

古くて新しい雑穀 キノアの可能性

日本大学生物資源科学部
磯部 勝孝

はじめに

2023年は国連が定めた国際雑穀年 (International Year of Millets 2023) である。雑穀は人類が最初に栽培化した植物のひとつで、アフリカやアジアでは約7000年前から食材として利用されていた。雑穀は他の主要穀物に比べて痩せた土壌や劣悪な環境下でも生育できるものが多いが、多くの国では生産量が減少しており雑穀の持つ潜在的な可能性が十分に発揮されている状況にあるとは言えない。このようなことから、国際雑穀年は各国での雑穀の生産量を増やし、食料資源としての雑穀の位置づけを高めることを主たる目的として第75回国連総会で承認された。ひとくちに雑穀と言っても、アワやヒエ、ソバのようによく知られているものから、特定の地域だけで栽培されている伝統的な雑穀もある。今回紹介するキノア(「キヌア」と表記される場合もある)も、もともとは南米大陸で長年栽培されていた雑穀であるが、スーパーフードブーム等の影響で近年急激に知られるようになってきた雑穀である。実際、我が国においても近年各地でキノアを導入して栽培化する動きがみられる。キノアが今日のように注目をされるようになったきっかけは子実に含まれる成分特性とこの作物を摂取した時に得られる様々な効果によるところが大きい。また、キノアは耐塩性が強いなど他の作物にはない優れた生態的特性を有す

る。そこで、ここではキノアの栄養価及び利用の仕方、植物としての特性や栽培法などこれまで得られた知見を紹介することでキノアの持つ可能性を考えてみたい。

1. 植物としてのキノアと生産状況

キノア (*Chenopodium quinoa* Willd.) はアンデス高地のチチカカ湖周辺が起源地と考えられているヒユ科 (以前はアカザ科に分類されていた) に属する双子葉の一年生作物 (擬穀類) である (Risi and Galwey 1984; 藤倉ら 2009)。染色体は36本で、複2倍体 (異質4倍体) である (Bhargava *et al.* 2005)。栽培の起源は古くアンデス地方では7000年前から栽培されていたと考えられている (Bazile and Negrete 2009)。その後、長い歴史の中で南米各地に広がり、それぞれの地域環境に適応した様々なエコタイプが発達した。例えば、チリの海岸部には Sea-level タイプ (海岸型) が、ペルーの比較的標高が低い地域には Valley タイプ (溪谷型) が分布しており (Risi and Galwey 1984)、現在では世界各地には3000種類以上もの系統があると考えられている。キノアの草丈は成熟期において80cm~150cm程度で、主茎や分枝の先端部に穂が形成されそこに多くの子実をつける (図-1)。子実は直径1mm~2mm程度、厚さ0.5mm程度の扁平な円盤型をしていて、色は白色、黄色、紫色、黒色と様々



図-1 圃場で育成されたキノアとその子実 (右下)

なものがあり、子実の表面に苦味成分であるサポニンを附着させている。

キノアは、ごく最近までは南米のアンデス地方を中心に現地の人々が食材等で利用するだけであった。しかし、1970年代にアメリカ科学アカデミーが将来の食糧確保と熱帯地域の農民の生活向上策として様々な作物の研究開発を推奨し、そのひとつにキノアが取り上げられたことや、1990年代になってアメリカ航空宇宙局 (NASA) が提唱する Control Ecological Life Support System (CELSS) の新しい作物の候補に挙げたことで世界的に注目を集めるようになった (Schlick and Bubenheim 1993)。FAOSTATによると2020年における世界でのキノアの作付面積は18万9千haで、このうちボリビアが11万6千ha、ペルーが6万8千haである。そしてこの2カ国にエクアドルを加えた3カ国が主産国である。我が国へのキノアの輸入量は財務省の統計によると2012年は162tであったが、2021年は485tである。このようなことから近年我が国でのキノアの需要は増加傾向にあると推察される。

