

(2) 輸出に適した畜産物供給のための試験・実証

業務実施状況報告書

京都女子大学 教授 八田一

業務名：鶏卵の非破壊鮮度検査法の開発とそのインライン装置の実用化

1. 実施内容

【背景】近年、国産の鶏卵を含めた農畜産物の輸出量が増加している。特に殻付き卵の輸出量が東南アジアを中心に急激に増加している。日本は生卵を食べる国として有名で、鶏卵の安全と安心が賞味期限（生食可能期限）として保証されている点が、近年の鶏卵輸出量を急激に押し上げている要因の一つであると推察される。このような状況下、賞味期限を超えた鮮度低下卵を決して輸出しないためにも、鶏卵を割らずにその鮮度を正確に判定できる非破壊鮮度検査法の開発が海外の消費者や鶏卵輸出業者から要望されている。

昨年度の受託研究では、新鮮卵を種々の温度で賞味期限を超えて保存し、鶏卵の鮮度を変え、卵黄係数（YI）とSalmonella Enteritidis(SE)菌の増殖性の相関を調べた結果、YIが0.3未満に鮮度が低下した鶏卵の卵黄においてSE菌の急激な増殖が起こることを明らかにした。すなわち、鶏卵の新しい鮮度指標として「YI」を用いれば、たとえIn Egg汚染卵であっても、生食可能と判断できるカットオフ値を「YI=0.3以上」と設定できる可能性がある（図1）。

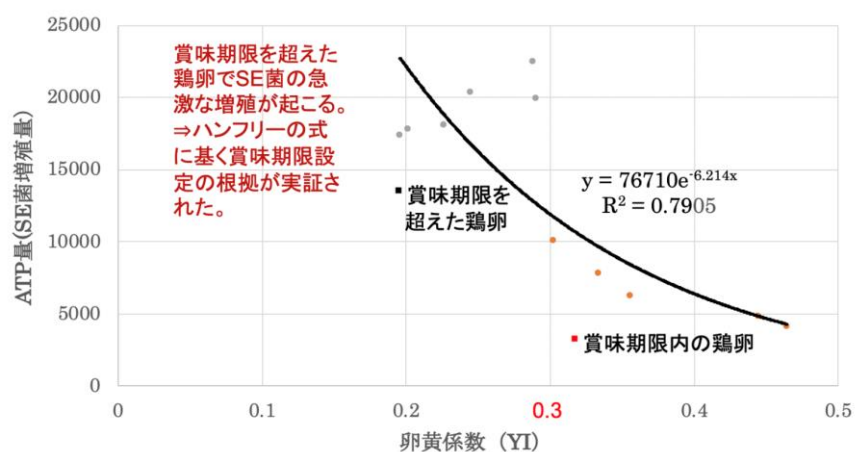


図1 卵黄係数（YI）とSE菌の増殖に伴うATP量の関係

また、鶏卵の非破壊鮮度検査法の開発として、鮮度の異なる鶏卵をX線CTスキャンにかけ測定した気室体積と各鮮度指標（HU、YI、卵白pHなど）との相関関係を検証した結果、卵黄係数（YI）と気室体積に強い相関関係がみられること、また気室体積は気室高さに強い正相関することを示した。すなわち、鶏卵の気室高さを精密に測定すれば、そのYIが算出可能で、鶏卵の非破壊鮮度測定が可能であることを示した。しかし、X線CTスキャンやX線写真撮影は装置コストが高く、インライン連続測定も不可能であり実用的でない。

【目的】本年度の受託研究では、X線CTスキャンやX線写真撮影に代わる非破壊検査法として、株式会社ナベルに鶏卵の気室高さ測定装置（サーモカメラ方式、キャンドリング方式、比重測定方式）の開発を依頼し試作した。これら測定方式の異なる各試作装置で鮮度の異なる鶏卵の気室高さの非破壊測定を行なった後、その鶏卵を割卵してハウユニット（HU）と卵黄係数（YI）を測定した。そして、各鮮度指標と気室高さの相関関係を詳細に検討し、さらに各試作装置の測定時間や精度の観点からインライン連続測定の可能性も考慮し、鶏卵の非破壊鮮度測定に最も適する気室高さ測定方式（装置）の比較を行う。

