

# 共軸二重円筒形回転粘度計を用いた流動性食品の粘度の解析

Analysis of the Viscosity in Fluidity Food with the Coaxial Double Cylinder Rotation Viscometer.

岸 和 廣

Kazuhiro KISHI

## 【はじめに】

流動性を持つ物質は、ニュートンの粘性法則に従うニュートン流体と、この定義とは異なる性質を持つ非ニュートン流体とに区分できる。一般的には、溶液状態のものは前者、多くの液状食品は後者の挙動を示すことが多い。本研究では、比較的理論に近い速度が設定できる共軸二重円筒形回転粘度計を用いて、流動性を持つ調味料や甘味料の粘度がずり速度 (Shear rate) を変化させたときにどのような変化を示すかを観察し、それぞれの食品がどのような粘度特性を持つのかを明らかにすることを目的とする。

(本研究は2017年度金城学院大学特別研究助成費の助成対象である)

## 【方法】

### (1) 粘度の測定

本研究に用いた共軸二重円筒形回転粘度計は、ブルックフィールドB型粘度計に共軸二重円筒形回転部を装着したシステム (低粘度仕様: LVDV2T型, 及び少量サンプルアダプター, SC4-14型スピンドル, いずれも英弘精機株式会社製) である。分析に用いたサンプル量は2.1 mLである。

粘度はサンプル温度によって大きく変動する。本研究では、少量サンプルアダプターに循環型恒温槽 (FUBER社製, MPC-K6型)

を装着し、サンプル温度を $25.0 \pm 0.1^\circ\text{C}$ にて測定した。

SC1-14スピンドルの回転数は0.3 rpm (ずり速度 $0.12 \text{ sec}^{-1}$ に相当) から200 rpm (ずり速度 $80.0 \text{ sec}^{-1}$ に相当) までとし、粘度測定時のトルク値が10~100%の間で得られたみかけの粘度 (以下、粘度) ( $\text{mPa} \cdot \text{s}$ ) を有効な数値とした。同一サンプルにて粘度を3回測定し、それらの平均値を解析に用いた。

### (2) 試料

本研究で用いた試料は、流動性を持つ市販の甘味料および調味料とした。

甘味料は、水あめ (水あめ, 株式会社スーダジャム製), はちみつ (純粋はちみつ, 株式会社加藤美蜂園本舗製), マルチトール配合シロップ (シュガーカットS, 株式会社浅田飴製), 及びレアシュガー配合シロップ (希少糖入りオリゴ糖シロップ, 徳島産業株式会社製) の4種とした。

調味料は、乳化液状ドレッシング (フレンチドレッシング (白), キューピー株式会社製), トマトケチャップ (カゴメトマトケチャップ, カゴメ株式会社製), 濃厚ソース (お好みソース, オタフクソース株式会社製) 及びマヨネーズ (キューピーマヨネーズ, キューピー株式会社製) の4種とした。

## 【結果】

流動性のある甘味料4種と調味料4種のずり速度と粘度との関係を両軸対数グラフに示す(図1, 図2)。本研究で用いたスピンドルでは, ずり速度 $0.12 \sim 80.0 \text{ sec}^{-1}$ までの範囲で設定することが可能であったが, この全範囲で有効な粘度の数値が得られたのは乳化

ドレッシングのみであった(図2左上)。

水あめでは, ずり速度 $1.0 \sim 8.0 \text{ sec}^{-1}$ の範囲でほぼ一定な粘度の数値(約 $4,900 \text{ mPa} \cdot \text{s}$ )が得られた。はちみつでは, ずり速度 $0.6 \sim 4.8 \text{ sec}^{-1}$ の範囲でほぼ一定な粘度の数値(約 $8,100 \text{ mPa} \cdot \text{s}$ )が得られた。マルチ

