一般論文

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-

北澤裕明*、佐藤達雄**、長谷川奈緒子*、李艶傑***、石川豊*

Construction of a New Damage Estimation Theory for Fresh Produce with Consideration of Cumulative Fatigue 1.

Damage Occurrence in Strawberry Subjected to Repetitive Shock

Hiroaki KITAZAWA*, Tatsuo SATO**, Naoko HASEGAWA*, Yanjie LI*** and Yutaka ISHIKAWA*

衝撃による青果物の損傷予測において、任意の衝撃加速度(Acc)と、これに対応する損傷度(D)との関係を S-N 曲線を応用することにより示すモデルが提案されている。このモデルでは衝撃印加時において 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 D が変化することが想定される。多様な包装および輸送条件に対応した損傷予測モデルを構築するためには、Vc と Acc の組み合わせと D との関係を明らかにする必要がある。そこで、種々の落下高さと緩衝材の組み合わせにより何パターンかの 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 が変化することが明らかとなった。この結果に基づき、Vc および Acc を考慮した、繰り返し衝撃による青果物の損傷発生を予測する理論の構築を進める。

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. Therefore, to construct a damage prediction model that can be fitted to various packing and/or transportation conditions, it is necessary to clarify the relationship between D per one time of shock and the combination of Vc and Acc. Accordingly, we investigated the effect of the combination of Vc and Acc on the damage occurrence in strawberry subjected to several shock conditions by considering the combination of Vc and Acc. Based on the result, our future research will focus on theory construction to predict the damage occurrence in fresh produce subjected to repetitive shock, by considering Vc and Acc.

⁽独) 農業・食品産業技術総合研究機構食品総合研究所, National 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), National Food Research Institute,NARO 2-1-12, Kan-nondai, Tsukuba, Ibaraki 305-8642, Japan

TEL:029-838-8037, FAX:029-838-7996, Email:ktz@affrc.go.jp

^{**}茨城大学農学部附属フィールドサイエンス教育研究センター

^{****}筑波大学大学院生命環境科学研究科

キーワード: 緩衝包装、損傷限界曲線 (DBC)、衝撃、S-N 曲線、輸送

Keywords: Cushioning packaging, Damage boundary curve, Shock, S-N curve, Transportation

1. 緒言

近年の道路やトラックなどの輸送環境の改善 $^{1),2)}$ にも関わらず、青果物の輸送中における品質劣化は依然として大きな問題となっている。そのような品質劣化をもたらす大きな要因としては振動・衝撃による機械的損傷が挙げられる。そのため、振動・衝撃と損傷発生との関わりについて多くの研究が行われてきた $^{3)}$ $^{-6)}$ 。振動による損傷発生に関しては、S-N曲線(S-N Curve、以下 SNC)理論を応用した損傷予測モデルが提案されるなど $^{7),8}$ 、輸送中の損傷発生対策につながる理論構築が進みつつある。一方、青果物において衝撃による損傷発生を予測するための有用な理論は構築されていない。

本研究では、青果物輸送中の繰り返し衝撃による損傷予測理論を構築するための基礎的知見を得るために、衝撃加速度(以下 Acc)、速度変化(以下 Vc)および衝撃繰り返し回数(以下 N)がイチゴ果実の損傷発生に及ぼす影響を調査した。

2. 理論

2.1. 損傷限界曲線(DBC)理論

ある物品に衝撃が加わった際に、物品が損傷するかどうかを見積るために、Newton⁹⁾ は損傷限界曲線(Damage Boundary Curve、以下DBC)理論を提唱した。これによると、被包

装物に任意の衝撃が1回印加された際に、内容物が損傷するか、しないかは Vc と Acc の2軸によって判定される (Fig. 1)。落下試験に代表される衝撃印加試験を通して、予め DBCを作成し、損傷領域・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内容物が損傷するかしないか、あるいは緩衝材を使用すべきかどうかといったことを容易に判定することができる。さらに、中鳴ら^{10)、11)}により、物品における部位ごとの強度の違い、あるいは耐衝撃性のばらつきを考慮した改良型 DBC が提案されるなど、物品や輸送環境の実情を反映した改良も進んでおり、その理論の実用性は高まりつつある。

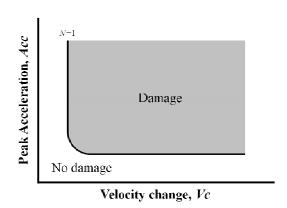


Fig. 1 DBC obtained as a relation between Vc and Acc.