【方法】25℃湿度70%・30℃湿度75%保存において、Dr. ハンプリーの式より「急激な菌増殖が起こる日数」はそれぞれ7日間、14日間である。この日数を基に、京都府畜産技術センターとグリーンファームSOGOから購入した産みたて卵（MサイズとLサイズ）を25℃湿度70%で0日・7日・14日・21日・28日・35日間、30℃湿度75%で0日・3日・6日・9日・13日・16日間保存したものをサンプル卵として使用した。京都市産業技術研究所のマイクロフォーカスX線CTシステムを用い、CTスキャンデータおよびX線写真から各卵の気室体積や気室高さの測定を行った。また、株式会社ナベルが試作した鶏卵の気室高さ測定装置のサーモカメラ方式・キャンドリング透光方式でも気室高さを測定した。さらに、鮮度低下卵は比重が軽くなることに着目し、鶏卵の体積をバックライト方式で測定した各卵の投影図の面積から算出し、その重量を精密に測定し比重を求めた。鮮度測定はデジタルエッグテスター（株式会社ナベル製）を用いてHUとYIを測定した。

2. 取組による成果

【結果および考察】本事業申請時に提出した計画書（添付）に沿って成果をまとめる。

(1) 鶏卵の非破壊鮮度検査法の開発（データの再現性確認）

昨年度と同様にX線CTスキャン装置で求めた鶏卵の気室高さと気室体積の相関関係は、25℃湿度70%と30℃湿度75%保存卵のMとLサイズ全てまとめて、 $R^2=0.9161$ 、

であった。昨年の相関関係を示す $R^2 = 0.8311$ より、本年度の結果の方がより強い正の相関関係が得られ、データの再現性が認められた（図2）。

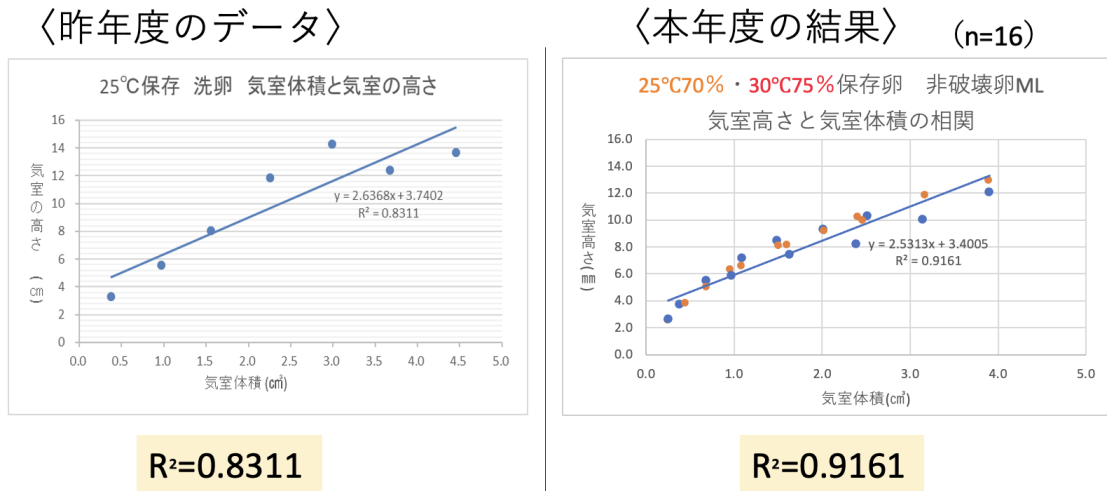


図2 X線での気室高さと気室体積の相関

なお、鶏卵の保存中の鮮度変化として卵黄係数 (YI) とハウユニット (HU) を比較すると、YI は測定値のばらつきが小さいこと、保存経過に伴い YI 値が直線的に低下すること、YI=0.3 近辺が賞味期限日と一致することの再現性が得られた。さらに、気室高さと測定値のばらつきが大きい HU の相関関係は $R^2 = 0.3747$ と弱い、気室高さと卵黄係数の相関関係は $R^2 = 0.7057$ で強い負の相関関係を示すデータが得られた（図3）。これらの結果から、昨年度データの再現性が確認できた。

