

一般論文

湿度環境変動時の 段ボール箱一定荷重圧縮特性

波多野 諭志*, 斎藤 勝彦**, 東山 哲***, 中尾 善和***

Corrugated Box Deformation by Static Load under Fluctuating Air Humidity

Satoshi HATANO*, Katsuhiko SAITO**, Akira HIGASHIYAMA*** and Yoshikazu NAKAO***

含水率一定時の段ボール箱の保管期間は、積重ね荷重試験から得られるクリープ率から推測可能であることが明らかにされているが、含水率が変動する場合は検討されていない。本研究では、含水率変動時に段ボール箱に静荷重を加え、変形量への含水率変動の影響を考察する。また、積重ね荷重試験で評価されるべき圧縮変形量からクリープ率を求め、適正な段ボール箱保管期間を推測することを目的とし、含水率変動時の箱伸縮について検討する。その結果、まず含水率変動による段ボール箱の伸縮振幅値が含水率変動速度に依存しないことを示している。また、含水率変動条件と等価な含水率一定条件において、クリープ率と圧縮量を積重ね荷重試験によって求めておき、現場での圧縮変形量をモニタリングすることによって、段ボール箱の保管期間が推定可能であることを指摘している。

When moisture contents of a corrugated box is constant, it is proved that the stacking lifetime of a corrugated box can be estimated from the creep rate measured by the stacking test. But, we don't guess a case under fluctuating air humidity. In this study, we apply a load on corrugated boxes under fluctuating air humidity and examine the effect to box deformation by fluctuating moisture content. And, in order to estimate the proper stacking lifetime of corrugated box, we determine the creep rate by box deformation displacement measured by stacking test, and review expansion and contraction of the box under fluctuating moisture content. As a result, at first we show that an expansion and contraction amplitude of the corrugated box by fluctuating moisture content does not depend on the fluctuating rate. In addition, we point out what the stacking lifetime of a corrugated box can estimate by the stacking test under constant moisture content that is equivalent under fluctuating air humidity, and monitoring on-site compression displacement of stacked corrugated boxes deformations.

キーワード：包装、段ボール箱、保管、圧縮試験、積重ね荷重試験、含水率、伸縮

Keywords: Packaging, Corrugated Box, Storage, Compression Test, Stacking Test, Moisture Content Rate, Expansion and Contraction

* 神戸大学大学院海事科学研究科博士前期課程

** 連絡者 (Corresponding author) 神戸大学輸送包装研究室 (〒658-0022 神戸市東灘区深江南町 5-1-1)

5-1-1 Fukaeminami, Higashi-nada, Kobe, 658-0022 Japan TEL:078-431-6341, Email:ksaito@maritime.kobe-u.ac.jp

*** レンゴー (株)

1. 緒言

段ボール箱強度は含水率に依存し、含水率が高いほど強度が低くなる¹⁾。段ボール箱積み時の座屈等を防ぐため、段ボール箱の含水率をモニタリングすることが提案されているが²⁾、含水率の変化によって箱が潰れていく状況が正確に予測できれば、より有効な管理が可能となる。

著者らは、段ボール箱含水率一定時は、含水率が高いほど圧縮変形速度が大きくなることを示した³⁾。また、静荷重下であれ含水率変動に伴い箱は伸縮し、伸縮量は荷重に依存せず、シート伸縮量から推測可能であることを指摘したが⁴⁾、保管期間に関して言及していない。