表-1 キノアと白米、コムギの成分比較

成分	キノア	白米	コムギ
炭水化物 (g)	61.0	77.1	72.2
タンパク質 (g)	14.6	6.1	10.6
脂質 (g)	5.6	0.9	3.1
灰分 (g)	3.4	0.4	1.6
K (mg)	927	88	470
Ca (mg)	149	5	26
Mg (mg)	250	23	80
P (mg)	384	94	350
Fe (mg)	13.2	0.8	3.2
Zn (mg)	4.4	1.4	2.6

単位：100g 当たり
小西 (2003) から引用

2. キノア子実に含まれている成分特性と摂取時の効果

キノアの子実の炭水化物含有率は約60%と他の穀類に比べそれほど高くないが、タンパク質含有率は10%~17%とコムギより高い (小西 2003)。そして、アミノ酸の中でも必須アミノ酸をバランスよく含み、特にリジンの含有率は他の穀類に比べ極めて高い。その結果、アミノ酸スコアが他の穀類に比べて高いことがキノアの特徴のひとつである。さらにカリウム、カルシウム、リン、マグネシウム、鉄、亜鉛などのミネラルも他の穀類に比べて非常に多く、食物繊維も4.8%程度含まれ、この値は白米や小麦粉より数倍高い値である (高尾 1999)。そして、キノアの子実には数種のポリフェノール類が含まれていて、総フェノール量は他の多くの穀類よりは多いことから抗酸化能の高い食材であることが示唆されている (石井 2010)。一方、水溶性ビタミンは他の穀類と同様にあまり多く含まれていないが、発芽すると総ビタミンC量がアルファルファーや緑豆と同程度まで増加することが確認されている (小西 2003)。このよ

うにキノアの子実成分は他の穀類とは大きく異なるが (表-1)、これらの成分はキノアの子実に均一に分布しているのではなく、部位によって各成分の含有率は大きく異なる (平野・小西 2003)。キノアの子実は中央に胚乳があり、それを取り巻くように胚がある。胚乳には炭水化物が多く含まれていて、胚にはタンパク質、脂質、ビタミン、カリウム、リン、マグネシウムなどが多く含まれている。ミネラルのうちカルシウムは胚芽にはほとんど含まれてなく、その多くは外皮等に含まれている (平野・小西 2003)。かつて、同じ品種で大きい子実と小さい子実でミネラル含量の違いを測定したことがあるが、概ね小さい子実の方がミネラル含量は高かった。これは小さい子実の方が子実に占める胚乳の割合が小さくなるからと考える。このようなことから小さい子実の方がキノア摂取時の効果は高くなるとも考えられる。

以上の様にキノアの子実は他の穀類とは異なる成分組成を示すのが特徴で、その結果これを摂取した時には様々な効果が期待できる。例えば、様々なミネラルが豊富なことから骨粗しょう症の予防が期待でき、豊富な食物繊維は便通を整えて便秘の解消に役立つ

ほか、コレステロールや糖の吸収を抑えることから血糖値や血液中のコレステロール濃度を低下させて生活習慣病の予防にも効果があると考えられる (小西 2002)。実際、健全なマウスと糖尿病のマウスを使ってキノアと白米を摂取させたところ、健全なマウスではキノアを摂取させても血糖値の低下は認められないが、糖尿病のマウスではキノアの摂取によって血糖値の低下が認められた (塩ら 2006)。さらに、キノアの外皮を含む食餌でマウスを飼育した場合に血中コレステロール値が低下したことから、キノアの外皮にコレステロールを低下させる作用があることが明らかにされている (平野・小西 2003)。このようにキノアを摂取すると様々な効果が期待でき、今後の研究次第ではさらに新たな機能が発見される可能性もあると考える。

3. キノアの利用法

キノアを摂取すると様々な効果が期待できるが、実際キノアをどのようにして食すればよいのかよくわからないという声を聴くことが多い。名前は知っているがまだまだ多くの日本人にとってキノアは食材としての知名度が高いとは言えないのが現状である。キノアの普及をさらに推し進めるにはキノアをどのように食するのか、様々な利用方法、調理方法を考案することが重要と考える。

