

キクイモに含まれるイヌリンの安定性に及ぼす 加熱および pH の影響

安田みどり、扇 萌華、斎木まど香

西九州大学健康栄養学部健康栄養学科

(令和元年 7 月 24 日 受理)

要 旨

キクイモに含まれる水溶性多糖類のイヌリンに及ぼす加熱や pH の影響について調べた。キクイモ乾燥粉末中のイヌリンは、160℃以上の焙煎によって減少することが分かった。これは、加熱によるイヌリンの分解とカラメル化反応によるものと考えられる。また、イヌリンは、強酸性では酸分解のために著しく減少することが明らかとなり、これは加熱温度が高く、加熱時間が長いほどより顕著であった。生キクイモからイヌリンの水への溶出は、40℃、1時間の抽出では約30%、95℃では10分でも約半分のイヌリンが水の方へ溶出することが分かった。以上のことから、キクイモ中のイヌリンは、高温での加熱、強酸性、長時間の水さらしにより減少することが分かった。

キーワード：キクイモ、イヌリン、加熱、pH

1 緒 言

北米原産のキク科ヒマワリ属のキクイモ (学名: *Helianthus tuberosus* L.) は、多年草で繁殖力が高く、栽培しやすい作物であるといわれている。消費者の健康志向により、キクイモに含まれるイヌリンの機能性に注目が集まり¹⁻²⁾、キクイモの栽培や普及が急速に伸びている。イヌリンは、スクロースのフルクトース残基にフルクトースが1~数十個直鎖上に結合したもので (図1)、ヒトの消化酵素では分解されにくい水溶性の多糖類である。一般的なイモ類は、デンプンを多く含むが、キクイモはデンプンをほとんど含まず、その代わりにイヌリンを多く含む。じゃがいも、さつまいもの熱量が76、134 kcal/100gであるのに対し、キクイモは35kcal/100gであり³⁾、他のイモ類に比べて低カロリーの食材といえる。イヌリンの生理機能は、食後血糖上昇抑制作用⁴⁻⁵⁾、食物繊維としての便秘改善効果⁶⁻⁷⁾、プレバイオティクス効果⁸⁻¹⁰⁾、ミネラルの吸収促進作用¹¹⁾、免疫増強作用¹²⁾、血中コレステロールやトリグリセリドの低下作用¹³⁾など、数多く報告されている。現在では、このようなイヌリンの機能性を生かした健康食品が数多く販売されている。

我々は、これまで、キクイモの品種によりイヌリン含量が異なること、収穫時期が遅くなるほどイヌリン含量が低下することを報告した¹⁴⁾。さらに、我々は、地元の企業と連携してキクイモを用いたお菓子 (焼き菓子) やメニュー (グラタン、酢の物、揚げ物など) の開発を行った。また、近年のキクイモの人気により、キクイモ茶やキクイモ酢など多くの食品が販売されている。しかし、これらの調理や加工により、キクイモ中のイヌリンの含量が変化することが考えられる。そこで、本研究では、イヌリンをできるだけ損なわないような調理・加工の方法を確立するため、キクイモ中のイヌリンに及ぼす加熱やpHの影響について調べた。

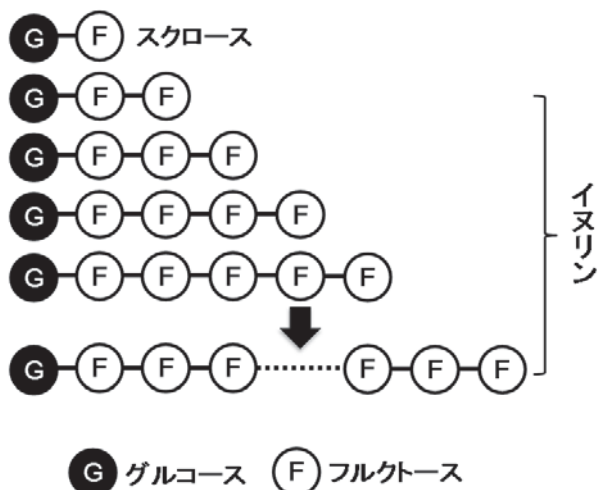


図1. イヌリンの構造

2 実 験

2.1 試 料

実験に用いたキクイモは、2017年11月に佐賀県三養基郡みやき町にて採取したものをを用いた。キクイモは、水にて洗浄して皮を取り除き、薄切りにした後、凍結乾燥機 (DRC-1000、東京理化工機) にて凍結乾燥を行った。さらに、乾燥物を乳鉢にて粉碎し、ふるい (500 μ m) でふるったものを実験に用いた。キクイモから水へのイヌリンの溶出について調べた実験には、皮を取り除いた生のキクイモを厚さ2~3mmの薄切りにしたものをを用いた。

