

総説

繰り返し衝撃による青果物の蓄積疲労損傷の評価と対策

北澤 裕明*

Evaluation and Countermeasure of Damage Due to Cumulative Fatigue Induced by Repetitive Shock to Fresh Produce

Hiroaki KITAZAWA*

流通中の青果物は、一回の応力よりも繰り返しの応力によって疲労が蓄積し損傷することが多い。この点を踏まえ、青果物の振動による蓄積疲労損傷の評価に関する研究が数多く行われてきた。一方、繰り返し応力の発生要因として繰り返し衝撃を想定した研究事例は少なかった。繰り返し衝撃による蓄積疲労損傷を正しく評価し、緩衝包装設計などの対策を講じるためには、これまでにない理論の構築と実輸送を想定した条件下における理論の実証が不可欠であった。本総説では、理論構築の背景にある先行研究についてレビューするとともに、新しい理論構築とその実証のために実施された研究について解説する。最後に、関連する新しい研究事例を紹介するとともに今後の展望を述べる。

Fresh produce is usually damaged by repetitive stress rather than a single event of stress. Vibration being one of the major sources of cumulative fatigue, multiple studies carried out previously have focused on the evaluation of cumulative damage on fresh produce due to vibration. However, repetitive shock could also be a source of cumulative fatigue and yet very few studies have been carried out on the damage to fresh produce. In order to evaluate cumulative fatigue accurately and to design countermeasures such as cushioning packaging for fresh produce, it was necessary to propose and validate a new theory considering actual transport conditions. This paper reviews past studies related to this topic, explains new research cases, and describes the future prospect for the same.

キーワード：青果物、繰り返し衝撃、蓄積疲労、緩衝包装

Keywords：Fresh produce, Repetitive shock, Cumulative fatigue, Cushioning packaging

1. 緒言

我が国の野菜および果物（青果物）の流通環境は、世界の中では比較的高い水準に位置していると考えられる。しかし、食料需給表¹⁾から見積もられる野菜および果物の減耗率は、ここ数年それぞれ10%および17%あたりで推移している。ま

た我が国は、青果物を含めた農産物の輸出額を2019年に1兆円規模に拡大することを目標としているが²⁾、輸出の拡大にともなって、将来、国内では想定されてこなかった流通環境や長距離輸送を考慮しなければならぬ場面が増加してくるものと想定される。つまり、青果物の国

* 国立研究開発法人農業・食品産業技術総合研究機構, Food Research Institute, NARO.

* 連絡者(Corresponding author), 北澤裕明. 〒305-8642 茨城県つくば市観音台 2-1-12, (2-1-12, Kannondai, Tsukuba, Ibaraki 305-8642, Japan)
TEL:029-838-7191, FAX:029-838-7996, Email:ktz@affrc.go.jp

内外いずれにおける流通を想定した場合においても、損傷防止を含めた品質保持対策が今後より一層、重要になるといえる。

本総説では、青果物の繰り返し衝撃による蓄積疲労損傷に焦点を当て、関連した研究および理論の現状について解説するとともに、評価と対策に関する研究事例について解説する。

2. 衝撃による青果物の損傷評価に関わる これまでの研究状況

物品の中には、1回の応力によっては損傷しないものの、繰り返し応力を受けることによって疲労が蓄積し損傷、すなわち蓄積疲労によって損傷するものがある^{3),4)}。工業製品の分野では、これまでに蓄積疲労損傷の評価および再現に関する研究が行われてきた。例えば、津田ら⁵⁾は、被包装物の振動耐久性を蓄積疲労に基づき評価することによって、シミュレーション試験における損傷再現性の向上を図った。また、細山・中嶋⁶⁾は、振動波形における尖度を考慮することによる非ガウス型ランダム振動の生成法を提案し、実輸送におけるショック・オン・ランダム振動を忠実に再現した上で蓄積疲労損傷を評価することが可能となった。

一方、青果物を対象とした蓄積疲労損傷の評価に関する研究も数多く行われてきた。なぜなら、青果物は1回の応力よりも繰り返し応力がかかることによって、蓄積疲労損傷することが多いからである。実際、レタスおよびイチゴ果実を対象として、輸送中における損傷を蓄積疲労評価モデルによ

って予測、または再現しようとする取り組みが行われてきた^{7)~10)}。さらに、青果物の蓄積疲労損傷を再現するために、損傷度の周波数依存性を考慮した試験方法も提案された¹¹⁾。しかし、工業製品および青果物のいずれを対象とした研究においても、輸送中における繰り返し応力の発生要因として想定されてきたのは主として振動であり、その発生要因として衝撃を想定した研究事例は少なかった。

青果物の衝撃による損傷発生に関する研究としては、モモ果実を対象とした衝撃による損傷部位の細胞観察¹²⁾、損傷評価のための衝撃印加条件の提案に関する研究¹³⁾がある。さらにリンゴ果実を対象として衝撃加速度の違いが損傷部位の面積または体積に及ぼす影響の評価を行った研究がある¹⁴⁾、¹⁵⁾。しかし、これらの研究においても、1回の衝撃による損傷が評価の対象とされており、繰り返し衝撃による損傷については評価されてこなかった。しかし、レモン果実の収穫から選果工程における衝撃発生状況の解析によって、繰り返し衝撃が果実の損傷発生要因となっている可能性が指摘された¹⁶⁾。さらに、繰り返し衝撃に起因する衝撃エネルギーの累積をパラメータとした数式モデルを用いて、貯蔵中におけるレモン果実の腐敗発生を予測する手法が提案された¹⁷⁾。これらのレモン果実を対象とした研究は、青果物の輸送中における損傷発生を適切に評価し、これを防止するための緩衝包装設計のためには、繰り返し応力の発生要因として繰り返し衝撃を考慮する必要性を示唆するものであった。

