

マイクロ波加熱を用いた高効率製塩プロセスの検証

仲川 晃平

福井大学遠赤外領域開発研究センター

概要

本研究は、従来の製塩法における加熱工程のエネルギー効率の低さという課題に対し、マイクロ波加熱技術を導入することで、省エネルギーかつ効率的な塩の製造を実現する可能性を検討したものである。日本では古来より海水を原料とした塩の製造が行われてきたが、その多くは加熱を伴う工程であり、大量の水を蒸発させる必要から多くのエネルギー消費を伴ってきた。特に小規模製塩や地域資源活用型の製塩においては、環境負荷や持続可能性の面で課題が残されている。

本研究では、マイクロ波加熱がもつ内部からの加熱機構や高いエネルギー集中性に着目し、実際の海水や食塩水を用いた加熱実験を行った。その結果、食塩水では塩分濃度が高くなるにつれて沸騰までに要する時間は増加する一方、同濃度の海水ではより早く加熱される傾向が明らかとなった。これは、海水に含まれるカリウムやカルシウムなどのミネラル成分が誘電特性に影響し、より均一な加熱が可能となるためと考えられる。従って、マイクロ波侵入深さなどの観点から困難だと考えられていたマイクロ波加熱による製塩の実現可能性を見出すことができた。

さらに、減圧条件下でマイクロ波加熱を行い、海水から塩結晶を析出させる実験も実施した。その結果、マイクロ波と同じ電気加熱であるマントルヒーターと比較し、消費エネルギー量が同等であるにもかかわらず、出力制御により加熱時間の大幅な短縮が可能であることが示された。また、得られた塩結晶を電子顕微鏡およびエネルギー分散型 X 線分析で評価したところ、マイクロ波加熱によって得られた結晶は、市販の海水由来食塩と類似した成分および形状を示した。特に、Mg(にがり成分)の含有量は市販塩に近く、風味の点でも優位性があると考えられる。本研究の成果は、エネルギー資源が限られた環境下における塩の自給自足や、小規模製塩事業への応用が期待される。今後は加熱装置の最適化、プロセス制御技術の高度化、再生可能エネルギーとの組み合わせによる応用展開などを通じ、持続可能な製塩モデルの構築を目指す。

1. 研究目的

塩(塩化ナトリウム)は、人類の文明において極めて重要な役割を果たしてきた無機物質の一つである。古代においては、保存料として食料の長期保存を可能にし、また貨幣や交易品としても重宝された。現在でも塩は、食品加工のほか医療、化学工業、農業など多様な分野で利用されており、人間社会にとって不可欠な資源となっている。中でも食塩は、人体の電解質バランスを維持するうえで欠かせない栄養素であり、安定した供給と安全な製造が求められている。

日本においては、国土の多くが海に囲まれている地理的条件を活かし、古くから海水を原料とする塩の生産が行われてきた。伝統的には「揚浜式」や「入浜式」と呼ばれる方法により、海水を天日で濃縮したのち煮詰めて塩を得る製法が主流であり、これらは江戸時代を通じて各地で発展してきた。現代では、イオン交換膜法や真空蒸発法、逆浸透膜法などの近代的な製塩技術が普及し、大量生産が可能となったが、一部の小規模事業者や地域資源を活かした地場産業、教育・研究機関においては、

依然として海水を加熱・蒸発させる単純な方法が用いられている。

こうした伝統的または簡易的な製塩法に共通する課題は、加熱工程におけるエネルギー効率の低さである。海水中の塩分濃度は約 3.5%前後であり、残りの約 96.5%は水分であるため、塩を得るためには大量の水を蒸発させる必要がある。従来の直火加熱や電気ヒーターによる煮詰め作業は、多くの時間とエネルギーを要し、環境負荷の観点からも持続可能性に課題を抱えている。特に、近年のカーボンニュートラル化の流れや、エネルギー価格の高騰、再生可能エネルギーの活用促進といった社会的背景から、従来手法の見直しと新たな加熱方法の導入が強く求められている。

