

# キヌアの栄養学的特性と健康機能：世界の食料安全保障への 貢献が期待される作物

小西 洋太郎

畿央大学健康科学部健康栄養学科（〒635-0832 奈良県北葛城郡広陵町馬見中4-2-2）

## Quinoa with nutritional characteristics and health benefit: A promising food crop that contributes to world food security

Yotaro KONISHI

Department of Nutrition, Faculty of Health Sciences, Kio University  
(4-2-2 Umami-naka, Koryo-cho, Kitakatsuragi-gun, Nara 635-0832, Japan)

**要約** キヌア (*Chenopodium quinoa* Willd.) は7000年前から中央アンデス地方で栽培化された擬穀物である。気温、水、塩のストレスに耐性を示す種々な品種が存在する。キヌア種子はタンパク質含量が高く、かつ優れたアミノ酸組成を有し、またカルシウム、マグネシウム、鉄、亜鉛などのミネラルも多い。さらに、生活習慣病を防ぐ種々のフィトケミカルが含まれる。このようにキヌアは世界の食料安全保障に貢献する作物として注目されている。しかし、キヌアの開発にあたっては、生産の場において持続可能な農業生態系、生物の多様性を維持しながら進めていくことが重要である。

Keywords：キヌア, 栄養機能, 健康機能, 食品加工, 食料安全保障, 食料主権

### 1 はじめに：急増する人口と食料供給と健康

現在（2019年）世界人口は77億人、30年後の2050年には97億人（現在の1.3倍）に達すると予想されている。多くの学識者は、地球上で人が住める地域・場所は限られているので、地球の定員は100億人だろうと分析している。それだけの人口を養うには食料がどれだけ必要だろうか？ある試算では現在の農業生産の1.7～2倍が必要だという。単純計算すると、耕地面積も1.7～2倍必要になるということになる。限られた地球の陸地面積を考えると、そんなことは到底不可能である。では世界の農業生産の内訳はというと、小麦、米、トウモロコシ、ジャガイモの4大作物が総生産量の半分以上を占めている。つまり世界の農業は少数作物に依存しており、今後もその構図は基本的には変わらないといわれる。というのは、主食となるこれらの作物（トウモロコシを除く）の需要は、人口増でよりいっそう増える予想されるからである。しかし、今後地球温暖化の影響でこれら作物の生産量は伸びないだろうともいわれている。そうなれば主要作物を補う新たな作物の開発が必要となる。このように2050年に向けて食料問題は、水問題、エネルギー問題、環境問題、地球温暖化問題と密接に関連し、喫緊の課題となっている<sup>1-6)</sup>。

人間が健康で生きていくために必要な食料は量的だけでなく、安全性や質的にも配慮されなければならない。それを謳っているのが食料安全保障である。世界の食料安全保障とは国連が「低栄養・飢餓状態」からの脱却を目標にしてきた宣言である。内容は時代とともに変わってきたが、1996年FAO（Food and Agriculture Organization of the United Nations）主催の世界食料サミットで採択された食料安全保障は、「すべての人がいかなる時にも、活動的で健康的な生活のために、必要な食生活上のニーズと嗜好に合致した、十分に、安全で、栄養のある食料（食品）を物理的、経済的に入手可能である時に達成される」と定義されている。しかし、この定義は数値目標がなく、漠然とした感が拭えない（注1）。アマルティア・セン（Amartya Sen, 1998年ノーベル経済学賞受賞）は、「飢餓はある人にとってその国や地域に食料がないからではなく、十分な食料にアクセスする権原（けんげん, Entitlement）、すなわち権利、資格を持たない結果である」とし、世帯・個人レベルでの食料安全保障の重要性を訴えている<sup>7)</sup>。また、前述の世界食料安全保障の定義にみられる「活動的で健康的な生活のために」は、現在約8億人いる低栄養・飢餓の人たちだけでなく、同じく約8億人いるといわれ増え続ける過栄養・

肥満の人たちをも対象とすべきである。肥満者が活動的で健康であるはずがないからである。よく使われる用語である「栄養不良」とは栄養素の摂取の不均衡状態のことで、極端な状態は栄養素の不足（低栄養・飢餓）と栄養の過剰（過栄養・肥満）の両方を意味する<sup>8)</sup>。ChappelとLavall<sup>9)</sup>は、肥満と飢餓は食料安全保障の問題であり、同等に扱われるべきだと述べている。筆者も同感である<sup>10)</sup>。

本稿では、食料安全保障の目的を低栄養および過栄養人口をなくすことを前提に、世界の食料安全保障に寄与する従来の主要作物（米、小麦、トウモロコシ、ジャガイモなど）以外に、ここ数年来、にわかにグローバル作物として期待されるようになった食料資源、アンデス原産のキヌア（キノアともいう）（注2）を紹介したい。キヌアが注目される理由は、穀粒に含まれるタンパク質の栄養価が優れていること、微量ミネラルを多く含んでいること、また健康維持や生活習慣病のリスクの低減に寄与する種々のフィトケミカルを含んでいること、多様な加工・利用法があること、そしてキヌアは種々の環境ストレス耐性を示す種々の品種が存在することがあげられる。これらの特徴はグローバル作物へ昇格するための条件を満たしているといえるだろう。

最近、キヌアゲノムの概要配列が解明されたことにより、ゲノム編集技術によるさまざまな性質や特性、機能性を備えた品種が誕生することが期待される。しかし一方で、キヌアの世界的な需要の高まりにより、主生産国のボリビア・ペルーでは、価格の上昇、伝統農業、生態系、生活文化などの崩壊が懸念されている。

世界人口が100億人を超えることが予想される21世紀後半にむけて、私たちは安全で質の高い食料を確保できるのか、持続可能な農業・環境を維持するにはどうすべきか、これらの課題解決策をキヌアという一つの作物を通して考えてみたい。なお、最近、キヌアに関する学際的な専門書<sup>11-17)</sup>が刊行されているので、本稿でも参考にした。

## 2 キヌア小史

キヌアは約7000年前に中央アンデス地帯で栽培化された作物（図1）で、かつてインカ帝国の神聖で重要な作物であった<sup>18, 19)</sup>。「Mother grain」あるいは「Grain of the Gods」とよばれ、種まきには皇帝が金の鋤で畑を耕したといわれる。1532年ピサロ（Francisco Pizarro, 1478?-1541年）率いるスペイン軍によってインカ帝国は征服されたが、キリスト教を布教するスペイン人にとってキヌアは忌み嫌われ、栽培は禁止された。代わりにトウモロコシ（場所によっては小麦）の



図1 アンデス地方のキヌアの栽培

栽培が奨励されたという。後にキヌアの栽培は再開されたが、旱魃が起きても安定した収穫が得られたからだといわれる<sup>12)</sup>。

16世紀以降、新旧大陸の間で多くの作物の壮大な交流が行われた。新大陸（南北アメリカ）へは小麦、コーヒー等が伝わった。一方、旧大陸（アジア、アフリカ、ヨーロッパ）へ伝わったトウモロコシ、ジャガイモ、トマトは後に世界の主要作物となったが、キヌアは種子の形や色が既存の雑穀と似ていたため食用作物として重視されなかったらしい。また当時、キヌアは野生のアマランサスと混同されたことも一因だといわれる<sup>20)</sup>。その後キヌアは徐々に認知され、ドイツの地理学者フンボルト（Alexander von Humboldt, 1769-1859）は南米を調査した際、「ワインはギリシャ人のために、小麦はローマ人のために、キヌアは古代アンデスの人たちのために」と書き残している<sup>21)</sup>。ロシア/ソ連の遺伝学者バビロフ（Nikolai Ivanovich Vavilov, 1887-1943）は、多様な品種が存在するチチカカ湖周辺がキヌアの栽培起源であることを提唱し、既に定説になっている<sup>21)</sup>。

時代は下って、1974年アメリカ科学アカデミー（NAS）は、熱帯地域の農民の暮らしを向上させる目的で、経済価値が期待されるキヌアをはじめ低利用熱帯植物

穀類	タネナラ	砂漠に育つヒエ	油糧種子	ババサヤシ	アマゾンのココヤシ	
(4種)	アマランサス	アステカの高リン食品	(5種)	バフアローウリ	驚異の砂漠植物	
	キヌア	アンデスの高タンパク食品		カリオカ類	バターの木	
	アマモ	海のコメ		ジェセニア	南アフリカのアブラヤシ	
根菜類	アラカチャ	ニンジンイモ	ホホバ	砂漠の鮫油		
	(3種)	ココヤム	アメリカサトイモ	顔料作物	アルビダ	アフリカの畑の守護神
		タロイモ	非アレルギー食品		ラモン	ミルクの木
野菜類	チャヤ	メキシコの保健食品	(8種)	ストゥルティ	砂漠の高タンパク資源	
	バームハート	世界の珍珠		塩の木	塩を排泄する植物	
	トウガン	低カロリー食品		タマルゴ	塩の荒野に育つ植物	
	シカクマメ	熱帯の大豆		その他	フリチヤシ	生命の樹
果実類	ドリアン	果実の王	(8種)	ルテア	アマゾンのワックス源	
	マンゴスチン	果実の女王		カンデリア	砂漠のワックス源	
	ナランジラ	アンデスの黄金の果実		グアー	ガムを含む豆	
	ペジバエ	南アフリカのクリ		グアユール	砂漠のゴムの木	
	ザボン	熱帯のオレンジ		シルトグラス	海水に強い芝	
	サワーソップ	麝香の香りの果実		ラミー	高級天然繊維カラムシ	
	ウーベリーヤ	アンデスのブドウ		スピルリナ	未来の食糧	

36種（表1）の研究開発を奨励した<sup>22)</sup>。1960年代までキヌアはアンデスの農民が小麦などと物々交換する程度の作物であったが、1973年ボリビア政府は、キヌアの商業化を促進するためにパスタやパンには小麦粉の5%をキヌア粉に置き換えなければならないという法令を出した<sup>21)</sup>。ペルーでは、1980年以前は食料輸入額（約4億ドル）の80%を小麦が占めていたが、その後方向転換し、キヌアの栽培に力を入れるようになった<sup>21)</sup>。80年代に入り、キヌアは健康食品として市場がヨーロッパや北アメリカに広がった。

1993年アメリカ航空宇宙局 (NASA) は、近い将来、人類が長期滞在する宇宙空間という特殊な生態系でキヌアを栽培する計画「管理された生態学的生活支援システム, Controlled Ecological Life Support System (CELSS)」を発表した<sup>23)</sup>。

