

短 報

ホタテガイの乾貝柱製造における除湿乾燥の特性

成田正直*・清水茂雅*・宮崎亜希子*・佐藤暁之*・辻 浩司*

Characterization of a dehumidifying drying process for drying the scallop adductor muscle and the effect of the process on crack formation

Masanao NARITA, Shigemasa SHIMIZU, Akiko MIYAZAKI,
Akiyuki SATO and Kohji TUJI

This study examined a dehumidifying drying process used to produce dried scallop adductor muscle and to compare the effect of two drying processes on crack formation. Examination of scallop adductor muscle drying processes performed in three factories revealed that the drying processes used, including dehumidifying drying, differed in each factory. To compare the efficiency of dehumidifying drying and heated-air drying, drying experiments using scallop adductor muscle were conducted in the laboratory. While the dehumidifying drying process required less time to complete, crack formation and extent was markedly more extensive using this method. The extent of cracking was markedly higher when dehumidifying drying was conducted in the early stage of drying. Our results showed that drying using heated air was associated with improved drying efficiency and reduced crack formation, and that heated-air and dehumidifying drying methods should be applied in the early and latter stages of the drying process, respectively.

キーワード：ホタテガイ，除湿乾燥，熱風乾燥，乾貝柱
2015年1月30日受付 2015年12月18日受理

乾貝柱はホタテガイ *Mizuhopecten yessoensis* の閉殻筋（以下，貝柱）を煮熟，乾燥した加工品で主に中華料理の具材として利用される（今村 2005）。北海道で水揚げされるホタテガイの約 15% は乾貝柱に加工され（成田ら 2011），その約 8 割が高級食材として香港，台湾などに輸出されている。生産金額は 100 億円を超え，乾貝柱は北海道の水産業にとって重要な加工品のひとつとなっている。

乾貝柱製造における乾燥方法は，古くから行われている天日乾燥と，近年導入された機械乾燥がある。機械乾燥にはさらに熱風乾燥と除湿乾燥があり，現在，これら 3 つの方法が用いられている。このうち，除湿乾燥は近年，普及が進んでいる比較的，新しい乾燥方法で，乾

貝柱の主要生産地であるオホーツク沿岸では，現在，約 20 加工場のうち 6 割で導入されている。3 つの乾燥方法の中で，熱風乾燥および天日乾燥は使用方法が各加工場で類似しているのに対し，除湿乾燥は温度や湿度，乾燥時間などの使用条件の他，使用回数や，どの段階で用いるかなどを含めた使用方法が加工場で異なっている

一方，乾貝柱の品質は共販制を実施している北海道漁業協同組合連合会により（長谷川 1993），1 等検から 4 等検の他，等外，ブローケン（砕け）の 6 ランクに格付けされている（北海道ほたて流通食品協会 2011）。ブローケンを除いた製品の品質は乾貝柱の肉質（肉締り），色沢，香味，白粉の有無，乾燥度（水分 16% 以下）などで評価されている。この基準の中で，肉質（肉締まり）に関

* 地方独立行政法人北海道立総合研究機構網走水産試験場加工利用部
〒094-0011 北海道紋別市港町7-8-5
Hokkaido Research Organization Abashiri Fisheries Research Institute,
7-8-5, Minato, Monbetsu, Hokkaido 094-0011, JAPAN
narita-masanao@hro.or.jp

しては乾貝柱に発生する亀裂の程度が重要な判断要素とされている。亀裂の程度が著しいものは、亀裂の隙間から向こう側がすけて見えることから「すかし」と呼ばれ、等級落ちの対象となる。

これまで、乾貝柱の品質に関する研究としては、色調形成に及ぼす要因 (Ymazaki 2013, 今村・坂本 1986) や煮熟条件と色調の関係 (武田ら 1995), 白粉物質の同定 (中村・一杉 1982, 坂本ら 1984), あん蒸条件と白粉生成の関係 (成田ら 1998) などいくつかの報告がある。また、除湿乾燥に関する報告は、連続除湿乾燥による新技術の開発 (野俣ら 1996) およびその実証試験 (成田 2000) があるが、これらは製造工程の短縮と主に色調の関係を検討したものである。現在、乾貝柱の製造現場では除湿乾燥機の導入が進んでいる一方で、除湿乾燥機の使用方法与製品の品質とりわけ亀裂発生との関連が指摘されている。しかし、乾貝柱の亀裂発生要因についての知見は極めて少なく、特に除湿乾燥条件との関連を解明した研究は見当たらない。このため、著者らは除湿乾燥の特性と使用方法が乾貝柱の亀裂発生に与える影響を明らかにするために、乾貝柱の乾燥工程について実態調査を行うとともに、貝柱の乾燥モデル試験を行った。本稿ではその結果について報告する。

材料および方法

乾貝柱乾燥の実態調査 2009～2012年にかけて、乾貝柱乾燥の実態調査を行った。除湿乾燥を比較的多用する2加工場 (A: 興部町, B: 紋別市) を選定し、乾燥工程での熱風乾燥機および除湿乾燥機の使用や天日乾燥の併用状況、乾燥の繰り返し回数などについて調査した。また、比較のため、除湿乾燥機を使用しない加工場 (C: 紋別市) についても同様に調査を実施した。さらに、各加工場で乾燥工程中の貝柱水分を測定した。測定は10個体について行い平均値を算出した。水分の測定は貝柱を包丁で細切あるいは粉碎機 (大阪ケミカル, LM-PLUS) により粉末化し、105°C 常圧乾燥法により行った。

貝柱の乾燥モデル試験 実態調査をもとに熱風乾燥と除湿乾燥による貝柱の乾燥モデル試験を行い、貝柱の重量変化、乾燥終了までに要した乾燥回数、貝柱の容積率、乾貝柱に発生した亀裂の程度について調べた。貝柱の熱風乾燥は送風定温乾燥器 (DN-84, ヤマト科学) で、除湿乾燥は恒温恒湿機 (PR-1S, エスペック) で行った。

試験試料 乾貝柱の製造では、先ず原貝を加熱 (ボイルまたはスチーム加熱で5～7分間) して貝殻と軟体部を分離する一番煮熟が行われる。この軟体部から採取した貝柱を一番煮熟 (9～15%の食塩水で10～15分間ボイル) した後、乾燥が行われる。乾燥モデル試験には、紋別市内の乾貝柱加工場で一番煮熟された貝柱 (Sサイズ, 平均重量約14g) を用いた。これを-30°Cで凍結し、ポリエチレン袋 (旭ポリフレックス N9, 200×300mm)