そのような中で、本研究ではマイクロ波加熱に着目した。マイクロ波加熱は、従来の外部加熱とは異なり、電磁波によって物質内部に直接エネルギーを与えることができる加熱方式である。Fig. 1 に示すように、水分子の双極子が電界内でその変化に応じて高速で振動し、その際に発生する誘電損失によって発熱する仕組みであるため、急速加熱、対象物全体を均一に温める均一加熱が可能である。また、エネルギー効率が高く、必要な部分のみに加熱を集中させることができる選択加熱となるため、材料合成、固体試料の焼結といったことのほかにも^{1,2)}、調理・乾燥・殺菌・融解など様々な応用が期待されている。

マイクロ波加熱は、すでに食品業界においては調理器具(電子レンジ)として一般に広く普及しており、近年では産業用途としても活用が進んでいる。たとえば、食品の乾燥や、廃棄物の減容処理、高分子材料の加工といった、加熱を伴う各種プロセスへの適用が報告されている³⁻⁶⁾。

塩分を含んだ塩水のマイクロ波加熱においては、食品調理だけではなく、海水の淡水化や、界面改質への応用などいくつかの分野での報告例がある⁷⁻⁹⁾。塩水は純水と比べ誘電率が高く、マイクロ波をよく吸収することで、マイクロ波が内部まで侵入できず、表面付近での加熱に限定されてしまう。また、温度が上昇することによってさらにマイクロ波侵入長が短くなることが知られており⁹⁾、マイクロ波加熱でのエネルギー効率は高くないとされることが多い。そのため、海水を加熱して塩を析出させるというプロセスへの応用はほとんど研究されていないが、これら実施例の多くは純水に塩化ナトリウム(NaCl)を加えた疑似的な海水を用いており、実際の海水に対してマイクロ波加熱を試みた例はほとんど知られていない。

本研究では、海水をマイクロ波加熱により効率的に蒸発・濃縮させ、塩を析出させるプロセスについて基礎的な検討を行う。海水には多くのミネラルも含まれており、純水と誘電特性が異なることで、マイクロ波加熱挙動に影響を与えている可能性もある。そこで、純水、食塩水、海水において複数の塩分濃度においてマイクロ波加熱を行い、塩の析出可能性について評価する。また、減圧蒸留法による低温での塩結晶の析出をマイクロ波加熱、ヒーター加熱の両方で行い、それぞれのエネルギー効率について求める。その際得られた塩の結晶は、市販の海水由来食塩と成分、結晶形状を比較し、評価することで、その有効性と課題を明らかにすることを目的とする。

これらより得られる知見は、小規模な塩製造事業への技術転用や、災害時・離島など限られたエネルギー資源下における塩の自給自足、さらには海洋資源の持続的利用といった観点からも社会的意義があると考えられる。

2. 研究方法

2.1 使用原料

使用する海水は、福井県越前海岸で製塩を行っている“越前海岸 志野製塩所”より、海水をろ過した試料(塩分濃度3%)、飽和状態まで水分を蒸発させた試料(塩分濃度28%)の2種類を提供いただいた。比較対象である食塩水は、蒸留水に食卓塩(公益財団法人塩事業センター製)を溶解させることにより作製した。塩分濃度として、0%、3%、25%とした。

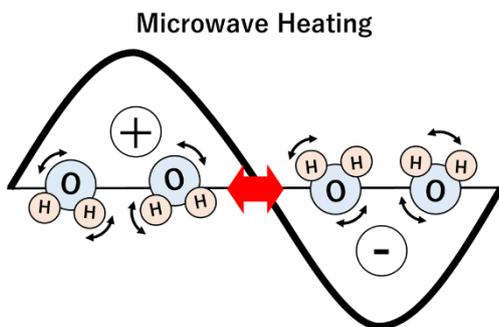


Fig. 1 Principle of microwave heating.



Fig. 2. Multimode microwave heating system.