Hussain ら⁵⁾は、含水率一定時の段ボール箱において積重ね荷重試験を行い、圧縮変形量と座屈期間を評価し、圧縮変形速度の座屈期間への影響について考察している。ここでは、静荷重が作用する際の段ボール座屈過程を、Fig. 1 のように 3 つの領域 (Primary Region、Secondary Region、Tertiary Region) に分類し、段ボール箱保管期間 T について、Secondary Region でのクリープ率 a (圧縮変形速度) を用いた式 (1) を提案している。

$$T = \frac{0.0136}{a} \quad (1)$$

ここに、クリープ率 (day^{-1}) は箱のひずみ量 (箱変形量を箱の初期高さで除した値) を日数で除した値で求められる。

式 (1) より、クリープ率がわかれば保管期間が推定可能であるものの、上式は含水率一定時の場合であるため、現場 (含水率変動

時) を考慮した保管期間推定方法が提案されるべきである。

そこで本研究では、含水率変動時に段ボール箱に静荷重を加え、箱の圧縮変形量への含水率変動の影響を考察する。また、積重ね荷重試験で計測される圧縮変形量からクリープ率を求め、適正な段ボール箱保管期間を推測することを目的とし、含水率変動時の箱伸縮について検討する。

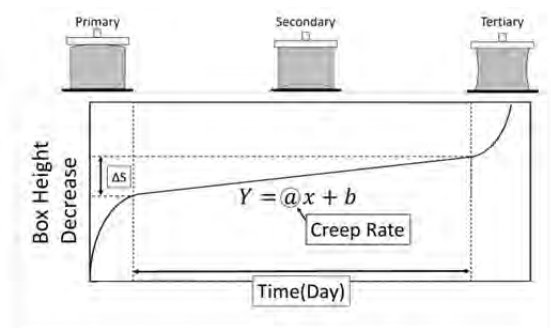


Fig. 1 Creep Rate of Corrugated Box under Static Load

2. 積重ね荷重試験

2.1 荷重条件と計測項目

本試験は恒温恒湿室 (株式会社 エスペック TBL-2HW6P2A) の中で行い、段ボール箱 (内フラップ固定空箱; 内寸法 302 mm×202 mm×303 mm; CF、表裏ライナ 160 (g/m^2)、中しん 120 (g/m^2)) に重錘積載後、圧縮変形量を計測している (Fig. 2)。試験 1 回で箱 2 つをセットする。各箱に 20kgf の鉄製平板を載せた上に重錘 4 個 (1 個 5kgf) を箱が不等沈下しない様に均等に配置し、箱 (鉄板) 中央部の圧縮変形量をレーザ変位計 (株式会社 キーエンス LK-G155) により計測している。また通常、0201 形段ボール箱は、内・外フラップを同位置の野線で折り曲げて組み立てるため、天面、

底面には歪みがあり、負荷直後は試料ごとに変形量のばらつきが生じ易い。そこで、ここでは重錘積載 10 分後の圧縮変形量を基点としている。さらに、段ボール箱から切り出したシートの重量を試験中 1 分毎に汎用電子天びん(株)エー・アンド・デイ FZ-2000i)にて自動計測している。段ボールシートは試験前に、105℃に設定した恒温器(パーフェクトオーブン)(株)エスペック PS-242)により絶乾させ、その重量を高精度電子天びん(株)新光電工 HG-2000)にて計測している。よって、試験中に自動計測されたシートの重量と絶乾重量の差を試験中の試料の含水率とみなし、時々刻々の含水率をモニタリングしている。さらに恒温恒湿室内中央部の温湿度をコンパクトロガー(株)グラフテック Petit LOGGER GL100-WL)の温湿度センサ(株)グラフテック GS-TH)より測定している。また、恒温恒湿室の空調の直風が電子天びんの測定値に影響しないよう、試料上方に風防を設置している。なお、試料として用いた段ボール箱の温湿度標準状態(23℃50%RH)における圧縮強度(5回の静圧縮試験による計測値)は 154.8kgf である。



