

日本食品保蔵科学会誌

VOL. 41 NO. 4

会 長	高井 陸雄	副 会 長	太田 英明	小宮山美弘	早坂 薫
編集委員長	太田 英明				
編 集 委 員	稲熊 隆博	井上 茂孝	今堀 義洋	恩田 匠	竹永 章生
	古庄 律	松田 茂樹	宮本 敬久		

<報 文>

- 近赤外マッピングスキャンによる食用卵の個別消費期限推定法に関する研究 (139)
／河野俊夫・疋田慶夫・村井正之
上向井美佐・柏野由加里・甲斐野乃花

<報 文> (英文)

- 小豆の減圧乾燥特性と含水率変化の予測モデル (145)
／村松良樹・坂口栄一郎・川上昭太郎・田川彰男

<研究ノート>

- 異なる輸送条件、貯蔵条件および貯蔵姿勢におけるアスパラガス (*Asparagus officinalis* L.) の
若茎の外観、糖度、水分含量および破断応力の変動 (155)
／樋口洋子・柘植一希・北條怜子・元木 悟

<講 座>

- HACCP教育講座 (10) エビ・カニアレルギーのはなし—甲殻類アレルギーの現状と対応— (165)
／菰田俊一

<文献抄録> (171)

<本会記事> (172)

<会 告> (175)

Food Preservation Science

CONTENTS OF VOL. 41 NO. 4 (2015)

<Article> (Japanese)

- Method for the Estimation of the Individual Shelf Life of Eggs
Using Mapping Scanning with Near-Infrared Spectroscopy
KAWANO Toshio, HIKIDA Yoshio, MURAI Masayuki,
KAMIMUKAI Misa, KASHINO Yukari and KAI Nonoka (139)

<Article> (English)

- Vacuum Drying Characteristics and New Prediction Model
for Changes in Moisture Content of Adzuki Beans
MURAMATSU Yoshiki, SAKAGUCHI Eiichiro,
KAWAKAMI Shotaro and TAGAWA Akio (145)

<Research Note> (Japanese)

- Effect of Transportation and Storage Conditions on the Quality of Asparagus Spears
HIGUCHI Yoko, TSUGE Kazuki HOJYO Reiko and MOTOKI Satoru (155)

<Serialization Lecture> (Japanese)

- Topic of Seafood Allergy Focusing on Crustaceans
KOMODA Toshikazu (165)

近赤外マッピングスキャンによる 食用卵の個別消費期限推定法に関する研究

河野 俊夫^{*1§}・疋田 慶夫^{*2}・村井 正之^{*1}
上向井美佐^{*1}・柏野由加里^{*1}・甲斐野乃花^{*1}

* 1 高知大学農学部

* 2 愛媛大学農学部

Method for the Estimation of the Individual Shelf Life of Eggs Using Mapping Scanning with Near-Infrared Spectroscopy

KAWANO Toshio^{*1§}, HIKIDA Yoshio^{*2}, MURAI Masayuki^{*1},
KAMIMUKAI Misa^{*1}, KASHINO Yukari^{*1} and KAI Nonoka^{*1}

* 1 Faculty of Agriculture, Kochi University, Monobe Otsu 200, Nankoku-shi, Kochi 783-8502

* 2 Faculty of Agriculture, Ehime University, 3-5-7 Takumi, Matsuyama-shi, Ehime 790-8566

To prevent the loss of eggs used for consumption, it is important to know the individual shelf life of eggs. In this study, a method for the estimation of the individual shelf life of eggs was proposed, based on the diffuse reflectance spectra mapping data obtained from the egg surface. The storage test for the eggs was conducted at a constant temperature, and for the test period, the spectra at 16 points on the surface of each egg, its Haugh Unit (HU) values, and albumen ATP values were measured every 3 days. The HU values were found to be highly correlated to the number of days after laying (DAL) with $R^2 = 0.957$. The relationships between the spectra mapping data and DAL were analyzed using the PLSR method, and ten wavelengths with good correlation performance were nominated. An estimation model for HU and albumen ATP values of eggs based on the spectra and its secondary different data was then constructed using neural networks with 20 input layer neurons, 40 hidden layer neurons, and 2 output layer neurons. The results obtained using the trained neural network estimation model showed good agreement with the measured data, the performance being $\pm 5.5\%$ in average relative error both for HU values and ATP values.

(Received Jan. 19, 2015 ; Accepted Apr. 8, 2015)

Key words : eggs, individual shelf life, estimation, mapping scanning, near-infrared, neural network
卵, 個別消費期限, 推定, マッピングスキャン, 近赤外, ニューラルネットワーク

養鶏場で採卵された食用卵の消費期限は、すべての卵に対して「一律の期間」が設けられ、パッケージに表示されている。消費者は一般に、パッケージに表示されたこの一律の消費期限を判断の基準として購入し、また、購入後もこの期限を外れた卵を家庭ゴミとして廃棄する。スーパーなどの末端市場では、消費期限を過ぎた卵は消費者に提供することができないため、廃棄するか、もしくは人以外の食用に転用される。食用卵の消費期限は、出荷卵に寄生する細菌の初期付着数および卵の流通環境(温湿度等)により、「一律の」、安全を見込んだ日数と

している。しかし、卵の安全な消費期限は卵ごとに異なる個別のものであり、一律の消費期限で廃棄すれば、まだ食用とするに足る卵も「廃棄処分」することになる。日本の食品流通においては、「まだ食べられる食品」の多くが、「一律の消費期限」によって廃棄処分となり食品の無駄を引き起こしている。平成24年10月に農林水産省より発表された「食品ロスの削減に向けて」と題する報告書(インターネット公開文書)¹⁾によれば、食用として生産される食品8,446万tのうち、食品由来の廃棄物は1,788万t発生し、このうちまだ食べられるのに廃棄

* 1 〒783-8502 高知県南国市物部乙200

§ Corresponding author, E-mail: tkawano@kochi-u.ac.jp

* 2 〒790-8566 愛媛県松山市樽味3-5-7

されている食品、すなわち「食品ロス」は、平成21年度の推計として年間約500～800万tに達するとしている。食品の無駄は、フィードバックして生産コストへの転嫁となり、消費者にとっては価格の上昇となって跳ね返る。採卵日による一律の消費期限ではなく、卵の状態に応じた「個別消費期限」をスキャンできる機器を開発することで、最適な卵消費につながり、食品の無駄を抑えることができるものと考えられる。

鶏卵の新鮮度を研究した例は多く、鮮度品質指標にはハウユニット、比重、粘度、卵黄色、卵白の水様化、CO₂発生量など様々な視点から検討されている^{2)～9)}が、品質指標として、どの文献にあっても支持されているのはハウユニットである。また、最近ではATP拭き取り検査法も機器の精度が高まり、応用範囲が広がっている¹⁰⁾。さらに、個々の卵の産卵後日数予測に関する従来の研究^{11)～13)}もあるが、主として割卵した結果をもとにしている。

そこで本研究では、ハウユニットと、拭き取り式ATPを用いた卵内ATPを、食用卵の内部鮮度指標に採用し、近赤外3Dマッピングスキャンにより、これらを割卵せずに推定するモデルを、ニューラル・ネットワークにより作成し、その応用によって卵の個別状態に応じて賞味・消費期限を推定する手法について検討した。

材料および実験方法

供試材料の鶏卵（以下、供試卵）には、高知県南国市の鶏卵農場より産出した褐色卵（卵重量M58g以上LL76g未満のもの）を総数144個用いた。農場で産出した卵は、通常、流通ルートを通じて末端市場で陳列されるまでの間、様々な温度履歴（変化）にさらされる。したがって、卵の品質劣化状態は流通過程に依存することになる。しかし卵の賞味・消費期限の中で、末端市場での保存期間が最も長く、卵の品質劣化への影響が大きいと考えられることから、ここでは末端市場での卵の陳列温度の標準として20℃を想定して貯蔵試験を行った。

鶏卵農場から産出した供試卵は、流通用のパックに入れ、20℃に設定したプログラム低温恒温槽（ヤマト科学、Model IQ-820）内の、常圧・暗所で12日間保存し、3日経過ごとに品質劣化指標となる、①卵白ATP値、②ハウユニット（Haugh Unit）の変化を計測するとともに、卵の3D品質指標マッピングとして、供試卵の周りに、長軸方向4点、円周方向4点に測定点を設け、波長900nm～1,600nmの範囲での卵表面の拡散反射分光スペクトルを測定した。

Fig. 1に、供試卵の近赤外マッピングスキャン装置の概要を示す。卵の3D品質マッピング情報としての、卵表面各部位での拡散反射分光スペクトル測定は次の手順により行った。①鈍端側を下にした状態で供試卵を長径方向で縦にして置く。②赤道部から下側1cm（測定部位A）、赤道部（同B）、赤道部から上側1cm（同C）、

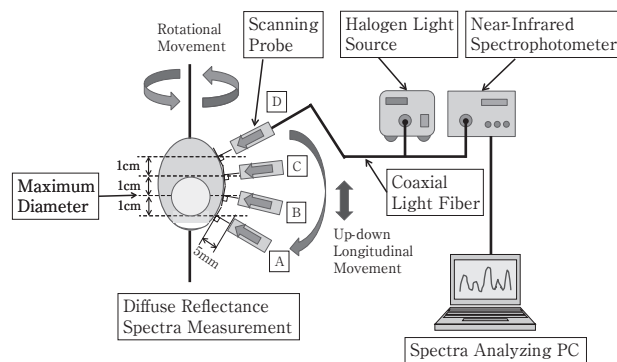


Fig. 1 Apparatus for the mapping scanning of eggs using near-infrared spectroscopy

同2cm（同D）の位置に、表面から5mmの距離で光ファイバー（光照射リング直径8mm）の先端を設置する。③②の光ファイバーを設置した位置ごとに、長軸を回転軸として供試卵を90°ずつ回転させる。④上記の縦方向4点、回転方向4点の組み合わせで決定される卵表面の位置で、ハロゲン光源（Moritex, Model: MHAB-150W）から同軸光ファイバーを通じて照射した光の、供試卵表面からの拡散反射光を、近赤外分光器（相馬光学、Model Fastevert S-2730）で分光し、近赤外スペクトルを計測する。近赤外分光器による反射分光スペクトルの測定では、供試卵表面の計測を開始する前に、卵表面に標準白板を当てて拡散反射測定を行い、その際の反射スペクトルをバックグラウンド特性（反射測定の基準値）とした。測定時の光ファイバー先端と供試卵との距離を決定するに当たっては、予備試験によって、間隙距離20mm、同10mm、同5mm、同0mm（スキャンプローブ先端接触）の4水準の距離設定で同一の卵の同一位置におけるスペクトルを比較し、得られる拡散反射スペクトルの変化がなくなり、スペクトル特性が安定する位置として5mmの距離を選んだ。

スペクトル測定を終えた卵は、殻付きの状態での質量を計測したのち、卵の鋭端側を、先端から軸方向に垂直高さ1cmの位置でアートカッターを用いて円周方向に切り取り、卵白部分のATP値を測定した。ATP測定には、調理機器の清浄度検査で用いられる拭き取り式の高感度ATP測定器（キッコーマンバイオケミファ、Model: PD-20）を用い、水・液体用ATP+AMP検査試薬キット（同、ルシパックPen-AQUA）で卵白内液のATP値を計測した。そのあと割卵し、卵黄が破裂しないよう、ゆっくりと内容物を平面上に載せて、濃厚卵白の高さをノギスで計測した。

最近では養鶏の際に、鶏卵の付加価値を高める目的で様々な添加物を飼料に加える場合がある。このため、供試卵間で、飼料由来と推定される食品添加物の検出量に大きな差（内成分に由来する初期条件の大きな違い）がないか、また、供試卵の保存性に影響ある保存料などが含まれていないかについて、PDA検出器（日本分光、

MD-2018), 蛍光検出器 (日本分光, FP-2020) を装備する高速液体クロマトグラフを用いて, 卵の水溶性成分中に含まれる食品添加物成分について確認した。使用カラムはCrest PAK C18T-5 (Size: 4.6mm×250mm, 日本分光) で, 溶離液は2液構成 (A液: 0.3% H_3PO_4 [リン酸] およびB液: CH_3CN [アセトニトリル]) で, カラム温度40℃, 検出波長域は210nm~530nm, 流量は1.0mℓ/min, インジェクション量は10μℓとした。

実験結果および考察

1. 供試卵の保存性にかかわる飼料由来物質の確認

供試卵間で, 飼料由来と推定される食品添加物の検出量に大きな差がないか, また, 供試卵の保存性に影響ある保存料などが含まれていないかをHPLCスペクトルによりスペクトル比較した結果, 供試卵には, 飼料由来とされる食品添加物や, 供試卵の保存性に影響ある保存料は, 他の市販卵と比較して大きな差は認められず, また保存料のように, 卵の賞味・消費期限に影響ある添加物も検出されなかった。このことから, 少なくとも, 供試卵間には飼料由来と推定される, 保存性に影響ある添加物因子については同条件として解析を進めた。

2. 3D品質マッピングデータの多変量解析

供試卵1個につき, 縦方向 (長軸方向) 4点, 円周方向4点の組み合わせで設定した, 表面各点における拡散反射スペクトルによる3Dマッピングデータは, 産卵日からの日数 (DAL=Days After Laying) を目的変数として, 多変量解析ソフトUnscrambler Ver.10.3 (CAMO, Norway) によりPLSR (Partial Least Square Regression) 分析した。拡散反射スペクトル (離散値) は, Savitzky-Golay法によるスムージング処理 (連続関数変換) のあと, 数値的に二次微分し, その値をPLSR分析時の入力データとした。データ数は, 900nm~1,600nmまでの波長範囲で242点, ca. 3nm間隔となっている。

Fig. 2は, そのPLSR解析の結果で, 横軸は近赤外二次微分値データから, 分析によって得られる因子の番号, 縦軸は目的変数 (DAL) の分散に対する寄与 (因子で

説明できる分散の割合%)である。Fig. 2によれば, PLSR分析によって得られる因子では, 3個の因子によってDAL分散を80%程度説明できるが, それ以上に因子を増やしても90%に漸近するのみで, 少数の因子でDAL分散を集約 (要約) 説明するのは難しい結果となっている。PLSRモデルは, 因子Fの線形結合によってDALの分散を説明する形式となっている。このため, スペクトルとDALとの関係が複雑になれば, 少数の因子Fの線形結合では足りず, 多数の因子が必要となる。Fig. 2で多数因子が必要になった理由は, そのことによるものと考ええる。

産卵からの日数 (DAL) は食用卵の品質低下の一つの指標である。PLSRモデルによって, 供試卵のスペクトル情報からDALを効率よく説明できなかったとしても, その分析過程で得られる, 個別測定波長のDAL値への寄与度は, その他のモデルを構築する際にも役立つ。このことから, 供試卵の近赤外マッピングスペクトルに含まれる各波長の, DALへの寄与度を示す回帰係数をもとに, その数値がプラスで大きいものから10位までを選ばし, 「品質劣化を推定するための候補波長」として利用することとした。より多くの候補波長を用いることも考えられるが, 近赤外3Dマッピング情報をもとにした食用卵の品質劣化モデル (個別消費期限推定モデル) を構築する上では, その数を少数にとどめる方が良い。それは, 候補波長数が実用化の際の波長フィルターの数に関連するため, フィルター数 (測定波長数) を減らすことが機器コンパクト化につながることによる。Table 1に, PLSR解析によって得られた, 品質劣化を推定するための候補波長を, 長軸方向のスキャンプローブ位置区分A~Dごとに示す。スキャンプローブ位置区分ごとに候補波長を決めた理由は, 後述するニューラル・ネットワークを用いた食用卵の品質劣化モデルの成績から, 卵のどの方向から光を照射することが推定に適切である

Table 1 Suitable wavelengths at each egg surface portion analyzed for the estimation of quality deterioration, which was obtained using PLSR analysis

Measuring Surface Portion on an Egg				
	A*	B*	C*	D*
Wave Lengths (nm)	1,034	1,049	1,034	1,264
	1,264	1,140	1,049	1,355
	1,267	1,264	1,184	1,375
	1,269	1,267	1,264	1,386
	1,369	1,269	1,270	1,545
	1,386	1,375	1,355	1,550
	1,534	1,536	1,386	1,553
	1,550	1,550	1,550	1,564
	1,553	1,553	1,553	1,570
	1,570	1,572	1,569	1,572