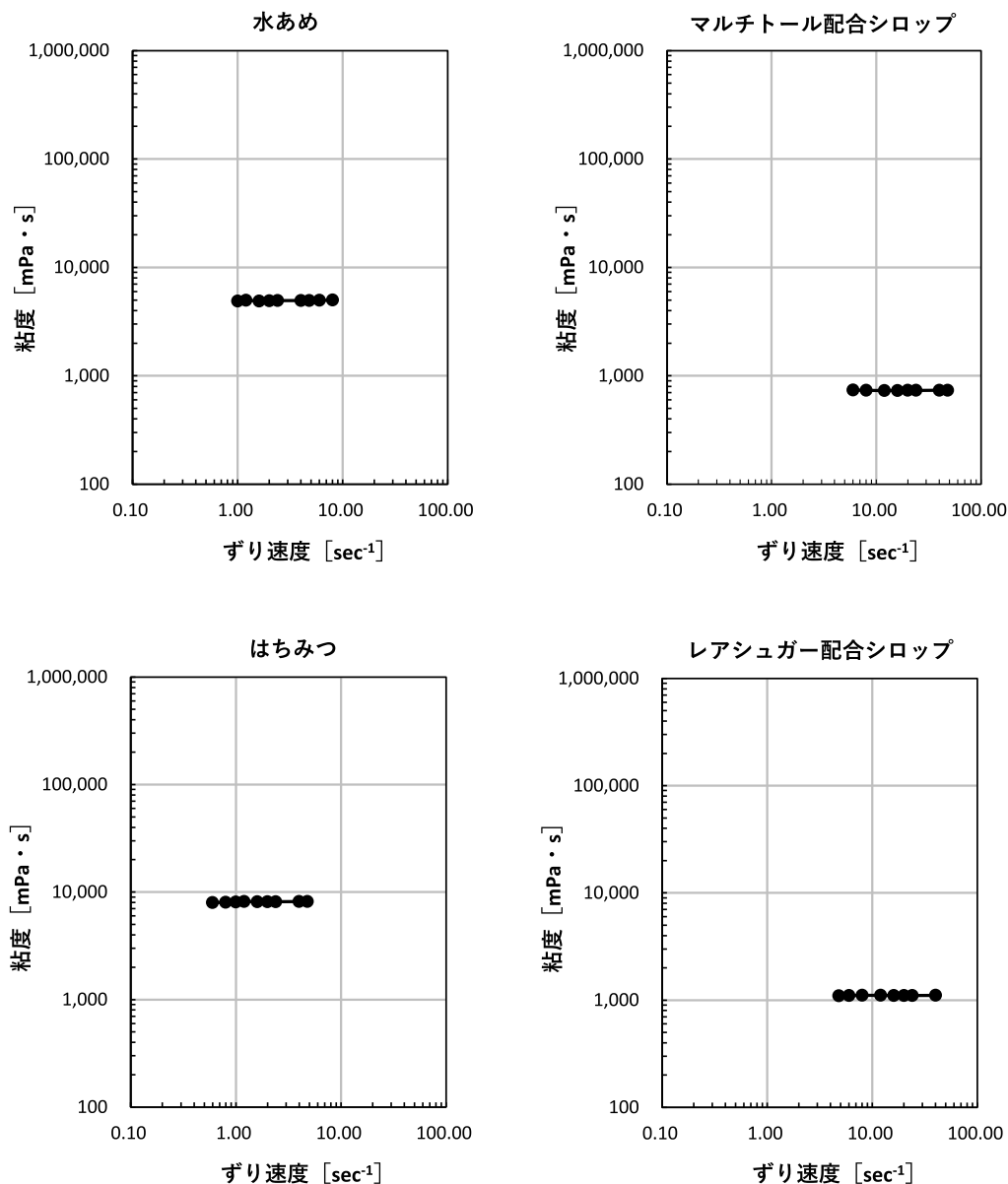


図1 流動性のある甘味料のずり速度と粘度との関係 (両軸対数グラフ)

トール配合シロップでは、ずり速度 $6.0 \sim 60.0 \text{ sec}^{-1}$ の範囲でほぼ一定な粘度の数値（約 $735 \text{ mPa} \cdot \text{s}$ ）が得られた。レアシュガー配合シロップでは、ずり速度 $4.8 \sim 40.0 \text{ sec}^{-1}$ の範囲でほぼ一定な粘度の数値（約 $1,100 \text{ mPa} \cdot \text{s}$ ）が得られた。