Fig.2 Stacking Test

2.2 段ボール含水率の設定

ここでは、変動する含水率に応じた段ボール箱の圧縮変形挙動を評価するために、恒温恒湿室の相対湿度を設定している。ただし、すべての試験の温度設定は 23℃一定としている。まず予備試験により、湿度設定に対して、室内の相対湿度応答や相対湿度変化にともなう段ボールの含水率の変化の状況を把握した。それにより、段ボール箱の含水率がおおよそ 7%、9%、10%、11%の一定条件とするためには、それぞれ相対湿度設定値を 58%、76%、80%、82%とした。また、含水率をおおよそ 7%と 9%の間で急激に変動させるために、相対湿度設定値 40% (一定含水率 7%設定のための相対湿度設定値 58%としたとき、湿度を急変させたい変動時間である 4 時間以内では含水率がおおよそ 9%からおおよそ 7%には落ちきらないことが予備試験で確認され、試行錯誤により相対湿度設定値を 40%にすることにより 4 時間で含水率がおおよそ 9%から 7%に落とすことを確認した) と 76%の 2 つの設定を 4 時間ごとに切り替えることにより含水率急激変動条件とした (ただし、含水率 7%から開始する場合の初期湿度設定値は一定含水率 7%設定のための相対湿度設定値である 58%)。以上の相対湿度設定条件を **Table 1** にまとめている。さらに、含水率おおよそ 7%と 9%の間を周期 8 時間で緩やかに変動させる場合 (緩徐変動条件) は、**Fig. 3** に示すように、含水率設定の最大値を 76%、最小値を 40% (ただし、含水率 7%から開始する場合の初期湿度設定値は一定含水率 7%設定のための相対湿度設定値である 58%) として、相対湿度設定値を時間に関して直線的に増加または減

小ささせている。

Table 1 Setting Relative Humidity Condition (Constant Condition and Sudden Change Condition of Moisture Content)

23°C		Time					
		0-4h	4-8h	8-12h	12-16h	16-20h	20-24h
Moisture Content	7%	58%					
	9%	76%					
	10%	80%					
	11%	82%					
	7%-9%	58%	76%	40%	76%	40%	76%
9%-7%	76%	40%	76%	40%	76%	40%	

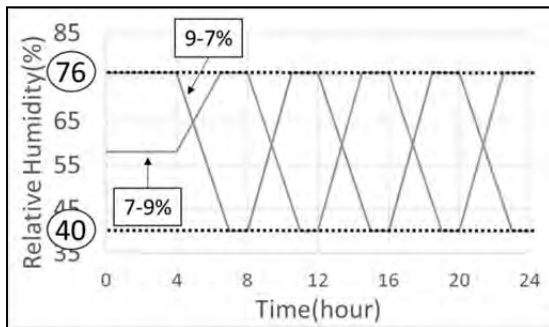


Fig.3 Setting Relative Humidity Condition (Slow Change Condition of Moisture Content)

3. 試験結果

3.1 試験空間の湿度と含水率

2.2 に述べたように試験室の相対湿度を設定することにより、計測された試験空間の相対湿度（湿度設定値は恒温恒湿室として目標値であり、試験空間近傍での実測湿度値との多少の違いはある）と、すべての段ボールの含水率は **Fig.4**(急変: 試験開始時含水率 7%)、**Fig.5**(急変: 試験開始時含水率 9%)、**Fig.6**(緩徐: 試験開始時含水率 7%)、**Fig.7**(緩徐: 試験開始時含水率 9%)のようになった。これらの図より、試験空間内の湿度はおよそ 75%と 45%の間で変動し、含水率が相対湿度変動

に追随しながら、およそ 7%と 9%の間で変動していることがわかる。

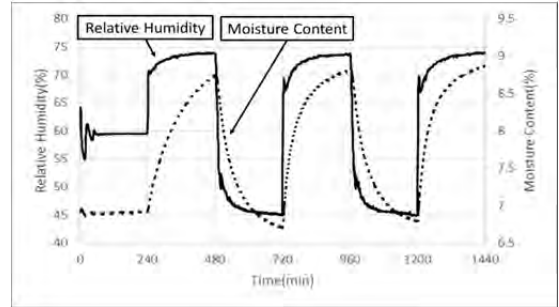


Fig.4 Drifted Moisture Content Changing by Relative Humidity (Rapidly: Moisture Content Start from 7%)