2.2 キクイモの焙煎方法

キクイモ乾燥粉末を入れたIH専用テフロンフライパン (直径16cm) をIHクッキングヒーター (KIH-1401、小泉成器株式会社) にのせ、60、100、130、160、180、200 $^{\circ}$ Cとなるよう温度を設定した。赤外線放射温度計 (AD-5611A、株式会社エー・アンド・デイ) にて温度を測定し、設定した温度になってからそれぞれ30分、1、2時間焙煎を行い、その後すぐに室温まで冷却した。均一に焙煎を行うため、焙煎中は木製のしゃもじにてよくかき混ぜた。焙煎後の試料中の水分量は、水分計 (MA 35、Sartorius) にて測定した。

2.3 イヌリンの分析

キクイモ中のイヌリン含量は、既報¹⁴⁾に従い、フルクタン測定キット (日本バイオコン株式会社) を用いて測定した。その実験方法を簡単に述べる。ビーカーに約100mgのキクイモ乾燥粉末を精秤し、80 $^{\circ}$ Cの熱水40mlを加え、温度を保ちつつ、時々ガラス棒で攪拌しながら15分間イヌリンを抽出させた。これを冷却後、メスフラスコ (50ml) に移し、水で定容し、ろ過を行った。溶液中のスクロース、デンプンは、スクラーゼおよびアミラーゼにより除去した。還元糖は、アルカリ性ホウ素化水素溶液により糖アルコールに還元した。フルクタン (イヌリン) は、フルクタナーゼにより完全に加水分解を行った。サンプルブランクとして酵素の代わりに緩衝溶液を用いて同様の実験を行った。さらに、フルクトース標準溶液を用いて同様の実験を行った。すべてのサンプルに0.5%のp-ヒドロキシ安息香酸ヒドラジド溶液を加え、沸騰水中で6分間加熱した。410nmにおける吸光度をマイクロプレートリーダー (Synergy HT、BioTec) にて測定した。

サンプル中のイヌリン含量は、以下の(1)式によって算出した。

$$\text{イヌリン含量 (\% w/w)} = \Delta a \times F \times V / W \times 2.48 \quad (1)$$

(1)式中の Δa はサンプルの吸光度とサンプルブランクの吸光度の差、Fはフルクトース標準溶液のファクター、Vは抽出液の容量 (ml)、Wは採取したサンプルの量 (mg) を表している。

加熱をしていないキクイモ乾燥粉末中のイヌリン含量を100%とした場合の各々の温度で焙煎したキクイモ乾燥粉末中のイヌリン含量の残存率は、以下の(2)式により求めた。

$$\text{イヌリンの残存率 (\%)} = A/B \times 100 \quad (2)$$

(2)式中のAは各温度・時間におけるイヌリンの含量、Bは生キクイモ中に含まれる全てのイヌリン含量(キクイモ粉末中のイヌリン含量から水分量を考慮して生キクイモ中のイヌリン含量に換算した含量)を示す。

さらに、pHにおけるイヌリンの安定性を調べるために、以下のような操作を行った。ビーカーに生キクイモを凍結乾燥した粉末約100mgを精秤し、5mlの緩衝溶液を加え、40mlの各温度(25、50、80、95℃)の水を加え、実験室内(25℃)、恒温槽中(50、80℃)、沸騰水浴中(95℃)にて各温度を保ちつつ、ガラス棒で時々かき混ぜながら10または30分間抽出させた。その後の操作は、前述した通りに行った。pH緩衝液の調製には、1Mまたは0.1Mの塩酸(pH1-2)、0.1Mクエン酸-0.1Mクエン酸ナトリウム緩衝溶液(pH4-5)、0.1Mマレイン酸-0.1M水酸化ナトリウム緩衝溶液(pH6-7)、0.1Mリン酸水素二ナトリウム-0.1Mリン酸二水素ナトリウム緩衝溶液(pH7-8)、0.1Mホウ酸-0.1M水酸化ナトリウム緩衝溶液(pH8-9)を用いた。pHの調整および測定は、pHメーター(S220、メトラートレド)を用いた。緩衝溶液を用いていない場合のキクイモ乾燥粉末中のイヌリン含量を100%とした場合のイヌリンの残存率は、以下の(3)式により求めた。

$$\text{イヌリンの残存率 (\%)} = C/D \times 100 \quad (3)$$

(3)式中のCは各温度・時間におけるイヌリンの含量、Dは生キクイモ中に含まれる全てのイヌリン含量(キクイモ粉末中のイヌリン含量から水分量を考慮して生キクイモ中のイヌリン含量に換算した含量)を示す。