にて真空包装して同温度で保管した。これを試験時に室温で一晩解凍して用いた。なお、予備試験により凍結、解凍は乾貝柱の亀裂発生に影響しないことを確認している。

乾燥モデル試験の試験区 実態調査の結果から、乾燥モデル試験では、ばい乾 (80°C, 50分間) 後に、熱風乾燥と除湿乾燥を交互に行う試験区 A と、先に熱風乾燥、後に除湿乾燥を行う試験区 B, 熱風乾燥のみで乾燥を行なう試験区 C, さらに除湿乾燥のみで乾燥を行う試験区 D を設定した。なお、実態調査の結果をもとに、各試験区の熱風乾燥の条件は、初回 70°C, 2回目 60°C, 3回目以降は 55°C とし、いずれも乾燥時間は 50分間とした。除湿乾燥の温度は試験区 A および試験区 B とともに 30°C および 50°C で行い、これらを区別するため、それぞれ A30, A50 および B30, B50 とした。試験区 D の除湿乾燥温度は 30°C とした。本試験における除湿乾燥条件は、いずれも相対湿度 30%RH, 1回あたりの乾燥時間は 7時間とした。各試験区とも貝柱は樹脂製のカゴに載せて熱風乾燥あるいは除湿乾燥を行い、乾燥はいずれも 1日 1回とした。1回の乾燥が終了するたびに、貝柱をカゴに載せた状態で乾燥機から取り出し、次の乾燥まで室温で放冷した。

以上、6区分の異なる乾燥条件によって、貝柱の水分が北海道漁業協同組合連合会の規格である 16% 以下になるまで乾燥を行った。具体的な乾燥モデル試験の工程を図 1 に示した。なお、貝柱水分が 30% を下回ると推定された時点であん蒸を行った。あん蒸は貝柱をチャック付きポリ袋 (生産日本社, ユニパック J-8, 340×240×0.08mm) に入れ、室温で 1週間保管して行った。貝柱水分の推定は、実測した一番煮熟後の貝柱水分をもとに、次項で述べるように乾燥による減少重量から算出して行った。

貝柱の重量変化と水分含量の推定 1試料区分 80個体を用い、乾燥ごとに貝柱重量を測定した。乾燥前 (一番煮熟後) の貝柱における水分実測 (68.0%) をもとに、各回の乾燥による減少重量から、各回乾燥終了後の貝柱水分を推定した。すなわち、乾燥前 (一番煮熟後) の貝柱重量を W_0 とし、(1) 式から固形分重量 W_s を得た。ここで W_s はいずれの乾燥段階においても一定の値であるから、任意の乾燥回数後における貝柱重量を W_t とし、(2) 式から任意の乾燥回数後の貝柱水分 M_t が推定できる。また、この推定値を用いて 1回の乾燥ごとに減少した水分 M_r を求めた。すなわち、任意の乾燥回数において乾燥前の推定水分 M_1 , 乾燥後の推定水分 M_2 とし、 M_r を (3) 式により求めた。

$$W_s = \frac{W_0 \times (100 - 68.0)}{100} \quad (1)$$

$$M_t = \frac{W_t \times W_s}{W_t} \times 100(\%) \quad (2)$$

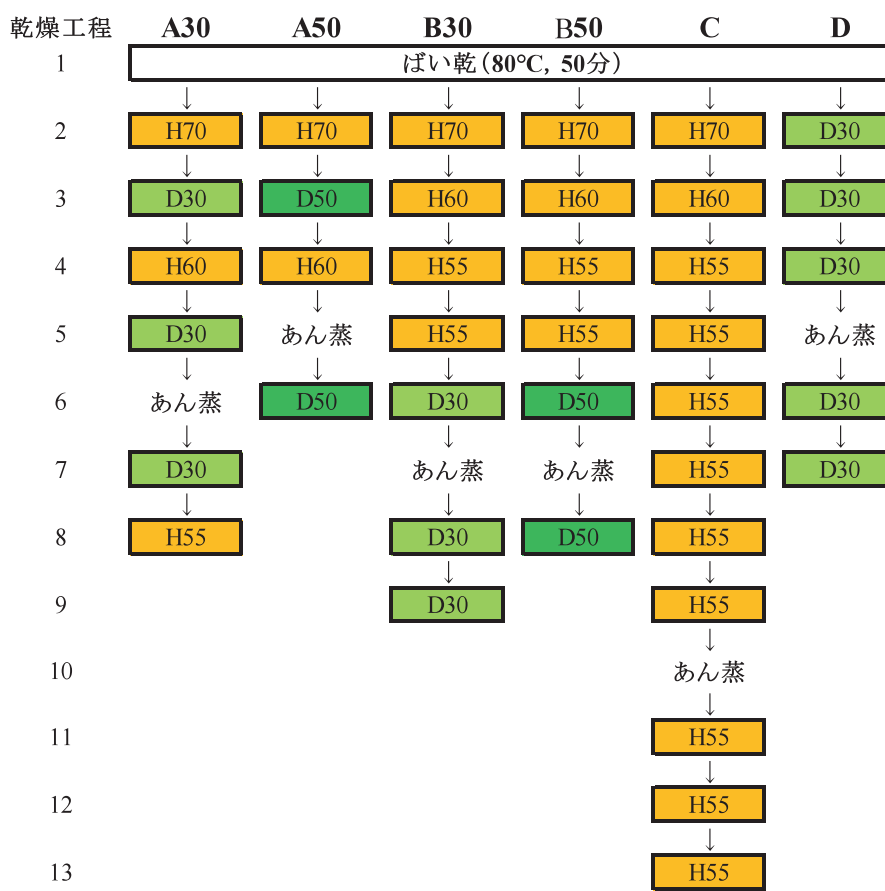


図1. 乾燥工程のフロー図

あん蒸は貝柱をチャック付きポリ袋に密封して、室温で1週間保管した
図中の記号は以下の乾燥条件を表す

D50	除湿乾燥, 50°C, 30RH%, 7時間
D30	除湿乾燥, 30°C, 30RH%, 7時間
H70	熱風乾燥, 70°C, 50分
H60	熱風乾燥, 60°C, 50分
H55	熱風乾燥, 55°C, 50分

$$Mr = M_1 - M_2 (\%) \quad (3)$$

乾燥による貝柱の容積の減少 重量測定用とは別の貝柱20個体について、貝柱の形状を円柱形とみなして直径と高さをデジタルノギス (CD-15PMX, Mitutoyo Corporation) で測定し体積を算出した。貝柱の容積率 V_s は、乾燥前 (二番煮後) の貝柱体積 V_0 と任意の乾燥回数後における貝柱体積 V_1 から (4) 式によって算出した。なお、直径を計測する際は、貝柱に付着している小柱を避け、小柱の厚さが測定に影響しないよう留意した。

$$V_s = \frac{V_1}{V_0} \times 100(\%) \quad (4)$$

亀裂の判定 全乾燥工程が終了 (製了) した各試験区の乾貝柱 (80個体) について亀裂の程度を次の基準により判定した。すなわち、貝柱を円柱形とみなして、上面および下面のどちらにも亀裂発生がないもの (1)、上面および下面の一方にのみ亀裂の発生が認められるもの (2)、上面および下面の両方に亀裂発生が認められるもの (3)、貝柱に砕け (貝柱が2片以上に分割) が生じたもの (4) の4段階に分類した。なお、これらの判定は、貝柱をライトボックス (ライトビューア 7000Pro, ハクバ写真産業) による透過光を用いて目視で行った (写真1)。

