

ミネラルと野菜と人間の 不思議な関係

東京農業大学 客員教授 渡辺 和彦

第2章 養分吸収

1 植物における鉄吸収

「日」 本人が発見し、命名した物質
『ムギネ酸』が学術用語として今や世界の学会で注目されている」と、茅野充男が1988年、日本土壤肥料学会会場で、日本農学賞を受賞した高城成一を紹介しました。そのころから日本の植物栄養学分野では、分子生物学的手法による植物の養分吸収機構解明が盛んになったように思います。ムギネ酸については、高城成一らはもちろんですが、その後、森敏らや馬建鋒らにより世界に先駆けた研究成果が続出しています。作物の養分吸収機構を新たな視点で知ることができるので、それらの研究のごく一部を紹介します。

根からの分泌物によって吸収される鉄



野菜など双子葉植物と、イネやム

ギなどのイネ科植物とは土壌からの鉄の吸収方法が異なります。単子葉植物でも、イネ科以外は双子葉植物と同じ吸収機構で鉄を吸収します。鉄は土壌中に約5%含まれていますが、ほとんどが難溶性の酸化鉄です。第1図に示すように、野菜などでは根から水素イオン（プロトン）やキレート物質を出し、鉄を溶けやすくし、根表面の3価鉄還元酵素の働きで2価鉄に還元し、2価鉄トランスポーター（輸送タンパク質）IRT1によって根内に吸収されます。この3価鉄還元酵素は亜鉛、マンガ

ン、銅の酸化物も還元しますので、イネ科以外の植物はアルカリ土壌での適応機構として、これらの不溶性重金属元素の可溶性に類似の還元酵素が存在している可能性が高いです。可溶化されたイオンは、それぞれの

！ トランスポーター（輸送タンパク質）とは...？

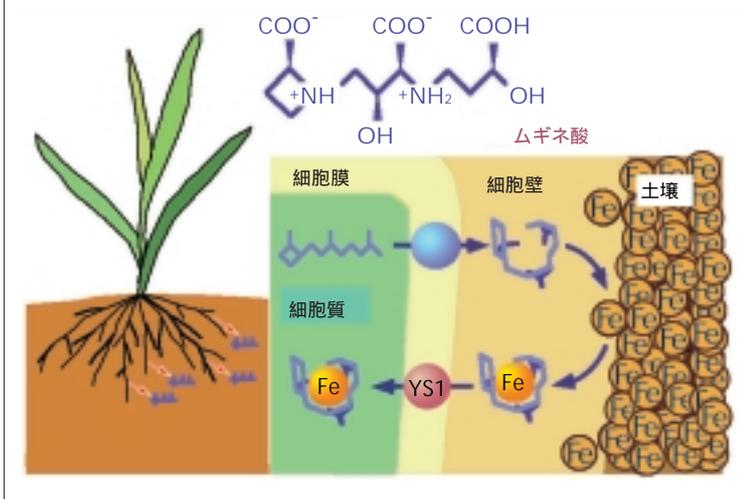
ここに出てくる新しい言葉「トランスポーター」は、養分の吸収・転流に非常に重要なので簡単に説明します。

生物は細胞からできていますが、その細胞の中へ、あるいは細胞から外へと物質を移動させるには特定の通路が必要です。その通路は多くの場合、輸送される物質に固有なもので、第1図のプロトンはプロトン用の、有機酸は有機酸固有のトランスポーターによって出入りしています。分子生物学の発展により明らかになったことですが、作物種による養分吸収の特異性も、このトランスポーターの有無や活動度によります。