しかし、DBCは、1回の衝撃により損傷するかしないかを判定するものであり、繰り返し衝撃により損傷、すなわち蓄積疲労により損傷する物品には応用できない。工業製品の

包装設計を対象とし、損傷限界曲線の作成方 法を取り扱うJIS Z0119^{:2002}、7.2.3 手順fには、

「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。」と記載されており ¹²⁾、蓄積疲労に より破損する物品には、この理論が応用でき ない懸念が示されている。

2.2 S-N 曲線(SNC)理論

一方、蓄積疲労により損傷する物品の損傷発生を予測する理論として、Wöhlerにより見出された物品の損傷発生における応力と応力繰り返し回数との関係¹³⁾から、導出されるS-N曲線を用いたSNC理論がある。著者らは、従来、青果物の振動による損傷発生予測に用いられてきたSNC理論を応用し、繰り返し衝撃によるイチゴ果実の損傷発生を予測する方法を提案した^{14)、15)}。この理論によると、衝撃加速度と果実に損傷が発生するまでの衝撃繰り返し回数との関係は、以下の式で表される。

$$N=cG^{-b}$$
····· (1)

ここで、N は損傷発生までの衝撃繰り返し回数、G はAcc、c およびb は定数である。また N 回の衝撃により果実が損傷する場合、1 回の衝撃により蓄積される損傷は N^I となることから、n 回の衝撃が繰り返された際の果実の損傷度(以下D)は、以下の式で表すことができる。

$$D=nN^{-1}\cdots\cdots$$
 (2)

この式 (2) より、損傷が発生する際のD は 1 となる。

一方、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。さら に、衝撃の発生要因としては落下、打突など 様々なものが想定される。従って、これらの 違いにより、物品が衝撃を受けた際に発生す る Acc と Vc の組み合わせは多様であると考え られる。しかし、式(1)からわかるように、 SNC ではAcc と対となるVc の影響を想定して いない。DBC 理論において、Acc が同一でも Vc が異なることにより損傷域・非損傷域が変 化することを勘案すれば、Vc の変化により損 傷発生までの N が変化することは容易に想像 され、繰り返し衝撃による損傷発生予測にお いて、SNC をそのまま用いて、汎用的な予測 を行うことは困難であると考えられる(既報 14)、15) では、包装形態の違いや衝撃発生要因の 違いよる影響については、検討していない)。

2.3 蓄積疲労を考慮した DBC 理論

ここまで、従来の DBC 理論では Vc の影響 を考慮できるものの、N を定義することが困難であること、逆に従来の SNC 理論では、N に影響を及ぼす、Vc の違いを考慮できないことを述べた。

一方、Burgess¹⁶⁾ は、**Fig. 2** に示すような、DBC を提案している。この曲線により、Vcの違いがNに及ぼす影響を定義することが可能である。

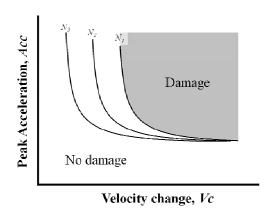


Fig. 2 DBC considering cumulative fatigue.

Based on the figure in Burgess's article¹⁶⁾.

しかし、この提案において Acc は一定となっている。これは疲労損傷を摩擦によりモデル化していることに起因しているが、実輸送においては Vc と Acc の組み合わせが多様となることは先に述べた通りであり、N に及ぼす Acc の影響についても併せて考慮されるべきである。 $Kipp^{17}$ は Fig. 2 の曲線に Acc の違いを加味した DBC を提案している。しかし彼が同時に、DBC はそもそもガラス製品など、1回の衝撃で損傷するような物品を対象としていると述べている 17 ことからもわかるように、Vc、Acc および N の 3 点を考慮した上で、物品の損傷限界を定義するといった検討は、これまでされてこなかった。

