

アガベから造られるテキーラ、 イヌリンなどの製品およびイヌリンの研究経過報告

Introduction to Products Made of Agave and Results
of Research into Inulin Production and Its Characterization

小倉 哲也^{a)}
Tetsuya Ogura

小嶋 良種^{b)}
Yoshitane Kojima

a) グアダラハラ自治大学化学科

Departamento de Quimica, Universidad Autonoma de Guadalajara

b) 株式会社アガベ
Agave Inc.

アガベから造られるテキーラ、イヌリンなどの製品およびイヌリンの研究経過報告

小倉 哲也^{a)} 小嶋 良種^{b)}

Tetsuya Ogura

Yoshitane Kojima

^{a)} グアダラハラ自治大学化学科

メキシコ合衆国ハリスコ州サボパン市ローマデルバイエ街パトリア通1201

Departamento de Química, Universidad Autónoma de Guadalajara
Av. Patoria #1201, Loma del Valle, Zapopan, Jalisco 44100, Mexico

^{b)} 株式会社アガベ

大阪府和泉市鶴山台4-7-3

Agave Inc.

4-7-3, Tsuruyamadai, Izumi-shi, Osaka 594-0013, Japan

Summary

Agave plants are not familiar in Japan but play diverse roles in Mexico, for example providing the starting material for tequila production. In this paper, some agave products and how to make them are introduced, with a description of progress of our research on inulin production in a pilot plant. Agave inulin was found to consist of a few to >150 monosaccharide residues, with very much greater solubility than other known inulins. Therefore, it is feasible to obtain products of good quality with agave inulin since the high solubility

facilitates homogeneity. Agave inulin is also expected to improve the taste and tongue sensation of food products and provide a stable quality. Its retention of 3 water molecules per monosaccharide unit points to applications in fabrication of cosmetics and medicines having high water retention characteristics. Moreover, agave inulin allows reduction of water activity of products to values as low as 0.8, at which food, medicinal and other products can be kept safely at room temperature.

1. はじめに

アガベは、乾性気候であるメキシコ国に原生するアロエに類似した多肉質の植物であり、国内では、リュウゼツランとして親しまれている。そのアガベ植物は、メキシコの砂漠で安定して栽培されており、気候変動に強いいため、その生産量は安定している。アガベ植物からは、そのアルコール発酵でテキーラ、プルケなどアルコール飲料が製造される。その際の発酵本体はアガベ植物に高濃度に含まれる良質のイヌリンの加水分解産物であることが知られている。また、アガベ植物から果糖を抽出し、アガベシロップを製造する技術も開発されている。アガベ・イヌリンの製造を目指すとき、加水分解の容易さが大きな障害になる。その上、植物の抽出液には植物由来の加水分解酵素、イヌリナーゼが含まれている。さらに、溶解度が極度に高いため、再結晶による精製工程を含めると、既存のチコリ・イヌリンとの経済的な競争力を失

うことになる。

イヌリンとは、チコリ、キクイモ、タマネギ、ニラ、ニンニク、ゴボウやバナナなど自然界に広く分布する多糖類であり、古くから人間が摂取してきた食材に含まれる食物繊維のひとつである。その性質は澱粉とは異なり水に溶けるが、消化されない。

現在、イヌリンは水溶性食物繊維として、整腸作用や血糖値の上昇抑制、血中脂質の低減など多くの効果が期待されている。特に、このアガベから抽出製造されたイヌリン（以降アガベ・イヌリンとする）は、他の天然イヌリン（主にヨーロッパのチコリを原料とするイヌリン）と比較して含有率（25～30%）が高く、高水溶性（様々な加工物に利用しやすい）であり、精製が容易という特徴を持つ。本稿では、キク科植物から離れて、アガベ植物のイヌリンに着目し、これからイヌリンの抽出、精製を行い、研究を開始した。

2. アガベ

アガベ・アメリカーナ (*Agave americana*) (図1) はわが国でも時々お目にかかる観葉植物である。欧米諸国ではセンチュリー・プラントと称され、100年の寿命があると珍重されるが、実際には10年を待たずに花をつけ、枯死する。この植物は約600種からなるアガベ科 (Agaveaceae) の中のアガベ属 (*Agave*) (約300種) に属する。アガベ属の植物は乾燥に耐える機能を獲得して、大多数がメキシコの砂漠ないし半砂漠地帯に自生する。

「アガベ」と言ってもすぐ植物を思い浮かべる人は少ないが、「テキーラ」の方は良く知られている。この蒸留酒はアガベの一種、アガベ・テキラナ (*Agave tequilana*) (図2、3) から造られる。このアガベは当地でアガベ・アスールと称される。アスール、azul、は「青い」の意で、葉の表面反射のせいで青みがかって見えるため、それを受けて、英語でもblue agaveと呼ばれることがある。アガベは地上に小さな幹を持ち、そこから葉が生じる。パイナップルをご想像頂きたい。こちらでは、葉は幹の上の方にだけ付いているが、アガベの幹では下の方から人の丈ほどの葉で覆われている。イチゴのような脇芽が地下を通過して地上に芽を出し (図1の右下に見える小さなアガベ)、これを株分けして苗にする。植苗後、6年ほどで花を咲かせる前に収穫する。まず、マチェーテ (Machete) と呼ばれる山刀で葉を落とし、図4の、長い柄の先に丸形のナイフを付けたヒーマ (jima) と呼ばれるものを用いて、プランテーション



図1. アガベ・アメリカーナ

に植わったまま葉を幹から5 cmほどの位置まで切り落とし、形を整え、根を切ると、図5で示すアガベ・アスールのピーニャが収穫される。ピーニャはスペイン語でパイナップルのことで、30~50 kg程もある大きなものだが、確かにパイナップルに似ている。

テキーラ製造のため、2004年現在、158,000ヘクタール¹⁾と言うから、東京都の7割余りの面積のプランテーションに植えられている。2005年には60,000m²のテキーラが製造され²⁾、その内約半分はメキシコ人のグラスを満たし、残りの大部分はアメリカ人の胃の腑に納まった。テキーラは原産地呼称が認定されており、原材料および生産地が厳しく管理されているため、限られた地域で栽培されるアガベ・アスールだけが用いられる。

糖類は、CO₂とH₂Oを使って、植物が光合成で造り出すものだが、人間を含めた全ての動物の生命を支えている。光合成にはC3およびC4型光合成と呼ばれる経路があり、ほとんどの植物はC3経路をとるが、乾燥して太



図2. 収穫期の近いアガベ、その1



図3. 収穫期の近いアガベ、その2

陽光が強い所に生育するトウモロコシ、サトウキビなどはC4経路を経る。C3植物はCO₂をまず3個のCを含む化合物、フォスフォグリセリン酸（C3有機物）に誘導するので、このように呼ばれる。それに対してC4植物は吸収したCO₂を4個のCを含む化合物（オキザロ酢酸やリンゴ酸）に変えて、一旦、細胞内に蓄え、別の細胞で光合成を行って、糖類を造り出す。そのため、夜間でもCO₂を吸収することができ、C3回路より効率が高くなる。ところが、空気中のCO₂濃度（0.04%程度）が低いので、光合成に使われる量を吸収するためには、気孔を長時間にわたって大きく開けておかなければならないので、水が大量に失われる。そのため、乾燥地に生えるアガベヤ