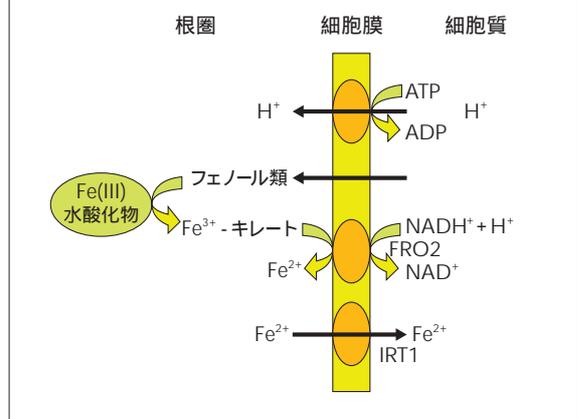
トランスポーターは養分固有のため多数あり、たとえば吸収された元素が根から導管へ移行するのも、吸収とは別のトランスポーターの働きによるのです。したがって、根に養分が吸収されても地上部含有率の異なる作物の場合は、導管への移行部位のトランスポーターの活性が弱いことも明らかになっています。

イオン特有のトランスポーターを紹介して吸収されると考えられています。一方、イネ科植物では第2図に示すように、鉄が欠乏すると根からアミノ酸の一種であるムギネ酸（作物種により構造が若干異なるため、正確には「ムギネ酸類」）が分泌され鉄とキレート結合し、3価鉄とムギネ

第2図 鉄獲得機構 系2³ (イネ科植物) (森敏 原図)



第1図 鉄獲得機構 系1³ (双子葉植物とイネ科以外の単子葉植物) (森敏、馬建鋒らより作図)



土壌pH₂がアルカリになると作物は鉄を吸収できなくなり、十分な生育が

世界的視野での鉄欠乏対策



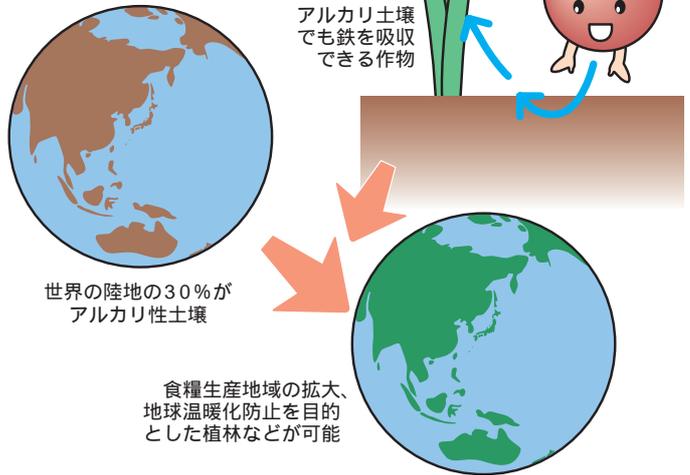
酸が結合したまま根に吸収されず。この鉄-ムギネ酸錯体の輸送を司るトランスポーターYS1の遺伝子も、すでにトウモロコシやイネから単離されています。ムギネ酸類は銅、亜鉛、コバルトとも鉄と類似構造の錯体を形成します。この輸送体(トランスポーター)は鉄特異的なものばかりでなく、他元素の錯体を運ぶことができるものもあります。根から分泌されるムギネ酸は分泌に日周期性があり、体内で時間をかけて徐々に生成されたムギネ酸が、一般には夜明け後、温度が上昇すると2〜3時間かけて放出され、鉄を可溶化して吸収します。

た。羅小勇はリンゴの樹幹に穴を開け、鉄資材を2〜3時間かけて圧をかけ、強制注入する技術を開発し、リンゴの鉄欠乏を治癒していました。ただし、効果は数年持続するもの

できません。これは鉄の溶解度がpH上昇とともに急激に減るためです。日本国内では八郎瀧など干拓地に、死滅した貝殻によるアルカリ土壌が一部ある程度ですが、世界全体で見ると乾燥地や半乾燥地にはアルカリ土壌が多く見られます。世界の陸地の約30%はアルカリ土壌で、世界の食糧生産を考えるとアルカリ土壌の存在は無視できるものではありません。

筆者は以前、羅小勇に招かれ中国の甘肅省農業科学院に集中講義を行ったことがあります。甘肅省は果樹栽培も盛んな所です。当地で問題になっていた生理障害は、リンゴやブドウの鉄欠乏でした。これは土壌pHが8前後のために発生しています。羅小勇はリンゴの樹幹に穴を開け、鉄資材を2〜3時間かけて圧をかけ、強制注入する技術を開発し、リンゴの鉄欠乏を治癒していました。ただし、効果は数年持続するもの