2. 2 マイクロ波加熱

マイクロ波加熱には、一般的な電子レンジと同じ周波数 2.45 GHz である μ Reactor Ex (四国計測工業株式会社製、最大出力 1000 W) を用いた (Fig. 2)。加熱対象として、食塩水 (塩分濃度 0, 3, 25%) ならびに海水 (塩分濃度 3, 28%) を 500 ml ずつビーカーに入れ、庫内に設置した。温度は光ファイバー温度計 (安立計器株式会社製) をビーカー中央付近に設置して測定するとともに、マイクロ波加熱によって生じる温度分布について評価するため、全体の表面温度をサーモカメラ (日本アビオニクス社製) によって撮影した。マイクロ波照射開始後、試料が沸騰し、温度が一定になるまで加熱を続け、その段階で停止した。

2. 3 マイクロ波減圧蒸留法

塩の結晶析出を促進するためにマイクロ波照射を行い、より低温で沸騰し、加熱時間の短縮が見込める減圧蒸留法を用いて実験を行った。Fig. 3 にマイクロ波加熱装置を加熱源として使用したマイクロ波減圧蒸留システムを示す。結晶析出を目的とするため、加熱対象にはすでに飽和状態となっている海水 (塩分濃度 28%) を選択した。加熱の際には 1000 ml の海水をセパラブルフラスコに投入し、容器内圧力を 213 hPa まで減圧した状態で開始した。これは、純水でおおよそ 60°C 付近で沸騰が確認できる圧力である。マイクロ波は 400~1000 W の一定出力を照射し、温度は光ファイバー温度計 (安立計器株式会社製) によって測定した。加熱開始後、蒸留によって得られた蒸留水が、おおよそ 350 ml になった段階でマイクロ波照射を停止した。得られた塩結晶は簡易的に脱水したのち、室温で乾燥させた。電気加熱の比較対象として加熱源をマントルヒーターにした場合でも同様に実験を行った。



Fig. 3. Microwave vacuum distillation system.

2. 4 塩結晶の評価方法

塩結晶の形状を調査するため、電界放出型走査電子顕微鏡 (FE-SEM) にて観察を行った。また、装置に付属しているエネルギー分散型 X 線分析装置 (EDX) を用い、結晶の構成成分比並びに元素マッピングデータを測定した。対象試料として市販の海水由来食塩、マイクロ波加熱により得られた塩結晶、マントルヒーター加熱について得られた塩結晶を選択し、それぞれの結果について比較することで、その有用性について検討した。

3. 研究結果

3. 1 塩水のマイクロ波加熱挙動

食塩水、海水に対し、マイクロ波加熱装置を用いて加熱実験を行った。Fig. 4 に、食塩水 (塩分濃度 0, 3, 25%) のマイクロ波加熱挙動を示す。食塩を加えていない蒸留水の場合、500 W のマイクロ波照射開始後おおよそ 8 min で 100°C 付近に到達し、沸騰し始めた。一方で、塩分濃度 3% の食塩水では沸騰まで 10 min、塩分濃度 25% の食塩水では沸騰までに 20 min の時間を要した。この際、沸点は塩分濃度の増加に伴って上昇しており、25% では 108°C で沸騰し始めている。以上の結果より、塩分濃度の増加に伴い、同様の出力でマイクロ波照射しているにもかかわらず、沸騰までにかかる時間が大幅に変化することが判明した。

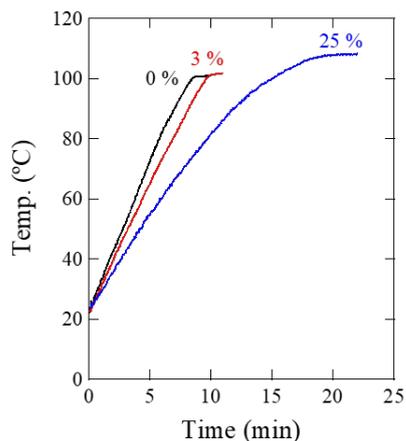


Fig. 4. Microwave heating behavior of salt water.