2.4 青果物の損傷発生予測のための新たな DBC 理論の提案

青果物においては、繰り返し衝撃による損傷発生が問題となることから^{14)、15)、18)}、**2.3** で述べた3点を考慮した損傷限界の定義が不可欠であると考えられる。逆に、これらの点と

損傷発生との関係を明確にできれば、輸送中 の損傷発生の予測が高い精度で実施できるも のと期待される。

実輸送中の損傷発生予測においては、任意の衝撃 1 回あたりの D を積算 \cup 、D=1 となる地点を予測することとなる 14 。 そのため、N よりも衝撃 1 回あたりの D に対応する Vc および Acc を定義する必要がある。

以上の点を踏まえ、**Fig. 3** に示す **DBC** を提 案する。

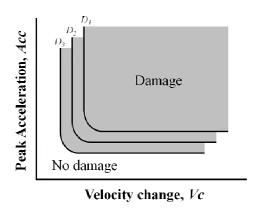


Fig. 3 A newly proposed DBC for fresh produce.

3. 実験

3.1 目的

2.4 で提案した DBC に基づく青果物の新たな損傷限界理論を構築するための予備段階として、Acc と Vc の組み合わせによって実際に衝撃1回あたりのDが変化するかどうかを明らかにすることを目的とし、蓄積疲労により損傷する物品の典型例であるイチゴ果実を用いて以下に示す評価試験を実施した。

3.2 *Acc、Vc* および *T*の違いがイチゴ果実の 損傷発生に及ぼす影響

3.2.1 実験試料

茨城県内で生産され、2010年1~2月に収穫されたイチゴ'とちおとめ'を用いた。傷および変形があるものは除外し、着色程度80~100%の果実を選んだ。これらの果実の、果実硬度計(KM-1、藤原製作所)により測定した果肉硬度(5 mm 径の円筒形プランジャー貫通時の最大抵抗力)は、約6.1 N であった。

3.2.2 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(Fig. 4)。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、Fig. 5 に示す装置を用 いて落下させた。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 Table 1 に示す。緩衝材の厚さ はいずれも 10 mm とし、落下高さは 10、20、 40、80 および 120 mm 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。計測したデータは振動・衝撃解 析デバイス (SMH-12、 神栄テクノロジー) により収集し、振動衝撃解析ソフトウェア (SMS-500、神栄テクノロジー)を用いて解 析した。この解析結果に基づき、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 $1 \ge 2$ 、 $3 \ge 6$ 、 $7 \ge 9$ および $8 \ge 11$ 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 Table 2 に示す 11 条件を抽出し、以下に述べる果実の落下試験に供した。



Fig. 4 Strawberry in 2-layer packaging used for testing.

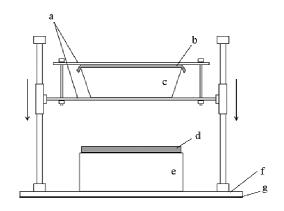


Fig. 5 Drop test system for strawberry damage estimation.

a, aluminium plates; b, urethane foam to avoid rebound; c, strawberry-containing package; d, cushioning material for counter face; e, wood block; f, aluminium plate; and g, rubber sheet.

Arrows indicate the drop direction.

3.2.3 果実の損傷評価

果実を詰めたトレーを Table 2 に示す各条件下において繰り返し落下させ、果実に損傷が発生するまでの N 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、損傷発生の時点をD=1 となるものと定義し、式(2)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。

Table 1. Properties of cushioning materials.

Cushion	Base material	Density (kg/m ³)	Compressive stress at 25% strain (kPa)	
A	Polyurethane	28.3	1.5	
В	Polyurethane	8.0	1.4	
C	Polyurethane	26.4	4.0	
D	Polyurethane	27.1	3.8	
E	Polychloroprene	80.9	5.7	
F	Polyurethane	49.7	32.9	
G	Polyethylene	65.3	92.6	
H	Polychloroprene	101.1	25.2	

Table 2. Selected counterface conditions for drop tests.