ここで、1961～2017年のキヌアの世界生産量の推移をみてみよう（図2）。NAS(1975年)およびNASA(1993年)の提唱によって生産量は若干増加しているが、2009年頃から急増し、国連国際キヌア年(2013年)を経て、2015年にピークに達している。図には示さないが、栽培面積も生産量とほぼ並行して推移している。2013年を境にしてみると、2008～2012年の5年間の世界の生産量（年間平均）は、8.2万トンであったが、2013～2017年の5年間の年間平均は15.8万トンとほぼ倍増している。内訳をみると、ボリビアでは3.8万トンから6.8万トンへと約1.8倍に増加、ペルーでは3.9万トンから8.6万トン（約2.2倍）に増加している。一方、栽培面積は2013～2017年の5年間で、ボリビアでは7.2万haから12.2万ha（1.7倍）、ペルーでは3.5万haから6.2万ha（1.8倍）に増えた。増加率はほぼ同じであるが、実際の栽培面積は、ボリビアはペルーの約2倍も広い。したがって、2000年以降の1haあたりの収量は、ボリビアでは0.38～0.65トンであるのに対し、ペルーでは0.87～1.68トンとかなりの差がある。

2016年、キヌアは日本食品標準成分表追補に記載さ

れた（食品番号01167）。またテレビ等マスコミでとり上げられるようになり、一躍知名度が上がった。現在、キヌアは国内の大手のスーパーやインターネットで入手できる。価格（1kgあたり）は1500～3000円（少量だと割高になる）。蒸しキヌア、ローストキヌア、パフキヌア、クリスピーキヌアなどの加工製品も市販されている。

### 3 植物学的特徴

キヌア (*Chenopodium quinoa* Willd.) は双子葉類ヒユ科アカザ属（注3）の一年生の双子葉類の植物で、アマランサス（ヒユ科ヒユ属）やソバ（タデ科ソバ属）と同様に擬穀物と呼ばれる（これに対し米、小麦などの単子葉類イネ科植物を穀類という）。ゲノム構造は異質四倍体（2n=36）である。キヌア植物体は1～3m、茎は直立しているかまたは枝分かれをしている<sup>24)</sup>。根の長さは1.8mにも及ぶ。キヌアは、湿度40～80%、気温4～38℃、年間降雨量100～200mmという環境条件でも栽培が可能である。また塩濃度の高い土壌でも生育できる、塩生植物（halophyte）（注4）である。

中央アンデス地方（北はエクアドルとボリビアの国境から南はチリの首都サンチャゴ辺りまで）は低緯度の熱帯地域であるが、標高によって気候はバラエティに富む。この標高差を利用してキヌアをはじめ種々の作物（たとえば、ジャガイモ、トウモロコシ、豆類など）が栽培されてきた。しかもそれぞれいくつかのエコタイプ（ecotype）が存在する。キヌア（野生種も含む）には約3000種のエコタイプ（注5）が知られているが、主な5つの栽培種を表2に示す<sup>19)</sup>。

このようなキヌアの環境に対する高い適応性はキヌアの遺伝子の変異し易いことを示し、同時に世界中に広まるゆえんといえる。主な生産国はボリビア、ペルー（2国で90%）であるが、アメリカ、エクアドル、カナダ、イギリス、スウェーデン、デンマーク、イタリア、ヒマラヤ、北インド、ブラジルなどに拡大している。

図2 キヌアの世界生産量（1961-2017年）

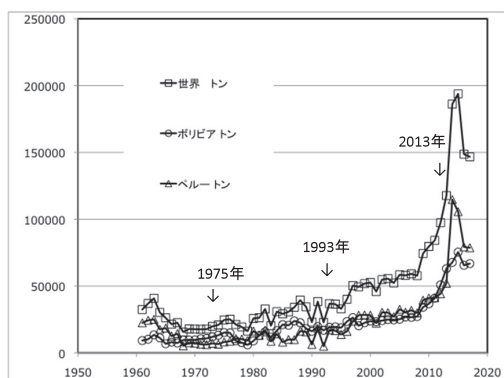


表2 キヌアのエコタイプ

タイプ	栽培地域	植物の形態	種子の特徴など
Sea-level	南緯40度付近のチリ中部・南部、海拔400m以下	高さ1.5m、成熟期間が短い、茎は一般に分枝しない	サイズは小さく均一、中程度のサポニン含量
Valley	ペルー北部の峡谷、海拔2500-3500m	高さ2.5mと大きく、茎は分枝している。成熟期間は長い（7ヶ月）	白っぽい、低サポニン、うどん粉病に強い
Altiplano	ペルー南部チチカカ湖周辺、海拔3600-3800mの寒冷平地。霜に強い。	高さ0.5-1.5mと小さく、茎は直立。成熟期間4-7ヶ月	品種改良が最も進んでいる。うどん粉病にかかり易い。低サポニン
Salt flat	ボリビア南部の乾燥地、年間降雨量300mm、海拔4000m、ワユ二塩湖畔、塩アルカリ土壌	アマランサスに似た花序。Quinoa real (Royal quinoa) と呼ばれる	種子サイズが大きい（直径2.2mm以上）、果皮が厚いためサポニン含量が高い。
Yungas	ボリビアYungas地方、海拔1500-2000m	高さ2.2m、緑色の植物体は成熟するとオレンジ色に変化する	小粒で色は白またはオレンジ色

出典：FAO 文献19) より、著者が一部改変



キヌアの種子は直径2～3mm, 厚さ1.5～2 mmの凸レンズ状をしており, 1000粒重量は2.5～3.1gで, アマランサス (0.8～1.2g/1000粒) よりもいくぶん大きい。種皮の色は, 白, 黄, 赤, 黒とさまざまである。図3に種子の構造を示す。中心部にはデンプンに富む外胚乳 (perisperm) があり, その周りに胚芽 (embryo) が取り囲み, そして種子全体が種皮 (seed coat) と果皮 (pericarp) で覆われている<sup>25)</sup>。ヒユ科のハウレンソウやアマランサスの種子も同じような構造である。

#### 4 栄養機能

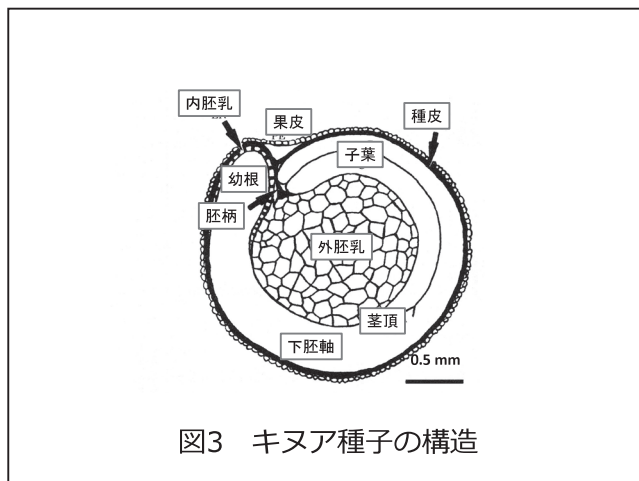
##### 4-1 一般成分

これまでにキヌアの成分に関する報告は, いくつかの成書や総説にまとめられている<sup>11-77, 26～35)</sup>が, 研究者によって数値にかなりの変動幅がある。その原因はキヌアの品種の違いや分析方法に起因するものと思われるが, Nowakら<sup>36)</sup>は, 特にビタミンとミネラルについては質の高い分析法が要求されるとコメントしている。表3にキヌアの成分値を示す。他の穀類と比較するため, 日本食品成分表2015 (七訂) の数値 (一部を抜粋) を採用したが, 表にはKoziolの総説<sup>26)</sup>とUSDA Nutrient Databaseの数値も参考にあげておく。

##### 4-2 タンパク質

###### 4-2-1 タンパク質の栄養価

表3に示すように, キヌアのタンパク質含量 (13.4%)



はアマランサスをはじめ他の穀類よりも多い。精白米の2倍以上もある。キヌア種子の貯蔵タンパク質は, Chenopodinとよばれる, 沈降係数11Sグロブリン (分子量320, 000, 六量体) と2Sアルブミン (分子量8, 000～9, 000, 二量体) である<sup>37, 38)</sup>。総タンパク質量の37%をグロブリン, 35%をアルブミンが占める<sup>39)</sup>。キヌア, アマランサス, ソバの3種類の擬穀物のタンパク質の物理化学的性質 (構造, 溶解性, 等電点, 乳化活性などの機能性) についての情報は食品科学・工学分野の重要な研究対象である。これらはJanssenら<sup>40)</sup>がまとめているので, ここでは詳しく触れない。

キヌアのタンパク質のアミノ酸組成に関する多くの報告があるが, 品種の違いや研究者によってかなり変動幅がある。しかし, それらの平均値はUSDA Nutrient Database<sup>36)</sup>に近い (表4)。キヌアのタンパク質の組成は, コメやトウモロコシで不足しているリシンが多く, WHO/FAO/UNUの必要量 (成人) を十分満たしている (表4)。生物価は71～83%で牛肉 (74%) とほぼ同様であり, コメ (56%), 小麦(49%), トウモロコシ (36%) よりも高い<sup>41)</sup>。消化率は加熱前では92%だが, 加熱調理後では95%に上昇する。

###### 4-2-2 タンパク質・ペプチドの機能性

キヌアタンパク質は優れた栄養価のみならず, 生物活性を示すことでも注目されている。心臓病リスクを高める一因である高コレステロール血症をコントロールする研究では, 高尾らの報告がある<sup>41)</sup>。彼らはキヌア種子から抽出したタンパク質がマウスの血中および肝臓の総コレステロール値を低下させることを観察した。さらに, その現象は消化管における胆汁酸の再吸収阻害, 肝臓におけるコレステロール生合成系の抑制と分解系の促進の両方に起因することを示唆する結果を得ている。このほか, 生理活性ペプチド<sup>42, 43, 44)</sup>については, 高血圧を防ぐアンギオテンシン変換酵素 (ACE) 阻害ペプチド<sup>45, 46)</sup>, 静脈内皮細胞の機能障害を防ぐペプチド, 抗糖尿病効果を示すオリゴペプチド<sup>43, 47)</sup>や, 血