キノアの子実を利用する場合は、子実を粒のまま利用する場合と粉にし

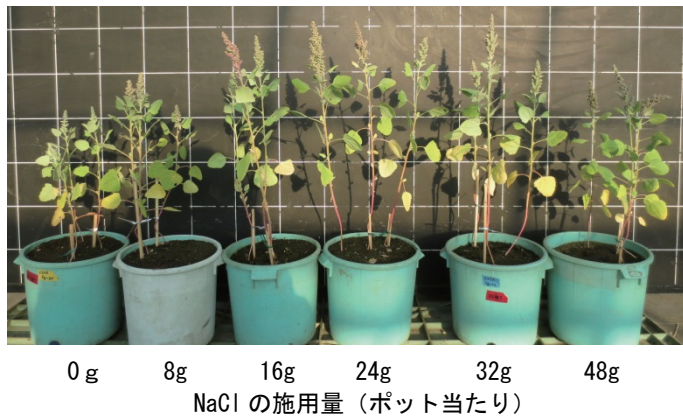


図-2 NaCl 施用下でのキノアの生育状況
1/5000a を使用

て利用する場合の2つの利用法が考えられる。粒のまま子実を利用する場合、我が国ではご飯を炊く際や雑炊を作る際に少量混ぜて一緒に炊くのが最も簡単な利用方法である。これ以外に水に浸して柔らかくした子実をサラダの上にのせたり、野菜と混ぜたりして利用する方法もある。さらに子実をパフ状にして（膨化させて）、トッピングとしてサラダやアイスクリーム等の上にかけて利用する方法もある（高尾1999）。キノア栽培が盛んなポリビアやペルーではキノアの子実をスープに入れて食するのが最も一般的な利用方法である。一方、子実を粉にしてから利用する場合は小麦粉の代わりに利用する方法が一般的である。つまり粉でパンやマカロニ、クッキーを作るのが最も簡単な利用方法であるが、その場合キノアの粉の割合を高くすると製品が硬くなったり、膨らみが不足したりして食味が低下することがあるので注意が必要である（大迫2006）。

キノアは子実だけでなく茎や葉も利用できる。例えば、若い葉や茎を茹でておひたしにしたり、野菜のように炒めたりして食べることもできる（大迫2013）。最近、様々な穀物や野菜のスプラウトをスーパーなどで見かけることがあるが、キノアもスプラウトとして食することも可能である。また、キノアを食材として利用するのは人だけ

でなく、家畜やペットの餌としても利用している。このように、キノアの利用方法はまだまだ途上中と言え、今後も新たな利用法が開発されることでキノアを持つ機能をより多く得ることができるようになると思われる。

4. 耐塩性とセシウム吸収能

今後も世界レベルで人口が増加していくことが予想される中、食糧の増産は我々人類に課された課題でもある。これからの食糧増産では単位面積当たりの単収を高めていくことが重要であるが、耕地面積を広めていくことも必要と考える。世界各地には塩類集積地があり、このようなところでは作物の栽培は現状難しい。しかし、植物の中には耐塩性の強いものや、塩生植物のようにある程度の塩類が土壌にあったほうが生育がよくなる植物も存在する。キノアもそのような植物のひとつであり（Koyro *et al.* 2008）、他の植物の栽培が困難である高い濃度で塩類が集積した土壌でも生育可能である（図-2）。さらにキノアには高いセシウム吸収能もある（Broadley *et al.* 1999）。チョルノービリ（チェルノブイリ）や福島での原発事故では環境中に大量の放射性セシウムが放出された。福島では土壌に蓄積された放射性セシウムを除去するために大量の表土

除去が行われたが（宮原2014）、これには大変な労力と費用がかかっている。植物を使って土壌から重金属等を除去するファイトレメディエーションも一時検討されたが、セシウムの半減期と植物によるセシウムの吸収率を考えるとこの時点ではセシウムのファイトレメディエーションは現実的ではなかった（佐藤2014）。しかし、その後セシウムの吸収に関するタンパク質が明らかにされるなど（Ashraf *et al.* 2021）、植物のセシウム吸収に関する研究は福島原発事故が起こった当時より遙かに進んでいる。今後の不慮の事故に備えるためにもセシウムのファイトレメディエーション技術を確立することは大変重要であると考えられる。キノアは種々の植物の中でもセシウム吸収能が高い植物のひとつであり（Broadley *et al.* 1999）、さらに草丈が1 m程度になり比較的高いバイオマス生産量を示す。このようなことから、キノアはセシウムのファイトレメディエーションに利用するには有益な植物であり、今後の研究次第では放射性セシウムのファイトレメディエーションに活用できる植物のひとつと考える。そこで、ここではキノアの耐塩性とセシウム吸収能に関する研究事例を紹介する。