次に、海水(塩分濃度 3, 28%)のマイクロ波加熱挙動を Fig. 5 に示す。塩分濃度 3%の場合、その加熱挙動は食塩水の結果とほぼ変化が見られず、およそ 10 min で沸騰を開始した。一方で、塩分濃度 28%の場合、温度の上昇曲線は塩分濃度 3%とほぼ変わらないという結果となった。沸点は 109°Cで、加熱開始後 13 min 後に到達していることがわかる。したがって、近い塩分濃度である場合、食塩を加えて作製した食塩水よりも、海水の方がより早くマイクロ波照射によって加熱されることが明らかとなった。

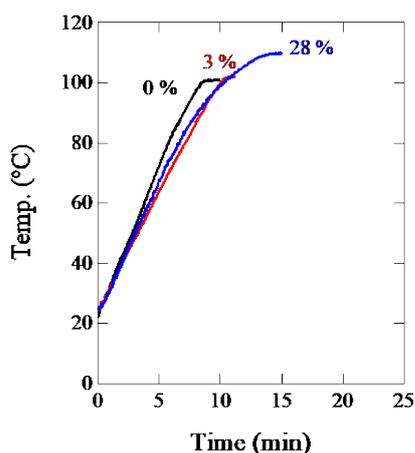


Fig. 5. Microwave heating behavior of Sea water.

その原因について検討するため、蒸留水(塩分濃度 0%), 食塩水(塩分濃度 28%), 海水(塩分濃度 28%)が 40°C 付近まで加熱された際の表面温度をサーモカメラで撮影した結果について Fig. 6 に示す。蒸留水では、側面からの画像から、対流によって上部で 46°C、下部で 37°C と緩やかな温度勾配が形成されているが、その差は 10°C 以下程度であった。また、上方向から見た画像においても、容器壁面と中心部での温度はほぼ等しいことがわかる。一方で、塩分濃度 28%食塩水では、側面画像から大きな温度勾配が発生している様子が見られる。上部は最大 62.3°Cまで到達しているが、下部では 39°Cまでしか加熱されておらず、その差は 20°C以上と非常に大きい。また、上方向画像から、壁面付近では最大 61.9°Cとなる一方、中心部では 53.1°Cを示しており、容器壁面と中心部でも温度差が発生していることがわかる。以上より、高い塩分濃度の食塩水は、マイクロ波照射によって均一に加熱されるのではなく、壁面付近がより集中して加熱されることで、大きな温度勾配が発生してしまうことが判明した。このことは、NaCl 濃度によりマイクロ波侵入長が著しく短くなり、表面より数 mm 程度しか加熱されないとする先行研究での計算結果に即したものであるといえる。

海水試料は塩分濃度 28%であり、食塩水と同等であるが、表面温度の傾向は大きく異なる結果となった。側面画像より、上部は最大で 55.5°C、下部は 39.3°Cであることがわかり、その温度差は 15°C程度に抑えられている。また、上方向画像においても壁面部と中心部での温度差は数°C程度であり、ほぼ均一に温度上昇しているといえる。したがって、海水では食塩を加えて作製した食塩水とは違い、マイクロ波照射による壁面部での集中した加熱が起きにくく、比較的均一に温度が上昇するため、より短い時間で沸点への到達が可能となると考えられる。この要因の一つとして、海水には NaCl だけでなく、カリウムやカルシウムといった多くのミネラル分を含んでいることが挙げられる。これらミネラル分の存在により、誘電特性が食塩水と異なることで、より内部までマイクロ波が侵入するようになり、均一加熱が可能となっている可能性がある。

したがって、海水をマイクロ波加熱し、蒸発させることで塩分濃度が増加しても、その加熱挙動は大きく変化することはないことから、製塩プロセスにおいても安定した制御が可能であることが示された。