図4. アガベの収穫



図5. 収穫されたアガベのピーニャ

サボテンはC4に似た回路、CAM（Crassulacean acid metabolism）で気温の低い夜の間にだけCO₂吸収を行った後、C4化合物に変え、昼間はCO₂吸収を止めて、夜間に造ったC4化合物を光合成で糖類にしているの、水の使用効率が著しく高い。

1970年代の初頭、衝撃的なローマクラブレポート「成長の限界」⁵⁾が発行されて早や35年が経過したが、いまだ解決方法が見えていない。エネルギーだけは、バイオマス経由で、太陽エネルギー利用が可能かもしれない。しかし最大で、その上、緊迫した問題は水であろう⁴⁾。人類が利用している水のうち70%またはそれ以上が農業の灌漑に用いられていると言う。一方、世界の人口は1960年の30億人から2005年の65億人へと急増した⁵⁾。近年、人口増加率が劇的に低下したが、人口は減少せず、今後50年間に90億人に達するものと見込まれている。日本でも1975年以降、女性の生涯出産数が2を割り、それから30年以上経った現在、ようやく人口増加が止まった気配が見られ始めたばかりである⁶⁾。地球温暖化およびそれに伴う陸地面積の減少、降雨量への影響、と不安定要素が多いが、砂漠で育つアガベを使った糖類の生産には灌漑を必要としないので、食料生産のひとつの有力な選択肢になるだろう。

アガベが先史時代から主食として常食されていた事実は遺跡のコプロライト（糞化石）や菌の化石などから知られている⁷⁾。放射性同位体炭素14を使った年代決定で、9000年前からアガベが食用されていたことが分かる。アジア人が、氷の橋を渡って、アメリカ大陸に到着したのが12000年前とされているので、人類が初めて北米大陸の南端に達して間もなくアガベを食べ始めたのであろう。今でも、アガベを蒸して、甘くなったものを街で売っている。一万年続く伝統は珍しいと思われる。

アガベが成熟するとキオーテ（quite）と呼ばれる。花をつける為の茎が一本現れ、1日50 cmほど伸び、直径10 cm、高さ5 m余りになる。アガベプランテーションでは1 m前後伸びた時に切り取り、イヌリンの消費を防ぐ。農事労働者たちは切り取ったキオーテを持ち帰り、数時間ボイルし、甘くなったキオーテを食べる。

したがって、人類はアガベを将来の食品リストに加えるべきであろう。

3. アグアミエル

葉は根から吸った水と、葉で吸収した炭酸ガスを太陽光を使って糖に変える工場である。最初に造られる糖は主としてブドウ糖や果糖で、葉で造られた糖類は篩管を通過して運ばれるが、途中、2量体のショ糖、3量体のケストース、ネオケストース、ニストースなどに変わりながら幹に集められる⁹⁾。したがって、幹をくりぬいて穴を掘ると、そこに篩管から送られてきた甘い液汁が溜まる。これを汲み出したものをアグアミエル (aguamiel: 蜂蜜水の意) と呼び、メキシコ中でひろく飲まれている。特に、アガベの一種、*Agave lechuguilla* から汲み出したものはレチュギーヤと呼んで愛飲される。交通信号が赤になると、青いポリエチレン袋に入った100~200 mL 液体をレチュギーヤと叫びながら売りに来るが、これは砂糖水のようなものである。

4. プルケ

メキシコ高原の標高2000 mを超える寒冷地でプルケのアガベ (マゲイとも言う) (agave pulquero or maguey pulquero) と呼ばれ、直径4 m、高さ2 mにもなる、大きなアガベが栽培されるが、これは主として *Agave salmiana* を指す。これからアグアミエルを毎日汲み出すが、半年のうちに1.5 m³にもなると言う。このアグアミエルを発酵させたものをプルケと呼び、2000年ほど前に

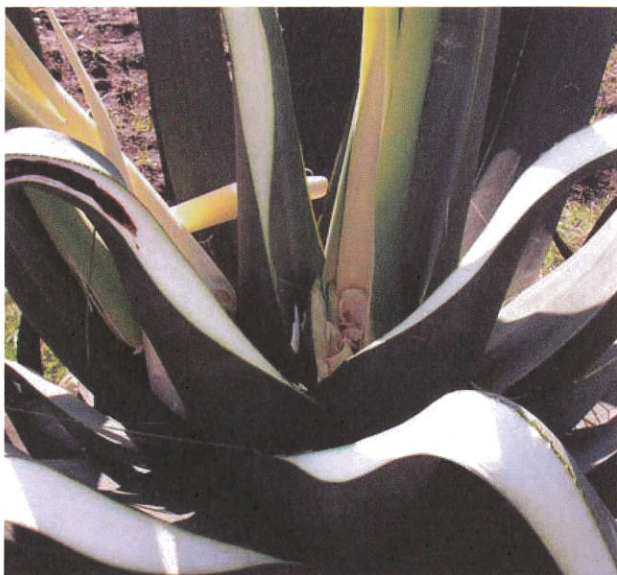


図6. アガベ・プルケ口の中心部の切り取り⁹⁾

建造されたピラミッドにプルケを造る神様の絵がある。

このアガベも成熟すると花を咲かせたあと、枯死する。花はローゼットの中心部から、ある日突然、花を載せるための茎が伸び始め、1日0.5~1 mほども成長し、6 mほどで花をつける。まず、花の咲く直前のアガベを探し出し、ローゼットを形造っている葉の外側を切り、中心に近づき、図6のように中心部を切り取る⁹⁾。この中心部にある成長点から全ての葉が生まれ、花が生じる。この成長点を壊すと、茎も葉も生じないが、切り取った部分にかさぶたができ、アガベは大きくなる。切り取ったあたりを掘り下げ、空洞を造ると、液汁が沁みってくる。図7のように瓢箪の側部に穴を開けて、そこから吸い出すこともある。

発酵は伝統的な手法がとられるが、色々な変法もあり、基本的には良いプルケを種 (スターター) として加える。プルケの微生物分析によると、酒やビールを始めとする殆どのアルコール発酵に用いられる酵母 *Saccharomyces cerevisiae* が常に見出されており、それ以外の数多くの酵母も見出されている。ザイモモナス (*Zymomonas*) というアルコール発酵性の細菌もプルケ製造に大きく寄与しているらしい。イヌリンを加水分解する微生物は特定されていないが、酵母にはイヌリナーゼ活性を持つものが多く、特に、高い活性を持つロドトルーラ酵母 (*Rhodotorula*) がアガベ・アスールのピーニャに頻繁に見つけられているので¹⁰⁾、そのうちに調べてみようと考えている。