表3 穀類・雑穀類の化学成分値 (抜粋)

	kcal	蛋白質	脂質	炭水化物	食物繊維	灰分	Na	K	Ca	Mg	P	Fe	Zn
	g												
	mg												
キヌア (玄穀)	359	13.4	3.2	69.0	6.2	2.2	35	580	46	180	410	4.3	2.8
キヌア (玄穀) *	399	14.6	5.6	64.4	13.4	3.4	12	927	149	250	384	13.2	4.4
キヌア (玄穀) **	354	14.1	6.1	57.2	7.0	2.4	6	649	54	227	527	5.6	3.6
アマランサス (玄穀)	358	12.7	6.0	64.9	7.4	2.9	1	600	160	270	540	9.4	5.8
そば粉, 全層粉	361	12.0	3.1	69.6	4.3	1.8	2	410	17	190	400	2.8	2.4
そば粉, 内層粉	359	6.0	1.6	77.6	1.8	0.8	1	190	10	83	130	1.7	0.9
トウモロコシ (玄穀)	350	8.6	5.0	70.6	9.0	1.3	3	290	5	75	270	1.9	1.7
小麦 (玄穀)	337	10.6	3.1	72.2	10.8	1.6	2	470	26	80	350	3.2	2.6
玄米, うるち米	353	6.8	2.7	74.3	3.0	1.2	1	230	9	110	290	2.1	1.8
精白米, うるち米	358	6.1	0.9	77.6	0.5	0.4	1	89	5	23	95	0.8	1.4

単位は 食品100g あたり。出典: 日本食品標準成分表2015年版 (七訂・追補2018年準拠) により抜粋。\* Koziol (文献26), \*\*はUSDA Nutrient Database (文献36) より。

表4 キヌア、コメ、トウモロコシのアミノ酸組成

	キヌア(a)	キヌア(b)	コメ(b)	トウモロコシ(b)	WHO/FAO/UNU必要量(成人)(c)
ヒスチジン	2.7(1.4-5.4)	2.9	2.4	3.0	1.5
イソロイシン	3.1(0.8-7.4)	3.6	4.3	3.6	3.0
ロイシン	6.0(2.3-9.4)	5.9	8.3	12.3	5.9
リシン	4.8(2.4-7.8)	5.4	3.6	2.8	4.5
メチオニン	1.9(0.3-9.1)	2.2	2.4	2.1	1.6
システイン	1.4(0.1-2.7)	1.4	2.0	1.8	0.6
フェニルアラニン+チロニン	6.3(2.7-10.3)	6.1	8.7	9.0	3.8
トレオニン	3.7(2.1-8.9)	3.0	3.6	3.8	2.3
トリプトファン	0.9(0.6-1.9)	1.2	1.2	0.7	0.6
バリン	3.7(0.8-6.1)	4.2	6.1	5.1	3.9

(a): 12の論文から引用した数値の平均 (最低, 最高値); (b) USDA nutrient data base (2013)より; (c): WHO/FAO/UNU(2007)より

糖値を下げるジペプチジルペプチダーゼIVの阻害活性と抗酸化活性を有するタンパク質の加水分解物が報告されている<sup>48)</sup>。

### 4-3 脂質

キヌア種子脂質含量は5～7%である。トウモロコシ(3～4%)よりも多い。種子の胚芽の細胞内小器官であるリピッドボディに貯蔵されている。Przybylskiら<sup>49)</sup>によると、中性脂肪画分のうち、約50%はトリアシルグリセロール(TG)で、ジアシルグリセロール(DG)は20%である。また、総極性脂質の57%はリゾホスファチジルエタノールアミンとリゾホスファチジコリンが占める。

多くの研究者の報告によると、総脂肪酸量に対する一価不飽和脂肪酸、多価不飽和脂肪酸、飽和脂肪酸の割合はそれぞれ25～28.7%、58.3%、19～12.3%である。したがって総不飽和脂肪酸量の割合は83～87%で、トウモロコシ油(73%)とほぼ同レベルである。主な不飽和脂肪酸はリノール酸(50%)、オレイン酸(23%)、 $\alpha$ -リノレン酸(5%)で、大豆油とほぼ同じである<sup>28, 35)</sup>。

FAO/WHO(2010)は乳幼児の脂質栄養について、カロリーの3～4.5%をリノール酸(n-6系)から、0.4～0.6%を $\alpha$ -リノレン酸(n-3系)から摂取するよう推奨している。n-6/n-3比でいえば、5～11.2となる。キヌア油のn-6/n-3比は6.2であり、FAO/WHO(2010)が推奨する範囲に入っている<sup>50)</sup>。n-6/n-3比の低い食事は心臓病、骨粗鬆症、炎症および自己免疫性疾患のリスクを低減する<sup>34, 51)</sup>といわれ、キヌア油のほか、イワシやサバの油、大豆油、なたね油、エゴマ油、チアシード油などがある。

### 4-4 炭水化物(デンプン)

キヌアのデンプン含量は52～69%<sup>29, 32)</sup>で他の穀類と同程度のカロリーを有する(表3)。種子の中央部の外胚乳(perisperm)(図3参照)の細胞内に多角形の小さなデンプン粒(直径1.0～1.25  $\mu\text{m}$ )として分布する。アマランサスのデンプン粒(直径1  $\mu\text{m}$ )よりもやや大きい。ジャガイモデンプン粒(直径65  $\mu\text{m}$ )に比べるとかなり小さい。モチ性は知られておらず、アミロース含量は4～20%(一般には10%以下)とかなりの変動があり、糊化温度にも影響してかなりの変動幅がある(57～71°C)<sup>11-17)</sup>。Inouchiら<sup>52)</sup>はアミロペクチンの微細構造を調べた結果、トウモロコシアミロペクチンと比較して、単位鎖長8～12の割合が高く、13～20の割合が低く、特徴的な構造であることを報告している。後述するようにキヌアデンプンは栄養機能よりも食品加工分野での機能性が注目されている。

### 4-5 食物繊維

日本食品成分表では、キヌアの総食物繊維量(TDF)は、6.2%で一般穀類の値と差がやや低い(表3)。しかし、Koziolがまとめた総説<sup>26)</sup>によると8～13%で、コメ、トウモロコシ、ソルガムより高い。この違いはおそらく品種や栽培条件(土壌、水の供給、ゲノタイプと環境の相互作用など)によるものであろう。またサポニンが分布する果皮を除去した試料(以下、脱穀種子)では食物繊維含量も低くなるので分析試料の選択には注意が必要である<sup>53)</sup>。Lamotheら<sup>54)</sup>は総食物繊維(TDF)の78%は不溶性食物繊維(IDF)、22%は水溶性食物繊維(SDF)と分析している(日本食品成分表でもほぼ同値)。IDFは主としてセルロース、SDFはホモガラクトロン(ペクチン)、アラビナンである<sup>53)</sup>。

### 4-6 ミネラル

キヌアの優れた栄養機能の特徴づけるものとして、高いミネラル含量(表3)があげられる。日本食品成分表(七訂)の数値は、Koziolがまとめた数値<sup>26)</sup>およびUSDA Nutrient Databaseと比べ、NaとPを除き、K、Ca、Mg、Fe、Znの含量はいずれも下回っている。詳細は不明だが、Naの高値についていえば、塩濃度の高い土壌で栽培された品種を分析した可能性がある<sup>55, 56)</sup>。

ミネラルの栄養は単に量だけで決められず、その化学形態が重要で生物利用率に大きな影響を与える。たとえば、フィチン酸やシュウ酸に結合したCaは不溶性で小腸から吸収されない。ミネラルの化学形態を知る手段の一つとして、著者ら<sup>56)</sup>はキヌア種子の断面の元素分布を走査型電子顕微鏡(SEM)にエネルギー分散型X線マイクロアナライザ(EDX)を取付けた装置で分析した。その方法の原理とは、試料表面に電子線を照射することによって飛び出してくる元素固有の特性X線を分析するもので、照射を二次元的に行うと、試料表面に分布する多元素のマップができるというわけである。この方法によってわかったことは、キヌア種子のCaの大部分は種皮・果皮に分布しており、植物細胞壁のペクチン(ポリガラクトロン酸)と結合していることが示唆された。また、P、Mg、Kは胚芽に、しかも3元素の分布が一致していたことから、Pはフィチン酸(イノシトール6リン酸)で、MgとKはフィチン酸に結合していることが示唆された(後述)。辻らのグループは独自に開発した微小部蛍光X線分析で同様の結果を得ている<sup>57)</sup>。さらに、キヌア種子が発芽するとCaの分布にほとんど変化はないが、Kは果皮周辺部から子葉および胚に移動することを観察した<sup>57)</sup>。

### 4-7 ビタミン

キヌアにはビタミン類も多く含まれる。特に葉酸(190  $\mu\text{g}/100\text{g}$ )は、アマランサス(130  $\mu\text{g}$ )とともに、



玄米 (27  $\mu\text{g}$ ), 小麦 (38  $\mu\text{g}$ ) トウモロコシ (28  $\mu\text{g}$ ) と比べ, かなり高値である. 2015年日本人の食事摂取基準によると, 日本人男女18歳以上の葉酸推奨量は 240  $\mu\text{g}/\text{日}$  (ただし, 妊婦には240  $\mu\text{g}/\text{日}$ , 授乳婦には 100  $\mu\text{g}/\text{日}$ をそれぞれ追加) なので, キヌア100gは約 80%を充足する. ビタミンB<sub>1</sub> (0.45 mg/100g) とビオチン (23.1  $\mu\text{g}$ ) は他の穀類とそれほど差はない. ビタミンC含量は日本食品成分表ではゼロと記載されているが, 多くの研究によると4 ~ 16.4 mg/100gと報告<sup>36)</sup>されており, 発芽すると増加する. ビタミンE ( $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$ ,  $\delta$ -トコフェロール) 含量 (6.8 mg/100g) はソバ (7.3 mg/100g) に次いで多い. Alvarez-Jubeteら<sup>58)</sup> は, キヌアとソバでは  $\alpha$ -トコフェロールが主で, アマランサスでは  $\beta$ -トコフェロールが主であると報告している.

## 5 フィトケミカルと健康機能

キヌアの生理活性物質 (ファイトケミカル) に関する総説<sup>31, 32, 35, 53, 59, 60, 61, 62, 63)</sup> には下述するような数種の物質を扱っている. 重複を避けるため各項目では引用を最小限に留める. 下述する生理活性物質の効果は, 単独のみならず, 複数の物質による相乗効果による可能性もある.

### 5-1 サポニン

サポニンは植物が生産するトリテルペンまたはステロイドをアグリコン (サポゲニン) とする配糖体の総称<sup>64)</sup> で, 特に豆類などの双子葉植物に多く含まれ, 穀物 (イネ科) など単子葉植物には比較的少ない. キヌアサポニンのアグリコンは主にオレアノール酸, ヘテラゲニン, フィトラッカゲニン酸で, これらのアグリコンのC3, C28位にグルコース, ラクトース, アラビノース, グルクロン酸などが結合している. これまでに16種のサポニンが検出されている. サポニンには高い起泡性, 溶血活性があるので, 鳥や昆虫からの防御する効果がある. それゆえ高サポニン品種は殺虫剤を使わない有機栽培に向いている<sup>59)</sup>.

