

第4回科学技術講演会
藤田教授への質問と回答

<質問①>

キヌアが非生物的ストレスに強いことは良くわかりましたが、病原体や害虫などの生物学的ストレスに対してはどのようなのでしょうか？ボリビアでの栽培、日本での栽培、ともに教えていただきたいです。

回答①

とても重要な点について、ご質問いただきありがとうございます。多くのキヌア系統は、日本で育ててみると、梅雨の高温多湿期に病原体や害虫による被害を受けやすい傾向がみられます。今のところ、キヌアは、健康食品としての期待が高く、無・低農薬での有機栽培を望まれていることが多いので、病気や害虫による影響を軽減する必要があります。多くのキヌア系統は、霜害などの低温には強い傾向があるので、できるだけ早い時期に播種して、梅雨前に収穫する方法や、高温多湿のピークを過ぎた夏から秋のシーズンに播種する方法などがあります。日本の田畑などの周辺では、キヌアと栄養成長期のみかけ（草姿）がそっくりなアカザやシロザが普通に見られます（参照：回答⑥）。日本の高温多湿や病気、害虫に対して適応しているこういったキヌアの近縁種のもつ仕組みを調べて、キヌアの耐病性などの強化に活かしていければと考えています。

一方、ボリビアのウユニ塩湖（塩原）（標高約 3,700~4,000m）周辺の年間降水量が 200mm 以下の乾燥地域で栽培されているキヌアは、低温低湿度の状況下で栽培されているため、病原体や害虫による被害は、比較的少ないです。しかしながら、過酷環境下においてもできるだけ高い収量を得るために、現地でもフェロモンを利用した害虫の駆除方法などの研究が進められています。また、この地域では、基本的にキヌア以外の作物が育てられないため、3年から5年に一回だけ土地を利用し、それ以外は、休閑地としています。この作付けの方法が、病気を避けることにつながっている可能性があります。また、ティティカカ湖周辺（標高約 3,700~4,000m）の年間降水量がもう少し多い地域（400mm~800mm 程度）では、マメ科作物、イネ科作物、ジャガイモなどとキヌアが輪作されています。この作付けの方法も連作による障害に加えて、病気などの影響を低減する効果があるとされています。さらに、ペルーの低地などでは、単位面積あたりの収量を高くするために、化学肥料や農薬を多投したキヌア栽培も行われています（参照：回答⑤）。

<質問②>

栽培地によって低地型、高地型など 3 つに分類されておりましたが、現在先生がご研究

で使用されているキヌアはどれに相当するのでしょうか。

回答②

ご質問いただきありがとうございます。キヌアのゲノムの解析により分類した3つの型（北部高地型、南部高地型および低地型）のすべての型に属するキヌア系統について、どのように栽培化が進められてきたのかを知るために、その生育やストレス耐性などの特徴を比較しながら研究を進めています。日本などの緯度帯（20度～45度）で育てやすいのは、やはり同じ緯度帯にあるチリの海岸地域に由来する低地型のキヌアです。キヌアのゲノムの解析の結果から、北部高地型→南部高地型→低地型の順に栽培化が進められてきたと考えられています。赤道近くの低緯度から高緯度に向けて、また、高度4,000m程度から海拔0m近くに向けて、北から南に向けて栽培化が進められてきたことがわかってきましたが、そのためにキヌアがどのように遺伝子の働きなどを変化させて、それぞれの環境に適応してきたかについて興味をもって研究を進めています。

<質問③>

モデル植物シロイヌナズナの研究によって明らかにされたストレス耐性シグナル伝達経路ですが、キヌアにも同様に存在するのでしょうか？

回答③

ご質問いただきありがとうございます。これまでの研究では、モデル植物のシロイヌナズナの研究によって明らかにされてきたストレス耐性シグナル伝達経路が、キヌアにもおおよそ同じような形で存在することがわかってきています。ただ、キヌアの持つ高いストレス耐性が何に起因しているのかは、これまでのところよくわかっていません。この謎を解くために、今後とも両者を比較しながら研究を進める必要があると考えています。