プルケでは納豆のように糸を引くことが必須とされているが、これはリュウコノストック (*Leuconostoc*) と

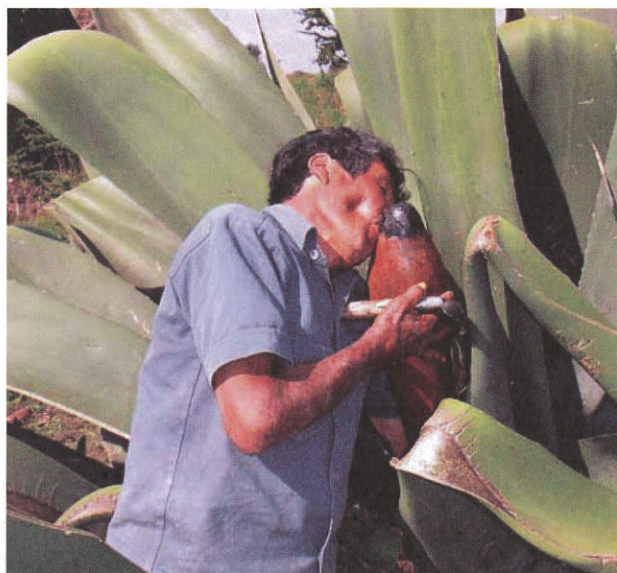


図7. 沁み出した液汁を瓢箪で吸いだす⁹⁾



図8. テキーラ山と山の裾野へとひろがるアガベ・アスールのプランテーション

いうデキストラン産生菌によるものである。この菌はサトウキビを搾って砂糖にする際、大変恐れられている菌である。一旦、この菌が繁殖すると、短時間の間に、搾り汁をねばねばするデキストランに変えてしまい、市場価値を失う。

5. テキーラ

テキーラはハリスコ州の首都、グアダラハラ市の郊外50 km位のところにある標高3000 mほどの山の名で、その麓、標高1000 mほどに同じ名前の街があり、アガベ・アスールのプランテーションが多く存在し(図8)、100以上のテキーラ醸造所が集まっている。この蒸留酒は約250年前、スペイン植民地時代に造り出されたと言う。

ピーニャは年間を通じて収穫され、テキーラ製造に供される。夏場、雲ひとつない炎天下での収穫作業は重労働である。3月になれば昼間は30度を超え、6月ごろまで毎日、温度が高くなる。6月に入れば、朝、夕にスコールが降り、気温が下がる。雨季は10月ごろまでで、砂漠地帯に生育するアガベは脇芽(イフエロ、hijuelo)が地上に顔を出した時から苗にするまで約1年、植苗後、約6年と合計7年かかって成熟する。たっぷり水と栄養分を蓄えたピーニャを、砂漠の中で飢えと渇きに苦しんでいる、動物や昆虫がよだれを流して狙っている。そのため、外敵に対する防御に多大の投資を怠るわけにはいかない。幹を取り囲んだ葉の先端は鋭く、硬い棘で守り(図9)、また、鋭い小さな棘で縁取られている(図10)。少し触れるだけで激痛が走る。棘には痛みを促す物質が塗



図9. 葉先の鋭い棘

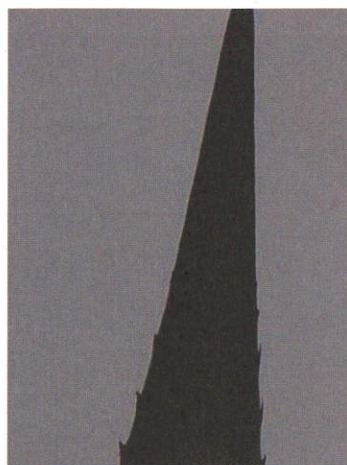


図10. 葉縁の鋭い棘

られているようである。

葉を切り落としてしまえばもう大丈夫と思いきや、切った付け根に触れると、1、2分経って猛烈なかゆみが襲い、赤く腫れ、痛痒さが一週間ほど続く。特に、女性でひどく、男性でも皮膚の薄い場所の被害が大きい。アガベのプランテーションで30~50 kgのピーニャを収穫し、エイヤコラとトラックに担ぎ上げる。この時、まず両手で抱え上げ、腹に載せ、首のうしろで担いでトラックまで運んで行く。農園労働者たちは、腹部と首筋の赤疹に苦しめられるが、年が経つと共に抵抗力が増加する。テキーラ蒸留所でも同じことが起こり、毎年、何人かは入院治療の憂き目を見る¹¹⁾。アガベ組織の至る所に無色透明な、両端が鋭く尖った針状結晶が見られる(図11、12)¹²⁾。

ご覧のように1ミクロンの細菌を串刺しにできるほど鋭い。苦もなく皮膚に突き刺さり、その上、大変脆いので搔くと細胞の中で小さく壊れる。結晶はシュウ酸カル

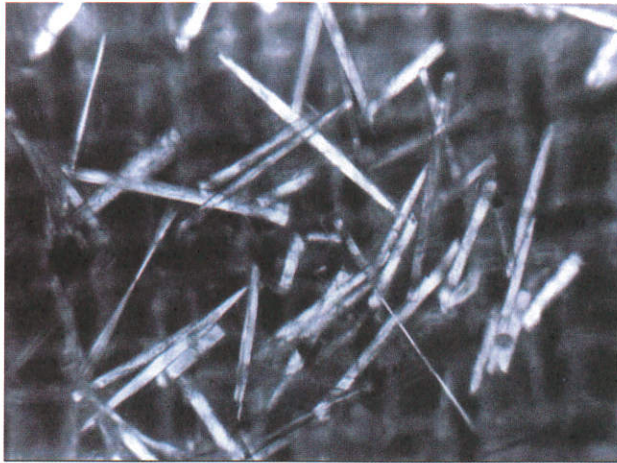


図11. アガベのシュウ酸カルシウムの結晶（ラファイド、raphide）偏光顕微鏡写真。背景の格子の一边は0.125 mm

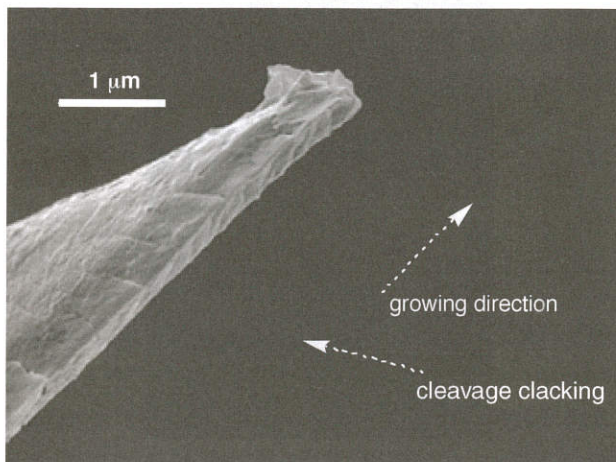


図12. ラファイドの電子顕微鏡写真⁹⁾

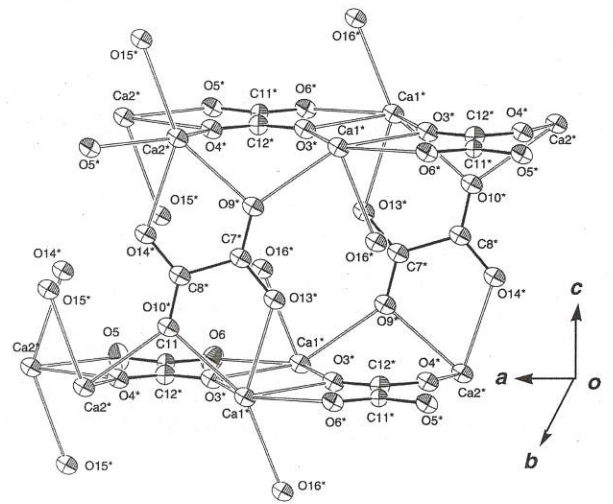


図13. アガベ・ラファイドの結晶構造¹²⁾



図14. 蒸気室へ運ばれるピーニャ

シュウムで、近年、結晶構造の決定（図13）¹²⁾に成功したが、これにはスプリング8のサイクロトロン放射を利用した。細胞内に残されたシュウ酸カルシウムはゆっくり分解されて遊離カルシウムイオンを生じ、細胞内のカルシウム濃度が増加するものと考えている。ちなみに、細胞内カルシウム濃度は 10^{-6} M、細胞外はそれより100倍ほど濃度が高い。