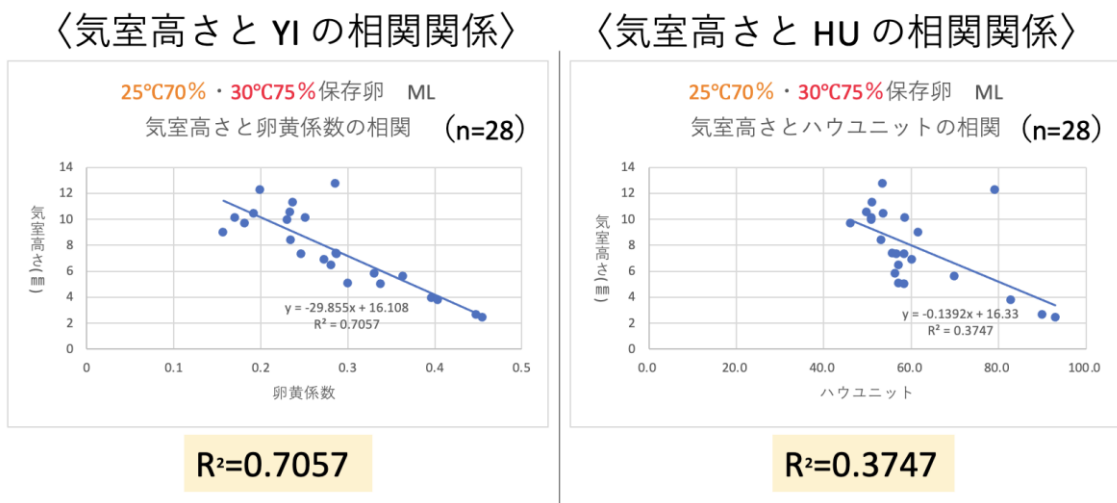


図3 X線写真方式の気室高さと鮮度指標 (YI・HU) の関係

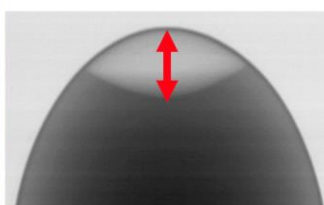
(2) 透過光下における鶏卵の気室形状のデジタル化（非破壊検査）

キャンドリング透光方式で鶏卵の気室高さを測定する装置は株式会社ナベルに開発を依頼し試作していただいた。

(3) 鶏卵の気室高さデジタル測定装置の開発

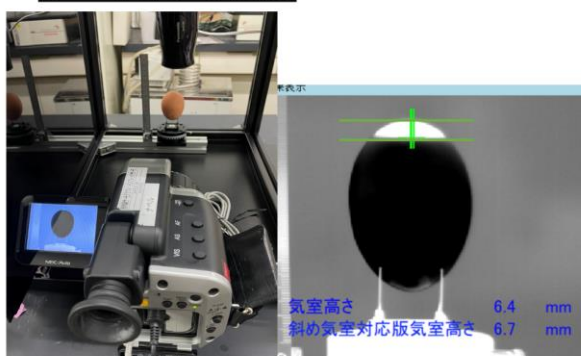
今回、株式会社ナベルに新しく試作していただいた鶏卵の気室高さデジタル測定装置の測定方式を図4に示す。X線写真方式はX線 CT スキャン装置で撮影する X 線写真データから気室高さを測定する方式である。サーモカメラ方式は冷却した鶏卵の鈍端部をドライヤーで温め、空気の気室部分と液体の卵白部分の比熱の違いを用い、サーモカメラで温度変化をデジタル化し気室高さを測定する方式である。また、キャンドリング方式は暗室で鶏卵の上部から特定波長の光を照射し、気室部分を可視化しデジタル撮影して気室高さを測定する方式である。これらの測定方式の中でX線写真方式が最も精度よく気室高さを測定することが可能であり、本実験ではX線写真方式で得られた気室高さを基準値として、サーモカメラ方式およびキャンドリング方式で測定した気室高さとの相関関係を調べた。