サポニンはキヌアの食味を妨げるので, 通常, 食する前に除去される. ただし, 脱サポニン操作を必要とするのは苦味種 (0.47 ~ 1.13%) で, 低サポニン品種 (甘味種, 0.02 ~ 0.04%) は不要である<sup>65)</sup>. サポニンを除去するには水に浸漬するか, またはサポニンが局在する果皮・種皮を削り取る搗精法で, 後者はアンデス高地では大切な水を節約できる.

いずれの方法でも, 種子から除去されたサポニンは多彩な機能性を持つ. サポニンのもつ起泡性, 界面活性は, たとえば, 石けん, シャンプー, ビール, 消火剤, 化粧品など工業的利用が可能である<sup>66)</sup>. 生理機能としては, コレステロール低下作用, 抗炎症作用, 抗がん作

用, 抗酸化活性, 免疫賦活活性などのヒトの健康に関与するポジティブな効果が有することがわかってきた<sup>31, 50)</sup>.

### 5-2 フェノール化合物 (Phenolic compounds)

フェノール化合物は芳香族炭化水素にOH基が結合した化合物の総称で, 1分子内に一つのOH基をもつものを一価のフェノールとよぶ, 2つ以上のOH基が結合したものをポリフェノールという. 一つの芳香族炭化水素リングにOH基が結合した化学的に安定な化合物の総称である. フェノール酸, フェノール, フラボノイド, リグナン, フェニルプロパノイド等いくつかのグループに分けられる. キヌア種子に含まれる総フェノール化合物の含量は0.46 ~ 1.84 mg/gで, その主なものはコーヒー酸, バニリン酸である. 総フェノール化合物含量と抗酸化活性とは正の相関がみられる<sup>59)</sup>.

### 5-3 フラボノイド

フラボノイドは植物色素の一種である. 芳香族炭化水素の2個以上の水素が水酸基で置換された化合物の総称で, フラボノイド類, アントシアニン類, カテキン類, タンニン類, リグナン類等がある. フラボノイドは植物の種々の環境ストレス防御効果を示すことが知られている. たとえば, 塩によるストレス耐性 (前述) の獲得は分子育種学上のターゲットの一つとされており<sup>62)</sup>, キヌアの生産性を高めることに役立つ. フラボノイドはまた, 抗菌作用, 抗カビ作用を有するので, 食品の保存や食品のshelf-life (品質保持時間) を延長させ, 食品ロスを軽減することにも貢献する. さらに, フラボノイドは, その化学構造にもよるが, 抗酸化活性, ラジカル捕捉活性は細胞膜脂質の酸化を阻害するなど, ヒトの健康を増進させる働きがある<sup>62)</sup>.

### 5-4 ベタレイン

ベタレインは赤~赤紫色の色素で, ヒユ科植物 (キヌアやアマランサス) やサボテンなど苛酷な条件でも生育する植物に多い<sup>67)</sup>. 同色系のアントシアニン (フラボノイド類) とは同じ細胞には存在しないとされる. アントシアニンと異なり, 幅広いpHで安定であり, 熱処理後の色の回復がみられるなど, 新たな天然色素としての可能性が期待されている<sup>68)</sup>. 生理機能として, ベタレインは抗酸化活性を有し, LDL-コレステロール酸化抑制作用, 炎症性サイトカイン上昇抑制による抗炎症作用, 薬物代謝酵素誘導による肝臓保護作用を示す<sup>67)</sup>.

### 5-5 グリシンベタイン (Glycine betaine)

ベタインともいう. ベタインの前駆体であるコリンは, 細胞膜の機能と関係のあるリン脂質の合成に関与するビタミン様物質である. これら2つの物質 (ベタインとコリン) は糖尿病, 肥満, 心臓病の治療および予防

に関与するといわれている<sup>35, 69</sup>が、ヒトの体の中で十分な量が作れない。ベタイン含量の比較的高い小麦（玄穀）・小麦製品（174～706  $\mu\text{g/g}$ ）がベストとされているが、キヌアはさらにベタイン含量が高い（3,930～6,000  $\mu\text{g/g}$ ）ので、健常人のみならずグルテンフリー食が必要なセリアック病患者にとっても好適食材である<sup>15, 35</sup>。

## 5-6 植物エクジステロイド (Phytoecdysteroids, PES)

植物エクジステロイド (PES) についてはGlaf<sup>31</sup>が詳しく紹介している。化学構造が昆虫脱皮ホルモン (ecdysone) に類似しているため、昆虫に対する防御に関与しているといわれている。総PES量は138～570  $\mu\text{g/g}$ と、ホウレンソウ（40  $\mu\text{g/g}$ ）やヤマモ（20  $\mu\text{g/g}$ ）よりも多い。キヌアから13種類のPESが単離されており、20-Hydroxyecdysteroid (20HE) が最も多く（109～487  $\mu\text{g/g}$ ）、総PES量の62～90%に及ぶ。動物に対する毒性は低く（腹腔内投与のLD<sub>50</sub>=6.4g/kg; 経口投与のLD<sub>50</sub>=9 g/kg）、また投与後速やかに血中からクリアされる。さらに*in vitro*においてアンドロゲンとの結合や*in vivo*においてエストロゲン様作用はない。

Kiezsztsteinら<sup>70</sup>は、マウスに20HE（10 mg/kg）を13週間投与したところ、肥満の改善、インスリン感受性の向上を観察した。Wangら<sup>71</sup>は、マウスに高脂肪食に20HE（25～50 mg/kg）を添加した食餌を12週間与え、体重の減少、インスリン感受性の向上、筋脂肪の蓄積が低下することを認めた。Foucaultら<sup>72</sup>は、20HEは高脂肪食投与マウスにおいて、食餌性脂質の消化管での吸収低下、グルコース酸化およびエネルギー消費量の促進がみられることを報告している<sup>72</sup>。以上、興味がある研究だけに、今後さらなるヒトでの臨床試験が待たれる。

## 5-7 フィチン酸

フィチン酸（イノシトール6リン酸）は穀類や豆類に多く、植物のリンの貯蔵形態であり、各種ミネラルの貯蔵形態でもある。フィチン酸はCaやMgと結合し、水に不溶性のフィチンとなるので、動物やヒトにとってはミネラルの吸収率・生物利用率を低下させる抗栄養因子とされてきた。しかし一方で、フィチン酸には種々の機能性を示すことがわかってきた。抗酸化剤（たとえばFeで触媒される酸化還元反応を阻害）、活性酸素（スーパーオキシドアニオン）を生成するキサンチンオキシダーゼ活性阻害、小腸上皮への酸化剤による損傷抑制、脂質過酸化の初期段階のADP-Fe-酸素の複合体形成への干渉、発がん物質と細胞との相互作用の抑制、ガン細胞の増殖速度の低下、またナチュラル

キラー細胞の活性亢進による免疫応答の向上、腎結石の形成阻害など多くの機能性を示す<sup>41</sup>。

キヌアに含まれるフィチン酸は1.05～1.35 g/100g<sup>26</sup>で、小麦（2.3～6.0 g/100g）よりも低い。総Pに対するフィチン酸Pの割合は19.7～41.9%で小麦（60.3%）よりも低い<sup>73</sup>。

## 5-8 ヒトの臨床試験

### 5-8-1 心臓病, 肥満, 糖尿病

キヌアの生体調節機能に関する細胞レベルや実験動物を用いた研究は数多くあるが、ここでは最近ようやく増えてきた、ヒトを対象とした臨床試験をまとめた総説<sup>31, 41, 60</sup>からいくつか紹介することにする。

Rualesら<sup>74</sup>は4-5歳の低栄養状態の幼児に、キヌア食（100 gを1日2回）を15日間与えた。コントロール食と比べ、体重増加の指標となる血漿IGF-1 (insulin-growth factor) レベルが上昇、キヌアを基本とする食事は子供の栄養失調を減少させる役割があることをアピールした。Farinazzi-Machadoら<sup>75</sup>は22人の健常人（18～45歳）にキヌアバー（quinoa bar）25 g（9.75 gのキヌアを含む）を1日2回、30日間与えたところ、血中TC, TG, LDL-コレステロール値がいずれも有意に低下を観察し、心臓病のリスクを下げるかもしれないと提唱した。Liら<sup>76</sup>は過体重の男性28名にキヌア20 gを含むパン食を28日間食べてもらおうと、血糖値およびLDL-コレステロールが有意に下がることを報告している。Gabrielら<sup>77</sup>は、12名の健常人（22～40歳）および12人のII型糖尿病患者（40～68歳）を対象として、朝食にキヌア食を中心とした食事（QB）、同様にソバ食を中心とした朝食（BB）、小麦パン（コントロール）食を供し、摂取後2時間までの血糖値の変化を調べた。その結果、健常人群では血糖値のAUC (Area Under the Curve) はQB群>BB群であったが、糖尿病患者群ではQB群, BB群ともにコントロール食群と比べ有意に低下していた。

De Carvalhoら<sup>78</sup>は、35人の月経後期の肥満女性にキヌアフレークを25 g/日を4週間与えた。コントロール食（コーンフレーク食）と比べ、有意にTC, LDL-コレステロール値はいずれも有意に低下し、キヌア食は代謝パラメータをよい方向に調節することを報告している。Navarro-Perezら<sup>79</sup>は過体重および肥満患者にキヌアを50 g/日を12週間与えると、血中TGレベルが有意に下がり、メタボリックシンドロームの罹患率が70%低下したと報告している。また、Abellanら<sup>80</sup>は前肥満者30人にキヌア食（20 g/日）を28日間食べてもらおうと、BMI, HbA1cの減少、空腹時の血糖値が維持でき、満腹感も増加したと報告している。



