

「アクアポリンとは何か」  
及び  
「貴陽石がアクアポリン  
透過水に及ぼす効果」

2022年5月7日  
合名会社群馬長石

# 目次

	ページ
1.生物と水	3
2.アクアポリン発見の歴史	4
3.アグリ教授の功績	5
4.ほとんどの生物にあるアクアポリン	6
5.各生物のアクアポリンの役割	7
6.アクアポリンの立体構造	8
7.アクアポリンの大きさなど（ヒトの体を例にして）	9
8.ヒトのアクアポリンと、貴陽石がアクアポリン透過水に及ぼす効果	10
9.植物アクアポリンと、貴陽石がアクアポリン透過水に及ぼす効果	32
10.ミネラルスター施用によるイネのアクアポリン透過性に関する試験結果 の詳細 2019年～2020年実施	44
11.【付録：2020年イネ生育データ込みの全試験結果のまとめ】	54
12. <引用・参考にした文献・資料>	63

# 1. 生物と水

- 地球は水の惑星ともいわれ、生命の誕生にも水は必要であった。
- 生物の基本単位である細胞で水は重要な働きをしており、生化学反応の大部分は水溶液中で行われている。
- 水は生物の身体を構成する成分として最も多く（脊椎動物においては体重の約60%以上）、水分の保持は個体の生存や種の維持のために不可欠となっている。
- ヒトの場合、体重の60%を占める水の内40%までが、細胞内に封じ込められた水（細胞内液）で、残り20%が、血液、リンパ液など、細胞の外にある水（細胞外液）です。さらに細胞の外にある水の内、細胞と細胞の間隙にある水（細胞間液）が体重の約15%、血漿は体重の約5%です。
- この細胞内液と細胞外液を合わせたものを体液と呼び、この体液が生命の維持と活動に重要な役割を果たしている。
- ヒトのからだの部分ごとに見ると、血液の90%は水、ヒトの脳も80%は水、眼の網膜も92%は水で、他には骨格筋に75%、肝臓に68%、骨に20%、脂肪組織には10%の水が含まれている。新生児は80%と大人に比べてかなり高い割合となっている。
- 生命活動において水は重要であり、古くから生体での水移動に関する研究は、生理学の主要な研究課題の一つであった。

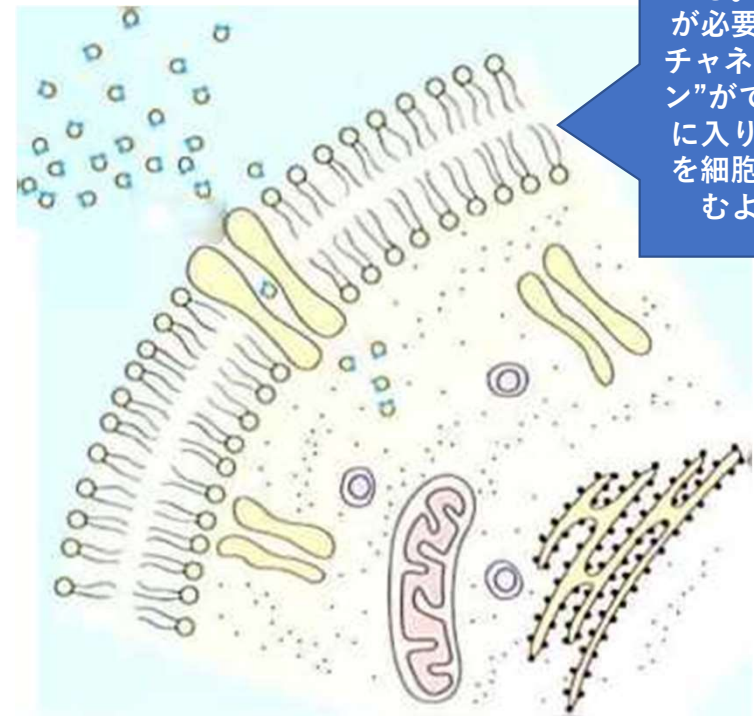
## 2. アクアポリン発見の歴史

●細胞の外側にある細胞膜の主な成分は、リン脂質でできています。このリン脂質は、頭と尾があり、頭は比較的水にくっつきやすい“リン酸”、尾は水にくっつきにくい“脂質(油)”でできています。細胞膜では二つのリン脂質が尾と尾をくっつけて、二重になった構造をとっています。もし細胞膜がリン脂質だけからできているとすると、油と水の関係にあたりますので、簡単に水が通り抜けられる膜ではないはずです。

