ホウレンソウの目減速度の推定

黒田佐俊・秋元浩一・杉本俊一・酒井正稔

(岐阜大学農学部)

Estimating Weight Loss Percent of Spinach after Harvest

Suketoshi KURODA, Koichi AKIMOTO, Syunichi SUGIMOTO
and Masatoshi SAKAI

Faculty of Agriculture, Gifu University, Kagamigahara, Gifu

Summary

In order to estimate weight loss percent of fruit and vegetables, we experimented with spinach. The results are as follows.

1. Equilibrium relationships between moisture content of products and relative humidity of the surrounding air can be easily determined within a few days by measuring the equilibrium relative humidity of the air in the small chamber in which products are kept at a constant temperature.

2. The equilibrium moisture content curves for spinach were expressed in the following equations.

$$\text{Adsorption : } 1-rh = \exp(-1.14 \times 10^{-4} \cdot T \cdot M^{1.169}) \quad 2-1$$

$$\text{Desorption : } 1-rh = \exp(-8.70 \times 10^{-5} \cdot T \cdot M^{1.170}) \quad 2-2$$

rh =equilibrium relative humidity, expressed as a decimal

T =absolute temperature of air [°K]

M_e =equilibrium moisture content (dry basis)

3. Weight loss percent of spinach after harvest can be obtained from Eq. (2-2) and the following equations.

$$v = \left(1 - \frac{M+100}{M_1+100}\right) \times 100$$

$$\frac{M-M_e}{M_1-M_e} = \exp[-(K \cdot t)^n]$$

$$K = 8.254 \times 10^8 \cdot \exp\left(-\frac{7.383 \times 10^3}{T}\right)$$

$$n = 6.24 \times 10^{-3} \cdot v + 0.537$$

v =water loss percent of product at any time after harvest

M =moisture content (dry basis) at any time

M_e =equilibrium moisture content (dry basis)

M_1 =initial moisture content (dry basis)

K =rate of drying constant [hr^{-1}]

n =constant

t =time in hours

v =centigrade temperature of air [°C]

緒 言

青果物の萎凋による目減は、重量減少による減収や商品価値の低下をひきおこすため、収穫後の青果物の取扱いは、注意を要する。一般に萎凋は水分蒸散によることが知られており、その蒸散量は植物の形態学的相異にも左右されるが環境条件によって影響される部分が極め

て大きい。しかし従来の報告のなかには実際の目減速度を数式によってとらえたものはみられない。目減速度の一般的推定方法についての基準を示すことは収穫後の農家における取扱い、また品目によっては予冷、貯蔵中での条件を設定するうえで一定の指針を与えることになる。本報ではホウレンソウを材料として必要な物性値の測定方法と考え方について検討してみた。

ハウレンソウでは収穫後、調整・結束・箱詰等の作業に2～3時間が必要である。また夏季の高冷地においては、出荷前のすかし箱に通風予冷の処理をしたり、あるいはバラのまま予冷することも考えられるので収穫～出荷間の目減の推定を行なうことによって、商品価値を保持できる限界目減を示し、それによって商品価値を維持するような操作の指標とすることができる。

基本計算式としては、既有的穀類乾燥理論のなかで適合のよい実験式(7)を導入し、推定に必要なハウレンソウの平衡含水率、乾燥速度係数などを実験により決定して目減推定をすることとした。その結果実測値と計算値は極めてよく一致し、有用な方法であることが明らかとなった。

原 理

一般に水分損失は数式上含水率変化で表わされ、目減のように初期重量を基準にするものでは含水率が異なった場合統一的把握は困難である。ところがいま目減と含水率の関係は次のように一般化できる。

$$V = \left(1 - \frac{W+d}{W_1+d}\right) \times 100 = \left(1 - \frac{M+100}{M_1+100}\right) \times 100 \quad (1)$$

V : 任意時間後の目減

W : 任意時間後の水分重量 [kg]

W_1 : 初期水分重量 [kg]

d : 乾物重量 [kg]

M : 任意時間後の含水率 [% d. b.]

M_1 : 初期含水率 [% d. b.]