死滅した貝殻によるアルカリ土壌が一部ある程度ですが、世界全体で見ると乾燥地や半乾燥地にはアルカリ土壌が多く見られます。世界の陸地の約30%はアルカリ土壌で、世界の食糧生産を考えるとアルカリ土壌の存在は無視できるものではありません。



今後期待されているアルカリ土壌の活用。

労力と時間がかかる方法です。日本の生産現場でもよく経験することですが、土壌pHを上げるのは容易でも、下げるのは難しいのです。pH10を超えるようなアルカリ土壌には脱硫酸石膏を用いるのが有効で、土壌重量当たり0.5%程度の添加でもpH8前後に低下でき、中国でも実用化が進みつつあります。しかし、それ以下に抑えるには炭酸カルシウムによる緩衝作用もあり、多くの酸を必要としますので、鉄欠乏対策としてヨーロッパでは、EDTA鉄やEDDHA鉄、クエン酸鉄などの葉

面散布や土壌施用がなされています。ただし、資材は高価です。

このアルカリ土壌でも鉄を吸収できる作物が、森敏らにより世界で初めて作出されました(写真1)。鉄獲得機構系2のイネ科植物(イネ)だけでなく、系1の双子葉植物のタバコでも別な遺伝子で成功しており、将来、世界の食糧生産地域の拡大に寄与すると思われます。

すなわち、この遺伝子は将来、双子葉植物であるダイズやジャガイモの石灰質アルカリ土壌耐性作物創製の基幹遺伝子となる可能性が高い、

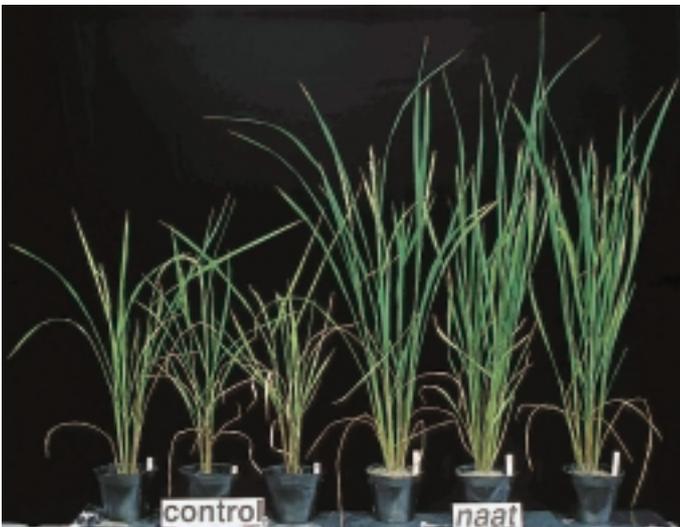


写真1 アルカリ土壌でも栽培できるイネ(森敏 原図)
左: コントロール、右: 遺伝子を入れたイネ

注: イネは通常2価鉄の多い湛水下で生育するため、3価鉄吸収能が弱い。メチオニンからムギネ酸合成へのキナー酵素でもあるニコチアナミンアミノ基転移酵素の遺伝子をイネに導入すると、デオキシムギネ酸を多く作り、アルカリ土壌でも3価鉄を吸収できるようになる。

イネ科牧草の混植で鉄を可溶化



写真2は馬建鋒のイタリアの共同研究者によるものですが、果樹の近くにイネ科牧草を混植すると鉄欠乏が発生せず、しかも異なるイネ科牧草を混植すると、その効果はより高

といえます。樹木は系1で鉄を吸収しています。このことは地球温暖化防止のため、現在不毛地となっているアルカリ土壌地帯への植林も可能になり、第三の緑の革命の基礎ともなりうることを示しています。