## 5-8-2 セリアック病

セリアック病は自己免疫疾患の一種で、小麦製品に含まれるグルテンに対して体内の免疫系が過剰な反応を起こし、小腸粘膜障害が生じる。このため栄養成分の吸収不良を起こし、嘔吐、腹痛、下痢などの症状を示す。セリアック病患者にはグルテン食を避けることが基本である。免疫学的にキヌアタンパク質はセリアック病患者には毒性を示さないことが分かっているため、キヌアはグルテンフリーの高栄養食材として注目されている<sup>53)</sup>。Zevallos ら<sup>81)</sup>は、19人のセリアック病患者に調理したキヌアを50 g/日、6週間与えた結果、すべての腸内パラメータ〔微絨毛の高さと深さ、腸細胞の高さ、腸細胞100個あたりの腸管上皮細胞間リンパ球 (intra-epithelial lymphocyte) の数〕が改善されたと報告している。またHDL-コレステロールはやや下がったが、トリグリセリド、総および LDL-コレステロール値は正常範囲であったことから、セリアック病患者食として安全であることを示した。

## 6 キヌア加工と応用および技術イノベーション

### 6-1 伝統的な調理・加工法

キヌアの利用形態は、全粒または製粉して利用する場合に大別される<sup>82)</sup>。全粒の加工調理操作には、ボイル (サラダのトッピング、スープの具、粥などに使用)、焙煎 (キヌア茶) などがある。粉を利用する場合、パン、蒸しパン、蒸し団子、揚げパン、ケーキ、ビスケット、クッキー、パスタ、キヌアミルク等がある<sup>83)</sup>。キヌアミルクとは、水でサポニンを除去したキヌアをオートクレーブ処理でデンプンを糊化させ、次いでアミラーゼでデンプンを糖へ分解し、植物油を1%添加しミキサーにかけた飲料である<sup>84)</sup>。キヌア粉を小麦粉に添加する場合、パン作りなら40%添加までなら可能、パスタ、ケーキ、ビスケット作りなら、それぞれ40%、60%、70%添加は可能である<sup>19)</sup>。最近筆者らの研究室で、キヌア粉を種々の前処理 (コントロール、乾熱処理、オートクレーブ処理、水浸漬による脱サポニン) を行い、乾燥後、小麦粉の20%をそれらのキヌア粉に置き換えてパンを作った。その結果、おいしさ (味、香り、テクスチャー) や物性の観点からみると、従来から行われている水浸漬による脱サポニンしたものが最も評価は高かった<sup>85)</sup>。新しい加工食品としてパフ、フレーク<sup>86)</sup>のほか、エクストルーダー加工法<sup>87)</sup>による新しいスナック食品などがある。また、キヌアの発酵食品としては、クモノスカビ (*Rhizopus oligosporus* Saio) を使ったキヌアテンペ<sup>83, 88)</sup>は大豆テンペよりもイソフラボンレベルは低下するが、必須アミノ酸量が増加する。また、発芽キヌアを加熱後すりつぶし、乳酸菌で発酵させる

ヨーグルトのような飲料が試作されている<sup>89)</sup>。

### 6-2 工業的利用

キヌアのデンプン粒は極小粒ゆえに単位重量あたりの表面積が大きいので、水分吸着量が大きい。また糊化後、凍結融解に対して安定で老化しにくい。これらの性質を利用して、さまざまな工業的利用が検討されている。たとえば、化粧品の分野でベビーパウダー、ゴム製タイヤのカビ取り剤、伸張性が重要なキャリアバッグ製造への利用、老化しにくい性質を利用した冷凍食品やエマルション食品への利用が考えられている<sup>31)</sup>。金ナノ粒子を取り込んだデンプン粒を抗菌バイオフィルムとして機能性食品包装に使う<sup>90)</sup>ことも検討されている。キヌア由来の製品や成分の機能性に関する特許は年々増えている<sup>31)</sup>。

### 6-3 分別した組織の利用

平野と小西<sup>55)</sup>は、精米機と精麦機を巧みに調整して、キヌアの種子を果皮・種皮、胚芽、外胚乳の3つの部分に分画した。重量比はそれぞれ7.9%、23.2%、68.9%であった。一般成分値を表5に示す。分画前の各成分値を基準にすると、タンパク質と脂質は胚芽に多く、炭水化物 (デンプン) は外胚乳に、灰分と食物繊維は果皮および胚芽に多く存在していた。そこでこれら組織の成分の特徴を生かした新たな利用法が考えられる。たとえば、タンパク質と脂質に富む胚芽は、脱脂後、脂質はn-6/n-3比の低い機能性油として、タンパク質はプロテインパウダーとしてサプリメント等に利用できるだろう。キヌア種子重量の約80%を占める外胚乳は水分を除くとほとんどデンプンなので、そのまま、たとえば醸造酒づくりの原料として適しているのではないかと考えられる。

筆者らはキヌア種子の搗精過程で生じる、果皮画分 (Quinoa pericarp fraction, QPF) の利用に関する研究を行なった<sup>91)</sup>。1%コレステロール食 (コントロール食) でマウスを一週間飼育すると、血漿コレステロール値は150 mg/dlから210 mg/dlに上昇する。この

表5 キヌア種子画分の化学成分

	玄穀	種皮・果皮	脱穀種子	胚芽	外胚乳
水分	11.7	12.2	11.3	12.1	11.1
粗タンパク質	12.9	5.3	13.5	34.6	6.1
脂質	4.9	1.4	5.2	14.4	2.1
炭水化物	67.5	72.8	67.5	32.0	79.7
灰分	3.0	8.3	2.5	6.9	1.1
小計	100	100	100	100	100
総食物繊維	5.0	14.5	4.7	13.7	1.7
サポニン	0.97	8.23	0.32	0.22	0.12

単位はg/100g。炭水化物は差し引き法で求めた。  
出典：文献55より一部改変。



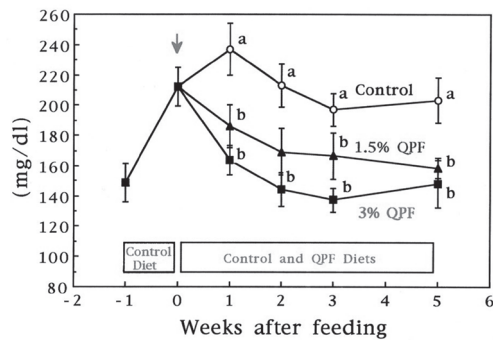


図4 キヌア果皮食の血漿コレステロール上昇抑制作用

時点で3群に分け、コントロール食（継続）、1.5%および3%QPF添加食を与えると、QPF添加食の2群は血漿コレステロール値が徐々に下がり、5週目には、コレステロール無添加食（実験開始前の値）にまで低下することを観察した（図4）。血漿コレステロール上昇抑制作用は、その後の研究で、果皮中の高分子ペクチンの関与が示唆された<sup>92)</sup>。

## 7 ローカル作物からグローバル作物に向けて

### 7-1 キヌアと食料安全保障

これまでみてきたように、キヌアは温度、水不足、塩に耐性があり、他の作物が育たない環境でも栽培が可能なこと、また高栄養価、生理活性を有する種々のフィトケミカル、種々の加工特性を持つことから、世界の食料安全保障への貢献度の高い作物の一つであることが理解できよう。また、種々の機能性成分の食品産業、健康産業にはビジネスチャンスがあるだろう。

しかし、キヌアの世界生産量（約15万トン）は米や小麦の1%にも満たないため、誰もが「入手可能」な食品とはいえない。普通に考えれば、生産量を増やせば価格も下がり、入手可能になる。生産量を増やすには、栽培面積を増やすことが手っ取り早いですが、アンデスの山間部では限界がある。それよりも育種によって良質で多収穫の品種を開発し単収を上げることが考えられる。

その方策として、地域適応型品種の開発と遺伝子操作技術による育種があげられる。地域適応型作物の導入の目的は、地域の植生が生存を許す作物を選抜することである。これによって過剰な農薬や肥料施用による環境負荷を低減することができる<sup>93)</sup>。すなわち、生態系を重視した持続可能な農業を目指している。同一品種でも環境条件によって成分が変化することはよく知られているが、キヌアについては先述したように世界各地で試験栽培が実施されており成果が上がっている。筆者もアルゼンチンのゴンザレスらが進める共同

研究に参画した。ボリビア原産のキヌア10品種を現地とアルゼンチンの2箇所で栽培した植物の生長、種子の大きさや収量、成分組成について比較したところ、ある品種はアルゼンチンに導入した方が、収率やタンパク質含量が高まることがわかった<sup>94)</sup>。その品種にとってベターな栽培環境が見つかったわけだが、繰り返し試験が必要である。

育種には二通りがある。従来どおりの交配による育種は、時間がかかるが、持続可能な方法でありで人々に受け入れられている。それに対し、最近、遺伝子操作による育種法として期待されているのがクリスパーCas9に代表されるゲノム編集の導入である。すでに、多収穫イネ、高GABA含有トマト、変色しないキノコ、筋肉量の多い牛やマダイなどさまざまな農水畜産物が登場している<sup>95)</sup>。従来の遺伝子組換え（GM）作物では外部遺伝子を挿入するのに対し、ゲノム編集では自然界で起きる遺伝子変異と同様の変異〔今のところは主として特定遺伝子の削除（ノックアウト）〕を早く正確に行うことができる。したがって、ゲノム編集作物は従来の交配によって改良された作物と区別できないとされ、アメリカではすでにラベル表示は省略され、日本でも省略される見通しである。しかし、ゲノム編集といえども人間が意図的に遺伝子を操作していることには変わりはないという主張があり、遺伝子組換え食品との違いや安全性を巡って、研究者の間および消費者の間で論争中である。仮にゲノム編集食品が市場に出回っても、買うか買わないかは消費者が決めることなので、もし売れ行きが悪ければ、日持ちするトマトとして開発されたGM作物のように、市場から消えるだろう。したがって開発者、業者はそうならないような戦略を考えるだろう。

話をキヌアに戻すと、ゲノム編集によるキヌアの品種改良は現実味を帯びている。最近キヌアのゲノム概要配列が解読されたからである（注6）。国際農林水産業研究センター、京都大学など産学官の共同研究グループは、京都大学で約20年以上他の品種との交雑がなかった単一のキヌア系統をもとにして、自殖系統Kd（この系統自身は高い耐塩性を示す）を確立し、Kdから全DNAを抽出し、世界で初めてゲノムの概要配列（Draft sequence）を解読した<sup>99)</sup>。キヌアの推定ゲノムサイズは15億塩基で、その73%にあたる11億塩基の解読に成功した。機能が推測できる遺伝子は62,512個あるという。キヌアゲノムデータベースは公開されている（<http://quinoa.kazusa.or.jp/index.html>）。ゲノム編集で良質で多収穫の品種が開発されれば、人々は安く入手しやすくなるだろう。Jarvisら<sup>100)</sup>は苦味成分サポニンの生成を調節する遺伝子を同定し、低サポニ