X線写真方式



昨年度と同様に
本年度もX線写真方式
（左図）で測定した気室
高さを基準とする。

サーモカメラ方式



キャンドリング方式

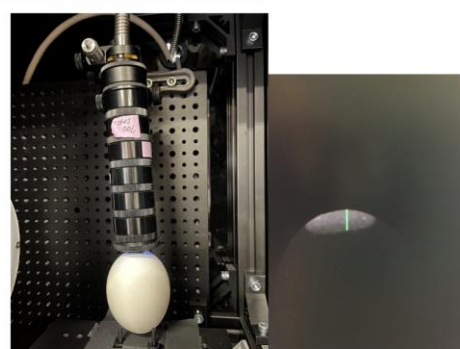


図4 気室高さ測定方式

サーモカメラ方式で測定した鶏卵の気室高さと X 線写真から求めた気室高さの相関関係は 25℃湿度 70% 保存卵で $R^2=0.9359$ および 30℃湿度 75% 保存卵で $R^2=0.8306$ と良好な正相関が得られた。また、キャンドリング透光方式の気室高さと X 線写真から求めた気室高さの相関関係は 25℃湿度 70% 保存卵で $R^2=0.9353$ および 30℃湿度 75% 保存卵で $R^2=0.9079$ とさらに良好な正の相関が得られた (図 5)。

