

## 科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成24年 6月13日現在

機関番号：82111

研究種目：若手研究（B）

研究期間：2009～2012

課題番号：21780236

研究課題名（和文） 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

研究課題名（英文） Construction of a new damage estimation theory by applying damage boundary curve -Packaging optimization for fresh produce-

研究代表者

北澤 裕明（KITAZAWA HIROAKI）

独立行政法人農業・食品産業技術総合研究機構・研究員

研究者番号：20455306

研究成果の概要（和文）：繰り返し衝撃による青果物の損傷発生をS-N曲線により予測するモデルが提案されているが、このモデルでは衝撃印加時において衝撃加速度（ $Acc$ ）と対になる速度変化（ $Vc$ ）が異なることにより、衝撃1回当たりの損傷度（ $D$ ）が変化することが想定される。本研究では、数種の $Vc$ と $Acc$ の組み合わせを作成し、それらの違いがイチゴ果実の損傷発生に及ぼす影響を調査した。その結果、 $Vc$ と $Acc$ の組み合わせにより、衝撃1回あたりの $D$ が変化することを実際に確認することができた。

研究成果の概要（英文）：For the estimation of damage to fresh produce subjected to shock, a model has been proposed to demonstrate the relationship between shock acceleration ( $Acc$ ) and the damage degree ( $D$ ) for each instance of shock by applying the S-N curve. In this model, it is assumed that  $D$  per one time of shock varies with the combination of velocity change ( $Vc$ ) and  $Acc$  under various shock conditions. Thus, we investigated the effect of the combination of  $Vc$  and  $Acc$  on the damage occurrence in strawberry subjected to several shock conditions. Our results suggested that  $D$  per one time of shock varied with the combination of  $Vc$  and  $Acc$ .

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2009年度	1,200,000	360,000	1,560,000
2010年度	1,300,000	390,000	1,690,000
2011年度	700,000	210,000	910,000
年度			
年度			
総計	3,200,000	960,000	4,160,000

研究分野：農学

科研費の分科・細目：農業工学・農業環境工学

キーワード：損傷限界曲線・流通・青果物・

緩衝包装設計

## 1. 研究開始当初の背景

近年の輸送環境の改善や包装形態の改良にもかかわらず、輸送工程における青果物の減耗は依然として大きな問題となっている。輸送中の青果物に損傷を与える要因には、継続的な加速度である「振動」と、振動よりも

大きなレベルかつ瞬間的な加速度が発生する「衝撃」とがある。これまで、青果物の損傷に及ぼす振動の影響に関する研究は数多く行われており、それらの研究を通してS-N曲線を用いた損傷評価理論などの緩衝包装設計に有用な理論が構築されつつある。一方、

衝撃と青果物における損傷発生程度との関係を解明するための研究は散見されるものの、これまでに青果物の衝撃による損傷防止のために有用な緩衝包装設計理論は構築されておらず、その理論構築が急務であると考えられた。

## 2. 研究の目的

工業分野においてはDBC評価法に基づいた効率的かつ確実な衝撃に対する緩衝包装設計が行われている。DBCは加速度と速度変化の2軸からなる平面において損傷域と非損傷域との境界を示す曲線であり、この曲線を作成することにより、想定される加速度および速度変化によって製品の損傷が発生するかどうかを迅速に判断できる。そのため、このDBC評価法を青果物の緩衝包装設計に応用することにより、これまで経験的に行われることも多かった青果物の緩衝包装設計を理論的かつ効率的に実施できると期待される。また、この理論を応用し輸送経路や手段ごとの包装設計を行うことにより、包装の低コスト化・省資源化が図れるものと期待される。ところが、DBCは1回の衝撃に対する損傷限界値を明確にすることができないものの、衝撃が反復された場合、すなわち衝撃加速度が積算された場合における損傷限界を保証するものではない。しかし、青果物においては1回では損傷を引き起こさないような弱い衝撃が反復され積算されることによって損傷が引き起こされることがあり、その緩衝包装設計においては積算された衝撃加速度の影響を考慮することが不可欠である。

以上より本研究の目的を、繰り返し衝撃による青果物の損傷を防止するための新たな損傷限界評価理論の構築と、それを応用した青果物の新たな緩衝包装の開発とした。

## 3. 研究の方法

### (1) 試験の概要

本研究は2つの段階に分けて実施した。最初の段階では、青果物の繰り返し衝撃による損傷発生を疲労破壊による損傷発生モデル、すなわちS-N曲線を用いて予測する手法について、その妥当性を確認するために、物性のことなる同一の品目を用いて繰り返し衝撃による損傷発生評価試験を実施した。