農業生産現場での鉄欠乏



いものとなります。馬建鋒が明らかにしたことですが、牧草の種類によりムギネ酸類の種類も異なり、しかも放出時間が異なるので(第3図)、その結果ムギネ酸類の分泌時間が長くなり、果樹に可溶化された鉄を供給できていた、ということ。ムギネ酸の日周性は、温度によって制御されているそうです。

作物の鉄欠乏症状は、土壌pHがアルカリ性になったり、重金属元素が過剰に存在すると生じることがよく知られていますが、めずらしい例を紹介しましょう。

第3図 異なるイネ科牧草によるムギネ酸類の分泌パターン (馬建鋒 原図)

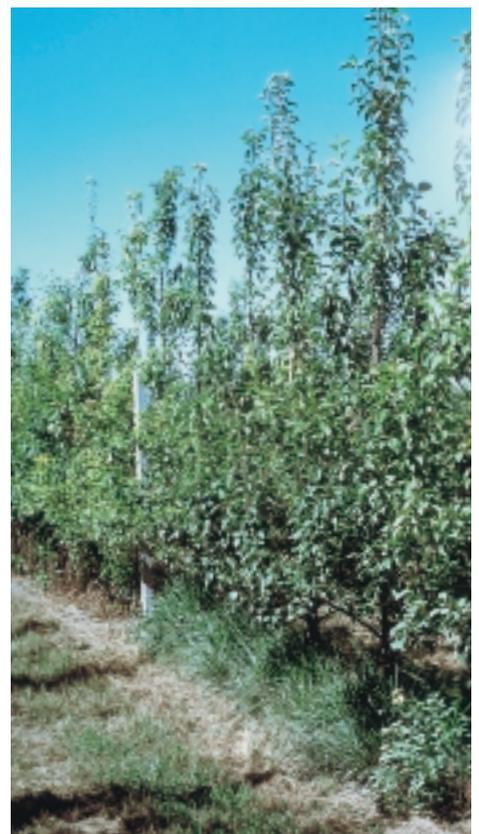
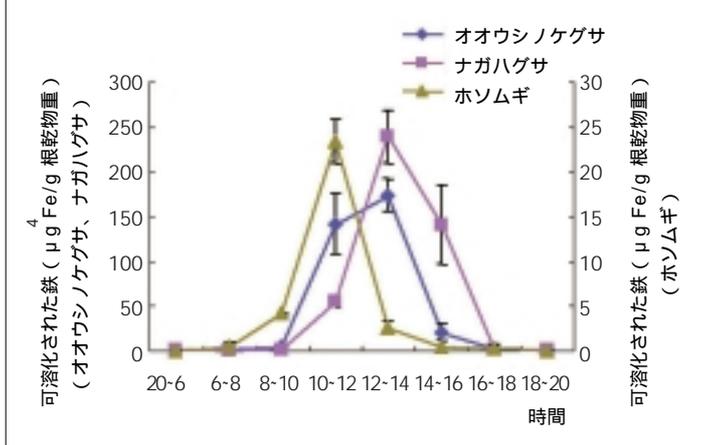


写真2 ナシの鉄欠乏がイネ科牧草の混植で防止 (馬建鋒の共同研究者 原図)

近年、イチゴの高設栽培やトマトでも液肥を利用した少量土耕栽培が普及しつつあります。通常の土耕栽培



写真3 2液用水耕用肥料をひとつのタンクに入れた

培では、窒素^{ちっそ}、リン酸、カリの三要素を供給していれば作物は健全に生育しますが、少量土耕栽培では栽培当初の2〜3年は生育もよいもの、やがて養分欠乏症状が多々見られるようになります。イチゴでは障害は観察しにくいですが、トマトは敏感で、葉全体が黄化して一見マグネシウム欠乏のようにも見えますが、実は硫黄欠乏を示しています。これは硫黄の入っていない液肥も多いからで、微量元素も入っていない液肥も多く見られます。

養液栽培の盛んなヨーロッパでは、

少量土耕栽培でも液肥として微量元素も入った完全な肥料を使っていることが多く、それを聞いた栽培者が早速、微量元素も硫黄も入った完全な肥料を液肥として用いました。しばらくして生育がおかしいと相談を受け、現場に行くと、タンク内の液肥が白く沈殿しています(写真3)。