●細胞膜を形成する脂質二重層は基本的に水を通過させませんが、いくつかの細胞、たとえば赤血球や腎臓上皮細胞には高い水透過性があることが知られており、100年以上前から特別な通過路、膜たんぱく質で水だけを通過させる水チャネルが存在するに違いないと考えられてきました。

●1992年に米国のジョンス・ホプキンス大学のアグリ教授 (Peter Agre) が、赤血球からこの性質を有するたんぱく質を発見し、水を通過させる穴を意味する“アクアポリン (aquaporin ; AQP)”の名前をつけられました。

●水という生命に直結する分子の細胞膜通過路が見つかったことは、生命科学の歴史上ひとつの大きな出来事であり、これらの功績で、アグリ教授は2003年にノーベル化学賞を授与されました。



この部分がリン脂質の二重になった細胞膜で“脂質”の尾っぽをおしをくっつけている。細胞の中に水が必要になると、水チャネル“アクアポリン”ができて、細胞膜に入り込み、水分子を細胞の中に取り込むようになる。

細胞膜でのアクアポリンの働きの模式図



### 3. アグリ教授の功績

- アグリ教授は赤血球を研究する臨床医 から出発した研究者で赤血球の遺伝病の研究を行い優れた論文を多く書いていました。
- 1980年代になって彼は赤血球に機能がわからない蛋白質があることに気づいて、そのアミノ酸配列を決めることに成功します。その配列には膜に存在するタンパク質に特有のものがあるとわかり、さらに知人の生理学者などと話しているうちにこの蛋白質が“水チャネル”ではないかと思いつきました。
- 次は証明です。これには打ってつけの手があります。アフリカツメガエルの卵にこのアクアポリンをつくらせると、卵の細胞膜は水透過性がとんでもなく高くなったのです。
- ここに長く研究者達から存在が予想されていた水チャネルが実物として示されたわけです。
- その後多くの研究者と共同研究を行い、アクアポリンの大切さを証明しています。
- その一つとして、大量に入手できるヒトの赤血球からアクアポリンを精製し、電子顕微鏡でその蛋白質の構造を解析しました。
- その結果から、この蛋白質が水だけを通過させる能力があること、早く大量に水を運ぶ仕組みをもつことを説明したのです。
- これらの功績により、彼は 2003年にノーベル化学賞を授与されました。
- “アクアポリン”という名前をつけたのも彼をはじめとする研究者たちで、水という意味の“アクア”と穴を意味する“ポア”をくっつけたものです。

## 4. ほとんどの生物にあるアクアポリン

- アクアポリンの遺伝子特徴は、3つのアミノ酸からなるNPAボックスというAsn-Pro-Ala（アスパラギン-プロリン-アラニン）構造です。
- アクアポリンを多数発見できたのも、ゲノム（生物のDNAがもつ全情報）解析技術が進化し、すべての生物の遺伝子が明らかにされたためです。いかなる生物にもアクアポリン（AQP）が存在しうることが証明されました。
- アクアポリンは系統学的に最も古いメタン生成古細菌などにも認められる起源が大変古い分子です。
- アクアポリンは、生物が環境に適応する過程で獲得した遺伝子と考えられます。
- 水移動を中心としたアクアポリンの機能は生命活動に不可欠で、単細胞生物のみならず、多細胞生物でも引き継がれ、現存の生物の水分含量が多いことの一つの理由になっているのではないだろうか。
- 今後も、生化学、生理学、医学、薬学、農学などの分野、さらには生物の多様性、進化、環境適応を理解する上において、アクアポリンの機能に関連した重要な発見や進展がもたらされるものと期待されている。

# 5. 各生物のアクアポリンの役割

●ヒトではAQP 0～12の13種類のアクアポリンが存在します。この中にはグリセロールを通過させるものもあります。

●植物のアクアポリンは、最も多く約30種類が発見されています。PIP、TIP、NIP、SIPの4つの群に分けられます。植物は水分の占める割合がとて多く、水を常に必要としますが、水を求めて移動することができないためにアクアポリンの発現が多いと考えられています。また二酸化炭素を通過させるアクアポリンも存在し、光合成活動に関わっています。