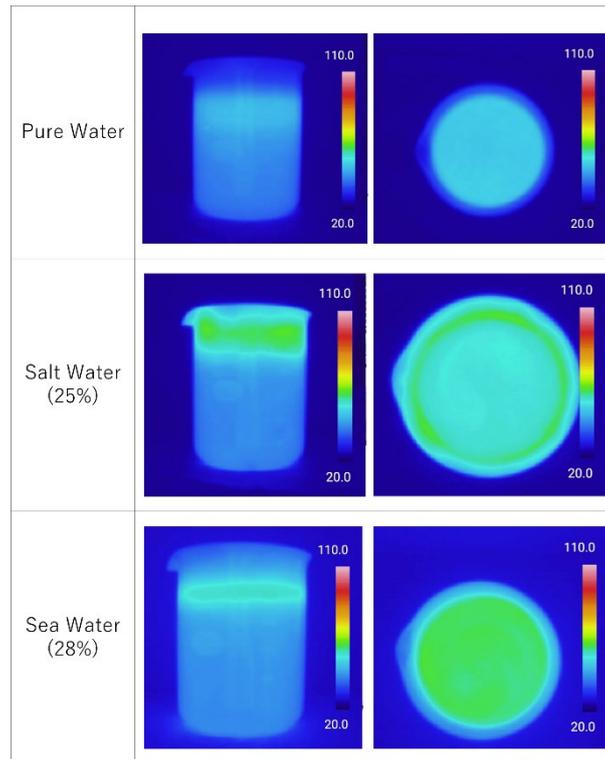


Fig. 6. Surface temperature distribution on each sample after microwave heating to 40°C.

3.2 マイクロ波減圧蒸留法による海水からの結晶析出

実際に海水をマイクロ波加熱することで塩の結晶析出が可能かどうか検証するため、マイクロ波減圧蒸留システムを用いて実験を行った。比較のため、加熱源をマントルヒーターとした電気加熱でも同様の実験を行った。Fig. 7 は、マイクロ波減圧蒸留を行った結果一定量蒸留水が採取でき、加熱を停止したのちの容器の画像である。容器内には多くの結晶が析出している様子が見られ、その重量も塩分濃度から計算できる塩結晶の析出量とほぼ一致したため、マイクロ波照射による加熱においても、従来法と同様に塩結晶の析出が可能であることを示せた。

それぞれの加熱源における到達温度、必要な所要時間、消費エネルギー量について Table 1 に記載した。それぞれの最高温度はマントルヒーターで 63.1°Cであったのに対して、マイクロ波では出力 400 W の時 72°Cとなり、出力の増加によって 86.4°Cまで上昇した。容器圧力から予想される沸点は 60°C付近であったため、マイクロ波加熱ではそれよりも温度が上昇している結果となった。これは、試料内に照射されたマイクロ波が過集中してしまうためにホットスポットができるため、又はマントルヒーターよりも瞬間的に加熱され、時間当たりに発生する水

蒸気量が多くなることで、表面付近の圧力が上昇し、沸点が変化したためといった原因が考えられるが、詳細については検討中である。所要加熱時間については、マントルヒーターでは 60 min 程度であったのに対し、400 W マイクロ波出力では 69 min 必要であった。急速加熱が特徴であるマイクロ波加熱で、多く時間がかかった原因としては、マイクロ波侵入長の短さが考えられる。食塩水よりも影響は少ないと考えられるが、純水と比較すれば若干表層のみでの加熱となったことで、外部から熱を加えるマントルヒーターと同等の結果となってしまった可能性がある。一方で、出力を 600 W、1000 W まで上昇することで、所要時間は 1/2 以下の 25 min 程度まで減少させることに成功した。これらの消費エネルギー量はおおよそ 400 Wh でほぼ変化がないため、電気加熱による製塩の実用化を検討する際には、より短い時間で塩結晶の製造が終了するマイクロ波加熱が適していると考えられる。

以上の結果は、製塩プロセスの電化を検討する際、エネルギー効率の改善という観点においてマイクロ波加熱が候補になることを示している。

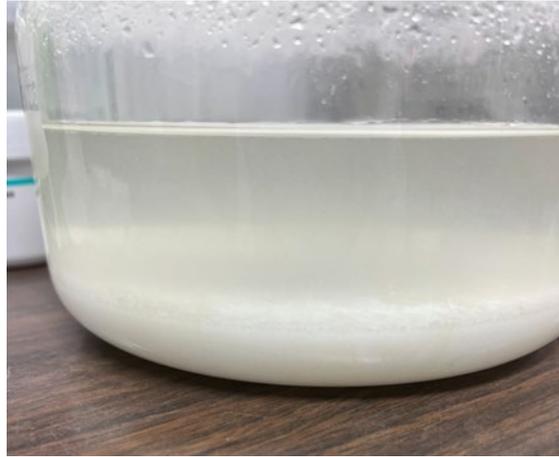


Fig. 7 Salt crystals precipitated from seawater by microwave vacuum distillation method.