キノアの耐塩性は従来耐塩性が高いと言われていたナタネ、ダイコン及びコマツナに比べても高い（磯部ら2014）。一般的に海水の塩濃度は500mM程度であるが、キノアの中には800 m M以上の塩化ナトリウム溶

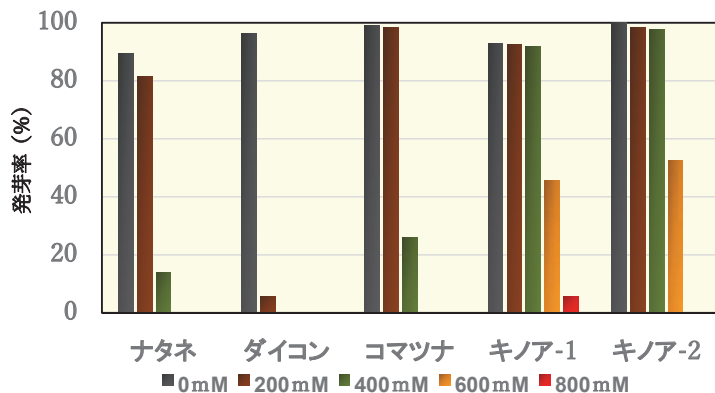


図-3 様々な濃度のNaCl溶液での種々の作物の種子発芽率
キノア-1、キノア-2の品種はそれぞれ、Amarilla de MaranganiとCICA-127を示す

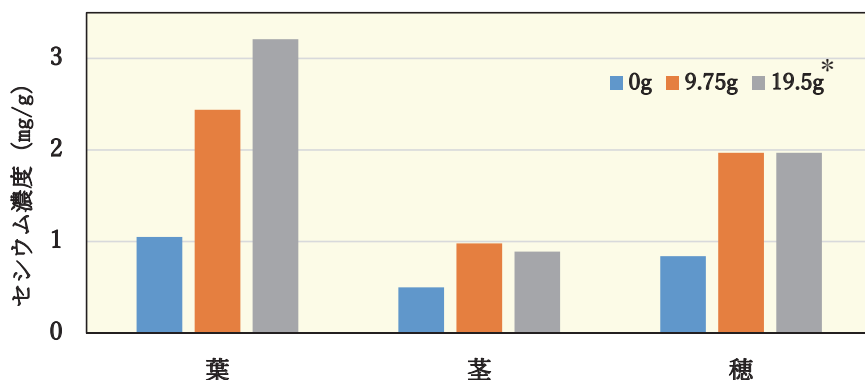


図-5 NaCl施用下でのキノア各器官のセシウム濃度
*：1/5000aポット当たりのNaCl施用量を示す

液でも発芽する系統もある (図-3)。さらに, Morales *et al.* (2011) の研究によると 600mM の塩化ナトリウム溶液を灌水しても生育できる。このように高い耐塩性を持つキノアは細胞から Na イオンを排除して K イオンを保持することで浸透圧を調整していると考えられている (Cai and Gao 2020)。さらに, キノアが高い耐塩性を有するのは植物体の表面に存在するブラッダー細胞 (Epidermal Bladder Cell) の存在も大きい (Orsini *et al.* 2011; Shabala *et al.* 2012)。キノアのブラッダー細胞は通常の細胞の約 1,000 倍以上の大きさで (図-4)、体内で不要な物質や過剰に吸収された塩類をこの細胞に移送することで体内生理を保っていると考えられている。2020 年にはブラッダー細胞の形成遺伝子が明らかになったことから