●魚のアクアポリンは、体液調整に深く関わっている。

●昆虫のアクアポリンは、腸管の水分吸収に関わっている。カイコのように絹糸を生成する器官（絹糸腺）からも発見されている。

●線虫には11種類のアクアポリンが存在し、神経細胞や腸管などに存在。

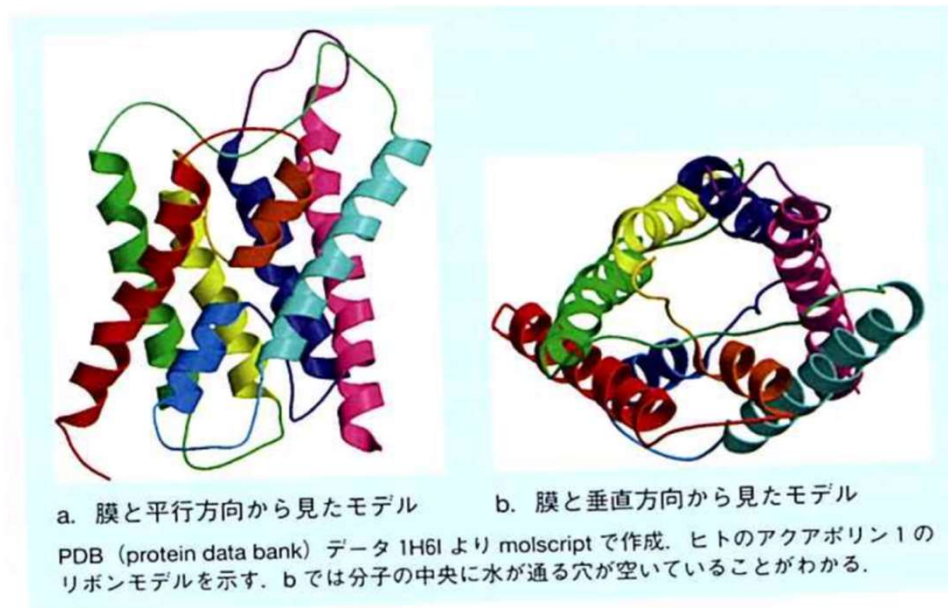
●真核生物である酵母からは、水とグリセロール通過に関与するアクアポリン（アクアグリセロポリン）が発見された。

●原生生物であるアメーバからは、浸透圧調整に関与しているアクアポリンが発見されています。

●細菌の大部分は一種類のアクアグリセロポリンをもっています。中には大腸菌のように一種類アクアポリンと一種類グリセロポリンを持つものもあります。（アクアポリンをもっていない細菌も約半数います）

# 6. アクアポリンの立体構造

- アクアポリンは細胞膜や細胞内オルガネラの膜に存在する膜蛋白質である。
- 6本の膜貫通 $\alpha$ ヘリックスをもっているチャンネル蛋白質分子であり中心に水が通れる孔がある。生体内では、4つの分子が集まって四量体を作っている。
- それにより、細胞膜の脂質二重層内で構造が安定に保たれている。