したがって初期含水率が既知で任意時間後の含水率を推定できれば、(1)式によって目減を知ることができる。(1)式をグラフ化して簡単に目減を読みとるようにしたものを図1に示す。これは含水率 M を横軸に、目減 $V = \left(1 - \frac{M+100}{M_1+100}\right) \times 100$ を縦軸にとり、含水率 M を初期含水率 M_1 から徐々に減少させて含水率と目減の関係を示す直線をいくつかの初期含水率の場合について例

図 1 目減と含水率との関係

示してある。横軸の乾量基準含水率 M および、湿量基準含水率 M' は次のように定義されている。

$$M = \frac{W}{d} \times 100, \quad M' = \frac{W}{W+d} \times 100, \\ \frac{M'}{100} = \frac{M}{M+100}$$

図1を用いて目減を知る方法を示すと、たとえば、初期含水率 $M_1=950\%$ d. b. ($M'=90.5\%$ w. b.) であった任意の試料が任意時間放置され、含水率が $M=900\%$ d. b. ($M'=90\%$ w. b.) となると推定されるとき推定目減は次のように読みとることができる。目減0のときの含水率（初期含水率）を横軸で950ととり、900, 1000を通る直線に平行に直線を引く。これが横軸の900を通り、横軸に垂直な線分と交わる点の目減（縦軸の読み4.8%）が推定目減となる。

次に含水率変化についての数式は穀物乾燥における乾燥曲線の全域でよく適合する次式—Overhultsらの実験(7)式を用いることとした。

$$\frac{M-M_e}{M_1-M_e} = \exp(-(Kt)^n) \quad (2)$$

M_e : 平衡含水率

K : 乾燥速度係数 [hr^{-1}]

t : 時間 [hr]

n : 乾燥定数

(2)式によって平衡含水率 (M_e)、乾燥速度定数 (K) 乾燥定数 (n)、初期含水率をあらかじめ決定しておけば任意時間後の含水率が推定できることになる。

平衡含水率の測定

一般によく行われている方法は一定温湿度条件に保持された密閉容器に試料を入れ、試料含水率が平衡に達するまで放置する方法である。しかし平衡に達するには長時間を要するためハウレンソウでは高温高湿下で腐敗発酵することが危惧される。したがって試料含水率を平衡させるのではなく、あらかじめ後述するような方法によって十分調整されたハウレンソウをデシケーター内に密封したのち、平衡状態となったデシケーター内の空気湿度を測定することとした。測定にあたっては方法の妥当性を検討するためグリセリン溶液、モミを試料として既存の文献値(5,9)と比較検討したうえでハウレンソウの平衡含水率についての一般式を決定することとした。平衡含水率に関する式としては、Hendersonの式がよく知られており、次式で与えられる(1)。

$$1-rh = \exp(-k \cdot T \cdot M_e^n)$$

rh : 相対湿度 (小数表示)

T : 絶対温度 ($^{\circ}\text{K}$)

M_e : 平衡含水率 (乾量基準) (%)

k, n : 物質によって決まる定数

本研究でも、上式を用いることとし、得られた測定値をもとに、ハウレンソウ固有の定数 k, n を決定し、一般式とした。

1. 材 料

〔グリセリン〕 グリセリン試薬 1 級に水を加えて濃度 57.5, 69.5, 70.9% のものを用いた。〔モミ〕 岐阜大農場 1974, 1975 年産の調整されたモミ（ハツシモ、乾量基準含水率 $13.6 \pm 0.2\%$ ）を $14.7 \pm 6.2\text{g}$ 単位で用いた。〔ハウレンソウ〕 岐阜大研究圃場でハウス屋根被覆栽培した次郎丸種で、播種（1975 年 9 月 25 日）後 46 日以降のものを用いた。収穫のハウレンソウの調整方法を次の 3 通りとした。

- i) 常温下に 57~83 日間放置して乾燥調整したもの
 - ii) 50°C, 90°C の熱風で乾燥したもの
 - iii) i), ii) で十分乾燥したものに加湿調整したもの。
- なお, i), ii), iii) で調整後, それぞれ密閉容器中で数日間放置した。