テキーラ蒸留所に運ばれたピーニャはとりあえず、中庭に積まれる。そこから、幅5 m、奥行き7 m、高さ3 mほどの土壁の部屋にぎっしり詰め込まれ（図14）、ボイラーのスチームで30時間ほど加熱されたあと、放冷し、取り出される。蒸したピーニャはあめ色になり（図15）、繊維が多いが、噛むととても甘い。ピーニャに含まれていたイヌリンが熱で加水分解され、果糖と少量のブドウ糖に変わったためである。工場ではナイフの刃を埋め込んだ軸を高速回転させて蒸したピーニャを叩き切る。次

いで、サトウキビ搾り機を大型にしたようなロール・ミルで搾りながら水を噴射して、糖類を抽出する（図16）。

糖分濃度を12~14%に調節し、発酵槽で発酵させる。蒸留所に棲みついた野生酵母を培養し、スターターとして用いることが多い。発酵を終えた液から遠心分離で酵母を分け採り、発酵に再利用することも行われている。スターターを使って発酵させると2日、遠心分離した酵母を使えば半日で終了する。定法通り、銅製の蒸留器（図17）でアルコール濃度を上げ、ステンレス製蒸留器でテキーラ（アルコール度40%）にする。最近、銅製の蒸留器を使わない所や、蒸留塔を使う所も出始めた。蒸留した後、寝かせないテキーラをブランコ（blanco、白い）またはホーベン（joven、若い）、3ヶ月以上寝かせたものをレポサード（reposado、休ませた）、もっと長

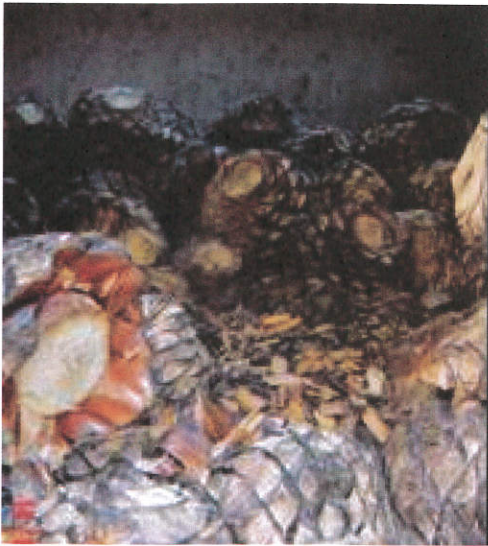


図15. 蒸したピーニャ



図17. テキーラの第一回蒸留

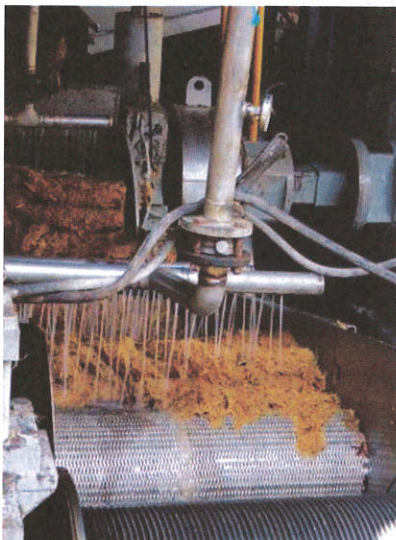


図16. 蒸したピーニャから糖類を抽出



図18. テキーラの寝かせ

く寝かせたものをアニェーホ (añejo、古い) と呼ぶ (図18)。

テキーラに似た蒸留酒はメキシコ各地に見られる一般名としてアグアルディエンテの名前が用いられ、中でも、メスカル、ソトール、バカノラ、ライシーヤなどが良く知られている。

6. アガベ・シロップ

アガベのイヌリンを加水分解して得られる糖は爽やかな甘味があり、大変美味である。メキシコではアガベ・アスールを始めとし、様々なアガベ種の搾り汁を加水分

解、濃縮してシロップとして販売されている。

アガベ・アスールはアガベ栽培業者が生産し、年間50万トンほどのピーニャが収穫され、その全量をテキーラ業者が購入していた。ところが市場価格は需要と供給に過剰に左右される。それを嫌って、2000年頃から、テキーラ業者が必要量のアガベを栽培するようになった。アガベ業者も栽培し続けていたので、2006～7年には需要量の2倍のアガベが収穫され、大きな社会問題となり始めた。そこで、2006年にはメキシコ農業水産省とハリスコ州が生産過剰のアガベをアガベ・シロップなど、テキーラ以外の製品にする事業に対して補助金を付けた。そのため、2007年には大量のアガベ・シロップが世界の市場に送り出されるものと考えられる。余ったアガベ・アスールを全てシロップに回したとすると、年間150万トンあまりの製品が得られる筈である。

アガベ・シロップの主成分は果糖なので、吸収されても血糖(ブドウ糖)にならない。ただ、果糖の一部はブドウ糖に異性化するので、その分だけが血糖値上昇に寄与するが、僅かなので、糖尿病に優しいと考えられている。果糖のグリセミック指数(血糖上昇率)は20～30と

言われ、これはブドウ糖による血糖上昇を100とし、同重量の果糖を摂取した時の血糖値上昇を表す。一方、果糖は体内で脂肪になるため、動脈硬化や脂肪肝が心配されており、取り過ぎには注意が必要である。

7. イヌリン

食物繊維の大切さが叫ばれて久しい。ADA（米国食物協会、American Dietetic Association）は2004年に、一日当たり20～30 gの食物繊維を摂取することを薦めており、同時に米国人はたった14～15 gしか摂っていないと嘆いている¹³⁾。FDA（Food and Drug Administration）も食物繊維の重要性を説いている¹⁴⁾。一方、厚生労働省研究班「多目的コホート研究（JPHC研究）」は、「食物繊維を多く取ったとしてもそれだけ予防効果が期待できるわけではなさそうだが、極端に少ない人では大腸がんリスクが高くなる可能性がある¹⁵⁾と報じている。

イヌリンは可溶性食物繊維に分類されているほか、プレビオティックスとして大変重要な役割を果たす。1999年に、米国栄養学会誌（*Journal of Nutrition*）がイヌリン特集を組み¹⁶⁾、以後、大いに注目を集めることとなった。人類を含め、ほとんどの動物はイヌリン加水分解酵素を持たないので、吸収されず、大腸に無傷でたどり着く。マイクロフローラ（菌叢）のなかにイヌリナーゼを分泌する菌があり、特に有益菌の代表、ビフィズス菌が有名である。したがって、イヌリンを含んだ食べ物を摂取すると、ビフィズス菌が優先的に増加することになる。その結果、有害菌の繁殖が抑えられる。その上、イヌリンの発酵過程で多量の乳酸などの有機酸が増え、ミネラルの吸収効率を高める。何よりも、便秘はてき面に改良される。お困りの方は、是非、一度、イヌリンの豊富な野菜類をお試しあれ。ただ、ビフィズス菌が増えるまでイヌリン摂取を数日間、続けなければならず、その後も摂取を怠ると、再び便秘が出現する。初乳にラクツロース（ガラクトースと乳糖からなる2糖類）が含まれ、イヌリンと同じ働きをする。このため、乳児のマイクロフローラがビフィズス菌で占められ、腸を有害菌から守っているものと考えられている。