2液タイプの肥料を1液タイプと同じように一つのタンクに入れると、リン酸カルシウムや硫酸カルシウムが生じて沈殿してしまい、その時に鉄も沈殿し、不溶化するのです。このケースでは少量培土に過リン酸石灰や貝化石粉末を施用していたので、リン欠乏やカルシウム欠乏は出ていませんが、トマトの葉に所々、鉄欠乏の症状が出ていました。ところが、水尻の1本のトマトだけが特に黄色くなっていました(写真4)。畝全体でなく、水尻だけというのが不思議ですが、理由は簡単でした。

- ・ここは水尻のため、根圏に水が当たりやすく、乾燥する時間も短い。
- ・すでに述べたように、作物は根から酸類を出して土壌中の鉄を可溶化している。常に根が水で洗われていれば、根から分泌された酸も流されてしまい、トマトは土壌か

らの3個の鉄を吸えなくなる。

これは高城成一が水耕栽培のイネやムギでも経験しており、3個の鉄を培養液に与えた場合、根が乾燥する畑状態のイネやムギでは鉄欠乏が生じにくく、水耕栽培では鉄欠乏になりやすいという、ムギネ酸発見のきっかけとなった現象とも類似しています。

2 人体における鉄吸収

鉄 の欠乏症は無機元素の欠乏症の中で最も発生頻度が高く、

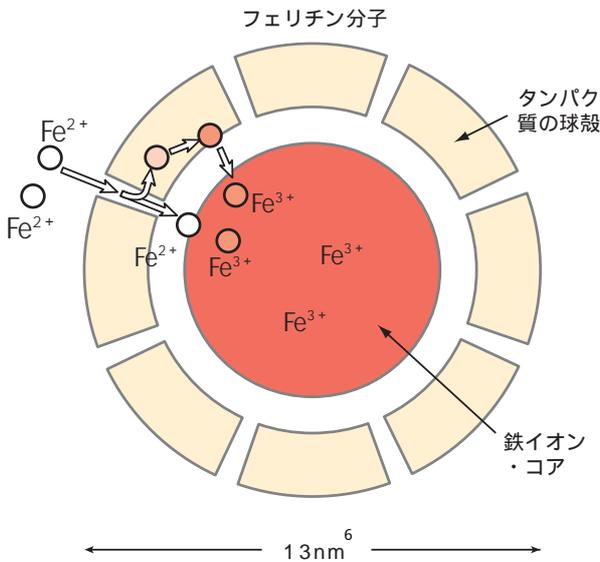
若年から中年の女性では、月経による鉄の損失のため、鉄欠乏症は多発します。人体における鉄吸収は、体内の鉄貯蔵量により調節されています。すなわち、鉄が充足されている場合は摂取された鉄の一部が吸収さ



写真4 水尻の1本だけ激しい鉄欠乏症状が発生

れるだけですが、鉄欠乏性貧血患者ではその数倍が吸収されるのです。生体内では鉄の恒常性を維持するための制御機構が存在しています。食物の種類により鉄の吸収率は大きく異なり、野菜や穀物に含まれる非ヘム鉄は吸収率が1〜5%であるのに、魚や肉類に含まれるヘム鉄は

第4図 フェリチンの構造 (猪子洋二 原図)



貯蔵タンパク質であるフェリチンは、動・植物からバクテリアまで普遍的に存在する。反応性の高い2価鉄イオンを酸化して不活性な3価鉄として最大約4500個を分子内に取り込むことで、鉄元素の貯蔵と無毒化の機能を担っている。

10〜20%とよく吸収されます。ヘム鉄は胃酸によりタンパク質から遊離され、そのままの形で腸管吸収されます。これはちょうど、イネ科植物におけるムギネ酸 鉄複合体による吸収とよく似ています。一方、野菜などの非ヘム鉄は粘膜の還元酵素により3価から2価に還元され、トランスポーターDMT1により主に十二指腸から吸収されます。鉄の吸収が、還元力のあるアスコルビン酸(ビタミンC)と同時に摂取するとよくなるというのは、このトランスポーターが植物のIRT1と同じく、3価鉄を全く通さないためなのです。

