

<令和5年度助成>

# 食品脱水工程の超省エネルギー化に資する無機多孔質薄膜の開発

酒井 求

(早稲田大学 先進理工学部 応用化学科)

## 1. 緒言

人の生活のために生産された食料の約3分の1が廃棄されていると言われており、世界の食料廃棄量は年間約13億トンとも推計されている<sup>1)</sup>。SDGsにおいては、2030年までに小売・消費レベルにおける世界全体の一人当たりの食料の廃棄を半減させ、生産・サプライチェーンにおける食料の損失を減少させることを目標の1つとしている。一方で、安全な食や飲料水が調達できない人々は8億人に上るとも言われており、人間活動を行う上で食と水へのアクセスを確保することも大きな課題である。令和元年には、日本でも食品ロス削減推進法が施行され、原料や製造方法の効率化やフードロス削減に向けた方針が示されている<sup>1)</sup>。脱水を伴う食品加工技術は、原料の無駄のない利用、保存期間の長期化と軽量化による輸送性向上を通じて上記の課題の解決に繋がる。

食品製造業における乾燥・濃縮のための脱水工程には多量のエネルギーが費やされており、本工程の省エネルギー化需要とそのインパクトは大きい。例えば、国内の食品飲料製造業のCO<sub>2</sub>排出量は製造業全体の5.4%と非常に大きく、消費されるエネルギーの多くは乾燥・濃縮等の加熱および脱水工程に充てられている<sup>2)</sup>。そこで近年、省エネルギーな脱水濃縮技術として正浸透(Forward Osmosis: FO)膜法が注目されている。FO膜法では、食品と食品よりも高い浸透圧を有する駆動溶液(Draw Solution: DS)を半透膜を隔てて配置することにより、浸透圧駆動により食品側からDS側へと自発的な水透過が生じる。FO膜法の原理の概略を図1に示す。正浸

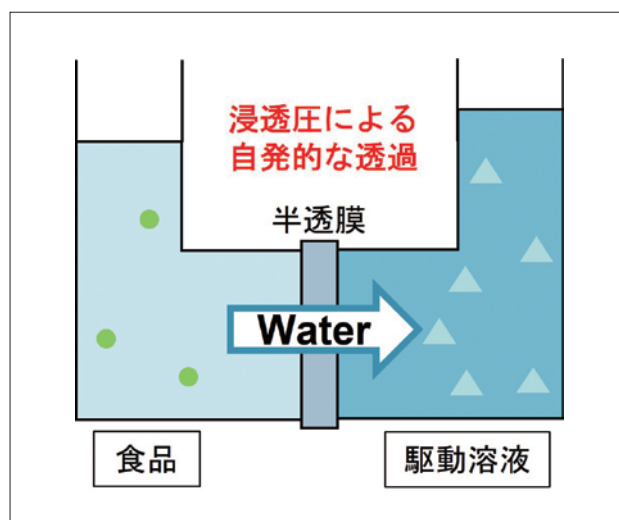


図1 正浸透膜法の原理

透膜法による食品脱水は、従来法(加熱・減圧・RO膜法等)と比較して極めて省エネルギーな手法として期待されており、食品製造業におけるエネルギー消費の大幅な削減に貢献するものと考えられる。また、加熱や減圧による濃縮法と比較して、食品の風味や栄養素を損なわないという特徴がある。

本研究では、多孔質無機材料の一種であるゼオライトを薄膜化し、食品の脱水濃縮を試みた。ゼオライト膜の脱水濃縮性能について、従来報告例のある有機高分子からなる膜と比較し、その特徴について考察した。

## 2. 実験方法

本研究で用いたゼオライトとは、結晶性多孔質アルミノケイ酸塩の総称であり、その構造中に無数の分子サイズの孔が空いていることを特徴とする。食品中の水分子は、ゼオライト細孔よりも小さいため

膜を透過するが、色素や風味・香味成分は分子サイズが大きく膜を透過できないため、半透膜として機能する。実験では、多孔質アルミナ管の表面にゼオライト薄膜を調製し、FO膜として用いた。

水熱合成によって種結晶を成長させる2次成長法を用いてゼオライト膜を調製した。多孔質アルミナ管上に予めゼオライトの種結晶を担持し、その結晶をケイ素、アルミニウム源を含むアルカリ性水溶液中で加熱し成長させることで薄膜を形成させた。成長に用いる溶液の組成は  $\text{Al}_2\text{O}_3 : 240\text{SiO}_2 : 53.3\text{Na}_2\text{O} : 8000\text{H}_2\text{O}$  であり、蒸留水、水酸化ナトリウム、アルミン酸ナトリウム、コロイダルシリカを混合することで調製した。水熱合成は  $180^\circ\text{C}$  で 12h 行った。