以上の点を整理すると、繰り返し衝撃による青果物の蓄積疲労損傷に関する評価を行うとともに、この結果に基づき損傷を制御するための包装設計手法を提案する必要があると考えられる。しかし、これらの点に関する検討は、行われてこなかった。

3. 衝撃による青果物の損傷評価に関わる これまでの理論

3.1 損傷限界曲線 (DBC) 理論

物品に衝撃が加わった際に、その物品が損傷するのかどうかを判定するための理論として、損傷限界曲線 (Damage Boundary Curve。以下、DBC) 理論¹⁸⁾がある。この理論では、物品に任意の衝撃が1回印加された際に損傷するのか、しないのかを衝撃パルス波形における高さに等しいピーク加速度 (Peak Acceleration。以下、 P_{Acc}) と面積に等しい速度変化 (Velocity Change。以下、 V_c) (図1) の2つの要因から判定する (図2)。

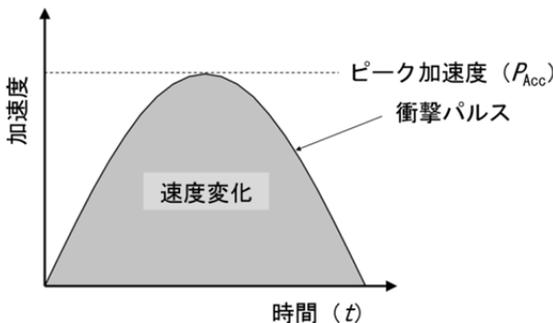


図1 正弦半波衝撃パルスにおける衝撃作用時間 (t)、ピーク加速度 (P_{Acc}) および V_c の関係

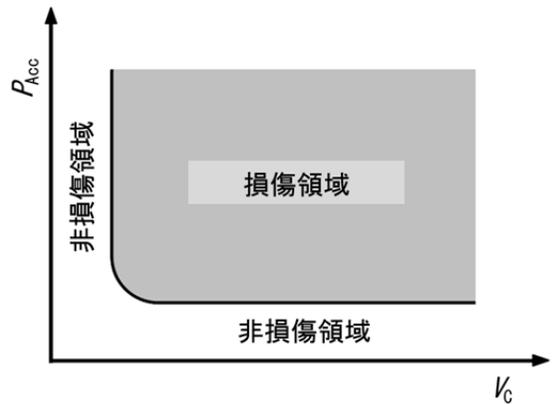


図2 台形波衝撃パルスの P_{Acc} および V_c の関係から導出される損傷限界曲線 (DBC) の例

図1に示す正弦半波衝撃パルスから得られる DBC ではないことに注意。

対象物への衝撃印加試験の結果から予め DBC を導出し、損傷領域および非損傷領域を把握しておけば、実輸送中に想定される衝撃環境において被包装物が損傷するかしないか、あるいは被包装物に対して緩衝材を使用すべきかどうかといったことを容易に判断することができる。また、包装された物品の部位ごとの強度の違い¹⁹⁾や衝撃減衰の影響を考慮した DBC が提案されるなど^{20)~22)}、この理論は実用的な発展を遂げてきた。また、青果物を対象としても、ジャガイモの損傷発生を予測したり²³⁾、モモ果実の損傷程度を評価したり²⁴⁾するための DBC が提示されている。しかし DBC 理論は、あくまで対象物が1回の衝撃によって損傷するかしないかを判定するための理論であり、蓄積疲労によって損傷する物品を対象としたものではなかった。このことは、工業製品の包装設計を対象とし、損傷限界曲線の

導出方法を取り扱う JIS Z0119:2002、7.2.3 手順 f に、「損傷までの試験回数は、繰返し衝撃による蓄積疲労を避けるため多くとも 5~6 回が望ましい。」と記載されている²⁵⁾ことからわかる。

3.2 S-N 曲線理論

物品の蓄積疲労による損傷が、Palmgren-Miner 則²⁶⁾に従い発生する場合、応力 (以下、 S) とその繰返し回数 (以下、 N) との関係は、以下の式に示す累乗近似曲線として表すことができる。

$$N = aS^b \quad (1)$$

ここで、 a および b は定数である。この関係は、Wöhler によって見出され²⁷⁾、応力を示す ‘Stress’ (または、ひずみを示す ‘Strain’) および繰返し回数を示す ‘Number’ の頭文字を取って S-N 曲線理論と呼ばれる。この理論は、物品の蓄積疲労損傷の評価や再現に広く応用されてきた^{7)~11)、28)、29)}。

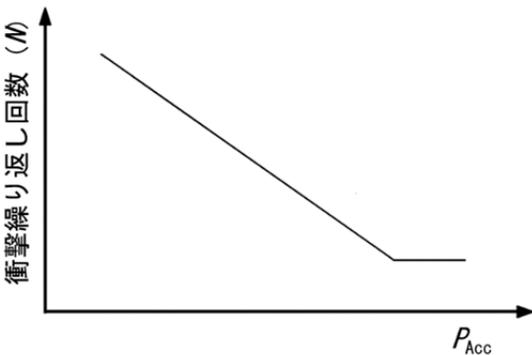


図3 P_{Acc} と衝撃繰返し回数 (N) との関係を示す S-N 曲線の例

運動の第 2 法則より、物品に加速度が加わることで力が加わることは等価であるため、 P_{Acc} に起因する衝撃応力を S の発生要因と考えることができる。また、繰り返し衝撃による包装された物品の蓄積疲労損傷の評価において、繰返し応力の発生要因を繰返し衝撃応力と置き換えることによって、S-N 曲線理論が応用可能である (図 3)。