筆者の一人は35年前に、メキシコに渡った時テキーラ製造工程に接し、イヌリンに興味を抱いた。当時、テキーラ業界では「アガベを加熱すると澱粉の加水分解で糖が生成して甘くなる」と言われていたが、1953年に、イ

ンドのSrinivasan^{17a)}がアガベ・ヴェラクルス（*A. vera cruz*）の幹に含まれている多糖がイヌリンであると報告している。同年、メキシコ国立自治大学のSanchez-Marroquin^{17b)}らもアガベ・アスールの炭水化物はイヌリンであることを提案した。これらの報告により、ピーニャのイヌリンが調理程度の加熱によって果糖とブドウ糖に変わることが理解できた。タマネギ、ニンニク、サツマイモが加熱調理によって甘くなるのと同じであろう。

アガベ・イヌリンの工業的生産方法を開発したいと思ったが、研究費の調達が叶わなかった。

将来、深刻な食料不足が訪れるまで待機することにした。前述のように、テキーラはピーニャに含まれたイヌリンをスチーム加熱で加水分解し、水抽出液を発酵させる。この際、ピーニャの積まれている場所によって加熱速度が異なる。また、熱伝対をピーニャに突っ込んで温度をモニターすると、温度の伝達が遅く、内部温度が沸点近くに達するのに約30時間かかることが分かった。それゆえ、十分蒸したピーニャは上に積まれたピーニャの重さで潰れやすく、蒸しの足りないピーニャは加水分解が不足する。また、蒸したピーニャから糖分を抽出する際、棲み付いた野生酵母や細菌類のコンタミが激しい。これらの短所を避けるため、ピーニャからイヌリンを冷水で抽出し、加水分解する工程を案出し、最大手のクエルボ（Cuervo）社に、クエルボ社とかかわりを持つ友人と連名で提案した。残念ながら何の返事も貰えなかったが、それから10年余りも経って、クエルボ社からアガベ・シロップ製造についての相談を持ちかけられ、その後、5年以上にわたり研究費を提供して頂くきっかけになった。

アガベ・アスールは植苗後、収穫までに6年を要する。収穫量が過剰になればテキーラ製造者に買い叩かれ、不足するとアガベ栽培者がテキーラ会社に高値を吹きかける。アガベが高騰すれば植え付け量が増え、値が下がれば植え付けを控える。そのため、大体6年周期で極端な高値、安値が繰り返されてきた。それに懲りて、1990年代から経済的に優位なテキーラ会社が、自社用のアガベを栽培し始め、今や大栽培業者になっている。結局、2006年には需要の倍量のアガベが生産されることが分かったのは2000年代の始めで、社会不安を恐れて、政府も重い腰を上げ、アガベをテキーラ以外の製品にする工業に補助金をつけ始め、2003年に、提出したイヌリンのプロポーザルにも、研究費をつけてくれた。国内では、昨年、中小企業基盤整備機構により、株式会社アガベから

メキシコへの業務委託として、アガベ・イヌリンの製造立ち上げが支援された。さらに、現在、建設中の会社で技術顧問として生産の指揮を執る幸運に恵まれている。

私達が得たアガベ・イヌリンについての新しい知見を以下にまとめる。

7-1. アガベ・イヌリンの製造工程¹⁸⁾

ピーニャの不溶部はたかだか6~8%である上、搾り汁には30%近いイヌリンが含まれる。ただ、イヌリンは加水分解を受けやすく、果糖になると甘味を生じ、品質のコントロールができなくなるばかりでなく、極度に乾燥が困難になる。それゆえ、加水分解を最小限に抑えるよう努力した。また、1 kgの不溶物に125~170 gの30%イヌリン溶液が含まれているので、原理的には搾るだけでかなりの割合の搾汁が得られる筈である。搾汁をイヌリンの生産に回し、不溶部（バガス）に残ったイヌリンは水を加えて回収し、アガベ・シロップおよびテキーラ生産に用いるものとして製造を考えた。

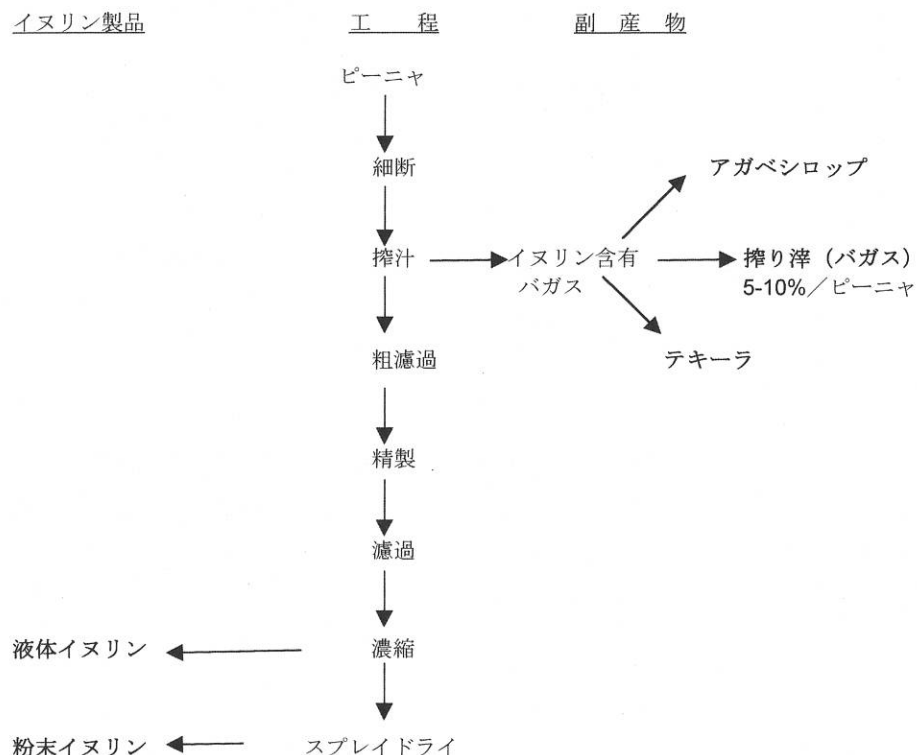
現在、パイロットプラント（1日あたり1~2 tのピーニャ処理）で実施している工程のダイアグラムをスキーム1に示す。

7-2. アガベ・イヌリンの溶解度

アガベ・イヌリンは非常に水に溶けやすく、75重量%以上の水溶液が得られる。言い換えれば、1 gの水があれば3 g以上のイヌリンを溶かすことができる。この時には、果糖ないしブドウ糖1分子が3分子の水に溶けていることになる。この驚くほど大きな溶解性はアガベ・イヌリン分子と水分子との間の強い親和力を示しており、この時の水分子は容易には取り除くことができない。すなわち、大きな保水性を示している。この大きな溶解度は、アガベが分枝の多いイヌリン¹⁹⁾を合成するためと考えられる。