果汁の濃縮試験には、市販の濃縮還元 100% オレンジ、アップル、パインアップル果汁を使用した。合成した管状のゼオライト膜をポリカーボネート製のモジュールに取り付け、膜の外側に果汁を、内側に DS (食塩水) を流通させることで濃縮試験を行った。実験に用いた装置図と実験中の様子を図 2 に示す。定期的に果汁の糖度を測定することで、食品の濃縮度合いを評価した。詳しい実験方法については、論文<sup>3)</sup>を参照されたい。

### 3. 結果・考察

#### 3.1 ゼオライト膜による食品濃縮の実証

ゼオライトの一種である Na-ZSM-5 型ゼオライト

膜による果汁濃縮結果の一例 (パインアップル) を図 3 に示す。オレンジ、アップル、パインアップル果汁の糖度は、濃縮前 (約  $11^\circ\text{Brix}$ ) から濃縮試験後 (約  $19^\circ\text{Brix}$ ) に大幅に増加した。また、果汁の色も脱水に伴って濃くなる様子が見られた。このことから、ゼオライト膜を用いた FO 法によって果汁濃縮が可能であることを実証できた。濃縮後の果汁について、DS に用いた食塩水の流入もほとんど見られず、飲用可能なものであることを確認した。

#### 3.2 ゼオライト膜の安定性評価

膜の安定性について検討するため、長期 (120 時間) の濃縮試験を行った。24 時間ごとに膜を取り出して、その様子を観察したのち、水で洗浄した。図 4 に長期濃縮実験の結果を示す。膜を透過する水の量は 24 時間かけて緩やかに低下することが分かる。また、24 時間経過後の膜の写真から、表面にわずかに汚れが付着しており、これが水透過速度の低下の原因と見られた。膜を水ですすぐだけでこの汚れは除去可能であり、水の透過速度も回復することを確認した。この結果より、ゼオライト膜は、果汁濃縮において長期的に使用可能であることを明らかにした。

実用化するうえで重要な熱・酸に対する安定性についても検討した。濃縮実験に用いる果汁の温度を  $20 \sim 80^\circ\text{C}$ 、pH を 2~7 の範囲で変化させ、試験を行った。その結果、今回検討した温度・pH 範囲