## ① アクアポリンのリボンモデル

※「水とアクアポリンの生物学」(中山書店) から引用

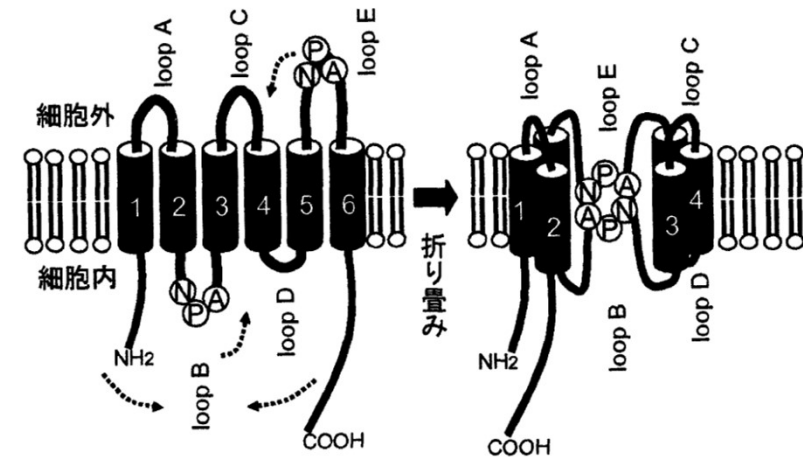


図1 アクアポリンの砂時計モデル

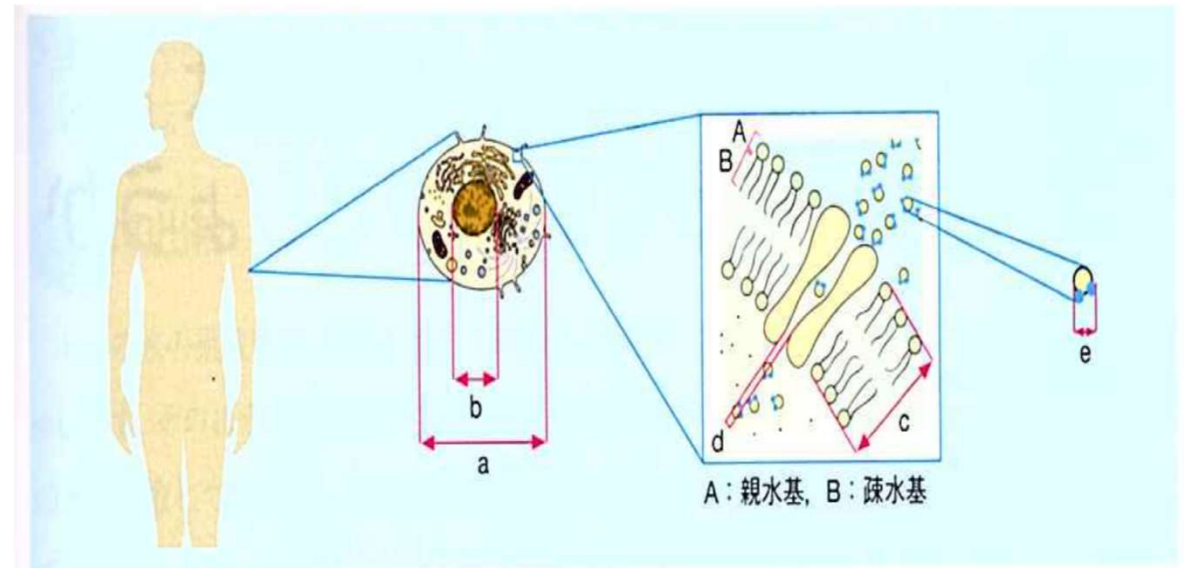
ループBとループEが内側に折り畳まれ、保存されたNPAボックスが水チャンネルの小孔部位形成に寄与する。

※群馬大大学院医学系研究科 高田先生の文献から引用



## 7. アクアポリンの大きさなど（ヒトの体を例にして）

- ヒトの細胞の大きさ：10～100 $\mu\text{m}$  ( $10^{-6}\text{m}$ )
- 細胞核の大きさ：10 $\mu\text{m}$
- 細胞膜の厚み：5～8nm( $10^{-9}\text{m}$ )で主にリン脂質でできている
- リン脂質の細胞膜に膜蛋白が埋め込まれており、特定の分子だけを通したり、ホルモンを感知したり、さまざまな働きをして生命活動を維持している。
- アクアポリンは、その膜蛋白の一つです。
- アクアポリンは、アミノ酸約300個からなる小さな蛋白質で、リン脂質の細胞膜に埋め込まれて、真ん中はストローのように細胞の内側と外側で水の受け渡しができる孔になっている。
- その孔の一番狭いところが約3 $\text{\AA}$  ( $10^{-10}\text{m}$ ) の細さで、水分子（約2.8 $\text{\AA}$ の大きさ）が1分子だけ通過できる超極細である。ここを1秒間に約20億個もの恐るべき速さで、しかも順序よく水分子だけを通過させる。
- アクアポリンはエネルギーを利用して水を能動輸送するのではなく、浸透圧差などによる受動的な水輸送を担う。
- アクアポリンは、水分子 $\text{H}_2\text{O}$ は通過させるが、水素イオン $\text{H}^+$ は通さない。



ヒト(約60兆個の細胞)の身長	細胞の長さ(a)	細胞核の長さ(b)	細胞膜の厚み(c)	アクアポリンの水分子の通り道(d)	水分子(e)
約1.4～2.0m 140～200億 $\text{\AA}$	10～100 $\mu\text{m}$ 10～100万 $\text{\AA}$	約10 $\mu\text{m}$ 10万 $\text{\AA}$	5～8nm 50～80 $\text{\AA}$	3 $\text{\AA}$	2.8 $\text{\AA}$