(Imamura *et al.* 2020), 将来ブラッダー細胞の大きさや数を増加させることが可能になれば, キノアの耐塩性をさらに高めることも不可能ではないと考える。キノアは耐塩性が高い植物のひとつであるが, 同時に土壌からセシウムを吸収する能力も高い。しかも, その吸収能は土壌に塩化ナトリウムが高い濃度で存在するとさらに高まる。実際, キノアを育成する際に塩化ナトリウムを施用するとセシウムの吸収量は最大で 9 倍以上になった (Isobe *et al.* 2019)。さらに Wada *et al.* (2020) の研究ではキノアは土壌から吸収したセシウムの多くを葉に蓄積し (図-5), 子実肥大期以降も葉から穂へのセシウムの移行は少ないことも明らかにされている。セシウムは過剰に吸収されると生育が阻害されるので, 細胞内では液胞等に取り込むか無毒化する

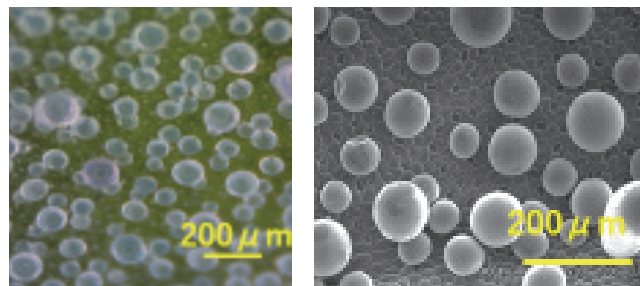


図-4 キノアの葉のブラッダー細胞
左：光学顕微鏡, 右：電子顕微鏡

か, または細胞外に排出する必要がある。既に述べたようにキノアの葉にはブラッダー細胞が多くあり, 葉身細胞よりブラッダー細胞の方がセシウム含量は高いことが明らかになっている。つまり, キノアは過剰に吸収したセシウムを葉のブラッダー細胞に移行させることで葉身の機能を維持していると考えられている。さらにこの現象は塩化ナトリウムを施用した時に促進され, 塩化ナトリウム施用によってキノアはブラッダー細胞そのものも大きくなりブラッダー細胞内に蓄積できるセシウムの量を多くする仕組みがあることも明らかになった。このようにキノアは他の植物の生育が難しい塩類集積地においても栽培することも可能で, さらに他の植物の数倍もセシウムを吸収することができる大変ユニークな植物でもあり, 今後の食糧生産や環境修復において大変有益な機能を有する作物と言える。

5. キノア栽培のポイント

これまで述べてきたようなことから, 我が国においてもキノアの栽培化を推し進めることは大変意義があると考えられる。しかしキノアの起源地と環境条件の大きく異なる我が国では現地ではあまり生じない問題点も発生すると推察される。そこで次にキノアを我が国で栽培する際のポイントについて述べる。



図-6 キノアの立枯れ (左) と倒伏 (右) の様子

キノアは一般的には冷涼な気候を好むと考えられているが、我が国では北海道から九州・沖縄まで栽培が可能である。関東でキノアを栽培する場合、播種は3月下旬から9月初旬頃まで可能であるが、南米の低緯度地帯で発達した Valley タイプのキノアは子実肥大に対する日長感応が極めて敏感で (Isobe *et al.* 2018), このタイプのキノアは開花期以降が長日条件になると子実肥大が順調に行われず極端な場合は収穫皆無になる。従って、Valley タイプのキノアは播種可能な時期が限定され、関東の場合8月以降に播種しないと多くの子実を得ることができない。キノアが生育できる土壌の pH は 4.5 から 8.0 で、比較的広い範囲の土壌 pH に対応できる (Bhargava and Srivastava 2013)。しかし、土壌の過湿に対しては弱く、降水量が多い我が国では特に出芽直後に土壌が過湿になると立枯れ (図-6) が発生する (磯部ら 2019)。また、その後の生育も地下水位が高いと生育が悪くなり、キノアの耐湿性はダイズやアマランサスよりも弱い (磯部ら 2005)。このようなことから、粘土質土壌など土壌水分が高くなりやすい所では、高畝や土壌改良材の施用などによって土壌水分を低下させる工夫が必要になる。キノアは茎の先端に大きな穂を形成するが、子実肥大期以降になると穂の新鮮重はかなり重くなり、生育後期に強風や激しい降雨があると倒伏が発生しやすい (図-6)。草丈の増加や