*Capital letters correspond to the scanning probe directions in Fig.1

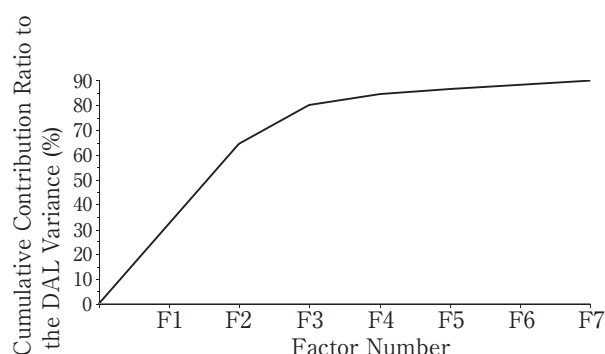


Fig. 2 Cumulative contribution ratio of the factors obtained by analyzing the secondary difference values of Near-Infrared spectra with PLSR

かを明らかにするためである。

3. 近赤外 3Dマッピング情報にもとづく食用卵の個別消費期限推定モデル

従来、食用卵の新鮮度の指標としては、次のハウユニット¹⁴⁾が用いられてきた。

$$HU = 100 \log (H - 1.7W^{0.37} + 7.6) \dots\dots\dots (1)$$

ここに、

H：濃厚卵白の高さ (mm)

W：殻付き卵の質量 (g)

本研究でも貯蔵中の供試卵のハウユニット計測を行い、それをプロットしたのがFig. 3である。供試卵の経過日数1日あたりのHU値減少は-3.10HUであった。スーパーなどの末端市場ではHU値60以上が目安である¹⁵⁾ことから、供試卵の場合、産卵から11日前後が棚持ち有効日数となることがわかる。ハウユニットは、貯蔵日数と高い相関性があることから、外挿すると24日程度でHU値20まで減少し、食用上問題を生じる可能性がある。

本研究で目標とする近赤外 3Dマッピング情報にもとづく食用卵の個別消費期限を推定するモデルは、HU値のほか、卵内清浄度の指標としてATP値を、個別消費期限を推定するための予測数とするものである。すなわちつぎのような関数モデルを構築する。

$$\left\{ \begin{matrix} HU \\ ATP \end{matrix} \right\} = f \left(X_i, \frac{d^2X}{d\lambda^2} \right) \dots\dots\dots (2)$$

ここに、

λ ：波長 (nm)

X_i ($i = 1 \sim 10$)：品質劣化を推定するための候補波長における近赤外拡散反射値

$\frac{d^2X}{d\lambda^2}$ ($i = 1 \sim 10$)：候補波長における近赤外反射スペクトル二次微分値

多入力（20入力）-多出力（2出力）の関数関係 f であり、線形の変数解析ではこの関係を表現することが困難である。そこで、多入力-多出力における非線形関係を表現するに適したニューラル・ネットワークをモ

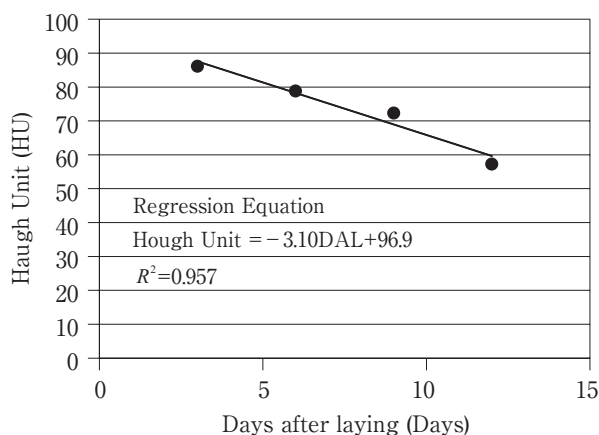


Fig.3 Relationships between Haugh Unit Values and Days after laying (DAL)

デル作成に利用した。Fig. 4に、近赤外 3Dマッピング情報（スペクトル情報）にもとづく食用卵の個別消費期限推定のためのニューラル・ネットワーク・モデルの概要を示す。関数関係 f の非線形性を考慮し、隠れ層の数は40ニューロンを設定した。モデルの構築には、MATLAB Ver. 6.1 Release12.1 (MathWorks, USA) 上のNeural Network Toolbox Ver. 4.0.1を利用した。測定データのうち4分の3をニューラル・ネットワークの学習に、残りの4分の1のデータを未知データとして推定精度の確認に用いた。

学習後のニューラル・ネットワーク・モデルを用いて、測定部位C（最大胴径位置から上方へ高さ1 cmの部位、Fig. 1参照）の近赤外拡散反射スペクトル情報から推定した、供試卵のHU値およびATP値を、それぞれ、Fig. 5およびFig. 6に示した。両図ともに、横軸には産

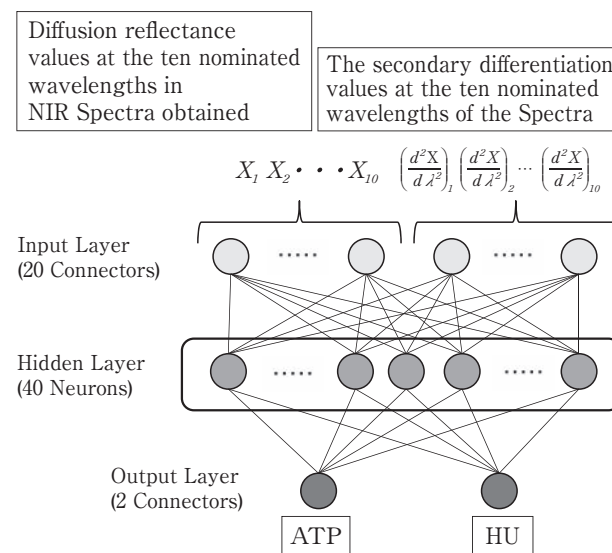


Fig. 4 Outline of the neural network model for estimating individual shelf life of eggs based on the NIR mapping information

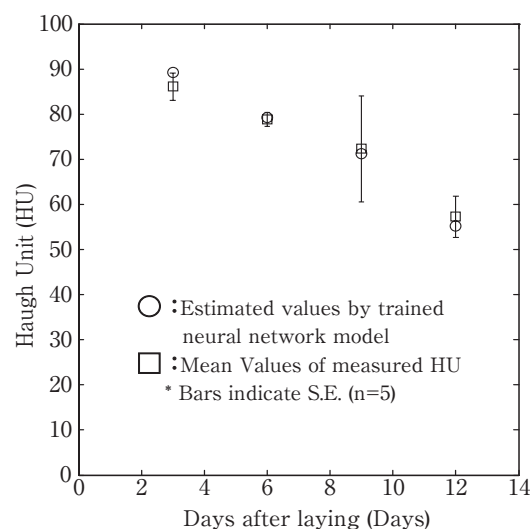


Fig.5 Estimation results of Haugh Unit values by the proposed neural network models (Scanning surface portion C)

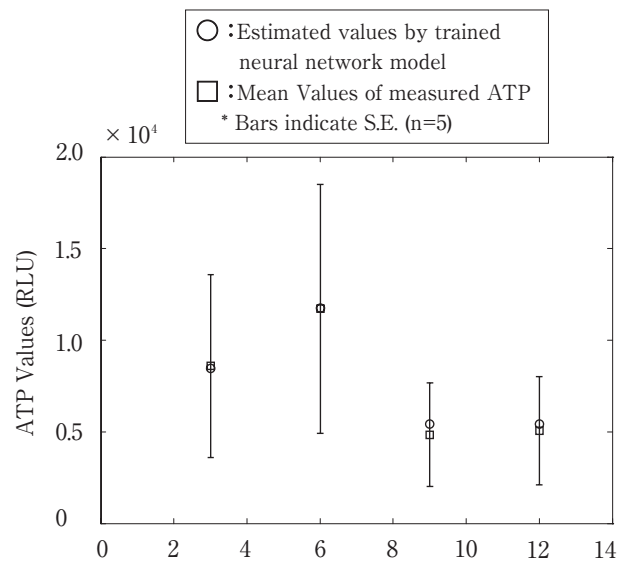


Fig.6 Estimation results of ATP values of egg albumen by the proposed neural network model (Scanning surface portion C)

卵日を起点とする経過日数 (DAL) をとっている。図中のバーは測定値平均に関する標準誤差S.E.である。HUに関するFig. 5の結果によれば、ニューラル・ネットワーク・モデルによる推定値 (図中の表示○) は、DALの初期においては実際のハウユニット値の平均 (図中の表示□) よりも高い値を推定し、DAL後期になるにしたがい、平均よりも低い値を推定する傾向となっている。

測定部位によって、ニューラル・ネットワーク・モデルによるHU推定の精度は異なる。Table 2 上段に、ニューラル・ネットワーク・モデルによるHU推定値の、実測値に対する相対誤差R.E. (Relative Error) を示す。表右側にある平均値は経過日数全体での単純平均である。平均値だけを見れば、部位D (最大胴径から上部2 cm位

置) での推定精度は+0.1%で推定成績が良い。ニューラル・ネットワーク・モデルによる推定では、Over-fittingと呼ばれる現象¹⁶⁾がある。測定したデータのばらつきが少ない場合や、データ数が母集団に比較して少ない場合にも起こる現象で、部位Dや部位Bの推定精度に見られる1%未満の数値は、このover-fittingによることも考えられる。

一方、部位Cでの卵内ATPに関するFig. 6によれば、ニューラル・ネットワーク・モデルによる推定値は、実測平均に近接しており、「平均値」の予測には適しているものと考えられる。しかし一方で、実測値のバラツキを示す、図中のバーで示した標準誤差 (S.E.) は大きく、卵内ATP推定では「個々の卵の」推定誤差は大きくなるものとする。HUの場合と同様に、卵内ATPの平均値に対するニューラル・ネットワーク・モデルの推定精度を、Table 2 の下段に示しているが、卵の最大胴径から最も遠い測定部位であるDの平均値推定精度は13.8%と、他の測定部位に比較して1オーダー成績が悪い。特に、DAL後半になるにしたがい推定値と実測値との差が大きくなる傾向を示している点は、賞味・消費期限を推定するうえでは問題がある。したがって、近赤外による卵のマッピング情報 (スペクトル情報) から卵内の品質低下を推定する場合には、部位BおよびD以外の、部位AとC (Fig. 1 参照) のデータを用いるほうが良い。

本研究で構築したニューラル・ネットワーク・モデルを用いて卵の近赤外3Dマッピング情報から、卵の品質 (HUおよび卵内ATP) を推定するには、測定部位が共通していることが検査の簡便さの点から良いと考えられる。したがって、卵の最大胴径部位 (部位記号B) を中心として、上下1 cm範囲の近赤外3Dマッピング情報 (スペクトル情報) をスキャンするのが適当である。このモデルは、割卵しない状態での卵内のHUおよび卵内ATPを推定するものである。したがって、これを卵の品質予測に活用する際には、HUおよび卵内ATPとDAL (産卵日からの経過日数) との関係図式を用いればよい。例えば、HUの個別賞味・消費期限を予測しようとする場合には、産卵直後の卵について、最大胴径を中心とする上下1 cm範囲の近赤外3Dスキャンを行い、Fig. 1で示した部位AとCにおける、品質劣化を推定するに適した候補10波長での拡散反射スペクトル、およびその二次微分値を利用する (二次微分値を得るため、実際には10波長前後の3点程度、3 nm間隔であれば波長にして前後9 nmのスペクトルをスキャンする必要がある)。これらをニューラル・ネットワーク・モデルに入力することで、卵のHUの「現在の推定値」を割卵することなく求められる。このことから、Fig. 3に示したHU-DAL直線式より、賞味・消費期限として設定するHUの値に到達するまでの「残り日数」、すなわち個別の卵ごとの賞味・消費期限の推定値を得ることになる。HU (ハウユニット) は、割卵しなければわからない数値であるので、

Table 2 Evaluation of the estimation accuracy of the proposed neural network model

	Scanning surface portion	DAL (Days)				Average (%)
		3	6	9	12	
HU	A	3.0	-0.1	0.8	14.6	4.6
	B	-11.5	0.4	-2.4	10.9	-0.6
	C	3.6	23.4	-1.24	-3.6	5.5
	D	-3.4	-1.0	6.2	-1.2	0.1
ATP	A	0.5	-2.5	15.6	8.5	5.5
	B	15.5	-0.3	-29.4	7.9	-1.6
	C	-1.5	0.3	12.1	6.7	4.4
	D	-2.1	1.8	-9.6	65.1	13.8

*Values in the table are the relative errors (R.E.) calculated by the following equation

$$R.E. (\%) = \frac{(\text{Model estimation value} - \text{Measured average value})}{\text{Measured average value}} \times 100$$

近赤外 3Dマッピング情報にもとづく無割卵での推定方法が有効となるのである。

今後の課題として、貯蔵温度を加味したHU-DAL関係式および卵内ATP-DAL関係式の整備があげられる。また、卵内ATP測定値と微生物繁殖状況との関係なども明らかにしていく必要があるものとする。

要 約

近赤外 3Dマッピングデータの解析では、まず線形の変量解析法の一つであるPLSR（部分最小自乗回帰）法を利用して、近赤外スペクトルの二次微分値から、卵の産卵後経過日数を推定する手法を試みた。その結果、PLSRモデルでは、因子数 7 個で経過日数の分散に対する分散寄与率を 90% 近くまで説明づけ予測することができたが、それ以上の因子を追加しても 90% の分散寄与率を漸近するのみであった。

そこで、PLSR分析の過程で明らかとなった、経過日数推定への相関係数が高い個別波長 10 個を選び出し、品質劣化を推定するための候補波長として利用することにし、産卵後の経過日数を推定する代わりに、卵の品質指標として頻用されるハウユニット (HU) および卵内 ATP 値の値を推定する、ニューラル・ネットワークを利用した非線形のモデルを作成した。学習したニューラル・ネットワーク推定モデルを用い、長軸方向 4 点周りの未学習データで、推定精度の検証を行ったところ、卵の最大胴径から上下 1 cm の点での近赤外マッピング情報を利用することで、HU および卵内 ATP とともに、実測平均に対する相対誤差で $\pm 5.5\%$ 以内の推定結果を得た。

したがって、産卵直後の近赤外マッピング情報とニューラル・ネットワークによる推定モデルから、その時点での HU および卵内 ATP が推定でき、HU および卵内 ATP の、産卵後日数との関係式を利用すれば、割卵することなく、卵の賞味・消費期限を予測するのに役立つと考える。