ン品種の開発に一步を踏み出した。このように、今後、キヌアの形質や特徴を活かした新品種の育成はスピードアップするだろう。

## 7-2 キヌアと食料主権 (Food sovereignty)

世界的規模でキヌアの需要が高まったことは、生産国であるボリビア、ペルーにとってキヌアを輸出用作物として外貨を稼ぐことになり、国益につながる。しかしその一方で、自国の庶民（特に貧困層）にとってキヌアは高価で手が出ないことを意味する。イギリスの一般紙Guardian紙の記者は以下のような報告（2013年）をしている<sup>101</sup>。要約すると、「2006年から5年間の間にボリビアでは市場価格が3倍に値上がりした。生産者の農民たちの収入が増えたが、キヌアの代わりに安価な米や小麦、パスタ、キャンディ、コーラといった食生活の欧米スタイルを求めるようになった。キヌアは儲かる作物だとわかると、都市に移住していた人たちは荒れた畑にUターンし、キヌアを栽培するようになった。輸出用にキヌアを生産するようになったため、ペルーの首都リマではキヌア価格は上昇し、チキンよりも高価で、米の価格の4倍になり、一般市民には贅沢品となっている。当然貧困層の人たちは先祖代々食べてきたキヌアを入手できなくなり、栄養格差が広がっている。栄養失調の多いペルーではこれに危機感を抱いて、政府プログラムとして、5歳以下の幼児施設の朝食にキヌアを取り入れるよう指示している。ボリビアでは5歳以下の幼児の27%は慢性的な栄養失調で苦しんでいる。」

このように、キヌアの需要が増えると、商品になる品種のみを栽培するモノカルチャーに移行する。モノカルチャーは生産効率がよいので大規模農場へと発展し、局地的な生物多様性の喪失や農薬・肥料の多用による土壌の不活化、生態系の乱れが起きて、持続可能な農業や社会が維持できなくなってしまう。将来、仮に遺伝子操作で良質で多収穫のキヌア品種が開発されたとすると特許登録されるので、誰でも自由に栽培することができなくなり、巨大多国籍企業が市場を席卷してしまい、結果的に世界の食料安全保障を脅かすことになる。このような輸出優先の産業型農業は新自由主義の考え方に立脚しているが、これに對立するのが、食料主権の考え方である。

食料主権とは、世界の小中規模の自作農・小作農、農業労働者、先住民、女性農民等の農業団体からなる、NGO団体ピア・カンペシーナ (Via Campesina) (1996年) が国や地域の食料自給を目指し、WTOの進める農産物の自由化に反対して提起した基本的概念である<sup>102</sup>。食料主権は国家の権利であるばかりでなく、自分自身の食料と農業の形をはっきりさせる庶民の権利で

あると主張する。2003年の声明では、貿易を否定するものではなく、むしろ持続可能な農業生産に役立つ貿易政策の形成を促進するもので、具体的には、自作農や小作農による食料生産、伝統種子の確保、GM作物への反対、農業政策への庶民の関与、女性農民の権利の認識などが謳われている<sup>102</sup>。食料主権は万人が食にアクセスできるようにするといういわば基本的人権の確立の手段の一つである<sup>103</sup>。

アメリカ大陸で最貧国の一つであり、多民族国家のボリビア政府は、キヌアを換金作物として輸出促進を掲げている一方で、食料主権の考え方を新憲法すでに(2009年)に取り入れている。国際キヌア年の翌年(2014年)、国連は、食糧安全保障は食糧主権なしには達成できないとして、国際家族年農業年を宣言した。家族農業が食料安全保障や食料主権、真の経済成長と雇用創出、生物多様性の持続的管理などに貢献できることを強調している。

食料安全保障と食料主権の対立はイデオロギー的には表面的に解消できたように見えるが、実際にはそうではない。研究者の間でも論争が続いている。

Jacobsenら<sup>104</sup>は、キヌアの輸出市場や価格上昇によってボリビア南部では牧草地がキヌアのための畑となり、局地的に生物多様性の喪失、土壌の砂漠化、収率の低下を招き、経済的な成功の代わりに環境被害をもたらしたと報告した。この報告に対しWinkelら<sup>105</sup>は、Jacobsenの報告は科学的根拠に欠け、持続可能な食料生産やフェアトレードの関係者にネガティブなインパクトを与えてしまうと反論した。そして激しくなる国際キヌア市場での競争においては、生産者との間で倫理経済や倫理的な問題として協力すべきだと主張している。Jacobsenら<sup>106</sup>は直接な返答を避け、人口増・食料需要増に立ち向かう戦略として、遺伝子組換え(GM)作物と生物多様性の二つをとりあげ、否定はしないもののバイオテクノロジーは生物多様性を脅かしているとし、生物多様性重視型の持続可能農業はオプションでなく必須であると主張している。

ボリビア政府は、NGOとともに農業の多様性、食料主権、有機農業の重要性については共通認識をもっていているが、実はうまく機能していないようだ<sup>107</sup>。Murphyら<sup>108</sup>はキヌアがグローバル作物として世界中に広がることについて、特定の品種の広がりには農民にとって懸念であり、キヌアの育種に関しては農民も参加するコンソーシアムの必要性を説いている。

## 8 おわりに

近未来の世界の食料安全保障のために、新たに登場したキヌアは稀に見るオールマイティなマイナー作物



であるが、あまりにも速いスピードでグローバル作物をめざす過程で種々の問題が生じている。かつて、ローカル作物だった胡椒、コーヒー、ジャガイモ、トマトが世界中に普及するのに数百年を要したことを考えると、出遅れたキヌアの場合は、日進月歩の現代情報化社会、バイオテクノロジーの時代において、多くのクリアすべき問題が一気に浮上したといえる。キヌアが世界の食料安全保障の確保の一角を担うには、政策や経済をふくむ学際的な英知を集め種々の軋轢を克服していくことが重要である。

## 付記

約30年間キヌアの開発を見守ってきた筆者は、当初栄養価の高い作物といえども、せいぜい脇役でニッチ市場にとどまるであろうとしか考えていなかった。しかし2013年の国際キヌア年キャンペーンの効果は大きく、日本でもマスコミにもしばしば登場するようになった。筆者はこの年に国連大学（東京）、ペルー大使館（東京）、JAICA（横浜）の各会場で開催されたシンポジウムでキヌアの栄養価について講演する機会を得たが、極端なキヌアブームに対して警鐘を鳴らした。あらゆるブームは必ず下火になり、地道な研究開発こそが結果的にキヌアの認知度を高め、生産を高めることになる」と主張した。

日本では現在、キヌアが入手できなくても食生活は成り立つ。しかし、高齢化が加速する日本において、栄養価の高い、健康機能を有するキヌアを必要とする時期はそう遠くないかもしれない。そのときには日本でも栽培されているかもしれない。

本稿の内容は、畿央大学大学院での講義「美しく生きるための健康総合特論」の内容をもとに大幅に加筆したものである。日頃、おいしいとかまずいとか、好きとか嫌いとかということしか話題にしない食品（キヌアでなくても）に少し興味を持って突き詰めていくと、食料問題、農業問題、環境問題、社会経済問題、政治問題へと話が発展してしまう。授業ではそのことを学生に伝えたかったのである。

最後に、本稿で引用した文献はなるべく最近のものを採用したが、重要な文献を見逃している場合が多々あると思うので、ご指摘いただければ幸いです。

## 後注

(注1) 国別の食料安全保障の充実性を数値化する資料がある。デュボン社／英国の調査機関、『エコノミスト・インテリジェンス・ユニット (EIU)』は、食料安全保障の柱である、「食料価格」「入手・利用のしやすさ」「栄養価」「安全性」などのデータを分析して数値

化（0～100）した。そのデータは、公式に開示されている各国の統計や数値、「家計に占める食費の割合」、「一人あたりの国内総生産」、「農産物の輸入関税」、「食料の輸入依存度」、「農業分野の公的研究開発費」、「食料の安全性」、「食品価格を決定する要因」をベースにしている。この食料安全保障指数は毎年のランキングが変わるが、欧米諸国は常に上位にあり、アフリカ諸国、南アジア諸国は低位置にある。日本は食料自給率が低いこともあって欧米諸国に次いで20位前後の第2集団に位置している。

(注2) 英語ではキノア (quinoa) という。本稿では原産地であるペルーやボリビアの言語であるスペイン語の呼称を採用する。日本食品成分表にもキヌアと記されている。

(注3) キヌアはアカザ科に属していたが、2009年アカザ科はヒユ科に統合された〔河原孝行：APG（被子植物系統グループ）に基づく植物の新しい分類体系、森林遺伝育種 3: 5-22, 2014〕

(注4) キヌアが塩濃度の高い土壌でも生育できるその仕組みは、根から取り込まれた $N^+$ と $Cl^-$ を葉の表面に分布する小さな粒状の袋（塩嚢）に閉じ込めてしまうのである（ハリス S：日経サイエンス 2016年11月号, pp82-85）。世界の灌漑農地の約25%は不適切な灌漑法で塩害に曝されており、もしこうした場所に塩生作物が栽培できれば食料増産に寄与するだろう。

(注5) なぜこのような種々の品種が存在するのだろうか？一説によるとアンデス高地の人たちの移動性の高い生活様式が一因だという。彼らは高低差による環境条件の異なる地域へ植物を運搬して栽培する際、植物の成熟期の相違とそれをうまく食用として利用する組み合わせ効果に気づき、植物を選択し、品種を確立していったといわれる（細谷広美（編）：ペルーを知るための62章、明石出版, pp31-35, 2004）。

(注6) キヌアのゲノム構造は異質四倍体 ( $2n=4x=36$ ) である。異質四倍体とは、異質倍数体（異種ゲノムが組合せて生じた染色体の倍数的変異）の一種で、同質倍数体（同じゲノムの倍加によって生じた倍数性）に比べ複雑である。このためキヌアのゲノム解析や優れた環境ストレスへの適応性や栄養特性についての分子的なメカニズムの解明は遅れていた。

## 文献

1. ロイド・エバンス /日向 康吉 (訳)：100億人への食糧～人口増加と食糧生産の知恵。学会出版センター, 2006
2. ジョン・クレプス /伊藤佑子, 伊藤俊洋 (共訳)：