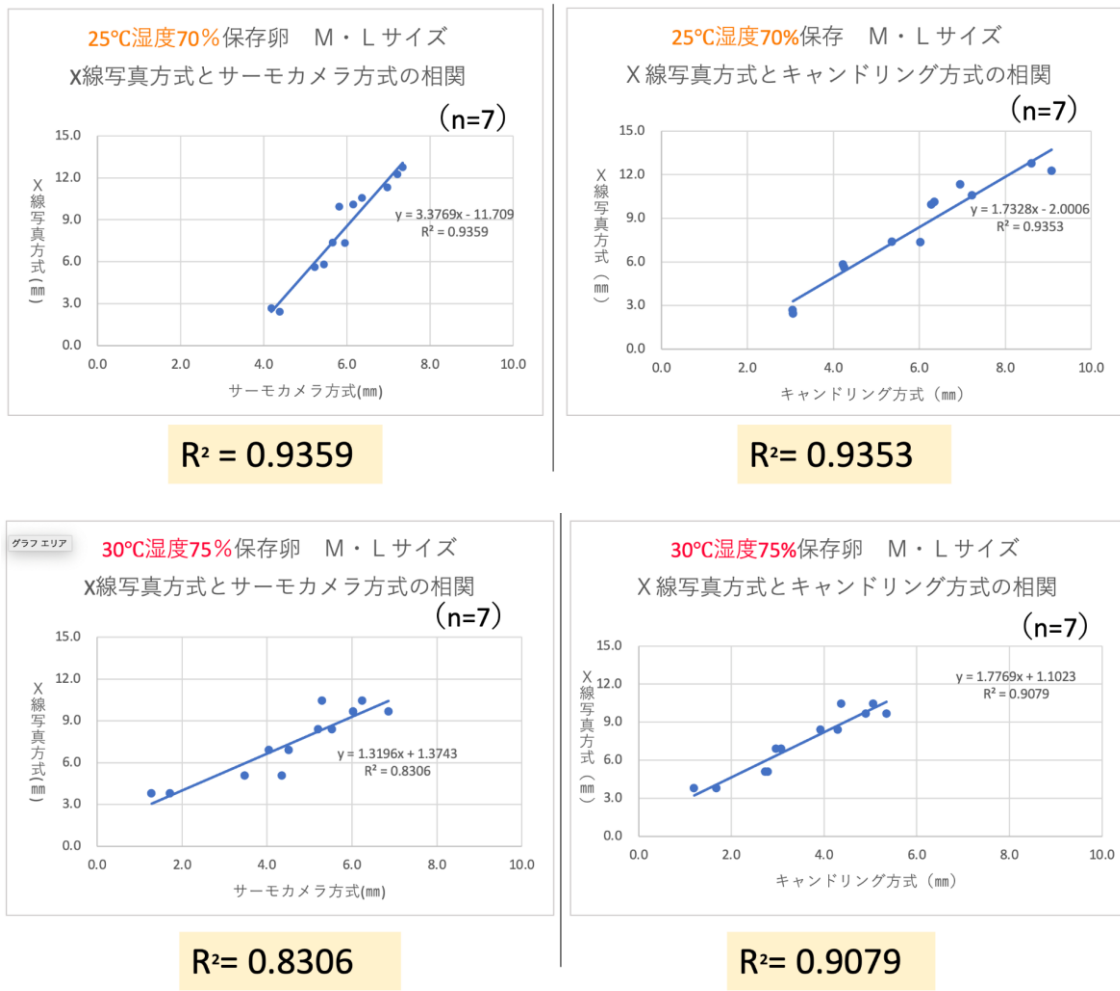


図 5 鶏卵気室高さの非破壊デジタル測定における X 線写真方式 (基準値) とサーモカメラ方式およびキャンドリング方式の相関関係

図 5 の各散布図内の 1 点は鶏卵 7 個 ($n=7$) の平均値である。25℃、30℃ 保存卵ともに M サイズと L サイズをまとめたので各散布図は 12 点すなわち 84 個の鶏卵を用いて得られた結果である。基準値として用いた X 線写真方式の気室高さとサーモカメラ方式もキャンドリング方式のいずれも良好な正の相関関係が得られた。但し、それぞれの相関関係式の傾きを比較して、25℃湿度 70% 保存卵 (左上図) のサーモカメラ方式で傾きが約 2 倍も異なるのは測定条件、おそらくドライヤーでの加熱条件、が規格化しにくいためだと考察する。

(4) 鶏卵の気室高さデジタル測定装置のインライン化

本事業で試作した鶏卵気室高さ測定装置はその測定原理がサーモカメラ方式あるいはキャンドリング方式であっても鶏卵の卵黄係数 (YI) と良好な負の相関関係を示した (図 6)。今回、測定に用いた鶏卵は 25°C湿度 70%や 30°C湿度 75%の保存条件で意図的に鮮度を変化させた M と L サイズの鶏卵それぞれ 120 個 (12 点、n=10) である。我々は昨年度の本事業受託研究により、卵黄係数 (YI) が鶏卵の鮮度変化を最もよく反映する鮮度指標であり、鶏卵の新しい鮮度指標として「YI」を用いれば、たとえ In Egg 汚染卵であっても、生食可能と判断できる賞味期限のカットオフ値を「YI=0.3 以上」と設定できる可能性がある (図 1) ことを示してきた。今回、高価な X 線 CT スキャン装置を用いることなく、本事業で試作した鶏卵気室高さ測定装置 (サーモカメラ方式あるいはキャンドリング方式) で鶏卵の気室高さを測定すれば鶏卵を割らずに YI を推定することが可能となった。