謝 辞 本研究は、財団法人旗影会 2013 年度研究助成により実施した。ここに記して謝意を表する。

文 献

- 1) 農林水産省：食品ロスの削減・食品廃棄物の発生抑制 http://www.maff.go.jp/j/shokusan/recycle/syoku_loss/ (2015 年 1 月 4 日現在)
- 2) 田名部尚子：鶏卵の品質—消費者の嗜好性と鶏卵の利用性の側面から—, 日本家禽学会誌, **32** (1), 1~11 (1995)
- 3) KEMPS, B. J., BAMELIS, F. R., MERTENS, K. DECUYPERE, E. M. DE BAERDEMAEKER, J. G. and DE KTELAERE, B.: PROCESSING, PRODUCTS, AND FOOD SAFETY - The Assessment of viscosity measurements on the albumen of consumption eggs as an indicator for freshness. *J. Poult. Sci.*, **89**, 2699~2703 (2010)
- 4) 小関佐貴代・中道由香：鶏卵の賞味期限決定に関わる想定温度における保存初期の鮮度変化と食用評価, 日本食生活学会誌, **18** (1), 43~47 (2007)
- 5) 山上善久・小林正樹：市販卵の品質についての実態調査並びに現状分析, 日本家禽学会誌, **20** (3), 192~196 (1983)
- 6) 青木隆子・石井裕子・伊藤輝子・春日敦子・佐々木弘子 (菅原龍幸・青柳康夫編著)：新版食品学実験書 (建帛社, 東京), pp. 187~192 (2002)
- 7) 阿久澤さゆり・石田 裕・大越ひろ・佐藤恵美子・澤山 茂・高橋智子・田村咲江・升井洋至・村山篤子・森高初恵 (大羽和子・川端晶子編著)：調理科学実験 (学建書院, 東京), pp. 162~163 (2003)
- 8) 渋谷祥子・杉山久仁子：新訂調理科学—その理論と実際— (同文書院, 東京), pp. 91~103 (2005)
- 9) FABBRI, A., CEVOLI, C., COCCI, E. and ROCCOLI, P.: Determination of the CO₂ mass diffusivity of egg components by finite element model inversion, *Food Research International*, **44**, 204~208 (2011)
- 10) 伊藤 武 (ATP・迅速検査研究会監修)：新しい衛生管理法 ATPふき取り検査 改訂増補版 (鶏卵肉情報センター, 名古屋) (2012)
- 11) 川合昌子・目加田博行・中島芳夫：平行線定量法を応用した市販卵の産卵後日数の推定方法, 日本家禽学会誌, **22** (5), 264~273 (1985)
- 12) 川合昌子・山田義武・桜井 進・中島芳夫：平行線定量法を応用した市販卵の産卵後日数の推定方法, 日本家禽学会誌, **24** (6), 369~371 (1987)
- 13) 川合昌子・梅田 勲・桜井 進・平光正博：市販卵の産卵後日数の推定方法, 日本家禽学会誌, **26** (6), 375~382 (1988)
- 14) HAUGHHL, R. R.: A new method for determining the quality of an egg, *US Egg Poultry*, **39**, 27~49 (1937)
- 15) 日本フードスペシャリスト協会：食品の官能評価・鑑別演習 (建帛社, 東京), pp. 155~157 (1999)
- 16) DEMUTH, H. and BEALE, M.: Neural Network Toolbox (5-51) ~ (5-72) (The MathWorks Inc., USA) (1992)

(平成 27 年 1 月 19 日受付；平成 27 年 4 月 8 日受理)

Vacuum Drying Characteristics and New Prediction Model for Changes in Moisture Content of Adzuki Beans

MURAMATSU Yoshiki^{*1§}, SAKAGUCHI Eiichiro^{*1},
KAWAKAMI Shotaro^{*1} and TAGAWA Akio^{*2}

* 1 Faculty of Regional Environment Science, Tokyo University of Agriculture,
1-1-1, Sakuragaoka, Setagaya-ku, Tokyo 156-8502

* 2 Kagoshima-Osumi Food Technology Development Center,
4938, Hosoyamada, Kushira-cho, Kanoya-shi, Kagoshima 893-1601

The vacuum drying method was applied to the drying of adzuki beans in this study. The effects of vacuum level and temperature on the drying rate and sample quality (intact bean kernel and hull) of adzuki beans were examined at various temperatures (20~70°C) and vacuum pressure levels (0.07~0.10 MPa). Broken and cracking sample beans were not observed under any measurement conditions. The drying rate of the sample was faster with vacuum drying than with hot air drying. The vacuum drying method was found to be applicable to adzuki beans with a moisture content of 25% on a dry basis or less at temperatures of 20~70°C. A new drying model related to temperature and vacuum level was developed to estimate changes in the moisture content of adzuki beans during vacuum drying with sufficient accuracy for practical use. The effective diffusion coefficients of the sample were estimated using Fick's second diffusion model, and they were shown to be a function of temperature and vacuum level.

(Received Mar. 11, 2015 ; Accepted Jun. 17, 2015)

Key words : adzuki beans, vacuum drying, drying model, Arrhenius type equation, diffusion coefficient
小豆, 減圧乾燥, 乾燥モデル, アレニウス式, 拡散係数

The eastern region of Hokkaido is a major site of bean production in Japan. At harvest, the moisture content of adzuki beans renders them unsafe storage, and so drying is necessary for commercial production of these beans. Currently, in Japan, almost all beans are first dried from 33 to 25%, on a dry basis (d.b.), or less in the field by sun drying, and then from 25 to 18% (d.b.) or less by hot air drying. Because the weather influences the drying treatment of these beans, the establishment of a drying method and conditions that result in efficient drying with no loss of bean quality is needed. Therefore, knowledge of the drying characteristics of beans is necessary for the design of equipment and processes as well as for quality control in adzuki bean drying.

The drying characteristics of many food types have been determined, and many mathematical models have been used to describe the food drying process. MURATA *et al.*¹⁾ investigated the drying characteristics of soybeans. TAGAWA *et al.*^{2),3)} and

MURAMATSU *et al.*⁴⁾ reported on the thin-layer drying characteristics of adzuki beans and kidney beans. Other studies have assessed the drying of soybeans^{5)~7)}, white beans⁵⁾, lentils⁸⁾, Bengal gram⁹⁾, green beans¹⁰⁾, peanuts¹¹⁾, and cocoa beans¹²⁾. However, almost all of the reports on bean drying have described hot air drying characteristics, and little research has been performed on the drying characteristics of adzuki beans, specifically.

During the drying of beans, it is necessary to avoid cracking the bean kernel and rupturing the hull of the bean. Usually, the beans are dried at low temperature by a forced air-drying method to avoid this quality degradation. The hulls of beans are thick and firm, such that movement of moisture through the hull is slower than in grains^{1)~4)}. Because of this, drying beans to a moisture level acceptable for safe storage by the forced air-drying method is a lengthy process. The disadvantages of forced air-drying include this long drying time during the falling rate drying period and a low

§ Corresponding author, E-mail: y-murama@nodai.ac.jp

energy efficiency. Compared with the forced air-drying method, vacuum drying has some distinctive advantages, such as faster drying rate, lower drying temperature, and oxygen deficient processing environment, which may help to improve the quality and nutritive value of the dried products¹³⁾. Therefore, the vacuum drying method can be an effective method to hasten the drying of beans. Examples of studies that have been conducted on vacuum drying of agricultural products include coconut press cake¹⁴⁾, eggplants¹³⁾, date pulp cubes¹⁵⁾, date powder¹⁶⁾, and onion slices¹⁷⁾. All of these studies developed suitable models to describe the vacuum drying process. However, no information exists in the literature on the vacuum drying of adzuki beans. If the beans are dried in unsuitable vacuum drying conditions (initial moisture content of the sample, vacuum level, and temperature), the bean kernel can crack and the hull of the bean can rupture, decreasing the quality of the beans. Therefore, it is necessary to clarify the optimal conditions in which the vacuum drying method can be applied to the drying of beans. The optimal vacuum drying conditions (i.e., vacuum level and temperature) that will minimize this damage and mathematical models that describe the vacuum drying process are needed for adzuki beans.

MURAMATSU *et al.*¹⁸⁾ reported that the vacuum drying method was suitable for scarlet runner beans with moisture content below 25% (d.b.) and that the diffusion coefficient values for vacuum drying were approximately twice as much as the values for hot air drying at the same temperature. Therefore, vacuum drying may be a useful method to shorten the drying time of adzuki beans.

In this study, vacuum drying characteristics of adzuki beans were measured at selected temperatures (20~70°C) and vacuum levels (0.07~0.10 MPa). A new drying model was then proposed to estimate the changes in moisture content of the sample during vacuum drying. The estimated constants from the drying model were then represented as a function of both vacuum drying temperature and vacuum level. In addition, by using Fick's second diffusion model, the effective diffusion coefficients of the sample were estimated and were shown to be a function of both vacuum drying temperature and vacuum level. The objectives of this study were ① to examine the vacuum drying characteristics of the sample at various

temperatures and vacuum levels; ② to develop a new drying model for estimation of the changes in moisture content; and ③ to evaluate the relationship between the effective diffusion coefficient, temperature, and vacuum level. The results obtained in this study will provide useful basic information for the optimum drying of adzuki beans.

Materials and Methods

1. Sample

The adzuki beans (cv. "Erimoshozu") used in this study were harvested in November 2005 in the town of Bihoro in Hokkaido, Japan, and were purchased from a Japanese agricultural cooperative in Bihoro (JA Bihoro). The experiments were conducted from 2005 to 2006. In Bihoro, the adzuki beans were dried by the sun drying method or the forced air-drying method, with both methods performed in ambient air. The dried beans were stored at ambient temperature. The sample beans were brought to the laboratory in sealed vinyl bags to maintain the initial moisture content and were stored at room temperature (20~25°C). The sample beans were dark garnet-brown in color and, on average, were 7.0 ± 0.4 mm long, 5.0 ± 0.2 mm wide, and 4.6 ± 0.3 mm thick. The moisture content of the sample was determined using the oven drying method in which 10 g of the sample was dried in a forced-hot-air oven (DX-600, Yamato Scientific Co., Ltd.) at 105°C for 24 hours, in accordance with the Japanese Society of Agricultural Machinery standards¹⁹⁾. The moisture content of the sample carried into the laboratory was approximately 15% (d.b.). Prior to measuring the drying characteristics, the sample beans were remoistened to the desired initial moisture content of 25% (d.b.) by the addition of a predetermined quantity of distilled water to 50 g of sample in a vinyl bag, because adzuki beans are normally delivered to drying plants with this moisture content. To ensure the uniform distribution of moisture in the bag and to equilibrate the moisture content of the sample, the sealed bag was stored in a refrigerator at approximately 5°C and mixed by shaking periodically for 7 days prior to testing. Beans with ruptured kernels or cracked hulls, determined by visual observation, were removed before the drying test.

2. Vacuum drying test

The changes in the moisture content of the

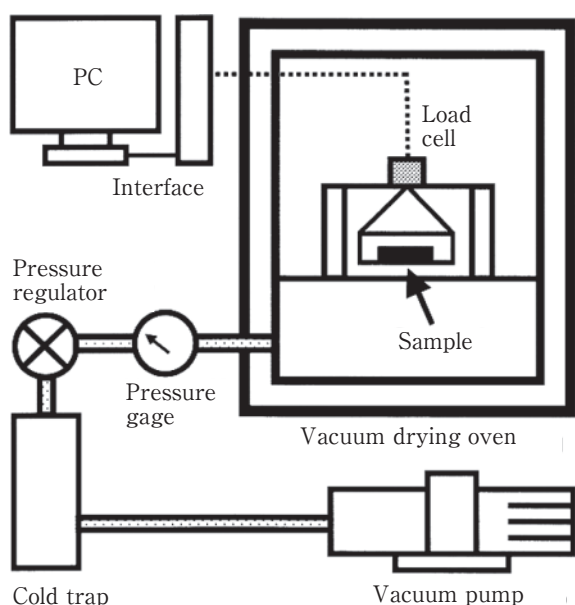


Fig. 1 Schematic of the vacuum drying apparatus

sample using the vacuum drying method were measured at six temperatures (20, 30, 40, 50, 60, and 70°C) and at four vacuum levels (0.07, 0.08, 0.09, and 0.10 MPa), respectively. The absolute pressure at a vacuum level of 0.10 MPa was 200 Pa in this study. The absolute vacuum pressure values were almost the same as the values converted from the standard pressure (0.101325 MPa) and vacuum level. Fig. 1 shows a schematic of the vacuum drying apparatus used in this study. A vacuum drying oven (DP33, Yamato Scientific Co., Ltd.) was used as a vacuum drying chamber and temperature control unit. The drying chamber was 300 mm wide, 250 mm long, and 250 mm high. The temperature in the drying chamber, as well as the surface and internal temperature changes of the sample, was measured with a T-type thermocouple and was recorded with a data logger (GR-3500, KEYENCE Co., Ltd.). The desired degree of vacuum in the chamber was maintained with a vacuum pump (PD 202, Yamato Scientific Co., Ltd.) and pressure regulator (T203-1-02BG, AS ONE Co., Ltd.), and the air in the chamber was continuously removed. Changes in mass, i.e., moisture content changes, during drying were measured using a load cell (LVS-200GA, KYOWA Electronic Instruments Co., Ltd.) fixed on a supporting frame and a sensor interface (PCD - 300 A, KYOWA Electronic Instruments Co., Ltd.), and the changes in sample mass were automatically recorded on a personal computer. A stainless steel basket, 120 mm in diameter and 15 mm in height with a 3.0 mm aperture,

was utilized as a sample tray. The sample (approximately 50 g) was placed on the sample tray and then suspended from the load cell. The drying test was terminated when the moisture content of the sample was approximately 5% (d.b.). Broken and cracked beans were determined again by visual observation after the drying test. The final moisture content of the sample was measured using the previously mentioned oven drying method. Utilizing the measured value of the final moisture content, the changes in mass during drying were converted to the moisture content of the sample.

Results and Discussion

1. Cracking of the bean kernel and hull, and changes in moisture content

During drying, it is necessary to avoid cracking the bean kernel and rupturing the hull of the bean due to the stress of changes in temperature and moisture of the bean. More specifically, the initial moisture content of the bean and the drying rate influence the integrity of the bean. The drying rate decreases with a decrease in the moisture content during the falling rate drying period, i.e., the drying rate is faster with higher moisture content. MURAMATSU *et al.*¹⁸⁾ reported that broken and cracking scarlet runner beans were not observed at an initial moisture content of 25% (d.b.) in the vacuum drying process. In this study, no broken and cracking sample beans were found under any measurement conditions. It is assumed that the drying conditions (initial moisture content, temperature, and vacuum level) were suitable to eliminate the breaking and cracking of samples. Therefore, the vacuum drying method was found to be applicable to adzuki beans with a moisture content of 25% (d.b.) or less at temperatures of 20 ~ 70°C.

The changes in moisture content of the sample at six different temperatures (20 ~ 70°C) and at a vacuum level of 0.10 MPa are shown in Fig. 2. The moisture content of the sample decreased with elapsed time, exhibiting a gentle downward curve from the beginning of the drying process. The drying rate of the sample was obtained by numerical differentiation (forward-Gregory-Newton method) using the moisture content measurements. Fig. 3 shows the relationships between drying rate and moisture content at four different vacuum levels (0.07 ~ 0.10 MPa) and at a temperature of

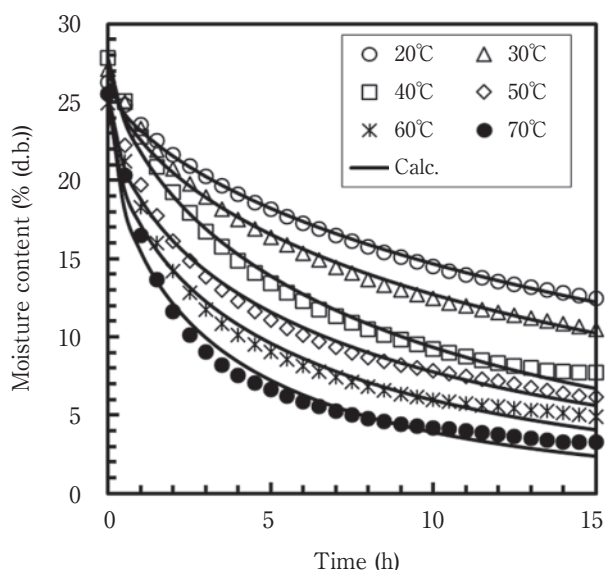


Fig. 2 Changes in the moisture content of the sample at six different temperatures (20~70°C) and at a vacuum level of 0.10 MPa

The solid line shows the values calculated from equation (2).

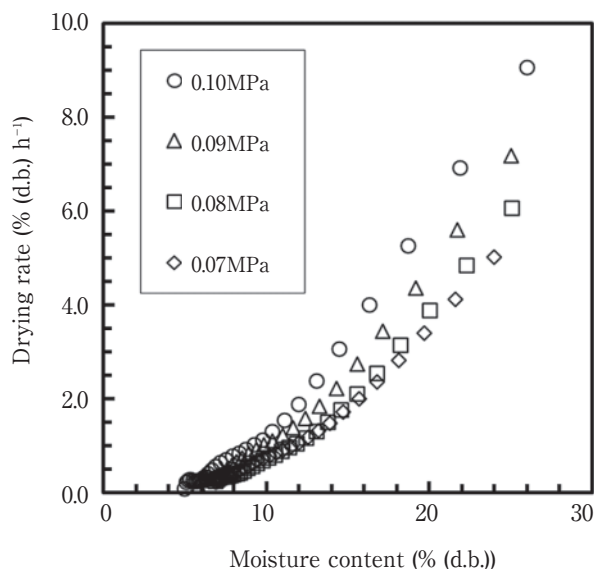


Fig. 3 Relationships between drying rate and moisture content at four different vacuum levels (0.07~0.10 MPa) and at a temperature of 60°C

60°C. As shown in Fig. 3, the drying rate of the sample increased with an increase in the vacuum level at the same temperature and with increasing temperature at the same vacuum level. Fig. 3 indicates that the vacuum drying process of the sample comprises the falling rate drying period. The relationship between the drying rate, moisture content, temperature, and vacuum level for all measurement conditions exhibited the same trend.