次の段階では、繰り返し衝撃による損傷発生において、印加される衝撃加速度と対となる速度変化の違いが、損傷性に及ぼす影響について調査した。

(2) 繰り返し衝撃によるイチゴの損傷性の解明と輸送中の損傷発生予測

#### ①供試材料

茨城県内で生産された‘とちおとめ’を用いた。着色程度は85%以上、平均果実重量は

約13g(2L階級相当)であった。果実の果肉硬度は果実硬度計(KM-1、藤原製作所)により測定した。赤道面の対極2箇所における円筒形プランジャー(5mm)貫通時の最大抵抗力を測定し、それら2値の平均を1果あたりの果肉硬度とした。この硬度計の表示単位はkgfであるため、計測値に9.80665を乗じNに換算した。この方法で測定した試験期間中の果肉硬度は、1~2月の調査日では、平均6.1N(5.9~6.4N)、3~4月の調査日では、平均5.1N(5.0~5.2N)であった。そのため、以下に示す落下試験をそれぞれの時期に実施することにより、果肉硬度の違いによる損傷性を比較することとした。

#### ②包装形態

包装形態は、蓋つきのポリスチレン製パックの内部に果実の形状に適合するようホールが成型された発泡ポリエチレン製のトレーを内包したものであった(ソフトパック)。トレーに収納できる果実数は20であった。実際の輸送において、これが段ボール箱に梱包されることを想定し、パック底面にイチゴ梱包用の段ボール箱と同質かつ同一面積の段ボール板(3mm厚、Fフルート)を両面テープで貼り付けた。

#### ③落下試験および損傷評価の条件

著者らが以前に実施した青果物の輸送環境調査において、輸送中に想定される落下高さは最大で200mm前後であったことから、本実験においてはイチゴを詰めたソフトパックを100、150、200および250mmの各高さから木製テーブル上に落下させ、衝撃加速度を計測した。その際、ソフトパックに内包したトレーの中心付近のホール底面に衝撃計測解析システム(SMH-12、神栄テクノロジー)に接続された加速度センサー(2366W、昭和測器)を両面テープで貼り付け、上から果実を載せた。他のホールにも果実を収納した。計測された衝撃加速度および速度変化を衝撃・振動解析ソフトウェア(SMS-500、神栄テクノロジー)に入力し、3次元方向の波形を合成することにより、トレーに生じた最大の衝撃加速度を算出した。試験は各高さについて20回繰り返した。本実験では、各高さから果実を詰めたパックの落下を繰り返し、20果中5果すなわち25%の果実に変形をとまなう圧迫および擦れ傷が認められた時点で商品性が喪失したと判定した。

衝撃の繰り返しによる果実の損傷を疲労破壊の一種であると仮定すると、衝撃加速度 $G$ と損傷発生までの衝撃繰り返し回数 $T$ との関係は以下の式で表される。

$$T = cG^b \dots\dots (1)$$

ここで、 $b$ および $c$ は定数である。各落下高さに対応する衝撃加速度ごとの損傷発生までの衝撃繰り返し回数を調査し、式(1)との整合性について検討した。各高さおよび果肉硬度ごとに3反復行った。輸送工程における衝撃による損傷発生について、実輸送に照らした予測を行った。使用したデータは、久留米市内から東京都内(大田市場)までソフトパックを2個収納した段ボール箱を4個結束し、これを冷蔵の宅配便にて輸送した際に、最下段の箱内に発生した衝撃加速度および衝撃回数の値である。これらの計測は、輸送環境記録計(DER-mini、神栄テクノロジー)により行った。ここで、 $T$ 回の衝撃により損傷する果実に $n$ 回の衝撃が印加された際の損傷度 $D$ は、

$$D = nT^1 \dots\dots (2)$$

と定義され、損傷発生時における損傷度 $D$ は1となる。式(1)および(2)を用いて、この行程における各衝撃1回あたりの損傷度 $D$ を算出し、この総和が1となる箇所を商品性が喪失する箇所と定義した。なお、輸送データの収集に用いた記録計による計測値と、本評価試験で用いた加速度センサーによる測定値との整合を図るため、計測された衝撃加速度値を2倍した上で、損傷発生予測を行った。

(3) 繰り返し衝撃によるイチゴ果実の損傷発生に及ぼす速度変化の影響

①供試材料

(2)において1~2月の試験に供したイチゴ果実と同様のサンプルとした。すなわち果肉硬度が約6.1Nである茨城県産の‘とちおとめ’を用いた。

②衝撃条件の作成

対象とした包装形態は、国内におけるイチゴの流通において最も一般的なものとした。すなわち果実をトレー(PET樹脂製)内に2段重ねて詰めたものである。果実数は20(上段:12、下段:8)とした。これを2枚のアルミ板で固定し、垂直に落下させた。その際、落下高さおよび落下面に配置する緩衝材の物性を変えることにより、種々の $Acc$ および $Vc$ の組み合わせ条件の作成を試みた。供試した緩衝材の材質および物性値を表1に示す。緩衝材の厚さはいずれも10mmとし、落下高さは10、20、40、80および120mmとした。その際、加速度センサー(2366W、昭和測器)をトレー内底面に両面テープで張り付け、 $Acc$ および $Vc$ を計測した。計測したデータの解析方法(2)に準じた。解析結果に基づき、1と7、5と6と9のようにピーク $Acc$ は近い値であるが $Vc$ の値が離れた組み合わせ、または、その逆に1と2、3と6、7と9および