結 果

乾貝柱乾燥の実態調査 二番煮熟後の貝柱は先ず、ばい乾と呼ばれる高温（80～90℃）の乾燥が行われ、これは3加工場とも共通していた。一方、ばい乾後の乾燥は加工場間で違いがみられた。A加工場の乾燥工程は熱風乾燥と除湿乾燥を交互に行う方式で、ばい乾後に熱風乾燥3回、除湿乾燥2回が交互に行なわれていた（表1）。これらの乾燥は6日目まで、1日1回毎日行なわれ、この時点での貝柱水分は29.1%であった。これ以降、あん蒸と乾燥を繰り返す断続的な乾燥が行われた。3回目の熱風乾燥の後、貝柱は3日間保管庫に収納され、天日乾燥2回を経て、あん蒸箱（ふた付きの木製容器）に移された。あん蒸箱で8日間保管後、4回目の熱風乾燥が行われた。その後、さらにあん蒸箱で4日間保管後、3回目の除湿乾燥と、その11日後に4回目の除湿乾燥が行われ全乾燥工程が終了した。A加工場では製了まで33日間を要し、最終的な貝柱水分は14.5%であった。

B加工場の乾燥工程は、前半に熱風乾燥を連続して行い後半に除湿乾燥を行う方式であった（表2）。ばい乾後に、熱風乾燥が3回（うち2回は同一日）、除湿乾燥が1回行われた。ここまではA加工場同様、毎日、乾燥が行なわれた。1回目の除湿乾燥終了後から保管庫に2日間収納された後、4回目の熱風乾燥が行われ、この時点での貝柱水分は27.1%であった。これ以降、除湿乾燥2回、天日乾燥1回、あん蒸3回を経て、4回目の除湿乾燥で全乾燥工程が終了した。B加工場では製了までに30日間を要し、最終的な貝柱水分は13.7%であった。なお、B加工場では、保管庫への収納日数は、乾燥工程を経るごとに3、4、7、10日間と徐々に長くなっていた。また、あん蒸箱の使用は製了後であった。除湿乾燥機を使用する2加工場（AとB）は、除湿乾燥の温度および湿度の設定は類似していたが、除湿乾燥を用いる段階が大きく異なっていた。

除湿乾燥を行わないC加工場では、ばい乾後、毎日、熱風乾燥が行われた（表3）。最初の熱風乾燥は1日に2

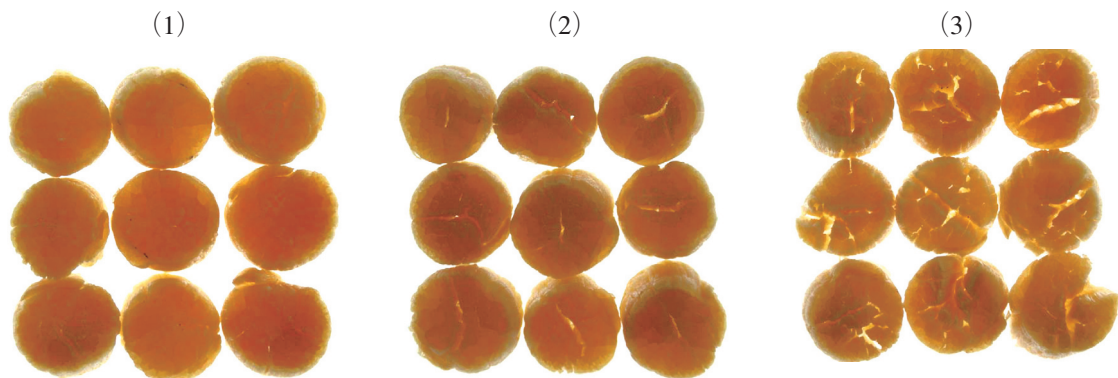


写真1. 乾燥が終了した乾貝柱に生じた亀裂
 (1)：亀裂なし
 (2)：片面に亀裂あり
 (3)：両面に亀裂あり
 他に砕けが生じたものを(4)とした
 砕けは貝柱が2片以上に分割したもの
 写真は下面からの透過光により撮影した

表1. A加工場における乾貝柱の乾燥工程

積算日数	乾燥工程	乾燥条件	貝柱水分(%)	備考
1	二番煮熟		66.9	
1	ばい乾	90℃, 60分		
2	熱風乾燥(1)	70℃, 70分		
3	除湿乾燥(1)	30℃, 30%RH, 10時間		
4	熱風乾燥(2)	65℃, 75分		
5	除湿乾燥(2)	30℃, 30%RH, 8時間		
6	熱風乾燥(3)	55℃, 75分	29.1	以後、保管庫に収納
9	天日乾燥(1)	屋外で6時間		〃
10	天日乾燥(2)	屋外で6.5時間		以後、あん蒸箱に収納
18	熱風乾燥(4)	60℃, 75分		〃
22	除湿乾燥(3)	30℃, 30%RH, 4時間		〃
33	除湿乾燥(4)	30℃, 30%RH, 4時間	14.5	〃

() 内の数字は積算日数までの同一乾燥方法による延べ乾燥回数

乾貝柱における除湿乾燥

表2. B 加工場における乾貝柱の乾燥工程

積算日数	乾燥工程	乾燥条件	貝柱水分(%)	備考
1	二番煮熟		68.7	
1	ばい乾	85°C, 50分		
2	熱風乾燥(1)	80°C, 45分		
2	熱風乾燥(2)	75°C, 50分		
3	熱風乾燥(3)	70°C, 50分		
4	除湿乾燥(1)	30°C, 30%RH, 7.5時間		以後, 保管庫に収納
6	熱風乾燥(4)	65°C, 2.5時間	27.1	"
9	除湿乾燥(2)	30°C, 30%RH, 7時間		"
13	除湿乾燥(3)	30°C, 30%RH, 6時間		"
20	天日乾燥(1)	屋外で5時間		"
30	除湿乾燥(4)	30°C, 30%RH, 4時間	13.7	以後, あん蒸箱に収納