A number of researchers have shown that drying of particulate agricultural products that contain little

moisture, such as cereals and beans, typically begins in the falling rate drying period^{1)~4), 20), 21)}. The thin-layer hot air drying processes of adzuki beans²⁾ and several kinds of kidney beans^{3), 4)} were composed of the second falling rate drying period, and the infinite cylinder model, infinite plane sheet model, and sphere model, which are exact solutions for the diffusion equation, were used to describe changes in the moisture content of these beans. MURATA *et al.*¹⁾ measured the thin-layer hot air drying characteristics of soybeans and analyzed the measured results using the infinite cylinder model. HENDERSON and PABIS model was applied to the drying of peanuts¹¹⁾, and AMELLAL and BENAMARA¹⁵⁾ used the same model to describe the vacuum drying kinetics of date pulp cubes. DOYMAZ¹⁰⁾ and JADHAV *et al.*²²⁾ reported that Page equation adequately predicts the drying characteristics of green beans and green peas. Page equation is given as:

$$\frac{M - M_e}{M_0 - M_e} = \exp(-kt^a) \dots\dots\dots (1)$$

Page equation has been widely applied to the analysis of drying characteristics of many kinds of agricultural products other than beans (e.g., blanched sweet potato slices²³⁾, banana slices²⁴⁾, black grapes²⁵⁾, asparagus roots²⁶⁾, tomatoes²⁷⁾, and litchi²⁸⁾). MITRA *et al.*¹⁷⁾ have reported that Page equation was a suitable mathematical model to represent the vacuum dehydration kinetics of onion slices. Complete dehydration of material by the vacuum drying method is possible if the drying time is sufficiently long. Therefore, the equilibrium moisture content in equation (1) was considered to be zero^{14), 17)}. Thus, equation (1) can be rearranged as follows^{14), 17)}:

$$\frac{M}{M_0} = \exp(-kt^a) \dots\dots\dots (2)$$

The measured drying data for adzuki beans at each measurement condition were fitted to equation (2) using the nonlinear least squares method. The goodness of fit was evaluated by the values of the root mean squared error (RMSE) and the coefficient of determination (R^2). The values of the parameters, the RMSE, and the R^2 of equation (2) at each measurement condition are given in Table 1. As shown in Table 1, the values of the RMSE increased with an increase in the vacuum level at the same temperature and with an increase in the temperature at the same vacuum level. Further, the

Table 1 Values of the initial moisture content (M_0), constant (α), drying rate constant (k), root mean squared error (RMSE), and coefficient of determination (R^2) for equation (2) under each set of measurement conditions

Vacuum level (MPa)	Temp. (°C)	M_0 (%, d.b.)	α (—)	k (h^{-1})	RMSE (%, d.b.)	R^2 (—)
0.07	20	24.44	0.6882	0.0594	0.0708	0.9994
	30	24.58	0.7313	0.0837	0.1302	0.9985
	40	24.31	0.6626	0.1405	0.1435	0.9985
	50	26.11	0.6547	0.1724	0.2430	0.9964
	60	23.99	0.6522	0.2331	0.3677	0.9924
	70	23.87	0.6368	0.3139	0.4942	0.9876
0.08	20	24.44	0.6852	0.0848	0.0920	0.9991
	30	24.58	0.6598	0.1097	0.1342	0.9986
	40	26.20	0.6690	0.1561	0.2852	0.9956
	50	25.49	0.6571	0.1957	0.2778	0.9957
	60	25.34	0.6288	0.2741	0.4722	0.9891
	70	24.99	0.5774	0.3469	0.5148	0.9858
0.09	20	27.12	0.6709	0.0989	0.1448	0.9985
	30	25.11	0.7012	0.1189	0.1872	0.9976
	40	27.91	0.6752	0.1761	0.3097	0.9955
	50	25.63	0.6286	0.2282	0.3968	0.9915
	60	25.06	0.6081	0.3146	0.5153	0.9867
	70	23.93	0.5815	0.4003	0.5985	0.9802
0.10	20	26.24	0.6717	0.1240	0.1786	0.9977
	30	27.11	0.6193	0.1820	0.3390	0.9936
	40	27.83	0.6532	0.2427	0.5033	0.9897
	50	25.45	0.5938	0.3034	0.4986	0.9871
	60	24.95	0.5837	0.3731	0.6314	0.9796
	70	25.51	0.5736	0.5007	0.7444	0.9726

R^2 values decreased with an increase in the vacuum level at the same temperature and with an increase in the temperature at the same vacuum level. These results suggest that equation (2) has a higher goodness of fit at lower vacuum levels and lower temperatures. The solid line in Fig. 2 shows the results calculated from equation (2). As shown in Fig. 2, the measured results agreed well with the calculated results. Similar results were obtained for all other temperatures. Under all measurement conditions, the changes in the moisture content of the sample caused by vacuum drying could be estimated by equation (2).

The drying rate of beans is slower than that of many kinds of grains²¹⁾. A potential reason for this is the larger particle size of beans. Furthermore, the hulls of beans are thick and firm, such that movement of moisture through the hull is slower than in grains. TAGAWA *et al.*²⁾ have reported that

the drying rate constants of adzuki beans for the hot air drying method were approximately 0.085 h^{-1} at 30°C and 0.110 h^{-1} at 40°C , respectively. The drying rate constants in equation (2) shown in Table 1 were 1.0~2.1 times greater at 30°C and 1.3~2.3 times greater at 40°C than the drying rate constants for the hot air drying method²⁾. These results show that the drying rate of adzuki beans with vacuum drying is faster than with hot air drying. This is true particularly in the falling rate period, because the drying rate decreases as drying progresses and a lot of the drying time is needed. Therefore, the vacuum drying method should be applied to adzuki beans with moisture content below 25% (d.b.) to decrease the drying time.

The temperature dependency of the drying rate constants for soybean¹⁾, kidney beans³⁾, and grains²⁰⁾ were expressed by the following Arrhenius-type equation:

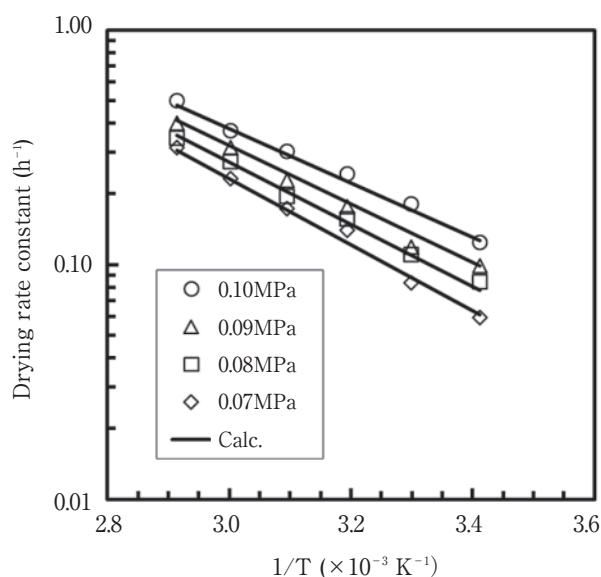
Table 2 Values of the parameters, root mean squared error (RMSE), and coefficient of determination (R^2) for equations (3) and (8) at each vacuum level

Equation		Vacuum level (MPa)			
		0.07	0.08	0.09	0.10
(3)	a_1 (h^{-1})	5.443×10^3	1.396×10^3	1.967×10^3	1.279×10^3
	b_1 (K)	2.780×10^4	2.373×10^4	2.428×10^4	2.241×10^4
	R^2 (-)	0.9914	0.9943	0.9920	0.9943
	RMSE (h^{-1})	7.075×10^{-3}	5.805×10^{-3}	6.457×10^{-3}	9.275×10^{-3}
(8)	D_o ($\text{m}^2 \text{h}^{-1}$)	2.447×10^{-1}	5.291×10^{-2}	6.700×10^{-2}	6.462×10^{-2}
	E (J mol^{-1})	3.850×10^4	3.387×10^4	3.396×10^4	3.291×10^4
	R^2 (-)	0.9939	0.9919	0.9968	0.9918
	RMSE ($\text{m}^2 \text{h}^{-1}$)	5.350×10^{-9}	8.059×10^{-9}	8.453×10^{-9}	2.054×10^{-8}

$$k = a_1 \cdot \exp\left(-\frac{b_1}{RT}\right) \dots\dots\dots (3)$$

Equation (3) shows that the relationship between the drying rate constants and the reciprocal of the absolute temperature is approximately linear in a semi-logarithmic plot. The drying rate constants in equation (2) shown in Table 1 increased as the temperature increased at each vacuum level. Fig. 4 shows the Arrhenius relationship for the drying rate constant at each vacuum level. The drying rate constant shown in Table 1 at each vacuum level was fitted by the linear least squares method to equation (3). The values of the parameters, the RMSE, and the R^2 of equation (3) for each vacuum level are given in Table 2. Equation (3) is applicable for examining the relationship between the drying rate constant and the absolute temperature at each vacuum level.

As shown in Table 1, the drying rate constant increased with an increase in the vacuum level at each temperature. When the natural logarithm of the drying rate constant was plotted against the vacuum level for each temperature, the natural logarithm of the drying rate constant increased linearly with an increase in the vacuum level. The temperature dependency of the drying rate constant of the sample at each vacuum level is expressed by equation (3). Therefore, we assumed the following equation to represent the relationship between the drying rate constant, temperature, and vacuum level:

**Fig. 4** Arrhenius relationships for the drying rate constant of the sample at four different vacuum levels (0.07~0.10 MPa)

The solid line shows the values calculated from equation (4).

$$\ln k = (a_2 P + b_2) - \frac{(c_2 P + e_2)}{RT} \dots\dots\dots (4)$$

The drying rate constants shown in Table 1 for all measurement conditions were fitted by the linear least squares method to equation (4). The values of the parameters, the RMSE, and the R^2 of equation (4) were: $a_2 = -40.83$, $b_2 = 11.14$, $c_2 = -1.581 \times 10^5$, $e_2 = 3.805 \times 10^4$, $\text{RMSE} = 1.033 \times 10^{-2} \text{ h}^{-1}$, and $R^2 = 0.9916(-)$. The solid line in Fig. 4 shows that the calculated drying rate constants from equation (4) agreed well with the values shown in Table 1.

Therefore, the drying rate constant for the sample was written as a function of both temperature and vacuum level by equation (4).

The drying model written as a function of both vacuum level and temperature will be useful in the vacuum drying simulation. In this study, to develop a new prediction model for the changes in moisture content of the sample during vacuum drying with sufficient accuracy for practical use, the values of constant α in equation (2) were expressed by the following equation (5) as a function of both temperature and vacuum level:

$$\alpha = -1.672P + 1.840 \times 10^{-3}T + 1.372 \quad (5)$$

The values of the RMSE and the R^2 between the values of α shown in Table 1 and the values calculated from equation (5) were 0.0188(–) and 0.7914(–), respectively. The changes in moisture content of the sample were described by equation (2) and the values of two parameters in equation (2) (k and α) were represented by equations (4) and (5), respectively. Therefore, using equations (2), (4), and (5), the changes in moisture content of the sample were calculated and then compared with the measured results. Namely, substituting the values of k calculated from equation (4), α calculated from equation (5), and the drying time to equation (2), the moisture contents were calculated for each measurement condition. A comparison between the measured results and the results calculated from equations (2), (4), and (5) at four different vacuum levels (0.07~0.10 MPa) and at a temperature of 50°C is shown in Fig. 5. The broken line in Fig. 5 shows the result calculated from equations (2), (4), and (5), which agreed well with the measured value. The values of the RMSE and the R^2 between the measured results and the values calculated from equations (2), (4), and (5) were 0.1804~1.244% (d.b.) and 0.9359~0.9976(–), respectively. When the calculated results from equation (2) using the values of drying rate constant k and constant α shown in Table 1 were compared with the results calculated from equations (2), (4), and (5), the deviations were 0.0~1.4% (d.b.) (average: 0.3% (d.b.)). Thus, the changes in moisture content of the sample during vacuum drying could be estimated using equations (2), (4), and (5). In this study, the new drying model, i.e., equations (2), (4), and (5), was derived, and this model was suitable for

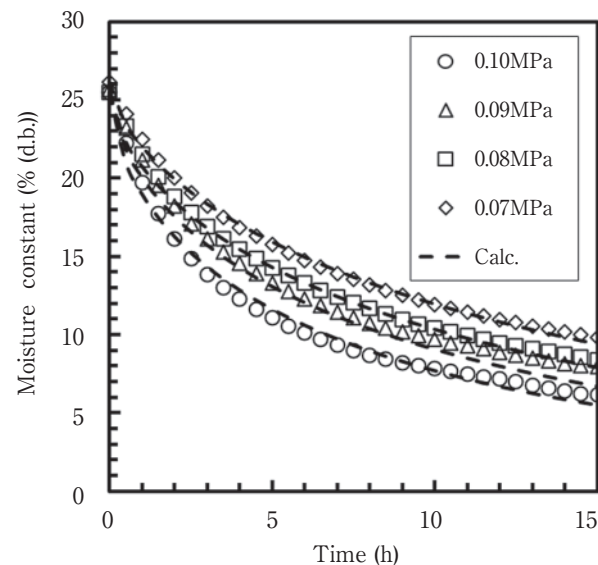


Fig. 5 Comparison of the measured moisture content to the result calculated from equations (2), (4), and (5) at four different vacuum levels (0.07~0.10 MPa) and at a temperature of 50°C

The broken line shows the value calculated from equations (2), (4), and (5).

predicting the changes in moisture content of adzuki beans during vacuum drying in the ranges of 20~70°C and 0.07~0.10 MPa (vacuum level) with sufficient accuracy for practical use. These equations will be useful in the design of equipment and processes for vacuum drying of adzuki beans.

2. Effective diffusion coefficient

The experimental drying data for the determination of diffusion coefficients were interpreted using Fick's second diffusion model. The solution of Fick's law for an infinite slab, with the assumptions that moisture migration was by diffusion, there was negligible shrinkage, and diffusion coefficients and temperature were constant, is given by equation (6)²⁹⁾:

$$\frac{M - M_e}{M_0 - M_e} = \sum_{i=1}^{\infty} \frac{8}{(2i-1)^2 \pi^2} \exp\{-D_{eff} (2i-1)^2 \pi^2 t / 4l^2\} \quad (6)$$

For long drying times, equation (6) can be simplified to only the first term of the series. Thus, equation (6) is rearranged as follows:

$$\frac{M - M_e}{M_0 - M_e} = \frac{8}{\pi^2} \exp\{-D_{eff} \pi^2 t / 4l^2\} \quad (7)$$

The effective diffusion coefficients D_{eff} can be calculated from the slope of the left-hand side of equation (7).