2. 測定方法

調整されたグリセリン, モミ, ハウレンソウは恒温器中にあるデシケータ（実容積約 4.5 l, 内部空気はファンで攪拌）に入れてから 0.5, 1, 5, 10, 20, 30 分, その後 30 分ごとにデシケータ内空気湿度の測定を続け, 一定となった値を平衡湿度とし, そのときの試料含水率を平衡含水率とした。湿度測定にはエース鋭感湿度計 AH-1 型を再検定後使用し, 含水率は 105°C 24 hr 法によって算出した。

3. 結果および考察

i) グリセリンとデシケータ内の空気湿度の平衡過程
グリセリンの平衡過程は, 吸・脱湿過程いずれの場合も 2~3 時間である, 液体試料の平衡時間としては従来の報告(10)と比較するとやや長いようであるが, これはデシケータ内壁に水蒸気が付着したためであろう。

ii) モミの平衡含水率

図 2 モミの平衡含水率

図 3 ハウレンソウにおける吸脱湿過程の平衡含水率 (25°C)

モミの平衡に要する時間は 30~40 時間であった。グリセリンの場合より非常に長くなっている。このことはモミの表面と空気の水分濃度が平衡するに要する時間だけでなく, モミ内部での水分移動がおきており, それに要する時間が長いと考えられる。図 2 は本実験によって得られたモミの値と既存の文献値とを比較したものである。下側の曲線は Richey, C. B. の報告(9)によるものであり, 上側の曲線は, 農機学会ハンドブック(5)の 20°C における値を Henderson の式(1)にあてはめ, 25°C に換算したものである。図からわかるように本実験値は既存の値とよく一致している。したがって本測定法は十分信頼できることがわかった。

iii) ハウレンソウの平衡含水率

脱湿過程で平衡に達するには約 40 時間を要した。これはモミの場合と同様, ハウレンソウ内部に水分勾配があるためであろう。ところが室内貯蔵室において十分乾燥させたハウレンソウを吸湿させ密封したものは 2~3 時間と比較的短時間で平衡に達した。これは吸湿した水分が水分濃度の低い表面に吸着したことなどによってハウレンソウ内部の水分が比較的均一化されたためではないかと思われる。図 3 は試料調整温度および吸・脱湿による影響を表わしたものである。試料調整温度は含有成分によって試料の温度歴が関係するといわれているがハウレンソウの場合は, その影響は小さいことが示されている。一方, 試料調整時の吸脱湿の影響は明らかであり, 履歴現象がみられる。そこで Henderson の式(1)を用いてハウレンソウの平衡含水率についての式を吸湿と脱湿に分けて次のように決定した。

吸湿曲線:

$$1 - rh = \exp(-1.14 \times 10^{-4} \cdot T \cdot M_e^{1.169}) \quad (3)$$

脱湿曲線:

$$1 - rh = \exp(-8.7 \times 10^{-5} \cdot T \cdot M_e^{1.170}) \quad (4)$$

図4 ホウレンソウの平衡含水率(脱湿過程)

図5 装置図

目減推定のための平衡含水率の算出にあたっては脱湿過程での式が適当と考えられるため(4)式をもとに 10°C と 30°C の曲線を図4に示す。

風速、温度と水分損失速度

水分の損失速度を含水率で示すと(2)式となるが乾燥速度係数 K や乾燥定数 n は温度の関数といわれ(2, 6, 7) また風速の影響も考えられるため温度、風速を変えて含水率変化を測定した。

1. 材料および方法

平衡含水率測定で用いたホウレンソウと同質のものを農家の作業に合わせて、収穫は早朝(7:00まで)とし、株単位で供試した。図5に示す装置によって風速を変えて含水率変化を測定した。温度は常温(18.0±2°C, 70±5% R.H.)で、風速はスライダックによってファン回転数を調節し、0, 0.5, 1, 3, 5m/secの5段階の風速が試料にあたるようにした。風洞は透明アクリル板(1mm厚)を工作し、ファンと試料の間には風流を整えるために整流格子をとりつけてある。試料は株単位に2株を同時に吊るし、1時間毎に重量測定し、約10%目減まで続けた。同一風速について2回反復を行なった。次に送風温度による影響をみるために風速を1m/secとして、

ファンの吸気側で加温、冷却し、試料位置での風温が10.3°C, 20.5°C, 30.8°C, 38.8°Cとなるように調節した。また含水率は10.5°C, 24hr法によって乾量基準で算出した。