メキシコの砂漠地帯に自生するアガベは、熱帯の雲ひとつない、灼熱の太陽に曝されながら、砂漠の乾燥に耐えて成長する。葉がアガベ表面を覆い尽くし、その表面は硬くて厚いクチクラで包まれ、さらに、その上にパラフィン様のロウがくまなく塗られている。CAM植物のアガベは涼しい夜の内に気孔を開いて炭酸ガスを取り入れ、フォスフォエノールピルビン酸と反応させてリンゴ酸を造る。太陽が射し始めると葉緑素で捉えた光エネルギーを使ってリンゴ酸を水と反応させ、糖を造り出す。

テキーラ製造用のアガベが栽培されている場所は一年間に3、4ヶ月ほど続く雨期の夕方に雨が降るだけの砂漠地帯で、アガベにとっては一年分の生活と光合成をこの



スキーム1. アガベ・イヌリンおよび副産物製造工程のダイアグラム

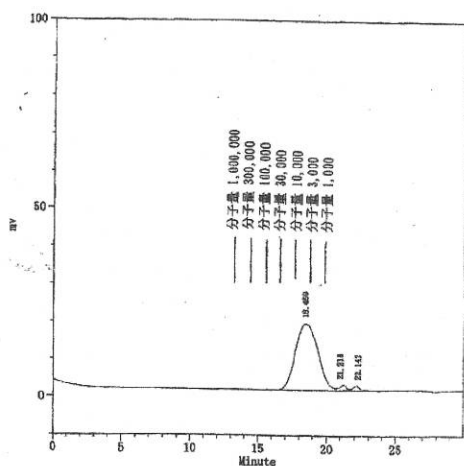


図19. アガベ・イヌリンのサイズ排除クロマトグラム

表1. アガベ・イヌリンの分子量分布

分子量範囲	ピーク面積百分率 (%)
1,000,000以上	微量
300,000-1,000,000	微量
100,000-300,000	0
30,000-100,000	微量
10,000-30,000	7
3,000-10,000	50
1,000-3,000	35
1,000以下	8

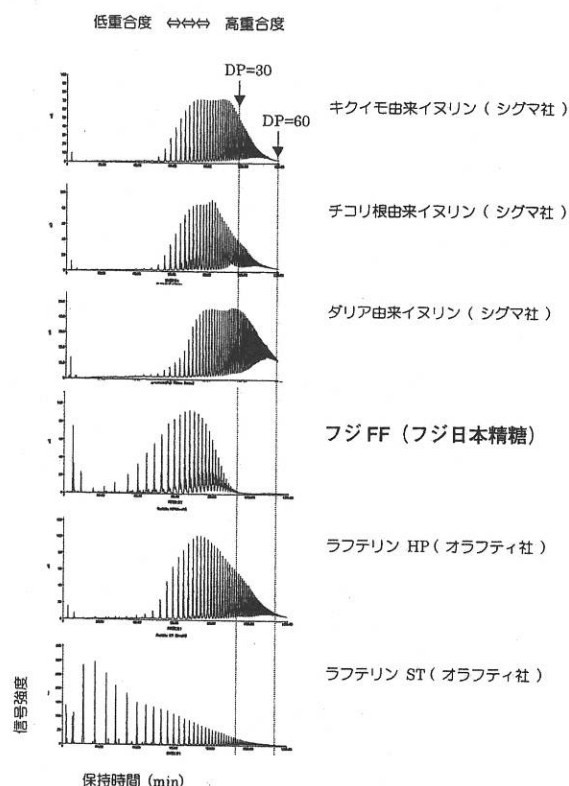
雨水だけに頼らなければならない。アガベ・イヌリンは、アガベの総重量の25%以上、4分の1以上を占めていて、葉の付け根と幹の部分に大量に蓄えられ、強い保水力がしっかり水を掴まえておく大役を担って、生命力の源となっているのではないだろうか。

7-3. イヌリンの分子量分布

アガベ・イヌリンのサイズ排除クロマトグラム (SEC) を図19に示す。日本食品分析センターに依頼し、TSKgel GMPWXLカラムを用いて実施したもので、図中に分子量標準試料の位置を示した。このクロマトグラフィーでは分子量が大きいほど早く流出し、21及び22分付近にメインピークから分離した小さなピークが見られ、低分子量のイヌリンの存在することが分かる。

表1に、図19を積分して求められたアガベ・イヌリンの分子量分布を示した。

アガベ・イヌリンと比較するため、図20に各種イヌリンのイオンクロマトを掲げた²⁰⁾。このクロマトグラフィーでは、SECと異なって低分子が先に流出することにご注意頂きたい。

図20. イオンクロマト分析装置による合成イヌリン、植物由来のイヌリンとの鎖長分散性の比較²⁰⁾

7-4. アガベ・イヌリンの安全性²¹⁾

メキシコ産アガベ・イヌリンの安全性評価のため、田辺R&Dサービスで実施し、雌雄マウスを用いて単回経口投与による急性毒性及び微生物を用いて変異原性を検討した。また、残留農薬分析はキューサイ分析研究所で実施した。

7-4-1. 急性毒性試験

アガベ・イヌリンの単回経口投与後の急性毒性について雌雄マウスを用いて検討した。アガベ・イヌリンを雌雄マウスに2000 mg/kg及び5000 mg/kgで単回経口投与し、その後2週間、一般症状の観察、体重及び摂餌量の測定を行い、観察期間終了時に剖検を行った。投与群において被験試料に起因した死亡はなく、観察期間中、一般症状、体重及び摂餌量に変化は認められなかった。観察期間終了時の剖検では、投与群の主要臓器・組織に異常な所見は認められなかった。本試験結果から、アガベ・イヌリンのマウス経口投与における最大無影響量と最大耐量はともに5000 mg/kgであった。

7-4-2. 変異原性試験

Salmonella typhimurium TA100、TA1535、TA98、TA1537及び*Escherichia coli* WP2uvrA菌株を用いてアガベ・イヌリンの変異原性を検討した。

試験の結果、直接法及び代謝活性化法で用いたいずれの菌株においても、アガベ・イヌリンによる処理群の復帰突然変異コロニー数は陰性対照群の2倍以上とはならなかった。以上の結果、本試験条件下において、アガベ・イヌリンは遺伝子突然変異を誘発しないことが判明した。

7-4-3. 残留農薬分析

475農薬の一斉分析を行った結果は、全て不検出であった。

7-5. アガベ・イヌリンの栄養学的性質

7-5-1. 難消化性とプレバイオティクス²²⁾

アガベ・イヌリンは、チコリ・イヌリンやキクイモ・イヌリンと同様、植物由来の水溶性の天然イヌリンである。砂漠地帯で、無農薬で栽培できるアガベ・イヌリンは、残留農薬の混入する恐れがほとんどない。また、よく知られてきた他の天然イヌリンは直鎖のため、水溶性が低い。一方、アガベ・イヌリンは分枝鎖構造を持つため、重合度はチコリ・イヌリンの2倍以上で、150を超えて分布するが、異常と言える程、高い溶解性を持つ。