TAGAWA *et al.*³⁾ and MURAMATSU *et al.*⁴⁾ have determined the effective diffusion coefficients of

kidney beans utilizing equation (7). In this study, to estimate the effective diffusion coefficient of the adzuki bean sample, moisture content data at each measurement condition were fitted to the three kinds of Fick's second diffusion model: the infinite slab model, the infinite cylinder model, and the sphere model. We found that the infinite cylinder model and the sphere model did not predict the moisture content data with sufficient accuracy. Therefore, the infinite slab model was used to determine the effective diffusion coefficient of the sample. In this study, to determine the effective diffusion coefficient for vacuum drying of the sample, the data from the late part of the drying process, i.e., the data at each measurement condition below a moisture content of 15% (d.b.), were fitted to equation (7) using the linear least squares method. When the effective diffusion coefficients

were calculated, the values of M_0 and l in equation (7) were equal to 0% (d.b.) and 0.0024 m (average of the width and thickness of the sample), respectively. The values of the estimated effective diffusion coefficient, the RMSE, and the R^2 of equation (7) at each measurement condition are given in Table 3. The values of M_0 in equation (7) are presented in Table 1. The effective diffusion coefficients increased as the temperature increased at each vacuum level. At the same temperature, the effective diffusion coefficients of the samples increased as the vacuum level increased. The temperature dependency of the effective diffusion coefficient for kidney beans⁴⁾, soybeans⁶⁾, and green beans¹⁰⁾ is expressed by the following Arrhenius-type equation:

$$D_{eff} = D_0 \cdot \exp\left(-\frac{E}{RT}\right) \dots\dots\dots (8)$$

Equation (8) shows that the relationship between the effective diffusion coefficient and the reciprocal of the absolute temperature is approximately linear in a semi-logarithmic plot. As shown in Fig. 6, the Arrhenius relationship of the effective diffusion coefficient of the samples exists at each vacuum level. The values of the parameters, the RMSE, and the R^2 of equation (8) of the sample, determined by the linear least squares method at each vacuum level, are given in Table 2. In addition, the relationships between the effective diffusion

Table 3 Values of the effective diffusion coefficient (D_{eff}), root mean squared error (RMSE), and coefficient of determination (R^2) for equation (7) under each set of measurement conditions

Vacuum level (MPa)	Temp. (°C)	D_{eff} ($\times 10^{-7} \text{ m}^2 \text{ h}^{-1}$)	RMSE (% (d.b.))	R^2 (-)
0.07	20	0.3107	0.0395	0.9954
	30	0.6116	0.0910	0.9793
	40	1.005	0.1113	0.9926
	50	1.378	0.0942	0.9900
	60	2.213	0.0914	0.9959
	70	3.352	0.1218	0.9949
0.08	20	0.5184	0.0914	0.9846
	30	0.6944	0.0729	0.9958
	40	1.255	0.2471	0.8054
	50	1.687	0.1002	0.9931
	60	2.725	0.0841	0.9966
	70	3.660	0.1187	0.9917
0.09	20	0.6125	0.0899	0.9862
	30	0.9129	0.0201	0.9997
	40	1.497	0.1936	0.9648
	50	2.015	0.1684	0.9826
	60	3.230	0.1189	0.9930
	70	4.642	0.1755	0.9897
0.10	20	0.8661	0.1621	0.9539
	30	1.352	0.1692	0.9666
	40	2.335	0.2162	0.9737
	50	2.934	0.2377	0.9720
	60	4.168	0.1208	0.9928
	70	6.593	0.1446	0.9930

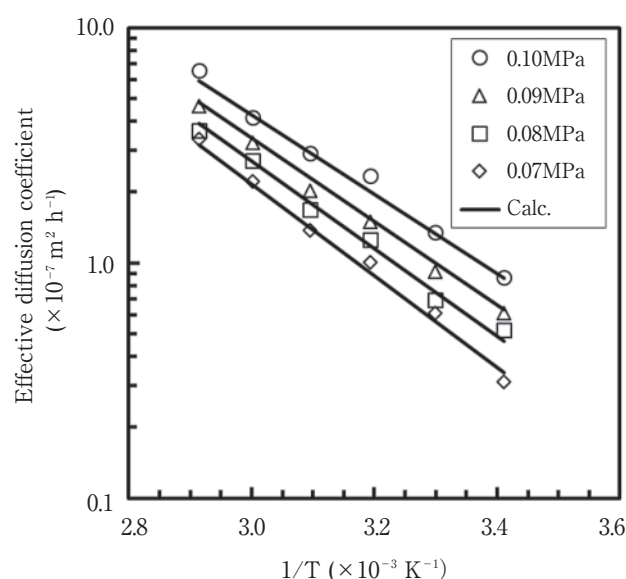


Fig. 6 Arrhenius relationships for the effective diffusion coefficient of the sample at four different vacuum levels (0.07~0.10 MPa)

The solid line shows the values calculated from equation (9).

coefficients and the vacuum level were examined. As a result, the effective diffusion coefficients could be expressed by equation (9) as a function of both temperature and vacuum level:

$$\ln D_{\text{eff}} = (-37.59P + 0.7479) - \frac{(-1.668 \times 10^5 P + 4.899 \times 10^4)}{RT} \dots\dots (9)$$

The solid line in Fig.6 shows the result calculated from equation (9). The values of the RMSE and the R^2 of equation (9) were $1.856 \times 10^{-8} \text{ m}^2 \text{ h}^{-1}$ and 0.9911(−), respectively. The values of the RMSE and the R^2 and the results shown in Fig. 6 show that the values calculated from equation (9) agreed well with the values estimated from equation (7). Thus, the effective diffusion coefficients of the sample were represented as a function of both absolute temperature and vacuum level by equation (9).

Conclusion

The vacuum drying characteristics of adzuki beans were measured at selected temperatures (20~70°C) and vacuum levels (0.07~0.10 MPa). The vacuum drying method was found to be appropriate for adzuki beans with a moisture content of 25% (d. b.) or less at temperatures of 20~70°C. A new drying model related to temperature and vacuum level was derived to estimate changes in moisture content of the sample. The comparison of the measured data with the calculated values from the empirical equation showed good agreement. The new drying model was suitable to predict the changes in moisture content of adzuki beans during vacuum drying in the experimental ranges with sufficient accuracy for practical use. The estimated effective diffusion coefficients increased with increasing temperature and vacuum level, showing that they are a function of these two variables.

Acknowledgements This research was supported in part by funds from the Iijima Memorial Foundation for the Promotion of Food Science and Technology. We would like to thank Mr. Daisuke Ehara, who was a student of the Tokyo University of Agriculture, for his assistance in performing the experiments.

Nomenclature

α : Constant (decimal)
 a_1 : Constant (h^{-1})

a_2 : Constant ($\text{h}^{-1} \text{ Pa}^{-1}$)
 b_1 : Constant (K)
 b_2 : Constant (h^{-1})
 c_2 : Constant (K Pa^{-1})
 D_{eff} : Effective diffusion coefficient ($\text{m}^2 \text{ h}^{-1}$)
 D_0 : Constant ($\text{m}^2 \text{ h}^{-1}$)
 E : Activation energy (J mol^{-1})
 e_2 : Constant (K)
 k : Drying rate constant (h^{-1})
 l : Characteristic length (m)
 M : Moisture content (% (d.b.))
 M_0 : Initial moisture content (% (d.b.))
 M_e : Equilibrium moisture content (% (d.b.))
 R : Gas constant (8.314 J mol^{-1})
 T : Absolute temperature (K)
 t : Time (h)
 P : Vacuum level (MPa)

References

- 1) MURATA, S., KAWANO, T. and ENOMOTO, T.: Drying characteristics of soybeans, *J. Japanese Soc. Agric. Machinery*, **55** (1), 51~56 (1993)
- 2) TAGAWA, A., KITAMURA, Y. and MURATA, S.: Thin layer drying characteristics of adzuki beans, *Trans. ASAE*, **39** (2), 605~609 (1996)
- 3) TAGAWA, A., MURAMATSU, Y., AI, F. and MURATA, S.: Thin layer drying characteristics of kidney beans, *J. Japanese Soc. Agric. Machinery*, **60** (2), 23~29 (1998)
- 4) MURAMATSU, Y., TAGAWA, A., SAKAGUCHI, E. and KASAI, T.: Prediction of moisture content changes of kidney beans during drying, *J. Japan Assoc. Food Preservation Scientists*, **33** (6), 295~302 (2007)
- 5) HUTCHINSON, D. and OTTEN, L.: Thin-layer air drying of soybeans and white beans, *J. Food Tech.*, **18** (4), 507~522 (1983)
- 6) GELY, M. C. and GINER, S. A.: Diffusion coefficient relationships during drying of soya bean cultivars, *Biosystem Eng.*, **96** (2), 213~222 (2007)
- 7) KHATCHATOURIAN, Oleg. A.: Experimental study and mathematical model for soya bean drying in thin layer, *J. Food Eng.*, **79** (1), 92~99 (2012)
- 8) TANG, J. and SOKHANSANJ, S.: A model for thin-layer drying of lentils, *Drying Tech.*, **12** (4), 849~867 (1994)
- 9) JAIN, N. K. and SINGH, J.: Effect of temperature on drying characteristics of bengalgram, *J. Food Sci. Tech.*, **32** (4), 329~331 (1995)

- 10) DOYMAZ, İbrahim : Drying behaviour of green beans, *J. Food Eng.*, **69** (2), 161~165 (2005)
- 11) YANG, C. Y., FON, D. S. and LIN, T. T.: Simulation and validation of thin layer models for peanut drying, *Drying Tech.*, **25** (9), 1515~1526 (2007)
- 12) HIL, C. L., LAW, C. L. and CLOKE, M.: Modeling using a new thin layer drying model and product quality of cocoa, *J. Food Eng.*, **90** (2), 191~198 (2009)
- 13) WU, L., ORIKASA, T., OGAWA, Y. and TAGAWA A.: Vacuum drying characteristics of eggplants, *J. Food Eng.*, **83** (3), 422~429 (2007)
- 14) JENA, S. and DAS, H.: Modelling for vacuum drying characteristics of coconut presscake, *J. Food Eng.*, **79** (1), 92~99 (2007)
- 15) AMELLAL, H. and BENAMARA, S.: Vacuum drying of common date pulp cubes, *Drying Tech.*, **26** (3), 378~382 (2008)
- 16) SAHARI, M. A., HAMIDI-ESFEHANI, Z. and SAMADLUI, H.: Optimization of vacuum drying characteristics of date powder, *Drying Tech.*, **26** (6), 793~797 (2008)
- 17) MITRA, J., SHRIVASTAVA, S. L. and RAO, P. Srinivasa : Vacuum dehydration kinetics of onion slices, *Food and Bioprocess Proc.*, **89** (1), 1 ~ 9 (2011)
- 18) MURAMATSU, Y., SAKAGUCHI, E., ORIKASA, T. and TAGAWA, A.: Hot air drying and vacuum drying characteristics of scarlet runner beans, *Int. J. Food Eng.*, **8** (3), 1~24 (2012)
- 19) Japanese Society of Agricultural Machinery : Data of the Agricultural Process Engineering Division of the Japanese Society of Agricultural Machinery (I), p.1 (1975)
- 20) HENDERSON, S. M. and PABIS, S.: Grain drying theory. I. Temperature effect in drying coefficient, *J. Agric. Eng. Res.*, **6** (3), 169~174 (1961)
- 21) MURATA, S. : Characteristics of grain and estimation of drying rate, *J. Japanese Soc. Agric. Machinery*, **44** (3), 517~523 (1982)
- 22) JADHAV, D. B., VISAVALE, G. L., SUTAR, N., ANNAPURE, U. S. and THORAT, B. N.: Studies on solar cabinet drying of green peas (*Pisum sativum*), *Drying Tech.*, **28** (5), 600~607 (2010)
- 23) FALADE, Kolawole, O. and SOLADEMI, Oluwakemi, J.: Modelling of air drying of fresh and blanched sweet potato slices, *Int. J. Food Sci. Tech.*, **45** (2), 278~288 (2010)
- 24) DOYMAZ, İbrahim : Evaluation of mathematical models for prediction of thin-layer drying of banana slices, *Int. J. Food Prop.*, **13** (3), 486~497 (2010)
- 25) TOĞRUL, İnci, Türk.: Modelling of heat and moisture transport during drying black grapes, *Int. J. Food Sci. Tech.*, **45** (6), 1146~1152 (2010)
- 26) BALA, B. K., HOQUE, M. A., HOSSAIN, M. A. and UDDIN, M., Borhan. : Drying characteristics of asparagus roots (*Asparagus racemosus* Wild.), *Drying Tech.*, **28** (4), 533~541 (2010)
- 27) GAWARE, T. J., SUTAR, N. and THORAT, B. N. : Drying of tomato using different methods : comparison of dehydration and rehydration kinetics, *Drying Tech.*, **28** (5), 651~658 (2010)
- 28) JANJAI, S., PRECOPPE, M., LAMBERT, N., MAHAYOTHEE, B., BALA, B. k., NAGLE, M. and MÜLLER, J.: Thin-layer drying of litchi (*Litchi chinensis* Sonn.), *Food and Bioprocess Proc.*, **89** (3), 194~201 (2011)
- 29) CRANK, J.: The Mathematics of Diffusion 2nd ed (Oxford Univ. Press, New York), p.44 (1975)

小豆の減圧乾燥特性と 含水率変化の予測モデル

村松良樹^{*1}・坂口栄一郎^{*1}・川上昭太郎^{*1}・田川彰男^{*2}

^{*} 1 東京農業大学地域環境科学部

(〒156-8502 東京都世田谷区桜丘1-1-1)

^{*} 2 鹿児島県大隅加工技術研究センター

(〒893-1601 鹿児島県鹿屋市串良町細山田4938)

減圧乾燥法を小豆の乾燥に適用し、乾燥速度や品質(豆の割れや裂皮)に及ぼす真空度と温度の影響を様々な温度(20~70℃)と真空度(0.07~0.10 MPa)条件下で調べた。すべての測定条件において破裂粒や裂皮粒は観察されなかった。減圧乾燥時の小豆の乾燥速度は熱風乾燥法よりも速かった。減圧乾燥法は、含水率25%以下、温度20~70℃の条件で小豆の乾燥に適用することが可能であることが示された。また、減圧乾燥過程における小豆の含水率変化を予測できる新しい乾燥モデルを提案した。そのモデルは温度と真空度の双方の関数として表されている。そのモデルによる含水率の計算値と測定値を比較したところ両者はほぼ一致し、提案した乾燥モデルは、温度20~70℃および真空度0.07~0.10 MPa条件において十分な精度で小豆の含水率経時変化を予測できることが示された。さらに減圧乾燥時における小豆の水分拡散係数を、Fickの第二拡散モデルを利用して推定し、温度と真空度の関数として表した。

(平成27年3月11日受付, 平成27年6月17日受理)

異なる輸送条件，貯蔵条件および貯蔵姿勢における アスパラガス (*Asparagus officinalis* L.) の 若茎の外観，糖度，水分含量および破断応力の変動

樋口 洋子*・柘植 一希*・北條 怜子*・元木 悟*§

* 明治大学農学部

Effect of Transportation and Storage Conditions on the Quality of Asparagus Spears

HIGUCHI Yoko*, TSUGE Kazuki*, HOJYO Reiko* and MOTOKI Satoru*§

* Faculty of Agriculture, Meiji University, 1-1-1 Higashimita, Tama-ku, Kawasaki, Kanagawa 214-8571

Asparagus spears continue to grow even after harvest, but their quality may deteriorate over time. Therefore, methods for maintaining freshness are needed to ensure the quality and function of harvested asparagus spears. In this study, we examined the changes in the external appearance, Brix levels, moisture content, and hardness of sixth-year spears of 'Zenju Yodel (NJ953)' for spring harvest under varying conditions of transportation and storage, including their orientation during storage. Asparagus spears transported and stored at low (chilling) temperatures showed better quality characteristics than those transported and stored under non-chilling conditions. Furthermore, the quality of spears stored vertically in water was better than that of spears stored horizontally. Moreover, in the asparagus spears transported at low temperature, Brix levels were lower in spears stored in water than in those stored without water. Wilting was also not observed in the spears stored in water. These results suggest that transportation conditions, storage temperature, and orientation of the asparagus spears during storage influence their quality.