2. 結果および考察

i) 風速による影響

風速による含水率比変化を図6に示す。 t 検定の結果風速0m/secと0.5~5m/sec間には有意な差が認められるが0.5, 1, 3, 5m/sの間には有意差が認められない。このことはホウレンソウの水分蒸発速度が主としてホウレンソウ内部の水分移動に支配されているためと考えられ、従来の報告(4, 8)とも一致する。したがって無風の場合を別として風の強さはそれほど水分蒸発に関係しないといえよう。

ii) 乾燥速度係数 K および乾燥定数 n

(2)式を変形して

図6 風速のホウレンソウ含水率変化への影響

図7 相対含水比と時間の関係

図 8 K の温度依存性

$$\ln\left(-\ln\frac{M-M_e}{M_1-M_e}\right) = n \ln t + n \ln k \quad (5)$$

したがって両対数グラフのたて軸に $\left(-\ln\frac{M-M_e}{M_1-M_e}\right)$ 、横軸に t をとれば、傾きが n で、たて軸の切片が $n \cdot \ln K$ の直線となる。例を図 7 に示す。これによって K 、 n を決定できる。一般に K は温度の関数として次式で表わすことができる。

$$K = d \cdot \exp\left(-\frac{f}{T}\right) \quad (6)$$

d, f : 物質によってきまる定数

T : 絶対温度 [°K]

(4) 式によって、片対数グラフの対数軸に K 、普通軸に $(1/T)$ をとると直線となることがわかる。測定結果を表わしたものが図 8 である。図中の式はハウレンソウ乾燥速度 K についての式で、データを最小自乗法によって決定したものである。

この K 値は物質によって異なるといわれる。更にハウレンソウの株の大小の差によって組織の違いも考えられるので、株の大きさを重量で示し、この重量と K の関係

図 9 重量と K の関係 図 10 n の温度依存性

をみようとした。図 9 から重量と K の間にはまったく相関はみられず、株の大小にかかわらず、温度毎に K 値は一定であるといえよう。

乾燥定数 n は Overhults ら (7) によると温度と初期含水率の関数であるが、ほとんど温度によって決定され、初期含水率は無視することもできるとしている。ハウレンソウの場合は n と温度の関係が一次式で表わされ (図 10)、初期含水率との関係にはまったく相関がなかった。大塚ら (6) は初期含水率が大きく関与する形でモミについての実験式を示しているが、これは予熱乾燥期間のモミについて論じたもので同じに扱うことはできないと考えられる。また n 値と重量の関係についても K 値と同様、まったく相関はなく温度毎に一定の傾向となった。目減は乾燥初期を問題にするため、その速度を大きく支配するのは K 、 n である。 K 、 n が重量と無相関という結果は株の大小で目減速度の違いはないということになる。崎山ら (8) のキュウリの重量減少率についての報告では、小果程減量が激しくなっているが、これは未熟果と成熟果についての比較であり、組織的に異なるもので当然の結果であろう。キュウリは幼果で商品価値の高い特殊産物であるが、ハウレンソウには一般にその特殊性はなく、

本実験で供試したハウレンソウは収穫適期の成熟状態にあるハウレンソウであり株の大小の目減について比較したものである。

目減の推定

実験条件 (温度、湿度) をもとに、図 4、図 8、図 10 によって平衡含水率 M_e 、乾燥速度係数 K 、乾燥定数 n を決定し、その値をもとに (2) 式によって $(M-M_e)/(M_1-M_e)$ を算出する。この計算値を実線で、含

図 11 $\frac{M-M_e}{M_1-M_e}$ の実験値と計算値との比較

図 12 環境温度の違いによる $\frac{M-M_e}{M_1-M_e}$ の経時的変化

含水率変化の実測値を記号で図 11 に示した。計算値と実測値は極めてよく一致している。したがって、環境条件（温度、湿度）をもとに計算によって含水率変化を推定することが十分可能であることがわかった。含水率変化の推定を容易にするために図化したものが図 12 である。式(2)の右辺は温度のみで決定されるため、温度毎に時間と $(M-M_e)/(M_1-M_e)$ の関係を示した。