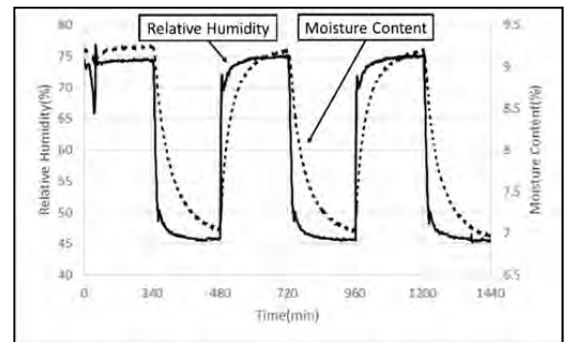


Fig.5 Drifted Moisture Content Changing by Relative Humidity (Rapidly: Moisture Content Start from 9%)

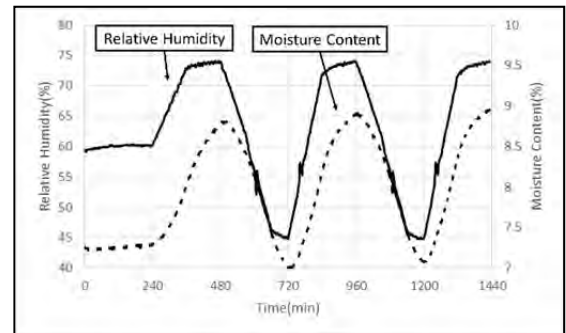


Fig.6 Drifted Moisture Content Changing by Relative Humidity (Slowly: Moisture Content Start from 7%)

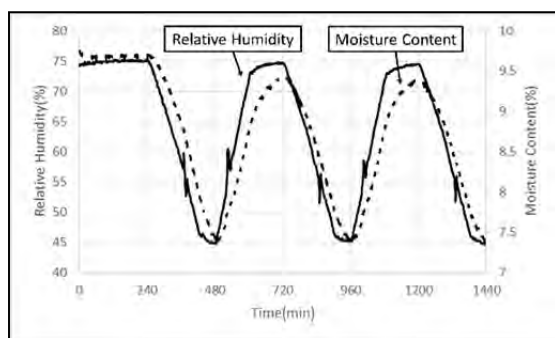


Fig.7 Drifted Moisture Content Changing by Relative Humidity (Slowly: Moisture Content Start from 9%)

3.2 箱変形挙動

含水率急変試験、緩徐変動試験における圧縮変形量が Fig.8、Fig.9 であり、含水率変動に伴い箱が伸縮していることがわかる。この現象は過去の研究結果⁴⁾でも示されている。