なお、すべての実験は、それぞれ3回ずつ行った。

2.4 生キクイモから水へのイヌリンの溶出

薄切りにした生のキクイモ2gをビーカーに入れ、100mlの水(40、60、80、95℃)を加え、そのまま温度を保ちつつ、10、30、60分間放置した。さらに、ろ紙(Whatman、No.1)にてろ過を行い、100mlのメスフラスコに入れ、定容を行った。その後は、2.3と同様の操作を行った。すべての実験は、それぞれ3回ずつ行った。

生キクイモから水へのイヌリンの溶出率は、以下の(4)

式により求めた。

$$\text{イヌリンの溶出率 (\%)} = E/F \times 100 \quad (4)$$

(4)式中のEは各温度・時間におけるイヌリンの含量、Fは生キクイモ中に含まれる全てのイヌリン含量(キクイモ粉末中のイヌリン含量から水分量を考慮して生キクイモ中のイヌリン含量に換算した含量)を示す。

2.5 統計処理

統計解析は、エクセル統計(株式会社社会情報サービス)を用い、一元配置分散分析で有意差を認めた場合、Dunnnettの多重比較検定を用いて、焙煎なしのものと各サンプル間における有意差の検定を行った。

3 結果および考察

3.1 キクイモ粉末中のイヌリン含量に及ぼす焙煎条件の影響

焙煎前のキクイモ粉末は白色を呈していたが、焙煎の温度や時間により着色を生じた(写真1)。キクイモ粉末は、130℃から黄色く着色し、180℃以上では茶色または黒色となった。また、180℃以上の焙煎中に香ばしく、甘い香りが発生した。

焙煎をしていないキクイモ粉末中のイヌリン含量は54.3g/100gであった。このときの含量を100%として焙煎後のイヌリン残存率を算出した結果を図2に示す。ただし、焙煎により水分含量が減少し、イヌリン含量が増えることが考えられるので、水分含量により補正し、イヌリン残存率に水分含量の影響が生じないようにした。焙煎温度が60℃から130℃までは焙煎なしのイヌリン残存率に対して有意差は認められなかった。しかし、