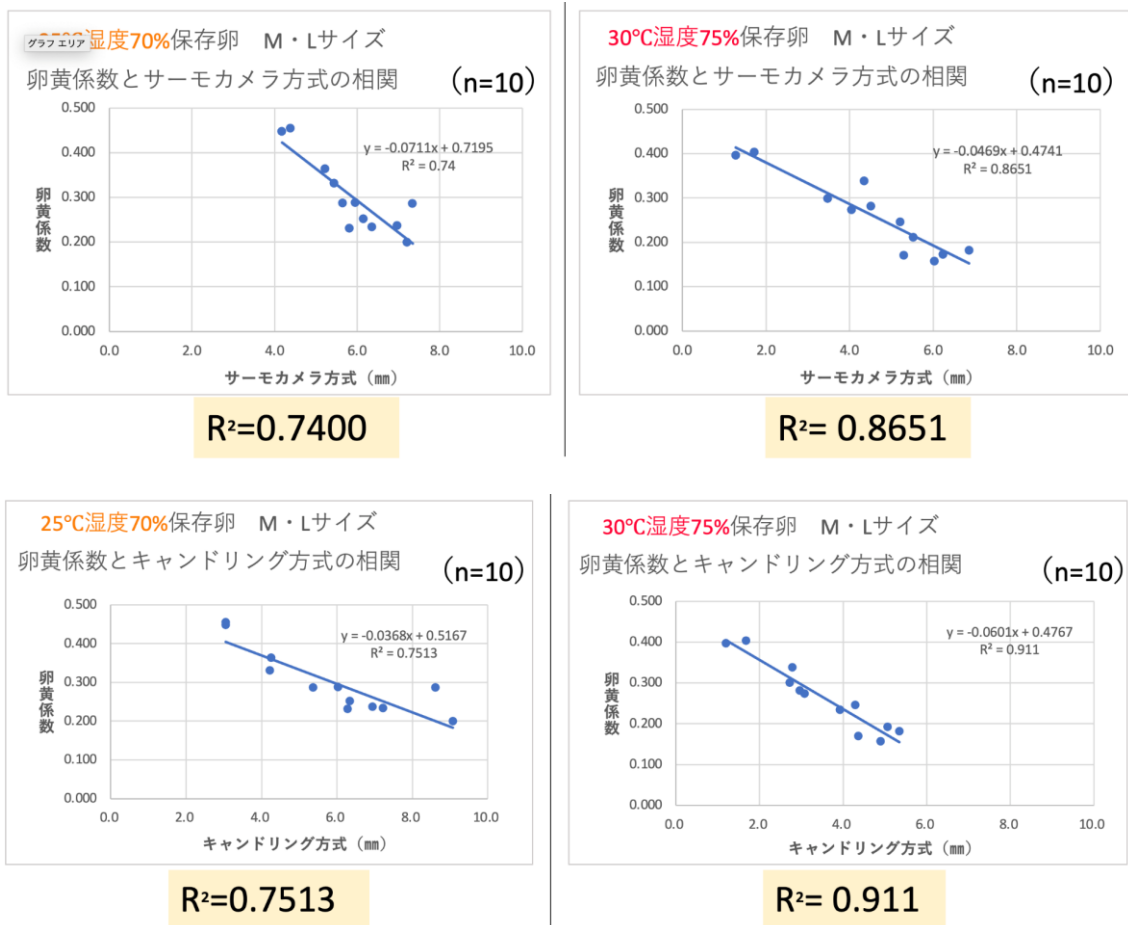


図 6 卵黄係数 (YI) とサーモカメラ方式およびキャンドリング方式で測定した気室高さの相関関係

本事業の成果を実用化するためには、鶏卵気室高さ測定装置（サーモカメラ方式あるいはキャンドリング方式）で大量の鶏卵の気室高さを連続的にインライン測定する必要がある。本年度は新型コロナウイルス感染拡大の影響もあり、鶏卵気室高さ測定装置をインライン化する実験が全くできなかった。ただ、サーモカメラ方式あるいはキャンドリング方式いずれの鶏卵気室高さ測定装置であっても鶏卵の選別ラインに実装するには、それぞれ利点と欠点を明らかにすることができた（図7）。

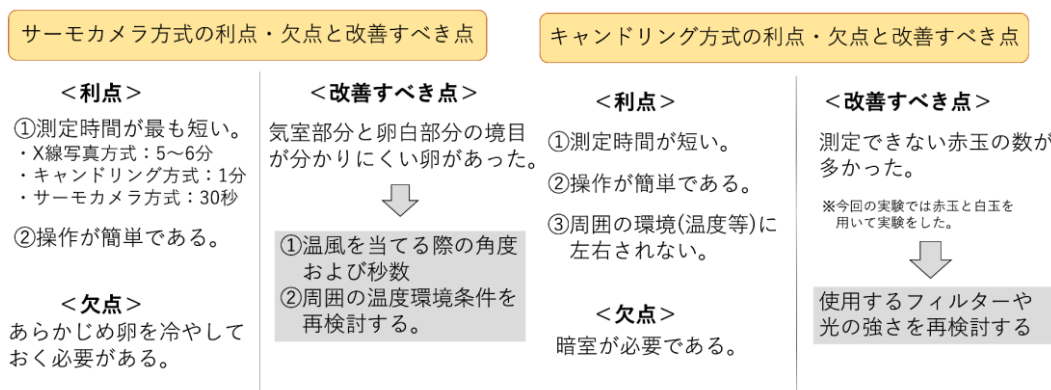


図7 インライン化におけるサーモカメラ方式とキャンドリング方式の利点と欠点

いずれの鶏卵気室高さ測定装置もX線CTスキャン装置より導入コストや装置の大きさ的には、インライン測定ができれば実用化可能性がある。しかし、図7にまとめたように、サーモカメラ方式では測定前に鶏卵を冷却する必要があり、しかも本実験のようにドライヤーの熱風で気室部分の温度をあげる方法は周囲の環境温度が上昇し測定結果のばらつきが大きくなる。一方、キャンドリング方式で気室を視覚化するには暗室での操作が必要で、しかも一つ一つの鶏卵の鈍端部から漏れがないように光をあてなければならず、この点が連続インライン化では困難である。