(Received Mar. 18, 2015 ; Accepted Jun. 3, 2015)

Key words : External appearance, Brix, Hardness, Orientation during storage, Asparagus spear,
Storage condition, Transport condition
外観，糖度，破断応力，貯蔵姿勢，若茎，貯蔵条件，輸送条件

アスパラガスは世界の多くの地域で消費されるポピュラーな野菜であり，健康野菜として注目されている。緑黄色野菜の一つに分類され，茎葉菜類の中では，各栄養成分をバランスよく含む。特に，グリーンアスパラガスは野菜類の中でもタンパク質や，アスパラギンをはじめとしたアミノ酸と糖質が多く，ほかにもビタミンBやC，Eなどのビタミン類やミネラルが比較的豊富で，リンやカリウム，カルシウム，鉄，亜鉛なども含まれる。また，アスパラガスの若茎は，約93%が水分で，残りの約7%が固形物である。おもな成分は炭水化物（4%前後）で，そのうち糖質が最も多い。次いでタンパク質が2.5%程度で，ほかに灰分や脂質，ビタミン類などが含まれる¹⁾。

未成熟な生育段階で収穫される若茎は収穫後も成長を続け^{2),3)}，野菜類の中では収穫後の品質劣化が起こりや

すい⁴⁾。アスパラガスの品質劣化のうち，若茎の先端部は最初に外観の品質劣化が確認される部位であり⁵⁾，穂先の開きの進行⁶⁾や色落ち，軟化による腐敗⁷⁾などが発生する。ほかにも，萎縮をもたらす水分の減少⁸⁾，糖やアミノ酸などの減少⁹⁾，切り口などで見られる腐敗によるトロケといった症状²⁾などが発生し，常温下では1週間以内に商品価値を失うとされる¹⁰⁾。なかでも，若茎を等級別に選別する際の品質基準となる曲がりの発生¹¹⁾は，輸送および貯蔵中に発生し，商品価値に直接影響する品質劣化の症状である¹²⁾。高柳・山ノ井¹³⁾は，若茎の曲がりに対する生産現場の選別作業に注目し，形状選別を熟練者の判断に頼らず，自動化するためのシステムを構築した。また，若茎の基部から発生する繊維化の進行による硬化も，アスパラガスの商品価値に直接影響する品質

* 〒214-8571 神奈川県川崎市多摩区東三田1-1-1

§ Corresponding author, E-mail: motoki@meiji.ac.jp

劣化の症状である^{14),15)}。若茎の硬化の原因は、セルロースやヘミセルロース、リグニンなどの食物繊維含量の増加であり、筋張った硬さとして食感に直接影響し、消費者の購買意欲を下げる要因となる^{9),16)}。そのため、若茎の曲がりと硬化の発生は、アスパラガスを高品質に保つために防止すべき品質劣化の症状であると考ええる。

ところで、アスパラガスにおける品質劣化の症状は、貯蔵温度が25℃以上では貯蔵後数日で現れるが、10℃以下では抑制され、予冷および低温輸送の効果が大きいとされる¹¹⁾。収穫後の若茎の安定した品質や機能性を保持し、商品価値を高めるには、高品質のための栽培管理はもちろんであるが、流通時にいかに高品質を保つかという収穫後の輸送技術および貯蔵技術の確立が重要である。過去には、収穫後の若茎の品質や機能性を保持することを目的に、輸送および貯蔵条件、包装資材を活用した鮮度保持の試験が行われてきた。例えば、RENQUISTら¹⁷⁾は、収穫後のCA貯蔵がアスパラガスの鮮度保持に有効であり、若茎の呼吸速度、糖含量および可溶性タンパク質の減少が緩やかになり、20℃の温度条件下において貯蔵日数を5日間延長できると報告した。しかし、若茎の曲がりは、若茎を低温で垂直に立てた状態で包装し、輸送および貯蔵することにより防止できるものの^{18),19)}、実際の生産現場では消費者の手元に届くまで低温を維持するのは難しく、輸送時に若茎が入ったコンテナを積み重ねることもあり、若茎の曲がりの発生を完全に防止することは難しいとされている¹⁹⁾。さらに、若茎の曲がりの発生は、品質管理において留意すべき症状であるものの、輸送および貯蔵条件に着目して曲がりによる品質劣化を研究した事例は見当たらない。

また、青果物の貯蔵において、貯蔵温度や貯蔵姿勢が貯蔵中の品質変化に影響を与えることが知られており、アスパラガスでは過去に、ニュージーランド産アスパラガスを、日本を含む北半球の国々に航空輸送することを想定し、輸送および貯蔵方法別の品質変化を調べた事例があるものの^{7),17),20)}、国内における貯蔵方法別の品質変化をデータで示した事例は少ない^{6),21)}。

そこで本研究では、アスパラガスを実際に栽培している生産現場で直接収穫した収穫直後の新鮮な若茎を用い、アスパラガスの収穫後の若茎の外観、糖度、水分含量および破断応力（若茎の硬さ）の変化を明らかにするため、収穫後の異なる輸送条件、貯蔵条件および貯蔵姿勢において若茎の品質変化を調査した。

実験方法

1. 供試材料および栽培条件

供試材料は、東京都三鷹市においてハウス長期どり栽培で春どりされた6年株の若茎を用いた。供試品種は、国内における作付状況と育成地および全雄品種の特徴である若茎の揃いを考慮し²³⁾、‘ゼンユウヨーデル (NJ 953)’ (バイオニアエコサイエンス)²⁴⁾を用いた。栽植様

式は、畝幅150cm、ベッド幅80cm、株間30cmの1条植え（栽植密度：2,222株・10a⁻¹）とした。栽培管理は、既報²⁴⁾を参考に行った。

2. 輸送および収穫調製条件

供試材料は、実験当日の午前9時に収穫し、漆崎²⁵⁾および元木ら²⁴⁾の報告を参考に、収穫直後に新聞紙で包み、若茎の穂先を上にして立てた状態で、収穫後1時間以内に明治大学生田キャンパス（神奈川県川崎市）へ輸送した。輸送は、低温またはそのままの状態で行った。低温輸送は、2014年5月3日にクーラーボックス（保冷剤により6.2～9.9℃に保持）に入れて行い、そのままの状態の輸送は、2014年5月1日に行った（温度範囲は19.2～49.5℃）。明治大学生田キャンパス到着後も貯蔵試験開始時まで輸送条件を保ったまま、収穫調製および収穫開始時の調査を行った。供試材料は、既報²⁴⁾を参考に、収穫時の長さが30cm以下の若茎を、出荷規格の25cm長に調製し、L級規格（長野県規格の1茎重で15g以上40g未満）に揃え、無作為に選んだものとした。

3. 貯蔵条件および試験区

貯蔵は、低温（家庭用冷蔵庫（SJ-PD17W, SHARP社製）の冷蔵室：1.9～4.6℃、湿度30±1%）および常温（明治大学生田キャンパスの空調制御室内：23.9～25.1℃、湿度15±1%）で行った。アスパラガスの貯蔵における特徴的な問題として、横向きの貯蔵姿勢で貯蔵された際に生じる曲がりの発生があることから¹¹⁾、貯蔵姿勢を縦置きと横置きに分け、縦置きは若茎の穂先を上にして立てた状態で、横置きは若茎を寝かした状態で貯蔵した。さらに、若茎の成長は水分の供給によって促進されるため¹¹⁾、切り口を水に浸けたものとそうでないものに分けて貯蔵した。試験区は、低温貯蔵、常温貯蔵の順にそれぞれ、無水で貯蔵姿勢が縦置き（以下「低温・無水・縦」、「常温・無水・縦」と表記する）、水を加えた縦置き（「低温・水・縦」、「常温・水・縦」）および横置き（「低温・水・横」、「常温・水・横」）の6処理区を設け、さらに低温貯蔵では、比較として、漆崎²⁵⁾および元木ら²⁴⁾の報告を参考に、若茎を新聞紙で包み、貯蔵姿勢が縦置きの処理区（「低温・新聞・縦」）を設けた。

4. 測定のタイミング

既報^{4),6),8),26)}では、アスパラガスの貯蔵期間は3～5日間程度であるが、貯蔵姿勢が横置きの貯蔵では、水分が供給され、高温多湿の場合には、わずか1日でも曲がりが著しく¹¹⁾、呼吸速度などの若茎内の生理生態的な活動も活発になる^{17),27)}ことから、本研究の各測定は、収穫後3時間以内（輸送後の明治大学生田キャンパス到着直後、貯蔵試験開始時）および48時間貯蔵後に行った。

5. 品質評価方法

若茎の重量増減率は、貯蔵試験開始時を100%としたときの貯蔵後の増減割合で示した。若茎伸長量は、貯蔵試験開始時に出荷規格の25cm長に調製し、貯蔵後に長さを測定した。商品性評価は、曲がり、萎縮、若茎頭部の

締まり、異臭および穂先の色の5項目について、HRO花・野菜センターの鮮度保持に関する試験方法・項目²⁸⁾を参考に、5段階(評点「5」を収穫時または試験開始時の状態、評点「4」を劣化がごくわずかに進行しているが、無調製またはごくわずかな調製により商品化が可能な状態、評点「3」を劣化が明らかに認められるが、調製すれば商品化が可能な状態、評点「2」を劣化が進行し、調製すれば利用可能な部分は残るが、商品化はできない状態、評点「1」を商品性が完全に失われるほど劣化が進行し、調製不可能な状態)で評価した。水分含量は、MOTOKIら²¹⁾の方法を参考に、送風定温乾燥機(DRM620TB, ADVANTEC社製)を用い、70℃で3日間乾燥させたあと、乾燥前の重量と比較することにより求めた。

6. 糖度および破断応力の測定

糖度の測定は、MOTOKIら²¹⁾の方法に従って、搾汁をそのまま使用し、デジタル糖度計(PR-201a, アタゴ社製)を用いて測定した。出荷規格に調製した若茎を先端部から8 cmごとに分け、先端部8 cmを測定した。また、破断応力の測定には、小型卓上試験機(EZ Test, EZ-SX, 島津製作所社製)を用いた。破断応力の測定は、元木ら²⁴⁾の方法に従って、若茎基部(切断面)から2, 4, 6, 8 および10 cmの計5か所を測定した。カッターナイフ替刃(小型刃, オルファ社製。刃厚: 0.38 mm, 刃幅: 9 mm)を使用し、切断時の最大応力として測定した。プランジャーの送り速度は40 mm・min⁻¹とした。それぞれの試験区について6本の若茎を用いて測定し、それらを反復とした。

貯蔵試験開始時および48時間貯蔵後に、糖度は3本、その他の項目は6本の若茎を用いて測定し、それらを反復とした。

実験結果

1. 輸送および貯蔵条件と若茎の品質

(1) 低温輸送 低温輸送した若茎において、異なる貯蔵条件および貯蔵姿勢が48時間貯蔵後の形状に及ぼす影響を図1に、低温輸送した若茎の異なる貯蔵条件が若茎の品質に及ぼす影響を表1に示した。

貯蔵試験開始時の糖度は $5.7 \pm 0.4^{\circ}$ 、水分含量は $92.4 \pm 0.6\%$ であった。無水区では、48時間貯蔵後の重量が減少し、重量減少率は「常温・無水・縦」が19.3%で最も大きく、次いで「低温・無水・縦」が11.3%、「低温・新聞・縦」が8.0%の順であった。一方、水を加えた区ではいずれも重量が増加し、最も重量増加率が大きかった「常温・水・横」では貯蔵試験開始時に比べて重量が10.3%増加した。48時間貯蔵後の若茎伸長量は、「常温・水・横」が3.4 cmで最も大きく、次いで「低温・水・横」の2.1 cmの順で、水を加えた区が無水区に比べて大きく、貯蔵姿勢では横置きが縦置きに比べて大きくなる傾向であった。また、48時間貯蔵後の糖度は、水を加

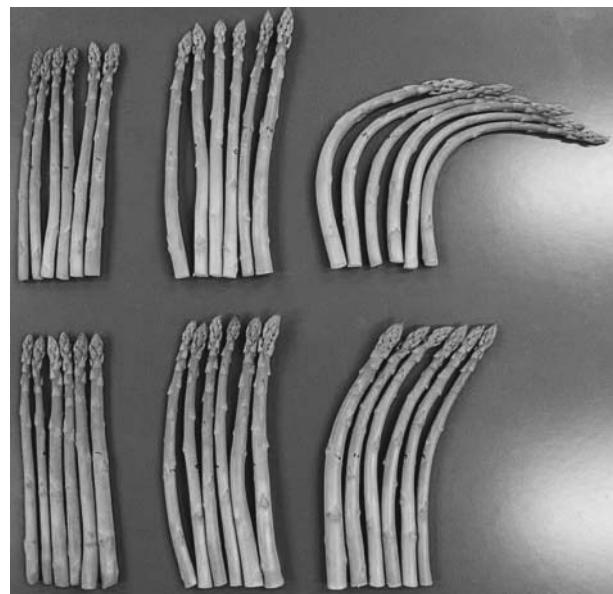


図1 低温輸送において異なる貯蔵条件および貯蔵姿勢が貯蔵48時間後の若茎の形状に及ぼす影響

上は常温(25℃), 下は低温(5℃)で貯蔵。
いずれも左から「無水・縦」, 「水・縦」, 「水・横」。

えた区が無水区に比べて同等か低くなり、水を加えた区は、貯蔵試験開始時に比べて同等か低くなった。48時間貯蔵後の水分含量は、常温貯蔵、低温貯蔵ともに、水を加えた区が無水区に比べて高くなった。水を加えた区は縦置きと横置きで有意な差はみられず、「低温・水・縦」(93.7%, 貯蔵試験開始時92.4%との検定結果NS)を除き、貯蔵試験開始時に比べて、いずれも高い値を示した。48時間貯蔵後の若茎の商品性評価のうち、曲がり、萎縮および若茎頭部の締まりは、「常温・無水・縦」でそれぞれの評点が2.8および1.5と最も低い値を示し、ほかの試験区に比べて評点が顕著に低かった。萎縮は、常温貯蔵、低温貯蔵ともに、無水区が水を加えた区に比べて低い値を示し、水分含量との間に正の相関関係が認められた($r=0.790^*$)。異臭は、試験区間で有意な差はみられなかった。若茎の穂先の色は、「低温・水・縦」および「低温・水・横」で赤色に変色し、ほかの試験区に比べてやや低い値(それぞれ3.5)を示した。

(2) そのままの状態の輸送 そのままの状態に輸送した若茎の異なる貯蔵条件が若茎の品質に及ぼす影響を表1に示した。

貯蔵試験開始時の糖度は $6.5 \pm 0.2^{\circ}$ 、水分含量は $93.1 \pm 0.2\%$ であった。48時間貯蔵後の重量は、いずれの試験区も3.1~18.8%の範囲で減少し、重量減少率は「常温・無水・縦」が18.8%で最も大きかった。48時間貯蔵後の若茎伸長量は、「常温・水・縦」が1.1 cmで最も大きく、常温貯蔵では水を加えた区が無水区に比べて大きくなる傾向であったが、「低温・新聞・縦」(0.4 cm)を除

表1 輸送条件および貯蔵条件が

輸送条件	試験区	重量増減率 (%)	若茎伸長量 (cm)	曲がり	若茎頭部 縮まり
低温	貯蔵試験開始時				
	常温・水・縦	8.2±3.8 ^y c ^x	1.9±0.3 b	4.8 a	4.2 a
	常温・水・横	10.3±2.0 c	3.4±0.2 a	1.0 d	4.5 a
	常温・無水・縦	-19.3±0.7 a	-0.3±0.1 d	4.2 b	1.5 b
	低温・水・縦	1.5±0.6 c	0.8±0.1 c	4.7 ab	4.8 a
	低温・水・横	7.5±0.7 c	2.1±0.2 b	3.0 c	4.8 a
	低温・無水・縦	-11.3±0.6 ab	-0.9±0.0 d	5.0 a	4.8 a
	低温・新聞・縦	-8.0±0.8 b	-0.6±0.1 d	5.0 a	4.7 a
そのままの状態	貯蔵試験開始時				
	常温・水・縦	-7.1±4.1 b	1.1±0.3 a	3.8 b	5.0 a
	常温・水・横	-7.9±1.9 b	0.7±0.2 ab	4.0 b	4.8 a
	常温・無水・縦	-18.8±1.0 a	-0.2±0.2 c	4.8 a	3.2 b
	低温・水・縦	-5.8±1.1 b	0.1±0.0 bc	4.5 ab	4.5 a
	低温・水・横	-3.1±1.0 b	-0.1±0.0 c	5.0 a	5.0 a
	低温・無水・縦	-9.5±0.4 ab	0.1±0.1 bc	4.8 a	4.8 a
	低温・新聞・縦	-6.6±0.8 b	0.4±0.1 abc	5.0 a	4.8 a

評点「5」を収穫時または試験開始時の状態、評点「4」を劣化がごくわずかに進行しているが、無調製またはごくわずかな劣化が進行し、調製すれば利用可能な部分が残るが、商品化はできない状態、評点「1」を商品化が完全に失われるほど劣化