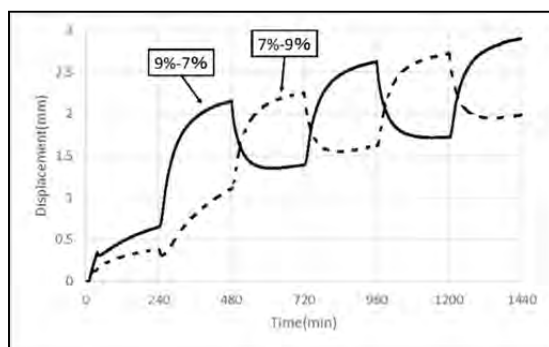


Fig.8 Time Series of Box Deformation Drifting Moisture Content Rapidly

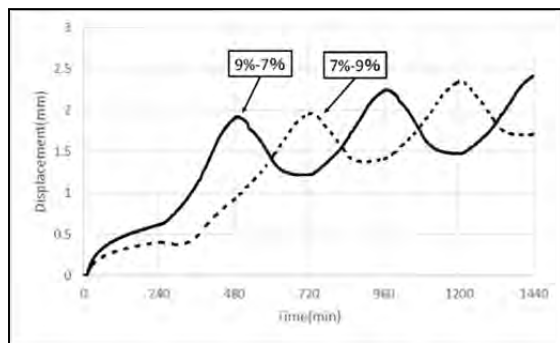


Fig.9 Time Series of Box Deformation Drifting Moisture Content Slowly

4. 含水率変動に伴う箱伸縮振幅に及ぼす含水率変動速度の影響

著者らは、含水率急変時の箱伸縮が上載荷重に依存せず、シート伸縮から推測出来ること⁴⁾を明らかにしている。ここでは、含水率変動速度が箱伸縮挙動に及ぼす影響について考察する。Fig.11、Fig.12 はそれぞれ Fig.8、Fig.9 に示した圧縮変形量の箱伸縮成分を抽出した結果で、導出方法は以下の通り (Fig.9 における緩徐変動試験、試験開始時含水率 9%を対象)である。

- Fig.10 の破線 (平均圧縮変形量) のように箱圧縮時系列データ前後 4 時間を区間とする単純移動平均処理 (ローパスフィルタリング処理) を行う。

- 試験開始 720 分後と 1200 分後の平均圧縮変形量を結んだ直線 l の値と各時刻の計測圧縮変形量の差 (Fig.10 中の \downarrow \uparrow に相当)を伸縮値とする。

また Fig.11、Fig.12 において、試験開始 720 分後と 1200 分後の伸縮成分の平均値と、試験開始 960 分後の伸縮成分との差を伸縮振幅値とする。さらに、Fig.4、Fig.5、Fig.6、Fig.7 から、試験開始 720 分後と 1200 分後の含水率の平均値と試験開始 960 分後の含水率差を求める。全試験結果における伸縮振幅値は、含水率 7%開始時の急変条件が 0.86mm(含水率差: 2.06%)、緩徐変動条件が 0.75mm(含水率差: 1.89%)であり、含水率 9%開始時の急変条件が 1.07mm(含水率差: 2.15%)、緩徐変動条件が 0.91mm(含水率差: 2.03%)となった。この結果と箱の高さ(303mm)から、含水率 1%変動あたりの段ボール箱伸縮率を求めると、含水率 7%開始時は、急変条件が 0.14%、緩徐変動条件が 0.13%、含水率 9%開始時は、

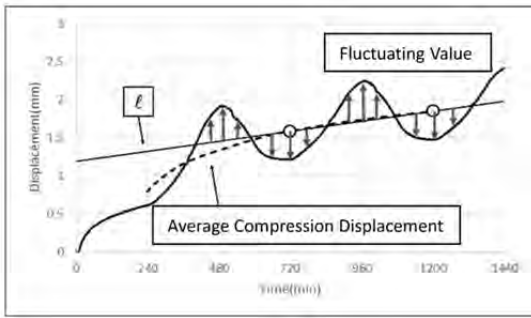


Fig.10 Derivation of Constant Box Deformation Speed

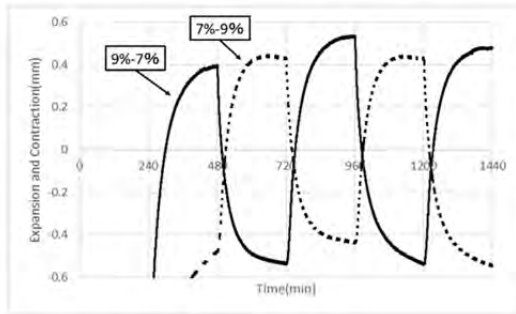


Fig.11 Fluctuating Box Displacement without Constant Box Deformation Speed by Static Compression (Sudden Change Condition of Moisture Content)