なお、式 (1) に示す関係が成立する場合において、 N 回の応力によって損傷する物品が、 n 回の応力を受けた際の損傷度 (以下、 D) は、以下の式で表される。

$$D = n/N \quad (2)$$

式 (2) より、損傷が発生する際には、 $n = N$ すなわち $D = 1$ となる。実輸送においては、緩衝材の有無も含め様々な包装形態が用いられている。また、衝撃の発生要因としては、人為的な落下³⁰⁾ や道路面の状況に起因するもの³¹⁾ など様々な事象が想定される。なお、図 1 で示した関係から、衝撃作用時間 (以下、 t)、 P_{Acc} および V_c の関係は、以下の式で表される。

$$P_{Acc} = dV_c / dt \quad (3)$$

この式は、速度を時間で微分したものが加速度であることを表わしており、使用される緩衝材の違いや衝撃発生要因の違いによって、物品が衝撃を受けた際に発生する P_{Acc} と V_c の組み合わせが様々な変化することが想像できる。

しかし、ここで式 (1) および図 3 を再び見てみると、 V_c がパラメータに含まれていない。従って、この理論では P_{Acc} と対となる V_c の影響が考慮できないことがわかる。3.1 で示した DBC 理論において、 P_{Acc} が同一でも V_c が異なることによって、物品の損傷領域および非損傷領域が変化することを考慮すれば、 V_c の変化によって N が変化することは容易に理解できる。

3.3 蓄積疲労を考慮した DBC 理論

ここまでの、従来の DBC 理論は V_c の影響を考慮しているものの、 N を考慮していないことを述べ、従来の S-N 曲線理論は、 N に影響を及ぼす V_c の違いを考慮していないことを

述べた。Burgess³²⁾ は、 V_c の違いが N に及ぼす影響を考慮し、図 4a に示すような DBC を提示している。この例は、摩擦によるプラスチックの損傷評価を対象としたものであり、衝撃による損傷を評価する上で必要となる P_{Acc} の影響については想定していない。この点を踏まえ、Kipp³³⁾ は、 P_{Acc} の違いを考慮した DBC を提案している (図 4b)。

このような DBC を繰り返し衝撃による被包装物の損傷評価に応用することによって、損傷対策における精度の向上が期待できる。しかし、被包装物の蓄積疲労損傷限界を P_{Acc} 、 V_c および N の関係から定義し、緩衝包装を設計する検討は、これまでになされてこなかった。

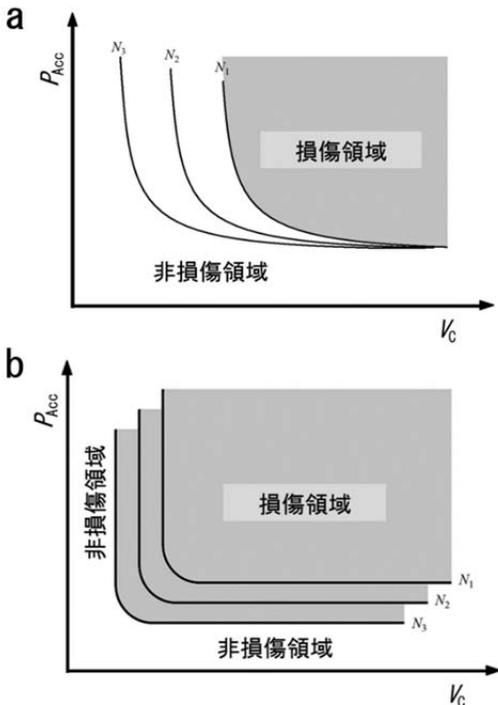


図 4 N を考慮した DBC のイメージ
 a は Burgess³²⁾ の図、b は Kipp³³⁾ の図を基に作成。

4. これまでの研究状況および理論を踏まえた研究事例

2 および 3 で述べた研究および理論の現状を踏まえ、以下の 3 つの事柄に関する検証が必要であると考えられた。

- ① 青果物の蓄積疲労損傷の発生における V_c の影響を評価する。
- ② 繰り返し衝撃による蓄積疲労損傷の発生に及ぼす P_{Acc} および V_c の影響を、実輸送を想定した包装条件下に在る青果物を用いて評価する。
- ③ の評価結果を踏まえた上で、 P_{Acc} 、 V_c および N の関連性を考慮した、青果物のための緩衝包装方法を提案する。

以下に、それぞれの検証と関わる研究事例について解説する。

4.1 青果物の蓄積疲労損傷の発生における速度変化(V_C)の影響評価

4.1.1 イチゴ果実を対象としたS-N曲線の導出

①に関する検証を進める前提として、まず N と P_{Acc} との間に線形の関係が見出せる材料が探索される必要があった。 N と P_{Acc} との関係をS-N曲線で表すことが出来れば、 P_{Acc} にともなう V_C の違いの影響を容易に観測できるからである。そこで、振動による蓄積疲労損傷の発生において、加速度と加振時間との間に、線形の関係が認められているイチゴ果実⁹⁾、¹⁰⁾を対象として、S-N曲線理論の適用可能性が検証された。その結果、 P_{Acc} と N の関係をS-N曲線によって表すことができること(図5)、およびこの曲線を用いることによって、イチゴ果実の繰り返し衝撃による蓄積疲労損傷を評価できることが証明された³⁴⁾。