次に以上の結果をもとに具体的目減の推定法を示す。

i) 予冷库内温度 3°C、湿度 50% R. H. の室内通風冷却庫で収穫直後のハウレンソウを 1 時間むき出しで放置したときの目減を推定しようとする。初期含水率を 900% d. b. (=90% w. b.) とすると図 4 より平衡含水率 M_e は、18% d. b.、図 12 より相対含水率比 $(M-M_e)/(M_1-M_e)$ は 0.97 である。従って 1 時間後の含水率は 874% d. b. となる。図 1 によって初期含水率 900% から 874% になったときの目減は 2.6% と推定することができる。

ii) 気温 20°C、湿度 65% R. H. の環境条件にむき出して放置して目減を 5% 以内におさえるためには放置時間は最大どれだけとしなければならないかを推定する。

図 4 より M_e は 24% d. b.、初期含水率 $M_1=900\%$ d. b. とすると、図 1 より目減 5% の時の含水率は 850% d. b. であるので相対含水率比は $(M-M_e)/(M_1-M_e)=(8.5-0.24)/(9-0.24)$ より 0.943 となる。図 12 で 20°C の曲線から最大放置時間は約 1 時間 30 分と推定することができる。

摘 要

青果物の目減推定の方法を提示するため、ハウレンソウの場合について実験を行なったところ次のような結果を得た。

〔1〕 平衡含水率測定：試料を温度一定の密封容器に入れ、平衡する空気湿度を測定する方法が、比較的短時間に測定が終り、方法も簡単である。

〔2〕 ハウレンソウの平衡含水率は次式で与えられる。

$$\text{吸湿過程 } 1-rh=\exp(-1.14 \times 10^{-4} T \cdot M_e^{1.169})$$

〔2〕-1

$$\text{脱湿過程 } 1-rh=\exp(-8.7 \times 10^{-5} T \cdot M_e^{1.170})$$

〔2〕-2

rh ：空気相対湿度（小数表示）

T ：絶対温度（°K）

M_e ：平衡含水率

〔3〕 ハウレンソウの目減推定：次の 4 式と〔2〕-2 式を用いることによって可能となる。

$$V = \left(1 - \frac{M+100}{M_1+100}\right) \times 100$$

$$\frac{M-M_e}{M_1-M_e} = \exp[-(Kt)^n]$$

$$K = 8.254 \times 10^8 \exp\left(-\frac{7.383 \times 10^3}{T}\right)$$

$$n = 6.24 \times 10^{-3} v + 0.537$$

V ：任意時間後の目減

M_1 ：初期含水率

K ：乾燥速度係数

n ：乾燥定数

t ：時間

M ：任意時間後の含水率

T ：絶対温度°K

v ：セ氏温度°C

M_e ：平衡含水率

引用文献

- 1) Henderson, S.M. 1952. A Basic concept of Equilibrium Moisture. Agric. Engng. 33: 29—32.
- 2) Henderson, S.M., S. Pabis. 1961. Grain Drying Theory(I. Temperature Effect on Drying Coefficient). J. Agric. Engng. 6: 169—173.

- 3) 高分子学会・高分子と吸湿委員会. 1968. 材料と水分ハンドブック—吸湿・防湿・調湿・乾燥. pp. 550—552. 共立出版社.
- 4) 邨田卓夫. 1972. カンキツ類果実の生理および貯蔵に関する研究(第3報)—果実の予措乾燥に及ぼす風速の影響. 園学雑 41 : 312—316.
- 5) 農機学会. 1957. 農業機械ハンドブック. p. 677. コロナ社.
- 6) 大塚寛治・村田 敏・中馬 豊. 1975. 薄層内の熱風乾燥に関する一実験式. 農機誌 37 : 331—338.
- 7) Overhults, D. G., G. M. White, H. E. Hamilton, I. J. Ross. 1973. Drying Soybeans with Heated Air. Trans. of the ASAE. 16 : 112—113.
- 8) 樽谷隆之. 1975. 貯蔵・昭和 50 年度秋季大会シンポジウム講演要旨. 126—135.
- 9) Richey, C. B. 1961. Agricultural Engineer's Handbook. McGraw-Hill.
- 10) 渡辺和之・有原丈二. 1974. 作物組織の水ポテンシャル測定法とその意義. 農及園 49 : 739—743.