Test No.	Counterface Cushion	Drop Height (mm)	Peak acceleration (m/s ²)	Velocity change (m/s)
1	A	10	117.4	0.70
2	В	10	62.0	0.72
3	В	40	97.0	1.41
4	В	80	145.3	1.82
5	В	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

4. 結果および考察

Table 2 に示す各落下条件により、イチゴを 落下させた際の損傷発生までのN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) 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 る。これを、Vcを横軸、Accを縦軸としプロ ットしたものを Fig. 6 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/s² 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^2 、後者は 204.0 m/s^2 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 ことによって、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。

なお、本実験での衝撃波形は、のこぎり波あるいは半正弦波に近いことから(データ省略)、各Dに対応するAcc側の限界は、Fig. 3で示したような直線とはならず、右肩上がりの波線 19 になるものと考えられる。この点に

ついては、今後 Acc および Vc の組み合わせ、 およびサンプル数を増やした上で検証を進め たい。

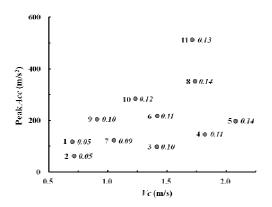


Fig. 6 Effect of Vc and Acc on the D of strawberry.

Numbers to the left of oninciate the test numbers, the details of which can be found in **Table 2**.

5. 結論

本研究により、蓄積疲労により損傷するイチゴ果実の、繰り返し衝撃による損傷発生において、Acc と Vc の組み合わせに対応する Dを算出することができた。今後は、実輸送中の Acc および Vc 条件を考慮した、繰り返し衝撃による青果物の損傷発生を予測するための実用的なモデルの構築を進める。

6. 謝辞

本研究は、文部科学省科学研究費補助金、 若手研究(B)採択課題「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」(No. 21780236) において実施したものである。ここに記して御礼申し上げる。

<参考文献>

- 臼田浩幸・椎名武夫・石川豊・佐竹隆 顕、農業施設、36(4)、215 (2006)
- 2) 玉越隆史·小林寬·中洲啓太·石尾真理、国土技術政策総合研究所資料、No. 358 (2006)
- 3) R.T. Hinsch, D.C. Slaughter, W.L. Craig, J.F. Thompson, Trans. ASAE, 36(4), 1039 (1993)
- K. Vursavuş, F. Özgüven, Turk. J. Agric. Forest., 28(5), 311 (2004)
- H. Kitazawa, Y. Ishikawa, F. Lu, Y. Hu, N. Nakamura, T. Shiina, J. Pac. Sci. Tech., 19(1), 33 (2010)
- F. Lu, Y. Ishikawa, H. Kitazawa, T. Satake,
 J. Food Eng., 96(4), 614 (2010)
- 7) 岩元睦夫・河野澄夫・早川昭、農業機 械学会誌、42(3), 369 (1980)
- 8) 中村宣貴・梅原仁美・岡留博司・中野 浩平・前澤重禮・椎名武夫、農業施設、 38(2)、101 (2007)
- R. E. Newton, Fragility Assessment Theory and Test Procedure—, U. S. Naval Post Graduate School, (1968)
- 中嶋隆勝・斎藤勝彦・寺岸義春、日本 航海学会論文集、(105)、63 (2001)

- 中嶋隆勝・斎藤勝彦・寺岸義春、日本 機械学会論文集 C、67(664)、3924 (2001)
- 12) JIS Z0119:2002、包装設計のための製品 衝撃強さ試験方法、(2002)
- 13) A. Wöhler, Zeitschrift für Bauwesen, 20,73 (1870)
- 14) 北澤裕明・石川豊・路飛・胡耀華・中村宣貴・椎名武夫、園芸学研究、9(2)、 221 (2010)
- 15) 北澤裕明・佐藤達雄・石川豊・中村宣 貴・椎名武夫、日本食品保蔵科学会誌、 36(6)、295 (2010)
- G. J. Burgess, Pack. Tech. Sci., 1(1), 5
 (1988)
- 17) W. I. Kipp, Pack. Tech. Sci., 13(3), 89 (2000)
- 18) 池田裕朗・石川豊・北澤裕明・路飛・赤阪信二・塩田俊、園芸学研究、9(1)、 107(2010)
- 19) 斎藤勝彦・長谷川淳英、"輸送包装の基礎と実務"、幸書房、p.57 (2008)

(原稿受付 2012年1月23日) (審査受理 2012年2月27日)