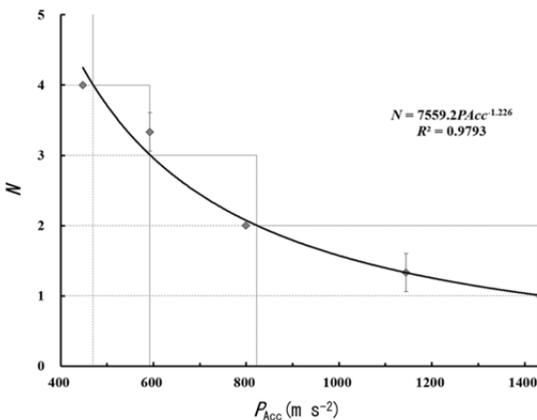


図5 イチゴ果実における P_{Acc} と N の関係³⁴⁾

4.1.2 繰り返し衝撃によるイチゴ果実の損傷発生における V_C の影響評価

4.1.1の研究結果を踏まえ、イチゴ果実に衝撃を繰り返し印加した際における P_{Acc} と対となる V_C の違いが N に及ぼす影響が検証された。検証結果は、繰り返し衝撃による物品の蓄積疲労損傷の発生において、衝撃1回あたりの損傷度(以下、 d)が P_{Acc} と V_C の組み合わせによって、様々に変化することを実証するものであった(図6)。このことによって、 P_{Acc} と V_C の組み合わせ条件が多様となる実輸送環境を想定した上で、青果物の蓄積疲労損傷の評価および包装設計を行う場合、それらの組み合わせに対応する d を想定すべきであることが提言された³⁵⁾。

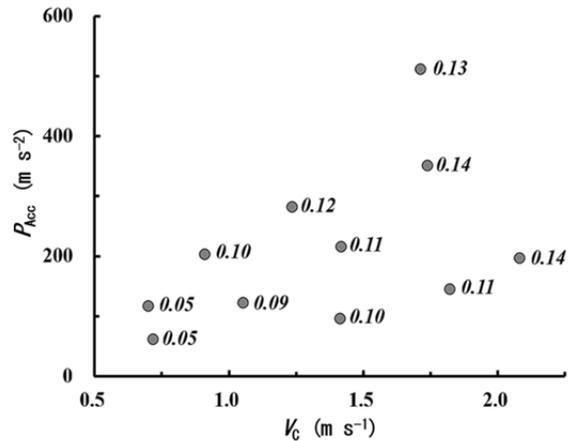


図6 イチゴ果実の衝撃1回当たりの損傷度(d)に及ぼす V_C と P_{Acc} の影響³⁵⁾

4.2 実輸送を想定した包装条件下における蓄積疲労損傷評価

4.2.1 緩衝材の違いが繰り返し衝撃によるイチゴ果実の損傷発生に及ぼす影響

4.1.2の結果は、イチゴ果実の繰り返し衝撃による損傷発生において V_c の影響を考慮する必要性について提言するものといえる。しかし、実輸送で用いられている包装条件、具体的には段ボール箱による梱包をとともなう条件下で、その点について検証したものではなかった。この点を踏まえ、2種類の緩衝材およびイチゴ果実の国内輸送において一般的に用いられている包装形態を用いた繰り返し落下試験による検証が行われた。これは、本項の冒頭で示した②に該当する事例である。試験の結果、実輸送で用いられている包装条件下においても P_{Acc} と対となる V_c の違いの影響を無視した場合、 d の値を見誤る危険性が生じることが証明された。また併せて、任意の P_{Acc} と V_c の組み合わせから導出される d に対応する DBC を導出され (図 7)、繰り返し衝撃による損傷評価において DBC が応用できることが証明された³⁶⁾。

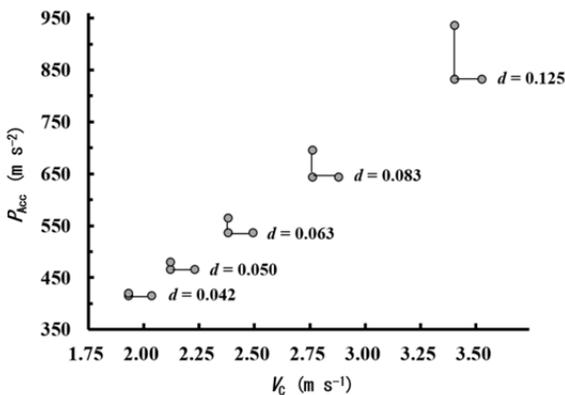


図 7 イチゴ果実における任意の d に対応する DBC³⁶⁾

4.2.2 多段積み包装されたイチゴ果実の損傷発生に及ぼす繰り返し衝撃の影響

4.2.1に続き、実輸送条件下における、イチゴ果実の繰り返し衝撃による蓄積疲労損傷の発生に及ぼす P_{Acc} と V_c の組み合わせの影響の検証が行われた。本項の冒頭で示した②に関するもう一つの事例である。実輸送条件としては、5段積みされた包装形態が対象とされ、段(部位)の違いが繰り返し衝撃によるイチゴ果実の d に及ぼす影響が評価された。その結果、まず多段積み包装において段の違いによって任意の P_{Acc} に対応する V_c が様々な変化することが実証された。それと同時に、任意の衝撃が印加された際の d が、段によって異なることが明らかにされ、その理由が P_{Acc} と対となる V_c の違いに起因していることが明らかにされた(表 1)³⁷⁾。

これらの結果は、多段積み包装されるイチゴ果実の緩衝包装設計において、特定の段における P_{Acc} および V_c に基づいて算出した d を用いて、それ以外の段における損傷を見積もった場合、包装全体における損傷程度を見誤る危険性があることを証明したものといえる。

4.3 イチゴ果実の蓄積疲労損傷の制御を可能とする包装方法の提案

4.2.2の検証を踏まえ、多段積み包装されたイチゴ果実の損傷を制御するための方法が検討された。冒頭で示した③に関する事例である。制御方法とし

表1 2段目から5段目における d の実測値(A)および予測値(P)³⁷⁾

段	落下高 (m)	P_{Acc} ($m\ s^{-2}$)	d		差(%) ^y
			実測値(A)	予測値(P) ^z	
2	0.05	139.2	0.022	0.012	43.6
	0.10	260.9	0.037	0.022	38.8
	0.15	371.6	0.052	0.032	39.7
	0.20	498.6	0.061	0.041	32.7
3	0.05	124.5	0.021	0.011	47.1
	0.10	220.9	0.029	0.019	34.4
	0.15	386.6	0.058	0.032	44.5
	0.20	421.1	0.070	0.035	50.1
4	0.05	107.5	0.020	0.009	53.1
	0.10	210.4	0.031	0.018	40.9
	0.15	340.3	0.058	0.029	49.8
	0.20	450.5	0.070	0.038	45.8
5	0.05	117.8	0.029	0.010	64.1
	0.10	177.7	0.035	0.015	56.3
	0.15	284.3	0.047	0.024	48.3
	0.20	459.3	0.077	0.038	50.5