茎径の低下はキノアの倒伏発生を招くことから、過剰な窒素施肥と密植を避けることも重要である (Wang *et al.* 2021)。キノアは痩せた土地でも栽培可能であると考えられているが、実際キノアを栽培すると窒素、リン酸、カリを十分に施用しないと生育が不良になりやすい。例えば、窒素の場合、1ha 当たり成分量で 100kg 程度施用する必要がある (氏家ら 2002)。種子は極めて小さいので、播種深度や覆土には注意を払う必要がある。出芽不良にならないためには播種深度を 1cm ~ 2cm とし、播種深度が 5cm 以上になると出芽率は著しく低下する (磯部ら 2015)。キノアには様々な虫害が生じ、生育初期ではヨトウムシやネキリムシによって茎の先端が被害され、生育中期では様々な虫の幼虫が葉や若い茎を食害する。さらに、生殖生長期になるとアブラムシやカメムシによる子実の吸汁害が生じる。このような中、我が国ではキノアに対してはアトマイヤーフロアブルが唯一登録された農薬である。いずれにしても我が国でのキノア栽培の歴史はまだ浅いので、今後も我が国の環境下でキノアの栽培試験を繰り返して様々な角度から問題点を解決していく必要があると考える。

おわりに

今回紹介したようにキノアは他の植物にはない様々な特徴があり、高い可

能性を秘めていると考える。今から約 10 年の 2013 年に国連は将来的な社会情勢の中でキノアが食料供給や貧困削減において大きな役割を果たすと考え、この年を国際キノア年と定めている。その後、2017 年にはキノアの全ゲノム塩基配列が解読され (Jarvis *et al.* 2017), 世界的にみてもキノアの持つ機能性や特徴が重要視されていることを意味する。ただし将来的にキノアがイネやコムギのように世界的な主要穀物になるとは考えにくいだが、今後も世界各地で栽培されキノアの持つ機能が食料生産や環境修復で生かされ、さらに食生活をより豊かにして健康の維持と栄養改善に貢献することに期待したい。そのためにもキノアに関する様々な研究が今以上に盛んになり、この植物が持つ新たな可能性が見出されることを願う。

引用文献

- Ashraf, M.A. *et al.* 2021. ATP binding cassette proteins ABCG37 and ABCG33 function as potassium-independent cesium uptake carriers in Arabidopsis roots. *Molecular Plant* 14, 664-678.
- Bazile, D. and J. Negrete 2009. Quinoa y biodiversidad: Cuáles son los desafíos regionales? *Revista Geografica de Valparaiso* 42, 1-141.
- Bhargava, A. *et al.* 2005. Karyotypic studies on some cultivated and wild species of *Chenopodium* (Chenopodiaceae). *Genetic Resources and Crop Evolution* 53, 1309-1320.
- Bhargava, A. and S. Srivastava 2013. *Crop Production and Management. Quinoa Botany, Production and Uses*, 90-102.