() 内の数字は積算日数までの同一乾燥方法による延べ乾燥回数

回, それ以降は1日1回, 合計5回の熱風乾燥が行われ, この時点での貝柱水分は31.4%であった。6回目以降は隔日で2回の熱風乾燥および1回の日乾燥が行われた。6回目の熱風乾燥以降のあん蒸には, あん蒸箱が使用され, 天日乾燥後には9日間のあん蒸が行われた。製了までの19日間に9回の熱風乾燥と1回の日乾燥を行い, 最終的な貝柱水分は14.9%であった。いずれの加工場も貝柱の水分が約30%になるまでは毎日乾燥を行い, その後, 乾燥とあん蒸を繰り返す点が共通していた。

なお本研究で実態調査を行った3加工場は, それぞれ, 原料貝の生産海域や時期, 乾燥機の収容能力などが異なっており, 単純な比較が困難であることから, 製了後の乾貝柱における亀裂の発生状況についての調査は行わなかった。

乾燥モデル試験による貝柱の乾燥回数と水分 各試験区において, 製了となるまでに要した乾燥の回数は, A30が7回(積算日数15日), A50が5回(同13日), B30が8回(同16日), B50が7回(同15日)であった。また, 熱風乾燥のみのCは最も多い12回(同20日), 除湿乾燥のみのDは6回(同14日)を要した(図2)。製了時における貝柱水分の実測値は, A30, A50, B30, B50, C, Dで, それぞれ14.3 ± 1.0%, 14.2 ± 0.3%, 14.6 ± 0.3%,

12.2 ± 0.9%, 13.6 ± 0.9%, 13.0 ± 1.0%であった(平均値 ± 標準偏差, n=8 ~ 12)。各試験区における貝柱水分は, 乾燥開始時の68.0%から53.4 ~ 55.8に減少した。

乾燥1回当たりの水分減少をみると, A30のばい乾および1回目に行った熱風乾燥で減少した水分は7.1%および7.5%であった。これに対し, 最初の除湿乾燥で減少した水分は14.1%とこれらに比べて高かった。この傾向は除湿乾燥の温度を50°Cで行ったA50において顕著で, 最初の除湿乾燥で減少した水分は23.7%とさらに高かった。しかし, 2回目の除湿乾燥で減少した水分はこれよりも低くなっていた。一方, B30, B50をみると, ばい乾1回, 熱風乾燥4回行った後に, 最初の除湿乾燥で減少した水分はB30で7.8%, B50で15.6%であり, いずれもA30, A50の除湿乾燥で減少した水分に比べ小さかった。これらに対し熱風乾燥のみのCは, 1 ~ 8回目の熱風乾燥で減少した水分がいずれも4.4 ~ 6.2%と低く, 9回目以降はさらに漸減した。除湿乾燥のみのDは最初の除湿乾燥で減少した水分は13.8%と高かったが, これ以降, 減少した水分は徐々に低くなっていった。

貝柱の容積率 乾燥中の貝柱は乾燥の進行とともに収縮して, 容積が減少する現象がみられた(図3)。いずれ

表3. C 加工場における乾貝柱の乾燥工程

積算日数	乾燥工程	乾燥条件	貝柱水分(%)	備考
1	二番煮熟		67.9	
1	ばい乾	80°C, 45分		
2	熱風乾燥(1)	70°C, 80分		
2	熱風乾燥(2)	62°C, 80分		
3	熱風乾燥(3)	62°C, 80分		
4	熱風乾燥(4)	62°C, 100分		
5	熱風乾燥(5)	62°C, 80分	31.4	以後, 保管庫に収納
7	熱風乾燥(6)	57°C, 120分		以後, あん蒸箱に収納
9	熱風乾燥(7)	55°C, 90分		"
9	天日乾燥(1)	屋外で2時間		"
18	熱風乾燥(8)	55°C, 120分		"
19	熱風乾燥(9)	50°C, 100分	14.9	"