^z1段目における P_{Acc} と d の関係から算出

^y $|(P-A)/A \times 100$

ては、実用的な観点から包装容器と包装容器の間もしくは包装全体の最底面に板またはシート状の緩衝材を配置する方法が検討された。それらの方法によって、段ごとの V_c 、 P_{Acc} を様々に変化させること、およびそれにともない d が最大となる段を様々に変化させることが可能になることが実証された (図 8)³⁸⁾。

イチゴ果実の果肉硬度は、栽培条件の違いによって変動し^{39)、40)}、その変動は、衝撃による易損性に大きく影響する。イチゴ果実を対象として非破壊方式による果肉硬度の測定方法が提案されているが⁴¹⁾、この提案は当初、果肉硬度の変動を把握し、易損性に応じて果実を選別し出荷先を変えるとといった対応への応用を想

定したものであった⁴²⁾。一方、ここでの実証結果は、各段において想定される d の値を様々に変化させることを可能にするものである。上述した非破壊計測による果肉硬度に基づく果実の選別方法との組み合わせによって、易損性に応じて出荷先を変えるだけでなく、繰り返し衝撃に対して異なる易損性を有する果実を混載し、同一の地点まで出荷することが可能になるかもしれない (図 9)。無論、緩衝材を使用しない場合でも、段ごとに推定される d は複数の値を取るものの、緩衝材の配置によって、その制御範囲を拡大することができる。いずれにせよ、異なる蓄積疲労損傷特性を有する青果物を混載することを可能とし、輸送効率の向

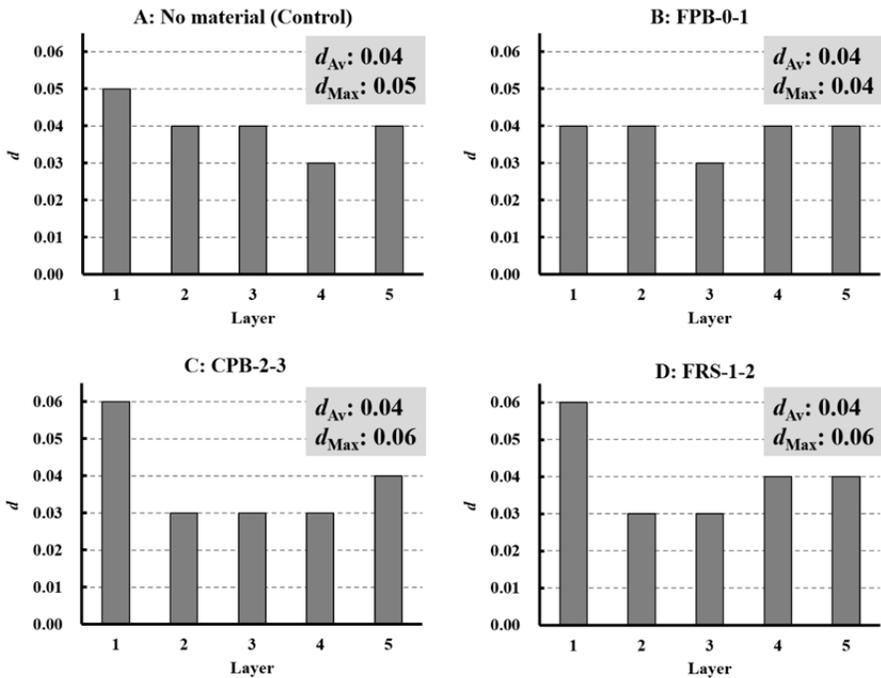


図 8 緩衝材の配置による各段(Layer)における d の変化の例³⁸⁾

A: 緩衝材なし、B: 発泡塩化ビニル板を最底面に配置、C: プラスチック段ボール板を 2 段目と 3 段目の間に配置、D: 発泡ゴム板を 1 段目と 2 段目の間に配置。

従来のコンセプト



提案方法を導入した場合

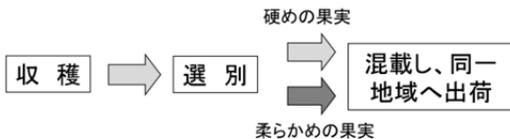


図 9 イチゴ果実の硬度選別による従来の輸送コンセプト、およびそれに蓄積疲労損傷を制御可能な多段積み方法を組み合わせることによる効率的輸送のコンセプト

上を図りながら、繰り返し衝撃に対する損傷発生を防止できる包装方法の開発につながる結果が得られたといえる。

4.4 まとめ

以上、青果物の繰り返し衝撃による蓄積疲労損傷の評価が、 P_{Acc} 、 V_c および N の 3 要因を考慮することによって実施しなければならない理由が、実輸送で用いられる包装形態を用いた実証試験を通して解明されたとともに、それらの 3 要因を考慮した損傷防止のための包装方法が提案された。以上の研究で対象とされたイチゴ果実の他、レモン果実¹⁶⁾、¹⁷⁾やマ

ンゴー果実⁴³⁾が繰り返し衝撃によって蓄積疲労損傷することが既にわかっている。本項で述べた研究事例は、そのような青果物の損傷評価および緩衝包装設計へ応用できるものと考えられる。