<質問④>

キヌアの作物としての長所は分かりましたが短所はないのでしょうか。光合成の効率は低いという事はないのですか。

回答④

ご質問いただきありがとうございます。トウモロコシの栽培化の過程を示した図のあたりで少し触れたのですが、同じくアンデス地方原産のジャガイモやトマトに比べて、キヌアは、作物としての完成度がまだまだ低く、伸びしろが大きいと考えています。具体的には、完成度の高い作物に比べると、単位面積あたりの収量が低い、穂発芽しやすい、脱粒しやすい、などの点が挙げられます（参照：回答⑤）。これらの性質は、栽培化の途上にある作物に一般的にみられる傾向であり、機械化が進んだ現代の効率的な農業への適合性が十分で

はないことを示しています。キヌアは、栽培を禁止されていた期間があるため、ジャガイモやトマトに比べておよそ 500 年程度作物の育種開発の点では遅れていると考えられています。現代の技術を駆使して、500 年の遅れを一気に取り戻し、必要とされる性質を付与できるように急速に改良を進めていきたいと考えております。

キヌアは、イネやコムギと同じく C3 植物であることが知られています。これまでのところ、特にキヌアの光合成効率が低いという報告は、ないようです。きちんと栽培するためには、太陽光が必要なトウモロコシやイネとは異なり、モデル植物のシロイヌナズナと同様、実験室の蛍光灯レベルの光でも、十分に栽培することができるため、実験植物としてもよい性質をもっていると考えています。

<質問⑤>

一般的に穀類生産は大規模土地利用型ということで、機械化が進んでいると思いますが、このキヌア生産については現状は機械化等はなされておりますでしょうか？今後の展望も含めてご教示ください。

回答⑤

ご質問いただきありがとうございます。回答④で少し触れましたが、現状のキヌアは、脱粒しやすく、穂発芽しやすい、あるいは、機械化に適合した草型になっていない系統が多い、など機械化には、あまり向いていない性質をいくつも持っています。商業的なキヌア生産を考えた場合に、はじめに直面するのは、どのように生産を機械化するのかという問題です。キヌアの栽培国は、増加の一途を辿っていますが、既存の作物向けの機械を改造してキヌア用として使っているケースが多いようです。回答①で少し触れましたが、ペルーの低地などでは、単位面積あたりの収量を高くするために、化学肥料や農薬を多投したキヌア栽培も行われています。また、日本では、北海道、海外では、中国や欧米諸国などにおいても、ある程度大きな規模のキヌア生産が一部で行われています。これらの状況を踏まえると、ある程度環境に恵まれた地域では、キヌアの大規模生産に向けた機械化などの取り組みが今後一層進んでいくものと思われます。一方で、キヌアしか栽培できないような乾燥地などの過酷環境地域も世界的に増加しています。そういった過酷環境下にある耕作不適地では、高収量は望めないかもしれませんが、家畜の放牧や在来遺伝資源の活用などを組み合わせることにより、過酷地域への定住を可能にするような持続的なキヌア生産体系を開発していきたいと考えております (https://www.jst.go.jp/global/kadai/r0107_bolivia.html)。このような過酷環境地に向けた地球規模課題への取り組みが、砂漠化の進展などに対する対応策になっていくことを願って、国際連携チームで研究に取り組んでいます。

<質問⑥>

栽培を拡大するにあたり、防疫体制の構築はどのように進められているのでしょうか？

母数の拡大や環境の変化に伴い、未知の病害が発生するリスクを考慮しなければいけないと考えます。

回答⑥

ご質問いただきありがとうございます。キヌアに限りませんが、作物の栽培を拡大するにあたって、未知の病害が発生するリスクを考慮する必要は常にあると思います。日本国内に持ち込む場合にも、植物検疫を受ける必要があります。回答①でも少し触れましたが、キヌアの近縁種として、日本の田畑などの周辺で普通にみられる、アカザやシロザが知られており、栄養成長期の見た目（草姿）はよく似ています。また、アカザやシロザは、日本のみならず、世界中に広く分布しています。そういった意味では、多くの地域で、まったくなじみのない植物種であるということはないかと思いますが、未知の病害が発生するリスクを慎重に考慮していく必要はあるかと思います。