8と11のようにピーク $Acc$ の値は離れているが、 $Vc$ の値は近いといった組み合わせを中心に11条件を抽出し(表2)、以下に述べる果実の落下試験に供した。

表1 落下面に用いた緩衝材の物性

素材	密度 (kg/m <sup>3</sup> )	25%圧縮応力 (kPa)
A ポリウレタン	28.3	1.5
B ポリウレタン	8.0	1.4
C ポリウレタン	26.4	4.0
D ポリウレタン	27.1	3.8
E ポリクロロブレン	80.9	5.7
F ポリウレタン	49.7	32.9
G ポリウレタン	65.3	92.6
H ポリクロロブレン	101.1	25.2

表2 落下試験に用いた衝撃加速度および速度変化条件

供試番号	落下面 緩衝材	落下高さ (mm)	ピーク加速度 (m/s <sup>2</sup> )	速度変化 (m/s)
1	A	10	117.4	0.70
2	B	10	62.0	0.72
3	B	40	97.0	1.41
4	B	80	145.3	1.82
5	B	120	197.2	2.08
6	C	40	216.8	1.42
7	D	20	122.8	1.05
8	E	80	351.5	1.74
9	F	20	204.0	0.91
10	G	40	283.0	1.23
11	H	80	512.0	1.71

③果実の損傷評価

果実を詰めたトレーを繰り返し落下させ、果実に損傷が発生するまでの衝撃繰り返し回数を調査した。トレー中85%(17個)の果実に、圧迫による変形または擦れ傷が発生した際に損傷が発生したと判定した。衝撃1回あたりの $D$ の算出には、SNC理論を応用した。すなわち、損傷発生の時点 $D=1$ となるものと定義し、式(2)で示した関係式を用いて算出した。試験は、落下条件ごとに3回行い、これを反復とした。

4. 研究成果

(1) 繰り返し衝撃によるイチゴの損傷性の解明と輸送中の損傷発生予測

1~2月および3~4月のいずれの時期に収穫された果実においても、損傷発生に至るまでの衝撃加速度と衝撃繰り返し回数との関係は、疲労破壊による損傷発生モデルに従い、以下の数式で示される累乗近似曲線により表すことができた。

$$1\sim 2\text{月収穫} : T = 829.8G^{1.21} \dots\dots (3)$$

$$3\sim 4\text{月収穫} : T = 267.0G^{1.03} \dots\dots (4)$$

式 (3) および (4) より、任意の衝撃加速度に対する損傷性（損傷発生までの衝撃繰り返し回数）は、3月から4月に収穫した果実では、1月～2月に収穫したものと比較し3割程度大きく、この違いは果実の輸送性に大きな違いをもたらすものと予測された（図1）。

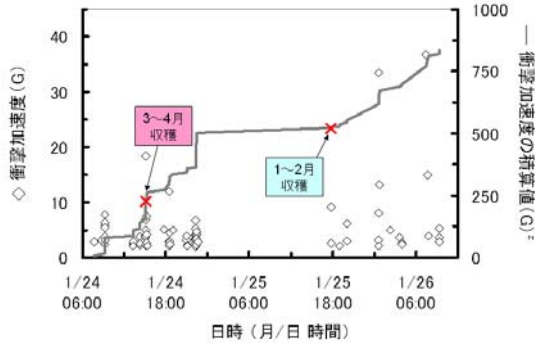


図1 イチゴ果実輸送中の損傷発生に及ぼす収穫時期の影響のシミュレーション

<sup>2</sup>室内試験・輸送試験それぞれに用いた記録計のデータ互換のため、◇の各値を2倍した上で積算した値

(2) 繰り返し衝撃によるイチゴ果実の損傷発生に及ぼす速度変化の影響

表2に示す各落下条件により、イチゴを落下させた際のイチゴの損傷発生までの衝撃繰り返し回数は、1から11まで順に、18.7、20.7、10.0、9.0、7.0、9.0、11.5、7.0、10.3、8.3および8.0回であった。式(2)の関係より算出される落下1回当たりのDは、それぞれ0.05、0.05、0.10、0.11、0.14、0.11、0.09、0.14、0.10、0.12および0.13となった。