以上、これまでの研究成果の要点をまとめると、高価なX線CTスキャン装置を用いることなく、本事業で試作した鶏卵気室高さ測定装置（サーモカメラ方式あるいはキャンドリング方式）で鶏卵の気室高さを測定すれば、鶏卵を割らずに非破壊的にYIを推定することが可能となった。そして、その推定YI=0.3以上を鶏卵の賞味期限（生食可能期限）のカットオフ値として用いる鶏卵の非破壊鮮度測定法の開発に成功した。一方、そのインライン装置の実用化については、本事業で試作した鶏卵気室高さ測定装置（サーモカメラ方式およびキャンドリング方式）の気室高さ検出原理から考えて、鶏卵の選別包装ラインに実装し実用化するには、装置の条件設定や装置の構造改良など改善すべき多くの問題があることを示した。

(5) 鶏卵の比重測定装置の開発とそのインライン化の可能性

最後に、本事業における鶏卵の気室高さ測定装置の技術開発と試作の委託先でもある株式会社ナベルから、非破壊鮮度測定に鶏卵の比重測定が使えるのではないかと提案がなされた。昔から、鶏卵が古くなると比重が軽くなることが知られている。また、昨年度の本事業で鶏卵の気室の体積は鶏卵の鮮度指標の卵黄係数（YI）を高度に負の相関関係を示すことが見出されている。従って、種々の保存鶏卵の重量と体積から比重を計算し、その卵黄係数との相関関係を調べる実験を行なった。

実験としては、株式会社ナベルが開発試作した鶏卵の体積測定装置（図8）で体積を算出し、鶏卵の重量をセミマイクロ天秤で精密に測定した。この体積測定装置はバックライト方式とよび、その体積測定原理は鶏卵に並行に光をあてて得られる投影図の面積から、特殊な計算式を用いて体積を算出している。

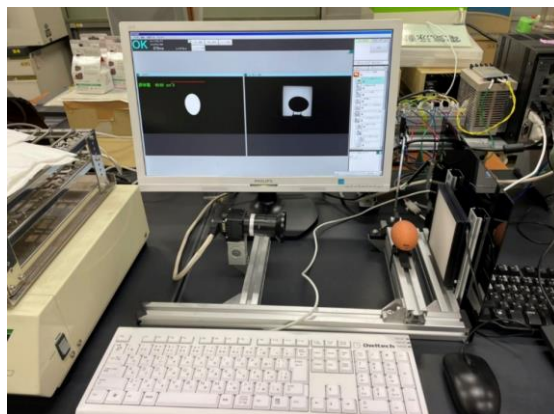


図8 鶏卵の体積測定装置（バックライト方式）

まず、25℃湿度70%および30℃湿度75%の保存で鮮度を変化させた鶏卵を試料として用い、X線CTスキャン方式およびバックライト方式で体積を測定し、それぞれの相関関係を調べた結果、バックライト方式で算出した鶏卵体積はX線CTスキャン方式で測定した体積と高度に正相関し、その傾きもほぼ1であった。

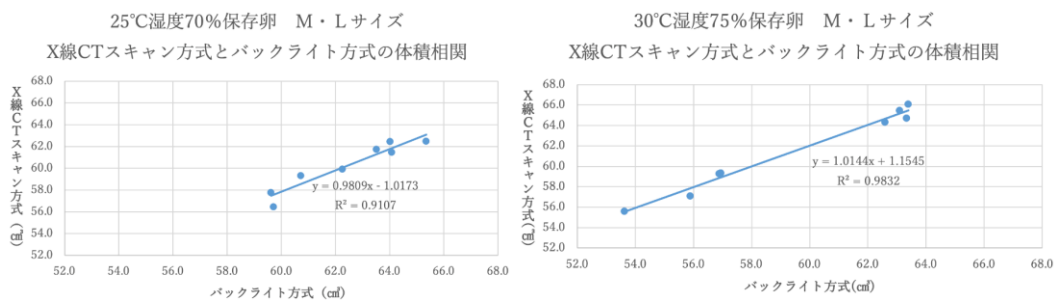


図9 鶏卵の体積 X線 CT スキャン方式とバックライト方式の相関関係

次いで、鶏卵を 25℃湿度 70%および 30℃湿度 75%で保存し、それぞれ鮮度を変えた鶏卵試料を調製した。各鶏卵試料の体積はバックライト方式で、重量はセミマイクロ電子天秤で測定し、比重 (g/cm^3) を計算した。その後、割卵して、デジタルエッグテスター (株式会社ナベル) でハウユニット (HU) と卵黄係数 (YI) を測定した。図10に鮮度を変えた保存鶏卵試料の比重と卵黄係数の相関関係を示す。試料数は M サイズ (オレンジ点) と L サイズ (青点) それぞれ 12 個ずつ合計 24 個と少ないが、比重と卵黄係数は強い正の相関関係 ($R^2=0.7033$) が得られた。