() 内の数字は積算日数までの同一乾燥方法による延べ乾燥回数

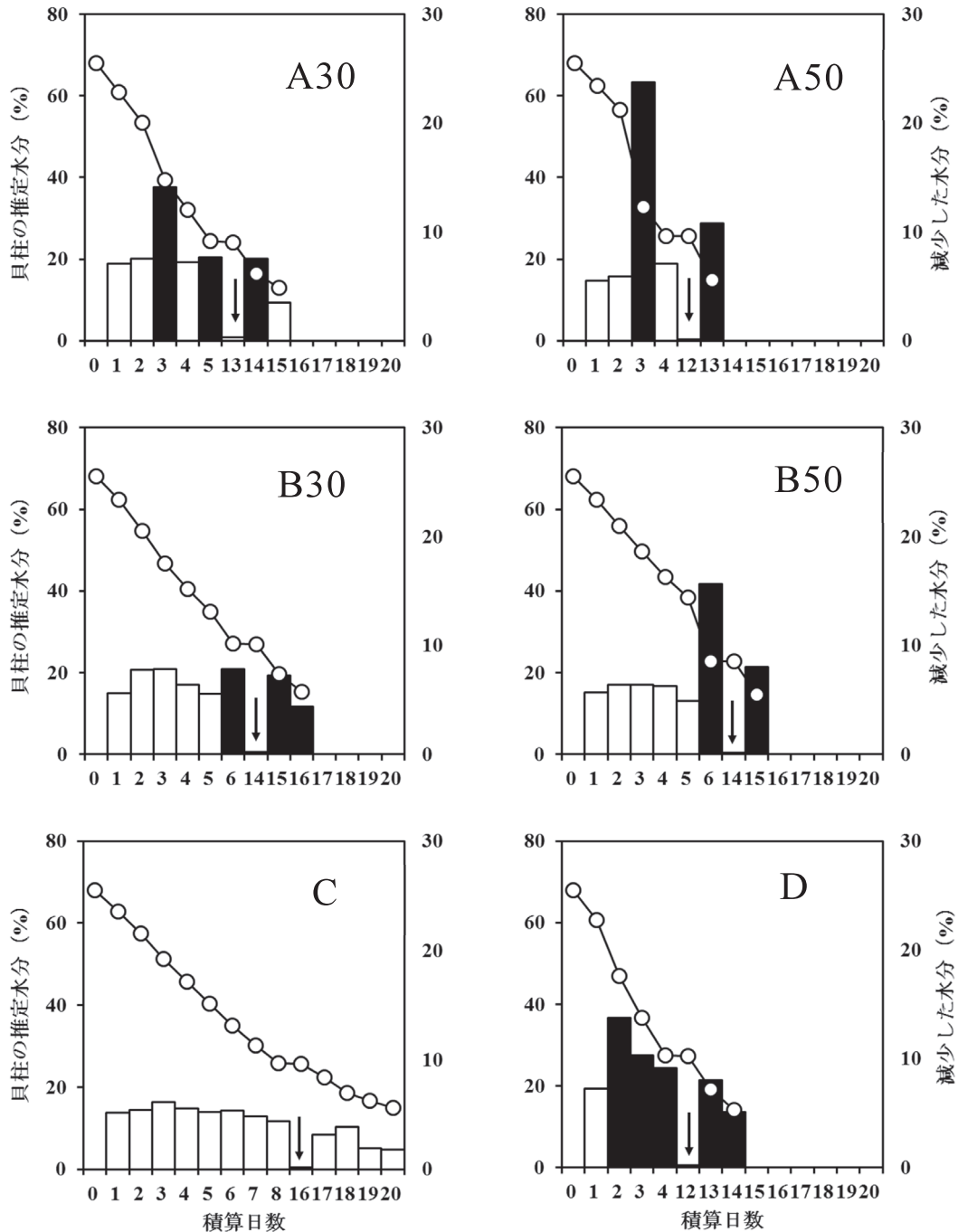


図2. 乾燥方法の違いによる貝柱の水分変化
 試験区および乾燥工程の記号は図1に同じ。○は貝柱の推定水分 (%)
 白いカラムは熱風乾燥，黒いカラムは除湿乾燥により減少した水分 (%)
 矢印はあん蒸を行ったことを示す

の試験区も乾燥初期の容積率は直線的に減少したが、乾燥が進行するにつれて、容積率の減少は緩やかになった。ばい乾前（二番煮熟後）に対する製了後（乾貝柱）の容積率は44.6～57.8%の範囲にあり、A50が最も高く、Cが最も低かった。A50（57.8%）およびA30（52.6%）の容積率は、いずれもB30（49.3%）およびB50（46.3%）より高く、除湿乾燥を用いる段階により、製了後の容積率が異なっていた。

なお、製了後における全試験区分の平均容積率は50.5%であった（図3に破線で示した）。試験区B30、B50、Cの容積率はいずれもこの値より低く、逆に試験区A30、A50、Dはこの値よりも高かった。

亀裂発生 の程度 貝柱の両面に亀裂（写真1の（3））が発生した割合は、22.5～81.3%でA50が最も高く、Cが最も低かった。除湿乾燥を用いた試料区分における両面亀裂の発生割合は、いずれも熱風乾燥のみのCに比

乾貝柱における除湿乾燥

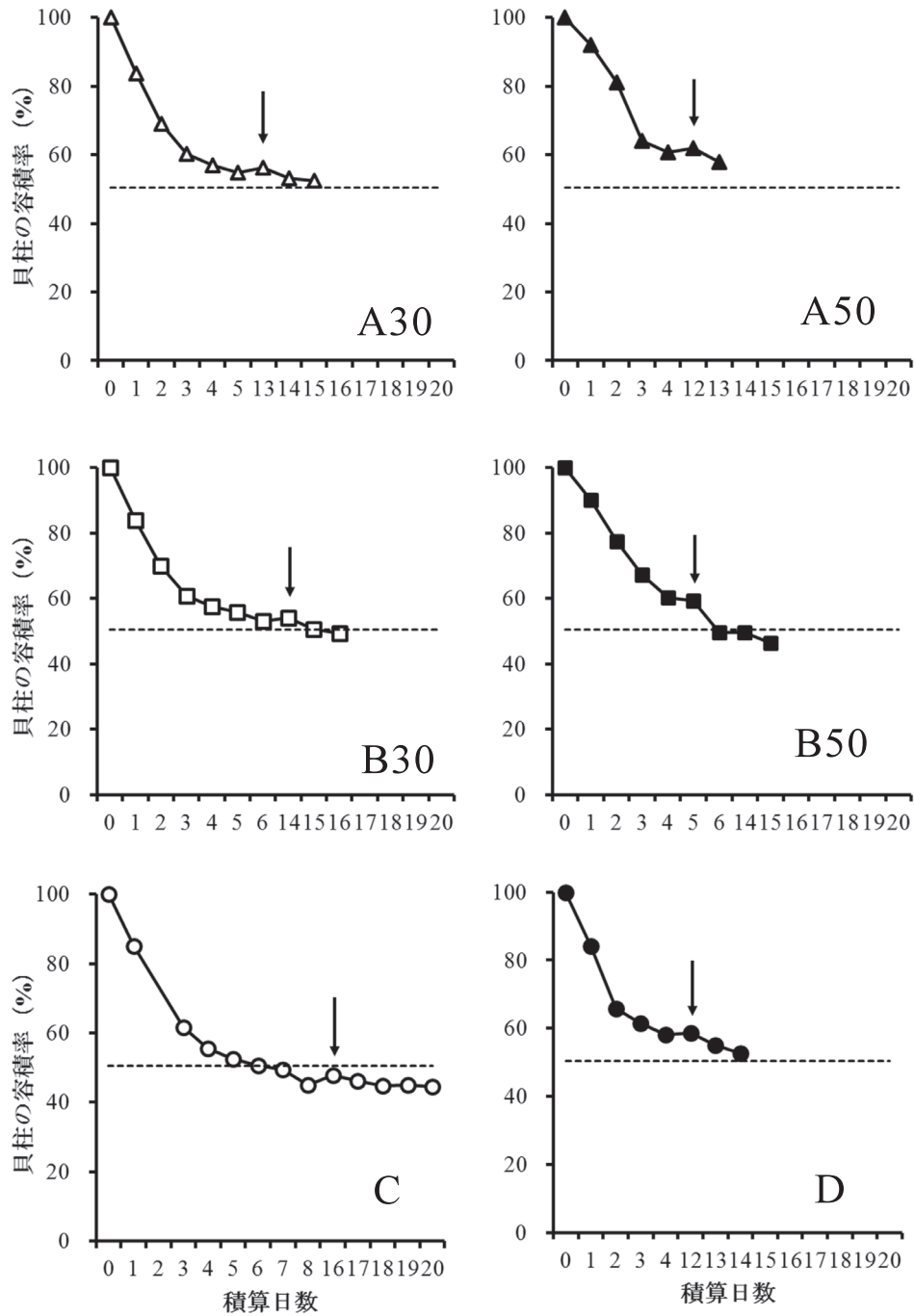


図3. 貝柱の容積率の変化

試験区の記号は図1に同じ

容積率は、ばい乾前（二番煮熟後）に対する体積割合（%）から算出した

各試験区分とも20個体の平均値で示した

破線は製了後における全試験区分の平均容積率を表す

矢印はあん蒸を行ったことを示す

べて高かった。次に、除湿乾燥における温度の影響をみると、A30（53.8%）よりA50（81.3%）が、またB30（48.8%）よりB50（53.8%）が高かった。D（52.5%）はA30（53.8%）とほぼ同じ割合であった（図4）。一方、亀裂なし（写真1の（1））の割合は、0～23.8%でCが最も高く、A50が最も低かった。除湿乾燥における温度