5. その他の研究事例と展望

5.1 ブドウの脱粒を防止する包装方法

4 では、イチゴ果実を対象とした研究事例について解説したが、ここでは、ブドウ対象とした事例を取り上げる。

ブドウの流通時において、衝撃や振動によって果粒と果柄とが離れることがあり、これを‘脱粒’と呼ぶ。脱粒が発生すると、ブドウの商品価値が大幅に低下するため、流通中において脱粒を防止することは重要である。振動による脱粒を防止するためには、包装容器内の隙間を極力減らすことが有効であることが知られている⁴⁴⁾。そこで、繰り返し衝撃による損傷を防止するためにも、同様の対策が有効であるものと考えられた。しかし、ブドウの形状および大きさは、品種や栽培時の仕立て方によって様々であるため、例えば、スポンジなどの塊にブドウの形状を模した穴を開け、そこにブドウを収納するといった方法では、全てのブドウを対象として容器内の隙間を完全に解消することが難しいものと想定された。

この点を踏まえ、異なる径の貫通穴を有する緩衝材シートを数枚積層し、形成される凹部にブドウ果房を収納する方法が提案された(図10)⁴⁵⁾。この方法では、貫通穴径の異なる緩衝材シートの組み合

わせを自在に変えることができる。つまり、包装作業時においてブドウ果房の形状や大きさの違いに柔軟に対応しつつ、容器内の隙間を確実に解消することができる。この包装方法によって、繰り返し衝撃による脱粒が通常の包装方法を用いた場合と比較し、大幅に軽減されることが確認されている(図11)⁴⁶⁾、⁴⁷⁾。現在、積層する緩衝材1枚当たりの厚さや枚数、貫通穴の径および形状などの最適化が進められている。

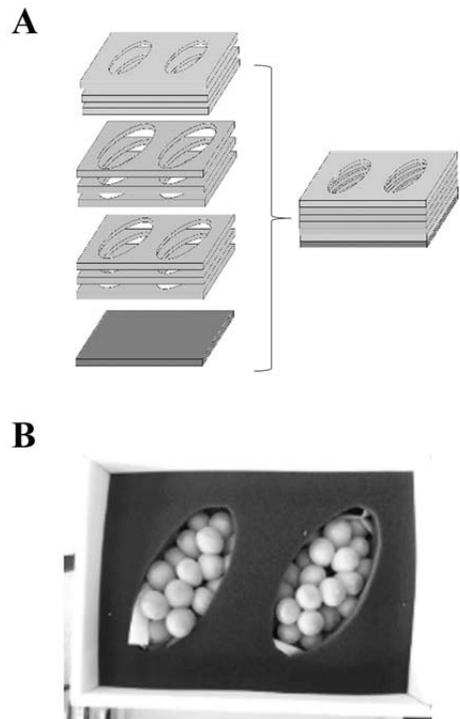


図10 緩衝材シートの積層によるブドウの梱包方法⁴⁵⁾

A: ブドウの形状および大きさに応じて貫通穴径の異なる緩衝材シートの組み合わせを変更する。

B: この方法を用いて段ボール箱内にブドウを収納した状態。

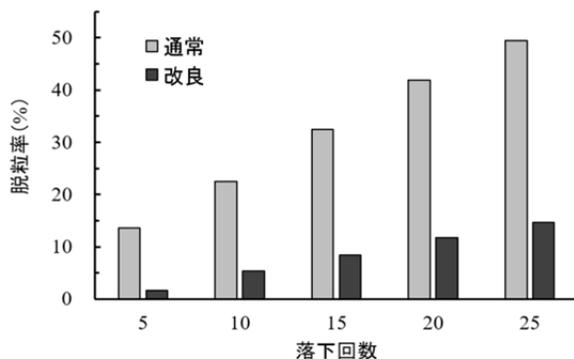


図 11 繰り返し衝撃に対する改良包装の脱粒防止効果^{46), 47)}

通常：フルーツキャップを用いた一般的な 2 kg 箱包装（対照）、改良：図 10 に示す方法。落下高さ：0.3 m。

5.2 消費者の購買行動に基づく損傷評価

工業製品と比較し、青果物の‘損傷’を明確に定義することは難しい。店頭に並ぶ青果物を想像してみると、無傷の状態で販売されていることは殆どあり得ず、我々消費者は、販売価格や包装状態といった複数の要素を含めて、買うか／買わないかを判断している。

どのくらいの価格、あるいはどのような包装条件であれば、どの程度の損傷まで許されるのか？といった、消費者の購買行動に基づく‘損傷限界’が明確となれば、適切な価格設定による可販品の増大や、包装資材の簡素化が実現できるものと考えられる。そして、それらは冒頭で述べた減耗率の低減や、包装に係るコストの削減に結び付くものである。消費者の購買行動から定義される蓄積疲労損傷限界を想定した評価と対策に関する研

究の発展を期待したい。

6. 結言

以上、青果物の繰り返し衝撃による蓄積疲労損傷に関連した研究事例について解説した。青果物の損傷発生要因には、衝撃の他にも振動や圧縮応力など様々なものがある。従って、実輸送における損傷発生を防止するためには、それら一つひとつの要因が損傷発生に及ぼす影響について解明が進められるとともに、それらの要因が複合した状況を想定した上での評価と対策が不可欠となる。本稿で取り上げた各研究事例が、それらの解明や対策構築のきっかけとなり、青果物の国内における安定供給、輸出の拡大といった我が国の農産物の安定と発展につながればさいわいである。

謝辞

4 で解説した研究事例の大半は、著者が神戸大学大学院海事科学研究科博士後期課程における専攻テーマとして取り組み、博士論文「繰り返し衝撃による被包装物の蓄積疲労損傷評価に関する研究」⁴⁸⁾として取り纏めたものである。研究の遂行および取り纏めにあたり多大なる御指導と御助言を賜った、同大学院輸送包装研究室・教授 斎藤勝彦先生に心から感謝の意を表し厚く御礼申し上げる。本研究のきっかけを賜るとともに、その遂行において有益な御助言および御協力を賜った、(当時)農研機構食品総合研究所食品工学研究領域 食品包装技術ユニット