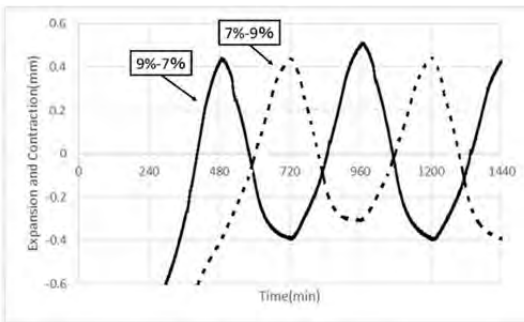


Fig.12 Fluctuating Box Displacement without Constant Box Deformation Speed by Static Compression (Slow Change Condition of Moisture Content)

急変条件が 0.16%、緩徐変動条件が 0.15%となる。以上のように、含水率急変条件と緩徐変動条件の伸縮率がおおよそ等しいことから、箱伸縮は含水率変動速度に依存しないことがわかる。

5. 圧縮変形量と含水率のモニタリングによる保管管理方法

物流現場では含水率が不規則に変動するため、事前に積重ね荷重試験を現場条件で行うことは不可能である。そこで、含水率変動条件と等価な含水率一定条件を把握出来れば、含水率一定条件における事前の積重ね荷重試験で得るクリープ率から保管期間の推定が可能となる⁵⁾。

含水率一定条件下の積重ね荷重試験結果、および含水率変動条件下の実験結果である Fig.8、Fig.9 から Fig.10 に示すようなフィルタリング処理によって算出した平均圧縮変形量における、試験開始 720 分後と 1200 分後の圧縮変形量の差 (Δd) をその時間 (480 min) で除した値を試験開始 960 分後における圧縮速度とし、その速度をクリープ率に換算した (Table 2)。Table 2 により、含水率変動時のクリープ率と同等となる一定含水率は、含水率変動時の極大含水率である 9%ではなく、それよりも大きな 11%になっている。この理由を説明するためには、湿度環境の変動に伴う段ボールの吸放湿機構の詳細な検討が必要であり、今後の課題とする。

段ボール箱保管期間はクリープ率と深く関係しているが、含水率一定条件と含水率緩徐変動条件における試験開始 960 分後の圧縮変形量に差があるため、両条件の保管期間が等しいとは限らない。Fig.13 に示すように、

両条件で座屈する時の変形量（事前の静圧縮試験により、静荷重座屈変位はある程度類推できることが知られている⁶⁾）が等しいと仮定すると、試験開始 960 分後の圧縮変形量が大きい含水率 9%開始緩徐変動条件の方が箱の保管期間が短いと考えられる。そこで、両条件のクリープ率が等しいものとし、そのクリープ率を両条件のクリープ率 a の平均値として求めると $25.83 (\times 10^{-4} \text{ day}^{-1})$ となる。含水率 9%開始緩徐変動条件の試験開始 960 分後の圧縮変形量で箱が座屈すると仮定すると、試験開始 960 分後における両条件の圧縮変形量差が 0.6795mm であることから、その変形量差をひずみ量 (ΔS) に換算し、 ΔS を平均クリープ率 ($25.83 (\times 10^{-4} \text{ day}^{-1})$) で除すことで、含水率 11%一定条件における残存保管期間を求めると 1250 分となる (Fig.13)。つまり、含水率 9%開始緩徐変動条件の箱の保管期間は含水率 11%一定条件における保管期間よりも最大約 21 時間短いことが推測出来る。以上の関係を式 (2) に示す。

$$Lifetime = T - \frac{\Delta S}{a} \quad (2)$$

ここに、 T は一定含水率条件における段ボール箱保管期間であり、変動含水率条件と等価な一定含水率条件でのクリープ率 a から式 (1) により求められ、 ΔS は両条件の Secondary Region における同時刻の圧縮ひずみ量差極大値である。したがって、式 (1)、(2) より、任意の変動含水率条件における保管期間推定式として、式 (3) が成り立つ。

$$Lifetime = \frac{0.0136 - \Delta S}{a} \quad (3)$$

すなわち、変動含水率条件におけるクリープ率を、圧縮変形量のモニタリング値からロー

パスフィルタリング処理により、リアルタイムで把握しておき、一定含水率条件における圧縮ひずみ量差極大値 (ΔS) を求めることで、保管期間の予測が現場レベルで可能となる。

