapor treatment on the main disease in postharvest strawberry fruit. Postharvest Biol. Technol. 77: 94–101.

曽根一純. 2011. 八部着色イチゴ果実の MA 包装と低温貯蔵を組み合わせた鮮度保持技術. 農業および園芸. 86: 713–719.

曽根一純・伊東良久・沖村 誠. 2010. 輸送に伴う機械的損傷を大幅に軽減できるイチゴ容器の開発. 園学研. 9 (別 2) : 598.

多々良泉・辻 聡宏・御厨初子・田中政信・劉 蚊艶・小島孝之・太田英明. 1999. 輸送

過程で発生する振動がイチゴの呼吸速度および品質に及ぼす影響. 日食保蔵科誌. 25: 15–20.

Tripathi P. and N.K. Dubey. 2004. Exploitation of natural products as an alternative strategy to control postharvest fungal rotting of fruit and vegetables. *Postharvest Biol. Technol.* 32: 235–245.

Ueda, Y. and J. Bai. 1993. Effect of short term exposure of elevated CO₂ on flesh firmness and ester production of strawberry. *J. Japan. Soc. Hort. Sci.* 62: 457–464.

Vargas, M., C. Pastor, A. Albors, A. Chiralt and C. González-Martínez. 2008. Development of edible coatings for fresh fruits and vegetables: possibilities and limitations. *Fresh Prod.* 2: 32–40.

Wang, H., H. Feng, W. Liang, Y. Luo and V. Malyarchuk. 2009. Effect of surface roughness on retention and removal of *Escherichia coli* O157:H7 on surfaces of selected fruits. *J. Food Sci.* 74: E8–E15.

Wang, S. Y., and H. Gao. 2013. Effect of chitosan-based edible coating on antioxidants, antioxidant enzyme system, and postharvest fruit quality of strawberries (*Fragaria x aranassa* Duch.). *LWT-Food Sci. Tech.* 52: 71–79.

王 世清・田中俊一郎・守田和夫・田中史彦. 1997. イチゴの貯蔵に関する基礎的研究. 農業施設 27: 207–215.

Washington W. S., N. Shanmuganathan and C. Forbes. 1992. Fungicide control of strawberry fruit rots, and the field occurrence of resistance of *Botrytis cinerea* to iprodione, benomyl and dichlofluanid. *Crop Protect.* 11: 355–360.

Whitaker, V. M., Hasing, T., Chandler, C. K., Plotto, A. and Baldwin, E. 2011. Historical trends in strawberry fruit quality revealed by a trial of University of Florida cultivars and advanced selections. *HortScience* 46: 553-557.

山下市二. 1998. 野菜の MA 包装における機能性フィルムの利用. 日食工誌. 45: 711–718.

余 小林・邨田卓夫. 1994. イチゴ果実貯蔵中の品質変化に及ぼす高温処理の影響. 日食保蔵誌. 20: 169–174.

吉田一朗. 2012. 表面粗さ—その測定方法と規格に関して—. 精工誌. 78: 301–304.

謝辞

本論文の取りまとめに当たり、京都大学大学院農学研究科教授 土井元章博士に懇切なご指導と丁寧な御校閲を賜りました。また、京都大学大学院農学研究科教授 田尾龍太郎博士、京都大学大学院農学研究科准教授 中野龍平博士より貴重なご意見を賜りました。研究全般にわたっては、農研機構九州沖縄農業研究センター施設野菜グループの曾根一純博士には数々の有益な御助言と励ましをいただきました。ここに深く感謝の意を表します。

第2章第2節および第3節におけるレーザー顕微鏡の使用に当たり、香川県産業技術センターの熱田俊文博士、松島康晴博士にご協力をいただきました。また、イチゴ品種の栽培管理のため、農研機構西日本農業研究センターの施設園芸グループの矢野孝喜氏、山中良祐氏、契約職員各位ならびに西日本技術支援センター西日本第2業務科の職員各位に御尽力いただきました。

第3章第2節における輸送試験に当たり、元農研機構九州沖縄農業研究センター農業技術研修生の栗山憲一氏および農研機構野菜花き研究部門の片岡園博士にご協力をいただきました。また、多数のイチゴ品種の栽培管理のため、農研機構九州沖縄農業研究センターのイチゴ育種研究グループ契約職員各位ならびに九州沖縄技術支援センター九州第2業務科の職員各位、農業技術研修生各位に御尽力いただきました。

第4章第2節におけるシンガポールへの輸送試験に当たり、YAOYA Fresh energy PTE. LTD の Mr. Katsuya Komatsuzaki, (有) 万英の玉城美佳氏および Isetan Singapore の皆様に多大なるご協力を頂きました。また、タイへの輸送試験に当たり、(株) ジャルックスアジアの宮崎亮二氏、Isetan (Thailand) Company Limited の辻基之氏および Isetan Bangkok の皆様に多大なるご協力を頂きました。両国への輸送試験の遂行全般に当たっては、イチゴ生産者の山下陽市氏、栗原雄一郎氏および GLO-berry Japan (株) の伊東良久氏にご尽力頂きました。さらに、第3節における香港への輸送試験に当たり、山下陽市氏(前出)、(株) まるむね、熊本宇城農業協同組合の皆様よりイチゴ果実をご提供いただいたとともに、大石産業(株)の大石高也氏、日本通運(株)の小林俊裕氏、松下孝一氏、文美玲氏、佐藤優介氏、(株) 八百岳の田中慎司氏、AEON Stores (Hong Kong) Co., Limited, AEON TOPVALU (HONG KONG) Co., Limited および香港日本通運(株)の皆様、イオン九州(株)の福山博久氏に多大なるご協力をいただきました。

なお、第3章第2, 3節および第4章第3節における試験の一部は、平成28年度革新的技術開発・緊急展開事業(うち地域戦略プロジェクト)「イチゴの省エネ栽培・収量予測・

低コスト輸送技術の融合による販売力・国際競争力の強化」により実施しました.