流動性のある調味料4種のずり速度と粘度との関係を両軸対数グラフに示す（図2）。

乳化液状ドレッシングでは、ずり速度を $0.12 \sim 80.0 \text{ sec}^{-1}$ の範囲で変化させると、粘度は約 $43,000 \sim 260 \text{ mPa} \cdot \text{s}$ へと次第に下がり、両軸対数グラフでは右下がりの直線となっ

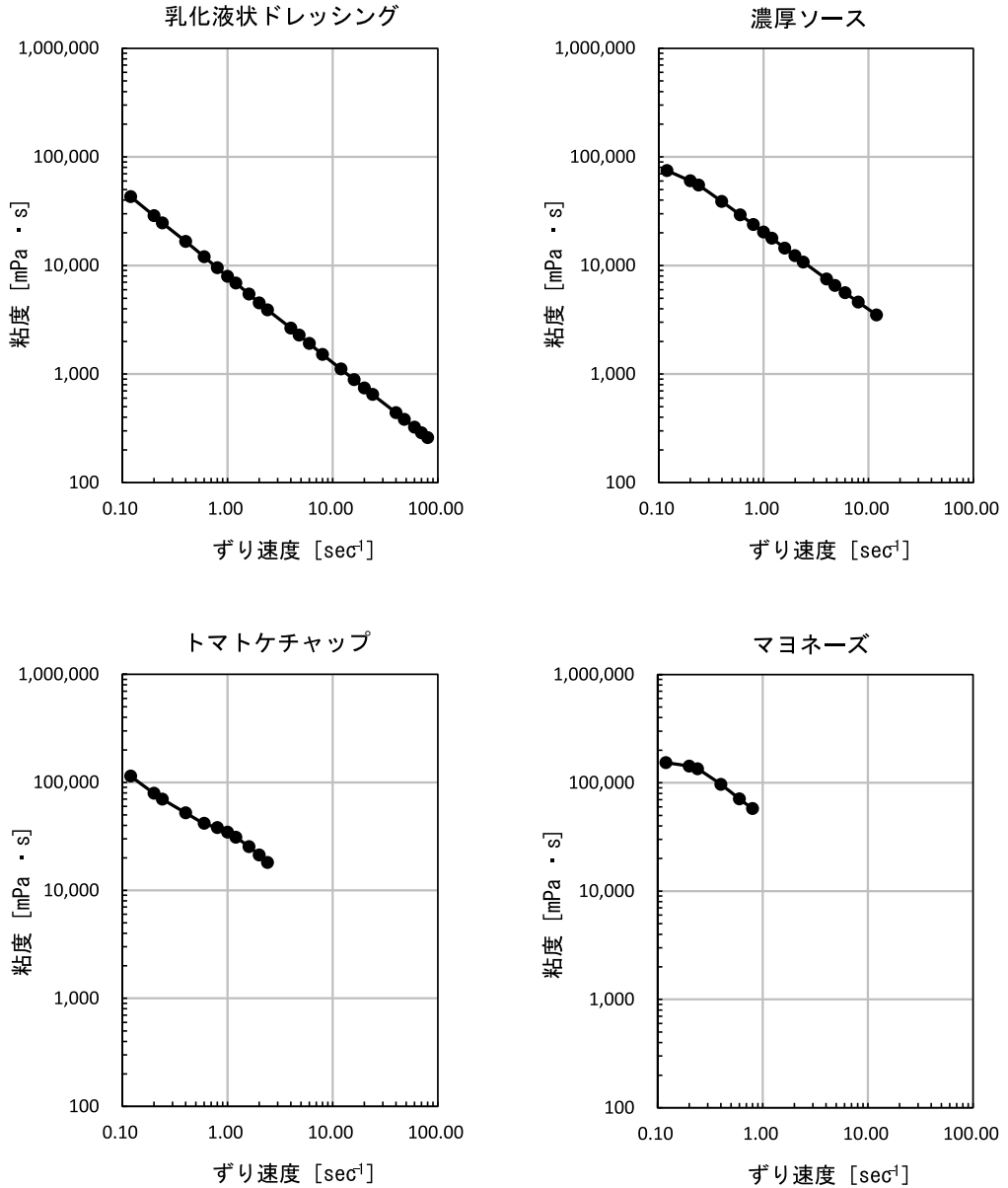


図2 流動性のある調味料のずり速度と粘度との関係（両軸対数グラフ）

た。トマトケチャップでは、ずり速度は $0.12 \sim 2.4 \text{ sec}^{-1}$ の範囲までの計測となった。粘度は約 $111,400 \sim 18,100 \text{ mPa} \cdot \text{s}$ へと次第に下がり、両軸対数グラフでは右下がりの直線状となった。濃厚ソースでは、ずり速度は $0.12 \sim 12 \text{ sec}^{-1}$ の範囲までの計測となった。粘度は約 $75,000 \sim 3,500 \text{ mPa} \cdot \text{s}$ へと次第に下がり、両軸対数グラフでは右下がりの直線状となった。マヨネーズでは、ずり速度は $0.12 \sim 0.8 \text{ sec}^{-1}$ の狭い範囲でしか測定できず、粘度は約 $153,000 \sim 58,000 \text{ mPa} \cdot \text{s}$ へと次第に下がり、両軸対数グラフでは右下がりの直線状となった。

### 【考察】

今回の甘味料4種は、温度一定の条件下( $25^\circ\text{C}$ )において、ずり速度の変化に関わらず、粘度は一定であった(図1)。このことから、今回用いた水あめ、はちみつ、マルチトール配合シロップ及びレアシュガー配合シロップはニュートン流体であると考えられる。