の影響については、A50（6.3%）> A30（0%）、B30（13.8%）> B50（3.8%）で、両面亀裂の発生割合と逆の傾向を示した。また、ばい乾前に対する貝柱の容積率と品質上問題となる両面亀裂の発生割合は、有意な正の相関関係（相関係数 $r=0.844$ ）がみられた（図5）。

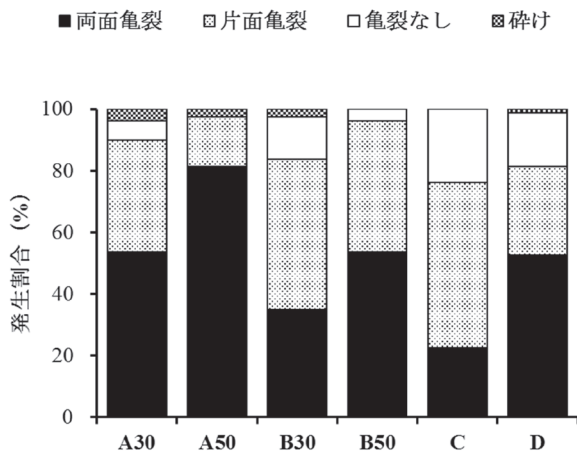


図4. 乾貝柱の亀裂発生割合
試験区分の記号は図1に同じ

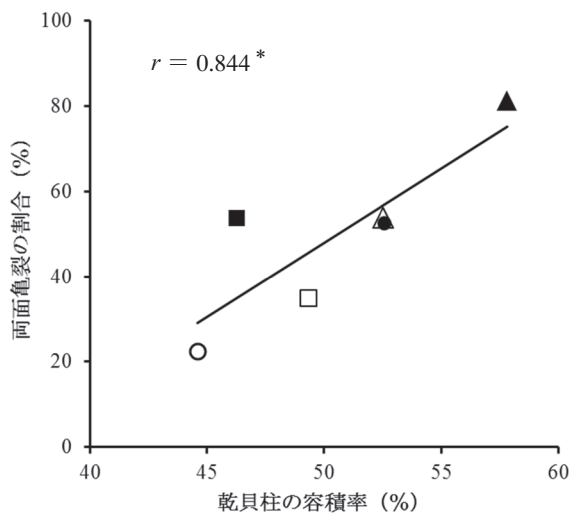


図5. 貝柱の容積率と両面亀裂の割合
図中のシンボルは図1の各試験区分に対応する
△：A30, ▲：A50, □：B30, ■：B50, ○：C, ●：D
 r は相関係数, *：有意に相関関係あり, *pearson's test*, $p < 0.05$

考 察

乾貝柱乾燥の実態 二番煮熟後の貝柱は、3加工場ともばい乾と呼ばれる高温（80～90℃）の乾燥が行われていた（表1、表2、表3）。ばい乾は本来、炭火や電熱を熱源として原料を焙りながら乾燥する工程（鴻巣1998）であるが、現在の乾貝柱製造では、機械乾燥機を用いた高温の熱風乾燥で代用されるのが一般的となっている（今村2005）。このため、乾貝柱の製造におけるばい乾は熱風乾燥の1工程とみることができ（成田2014）。3加工場とも、熱風乾燥は高温（55～80℃）、短時間（50～90分間）で行われ、熱風乾燥と放冷が繰り返して行われていた。このとき、熱風乾燥の温度は乾燥回数の増加につれて徐々に低く設定されていた。貝柱の熱風乾燥がこのような方法で行われている理由として、以下の

ことが推測される。熱風乾燥は加熱した空気を用いて原料（被乾物）を加熱することにより、水の蒸発を促進し、表面の湿った空気の層を取り去って乾燥する方法（川崎2012）であるが、貝柱の乾燥では内部拡散と表面蒸発の2種の異なった現象が関係している。すなわち、貝柱内部に含まれている水分は筋肉組織を通して表面まで湿潤移動（内部拡散）し、表面に達した後に始めて蒸発作用（表面蒸発）が起こる（木村1974）。貝柱の熱風乾燥は乾燥温度が高いことから、内部拡散の速度に比べて表面蒸発の速度が著しく速いことが推測される。このため熱風乾燥を長時間行っても、貝柱表面のみの乾燥にとどまり十分な乾燥効果が得られない。そこで、熱風乾燥を短時間行った後に貝柱を放冷し、水分の内部拡散を図る必要がある。さらに、乾燥がある程度進行した後に、この内部拡散を数日間にわたって行う工程があん蒸である。あん蒸は、乾燥をいったん中止して、乾燥物中における水分の均一化を図るために行われる。高い乾燥度を要する水産加工品などの乾燥工程では欠かせない工程とされる（川崎2012）。また、乾燥回数の増加につれて貝柱水分が低下した状態では内部拡散の速度がさらに低下するため、乾燥温度を徐々に低く設定して表面蒸発と内部拡散の速度差を小さくする必要があると推定される。乾貝柱の製造現場では、熱風乾燥におけるこれらの現象が経験的に理解され、これまでに一定の乾燥方法が確立されていると考えられる。

これに対し、除湿乾燥は庫内の湿度を約30%RHに調節しながら比較的低温（約30℃）で、長時間（4～10時間）の乾燥が行われていた。除湿乾燥は冷凍機によって作られた乾燥空気を用いて乾燥する方法で（木村1974）、乾燥は原料（被乾物）と冷風（乾燥空気）間の水蒸気圧の差によって起こる（川崎2012）。このため、除湿乾燥では貝柱水分の内部拡散を促進しながら徐々に表面水分が除去されており、貝柱表面の緩やかな乾燥と内部拡散が平行して行われている。このことから、除湿乾燥は乾燥とあん蒸が同時に行われる工程と考えることができる。