<質問⑦>

講演ありがとうございました。キヌアのゲノム特性を参考にその他の穀物(米や小麦)への応用は考えられておられるのでしょうか。

回答⑦

ご質問いただきありがとうございます。栄養価が高く、干ばつや塩害などさまざまな環境ストレスに強いキヌアの性質を既存のイネやコムギなどの作物の改良に役立てたいと考えて研究に取り組んでいます。ただ、まだ、現段階では、具体的な応用例を展望できる状況ではありませんが、基盤的な研究にしっかりと取り組んで、早期に実現させたいと考えています。

<質問⑧>

キヌアのバイオマスとしての生産性(単位面積当たりの乾物重量)はどのくらいですか。

回答⑧

ご質問いただきありがとうございます。バイオマスとしての単位面積あたりの乾物重量について、圃場レベルでのデータは持っていません。子実重量としては、1 haあたり3t以上の収量があることが報告されていますが、環境により大きく異なります。年間降水量が200mm以下の地域では、1 haあたり1t前後が目安とされていることが多いです。ポリビアでも、キヌアの茎葉は、乾燥して砕いた後に、リヤマの冬場の餌として与えられています。今後は、キヌアの飼料作物としての価値も考慮し、バイオマスとしての生産性についても注目していきたいと考えております。

<質問⑨>

キヌアが乾燥、塩に対して強いことはよくわかりましたが、高温や低温に対してはどうでしょうか？

回答⑨

ご質問いただきありがとうございます。高温にも低温にも強い系統があります。アラブ首長国連邦では、北アフリカや中央アジアの乾燥地でのキヌア栽培を目標として、耐暑性品種が選抜されています。ただし、北米大陸では、夏の気温がある程度以上の日数続く場合に不稔率が上がるとのことで、栽培適地を決める重要な制約要因になっている場合もあるようです。一方、低温については、氷点下5℃でも、死んでしまうことはないようですが、収量には影響を与えることが知られています。品種にもよりますが、収量に大きな影響を与えない低温は、氷点下3℃程度とも言われています。

<質問⑩>

キヌアの特徴は、栽培環境で共生する微生物とも関係していないのか？

回答⑩（参照：回答⑫）

ご質問をいただきありがとうございます。キヌアの過酷環境への適応性の高さには、共生する微生物も関係があるのではないかと考え、現在、私たちの研究チームでも研究を進めています。世界的には、いくつか報告もありますが、まだ、はっきりとしたことは、わかっていないのが現状です。今後急ピッチで解明されていくことを期待しています。

<質問⑪>

キヌアの遺伝的多様性は、農家には品種として認識されているのか、自家採種で変化していても特に意識されていないのかどちらでしょうか。また今後農家にはどのような形で（遺伝的に固定された形の品種として）普及していくのが良いのでしょうか。

回答⑪

ご質問いただきありがとうございます。キヌアは、雌花と両性花を一つの個体を持っているため、交雑しやすい性質を持っています。それぞれのキヌアの系統がどのような性質を持っているかを調べるために、自殖を繰り返し、遺伝的に均一な自殖系統をつくってきました。これは、キヌアの栽培化の過程やキヌアのもつ優れた環境適応性などの謎を分子レベルで解き明かすためには、必要なことでした。一方で、この交雑しやすい性質は、さまざまな遺伝的背景をもつ性質の個体が入り交じって存在している状況を生み出します。このようなヘテロ（不均一）な集団であることは、過酷環境下において、さまざまな状況に対応するには、有効な性質であり、リスクヘッジの役割を果たしてきた可能性が考え