水あめとはちみつは代表的な糖液性の甘味料であるが、それぞれ、水あめはぶどう糖、麦芽糖、デキストリンを主成分とし、はちみつは果糖とぶどう糖を主成分としているので、組成からみても今回の4種の甘味料はニュートン流体と考えてよい。

マルチトール配合シロップやレアシュガー配合シロップのような、低エネルギー性の甘味料では、近年、様々な製品が開発されている。果糖ぶどう糖液糖のように粘度のある甘味料を主成分とするガムシロップでは、ニュートン流体の性質を示すことが考えられるが、一部のローカロリーガムシロップ等では、増粘剤としてキサントガムを配合している。増粘剤を配合しているシロップの甘味成分には、アセスルファムカリウムを代表とする高甘味度甘味料が配合され、相対的に糖類の含

有量は少なくなることから、シロップの粘度低下を招き、そのままでは、シロップとしての商品の特性が損なわれる。低糖質を維持しながらシロップの粘度を高めるには、増粘剤の配合が必要となると思われる。グアガム系とキサントガム系増粘剤におけるずり速度と粘度との関係には非ニュートン性があることが明らかになっている<sup>1,2)</sup>。本研究では明らかにできなかったが、増粘剤を配合したシロップの粘度解析を行うと、ずり速度の上昇に伴った粘度低下がみられる非ニュートン流体の性質がみられる可能性がある。本研究で用いたマルチトール配合シロップはニュートン流体の性質を持っていた。この製品の成分は、還元麦芽糖水飴、還元水飴、水溶性食物繊維、甘味料(スクラロース)となっており、中でも還元麦芽糖水飴や還元水飴の含有率が高いことが考えられる。本研究ではこの製品中の水溶性食物繊維の組成や含有量を明らかにすることはできなかったが、製品全体としては糖質の持つニュートン流体の挙動を示したことから、この製品の粘度の挙動は糖類が主体となって成り立っているものと推察された。