このような特性から除湿乾燥をどの段階で用いるかは、製造担当者の除湿乾燥に対する考え方により異なってくると考えられる。すなわち、除湿乾燥を熱風乾燥と同様に主たる乾燥方法のひとつとして考えるか、あるいは熱風乾燥の補助的役割として考えるかである。前者であればA加工場のように熱風乾燥と除湿乾燥を交互に使用する方法に近くなり、後者ではB加工場のように熱風乾燥によりある程度乾燥が進行した後に、乾燥とあん蒸を兼ねて乾燥後半に除湿乾燥を用いる方法に近くなると考えられる。いずれにしても、乾燥条件の設定は製品品質との関係が重要であることから、今後、製品品質と関連付けた調査を進めて行く必要がある。

乾燥モデル試験による貝柱の乾燥回数 除湿乾燥を行った試験区は、熱風乾燥のみの試験区Cに比べていずれも乾燥回数が少なかった（図2）。これは、除湿乾燥が熱

風乾燥に比べて乾燥温度は低いものの乾燥時間が長い
ため、結果として乾燥1回当たりの水分減少が大きくなる
ためと考えられる。乾貝柱の加工場では、貝柱を積載し
た台車を製造ロットごとに乾燥機の庫内に出し入れする
作業が行われる。通常、20～50トンの原貝が連日処理
されるため、人手によって複数の台車を頻繁に出し入れ
する必要がある。乾燥回数の減少はこうした作業の軽減
を図る効果がある。

また、除湿乾燥は、どの段階で行うかによって水分の
減少率が異なっていた。比較的水分の高い時期（推定
水分53～57%）に除湿乾燥を行ったA30、A50は、熱
風乾燥によりある程度乾燥が進んだ後（推定水分35～
39%）に除湿乾燥を行ったB30、B50に比べて、同じ乾
燥温度の場合、乾燥1回あたりの水分の減少が大きかつ
た。これらのことから、貝柱水分が比較的高い時期に行
われる除湿乾燥は、乾燥効果が高いことが明らかとなつ
た。

林ら（2006）は40°C、30%RHの条件で貝柱を乾燥し、
その乾燥曲線から、貝柱の乾燥では乾燥開始後、直ちに
減率乾燥期間が始まることを確認している。減率乾燥期
間とは、乾燥初期に乾燥速度が一定である恒率乾燥期
間に対し、乾燥の進行とともに乾燥速度が減少する段階
をいう（木村1984）。本モデル試験においても、除湿乾
燥のみのDは乾燥回数が増加するに従って乾燥1回あた
りの水分減少が小さくなっており、この知見と一致した
結果が得られている。これらのことから、乾燥回数で評
価すれば、貝柱の除湿乾燥は比較的高い減率乾燥期
間の初期段階で行った方が、乾燥回数がより少なくな
り、乾貝柱製造における乾燥作業の効率化を図ることが
可能と考えられる。

貝柱の容積率と亀裂 貝柱の容積は乾燥の進行とともに
減少したが、製了時の容積率は乾燥方法によって異なつ
ていた。除湿乾燥を行った試験区は熱風乾燥のみの試験
区Cに比べ、いずれも製了時の容積率が高かった（図3）。
除湿乾燥は熱風乾燥に比べて低温で行われることから、
乾燥温度が容積率に及ぼす影響がうかがわれた。

また、除湿乾燥を用いる段階によって貝柱の容積率が
異なることは、次のように考えられる。A30およびA50
は比較的水分の高い時期に除湿乾燥を行っており、貝柱
の容積率が比較的高いうちに水分除去が進み製了となつ
た。これに対し、B30およびB50は除湿乾燥を行うま
でに、ばい乾を含む5回の熱風乾燥を経ていることから、
この間A30およびA50に比べ貝柱の収縮が進行し、容
積率が低くなったと推定される。これらのことから、乾
燥回数が少ない程、製了時における貝柱の容積率は大き
くなると考えられる。

容積率と亀裂の関係 除湿乾燥を用いた試験区における
両面亀裂の発生割合は、いずれも熱風乾燥のみのCに
比べて高かった（図4）。また、両面亀裂の割合は、容
積率の大きい試験区ほど高かった（図5）。北海道漁業

協同組合連合会の格付け検査員によれば、両面に亀裂が
発生した乾貝柱は、より下位のランクに等級格付けされ
ることから、除湿乾燥の使用は乾貝柱の品質に影響を与
えることが示唆された。

ホタテガイの貝柱は横紋構造を持つ太さ2～7 μ mの
筋原繊維からなっている。多数の筋原繊維が筋膜に束ね
られて筋繊維となり、さらにこれが十数から数十本束ね
られて筋繊維束を形成している。貝柱の筋繊維束は結合
組織によって束ねられており、貝柱の身割れはこうした
筋繊維束の間から生じるとされている（中村1990）。

本モデル試験における乾燥歩留りは、いずれの区分も
大きな差がみられなかった（図2）。このことから、容
積率が高い貝柱ほど密度が低い状態になっており、貝柱
内部に存在する空隙の割合が高くなっている可能性が考
えられる。

林・鶴田（2006）は熱風乾燥を行った貝柱における筋
繊維組織の変化と水分の移動について、次の2点を指摘
している。第1に貝柱表面に過乾燥が生じ表面近傍の筋
繊維が収縮する。このため、内部から表面へ水分が移動
する流路に閉塞が生じること。第2に貝柱の表面に移動
できなくなった水分は、温度上昇に伴う浸透圧の増大に
より細胞内へ流入し、筋繊維を膨潤させる。このため筋
繊維の隙間が閉塞し、水分の移動がさらに阻害されるこ
との2点である。これらのことから、熱風乾燥に比べて
乾燥温度が低い除湿乾燥は、筋繊維の収縮が抑えられる
とともに筋繊維の膨潤が抑制され、長時間の乾燥による
水分の連続的な移動を可能にしている一方で、筋繊維間
に空隙が生じやすくなっていることが推測される。

相馬ら（2004）は青果物の乾燥において、乾燥の進行
とともに試料内部の空気相の体積割合すなわち空隙率が
増加することを確認している。本研究においては、乾燥
中の貝柱における容積の測定にとどまり、密度や空隙率
の変化については検討に至っていない。今後、これらにつ
いても詳細な調査を行って、亀裂発生との関連を精査す
る必要がある。