### ①ヒトのからだとアクアポリンの大きさ比較

※「水とアクアポリンの生物学」（中山書店）から図引用

参考：一番小さな原子である水素の大きさが約1 $\text{\AA}$

## 8. ヒトのアクアポリンと貴陽石がアクアポリン透過水に及ぼす効果

# ヒトのアクアポリンの分布

アクアポリンはほぼすべての臓器に分布している。とくに腎臓には多くのアクアポリンが存在している。

脳	AQP1, 3, 4, 9	肺	AQP1, 5	腸	AQP1, 3, 4, 7, 8
眼	AQP0, 1, 3, 4, 5	膵臓	AQP12	精巣	AQP1, 2, 7, 8, 9
鼻腔	AQP3, 4	肝臓	AQP1, 8, 9	赤血球	AQP1, 3
唾液腺	AQP1, 5, 8	胆嚢	AQP1	白血球	AQP9
気管	AQP3, 4	腎臓	AQP1, 2, 3, 4, 6, 7, 11	筋肉	AQP4
心臓	AQP1	脊髄	AQP1, 4	皮膚	AQP3, 4

※「水とアクアポリンの生物学」（中山書店）から引用

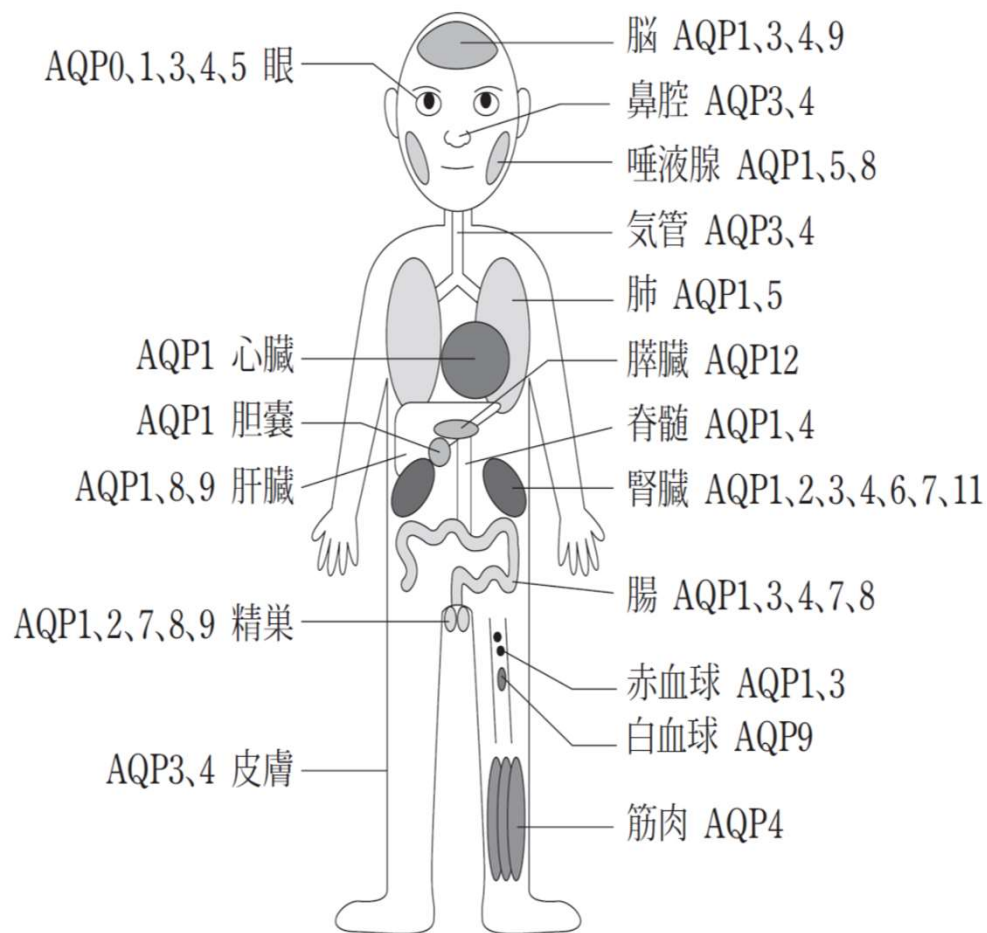


図1 アクアポリンの全身分布

※「アクアポリン研究の現在」（東京医科歯科大 佐々木成、第19回大学と科学公開シンポジウム代表挨拶資料）から図引用

# ヒトのアクアポリンの分布と病態

アクアポリンの体内での機能については、欠損（ノックアウト）マウスを中心とした研究が進んでいます。その研究によって、下表のようにいくつかのアクアポリンの遺伝子異常で先天性疾患が起こることがわかっています。