られます。現地の伝統的なコミュニティに属する農家の方々は、さまざまなキヌア系統や野生種を貴重な遺伝資源として脈々と維持してこられました。一つの畑に数十系統が混植されることもあるようです。また、アンデスの人々の間には、変わった特質をもつキヌアなどの系統を大切に維持していく慣習があったようです。これらの点を踏まえると、環境の厳しい地域においては、今後とも、頑健性のより高いヘテロな集団として栽培していくことが、望ましいように思えます。一方で、環境に恵まれた地域では、雑種強勢や雄性不稔など現代農業で使われている技術を使った育種も展開していける可能性があるかもしれません。

<質問⑫>

キヌアの栽培環境中で共生する微生物の有無と、共生微生物の影響はないのか。例えば、乾燥した日なたで最初に成長する松は、土中の共生微生物から水分の補給を受けている。

回答⑫（参照：回答⑩）

ご質問いただきありがとうございます。私たちの研究チームでは、キヌアの栽培環境中に共生する微生物が存在するという予備的知見を得ており、世界的にも、いくつか関連の報告があります。現在、キヌアの過酷環境への適応性の高さには、共生微生物も関係があるのではないかと仮説を立て研究を進めていますが、まだ、はっきりとしたことは、わかっていません。今後の解明が期待されます。

<質問⑬>

過酷環境で生育する作物には、他にどのようなものがあるのか

回答⑬（参照：回答⑩）

ご質問いただきありがとうございます。キヌアが属するヒユ科には、ハウレンソウやビート（テンサイ）など乾燥や高濃度の塩分などのストレスに強い植物が多く含まれています。南米では、キヌアほどではありませんが、ジャガイモも比較的厳しい環境に強いとされています。また、キヌア (*Chenopodium quinoa*) の近縁種であるカニワ (*Chenopodium pallidicaule*) は、キヌアより高所の寒冷地でも育つことが知られています。主要穀類では、コムギも乾燥に比較的強いことが知られていますが、コムギの生産が困難な地域では、より低温や乾燥に強いオオムギやライ麦が栽培されています。一般に、孤児作物や低利用作物（ある地域では重要な役割を担っているもののその栽培や利用が世界的に広がっていない作物）の中には、キヌアのみならずトウジンビエやソバなど比較的過酷な環境で生育できる作物が多いことが知られています。トウジンビエは、トウモロコシやコムギが生育できない貧栄養土壌や高濃度の塩分を含む土壌でも栽培できるだけでなく、高温や乾燥ストレスにも強い耐性をもっています。ソバは、収穫期間が短く、冷涼なところでも育ち、乾燥に強いいため、日本でも古くから冷害時などに救荒作物（天候不順による飢饉の時などに利用される代用作物）とし

て、栽培されていました。

<質問⑭>

キヌア栽培は、現在、世界の過酷環境での食料生産にどの程度貢献しているのか。何トンぐらい生産されているのか。2050の見込みは？

回答⑭

ご質問いただきありがとうございます。国連は、世界の飢餓や栄養不良の削減に大きな可能性があるキヌアの重要性に対する認識を高めるために、2013年を国際キヌア年 (<http://www.fao.org/3/ax303o/ax303o.pdf>) と決めました。現在、世界中で約10万トン程度生産されていると推定されています。2050年の見込みは、わかりませんが、中国では、キヌアの生産量が急増しており、2万トン生産しているとの報告もあります。世界中で徐々に受け入れられて生産量は伸びていくことが推定されています。いずれにしても、本格的な取り組みは、まだはじまったばかりかと思います。今後の状況を見守っていきたいと思います。

<質問⑮>

日本で栽培する価値のある土地は存在するのか？

回答⑮

ご質問いただきありがとうございます。日本は、気候的にも環境的にも恵まれたところが多く、特に、全土に渡って十分な降水量があるため、水分環境の面で見れば、過酷環境と呼べる地域はほとんどないかもしれません。しかしながら、現在、価格も高く、栄養面でも評価されているため、日本でも意欲的な農家の方々がキヌア生産に取り組まれています。