ヒトはイヌリン分解酵素（イヌリナーゼ）を持たないため、イヌリンを消化できないが腸内細菌叢により生じた有機酸などの発酵生成物を吸収できるので、そのエネルギー値は2 kcal/gと解釈される。また、有益細菌（プロバイオティクス）のビフィズス菌はイヌリナーゼを持つため、イヌリンが供給されると繁殖するので、イヌリンをプレバイオティクスと呼んでいる。

7-5-2. 低水分活性

水分活性は微生物による変敗を防止する際の指標として用いられ、活性値が低いほど変敗防止効果が高い。水分活性が0.80に近づくと、微生物（細菌、酵母、カビ）は発育しなくなる（FDAの基準は、0.85である）。75%アガベ・イヌリン溶液の水分活性は、0.83と低い。

それゆえ、水分活性の高い、油断すれば腐敗する食品などにイヌリンを添加し、味を大きく変えないで、水分活性を落とすことができる。例えば、リング100%天然果汁30%、イヌリン55%を使ったシロップ状の製品の水

分活性は0.73と非常に微生物の繁殖しにくい製品になる。

7-5-3. 栄養成分

分析項目	含量(100g中)	試験方法
性状	白色微粉末	目視法
水分	2%	常圧加熱乾燥法
タンパク質	0.1%	ケルダール法
脂質	0.2%	酸分解法
灰分	0.2%	直接灰化法
炭水化物(イヌリン)	97.5%	100-(水分+タンパク質+脂質+灰分)
ナトリウム	30.0mg	原子吸光度法
亜鉛	0.25mg	ICP発光分析法

7-6. アガベ・イヌリンの物理化学的性質

- (1) 無味・無臭の白色粉末
- (2) 高水溶性（室温で、25 gの水に、75 gのアガベ・イヌリンが溶け、チコリ・イヌリン（ラフテリンST）の20倍以上の溶解度を持つ）
- (3) 難消化性であり、低エネルギー
- (4) 25℃、25重量%水溶液の動粘度はほとんどない（4.1 mm²/s）。70重量%水溶液の動粘度は、4,430 mm²/s
- (5) 食品の味質・食感改善効果を有する。

7-6-1. 動粘度

日本食品分析センターに依頼して、アガベ・イヌリン水溶液、25、50及び70重量%の動粘度をウペローデ粘度計により測定した結果を表2にまとめる。表に示される様にかかなり濃度の高い50重量%でさえ動粘度は低い。75℃、50℃、25℃において20℃での水の動粘度の11倍、22倍、65倍に過ぎないので、細い配管中でも容易に移動させることができる。70%を超えると急激に粘性が増加し、低温での流動性が落ちる。

7-6-2. 浸透圧

フジFF5%溶液の浸透圧（29.5 mOsm/kg）は、砂糖1%溶液の浸透圧とほぼ等しい。フジFFは砂糖と比較し

表2. アガベ・イヌリンの動粘度（mm²/s）

	測定温度		
	25℃	50℃	75℃
25%水溶液	4.1	—	—
50%水溶液	64.9	22.9	10.7
70%水溶液	4,430	—	—

—：試験せず

て浸透圧が低く、浸透圧性の下痢を起こしにくい。アガベ・イヌリンの浸透圧は、1、2、5及び10%溶液で、それぞれ4、8、23及び53 mOsm/kgであり、5%溶液の浸透圧 (23 mOsm/kg) は、フジFF5%溶液の浸透圧と比較しても、その浸透圧は低く、さらに、浸透圧性の下痢を起こしにくい食物繊維である。

7-7. アガベ・イヌリン複合体²³⁾

アガベ・イヌリンの単糖あたり、たかだか3分子の水を加えると溶液になるが、粉末イヌリンの単糖1個あたり2分子またはそれ以下の水を含ませると面白い様相を示す。0.5~1分子の水 (重量比でイヌリンの5~10%の水) の場合、粉末状を保ったままだが、加圧すれば成型でき、温度を少しかけるとより成型しやすくなる。それゆえ、鋳型に入れて思い通りの形の製品を造り出すことができる。もう少し多くの水を加え、加熱すると、非常に粘り半透明ないし不透明な液体になり、室温まで冷やせば飴状ないしガラス状の固体が得られる。

水の代わりに蜂蜜やシロップを用いても同じような製品が得られる。イヌリン分子に水分子が捉えられると、イヌリン分子間に働く水素結合がイヌリン-水の水素結合と入れ替わって、イヌリン分子が動きやすくなり、飴状やガラス状になるものと考えられる。また、少量の水を含む場合、粉体粒子の内部はイヌリン間の水素結合が残り、表面からイヌリン-水の結合ができるので、内部は固く、表面は柔らかくなり、圧着によって成型されるようになるものと考えられる。土を加熱して陶磁器を作る際、固体粒子の表面にガラス状溶融体が集まり、接着し、冷やすと固体になる (シンタリング) が、少量の水を含んだイヌリンを圧着によって成型する現象とよく似ている。我々はこのイヌリン製品を複合体と呼んでいる。

8. おわりに

アガベ生産業者により栽培されてきたアガベは、メキシコにおいて、長年にわたって、主に、テキーラの原料として用いられてきた。けれども、年によってアガベの値段が大きく変動するので、近年、テキーラ製造業者がアガベの生産に乗り出したため、アガベの生産過剰となり、アガベの値段が暴落する羽目に陥った。メキシコ政府は、大きな社会問題として、それらを放っておけなくなり、救済のため、アガベシロップなどテキーラ以外の

アガベ産業の支援に乗り出してきた。丁度、その時期に日墨共同研究として、アガベ・イヌリンの製造を立ち上げるきっかけを得ることになった。この機会に、再結晶を含まない製造法を開発したことにより、既存のチコリ・イヌリンとの経済的競争力においても負けない価格で、アガベ・イヌリンを提供することが可能になった。

アガベ・イヌリンは、グルコース残基にフラクトース残基が数個~150個を超えて、分枝して重合した高水溶性の植物繊維であり、今まで知られてきたチコリ、キクイモ、ごぼう、タマネギ、ニンニクなどに多く含まれている直鎖イヌリンと比べて、溶解度が桁違いに大きいことで、製品化のときに均一になりやすく品質の良い製品が得られる。また、アガベ・イヌリンは、その特性として風味や味質に改善効果が期待でき、食品の加工に用いたときに溶解度が高いためムラができにくく、安定した品質のものが提供できる。

その上、アガベ・イヌリンは、単糖当たり、3分子の水に溶解し、保水性の維持が大きいと、化粧品や医薬品など多方面への応用も期待できる。さらに、この大きな溶解度を利用し、水分活性を0.8以下まで低下させ、室温で保存可能な食品、医療品などを製造することができる。

謝辞：

この研究の一部はメキシコ国、FOMIX JAL 2004-01-34、によりサポートされた。アガベ・イヌリンの試作・製造立ち上げには、独立行政法人中小企業基盤整備機構事業化助成金によるメキシコへの業務委託として行われた。また、財団法人大阪市都市型産業支援センターにより、大阪府「平成18年度 大学発ベンチャー創出促進事業 (提案名：新規食品素材としてのアガベイヌリンの事業化)」として、支援された。