本実験で用いた調味料4種は、温度一定の条件下( $25^\circ\text{C}$ )において、ずり速度の上昇に伴う粘度の低下が見られ、ずり速度と粘度との関係を両軸対数グラフ上にプロットするといずれも右下がりの直線状になった(図2)。このことから、本研究で粘度の数値が得られずり速度の範囲においては、乳化液状ドレッシング、トマトケチャップ、濃厚ソース、マヨネーズは非ニュートン流体の性質を持つものであると考えられる。小野木によれば、エマルジョンは非凝塑性、トマトケチャップはビンガム、マヨネーズは非ビンガムの非ニュートン性を示すとしている<sup>3)</sup>。

本研究に用いた乳化液状ドレッシングは水

中油滴（W/O）型エマルジョンであり、主要な原材料は、食用植物油脂、醸造酢、ぶどう糖果糖液糖及び増粘剤（キサンタンガム）等である。W/O型エマルジョンは非ニュートン流体であり、ずり速度（剪断速度）によって粘度が変化する<sup>4,5)</sup>。清水はB型回転粘度計を用いてW/O型エマルジョンの見かけ粘度と剪断速度とを測定し、両軸対数グラフにて右肩下がり直線の示すことを明らかにした<sup>5)</sup>。共軸円筒回転に基づいて粘度を算出している清水の結果は本研究結果の内容と同様であるが、本研究のように少量サンプルアダプターを用いた計測結果かどうかは不明である。

本研究に用いたトマトケチャップには、トマト、糖類（砂糖、ぶどう糖果糖液糖、ぶどう糖）、醸造酢等が含まれている。トマトケチャップはエマルジョンではなくコロイド分散溶液であり、糖類を含んでいるが、ペクチン等を含有するトマト果実をより多く含有している。一般的には、これらの成分やトマトの細胞自体がトマトケチャップの粘度に関与すると考えられているが、詳細なメカニズムの解明には至っていない。Takizawaらは成熟したトマトには細胞壁の再構築機構があり、新規に架橋性多糖が合成されていることを明らかにしたが<sup>6)</sup>、これは興味深い。本研究の結果では、トマトケチャップは非ニュートン流体の挙動を示したが、このメカニズムを解明するためにはさらなる今後の研究結果を待たなければならない。

本研究に用いた濃厚ソースには、野菜、果実（トマト、デーツ、たまねぎ、りんご、その他）、糖類（ぶどう糖果糖液糖、砂糖）、増粘剤（加工でんぷん、増粘多糖類）等が含まれている。また、トマトケチャップとは異なり、肉エキスなど動物性食品由来の原材料も含まれており、濃厚ソースが非ニュートン性

流体の挙動を示すメカニズムについては、植物性食品、動物性食品及び増粘剤の性質が合わさって粘度を保っている可能性がある。

本研究に用いたマヨネーズには、食用植物油脂、卵黄、醸造酢等が含まれており、乳化ドレッシング同様にW/O型エマルジョンに分類される。赤羽らは、原材料から調整したマヨネーズの粘度をハーケ社二重円筒形回転粘度計（ロトビスコRV3型）にて測定し、ずり速度とみかけの粘性率を両対数グラフ上で右肩下がり直線の示すことを明らかにした<sup>7)</sup>。この結果は本研究結果と同様のものではあった。

粘度分析法にはいくつかの測定法があるが、混合物である食品の粘度分析には主に単一円筒形回転粘度計（以下、B型粘度計）とコーンプレート型回転粘度計（以下、E型粘度計）が用いられてきた<sup>8)</sup>。B型粘度計は比較的安価で取り扱いが容易なものが多く、粒子の大きさに左右されにくいという利点があるが、有効に測定できる粘度の範囲が狭く、1回の測定に50~300 ml程度の試料が必要になり、ずり速度の設定が容易でない等の欠点がある。一方、E型粘度計はB型粘度計に比べてやや高価で測定物の粒子の大きさによって制約を受けやすい反面、測定可能な粘度の範囲が広く、1回の測定に必要な試料は数ml程度であり、ずり速度の設定が可能で測定の精度が高いという利点がある。また、本研究で用いた共軸二重円筒形回転粘度計は、前述のB型粘度計におけるスピンドルを内筒に、スピンドルと共軸になるような測定容器を外筒にしたものであり、粒子の大きさに左右されにくく、ずり速度の設定が可能であり、精度が高く、1回の測定に必要な試料も数mlである。浅井らは非ニュートン性を持つ食品やモデル溶液をB型粘度計と共軸二重円筒形回転粘度計の両方で測定し、両者の粘度計から得られ