しかしながら、いまだ多くのことが未知です。今後の研究で、アクアポリンの生理的役割がさらに明らかにされるでしょうが、日常生活の質の向上など、ヒトがよりよく生きてゆくための構成因子として、アクアポリンの関わりが明らかにされてゆくことも期待されます。

表1 哺乳類のアクアポリン一覧

	存在部位	病 気	
		マウス	ヒ ト
AQP0	眼の水晶体	白内障	白内障
AQP1	腎臓、赤血球、眼、脳、毛細管内皮	軽度腎性尿崩症	軽度腎性尿崩症
AQP2	腎集合管	腎性尿崩症	腎性尿崩症
AQP3	腎臓、気管支、皮膚、大腸	軽度腎性尿崩症	
AQP4	脳、腎臓、眼、肺、消化管、骨格筋	軽度腎性尿崩症	
AQP5	唾液腺、涙腺、汗腺、気管支、肺	唾液分泌低下	シェーグレン症候群
AQP6	腎臓		
AQP7	精巣、脂肪細胞、腎臓、心臓		グリセロール代謝障害
AQP8	精巣、肝臓、膵臓		
AQP9	肝臓、白血球		
AQP10	小腸	偽遺伝子	
AQP11	腎臓、精巣、肝臓	多発性嚢胞腎	
AQP12	膵臓		

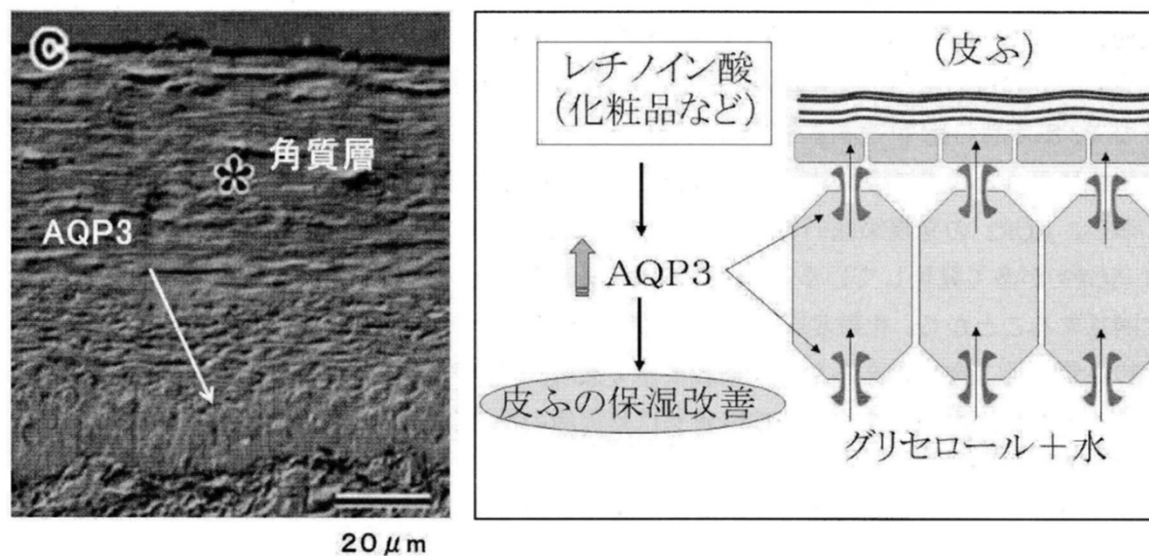
※「アクアポリン研究の現在」（東京医科歯科大 佐々木成、第19回大学と科学公開シンポジウム代表挨拶資料）から表引用



# ヒトがより良く生きてゆくための環境適応としてアクアポリンを捉える

- 皮膚のシワや乾燥肌の改善など、美容の分野で応用
- 鼻腔や肺の湿潤保持による感染症予防
- 血液細胞の活性化による免疫力の向上
- 等々、予防医学の分野での応用に新しい展開があるだろう。