Table 1 Max temperature, processing time, and energy consumption of different heating sources for salt crystallization by microwave vacuum distillation method.

	Microwave			Mantle Heater
	400 W	600 W	1000 W	
Max Temp. (°C)	72	83.8	86.4	63.1
Heating Time (min)	69	38	25	61
Average Power (W)	399.8	595.7	997.6	402.9
Power Consumption (Wh)	458.8	377.3	422.6	407.0

3. 3 得られた塩結晶の評価

マントルヒーター加熱、マイクロ波加熱で得られた塩結晶について、走査型顕微鏡(FE-SEM), ならびにエネルギー分散型 X 線分析装置(EDX)での測定を行った。また、比較対象として市販の海水由来食塩も同様に測定した。**Table 2** に、それぞれの試料における成分比の結果をまとめた。どの結果でも主成分である Na, Cl について、にがり成分である Mg が多く含まれていることがわかる。

Mg の含有率は市販塩が 7.3%であり、マイクロ波加熱では 8.0%であるのに対し、マントルヒーターでは 13.3%と、ほか2種類と比較して高い結果となった。Mg は苦みを感じる成分であり¹⁰⁾、塩の風味を大きく作用する要因の一つであるため、マントルヒーター加熱よりもマイクロ波加熱で得られた塩結晶の方が、より市販品に近い風味であるといえる。

Table 2 EDX results of each salt crystal precipitated from sea water.

at. %	Common Salt	Microwave	Mantle Heater
Na	43.70	40.40	28.60
Cl	47.86	49.50	49.60
Mg	7.33	8.04	13.32
Other	1.11	2.06	8.47

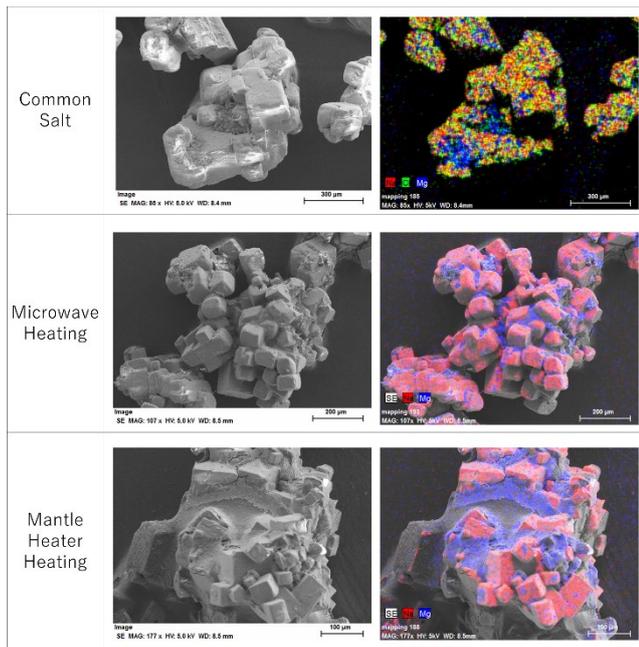


Fig. 8 SEM and EDX images of each salt crystal.

Fig. 8 に、それぞれの結晶をSEMで撮影した画像と、構成元素のマッピングデータ画像を示す。市販塩では、NaCl結晶は複数凝集している様子が見られた。結晶の各辺は鋭角ではなく、丸みを帯びており、これは海水を緩やかに蒸発させる際、緩やかに攪拌する工程を行うことによって立方体の角が取れていった結果だと考えられる。味覚上では結晶形状が丸みを帯びることで比表面積が減少し、舌で溶けだす速度が低下するため、よりまろやかに感じるとされており、豊かな風味を生み出す要因の一つと言える¹¹⁾。また、結晶間やその周辺には明確な結晶形状が見られない付着物が存在している。マッピングデータより、この付着物は主成分がMgであり、NaCl粒間に残存したにがり成分であると考えられる。