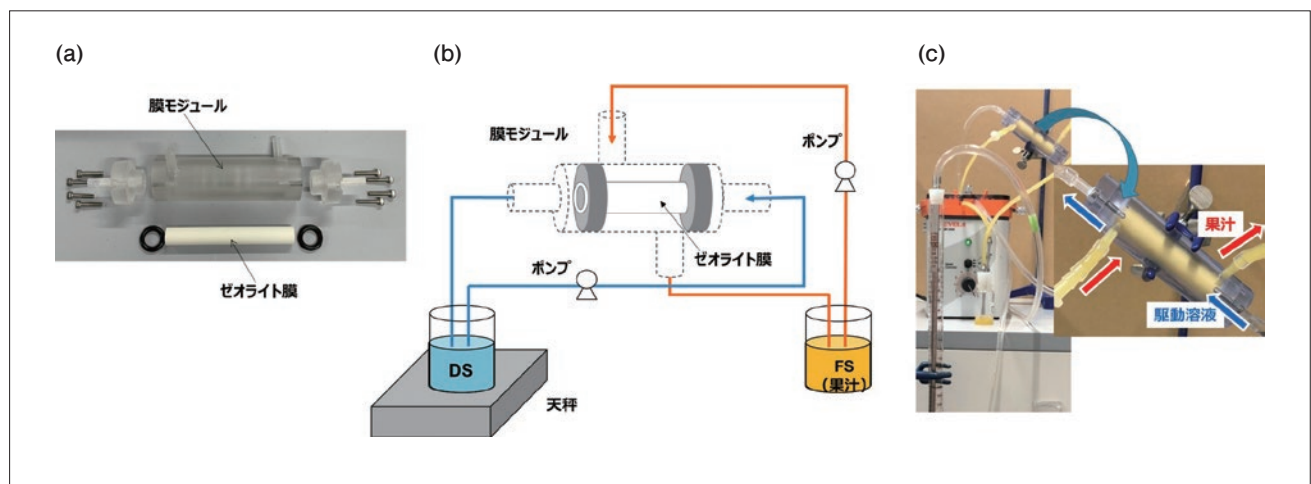


図 2 (a) ゼオライト膜の外観と (b) 装置図および (c) 果汁濃縮実験中の様子

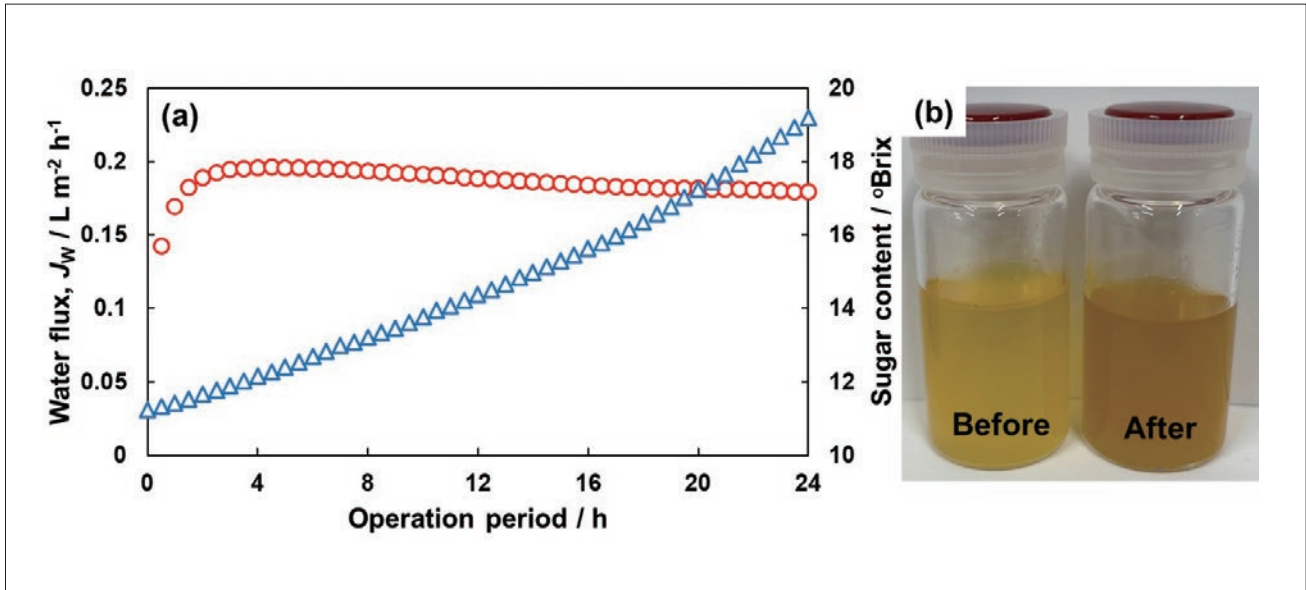


図3 (a) パインアップル濃縮試験結果および (b) 濃縮前後の果汁の様子

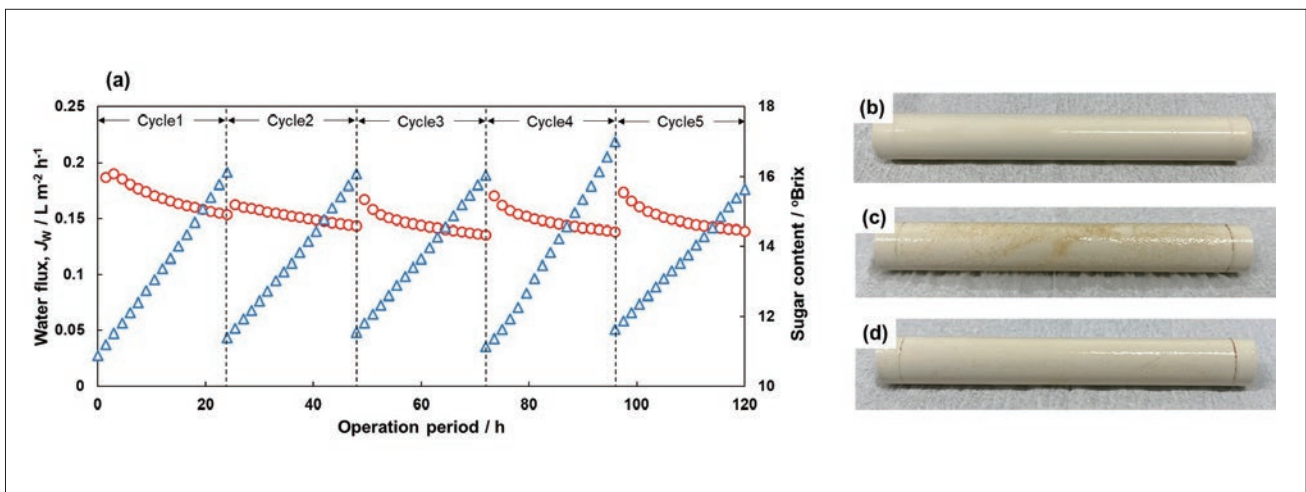


図4 (a) 長期濃縮実験の結果と (b) 未使用、(c) 24時間使用後、(d) 洗浄後の膜の様子

において、ゼオライト膜の劣化は見られず、安定した性能を示すことが明らかとなった。高温条件下での高い安定性は、乳製品等の加熱殺菌工程を伴うプロセスにおいて役立つ可能性があり、酸性条件下での高い安定性は、果汁以外にもワイン等酸性食品の濃縮に適していることを示している。これらの結果からゼオライト膜が幅広い食品の濃縮に使用できることが示唆された。

さらに、ファウリングと呼ばれる目詰まりによる膜性能低下に対する耐性も検討した。従来の有機高分子膜を用いた果汁の濃縮過程では、果肉に含まれるセルロースによる物理的な目詰まり、あるいはペ

クチンによって形成されるゲル層による水透過速度の顕著な低下が報告されている<sup>4,5)</sup>。そこで、セルロースおよびペクチンがゼオライト膜の水透過速度に与える影響について検討した。いずれの物質が共存した場合でも水透過速度は変化せず、ゼオライト膜が極めて高いファウリング耐性を有することを見出した。この優れた特徴の原因については未だ完全には解明できていないが、セルロースやペクチンといった有機物は無機材料表面に付着しにくいため、高い水透過流束が維持されたと推察している。

#### 4. 要約

ゼオライト膜を用いた正浸透膜法によって、果汁の脱水濃縮が可能であることを初めて実証した。従来の有機高分子膜と比較して、高温・酸性条件下でも安定した性能を有すること、果肉等による目詰まりが起りにくいことを見出し、幅広い食品の脱水濃縮への応用可能性を示した。

本研究の成果の一部は、学術論文 (M. Sakai *et al.*, *Appl. Food Res.* 4 (2024) 100487、M. Sakai *et al.*, *Cryst. Growth Des.* 25 (2025) 5584.) として発表することができた。

#### 謝 辞

本研究の遂行にあたり、研究助成を賜りました公益財団法人 浦上食品・食文化振興財団に厚く御礼を申し上げます。

#### 参考文献

- 1) 食品ロスの削減の推進に関する基本的な方針、閣議決定、2021年3月
- 2) 2020年度(令和2年度)の温室効果ガス排出量(確報値)、環境省、  
<https://www.env.go.jp/content/900518858.pdf>
- 3) E. Negishi, M. Sakai, M. Matsukata, Fouling-resistant Na-ZSM-5 zeolite membrane for fruit juice concentration in forward osmosis process, *Appl. Food Res.* 4 (2024) 100487.
- 4) Z. Li *et al.*: *Membranes*, 11, 611, 2021.
- 5) H. Wang *et al.*: *Chem. Eng. Res. Des.*, 177, 569-577, 2022.

## **Development of inorganic porous membranes for energy-saving dehydration in food manufacturing**

**Motomu SAKAI**

*Department of Applied Chemistry, Waseda University*

The forward osmosis (FO) method has been attracting attention as an energy-saving dehydration and concentration technology. In this study, a method for the dehydration and concentration of fruit juice using a zeolite membrane was developed for the first time. The dehydration performance of the zeolite membrane was compared with those of previously reported organic polymer membranes. Commercially available 100% orange, apple, and pineapple juices were used in the experiments. A synthesized tubular zeolite membrane was attached to a polycarbonate module, after which fruit juice and a draw solution (NaClaq) were respectively flowed to the inside and outside of the membrane. The results successfully demonstrated the concentration of fruit juice by a zeolite FO membrane. In addition, it was also found that the zeolite membrane displayed stable performance even under high temperature and acidic conditions, indicating its applicability to dehydration in a wide range of food applications. Furthermore, it was found that the zeolite membrane exhibited a high fouling-resistance compared with conventional organic polymer membranes.