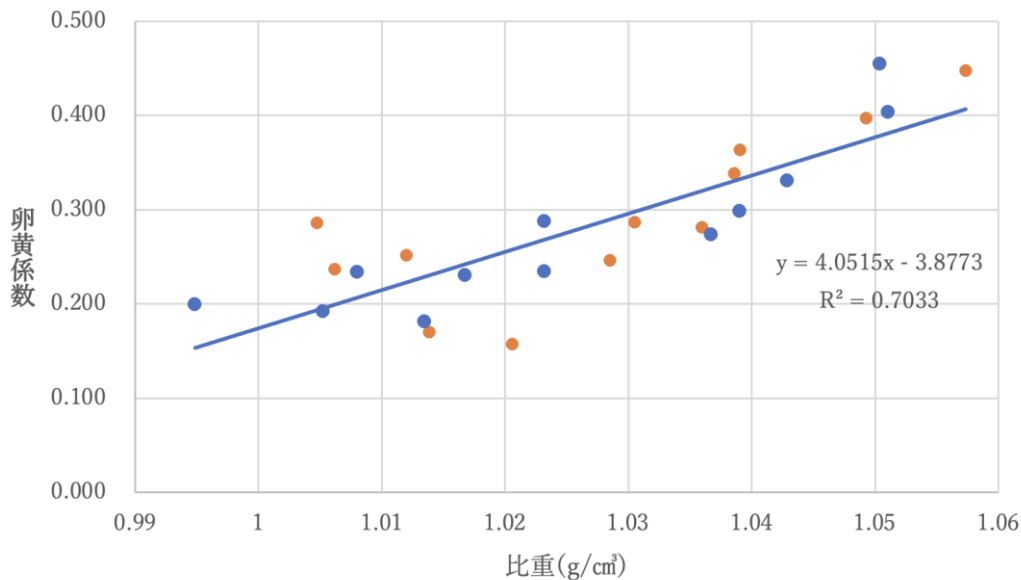


図10 25℃湿度 70%・30℃湿度 75%保存卵 M (赤点)・L (青点) サイズ
卵黄係数 (YI) と比重の相関関係

今回、本事業の計画書 (別添) 提出時にはなかったが、株式会社ナベルからの提案により、セミマイクロ電子天秤で測定した鶏卵の重量をバックライト方式で測定した鶏卵の体積で除した鶏卵の比重 (g/cm^3) とその卵黄係数 (YI) が正相関することが見出された。すなわち、卵黄係数 (YI) = $4.0515 \times$ 鶏卵の比重 (g/cm^3) - 3.8773 で算出することができる (図10)。この比重測定法は GP センターの鶏卵選別包装システムにインラインで導入できる可能性が非常に高い。従って、今後さらに多くの大きさや鮮度の異なる鶏卵を試料として、その鮮度指標 YI と鶏卵の比重のデータを蓄積し、それぞれの相関関係式の精度を高めれば、世界初の鶏卵の比重測定を用いた非破壊鮮度検査法を鶏卵選別包装システムに実装可能なインライン装置の実用化が期待できる。

3. 実施結果の公表等

本事業の実施結果は来年度中に学術論文としてまとめて、順次公表していきたい。

なお、実施結果の内、上述の2. 取組による成果 **(5) 鶏卵の比重測定装置の開発とそのオンライン化の可能性**は株式会社ナベルの発案による共同研究でもあり、鶏卵の比重と YI の相関関係をさらに詳細に調べる必要はあるが、同社の鶏卵選別包装システムへ実装可能な鶏卵の非破壊鮮度測定法として実用化できる可能性が見込まれる。本事業の継続が可能であれば、さらに多くの鶏卵を用いてデータを集め、特許性などもよく調べて特許出願の後、得られた結果を学術論文としてまとめて、順次公表していきたい。

以上