^y平均値±標準誤差（糖度および貯蔵試験開始時の水分含量はn=3, 他はn=6）。

^x輸送条件ごとに統計処理を行った。Tukeyの多重検定により、異符号間に5%以下の水準で有意差あり。

^w貯蔵試験開始時と貯蔵後の若茎について、Student's t-testにより1%（**）または5%（*）水準で有意差あり、またはなし^v調査せず。

き、低温貯蔵（-0.1～0.1cmの範囲）および常温貯蔵の「常温・無水・縦」（-0.2cm）では、ほとんど伸長しなかった。48時間貯蔵後の糖度は、「常温・水・縦」が4.0°で最も低く、常温貯蔵では水を加えた区が無水区に比べて低くなる傾向であったが、低温貯蔵では水を加えた区が無水区に比べて高くなる傾向を示した。48時間貯蔵後の水分含量は、「常温・無水・縦」がほかの試験区に比べてやや低い値（92.7%）であったが、貯蔵試験開始時（93.1%）との検定結果、いずれの試験区も有意な差はみられなかった。48時間貯蔵後の若茎の商品性評価のうち、曲がりは、常温貯蔵では「常温・無水・縦」が水を加えた区に比べて高い値（4.8）を示したが、低温貯蔵では有意な差はみられなかった。萎縮は、常温貯蔵が低い値（評点が1.2～1.5）を示し、低温貯蔵では「低温・無水・縦」（1.7）がほかの試験区（2.3～2.5）に比べて評点が低かった。また、低温およびそのままの状態の輸送を含めた総合において、水分含量との間に相関関係が認められなかった（それぞれ $r = -0.119$ および 0.249 ）。若茎頭部の縮まりは、「常温・無水・縦」が3.2と最も低い値を示し、ほかの試験区（4.5～5.0）に比べて評点が低かった。異臭は、試験区間で有意な差はみられなかった。

2. 輸送および貯蔵条件と若茎の破断応力

（1）低温輸送 低温輸送した若茎の異なる貯蔵条件

が若茎の破断応力に及ぼす影響を表2に示した。

貯蔵試験開始時の若茎の破断応力は、最大値が3.1N、平均値が1.9Nであった。48時間貯蔵後の若茎の破断応力は、貯蔵試験開始時に比べていずれの試験区も同等か硬くなり、破断応力の最大値および平均値は、「低温・無水・縦」がそれぞれ8.7Nおよび6.5Nで最も高く、次いで「常温・無水・縦」が7.9Nおよび6.2N、「低温・新聞・縦」が6.3Nおよび5.8Nの順であった。水を加えた区は、無水区に比べて破断応力の最大値が低い傾向がみられ、特に貯蔵姿勢が縦置きで低く、「低温・水・縦」および「常温・水・縦」がそれぞれ3.7Nおよび3.8Nであった。若茎の基部（切断面）から2, 4, 6, 8および10cmの破断応力の平均値も同様の傾向がみられ、貯蔵試験開始時に比べていずれの試験区も硬くなり、「低温・無水・縦」および「常温・無水・縦」の平均値は、それぞれ6.5Nおよび6.2Nと高く、水を加えた貯蔵姿勢が縦置きで低かった（「低温・水・縦」および「常温・水・縦」がそれぞれ3.4Nおよび3.0N）。

（2）そのままの状態の輸送 そのままの状態で輸送した若茎の異なる貯蔵条件が若茎の破断応力に及ぼす影響を表2に示した。

48時間貯蔵後の若茎の破断応力の最大値は、3.9～8.4Nの範囲で個体間差が大きく、有意な差はみられなかった。破断応力の平均値は、「常温・水・縦」（7.4N）で

貯蔵48時間後の若茎の品質に及ぼす影響

商品性評価 ^z						
異臭	萎縮	穂先の色	糖度 (°Brix)	t 検定	水分含量 (%)	t 検定
			5.7±0.4		92.4±0.6	
4.7 a	4.8 a	5.0 a	4.9±0.2 c	* ^w	94.0±0.2 a	*
5.0 a	4.7 a	4.8 a	4.5±0.3 c	*	94.2±0.2 a	*
5.0 a	2.8 c	4.6 ab	6.6±0.5 a	NS	91.9±0.3 b	NS
5.0 a	5.0 a	3.5 b	5.4±0.1 b	NS	93.7±0.1 a	NS
5.0 a	5.0 a	3.5 b	4.9±0.1 c	*	94.0±0.1 a	*
5.0 a	4.0 b	4.8 a	5.7±0.3 ab	NS	92.3±0.2 b	NS
5.0 a	4.8 a	4.0 ab	5.7±0.1 ab	NS	92.7±0.1 b	NS
			6.5±0.2		93.1±0.2	
5.0 a	1.5 b	— ^v	4.0±0.1 e	* *	93.5±0.3 a	NS
5.0 a	1.2 b	—	5.1±0.3 d	* *	93.8±0.2 a	NS
4.8 a	1.2 b	—	6.6±0.1 ab	NS	92.7±0.2 b	NS
5.0 a	2.5 ab	—	6.9±0.0 a	*	93.2±0.1 a	NS
5.0 a	3.3 a	—	5.8±0.3 b	NS	93.3±0.2 a	NS
5.0 a	1.7 b	—	5.3±0.2 cd	* *	93.4±0.2 a	NS
5.0 a	2.3 ab	—	6.1±0.3 abc	NS	93.1±0.2 a	NS

調製により商品化が可能な状態、評点「3」を劣化が明らかに認められるが、調製すれば商品化が可能な状態、評点「2」を
が進行し、調製不可能な状態とした。

(NS)。

表2 輸送条件および貯蔵条件が貯蔵48時間後の若茎の破断応力に及ぼす影響

輸送条件	試験区	基部 (切断面) からの位置および破断応力 (N) ^z										t 検定	最大値 (N) ^y	t 検定		
		2 cm		4 cm		6 cm		8 cm		10cm					平均値 (N)	
低 温	貯蔵試験開始時	3.1		1.7		1.8		1.5		1.5		1.9±0.2 ^x		3.1		
	常温・水・縦	3.8	b ^w	3.5	b	3.1	b	2.9	c	2.0	b	3.0±0.3	c	3.8	c	NS
	常温・水・横	4.1	ab	4.3	b	3.8	ab	4.4	abc	5.0	ab	4.3±0.4	bc	5.0	bc	NS
	常温・無水・縦	6.2	a	7.9	a	5.9	ab	6.3	ab	4.8	ab	6.2±0.3	a	7.9	ab	**
	低温・水・縦	3.7	b	3.6	b	3.6	ab	3.2	bc	3.0	ab	3.4±0.4	c	3.7	c	NS
	低温・水・横	4.7	ab	4.5	b	4.0	ab	3.4	abc	3.4	ab	4.0±0.4	c	4.7	bc	NS
	低温・無水・縦	6.0	ab	8.7	a	6.7	a	6.5	a	5.4	a	6.5±0.8	a	8.7	a	**
	低温・新聞・縦	6.2	ab	5.9	ab	5.7	ab	6.3	ab	5.3	a	5.8±0.8	ab	6.3	abc	*
そのまま の状態	常温・水・縦	6.6	a	6.7	a	7.9	a	7.3	a	8.4	a	7.4±0.8	a	8.4	a	—
	常温・水・横	4.6	a	6.6	a	4.9	a	5.4	a	5.9	a	5.5±0.6	ab	6.6	a	—
	常温・無水・縦	3.7	a	3.9	a	3.6	a	3.0	a	3.3	a	3.5±0.4	b	3.9	a	—
	低温・水・縦	5.5	a	6.1	a	6.8	a	6.6	a	6.0	a	6.2±0.9	ab	6.8	a	—
	低温・水・横	5.1	a	6.3	a	4.0	a	7.8	a	7.0	a	6.0±1.0	ab	7.8	a	—
	低温・無水・縦	7.3	a	5.0	a	5.0	a	8.3	a	5.2	a	5.7±0.5	ab	8.3	a	—
	低温・新聞・縦	5.2	a	5.7	a	5.2	a	4.3	a	6.5	a	5.6±0.4	ab	6.5	a	—

^z基部 (切断面) を 0 cm とし、2 cm ごとに破断応力を測定した。^y2 ~ 10cm における最大値 (n = 6)。^x平均値 ± 標準誤差。^w輸送条件ごとに統計処理を行った。Tukey の多重検定により、異符号間に 5 % 以下の水準で有意差あり。^v貯蔵試験開始時と貯蔵後の若茎について、Student's t-test により 1 % (* *) または 5 % (*) 水準で有意差あり、またはなし (NS)。^u「貯蔵試験開始時」のデータがないため、検定せず。

やや高く、「常温・無水・縦」(3.5N)でやや低い傾向であった。

考 察

アスパラガスは収穫後も成長を続け²⁾、野菜類の中では収穫後の品質劣化が起こりやすい⁴⁾。輸送および貯蔵において、若茎の商品価値に直接影響するさまざまな品質劣化の症状が発生する。なかでも曲がりの発生と繊維化は、消費者の購買意欲に直接影響するため、アスパラガスの重要な品質基準となる^{9), 12), 16)}。一方、収穫後における若茎の品質変化は、収穫時期や作型、天候などが影響を及ぼすという報告^{24), 29), 30)}があることから、若茎の収穫後の品質劣化を防止するには、品種や栽培条件、輸送条件、貯蔵条件などと品質変化との関係を明らかにする必要がある。

本研究では、アスパラガスを経営の主品目として、ハウス半促成長期どり栽培で実際に栽培している生産者の圃場から、実験当日の午前中に若茎を収穫し、その直後から輸送条件を低温およびそのままの状態に分け、貯蔵条件を低温および常温で、さらに水の有無に分け、貯蔵姿勢を縦置きおよび横置きに分けて、若茎の品質が大きく変化するとされる²⁷⁾収穫後3時間以内の貯蔵試験開始時および48時間貯蔵後に若茎の品質を調査した。

アスパラガスの若茎の出荷形態としては、先端部下のところと基部の2か所を結束し、先端部が上の立詰めとして流通させるのが一般的である¹¹⁾。本研究でも、低温輸送、そのままの状態の輸送ともに、若茎の穂先を上にして立てた状態で輸送し、その後の貯蔵試験に供試した。本研究の輸送における温度変化は、低温輸送とそのままの状態の輸送で大きく異なり、輸送中の温度は、クーラーボックスを用いた低温輸送では6.2~9.9℃の範囲、そのままの状態の輸送では19.2~49.5℃の範囲であった。そのままの状態の輸送における温度変化は、輸送に用いた車内の温度変化がおもな原因であり、若茎の外観に関しては、輸送後の明治大学生田キャンパス到着直後は問題なかった(達観調査)ものの、試験結果から判断すると、輸送中の温度変化が貯蔵後の若茎の品質に影響を与えた可能性が示唆された。

本研究では、若茎の鮮度を考慮し、収穫直後から貯蔵試験開始時まで3時間以内に調査を終えた。しかし、その短い時間でも、そのままの状態の輸送は低温輸送に比べて、商品性評価のうちの萎縮の品質劣化が著しく、常温貯蔵した場合には48時間貯蔵後にほとんどの若茎が商品性を失った。アスパラガスの鮮度保持のために最初に行うべきことは、収穫直後の若茎を低温下に運び、若茎の品温を速やかに下げることである¹⁷⁾。若茎の呼吸速度は、収穫から2時間後に最大速度に達し、24時間後には最大時の3割程度まで減少する²⁷⁾。また、グルコース、フルクトースおよびスクロース含量も、収穫後24~48時間以内に半分かそれ以下まで減少するため²⁷⁾、若茎の品

温が急上昇しないように、収穫後の若茎は速やかに低温で貯蔵し、選別や収穫調製もできるだけ涼しい場所で行うことが望ましいと考えられる。

ほかの野菜類と同様、アスパラガスの場合も品質良好な若茎ほど鮮度が長く保持できる。品質のよい若茎とは、まっすぐ伸びて先端部が硬くしまっており、太さも適当で新鮮なものである¹¹⁾。アスパラガスの貯蔵において、若茎の切り口を水に浸けたままにしておくと、収穫後24時間までの吸水が最も多く、20℃の温度条件下において、若茎は14%伸長し、19%重量が増加したという報告³¹⁾がある。また、低反発性のフォームパッドを濡らして若茎の切り口に敷くと、市場までの輸送中に若茎の乾燥や繊維化による硬化を防止できるとされ¹⁷⁾、HEYESら³¹⁾と同じ20℃の温度条件下および暗黒下で垂直に立てた状態を保ち、若茎の切り口を水に浸けたものとそうでないものに分けて試験したところ、無水区で5%、水を加えた区で22~23%の伸長が確認された¹⁷⁾。本研究の48時間貯蔵後の水分含量も、低温輸送した若茎では常温貯蔵、低温貯蔵ともに吸水して高くなり、「常温・水・縦」(25℃)では、若茎は貯蔵48時間後が貯蔵試験開始時に比べて13.6%伸長し、重量も8.2%増加したものの、若茎の伸長率はRENQUISTら¹⁷⁾に比べて小さく、重量増加率もHEYESら³¹⁾に比べて小さかった。そのため、収穫後の品質変化には、貯蔵温度の違いだけでなく、栽培管理や品種などの違いも影響しているものと考えられる。また、本研究では、低温輸送した場合、水を加えた区は無水区に比べて萎縮が有意に抑えられ、既報³¹⁾の結果を支持した。一方、そのままの状態の輸送では、無水区だけでなく、水を加えた区においても、貯蔵試験開始時と48時間貯蔵後との間で水分含量に有意差が認められず、萎縮による外観の品質劣化が発生した。吸水が生じた低温輸送においては、水分含量と萎縮との間に有意な正の相関関係が認められ($r=0.790^*$)、そのままの状態の輸送および総合では相関が認められなかった(それぞれ $r=-0.119$ および 0.249)ことから、そのままの状態の輸送した若茎では、低温輸送と比較して吸水量が少なく、水を加えた区も無水区と同様に萎縮による外観の品質劣化が発生したものと推察された。

また、本研究では、48時間貯蔵後の品質を調査し、若茎の曲がりを評価したが、低温輸送した若茎のうち、切り口を水に漬けた常温貯蔵かつ貯蔵姿勢が横置きではすべての供試個体が曲がり、商品性を失った。既報^{1), 6), 8), 15), 26)}では、アスパラガスの貯蔵期間を3~9日間程度で試験しているが、本研究の曲がりによる若茎の形態変化は、貯蔵試験開始後12時間以内で現れ(達観調査)、比較的早い時期から商品性を失ったため、既報より短い48時間貯蔵後の調査とした。本研究の結果、アスパラガスの若茎の成長は垂直方向への伸長と屈曲であり、貯蔵姿勢と水分の供給によって貯蔵後の早い時期から若茎の成長が促進されることが明らかになった。しかし、若茎の曲が

りの発生は、そのままの状態の輸送が低温輸送に比べて少なく、特に「常温・水・横」において、低温輸送は評点1.0と顕著な曲がりを示したが（図1）、そのままの状態の輸送では商品化できないような曲がりが発生しなかった（評点4.0）。PAULL・JUNG-CHEN¹⁹⁾は、アスパラガスの若茎における曲がりの発生に関して、若茎全体を熱水に浸した後、速やかに冷却をする処理を既報³²⁾に基づいて検討し、温湯処理を47.5℃で2～5分間行えば、若茎の曲がりの発生を防止することができ、温湯処理を45℃で7分30秒および50℃で2分30秒以内を目安に行えば、外観の品質劣化の発生を防止できると報告した。本研究では、そのままの状態における1時間の輸送中に最大49.5℃まで温度が上昇した。温度制御された室内に持ち込む温度処理は、温湯処理に比べて、収穫物の品温を変化させるのに時間がかかるものの³³⁾、本研究ではそのままの状態（温度範囲は19.2～49.5℃）で1時間程度輸送したため、PAULL・JUNG-CHEN¹⁹⁾の温湯処理に比べて、高温に長時間さらされたものと推察され、温湯処理と同じ仕組みで曲がりの発生が抑えられた可能性がある。しかし、前述のとおり、すべての試験区において萎縮が顕著に発生したことから、外観の品質劣化を考慮すると、高温下に若茎を置いた時間が長かった可能性がある。そのままの状態の輸送では、若茎の曲がりの発生と貯蔵後の伸長を防止できたものの、萎縮による外観の品質劣化が発生したことから、若茎の商品価値を高めるには貯蔵前の予冷が重要であることが再認識できた。