なお、倉庫現場では気象条件の急変により含水率が急上昇することで、箱が圧壊することもあり、圧縮変形量による保管期間推定のみでは手遅れになり得る。そこで、段ボール箱の含水率をモニタリングすること (段積み保管の安全レベルを含水率で判断) も提案²⁾されている。以上により、圧縮変形量の現場モニタリングと事前静圧縮試験により類推できる座屈変位から保管期間を推定し、なおかつ含水率の現場モニタリングによる危険シグナルの判断を総合化することにより、保管管理のリスク低減に貢献できる。

Table 2 Displacement and Creep Rate in Case of Every Moisture Content

	Moisture Content	$\Delta d(\text{mm})$	Creep Rate ($\times 10^{-4} \text{ day}^{-1}$)
Constantly	7%	0.07575	7.50
	9%	0.1375	13.61
	11%	0.26525	26.26
Rapidly	7%–9%	0.4735	46.88
	9%–7%	0.3325	32.92
Slowly	7%–9%	0.3865	38.27
	9%–7%	0.2565	25.40

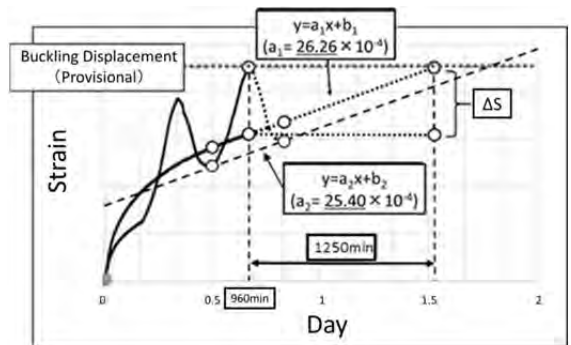


Fig.13 Concept of Equivalent Creep Rate and Remaining Life Time

6. 結言

倉庫保管における座屈による損害を予防するためには、段積み貨物の安全残存保管期間を推測する必要がある。

段ボール箱の保管期間を推定するためには、積重ね荷重試験が有効であるが、現場の温湿度環境は不規則に変動するため、同条件における事前積重ね荷重試験は不可能である。

本研究では、含水率変動条件と等価な含水率一定条件でのクリープ率と、事前積重ね荷重試験による含水率一定条件での圧縮量及び、含水率が変動する現場での圧縮変形量モニタリング値から得られる圧縮ひずみ量差極大値 (ΔS) を求めることによって、段ボール箱の保管期間が推定可能であることを指摘した。

また、含水率変動により段ボール箱が伸縮し、その伸縮振幅値は含水率変動速度に依存しないことを示した。

<引用文献>

- 1) 五十嵐精一、“段ボール包装技術実務編”、日報出版、p.399 (2012)
- 2) 中尾善和、東山哲、絶乾した段ボールを用いた簡易的な含水分測定方法、日本包装技術協会、第53回全日本包装技術研究大会予稿集、p.270 (2015)
- 3) 波野野諭志、斎藤勝彦、東山哲、含水率が急変する段ボール箱の圧縮挙動、日本包装学会、第25回年次大会予稿集、p.38 (2016)
- 4) 波野野諭志、斎藤勝彦、東山哲、中尾善和、静荷重作用下での段ボール箱の含水率と伸縮率の関係について、日本包装学会誌ノート、26(2)、p.131 (2017)
- 5) Hussain S, Douglas W Coffin, Christine Todoroki, Investigating Creep in Corrugated Packaging, *Packaging Technology and Science*, **30**(12), p.757 (2017)
- 6) 大山絢加、斎藤勝彦、山原栄司、段ボール箱クリープの簡易推定、日本包装学会誌ノート、22(2)、p.163 (2013)

(原稿受付 2018年 3月 19日)

(審査受理 2018年 5月 15日)