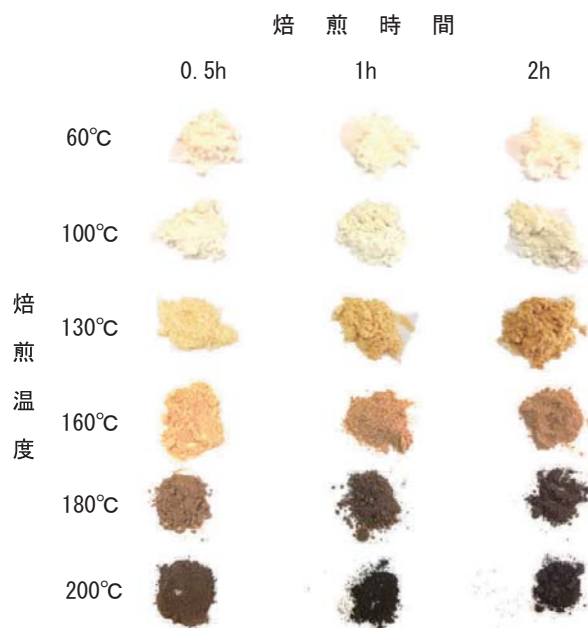


写真1. 加熱後のキクイモ粉末

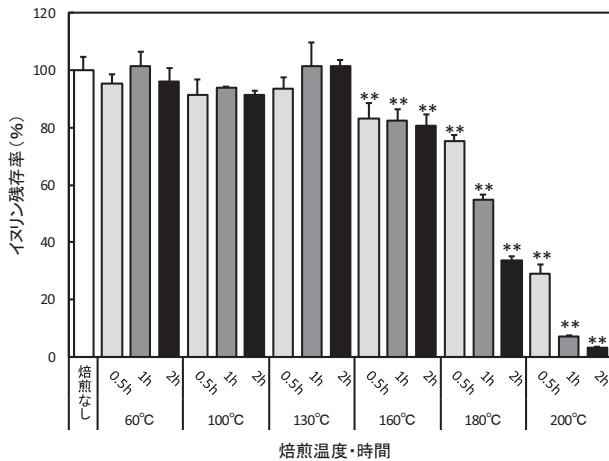


図2. キクイモ粉末中のイヌリン含量に及ぼす加熱温度・時間の影響

データは、平均値±標準偏差 (n=3) で示した。**は、焙煎をしていないキクイモ粉末に対する有意差を示す (p<0.01)。

160℃以上で焙煎した場合、焙煎していないものに比べてイヌリン残存率が有意 (p<0.01) に減少した。例えば、160℃では約80%となり、180℃では焙煎時間30分で75%、1時間で55%、2時間で34%にまで減少した。200℃ではさらに減少し、2時間の焙煎では残存率3%とイヌリンがほとんど含まれていなかった。このように、焙煎温度によりイヌリンが減少した理由として、次のようなことが考えられる。イヌリンは、加熱すると低分子化合物に分解され¹⁵⁾、多くの分解物が生じる¹⁶⁾ことが報告されている。その中でも特にフルクトースが多いことが明らかにされている¹⁶⁾。さらに、フルクトースは、加熱により重合、すなわちカラメル化反応が生じることが報告されている¹⁷⁾。また、イヌリンの加熱分解によって生じたフルクトースは、アミノ酸と結合してアミノカルボニル反応を引き起こすことも知られており、これも着色や香りの発生を伴う¹⁸⁾。ただし、キクイモにはたんぱく質が少ない³⁾ので、この反応の影響は少ないと思われる。しかし、調理や加工において、たんぱく質やアミノ酸を多く含む食材と混ぜる場合には、アミノカルボニル反応が生じる可能性も考えられる。

一方、石黒らは、キクイモを190℃、30分間で焙煎することにより、ポリフェノール含量が最も増加し、抗酸化活性も高まったと報告している¹⁹⁾。我々も、キクイモの実の部分よりも皮にポリフェノールが多く含まれ、抗酸化性も高いことを報告した¹⁴⁾。本研究では、焙煎に伴うポリフェノール含量について調べてはいないが、皮を取り除いて実験したことから、ポリフェノール含量や抗酸化性については石黒らの報告¹⁹⁾に比べて低いのではないかとと思われる。

最近では、キクイモを高温で焙煎したキクイモ茶が多く市販されている。また、オープンを使った料理やお菓子についても、高温で長時間加熱している場合がある。これらの食品には、イヌリンによる血糖値上昇抑制作

用、コレステロール低下作用などの効能を謳ったものもある。しかしながら、焙煎温度が160℃以上になると、イヌリン含量が低下するため、イヌリンの機能性が残っているかは疑わしい。したがって、イヌリンの機能性を重視したい場合は、調理や加工中の温度には注意が必要である。

3.2 水溶液中のイヌリンの安定性に及ぼすpHの影響

各々のpHにおけるキクイモ粉末中のイヌリン残存率の変化を調べた結果を図3に示す。抽出時間10分(図3A)では、25℃のpH2以上ではイヌリン残存率は約100%となった。キクイモ粉末からイヌリンが室温で、しかも10分という短時間で抽出されたのは、イヌリンが水溶性の多糖類であることと、粉末状であったために表面積が広がり抽出されやすかったためではないかと考えられる。50、80℃でもpH2以上、95℃ではpH4以上で25℃の場合と同様、イヌリンの残存率が100%となり、よく抽出されていることが明らかとなった。しかし、25-80℃ではpH1、95℃ではpH2以下でイヌリンの残存率が低下した。これは、強酸性でイヌリンが酸分解を引き起こすためだと考えられる²⁰⁻²¹⁾。特に、80℃のpH1、95℃のpH2以下の場合には、イヌリンの残存率は12%以下となり、イヌリンがほとんど含まれていないことが明らかとなった。つまり、強酸性で加熱温度が高いほど酸分解が起こりやすいと考えられる。

抽出時間30分(図3B)の場合では、25、50、80℃におけるpH1、95℃におけるpH2以下では、抽出時間10分の場合よりもイヌリン残存率が低かった。抽出時間が長いほど酸分解が進んだと考えられる。しかし、pH4以上(25℃ではpH2以上)では、イヌリン残存率が高く、安定であることがわかった。