長 石川豊博士および(当時)農研機構食品総合研究所食品工学研究領域 流通工学ユニット長 椎名武夫博士に厚く御礼申し上げます。また、研究事例の一部は、神戸大学海事科学部 輸送包装研究室ゼミにおける研究状況報告とそれに付随した同ゼミ参加者との議論を通して進められたものである。同大学海事科学部 学部生、同大学大学院海事科学研究科 専攻生、および輸送包装に関連する企業および法人所属の参加者各位に厚く御礼申し上げます。

各研究事例は、解説した順に農林水産省 新たな農林水産政策を推進する実用技術開発事業「国産果実の輸出促進に向けた低コスト生産・流通システムの開発(課題番号:1913)」、文部科学省・日本学術振興会 科学研究費補助金若手研究(B)「損傷限界曲線を応用した新たな緩衝包装設計理論の構築と青果物輸送包装の最適化(課題番号:21780236)」、復興庁・農林水産省 食料生産地域再生のための先端技術展開事業「被災地における農産物加工技術の実証研究」および同・「被災地における果実生産・流通技術の実証研究」の一部として、各事業から資金提供を受けて実施されたものである。ここに記して厚く御礼申し上げます。

<引用文献>

- 1) 農林水産省, 食糧需給表,
<http://www.maff.go.jp/j/zyukyu/fbs/> (2017年12月20日)
- 2) 農林水産省, 総合的なT P P等関連政策大綱,
http://www.maff.go.jp/j/kanbo/eu_epa/attach/pdf/index-11.pdf (2017年12月20日)
- 3) Y. Cinar and G. Jang: Fatigue life estimation of FBGA memory device under vibration, J. Mechanic. Sci. Technol., **28**(1) p107 (2014)
- 4) G.L. Scalia, G. Aiello, A. Miceli, A. Nasca, A. Alfonzo, L. Settanni: Effect of vibration on the quality of strawberry fruits caused by simulated transport, J. Food Process Eng., **39**(2) p.140 (2016)
- 5) 津田和城, 中嶋隆勝, 斎藤勝彦: ガタ振動をともなう包装品の振動耐久性に関する検討, 日本航海学会論文集, (117) p.111 (2007)
- 6) 細山 亮, 中嶋隆勝: 尖度を考慮した非ガウス型ランダム振動生成法, 日本包装学会誌, **20**(1) p.27 (2011)
- 7) 岩元睦夫, 河野澄夫, 早川昭: 青果物輸送の等価再現化に関する研究(第1報)―多段積載時の段ボール箱および内容レタスの振動特性ならびに損傷性―, 農業機械学会誌, **39**(3) p.343 (1977)
- 8) 岩元睦夫, 河野澄夫, 早川昭: 青果物輸送の等価再現化に関する研究(第2報)―損傷度の定義と輸送シミュレーション時の加速度レベルの設計―, 農業機械学会誌, **40**(1) p.61 (1978)
- 9) 岩元睦夫, 河野澄夫, 早川昭: 青果物輸送の等価再現化に関する研究(第3

- 報)一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一, 農業機械学会誌, **42**(3) p.369 (1980)
- 10) 中村宣貴, 梅原仁美, 岡留博司, 中野浩平, 前澤重禮, 椎名武夫: 振動周波数およ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**(2) p.101 (2007)
- 11) 臼田浩幸, 椎名武夫, 石川豊, 佐竹隆顕: 青果物の損傷性を考慮したランダム振動試験法の開発, 農業施設, **37**(1) p.3 (2006)
- 12) C.H. Crisosto, R.S. Johnson, J. Luza, K. Day: Incidence of physical damage on peach and nectarine skin discoloration development: Anatomical studies, J. Amer. Soc. Hort. Sci., **118**(6) p.796 (1993)
- 13) N.O. Maness, G.H. Brusewitz, D. Chrz, G. Taylor: Performance of an instrument designed for, and evaluation of methods to assess, peach fruit impact bruise susceptibility, J. Food Qual., **18**(4) p.335 (1995)
- 14) A.F. Bollen, H.X. Nguyen, B.T.D. Rue: Comparison of methods for estimating the bruise volume of apples, J. Agric. Eng. Res., **74**(4) p.325 (1999)
- 15) F. Lu, Y. Ishikawa, H. Kitazawa, T. Satake: Measurement of impact pressure and bruising of apple fruit using pressure-sensitive film technique, J. Food Eng., **96**(4) p.614 (2010)
- 16) 池田裕朗, 石川豊, 北澤裕明, 路飛, 赤阪信二, 塩田俊: 収穫から選果までの間にレモン果実が受ける衝撃解析, 園芸学研究, **9**(1) p.107 (2010)
- 17) 池田裕朗, 石川豊, 赤阪信二, 塩田俊, 北澤裕明, 路飛: 収穫後の衝撃がレモン果実貯蔵中の腐敗の発生に及ぼす影響, 園芸学研究, **10**(1) p.93 (2011)
- 18) R.E. Newton, Fragility Assessment -Theory and Test Procedure- (1968), <http://edocs.nps.edu/npspubs/institutional/SR/2007/Newton.pdf> (2017年12月20日)
- 19) 中嶋隆勝, 斎藤勝彦, 寺岸義春: 新しい製品衝撃強さ評価試験方法の提案, 日本機械学会論文集 (C編), **67**(664) p.3924 (2001)
- 20) Z.-W. Wang, C.-Y. Hu: Shock spectra and damage boundary curves for non-linear package cushioning systems, Packag. Technol. Sci., **12**(5) p.207 (1999)
- 21) Z.-W. Wang: Shock spectra and damage boundary curves for hyperbolic tangent cushioning system and their important features, Packag. Technol. Sci., **14**(4) p.149 (2001)
- 22) Z.-W. Wang: On evaluation of product dropping damage, Packag. Technol. Sci., **15**(3) p.115 (2002)