マイクロ波加熱により得られた塩結晶では、市販塩と比較してより小さいNaCl結晶が凝集していることがわかる。その角は市販品と同様に丸みを帯びており、食塩として適しているといえる。マイクロ波加熱中は外部から熱が加わるのではなく、内部の物質自体が発熱するため、NaCl結晶は溶液中で誕生し、成長することとなる。そのため、多くの小さな結晶粒が誕生し、漂いながら成長するなかで角が取れ、丸みを帯びて凝集することが、攪拌をしていないにもかかわらず従来法と似通った形状となった要因であるといえる。また、マッピングデータから市販塩

と同様に結晶粒間にMgがわずかに分布していることがわかる。溶液中を漂いながら凝集するため、その粒間ににがり成分をわずかに含んだまま析出していることが示されている。

最後に、マントルヒーター加熱で得られた塩結晶では、上記2つの場合と異なり、鋭角な立方形状であるNaCl結晶が凝集している結果となった。味覚の上では鋭角なNaCl結晶は舌との接触面積が小さいことで塩味をより感じるようになることとされており、風味への影響が出ている可能性がある。このような結晶形状となった要因として、マントルヒーター加熱では外部から熱を加えるため、壁面が最も温度が高く、その表面から塩結晶が析出していることが挙げられる。マイクロ波加熱と同様にマントルヒーター加熱でも攪拌していないため、析出したNaCl結晶はその場で成長を続け、角が取れることもなく、鋭角な形状を保つことができている。また、マッピングデータより、多くのMgが付着物として残存してくることが示された。こちらも同様に壁面に堆積したにがり成分を多く吸着してしまったためだと考えられる。

以上の結果から、マイクロ波加熱で得られた塩結晶の方は、市販塩の結晶形状、成分に類似していることが明らかになった。より短時間、低エネルギー消費ながらも従来法と同等の食塩を製造できる可能性があり、製塩プロセスにおける代替法としての有用性を示すことができた。

4. 考察

本研究では、マイクロ波加熱による海水の蒸発と塩の析出について基礎的検討を行い、加熱特性や結晶の形状・成分に関して知見を得てきた。これまで、NaClを含んだ塩水では、マイクロ波侵入深さが著しく短くなるため全体的な加熱は困難であるとされており、具体的な調査はなされてこなかった。

実際に、食塩を添加することで塩分濃度を飽和状態直前まで高くした食塩水に対し、マイクロ波加熱を試みた結果、沸騰までに純水の2倍以上の時間を必要とした。一方で、同様に塩分濃度を飽和状態付近まで高くした海水では、マイクロ波加熱によって純水とほぼ変わらない温度上昇挙動を示した。このことから、海水中に含まれる多様なミネラルが誘電特性に影響を及ぼすことで、比較的均一な加熱が可能となり、同濃度の食塩水と比

較して短時間で沸騰に到達する可能性が示された。特に高濃度海水において、マイクロ波の均一な伝播により温度分布が安定し、エネルギー効率の向上が期待できることが明らかとなった。

また、実際の製塩プロセスの電化に向け行った減圧条件下での加熱において、同様に電気加熱であるマントルヒーターを用いる場合とほぼ同じ消費電力量ながら、加熱時間の短縮が可能であることが示せた。また、この際にマイクロ波加熱によって得られた塩結晶は、市販塩と類似した構成成分および形状を示した。これらは塩の風味、味に大きく影響を与える要素であり、市販塩の特徴をマイクロ波加熱でも再現できることは、従来加熱法の代替法として用いることができる可能性を示唆している。

これらの結果は、マイクロ波加熱が塩の製造プロセスにおいて有効な手法である可能性を示唆しており、特に小規模事業者やエネルギー制約下における製塩において高い有用性を有すると考えられる。

5. 今後の課題

本研究ではマイクロ波加熱による基礎的な挙動と塩の析出性について検討を行ったが、実用化に向けては検討が必要である。特に、装置構造の最適化や出力制御による加熱均一性の向上、結晶化速度や結晶の純度制御など、製品品質の安定化に向けたプロセス制御技術の確立が求められる。また、他の加熱方式とのエネルギー収支比較、ならびにスケールアップ時の効率性や安全性評価も重要な課題である。今後は、持続可能な資源利用の観点から、自然エネルギーと組み合わせた加熱方式の導入や、地域資源を活用した分散型塩製造モデルの構築も視野に入れ、応用可能性を広げていく必要がある。