吸

取された鉄のごく一部は血漿中のフェリチン(第4図)に取り込まれ、大半は血清中の鉄を運ぶタンパク質であるトランスフェリンに受け渡されます。そして造血の場である骨髄、あるいは肝臓に運ばれ、フェリチンなどの形態で貯蔵されます。

骨髄ではヘモグロビンのヘム分子に取り込まれ、赤血球中のヘモグロビンとして末梢血へ放出されます。役目を終えた赤血球中のヘモグロビンは分解を受け、鉄は再びトランスフェリンに結合して骨髄へと運ばれ、再利用されます。このように、い

鉄の欠乏症について進めてきましたが、逆の場合はどうなるのでしょうか。人体に鉄が充足されていれば、過剰に吸収されないように調節する機能があるため、健康な人は何ら心配はありませんが、慢性アルコール中毒や肝障害の人は注意が必要です。特にC型慢性肝炎では、理由は明らかではありませんが鉄が過剰に肝臓に蓄積されており、血漿フェリチン値は上昇しているからです。

通常、酸素は細胞内でエネルギー生産に使われますが、その際に一部

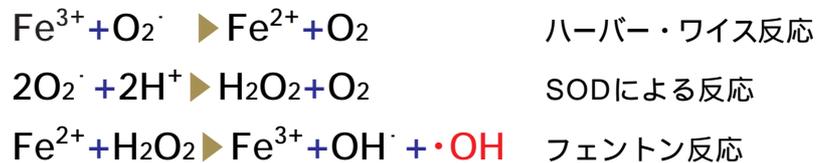
鉄の過剰障害に注意



たん体内に入った鉄は再利用されています。鉄の体外への排泄は、わずかに腸粘膜や皮膚の老化細胞の脱落による程度(約1mg/日)なので、成人男性では1日に1mg、女性は月経による失血のため、さらに1mgの新たな吸収が必要とされています。

体内の鉄不足はまず貯蔵鉄の不足として現れます。貯蔵鉄の量は血漿フェリチンの量と相関があり、早期の鉄欠乏は血漿フェリチンの低下によって診断できます。血漿フェリチンの標準値は100〜3000ng/mlとされています。

第5図 鉄の存在による水酸化ラジカルの生成



注：この水酸化ラジカル($\cdot\text{OH}$)は活性酸素種の中でも最も酸化力が強く、DNAの酸化損傷、細胞破壊、がん化を引き起こす。

注：正常な細胞では O_2^- はスーパーオキシドジスムターゼ(SOD)により過酸化水素と酸素に分解され、生じた過酸化水素はカタラーゼにより水と酸素になる。SODとカタラーゼ...いずれも前記の反応を触媒する酵素の名前。

の酸素から O_2^- が発生します。 O_2^- は、鉄の作用によってより活性の強い水酸化ラジカルを生じます(第5図・フェントン反応参照)。植物の鉄毒性に詳しい但野利秋によると、植物だけでなく動物でも2価鉄と過酸化水素の反応で生じる水酸化ラジカルが、生体膜を構成する多価不飽和脂肪酸と反応し、脂質過酸化の連鎖反応を生じて細胞を破壊します。活性

6 nm...ナノメートル。1mの 10^{-9} 倍(10^{-9} m)。 7 ng...ナノグラム。1gの 10^{-9} 倍(10^{-9} g)。

8 ラジカル...遊離基。不対電子を持つ原子。化学反応が大きく不安定とされる。

9 DNA...デオキシリボ核酸の略称で、遺伝子本体。

野菜作りの疑問が解消！

申込番号 05-084-01

野菜栽培処方箋 Q&A

価格 1冊 1,050円(税込み)

家庭菜園からプロの出荷用まで、実際の栽培時によくある失敗や疑問にQ & A形式で解説しています。また、初級編、中上級編に分けて、作物の特質や基本栽培管理を記載しており、栽培マニュアルとしても利用できます。

この本は園芸新知識・野菜号および、野菜ガイド掲載記事を抜粋加筆し、再編集したものです。

タキイ種苗(編)
A4判
オールカラー114頁



友の会員割引はできません。
10冊以上お求めになる場合は、価格を別途ご相談ください。

ご注文書には申込番号をご記入ください。



タキイのラジオCM 下記全国32局ネットで放送中!