これを、Vcを横軸、Accを縦軸としプロットしたものを図2に示す。1と2とを比較すると、Vcは、それぞれ0.70および0.72 m/sであり、ほぼ同等であるが、Accは、それぞれ117.4および62.0 m/s<sup>2</sup>であり2倍近くの差がある。しかし、いずれもD = 0.05となり、この2点の比較において、AccはDにほとんど影響していないものと考えられた。8と11との比較においても同様の傾向がうかがえる。また、5と9のAccの比較において、前者は、197.2 m/s<sup>2</sup>、後者は204.0 m/s<sup>2</sup>と、ほぼ変わらないにも関わらず、Vcに2倍以上の差があることにより、両者のDには1.4倍の差が現れている。

この結果においてもAccよりもVcの違いがDに大きく影響したことが示唆された。また、逆に3と10あるいは4と8または11の比較においては、DはVcよりもAccに依存した傾向が示唆された。このように、イチゴにおいて衝撃1回あたりのDは、AccとVcの組み合わせにより、様々に変化することが確認できた。

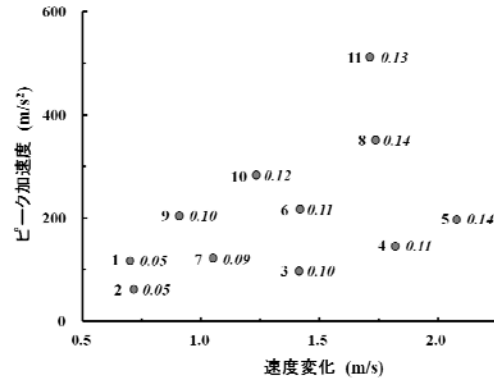


図2 速度変化およびピーク加速度が衝撃1回あたりの果実の損傷度に及ぼす影響

●右横の数字が衝撃1回あたりの損傷度

(3) まとめ

繰り返し衝撃によるイチゴ果実の損傷発生はS-N曲線を用いて予測できるものと考えられたが、それと同時に衝撃加速度と対となる速度変化が異なることにより、衝撃1回あたりの損傷度が様々に変化することが明らかとなった。従って、青果物輸送中の衝撃による損傷発生予測においては、衝撃加速度と対となる速度変化の違いにより生じる、S-N曲線の変化を把握しておく必要があるものと考えられた。今後、包装形態および緩衝材の違いなど、実輸送中において衝撃加速度と速度変化の組み合わせが様々に変化する状況下において損傷評価試験を行い、高精度かつ実用的な損傷発生予測手法の開発を進める。

### 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計2件)

- ①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、査読有、21巻、2012、印刷中
- ②北澤裕明、佐藤達雄、石川豊、中村宣貴、椎名武夫、ソフトバ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、日本食品保蔵学会誌、査読有、36巻、2011、265-269

[学会発表] (計5件)

- ①北澤裕明、石川豊、衝撃によるイチゴの損傷発生に及ぼす速度変化の影響、園芸学会平成24年度春季大会、2012年3月28日、大阪府立大学、大阪府堺市
- ②北澤裕明、中村宣貴、石川豊、椎名武夫、

青果物の輸送・貯蔵中のトラブルを回避するために ―品種や栽培条件の影響―、2011 国際食品工業展アカデミックプラザ、2011 年 6 月 7 日、東京国際展示場、東京都江東区

③Hiroaki Kitazawa, Yutaka Ishikawa, Fei Lu, Yaohua Hu, Analysis of Shock during Strawberry Transport and Damage Estimation, 17<sup>th</sup> IAPRI World Conference on Packaging, 2010 年 10 月 13 日, Renaissance Tianjin TEDA Hotel & Convention Centre, Tianjin, CHINA

④北澤裕明、佐藤達雄、石川豊、包装形態の違いが衝撃によるイチゴの損傷発生に及ぼす影響、日本食品保蔵科学会第 59 回大会、2010 年 6 月 27 日沖縄県男女共同参画センター「ているる」、沖縄県那覇市

⑤北澤裕明、青果物輸送中の損傷発生予測および評価の現状と課題、園芸学会園芸植物細胞壁研究小集会、2010 年 3 月 20 日、日本大学、神奈川県藤沢市

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

北澤 裕明 (KITAZAWA HIROAKI)

独立行政法人農業・食品産業技術総合研究機構・食品総合研究所・研究員

研究者番号：20455306

### 研究協力者

石川 豊 (ISHIKAWA YUTAKA)

独立行政法人農業・食品産業技術総合研究機構・食品総合研究所・上席研究員

研究者番号：30312812

佐藤 達雄 (SATO TATSUO)

茨城大学・農学部・准教授

研究者番号：20451669