6. 文献

1. C. Oliver Kappe, Controlled Microwave Heating in Modern Organic Synthesis, *Angew. Chem. Int. Ed.*, 43, (2004) 6250.
2. R. Roy, D. Agrawal, J. Cheng, S. Gedevarishvili, Full sintering of powdered-metal bodies in a microwave field, *nature*, 399, (1999) 668.
3. S. Chandrasekaran, S. Ramanathan, Tanmay Basak, Microwave food processing—A review, *Food Res. Int.*, 52, (2013) 243.
4. D. Wray, H. S. Ramaswamy, Novel Concepts in Microwave Drying of Foods, *Drying Technology*, 33, (2015) 769
5. X. Jie, W. Li, D. Slocombe, Y. Gao, I. Banerjee, S. Gonzalez-Cortes, B. Yao, H. AlMegren, S. Alshihri, J. Dilworth, J. Thomas, T. Xiao, P. Edwards, Microwave-initiated catalytic deconstruction of plastic waste into hydrogen and high-value carbons, *Nat. Catal.*, 3, (2020) 902.
6. T.J. Appleton, R.I. Colder, S.W. Kingman, I.S. Lowndes, A.G. Read, Microwave technology for energy-efficient processing of waste, *Appl. Energy*, 81, (2005) 85.
7. Keiko NAKAMURA, Effect of Sodium Chloride on the Sample Temperature and Absorbed Energy during Microwave Cooking, *J Home Econ JPN*, 2003; 54: 351-356.
8. S. Roy, M. S. Humoud, W. Intrchom, S. Mitra, Microwave-Induced Desalination via Direct Contact Membrane Distillation, *ACS Sustainable Chem. Eng.*, 6, (2018) 626.
9. Y. ASAKUMA, S. SONOBE, Y. SHIBATA, A. HYDE, C. PHAN, Irradiate Microwave to an Interface-Interfacial Modification in Chemical Process, *Bull Soc Sea Water Sci Jpn*, 2021; 75: 2-7.
10. H. T. Lawless, F. Rapacki, J. Horne, A. Hayes, The taste of calcium and magnesium salts and anionic modifications, *Food Qual. Prefer.*, 14, (2003) 319.
11. M. Quilaqueo, L. Duizer, J. M. Aguilera, The morphology of salt crystals affects the perception of saltiness, *Food Res. Int.*, 76, (2015) 675.

Verification of a High-Efficiency Salt Manufacturing Process by Microwave Heating

Kohei Nakagawa

Research Center for Development of Far-Infrared Region, University of Fukui

Summary

This study explored the potential of microwave heating technology to improve the energy efficiency of traditional salt production methods. In Japan, salt has long been produced from seawater by heating processes that require substantial energy to evaporate large volumes of water. Such methods, particularly for small-scale or local production, pose challenges in terms of environmental impact and sustainability.

To address these issues, this research focuses on the unique characteristics of microwave heating, including internal heat generation and high energy concentration. Experiments were conducted using seawater and saline solutions. The results showed that in saline solutions, the time to reach boiling increased with increasing salt concentration. However, seawater with the same concentration was heated more quickly. This is likely due to the dielectric properties of minerals, such as potassium and calcium, in seawater, which enhance uniform heating under microwave irradiation.

Further experiments were performed under reduced pressure to induce salt crystallization in seawater using microwave irradiation. Compared to a mantle heater, microwave heating achieved a significant reduction in heating time, even with similar energy consumption, owing to the output control. Electron microscopy and X-ray analysis revealed that the obtained crystals resembled those of commercial sea salt in both composition and shape. Notably, the magnesium (nigari) content was close to that of commercial products, suggesting potential advantages in terms of flavor.

These findings indicated that microwave heating is an energy-efficient and effective alternative for salt production. It holds promise for self-sufficient salt supply in energy-limited settings and sustainable small-scale salt operations. Future work will focus on optimizing the equipment, improving the process control, and integrating renewable energy sources to develop a sustainable salt production model.