- 食～90億人が食べていくために. 丸善出版, 2015
3. Smil V: Feeding the World: A Challenge for the Twenty-First Century, The MIT Press, London, UK, 2001
  4. Conway G: One Billion Hungry: Can We Feed the World? Cornell University Press, Ithaca, USA, 2012
  5. スティーブン・エモット／満園真木 (訳): 世界がもし100億人になったら. マガジンハウス, 2013
  6. J.A. フォーリー: 人口70億人時代の食糧作戦, 日経サイエンス2012年3月号, pp68-74
  7. アマルティア・セン／黒崎卓, 山崎幸治 (訳): 貧困と飢餓, 岩波現代文庫, 2017
  8. 香川雅春: 世界における子どもの栄養と成長・発達. 日本健康学会誌 83: 198-207, 2017
  9. Chappell MJ & LaValle LA: Food security and biodiversity: Can we have both? An agroecological analysis. Agric Hum Values 28: 3-26, 2011
  10. 小西洋太郎: アマランサスの食品栄養学的研究から見えてくるもの. 生活科学研究誌 14: 1-11, 2015
  11. Belton P & Taylor L (Eds): Pseudocereals and Less Common Cereals, Springer-Verlag, Berlin, Germany, 2002
  12. Bhargava & Srivastava (Eds): Quinoa: Botany Production and Uses. CAB Int. Boston MA, USA, 2013
  13. Murphy K & Matanguhan JA (Eds): Quinoa: Improvement and Sustainable Production, John Wiley & Sons, Inc, Hoboken, NJ, USA, 2015
  14. Peiretti PG & Gai F (Eds): Quinoa: Cultivation, Nutritional Properties and Effects on Health. Nova Science Publishers, New York, USA, 2019
  15. Taylor JNR & Awika JM (Eds): Gluten-Free Ancient Grains. Woodhead Publishing, Duxford, UK, 2017
  16. Haros CA & Schoenlechner (Eds): Pseudocereals: Chemistry and Technology, Wiley & Sons Ltd, Chichester, UK, 2017
  17. Johnson J, & Wallace TC: Whole Grains and their Bioactives, Wiley & Sons Ltd, Chichester, UK, 2019
  18. National Academy Science: Lost Crops of the Incas. National Academy Press, Washington, DC, USA, pp149-161, 1989
  19. FAO: Quinoa: An ancient crop to contribute to world food security. Regional Office for Latin America and the Caribbean, 2011
  20. Tapia ME: The long journey of quinoa: Who wrote its history. State of the Art Report on quinoa around the world, pp3-9, 2013
  21. Erdos J: Atawallpap Mikhunan: Quinoa, Mother Grain of the Incas. Planeta Com. December 1999
  22. National Academy Science: Underexploited Tropical Plants with Promising Economic Value. National Academy Press, Washington, DC, USA, 1975: 日本語編 [吉田よし子, 吉田昌一 (訳): 21世紀の熱帯植物資源. 楽游書房 (1978)]
  23. Schlick G & Bubenheim DL: Quinoa: An emerging new crop with potential for CELSS. NASA Tech paper 3422 (1993)
  24. Rojas W & Pint M: *Ex situ* conservation of quinoa: The Bolivian experience. In: Quinoa: Improvement and Sustainable Production, Ed. Murphy K & Matanguhan JA, John Wiley & Sons, Inc, Hoboken, NJ, USA, pp125-160, 2015
  25. Prego I, Maldonado S & Otegui M: Seed Structure and Localization of Reserves in *Chenopodium quinoa*. Ann Bot 82: 481-488, 1998
  26. Koziol MJ: Chemical composition and nutritional evaluation of quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.). J Food Comp Anal 5: 35-68, 1992
  27. Jancurova M, Minarovicova L & Dandar: Quinoa - a Review. Czech J Food Sci 27: 71-79, 2009
  28. James LEA: Quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.): Composition, chemistry, nutritional, and functional properties. Adv Food Nutr Res 58: 1-31, 2009
  29. VegaGálvez A, Miranda M, Vergara J, Uribe E, Puente L & Martínez EA: Nutrition facts and functional potential of quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.), an ancient Andean grain: a review. J Sci Food Agric 90: 2541-2547, 2010
  30. Coral LLT & Cusimamani EF: An Andean ancient crop, *Chenopodium quinoa* Willd.: A review. Agric Tropica Subtropica 47: 142-146, 2014
  31. Graf BL, Rojas-Silva P, Rojo LE, Delatorre-Herrera J, Baldeón ME & Raskin I: Innovations in health value and functional food development of quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.). Compr Rev Food Sci Food Saf 14: 431-445, 2015.
  32. Navruz-Varli S & Sanlier N: Nutritional and health benefits of quinoa (*Chenopodium quinoa*

- Willd.). *J Cereal Sci* 69: 371-376, 2016
33. Sharma V, Chandra S, Dwivedi P & Parturkar M: Quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.): A nutritional healthy grain. *Int J Adv Res* 3: 25-736, 2015
  34. Mir NA, Riar CS, & Singh S: Nutritional constituents of pseudo cereals and their potential use in food systems: A review. *Trends Food Sci Technol* 75: 70-180, 2018
  35. Hernández-Ledesma B: Quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.) as source of bioactive compounds: a review. *Bioactive Comp Health Dis* 2: 27-47, 2019
  36. Nowak V, Du J & Charrondiere UR: Assessment of the nutritional composition of quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd). *Food Chem* 193: 47-54, 2016
  37. Brinegar C & Goundan S: Isolation and characterization of chenopodin, the 11S seed storage protein of quinoa (*Chenopodium quinoa*). *J Agric Food Chem* 41: 182-185, 1993
  38. Brinegar C, Sine B & Nwokocha L: High-cysteine 2S seed storage protein from quinoa (*Chenopodium quinoa*): *J Agric Food Chem* 44: 1621-1623, 1996
  39. Dakhili S, Abdolalizadeh L, Hosseini SM, Shojaee-Aliabadi S & Mirmohtadaie L: Quinoa protein: Composition, structure and functional properties. *Food Chem* 299: 12511, 2019
  40. Janssen F, Pauly A, Rombouts I, Jansens KJ, Deleu LJ & Delcour JA: Proteins of amaranth (*Amaranthus spp.*), buckwheat (*Fagopyrum spp.*), and quinoa (*Chenopodium spp.*): a food science and technology perspective. *Comp Rev Food Sci Food Saf* 16: 39-58, 2017
  41. Bastidas EG, Roura R, Rizzolo DAD, Massanes T & Gomis R: Quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd), from nutritional value to potential health benefits: *J Nutr Food Sci* 6: 1000497, 2016
  42. Takao T, Watanabe N, Yuhara K, Itoh S, Suda S, Tsuruoka Y, Nakatugawa K & Konishi Y: Hypocholesterolemic effect of protein isolated from quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.) seeds. *Food Sci Technol Res* 11:161-167, 2005
  43. Kehinde, BA & Sharma, P: Recently isolated antidiabetic hydrolysates and peptides from multiple food sources: a review. *Crit Rev Food Sci Nutr* 60: 322-340, 2020.
  44. Majid A & Priyadarshini, CG: Millet derived bioactive peptides: A review on their functional properties and health benefits. *Cri Rev Food Sci Nutr*: 1-10, 2019, DOI: 10.1080/10408398.2019.1686342
  45. Aluko RE & Monu E: Functional and bioactive properties of quinoa seed protein hydrolysates. *J Food Sci* 68: 1254-1258, 2003
  46. Chirinos R, Ochoa K, Aguilar-Galvez A, Carpentier S, Pedreschi R & Campos D: Obtaining of peptides with *in vitro* antioxidant and angiotensin I converting enzyme inhibitory activities from canihua protein (*Chenopodium pallidicaule* Check for Aellen). *J Cereal Sci* 83: 139-146, 2018
  47. Vilcacundo R, Martínez-Villaluenga C, & Hernández-Ledesma B.: Release of dipeptidyl peptidase IV,  $\alpha$ -amylase and  $\alpha$ -glucosidase inhibitory peptides from quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.) during *in vitro* simulated gastrointestinal digestion. *J Functional Foods* 35: 531-539, 2017
  48. Nongonierma AB, Le Maux S, Dubrulle C, Barre C & FitzGerald RJ: Quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.) protein hydrolysates with *in vitro* dipeptidyl peptidase IV (DPP-IV) inhibitory and antioxidant properties. *J Cereal Sci* 65: 11-118, 2015
  49. Przybylski R, Chauhan GS & Eskin NAM: Characterization of quinoa (*Chenopodium quinoa*) lipids. *Food Chem* 51: 187-192, 1994
  50. Gonzalez JA, Eisa SSS, Hussin SAE & Prado FE: Quinoa: An Incan crop to face global changes in agriculture. In: *Quinoa: Improvement and Sustainable Production*, Ed. Murphy K & Matanguhan JA, John Wiley & Sons, Inc, Hoboken, NJ, USA, pp1-18, 2015
  51. Simopoulos AP: Evolutionary aspects of diet, the omega-6/omega-3 ratio and genetic variation: nutritional implications for chronic diseases. *Biomed Pharmacotherapy* 60: 502-507, 2006
  52. Inouchi N, Nishi K, Tanaka S, Asai M, Kawase Y, Hata Y, Konishi Y, Yue S & Fuwa H: Characterization of amaranth and quinoa starches. *J Appl Glycosci* 46: 233-240, 1999
  53. Schoenlechner R: Quinoa: Its unique nutritional