引用文献

- 1) Servicio de información y estadística agroalimentaria y pesquera. SAGARPA
- 2) Consejo Regulador del Tequila. http://www.crt.org.mx/esp/est_tequila.asp#
- 3) Donella H. Meadows, Dennis L. Meadows, Jørgen Randers and William W. Behrens III, "The Limits to Growth", Universe Books, New York, 1972, ISBN 0-87663-165-0
邦訳：メドウズ・ドネラ・H, メドウズ・デニス・L, ランダーズ・ヨルゲン, ウィリアム・W・ベアランズ三世『成長の限界』大来佐武郎監訳, ダイヤモンド社

- (1972).
- 4) a) S. ポステル, しのび寄る水資源危機 節水と食糧増産の両立は可能か, 日経サイエンス, **5**, 34-39(2001).
 - b) Sandra L. Postel, Gretchen C. Daily and Paul R. Ehrlich, Human Appropriation of Renewable Fresh Water, *Science*, **271**(5250), 785-788(1996).
 - 外務省: 第4回世界水フォーラム
 - 5) J. E. コーエン, 90億人が住む世界 激変する人口バランス, 日経サイエンス, **12**, 34-41(2005).
 - 6) <http://www.stat.go.jp/data/jinsui/2004np>
 - 7) a) Vaughn M. Bryant and Glenna W. Dean, The legacy of Eric O. Callen(1912-1970), Advances in the Interpretation of Pollen and Spores in Coprolites, Archaeological coprolites science, *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, **237**(1), 51-66(2006).
 - b) Glenna W. Dean, The science of coprolite analysis: The view from Hinds cave, Advances in the Interpretation of Pollen and Spores in Coprolites, *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, **237**(1), 67-79(2006).
 - c) Karl J. Reinhard and Dennis R. Danielson, Pervasiveness of phytoliths in prehistoric southwestern diet and implications for regional and temporal trends for dental microwear, *Journal of Archaeological Science*, **32**(7), 981-988(2005).
 - d) Paula Turkon, Food and status in the prehispanic Malpas Valley, Zacatecas, Mexico, *Journal of Anthropological Archaeology*, **23**(2), 225-251(2005), Elliott, M. Evaluating evidence for warfare and environmental stress in settlement pattern data from the Malpas valley, Zacatecas, Mexico, *Journal of Anthropological Archaeology*, **24**(4), 297-315(2005).
 - e) Steven R. Bozarth and Thomas H. Guderjan, Biosilicate analysis of residue in Maya dedicatory cache vessels from Blue Creek, Belize, *Journal of Archaeological Science*, **31**(2), 205-215(2004).
 - f) M. Smale, M. R. Bellon, J. A. Aguirre, I. Manuel Rosas, J. Mendoza, A. M. Solano, R. Martínez, A. Ramirez and J. Berthaud, Returns to investment in plant genetic resource conservation and crop improvement research, The economic costs and benefits of a participatory project to conserve maize landraces on farms in Oaxaca, Mexico, *Agricultural Economics*, **29**(3), 265-275(2003).
 - g) Callen E. O. Food habits of some pre-Columbian Mexican Indians, *Econ. Bot.*, **19**, 335-343(1965).
 - 8) Ning Wang and Park S. Nobel, Phloem Transport of Fructans in the Crassulacean Acid Metabolism Species *Agave deserti*, *Plant Physiol.*, **116**(2), 709-714(1998).
 - 9) Don Lotter, *Pan-American Adventure, Tepozotlan, Mexico*, http://www.newfarm.org/international/pan-am_don/sept04/pulque.shtml
 - 10) C. Beltran and T. Ogura, 未発表.
 - 11) M. L. Salinas, T. Ogura and L. Soffchi, Irritant contact dermatitis caused by needle-like calcium oxalate crystals, raphides, in *Agave tequilana* among workers in tequila distilleries and agave plantations, *Contact Dermatitis*, **44**(2), 94-96(2001).
 - 12) M. Tadokoro, Y. Ozawa, M. Mitsumi, K. Toriumi and T. Ogura, Raphide Crystal Structure in *Agave Tequilana* Determined by X-ray Originating from Synchrotron Radiation, *Chem. Lett.*, **34**(2), 236-237(2005).
 - 13) Eat fiber for health, http://www.eatright.org/cps/rde/xchg/ada/hs.xsl/home_4033_ENU_HTML.htm
 - 14) Why is fiber important to your diet?, <http://www.cfsan.fda.gov/~dms/qa-nut12.html>
 - 15) 野菜・果物摂取と大腸がんとの関係について—多目的コホート研究(JPHC研究)からの結果—, http://epi.ncc.go.jp/jphc/outcome/25/veg_fru_colon.html
 - 16) Supplement, "Nutritional and Health Benefits of Inulin and Oligofructose", *J. Nutr.*, **129**(7), (1999).
 - 17) a) M. Srinivasan and I. S. Bhatia, Carbohydrates of *Agave vera cruz*, *Biochemical Journal*, **55**, 286-289(1953).
 - b) Alfredo Sanchez-Marroquin and P. H. Hope, Fermentation and chemical composition studies of some species of agave juice, *J. Agric. Food Chem.*, **1**, 246-249(1953).
 - 18) 高水溶性アガベ・イヌリンの製造方法、アガベ・イヌリン製品、副産物、食品の製法及び飼料, 出願人: 株式会社アガベ, グアダハラ自治大学, 発明者: 小倉, 小嶋ら, 優先出願日: 2006.6.8. PCT国際出願番号: PCT/JP2007/61569. PCT国際出願日: 2007.6.7.
 - 19) M. G. Lopez, N. A. Mancilla-Margalli and G. Mendoza-Diaz, Molecular Structures of Fructans from *Agave tequilana* Weber var. azul, *J. Agric. Food Chem.*, **51**(27), 7835-7840(2003).
 - 20) 農林水産省総合食料局食品産業振興課推薦, "食品新素材有効利用技術シリーズNo15, イヌリン (フジFF)", 社団法人菓子総合技術センター, 2005.
 - 21) 社内データ(未公表).
 - 22) 橋川, "サプリメントと栄養管理", 細谷, 浜野監修, 日本医療企画, 2006, pp. 433-455.
 - 23) イヌリン複合体及びその製造方法, 出願人: 株式会社アガベ, 発明者: 小倉, 小嶋ら, 特願2006-243900, 出願日: 2006.9.8.

PROFILE

小倉 哲也

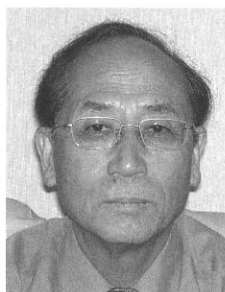
グアダハラ自治大学化学科
教授
理学博士



1937年生まれ、1962年大阪市立大学理学部化学科卒業、1969年同大学理学部より学位受理、1962~1972年同大学理学部化学科助手、1970~1971年アリゾナ大学化学科ポスドク、1973年グアダハラ自治大学化学科教授、2006年Inulina y Miel de Agave社およびアガベ社顧問、現在に至る。

小嶋 良種

株式会社アガベ
代表取締役
理学博士



1965年大阪市立大学大学院理学研究科修士課程修了後、同大学理学部助手、講師、助教、教授を経て、2002年定年退官、2002~2005年株式会社有田酵素化学研究所顧問、2002年大阪市立大学大学院理学研究科客員教授、2006年起業株式会社アガベ代表取締役、現在に至る。