以上のことから、イヌリンは強酸性の溶液中で分解されやすく、しかも、抽出温度が高く、抽出時間が長いほど、その反応は進みやすくなることがわかった。キクイ

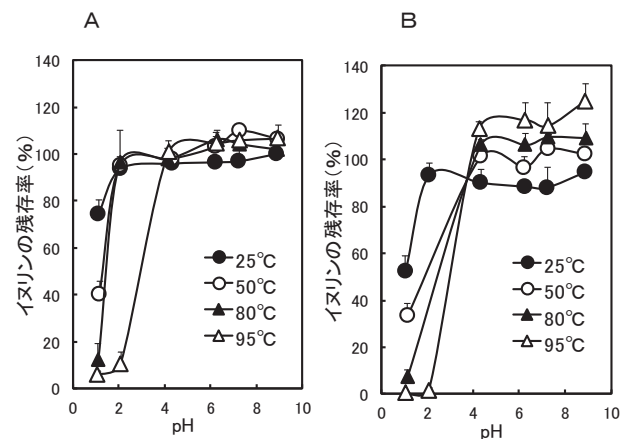


図3. キクイモ粉末中のイヌリンに及ぼすpHおよび加熱の影響

A、Bはそれぞれ加熱時間10分および30分である。データは、平均値±標準偏差 (n=3) で示した。

モのお酢を製造したときに発酵期間とともにイヌリン含量が減少したという報告²²⁾もあり、弱酸性の条件でも、キクイモを長期間保存する際にはイヌリンの減少が伴うので注意が必要である。

3.3 生キクイモからの水へのイヌリンの溶出に及ぼす温度の影響

これまでの実験では、キクイモの乾燥粉末を用いたが、次の実験では、生のキクイモを用いた場合、どの程度水へ溶出されるのかについて検討を行った。種々の加熱温度・時間におけるイヌリンの溶出率を図4にまとめた。生キクイモ中のイヌリンは加熱温度および加熱時間とともに溶出されやすいことがわかった。40℃では、イヌリン溶出率が加熱時間10、30、60分でそれぞれ7、16、29%となり、図3のキクイモ乾燥粉末の場合に比べて非常に低い値となった。イヌリンは水溶性の多糖類であるが、キクイモの形態や切り方に大きく影響すると思われる。加熱することでキクイモが柔らかくなり、溶出率が高まる。特に、95℃で1時間加熱した場合は、キクイモの形状が崩れて表面積が広がり、すべてのイヌリンが溶出されたと考えられる。

したがって、キクイモを沸騰水で長時間茹でるといった調理操作の場合、イヌリンはほとんど茹で汁に含まれることになる。キクイモを茹でる場合は、茹で汁を捨てるといった調理操作は、イヌリンの損失につながる。例えば、みそ汁やスープなど茹で汁をそのまま使った調理法が、イヌリンの効率的な摂取につながる。また、低い温度でも長時間、生キクイモを水に漬けることによって、イヌリンが水の方へ溶出することが明らかになったことから、長時間の水さらしにも注意が必要である。

本研究により、キクイモ中のイヌリンは、焙煎の際の

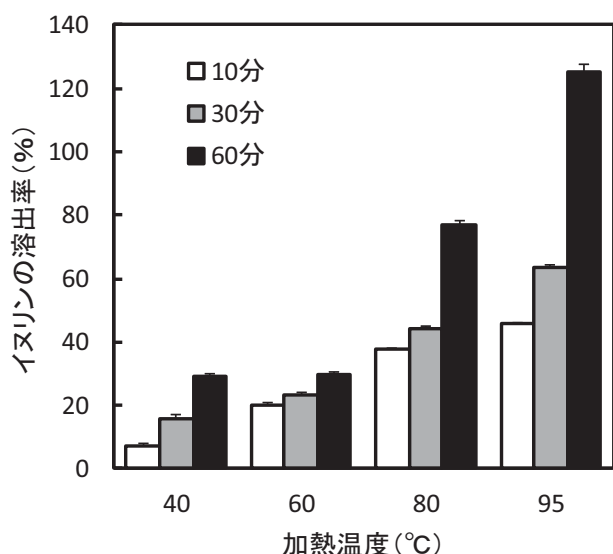


図4. 加熱温度・時間によるキクイモからイヌリンの溶出率の変化

データは、平均値±標準偏差 (n=3) で示した。

焙煎温度・時間、抽出の際の pH や温度、キクイモの形態・形状などに影響を受けることが明らかになった。イヌリンの機能性を生かすためには、加熱温度や pH、水への溶出などを考慮し、イヌリンの損失の少ない調理・加工方法を用いることが必要である。