- Broadley, M.R. *et al.* 1999. A method to assess taxonomic variation in shoot cesium concentration among flowering plants. *Environ. Pollut.* 106, 341-349.
- Cai, Z.-Q. and Q. Gao 2020. Comparative physiological and biochemical mechanisms of salt tolerance in five contrasting highland quinoa cultivars. *BMC Plant Biology* 20, 70.
- 塩拓磨ら 2006. キノアの栽培と機能性. 第60回日本栄養食糧学会講演要旨集, 229.
- 藤倉雄司ら 2009. キヌアは栽培植物か? アンデス産雑穀の栽培化に関する一試論一. 国立民族学博物館調査報告 84, 225-244.
- 平野茂・小西洋太郎 2003. 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.
- 小西洋太郎 2002. 擬穀物アマランス, キノアの栄養特性とアレルギー代替食品への応用. *日本栄養・食糧学会誌* 55, 299-302.
- 小西洋太郎 2003. キノア種子の食品栄養学的特性. *雑穀研究* 18, 11-15.
- Koyro, H.W. *et al.* 2008. Salt Tolerance of *Chenopodium quinoa* Willd., Grains of the Andes: Influence of Salinity on Biomass Production, Yield, Composition of Reserves in the Seeds, Water and Solute Relations. *Mangroves and Halophytes: Restoration and Utilisation* 43, 133-145.
- Imamura, T. *et al.* 2020. A novel WD40-repeat protein involved in formation of epidermal bladder cells in the halophyte quinoa. *Communications Biology* 3, 513.
- 石井利幸 2010. 山梨県におけるキノア生産に向けた取り組み. *特産種苗* 8, 17-20.
- 磯部勝孝ら 2005. 高地下水位がアマランス, キノアの生育に及ぼす影響. *日作紀* 74, 298-303.
- 磯部勝孝ら 2014. キノアの発芽と初期生育における耐塩性の品種間差と作物間差. *日作紀* 83, 9-14.
- 磯部勝孝ら 2015. 土壌水分, 地温および播種深度がキノアの出芽に及ぼす影響. *日作紀* 84, 17-21.
- Isobe, K. *et al.* 2018. Effects of day length on pollen tube elongation, embryo formation, and seed development after flowering in quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.). *Seed Science Research* 28, 272-276.
- Isobe, K. *et al.* 2019. Effects of NaCl on Growth and Cesium Absorption in Quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.). *Water Air Soil Pollut.* 230, 66.
- 磯部勝孝ら 2019. キノアの立枯れの発生原因と抑制法に関する研究. *日作紀* 88, 117-124.
- Jarvis, D.E. *et al.* 2017. The genome of *Chenopodium quinoa*. *Nature*, 542, 307-312.
- 宮原佳彦 2014. 農地除染用トラクタによる表土削り取り作業技術. *土肥誌* 85(2), 125-128.
- Morales, A.J. *et al.* 2011. Physiological responses of *Chenopodium quinoa* to salt stress. *Int.J.Plant Physiol.Biochem.* 3, 219-232.
- 大迫早苗 2006. キヌア添加によるスポンジケーキの食味特性. *相模女子大学紀要*. B, 自然系 70, 15-22.
- 大迫早苗 2013. 食料安全保障に果たすキノアの役割—栄養面からのアプローチ—. *国際農林業協力* 36, 6-11.
- Orsini, F. *et al.* 2011. Beyond the ionic and osmotic response to salinity in *Chenopodium quinoa*: functional elements of successful halophytism. *Functional Plant Biology* 38, 818-831.
- Risi, J. and N.W. Galwey, 1984. The *Chenopodium* Grains of the Andes: Inca Crops for Modern Agriculture. *Advanced in Applied Biology* 10, 145-216.
- 佐藤睦人 2014. ファイトレメディエーションによる放射性セシウム除去効果の検証. *土肥誌* 85(2), 136-137.
- Schlick, G. and D.L. Bubenheim, 1993. Quinoa: an emerging „new crop“ with potential for CELSS. NASA technical Paper 3422, 1-6.
- Shabala, L. *et al.* 2012. Oxidative stress protection and stomatal patterning as components of salinity tolerance mechanism in quinoa (*Chenopodium quinoa*). *Physiologia Plantarum* 146, 26-38.
- 高尾哲也 1999. キノアの成分と生理活性物質 (特集 アマランスとキノア). *食の科学* 253, 52-58.
- 氏家 和広ら 2002. キノア (*Chenopodium quinoa* Willd.) の栽培に関する研究 第1報 子実収量の品種間差. *日作紀* 72 (別1), 138-139.
- Wada, K. *et al.* 2020. Effects of NaCl application on cesium accumulation in the aboveground parts of quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.). *Water Air Soil Pollut.* 231, 552.
- Wang, N. *et al.* 2021. Evaluating quinoa stem lodging susceptibility by a mathematical model and the finite element method under different agronomic practices. *Field Crops Research* 271, 108241.