亀裂発生を抑制する除湿乾燥の条件 以上より、乾貝柱
の製造における除湿乾燥の特性として、高い乾燥効果に
ともなう乾燥回数の短縮化が可能であることがわかつた。
また、除湿乾燥は長時間の連続乾燥が可能であること
から、頻繁に台車の出し入れを必要とする熱風乾燥に
比べて、作業の軽減化を図るメリットが期待できる。こ
のため、人手不足が指摘されている乾貝柱の製造現場で
は、今後、除湿乾燥の導入がさらに進むことが予想され
る。しかし、その一方で除湿乾燥は亀裂発生による品質
の低下要因となることが明らかとなった。この傾向は
乾燥温度の高い50°Cで顕著であった。また、ばい乾の
後、除湿乾燥のみで製造した貝柱は、亀裂の発生が特に
著しかった。貝柱に発生する亀裂が目立ってくるのは、
ある程度乾燥が進行した段階と思われるため、除湿乾燥
機の使用にあたっては、乾燥初期の段階から予め亀裂発

生を抑制する方策を考慮しておく必要がある。このためには、除湿乾燥が貝柱の亀裂発生に与える影響を理解した上で、高温での運転を避け、熱風乾燥と併用することが望ましい。その際は、「前半熱風乾燥、後半除湿乾燥」方式で乾燥を行うほうが、亀裂発生をより抑制できると考えられる。除湿乾燥を用いた効率的な乾燥に関する研究は、これまで主に農産物を対象として行われており、乾燥モデルの数式化や品質との関係が多く報告されている(田原迫ら1988, 田原迫ら1990, 魏ら1993, 韓ら1995)。今後、貝柱についても詳細な検討を行って、乾燥効率と品質向上両立が可能な乾燥条件を明らかにしていく必要がある。

謝 辞

本研究に際しては、乾貝柱の製造および品質評価に関わる多くの方々に多大なご協力をいただいた。紋別漁業協同組合および猿払村漁業協同組合の乾貝柱担当者および委託加工場の方々には、乾貝柱製造に関する詳細な情報を賜った。また、北海道漁業協同組合連合会の羽崎亨氏を始めとする格付け検査員の方々には、乾貝柱の品質に関する貴重な情報を賜った。ここに深謝する。本研究は北海道ホタテ漁業振興協会の委託事業である「乾貝柱の品質データベースの作成と製造技術の高度化」の中で行った。

文 献

- 魏 長楽・守田和夫・田原迫昭爾・李 振邦・林 純男(1993) ソバの乾燥と品質(第2報) 常温除湿乾燥法によるソバの乾燥. 農業機械学会誌, **55**, 57-65.
- 長谷川健二(1993) 北海道漁連のホタテ貝共同出荷と系統販売: 漁連系統組織とマーケティングに関する考察. 三重大学生物資源学部紀要, **11**, 97-104.
- 林 伊久・鶴田隆治(2006) 海産物の乾燥過程における内部輸送抵抗の評価. 日本機械学会論文集, **72**, 2249-2255.
- 林 伊久・鶴田隆治・谷川洋文(2006) 海産物の温風における熱・物質伝達. 日本機械学会論文集, **72**, 723-729.
- 北海道ほたて流通食品協会(2011) ほたて加工必携ハンドブック(平成22年度改訂版). 北海道ぎょれん, 札幌, 192p.
- 今村琢磨(2005) 干しほたて貝柱. 「全国水産加工品総覧」, 光琳, 東京, 93-96p.

- 今村琢磨・坂本正勝(1986) ホタテ白干しの褐変について. 北水試月報, **43**, 63-73.
- 韓 東海・安部武美・疋田慶夫・鶴崎 孝(1995) ヒートポンプによる椎茸の除湿乾燥. 農業機械学会誌, **57**, 29-36.
- 川崎賢一(2012) 最新水産ハンドブック. 講談社, 東京, p.457-459.
- 木村 進(1974) 食品の乾燥の原理. 「乾燥食品」, 光琳書院, 東京, 11-19p.
- 木村 進(1984) 食品乾燥の基礎. 「乾燥食品事典」, 朝倉書店, 東京, 24-27p.
- 鴻巣章二(1998) 水産学用語辞典. 恒星社厚生閣, 東京, p.8-9.
- 中村全良(1990) 北の水産加工事典. 北日本海洋センター, 札幌, 116-117p.
- 中村全良・一杉哲郎(1982) 2. 水産乾製品に生成する白粉について. 昭和56年度網走水産試験場事業報告書, 249-261.
- 成田正直(2000) 乾ほたて貝柱の湿度制御乾燥技術の開発. 北水試だより, **50**, 10-11.
- 成田正直(2014) 干し貝柱. 「干物の機能と科学」, 朝倉書店, 東京, 151-156p.
- 成田正直・木村 稔・今村琢磨・福士曉彦・高橋玄夫(1998) 6. 乾ほたて貝柱品質向上試験. 平成9年度網走水産試験場事業報告書, 298-302.
- 成田正直・阪本正博・秋野雅樹・武田忠明・今村琢磨・飯田訓之(2011) ホタテガイを用いたフレーク及び飯寿司の開発について. 日本食品科学工学会誌, **58**, 277-283.
- 野俣 洋・福士曉彦・金子博実・木村 稔・西 紘平(1996) 2. 1 乾ほたて貝柱製造工程短縮化技術の開発. 平成6年度網走水産試験場事業報告書, 285-290.
- 坂本正勝・今村琢磨・相沢 悟(1984) 3. ホタテ白干し(煮干し貝柱) 品質向上試験. 昭和58年度稚内水産試験場事業報告書, 209-244.
- 相馬真哉・田川彰男・飯本光雄(2004) 乾燥工程における青果物の構造的な特性の変化. 日本食品科学工学会誌, **51**, 577-584.
- 田原迫昭爾・繆治煉・林純男・吉原国彦・朝隈寛治(1988) 常温, 除湿空気による穀類の通気乾燥. 農業施設, **18**, 23-33.
- 田原迫昭爾・守田和夫・魏 長楽・林 純男(1990) ビニールハウス内における切干し大根の除湿乾燥(1) 乾燥効率とハウスの効果. 農業施設, **21**, 95-101.
- 武田忠明・野俣 洋・木村 稔・金子博実・西 紘平・松沢治幸・平野英春・柴田悦郎・多田真前(1995) 7. 乾ほたて貝柱品質向上試験. 平成5年度網走水産試験場事業報告書, 248-254.
- Yamazaki M(2013) Browning Reaction in the Production of the Boiled-dried Adductor Muscle of Scallop (shiraboshi), *Food Preservation Science*, **39**, 137-142.