例：皮膚のAQPの分布と皮膚の保湿改善（日本医科大学、松崎利行先生の文献から）



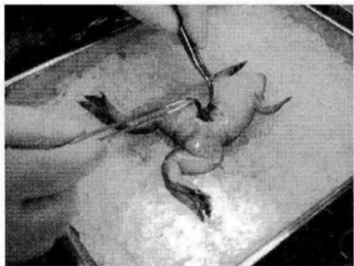
※北川科学総合研究所 北川良親先生の文献からの引用です

# 水の性質

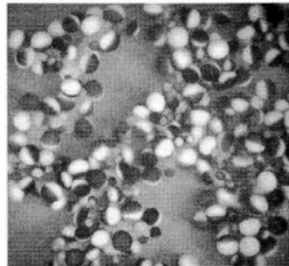
- アクアポリンを通過する水にもいろいろな種類がある。
- 水に含まれる成分が違えば溶液としての水の性質は変わってくる。溶けている物質の性質が分かれば、評価するのは簡単であるが、不明かつ微量であれば、溶液としての水の評価するのは難しい。
- 溶けている成分が水の電氣的性質に関係する場合、**pH**や酸化還元電位に変化が現れる場合もある。
- 水に含まれる成分の変化がない場合でも水の性質が変わることが知られている。高電位の静電気磁場、鉱石、セラミックに曝された水が元の水とは違った性質を示すことが報告されている。
- これらの水の物理化学的性質として、**pH**、酸化還元電位、界面活性力、赤外線放射量などが測定されている。また、生物学的性質として、植物の生育や鮮度保持への影響、抗酸化活性や免疫細胞の活性など細胞レベルでの測定がなされている。
- 水にこのような変化が起こる原因はまだ十分に解明されていない。

# アクアポリンで水の性質を調べる

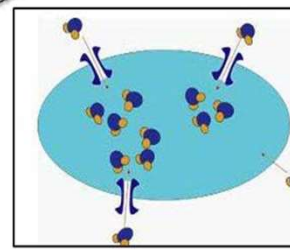
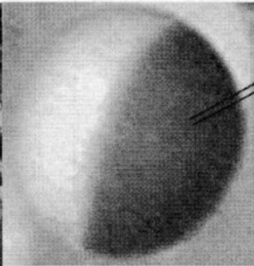
- ピーター・アグリ教授はアクアポリンが水チャンネルであることをアフリカツメカエルの卵母細胞を用いて証明した。この卵母細胞はアクアポリンをほとんど発現していないので、アクアポリン遺伝子転写RNA(CRNA)を注入すると、アクアポリンを発現した卵母細胞を作ることができる。
- この細胞をいろいろな水や阻害剤あるいは促進剤の入った溶液に入れると卵の膨らみ方に差がでてくる。卵の膨らみが早く大きいと、その水はアクアポリン透過性が高いと言える。(他に酵母細胞による方法もある)
- このような方法でいろいろな水を測定すると透過性に差がでる。たとえば、いろいろ効能が伝えられている天然ミネラルウォーターの水透過性を測ると水道水に比べて有意に高い結果が得られる。アクアポリンの種類を変えてもこの傾向は変わらない。
- また、ある種のセラミックで処理した水は元の水に比べて有意に高い水透過性を示す。各種の植物や動物のエキスを溶かした溶液の水透過性も調べると非常に高い促進効果や阻害効果を示すものを発見できる。
- また、AQP3,AQP7,AQP9のようなアクアポリンはグリセロールも透過するので、同時にグリセロール透過性も測定することができる。



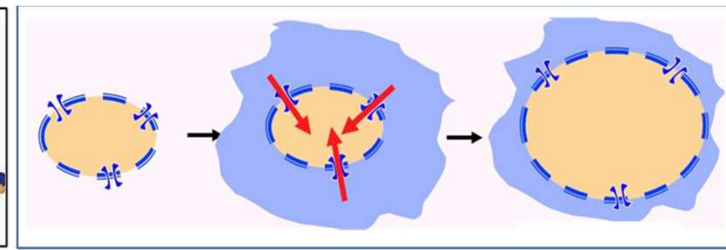
アフリカツメカエル卵母細胞の分離



アクアポリンRNAを注射



アクアポリンの発現



アクアポリンを用いた水透過性の測定

※北川科学総合研究所 北川良親先生の文献からの引用です

アクアポリンを通りやすい水とはどんな水なのか？

- アクアポリンを通りやすい水と通りにくい水の違いは図6に示したような水分子の構造の違いと考えられる。アクアポリンを通る時、水分子約8個が直列に数珠玉のように並んで進んで行くと言われている。このような通り方をシングルファイル化と言う。
- 通り易い水はアクアポリンの入り口で8個が並びやすい状態になっていると推測される。逆に、通りにくい水は8分子が並びにくい水素結合をしていることが考えられる。