た粘度に差があることを明らかにした<sup>9)</sup>。しかしながら、共軸二重円筒形回転粘度計は単一のスピンドルで測定可能な粘度の範囲が狭い。即ち、共軸二重円筒形回転粘度計では、ずり速度の低い範囲では測定に必要なトルクを得ることが難しいことから安定した粘度の数値が得にくく、また、ずり速度の高い範囲では粘度計の検出限界を超えてしまうという原理的な欠点がある。本研究においては、ずり速度を $0.12 \sim 80.0 \text{ sec}^{-1}$ に相当する回転数に設定して測定を試みたが、多くの甘味料ではずり速度 $1.0 \text{ sec}^{-1}$ 以下の範囲での、多くの調味料ではずり速度 $16.0 \text{ sec}^{-1}$ 以上の範囲での粘度を測定することができなかった。人体の胃のずり速度範囲を $2.0 \sim 20.0 \text{ sec}^{-1}$ と考える<sup>10)</sup>と、トマトケチャップやマヨネーズのような粘度の高い食品を測定する際には、用いるスピンドルを高粘度に対応できるものに変更することで対応できる可能性がある。山賀らはB型粘度計あるいはE型粘度計を用いて、種々の半固形化経腸栄養剤の粘度測定を行ったが、それぞれの長所と短所について詳細に検討しており、半固形化栄養剤の粘度測定法についてはさらなる研究を進めると考察した<sup>11)</sup>。共軸二重円筒形回転粘度計を用いることによって半固形化栄養剤の粘度測定の標準化に貢献できる可能性がある。

### 【結語】

本研究で用いた共軸二重円筒形回転粘度計において、流動性をもつ食品の物性を解析できることが明らかとなった。今後は測定条件の検討を重ね、より多く種類の食品の粘度特性を分析できるように研究を推進していく。

### 【文献】

- 1) 熊谷仁, 熊谷日登美, レオロジーと食品工学—嚥下状概要介護食の物性を中心として, 日本食品工業学会誌10, 137-148 (2009)
- 2) 藤谷順子, 飯島正平, 5つの濃度のニュートン流体を用いた官能試験による, とろみ液の粘度測定条件(ずり速度)の検討, リハビリテーション医学53, 164-171 (2016)
- 3) 小野木重治, レオロジー要論, 槇書店(1968)
- 4) 清水正高, エマルジョンの粘度特性に及ぼす液滴径の影響, 宮崎県工業センター・宮崎県食品開発センター研究報告53, 13-18 (2008)
- 5) 松本幸雄, エネルギーのレオロジー, 表面20, 80-90 (1982)
- 6) Takizawa A., Hyodo H., Wada K. et al, Regulatory specialization of xyloglucan and glucuronoarabinoxylan in pericarp cell walls during fruit ripening in tomato. PLoS One 9, e89871, Published online 2014 Feb 26
- 7) 赤羽ひろ, 柳瀬仁茂, 中浜信子, マヨネーズの性状について, 家政学雑誌29, 362-368 (1978)
- 8) 飯島正平, PDNレクチャーChapter2 経腸栄養, 5.半固形化栄養剤, 1.基礎的な知識, NPO法人PEGドクターネットワーク2011 spring 1-4 (2011)
- 9) 浅井一輝, 一柳正昭, 佐藤根大士 他, 非ニュートン性が単一円筒型粘度計(B型粘度計)の測定結果に及ぼす影響について, 粉体工学会誌46, 873-880 (2009)
- 10) 合田文則, 飯島正平, 蟹江治郎 他, 栄養材の形状と用語の統一, 臨床栄養114, 645-650 (2009)
- 11) 山賀華奈子, 合田文則, 河本彩 他, 半固形化経腸栄養剤の物性測定方法についての検討, 静脈経腸栄養26, 1247-1253 (2011)