<質問⑯>

私は食の選択肢を増やすということを考えると、生産量の他に、キヌアの味や調理のしやすさといったことが重要だと考えます。実際に、遺伝子操作などでキヌアの味や調理のしやすさは操作可能なのでしょうか。

回答⑯（参照：回答⑳）

ご質問いただきありがとうございます。遺伝子組換えキヌアを作る技術は、今のところ開発されておらず、遺伝子組換え技術で、キヌアの味や調理のしやすさを変えることはできません。かわりに、次世代シークエンサーやスーパーコンピューターなどの先端機器を駆使した新しい育種技術を用いることによって、比較的短期間に、キヌアの味や調理のしやすさを変えることは可能です。味については、すでにいろいろな系統の中から、育種が進められて

おり、特にサポニン含量が低い苦み成分の少ない系統の開発が進められています。調理については、お米のように炊く必要もなく、茹でるか、炒めるか、煎ったりすることによって簡単に食べることはできます。ただし、おっしゃられているように「食の選択肢を増やす」という観点では、大いに工夫や研究の余地があると思います。ソバの植物や実のを知り、見たことがある人はそう多くはないかもしれませんが、食べ物としての麺類の「ソバ」を知らない日本人は、ほとんどいないでしょう。キヌアにも、キヌアのことを知らなくても、「キヌア」って食べ物なら知っていると言われるような代表的な食べ方や加工食品を開発していくことが必要ではないかと考えています。

<質問⑰>

作物生産というのは太陽エネルギーの固定だと思いますが、太陽光発電と比べた場合エネルギー効率はどの程度になるのでしょうか。

回答⑰

ご質問いただきありがとうございます。太陽光発電の専門家でないため、詳しくはわかりませんが、最近では、20%以上の変換効率のものもあると報告されているようです。一方で、植物の光合成の太陽エネルギー変換効率は、理論上の最大値で8%、日本のような中緯度地域では、約1%とのことです（渡辺正、1997、光合成と地球環境、生産研究 49:10）。この著作の中で、渡辺先生は、太陽電池は、それなりのエネルギーを消費してつくられるが、植物は、ほうっておいてもひとりで堅実に太陽エネルギーを変換する点が異なるので、数値だけを比較することに懸念を示されています。さらに、ご興味があれば、もとの論文にもぜひあたってみてください。

<質問⑱>

日本ではキヌアは高価なので日常では食すことができなさそうですが、他の国でキヌア栽培が容易であれば、家庭に苗を配布して育て方を教えてあげれば、現地の方でも栽培できますか？

回答⑱

ご質問いただきありがとうございます。苗でなくても、種子があれば、いろいろな環境でキヌアを育てることができます。系統にもよりますが、気候や環境により向き不向きはあるかと思います。水田などの特別なしくみが必要なわけでもなく、播種すればいいだけなのでそういう意味では、簡単と言えます。難しい点があるとすれば、高温多湿の状況が続くと病気になるやすくなり、虫害も顕著になってきますが、それにどう対応していくかということかと思います。あとは、水がなさ過ぎるのも対応が難しいかと思われます。日本でも展開している外資系のスーパーでは、南米産有機栽培キヌアが1kgあたり500円程度で入手でき

ます。通常、日本国内では、南米産有機栽培キヌアは、1kgあたり2,000-3,000円程度で入手できることが多いです。また、給食や健康弁当、機内食などにもキヌアが入っていることもありますので、日常的に食べる機会ももてるかもしれません。

<質問⑱>

キヌアのように今後の栄養調達に必要となっていく作物は、私たち食が豊富にある国の人も積極的に消費するべきなのでしょうか？消費によって生産も増えていくのか、かえって必要な人への供給が滞ってしまうのか、どちらなのでしょう。