- and health-promoting attributes. In *Gluten-free ancient grains*. Ed. Taylor JNR & Awika JM, Woodhead Publishing, Duxford, UK, pp105-129, 2017
54. Lamothe LM, Srichuwong S, Reuhs BL & Hamaker BR: Quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.) and amaranth (*Amaranthus caudatus* L.) provide dietary fibres high in pectic substances and xyloglucans. *Food Chem* 167: 490-496, 2015
  55. 平野茂, 小西洋太郎: キノア種子の分画とその栄養成分. *日本栄養・食糧学会誌* 56: 283-289, 2003
  56. Konishi Y, Hirano S, Tsuboi H & Wada M: Distribution of minerals in quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.) seeds. *Biosci Biotechnol Biochem* 68: 231-234, 2004
  57. 江本哲也, 小西洋太郎, Ding X, 辻幸一: キノア種子のX線元素マッピングにおける自己吸収の影響の低減. X線の進歩, 第36集, pp267-274 (2005)
  58. Alvarez-Jubete I: Impact of baking on vitamin E content of pseudocereals amaranth, quinoa, and buckwheat. *Cereal Chem* 86: 511-515, 2009
  59. Gomez-Caravaca AM: Phenolic compounds and saponins in plants grown under different irrigation regimes. In *Polyphenols in plants: Isolation, Purification, and Extract Preparation*. Ed. Watson RR, Elsevier, San Diego, CA, USA, pp37-52, 2014
  60. Tanwar B, Goyal A, Irshaan S, Sihag KV, Patel A & Kaur I: Quinoa. In *Whole Grains and Their Bioactives*, Ed. Johnson J, Wallace TC. Wiley & Sons Ltd., Chichester, UK, pp269-305, 2019
  61. Tang Y & Tsao R: Phytochemicals in quinoa and amaranth grains and their antioxidant, anti-inflammatory, and potential health beneficial effects: a review. *Mol Nutr Food Res* 61: 1600767, 2017
  62. D'Amelia V, Aversano R, Chiaiese P & Carputo D: The antioxidant properties of plant flavonoids: their exploitation by molecular plant breeding. *Phytochem Rev* 17: 611-625, 2018.
  63. Kuljanabhagavad T & Wink M: Biological activities and chemistry of saponins from *Chenopodium quinoa* Willd. *Phytochem Rev* 8:73-490, 2009
  64. Cheok CY, Salman HAK & Sulaiman R: Extraction and quantification of saponins: A review. *Food Res Int* 59: 16-40, 2014
  65. Oleszek W, Junkuszew M & Stochmal A: Determination and toxicity of saponins from *Amaranthus cruentus* seeds. *J Agric Food Chem* 47: 3685-3687, 1999
  66. Bhargava A, Shukla S & Ohri D: *Chenopodium quinoa*: An Indian perspective. *Indust Crops Prod* 23: 73-87, 2006
  67. 崎浜靖子: 植物色素ベタレイン—分布, 生合成および生理機能. *化学と生物* 55: 582-584, 2017
  68. Celli GB & Brooks MSL: Impact of extraction and processing conditions on betalains and comparison of properties with anthocyanins—A current review. *Food Res Int* 100: 501-509, 2017
  69. Olthof MR & Verhoef P: Effects of betaine intake on plasma homocysteine concentrations and consequences for health. *Curr Drug Metab* 6:15-22, 2005.
  70. Kizelsztejn P, Govorko D, Komarnytsk S, Evans A, Wang Z, Cefalu WT & Raskin I: 20-Hydroxyecdysone decreases weight and hyperglycemia in a diet-induced obesity mice model. *Am J Physiol Endocrinol Metab* 296: E433-E439, 2009
  71. Wang ZQ, Yu Y, Zhang XH, Ribnicky D & Cefalu WT: A ecdysterone enhances muscle insulin signaling by modulating acylcarnitine profile and mitochondrial oxidative phosphorylation complexes in mice fed a high-fat diet. *Diabetes*: 101605, 2011
  72. Foucault AS, Mathé V, Lafont R, Even P, Dioh W, Veillet S, ... & Quignard - Boulangé A: Quinoa extract enriched in 20-hydroxyecdysone protects mice from diet-induced obesity and modulates adipokines expression. *Obesity* 20: 270-277, 2012
  73. Rosero O, Marounek M, & Břeňová N: Phytase activity and comparison of chemical composition, phytic acid P content of four varieties of quinoa grain (*Chenopodium quinoa* Willd.). *Acta Agronómica* 62: 13-20, 2013
  74. Ruales J, De Grijalva Y, Lopez-Jaramillo P, & Nair BM: The nutritional quality of infant food from quinoa and its effect on plasma level of insulin-like growth factor-1 (IGF-1) in undernourished children. *Int J Food Sci Nutr* 53: 143-154, 2002
  75. Farinazzi-Machado FMV, Barbalho SM, Oshiiwa



- M, Goulart R, & Pessan Jr O: Use of cereal bars with quinoa (*Chenopodium quinoa* W.) to reduce risk factors related to cardiovascular diseases. *Food Sci Technol* 32: 239-244, 2012
76. Li L, Lietz G, Bal W, Watson A, Morfey B & Seal C: Effects of Quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.) Consumption on Markers of CVD Risk. *Nutrients* 10: 777-793, 2018
77. Gabriel SG, Shakib MCR & Gabriel GN: Effect of pseudocereal-based breakfast meals on the first and second meal glucose tolerance in healthy and diabetic subjects. *Macedonian J Med Sci* 4: 565-573, 2016.
78. De Carvalho FG, Ovidio PP, Padovan GJ, Jordao Jr AA, Marchini, JS, & Navarro AM: Metabolic parameters of post menopausal after corn flakes intake- a prospective and double-blind study. *Int J Food Sci Nutr* 65: 380-385, 2014
79. Navarro-Perez D, Radcliffe J, Tierney A & Jois M: Quinoa Seed Lowers Serum Triglycerides in Overweight and Obese Subjects: A Dose-Response Randomized Controlled Clinical Trial. *Curr Dev Nutr* 1: 1-9, 2017, 2017
80. Abellán MR, Barnuevo ME, García CS, Contreras CF, Aldeguer MG, Soto FM, ... & López FR: Effect of quinoa (*Chenopodium quinoa*) consumption as a coadjuvant in nutritional intervention in prediabetic subjects. *Nutr Hosp* 34: 1163-1169, 2017
81. Zavallos VF, Herencia LI, Chang F, Donnelly S, Ellis HJ, & Cioclitira PJ: Gastrointestinal effects of eating quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.) in celiac patients. *Am J Gastroenterol* 109: 270-278, 2014
82. 小西洋太郎：キノア。地域食材大百科（第1巻），農山漁村文化協会，pp191-196, 2010
83. Haros CM & Sanz-Penella JM: Food uses of whole pseudocereals. In: *Pseudocereals: Chemistry and Technology*, Ed. Haros CA & Schoenlechner (Eds): Wiley & Sons Ltd., Chichester, UK, pp.163-192, 2017
84. Pineli LLO, Botelho RB, Zandonadi RP, Solorzano JL, de Oliveira GT, Reis CEG & Teixeira DDS: Low glycemic index and increased protein content in a novel quinoa milk. *LWT-Food Sci Technol* 63:1261-1267, 2015.
85. 橋本咲穂里, 畠木優羽, 原口佳奈恵：キノア添加パ  
ンの物性・機能性. 畿央大学卒業論文集, pp158-161, 2019
86. Medina WT, de la Llera AA, Condori JL & Aguilera JM: Physical properties and microstructural changes during soaking of individual corn and quinoa breakfast flakes. *J Food Sci* 76: E254-E265, 2011.
87. Ramos Diaz JM, Sundarrajan L, Kariluoto S, Lampi AM, Tenitz S & Jouppila K.: Effect of extrusion cooking on physical properties and chemical composition of corn - based snacks containing amaranth and quinoa: application of partial least squares regression. *J Food Process Engineering* 40: e12320, 2017
88. Peñaloza W, Davey CL, Hedger JN & Kell DB: Physiological studies on the solid - state quinoa tempeh fermentation, using on - line measurements of fungal biomass production. *J Sci Food Agric* 59: 227-235, 1992.
89. Lorusso A, Coda R, Montemurro M & Rizzello CG: Use of Selected Lactic Acid Bacteria and Quinoa Flour for Manufacturing Novel Yogurt-Like Beverages. *Foods* 7: 51.2018
90. Pagno CH, Costa TM, de Menezes EW, Benvenutti EV, Hertz PF, Matte CR, ... & Flôres SH: Development of active biofilms of quinoa (*Chenopodium quinoa* W.) starch containing gold nanoparticles and evaluation of antimicrobial activity. *Food Chem* 173: 755-762, 2015
91. Konishi Y, Arai N, Umeda J, Gunji N, Saeki S, Takao T, Minoguchi R & Kensho G: Cholesterol lowering effect of the methanol insoluble materials from the quinoa seed pericarp. In *Hydrocolloids, Part 2*, Ed. Nishinari K, Elsevier Science BV, Amsterdam, pp417-422, 2000
92. 松浦照二, 平野茂, 米澤崇夫, 米田武志, 小西洋太郎：キノア果皮のコレステロール上昇抑制作用. 精糖技術研究会誌, pp19-26, 2004
93. 桃木徳博, 桃木芳枝（編）：地域適応型作物の導入と方法, 三共出版（1999年）
94. González JA, Konishi Y, Bruno M, Valoy M & Prado FE: Interrelationships among seed yield, total protein and amino acid composition of ten quinoa (*Chenopodium quinoa*) cultivars from two different agroecological regions. *J Sci Food Agric* 92:1222-1229, 2012.
95. 中島治, 近藤一成：食用と考えられるゲノム編集

- 動植物に関する調査. 国立医薬品食品衛生研究所報告 136: 52-69, 2018
96. 石井哲也：ゲノム編集を問う, 岩波新書, 2017
97. 小林雅一：ゲノム革命がはじまる, 集英社新書, 2019
98. 青野由利：ゲノム編集の光と闇, 筑摩新書, 2019
99. Yasui Y, Hirakawa H, Oikawa T, Toyoshima M, Matsuzaki C, Ueno M & Tanaka K: Draft genome sequence of an inbred line of *Chenopodium quinoa*, an allotetraploid crop with great environmental adaptability and outstanding nutritional properties. DNA Res 23: 535-546, 2016
100. Jarvis DE, Ho YS, Lightfoot DJ, Schmöckel SM, Li B, Borm TJ, ... & Kharbatia NM: The genome of *Chenopodium quinoa*. Nature 542: 307-325, 2017
101. Collyns D: Quinoa brings rich to the Andes: Bolivian and Peruvian farmers sell entire crop to meet rising western demand, sparking fears of malnutrition. The Guardian, January 14, 2013.
102. 尾関修：シューマツハ経済学と食料主権. 横浜商大論集 41：1-28, 2008
103. 勝俣誠：食糧主権のグローバル政治経済学. KAN (環) 16: 188-194, 2004
104. Jacobsen SE: The situation for quinoa and its production in southern Bolivia: From economic success to environmental disaster. J Agro Crop Sci 197:390-399, 2011
105. Winkel T & others: The sustainability of quinoa production in southern Bolivia: from misrepresentation to questionable solution. Comments on Jacobsen (2011, J. Agron Crop Sci., 197:390-399). J Agron Crop Sci 198: 314-319, 2012
106. Jacobsen SE, Sorensen M, Pedersen SM & Weiner J: Feeding the world: genetically modified crops versus agricultural biodiversity. Agron Sustain Dev 33: 651-662, 2013
107. Cockburn J: Bolivia's food sovereignty and agrobiodiversity: Undermining the local to strengthen the state? Theory in Action 7: 67-89, 2004
108. Murphy KM, Bazile D, Kellogg J & Rahmanian M: Development of a worldwide consortium on evolutionary participatory breeding in quinoa. Front Plant Sci 7: 608-614, 2016