- 23) R. Mathew, G.M. Hyde: Potato impact damage thresholds, Trans. ASAE, **40**(3) p. 705 (1997)
- 24) N.L. Schulte, E.J. Timm, G.K. Brown: 'Redheaven' peach impact damage thresholds, HortScience, **29**(9) p. 1052 (1994)
- 25) JIS Z0119 (2002), 包装及び製品設計のための製品衝撃強さ試験方法
- 26) 日本材料学会編, “金属材料強度試験便覧”, 養賢堂, p. 31 (1977).
- 27) A. Wöhler: Ueber die festigkeitsversuche mit eisen und stahl, Zeitschrift für Bauwesen, (20) p. 73 (1870)
- 28) 中嶋隆勝, 津田和城, 川田浩二, 山内佳門: 蓄積疲労評価型振動試験システムの提案, 日本包装学会誌, **16**(1) p. 41 (2007)
- 29) 野中勇: 総説: 高温機器の長期疲労、クリーブおよびクリーブ疲労寿命予測の現状と課題, 材料, **64**(2) p. 65 (2015)
- 30) S.P. Singh, G. Burgess, J. Singh: Measurement and analysis of the second-day air small and light-weight package shipping environment within Federal Express, Packag. Technol. Sci., **17**(3) p. 119 (2004)
- 31) F. Lu, Y. Ishikawa, T. Shiina, T. Satake: Analysis of shock and vibration in truck transport in Japan, Packag. Technol. Sci., **21**(8) p. 479 (2008)
- 32) G.J. Burgess: Product fragility and damage boundary theory, Packag. Technol. Sci., **1**(1) p. 5 (1988)
- 33) W.I. Kipp: Developments in testing products for distribution, Packag. Technol. Sci., **13**(3) p. 89 (2000)
- 34) 北澤裕明, 石川豊, 路飛, 胡耀華, 中村宣貴, 椎名武夫: イチゴ輸送中の衝撃解析と損傷発生予測, 園芸学研究, **9**(2) p. 221 (2010)
- 35) 北澤裕明, 佐藤達雄, 長谷川奈緒子, 李艶傑, 石川豊: 蓄積疲労を考慮した青果物のための新たな損傷予測理論の構築 (第1報) —繰り返し衝撃によるイチゴの損傷発生—, 日本包装学会誌, **21**(2) p. 125 (2012)
- 36) H. Kitazawa, K. Saito, Y. Ishikawa: Effect of difference in acceleration and velocity change on product damage due to repetitive shock, Packag. Technol. Sci., **27**(3) p. 221 (2014)
- 37) 北澤裕明, 斎藤勝彦: 蓄積疲労を考慮した青果物のための新たな損傷予測理論の構築 (第2報) —多段積み包装されたイチゴ果実の損傷発生に及ぼす繰り返し衝撃の影響—, 日本包装学会誌, **23**(4) p. 277 (2014)
- 38) H. Kitazawa, K. Saito, Y. Ishikawa: Method for controlling damage to products subjected to cumulative fatigue considering damage degree at each layer in stacked packaging, J. Packag. Sci. Technol., Jpn., **24**(2) p. 69 (2015)
- 39) 北澤裕明, 佐藤達雄, 石川豊, 中村宣

- 貴, 椎名武夫: ソフトパックにより包装されたイチゴの損傷発生に及ぼす衝撃の影響, 日本食品保蔵科学会誌, **36**(6) p. 265 (2010)
- 40) E. M. J. Salentijn, A. Aharoni, J. G. Schaart, M. J. Boone, F. A. Krens: Differential gene expression analysis of strawberry cultivars that differ in fruit-firmness, *Physiol. Plant.*, **118**(4) p. 571 (2003)
- 41) 柏寄勝, 末永健, 五月女英平, 中島教博, 大森定夫: 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 —, 農業機械学会誌, **71**(6) p. 90 (2009)
- 42) 柏寄勝, 末永健, 五月女英平, 中島教博, 大森定夫: 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 —, 農業機械学会誌, **69**(6) p. 49 (2007)
- 43) Y. Nakanishi, N. Nakamura, N. Hasegawa, H. Inamori, Y. Ogawa, H. Kitazawa: Evaluation and estimation of damage to tree-ripened ‘Irwin’ mangos from repetitive shock during transportation, *Trop. Agric. Develop.*, **59**(3) p. 112 (2015)
- 44) 高野和夫, 小野俊朗, 海野孝章: ブドウ‘ピオーネ’の流通過程における脱粒防止, 岡山県立農業試験場研究報告, (14) p. 49 (1996)
- 45) 北澤裕明, (国立研究開発法人農業・食品産業技術総合研究機構), 意匠登録第 1572040 号
- 46) H. Kitazawa, S. Akashi, N. Hasegawa: A Packaging System Proposal to Prevent Repetitive-Shock-Induced Berry Drop in Grapes, *Proceedings, 28th IAPRI Symposium on Packaging 2017*, p. 155 (2017)
- 47) 北澤裕明, 第3編・第3章 農産物流通における新規緩衝包装技術, “農産物流通における新規緩衝包装技術”(五十部誠一郎編), S&T出版, p. 250 (2017)
- 48) 北澤裕明, “繰り返し衝撃による被包装物の蓄積疲労損傷評価に関する研究”, 神戸大学博士論文 (2015)
<http://www.lib.kobe-u.ac.jp/repository/thesis2/d1/D1006493.pdf>
(2017年12月24日)
- (原稿受付 2017年12月27日)