回答⑱

ご質問いただきありがとうございます。単純にイエスともノーとも言えないかもしれません。地球規模で食の問題を捉えられている点、共感できます。地球規模の食料問題には、地産地消、食の多様性、食品ロスなど、さまざまな問題や尺度もあるかと思います。こういった食料問題は、自然災害や極度の貧困に加えて、需要と供給のバランスの崩壊が原因になっていると考えられています。今回の講演では、キヌアの研究を通して、食の多様性を拡大することの重要性を訴えるのが一つの目標でした。そういう観点からは積極的にキヌアも食べていただいて、差し支えないと思います。ただ、南米産のキヌアを食べるのであれば、地産地消とはならないでしょう。また、食の多様性を拡大する過程では、需要と供給のバランスを崩すこともありえるかもしれません。重視する尺度によって、答えは、変わってしまいます。

国連が2013年を国際キヌア年として定めた前後の頃は、空前のキヌアブームとなり、キヌア需要が世界的に増大し、キヌア価格が高騰しました。これによって、現地でも土地の乱開発によってキヌア圃場を拡大する動きがありました。その結果、本来キヌア圃場に向いていない土地までキヌアの栽培に使ってしまったため、土壌浸食や砂漠化の問題を引き起こしました。つまり、キヌアのブームは、食料問題にとどまらず環境問題にも影響を与えてしまったのです。このように、密接につながったさまざまな事象があり、その連関の具合によって、いろいろなことが引き起こされていくことを考える必要があります。温暖化についても、さまざまな側面があることを理解し、情報の山の中から、本当に大切な情報をつかんでいく必要があるでしょう。大勢の人が言うことだから正しいということもないかもしれません。今後とも、さまざまな状況を見きわめ、そのバランスに考慮しながら、食の多様性の拡大を目指すことによって、地球規模の環境問題や食料問題を解決する道を探していきます。

<質問⑳>

キヌアのことを初めて知りました。栄養価が高く、優れた植物であることは分かりますが、食品として利用されるためには美味しくないとなかなか普及しないと思います。加工食品

としての事例が幾つか紹介されていましたが、グローバルに普及するためには食味向上と言った点が大切だと思います。どのような試みがなされているのでしょうか？

回答⑳（参照：回答⑯）

ご質問いただきありがとうございます。キヌアの若い葉っぱは、普通のホウレンソウとは違って、加熱することなくサラダとして食べることができます。また、種子（子実）は、茹でたり、炒めたり、煎ったりして簡単に食べることができます。すでに欧米や日本でも一部の方々の間では、どのような料理にもあわせやすいということもあって普及しているようです。キヌアの利用法については、世界的に、さまざまな検討が進んでいるようですが、日本の食生活で、どのように利用されていくのかは、今後の課題かと思えます。食味の向上には、どういう成分を調整していけばいいのかなどもこれからの研究課題かと思えます。食品科学分野でキヌアの利用に関する研究が活発に行われているので、今後の展開を期待しています。

<質問㉑>

温暖化により高緯度でも越冬できる昆虫が増えた結果、病虫害被害が拡大することが考えられます。すでに起こっているなら、ブドウ、キヌアに限らずお二人がご存じの事象やその対策を教えてくださいたいです。

回答㉑（参照：回答①）

ご質問いただきありがとうございます。キヌアは、高温多湿の日が続くと病気になりやすくなり、虫害も顕著になってきます。比較的病虫害が少ないと考えられていた冷涼な高地の栽培においても、病虫害が問題になってくる可能性があります。サバクトビバッタの異常増殖による被害がよく報道されていますが、地球温暖化の影響で、これまで特定地域のみ被害が生じていた病虫害の越冬エリアが拡大することによって越境性の病虫害の被害が発生し、世界各地の農業を脅かしています。なかなか有効な手立てがないようですが、病虫害のモニタリングなどの情報収集をしっかりと行い、発生時の防除やまん延防止対策をしっかりと行っていくことが提唱されています（<https://www.affrc.maff.go.jp/kokusaikenkyu/attach/pdf/byogaichu-5.pdf>）。