4 謝 辞

試料として用いたキクイモを提供していただいた、佐賀県三養基郡みやき町の真子生次様に深く感謝いたします。

5 引用文献

- 1) 武内純子：東京農業大学総合研究所紀要、**21**、84 (2010)
- 2) 横井健二、吉岡毅：Food Style *21*、**17**、29 (2013)
- 3) 実教出版編集部：“オールガイド食品成分表2018”、p. 52、54 (2018)、(実教出版)
- 4) M. Najima, T. Shirakawa, O. Ueki：診療と新薬、**55**、217 (2018)
- 5) 名嶋真智、白川太郎、植木音羽：診療と新薬、**55**、605 (2018)
- 6) 寺部茜、三嶋智之、柘植治人、和田正、早川享志：日本食物繊維学会誌、**9**、93 (2005)
- 7) A. Micka, A. Siepelmeyer, A. Holz, S. Theis, C. Schoen: *Int. J. Food Sci. Nutr.*, **68**, 82 (2017)
- 8) P. Ramnani, E. Gaudier, M. Bingham, P. V. Bruggen, K. M. Tuohy, G. R. Gibson: *Br. J. Nutr.*, **104**, 233 (2010)
- 9) Q. Yu, J. Zhao, Z. Xu, Y. Chen, T. Shao, X. Long, Z. Liu, Xiumei G., Z. Rengel, J. Shi, J. Shi, J. Zhou: *J. Funct. Foods*, **40**, 187 (2018)
- 10) W. Li, W. Li, J. Zhang, C. Yu, Q. Li, F. Dong, G. Wang, G. Gu, Z. Guo: *Carbohydr. Polym.*, **121**, 315 (2015)
- 11) 小嶋良種、吉川豊、安井裕之、小倉哲也：FFI journal of Japan、**217**、60 (2012)
- 12) 源田知美、森田達也：応用糖質科学、**6**、212(2016)
- 13) E. A. Trautwein, D. Rieckhoff, H. F. Erbersdobler: *J. Nutr.*, **128**, 1937 (1998)
- 14) 安田みどり、齋木まど香、児島百合子：西九州大学健康栄養学部紀要、**3**、1 (2017)
- 15) A. Boehm, B. Kleessen, T. Henle: *European Food Research & Technology*, **222**, 737 (2006)
- 16) K. Trabs, N. Kasprick, T. Henle: *European Food Research & Technology*, **233**, 151 (2011)
- 17) M. P. Luna, J. M. Aguilera: *Food Biophys.*, **9**, 61 (2014)
- 18) S.-C. Liu, D.-J. Yang, H.-Y. Chen, S.-L. Chen, M.-L.

Chen: *Int. J. Food Sci. Tech.*, **46**, 1768 (2011)

- 19) 石黒浩二、横田聡：日本食品科学工学会誌、**65**、7
(2018)
- 20) 横井健二、今井修：富山県食品研究所研究報告、**6**、
15 (2008)
- 21) 戸松誠：秋田県総合食品研究センター報告、**18**、17
(2016)
- 22) 本堂正明、橋渡携、奥村幸広：北海道立食品加工研
究センター報告、**6**、37 (2005)

Effects of Heating and pH on The Stability of Inulin Contained in Jerusalem Artichoke

Midori Yasuda, Moeka Ohgi, Madoka Saiki

Department of Health and Nutrition Sciences, Faculty of Health and Nutrition Sciences, Nishikyushu University

(Accepted: July 24, 2019)

Abstract:

Herein, the effects of heating and pH on inulin, a water-soluble polysaccharide contained in Jerusalem artichoke were investigated. The inulin in Jerusalem artichoke dry powder was reduced by roasting at a minimum of 160°C, likely due to the decomposition of inulin and caramelization reaction of fructose upon heating. Moreover, inulin was significantly reduced due to acid decomposition under strongly acidic conditions, which was more significant at increased temperature and longer heating times. The elution of inulin to water from raw Jerusalem artichoke was approximately 30% for the extraction at 40°C for 1 h and approximately 50% for extraction at 95°C for 10 min. In conclusion, inulin in Jerusalem artichoke was reduced by heating at high temperatures, strongly acidic conditions, and prolonged water exposure.

Key words : Jerusalem artichoke, inulin, heating, pH