アスパラガスは、収穫後に若茎基部の切り口から先端部に向けて組織の繊維質化が急速に進行し、食物繊維量の増加に伴い筋張った硬さの食感へと変化し、硬化することが収穫後の品質低下の一因とされる¹⁴⁾。アスパラガスの若茎は収穫後も伸長するが、その伸長量は水分および温度との関係が深い²⁾。収穫前における1日当たりの若茎の伸長量は、若茎頭部に近いほど大きく、基部では小さい³⁴⁾。また、若茎の硬さは、先端部に近い部分が軟らかく、基部に近づくほど硬くなる^{16), 21)}。アスパラガスの基部は、先端部に比べてリグニンを多く含んでおり³⁵⁾、リグニンを合成する酵素の量も先端部から基部にかけて増加することから、若茎の硬化に直接影響する細胞壁の木化が活発に進行する³⁶⁾。さらに、気温が高いほど若茎の伸長量が大きくなり³⁷⁾、若茎の成長が旺盛な条件では、1日に10cm以上伸長することから²⁾、伸長量が多い若茎先端部や中部では軟らかく、伸長量の小さい基部で硬化が進行しやすいものと考えられる。

ところで、アスパラガスの若茎の硬化を防止するには、低温貯蔵が有効である³⁸⁾。本研究における若茎の破断応力は、貯蔵温度の違いによる差がみられなかったが、貯蔵期間が48時間と短いことが原因と考えられる。収穫後の若茎の破断応力の変化を調べた前田ら¹⁵⁾、伊藤³⁹⁾および元木ら²⁴⁾の試験では、貯蔵期間は6～9日間であり、本研究でも貯蔵期間を長くすれば、貯蔵温度の違いによ

る差が現れた可能性がある。一方で、本研究では、水の有無による若茎の破断応力の差が確認され、既報³¹⁾の結果を支持した。低温輸送において、48時間貯蔵後の無水区は水を加えた区に比べて硬かったが、無水区では貯蔵試験開始時に比べて重量が大きく減少し、若茎に萎縮が発生したことにより、破断応力が大きくなったものと考えられる（ $r = -0.759^*$ ）。若茎の硬化には繊維質化の進行^{14), 15)}などの要因があり、水分含量の減少のみに影響されるわけではないものの、若茎の破断応力の大きかった無水区では繊維が発達し、破断応力が大きくなった可能性が考えられる。若茎の破断応力は、各試験区においてばらつきが大きく、若茎の太さと繊維量との間に相関関係が認められたという報告⁴⁰⁾があることから、今後は栽培条件や太さを考慮した選別、収穫調製などの条件をさらに揃えて試験を行うとともに、貯蔵条件の違いによる萎縮および繊維の発達が若茎の破断応力に与える影響も考慮する必要があると考えられた。

本研究の結果、若茎の商品性は、そのままの状態の輸送よりも低温輸送で、常温貯蔵よりも低温貯蔵で保持され、特に水を加えた場合には、横置きよりも縦置きの貯蔵姿勢で保持される傾向であった。一方で、低温輸送において、水を加えた区は無水区に比べて糖度が低く、そのままの状態の輸送後の低温貯蔵では水を加えた区で糖度が高くなった。そのため、若茎の商品性の保持には、そのままの状態の輸送、貯蔵温度の高い条件および横置きの貯蔵姿勢が品質劣化につながる可能性が示唆された。

アスパラガスの収穫後における若茎の品質変化に、収穫時期や作型、天候などが影響を及ぼすという報告^{24), 29), 30)}があり、さらに収穫時期における収穫後の品質変化には品種も関係する⁶⁾。若茎の収穫後の品質に関しては、過去にもいくつかの報告があるものの、供試品種名が示されていない報告^{14), 25)}や現在国内でほとんど栽培されていない品種を用いた報告³⁹⁾も多く、それらの報告をアスパラガスの収穫後における品質変化の事例として現在の栽培に適用することは難しいと考える。本研究では、供試品種として、国内における作付状況と育成地および全雄品種の特徴である若茎の揃いを考慮し²³⁾、‘ゼンユウヨーデル（NJ953）’を用いた。また、アスパラガスの収穫後の品質変化に関しては、春どりされたものに関する報告が多く^{6), 8), 39)}、本研究でも春どりされた若茎を用いて試験した。しかし、国内では長期どり栽培が全国的に広く普及していることから²³⁾、今後は春どり以外の収穫時期における若茎の収穫後の品質変化についても、本研究と同様の手法で把握する必要がある。さらに、収穫後の青果物の呼吸速度は貯蔵温度に依存し⁴¹⁾、アスパラガスの場合、10℃上がれば、元の温度の場合と比べて呼吸速度が2倍以上に増加する⁶⁾。また、収穫後の貯蔵温度が高いほど糖分含有率の減少が急激であり^{9), 15)}、アスコルビン酸含量の減少も速く、品質低下が大きい⁶⁾。さらに、本研究では若茎の曲がりが貯蔵試験開始後12時

間以内に発生した。そのため今後は、本研究で明らかとなった輸送条件、貯蔵条件および貯蔵姿勢の知見を基に、国内の主要品種²³⁾を用いて、若茎の商品性を保持するための試験を行うとともに、品種や収穫時期を考慮し、若茎の曲がりの発生や硬化など、アスパラガスの商品価値に直接影響する症状をはじめ、さまざまな品質劣化の症状に対応した鮮度保持方法を国内生産向けに確立していく必要がある。そして、それらの研究結果に基づいた鮮度保持技術の開発を進めることにより、国内産アスパラガスの品質をさらに向上させることが期待できる。

要 約

アスパラガスは収穫後も成長を続け、野菜類の中では収穫後の品質劣化が起こりやすいため、安定した品質や機能性を保持するには、収穫後の鮮度保持方法を確立する必要がある。本研究では、‘ゼンユウヨーデル (NJ 953)’の6年株の春どりの若茎を用いて、異なる輸送条件、貯蔵条件および貯蔵姿勢における外観、若茎の糖度、水分含量および破断応力の変動を調査した。若茎の商品性は、そのままの状態の輸送よりも低温輸送で、常温貯蔵よりも低温貯蔵で保持され、特に水を加えた場合には、横置きよりも縦置きの貯蔵姿勢で保持される傾向であった。一方で、低温輸送区において、水を加えた区は無水区に比べて糖度が低くなったが、外観の萎縮は抑えられた。本研究の結果、若茎の商品性の保持には、輸送方法、貯蔵温度および貯蔵姿勢が影響し、そのままの状態の輸送、貯蔵温度の高い条件および横置きの貯蔵姿勢が品質劣化につながる可能性が示唆された。

文 献

- 1) 香川芳子監修：食品成分表 2014：女子栄養大学出版部，本表編，pp.46～47 (2014)
- 2) 前田智雄：アスパラガスの成分と鮮度保持（元木 悟・井上勝広・前田智雄編著：アスパラガスの高品質多収技術），農文協，pp.189～199 (2008)
- 3) O'DONOGHUE, E. M. and SOMERFIELD, S. D.: Cell walls of asparagus after harvest, *Acta Hort.*, **464**, 447～450 (1988)
- 4) 一丸禎樹・犬塚和男：アスパラガスの鮮度保持に関する研究，長崎総農林試報，**32**，1～14 (2006)
- 5) KING, G. A., HURST, P. L., IRVING, D. E. and LILL, R. E.: Recent advances in the post harvest physiology, storage and handling of green asparagus, *Postharvest. News Inform.*, **4**, 85N～89N (1993)
- 6) KITAZAWA, H., MOTOKI, S., MAEDA, T., ISHIKAWA, Y., HAMAUZI, Y., MATSUSHIMA, K., SAKAI, H., SHINA, T. and KYUTOKU, Y.: Effects of storage temperature on the postharvest quality of three asparagus cultivars harvested in spring, *J. Jpn. Soc. Hort. Sci.*, **80**, 76～81 (2011)
- 7) LILL, R. E., BORST, W. H. and IRVING, D. E.: Tiprot in asparagus: effect of temperature during spear growth, *Postharvest Biol. Tec.*, **8**, 37～43 (1996)
- 8) 八鍬利郎：アスパラガス（地域資源活用食品加工総覧 第10巻 素材編），農文協，pp.19～32 (2000)
- 9) HERPPICH, W. B. and HUYSKENS-KEIL, S.: Cell wall biochemistry and biomechanics of harvested white asparagus shoots as affected by temperature, *Ann. Appl. Biol.*, **152**, 377～388 (2008)
- 10) LIPTON, W. J.: Postharvest biology of fresh asparagus, *Hortic. Rev. (Am. Soc. Hortic. Sci.)*, **12**, 69～115 (1990)
- 11) 元木 悟：若茎の成分・品質と鮮度保持（農業技術体系野菜編 8 (2) タマネギ・アスパラガス），農文協，pp. 基48の2～基48の21 (2014)
- 12) Government of Canada, Canadian Food Inspection Agency, Guidance Document Repository, Food, Fresh Fruits and Vegetables, Quality Inspection, Asparagus, (<http://www.inspection.gc.ca/food/fresh-fruits-and-vegetables/quality-inspection/vegetable-inspection-manuals/asparagus/eng/1303751270575/1303751527307>)
- 13) 高柳 浩・山ノ井高洋：ファジィ論理とニュートラルネットワークを用いたアスパラガスの形状判別，日本ファジィ学会誌，**9** (3)，402～407 (1997)
- 14) 牛流清志：葉菜類その他の真空冷却（大久保増太郎編著：野菜の鮮度保持），養賢堂，pp.127～135 (1988)
- 15) 前田万里・太田英明・興座宏一・田島 眞：アスパラガス貯蔵中の破断応力変化と食物繊維含量変化との関連，近畿中国農研，**80**，46～49 (1990)
- 16) ZURERA, G., MÜÑOZ, M., MORENO, R., GONZALEZ, J. A., AMARO, M. A. and ROS, G.: Cytological and compositional evaluation of white asparagus spears as a function of variety, thickness, portion and storage conditions, *J. Sci. Food Agr.*, **80**, 335～340 (2000)
- 17) RENQUIST, A. R., LILL, R. E., BORST, W. H., BYCROFT, B. L., CORRIGAN, V. K. and O'DONOGHUE, E. M.: Postharvest life of asparagus (*Asparagus officinalis*) under warm conditions can be extended by controlled atmosphere or water feeding, *New Zeal. J. Crop Hort.*, **33**, 269～276 (2005)
- 18) MORRIS, L. and WATADA, A.: Elongation and bending of asparagus spears, *Calif. Agric.*, **14** (11), 15 (1960)
- 19) PAULL, R. E. and JUNG-CHEN, N.: Heat treatment prevents postharvest geotropic curvature of

- asparagus spears (*Asparagus officinalis* L.), *Postharvest Biol. Tec.*, **16**, 37~41 (1999)
- 20) LILL, R. E. : Storage of asparagus, *New Zeal. J. Exp. Agr.*, **8**, 163~167 (1980)
- 21) MOTOKI, S., KITAZAWA, H., KAWABATA, T., SAKAI, H., MATSUSHIMA, K. and HAMAUZU, Y.: Rapid rutin accumulation during spear elongation in asparagus, *HortSci.*, **47** (5), 599~602 (2012)
- 22) VILLANUEVA-SUAREZ, M. J., REDONDO-CUENCA, A., RODRIGUEZ-SEVILLA, M. D. and HEREDIA-MORENO, A. : Postharvest storage of white asparagus (*Asparagus officinalis* L.) : changes in dietary fiber (Nonstarch Polysaccharides), *J. Agric. Food Chem.*, **47** (9), 3832~3836 (1999)
- 23) 元木 悟：品種を選び、その特性を活かす（元木 悟・井上勝広・前田智雄編著：アスパラガスの高品質多収技術），農文協，pp.39~56（2008）
- 24) 元木 悟・北澤裕明・酒井浩晃・松島憲一・濱渦康範：品種および収穫時期の違いが長期どり栽培されたアスパラガス (*Asparagus officinalis* L.) の破断応力およびルチン含量ならびにそれらの収穫後変化に及ぼす影響，*日食保蔵誌*，**38** (5)，271~276 (2012)
- 25) 漆崎末夫：農産物の鮮度保持，筑波書房，p.190 (1988)
- 26) 岡部和広・大木 淳・工藤郁也：アスパラガス収穫物の切り口を中心とした品質低下防止技術，*東北農業研究*，**60**，207~208 (2007)
- 27) LILL, R. E., KING, G. A. and O'DONOGHUE, E. M. : Physiological changes in asparagus spears immediately after harvest, *Sci. Hortic.*, **44**, 191~199 (1990)
- 28) 北海道立総合研究機構 花・野菜技術センターホームページ，鮮度保持に関する試験方法・項目 (http://www.agri.hro.or.jp/hanayasai/04hana_yasai_info/02youryou/fresh/veg/yasai.pdf)
- 29) 田村 晃・篠田光江：アスパラガス長期どり栽培収穫物における糖と遊離アミノ酸含量の推移，*東北農業研究*，**56**，219~220 (2003)
- 30) 板森敏宣・地子 立・植野玲一郎・中野雅章・目黒孝司：ハウス立茎および露地普通栽培におけるグリーンアスパラガス若茎のBrix値とアスコルビン酸含量，*北海道立農試集報*，**98**，51~54 (2006)
- 31) HEYES, J. A., BURTON, V. M. and DE-VRÉ L. A. : Cellular physiology of textural changes in harvested asparagus, *Acta Hortic.*, **464**, 455~460 (1998)
- 32) HARA, A. H., HATA, T. Y., HU, B. K-S. and TSANG, M. M. C. : Hot air induced thermo tolerance of red ginger flowers and mealy bugs to postharvest hot water immersion, *Postharvest Biol. Tec.*, **12**, 101~108 (1977)
- 33) VIGNEAULT, C., GOYETTE, B., GARIÉPY, Y., CORTBAOUI, P., CHARLES, M. T. and RAGHAVAN, V. G. S. : Effect of ear orientations on hydrocooling performance and quality of sweet corn, *Postharvest Biol. Tec.*, **43**, 351~357 (2007)
- 34) 元木 悟・前田智雄・鈴木尚俊・宮下和久・原 嘉胤・矢崎明美：トンネルを利用したアスパラガス新品目「生食用ホワイトアスパラガス」の特性と品種間差異，*長野野菜花き試報*，**15**，30~38 (2013)
- 35) SALTVEIT, M. : Postharvest glyphosate application reduces toughening, fiber content, and lignification of stored asparagus spears, *J. Am. Soc. Hortic. Sci.*, **113**, 569~572 (1988)
- 36) POWERS, J. R. and DRAKE, S. R. : Effect of cut and field holding conditions on activity of phenylalanine ammonia lyase and texture in fresh asparagus spears (lignin formation), *J. Food Sci.*, **40**, 509~513 (1980)
- 37) 元木 悟：若茎の収穫（農業技術体系野菜編8 (2) タマネギ・アスパラガス），農文協，pp.43~47 (2010)
- 38) REDONDO-CUENCA, A., VILLANUEVA-SUAREZ, M. J., RODRIGUEZ-SEVILLA, M. D. and HEREDIA-MORENO, A. : Changes in insoluble and soluble dietary fibre of white asparagus (*Asparagus officinalis* L.) during different conditions of storage, *J. Agr. Food Chem.*, **45**, 3228~3232 (1997)
- 39) 伊藤和彦：青果物の鮮度保持に関する研究，第1報 グリーンアスパラガスの短期包装貯蔵，*北海道大学農学部邦文紀要*，**15**，7~18 (1986)
- 40) SÁNCHEZ-PINEDA-INFANTAS, M. T., CANO-MÚÑOZ, G. and HERMIDA-BUN, J. R. : Blanching, Freezing and frozen storage influence texture of white asparagus, *J. Food Sci.*, **59**, 821~823 (1994)
- 41) SUSANA, C. F., FERNANDA, A. R. O. and JEFFREY, K. B. : Modelling respiration fresh fruits and vegetables for modified atmosphere packages : a review, *J. Food Engr.*, **52**, 99~119 (2002)
- (平成27年3月18日受付，平成27年6月3日受理)