番組名 ニッポン放送「笑顔満開! ひでたけ・のりこの大吉ラジオ」(月~金)

それ以外の局「吉田尚記のどうですか歌謡曲」(月~金)

ラジオで「園芸新知識」をCM中!

ニッポン放送「お願い! DJ! 小林克也のはっぱウィークエンド」(毎週土曜日7:00~11:00)の中で、「園芸新知識」のCMを放送中(毎月第4土曜日10:45ごろ)です。ぜひお聴きください!

ネット局一覧

エリア	放送局名	放送時間	エリア	放送局名	放送時間	エリア	放送局名	放送時間
関東・甲信越	ニッポン放送	15:30~17:30	富山	北日本放送	16:00~16:10	香川	西日本放送	16:50~17:00
北海道	STVラジオ放送	13:45~13:55	福井	福井放送	16:10~16:20	愛媛	南海放送	16:35~16:45
青森	青森放送	16:30~16:40	静岡	静岡放送	16:20~16:30	高知	高知放送	16:50~17:00
岩手	IBC岩手放送	16:50~17:00	愛知	東海ラジオ放送	16:23~16:33	福岡	九州朝日放送	16:30~16:40
宮城	東北放送	15:50~16:00	大阪	大阪放送	17:20~17:30	長崎	長崎放送	16:35~16:45
秋田	秋田放送	16:10~16:20	和歌山	和歌山放送	16:30~16:40	熊本	熊本放送	16:35~16:45
山形	山形放送	16:50~17:00	鳥取・島根	山陰放送	17:50~18:00	大分	大分放送	16:45~16:55
福島	ラジオ福島	16:40~16:50	岡山	山陽放送	16:50~17:00	宮崎	宮崎放送	16:40~16:50
新潟	新潟放送	16:00~16:10	広島	中国放送	16:00~16:10	鹿児島	南日本放送	14:10~14:20
長野	信越放送	16:30~16:40	山口	山口放送	16:50~17:00	沖縄	ラジオ沖縄	16:45~16:55
山梨	山梨放送	16:40~16:50	徳島	四国放送	16:50~17:00		は自社番組	計32局

その他: KBSラジオ「桂都丸のサークルタウン」10:00~11:00内(京都・滋賀)

CMのご感想をハガキでお寄せください。お寄せいただいた方の中から、毎月抽選で10名様に素敵なプレゼント(オリジナル和布巾)を差し上げます。(毎月末到着締切)

プレゼントの当選者発表は、景品の発送をもって代えさせていただきます。

宛先 〒600 8686 京都市下京区梅小路
タキイ種苗(株)広報出版部 ラジオCM係

な鉄は、正常な細胞ではフェリチンにより隔離されています。鉄が隔離されていないと、水酸化ラジカルが細胞膜障害、DNA障害を引き起こし、肝病変の進展、肝細胞がんの発生に影響を与えます。このため鉄制

限の食事療法がなされています。レバーや赤身の肉や魚はへム鉄が多く含まれています。植物性食品は非へム鉄ですが、海藻、特にひじきに多く鉄分が含まれています。貧血の女性にはよい食事も、肝障害の人は控

えた方がよいので注意が必要です。
* * *
先進国では疾病や食生活が悪くない限り、鉄は充足しています。しかし、日本国内でも若い女性は鉄不足ですし、海外の発展途上国、特に貧

困層の鉄欠乏が問題視されています。農産物の鉄含有量の品種間差は2~3倍のため、それを利用する方法もありませんが、国際的には分子育種によるフェリチン含量の高い農産物の作出研究が進んでいます。