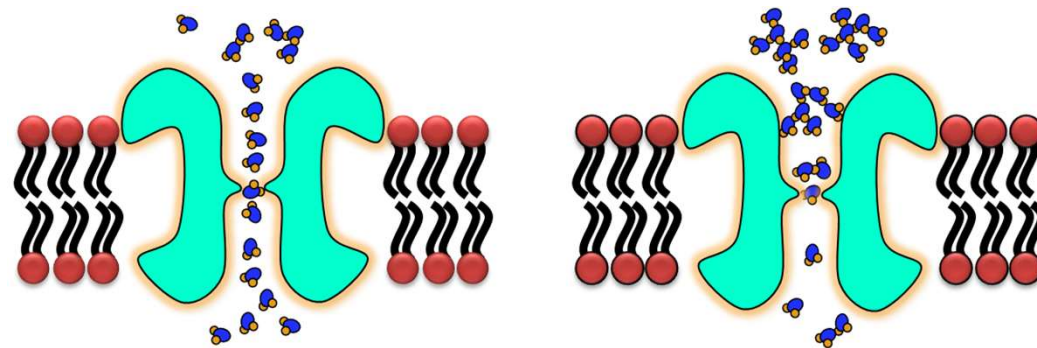
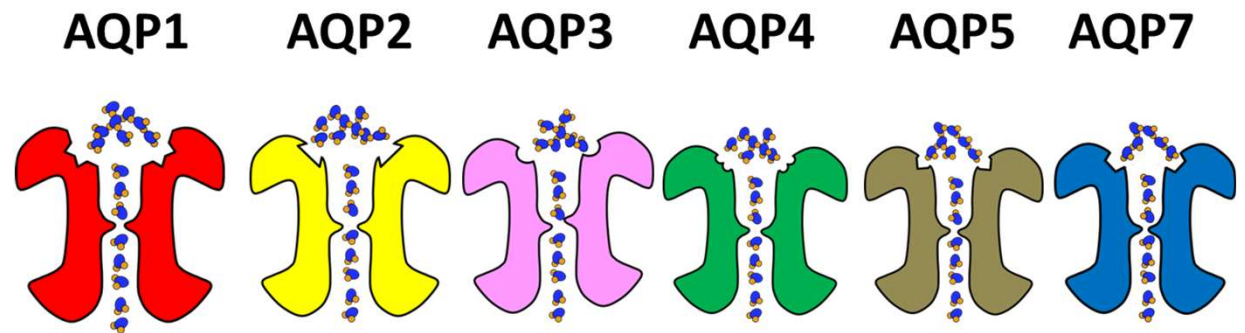


図6 アクアポリンを透過しやすい水（左）の構造

※北川科学総合研究所 北川良親先生の文献からの引用です

特定のアクアポリンを通りやすい水がある

- アクアポリンの入り口の構造がアクアポリンごとに違うと考えれば、同じ水でも通り易いアクアポリンがある理由を説明できる。
- 図7にアクアポリンの入り口の構造の違いを模式的に示した。貴陽石処理水がAQP1に対する透過性が高いのは、AQP1の入り口の構造に水分子のクラスターが馴染みやすい構造をしていると推測される。このように考えれば、6種類のアクアポリンで水の透過性を調べれば、水のクラスターが水ごとに違うことを証明できる。水はそれぞれ違うクラスターを持っている。



※北川科学総合研究所 北川良親先生の文献からの引用です

図7 アクアポリンの入り口の構造の違い



臓器の細胞は  
それぞれ違う  
アクアポリン  
活性水ででき  
ている

- ヒトには13種類のアクアポリンがある。臓器によって分布するアクアポリンの種類が違う。例えば、脳の細胞の膜にはAQP4が多く分布する。腎臓の細胞の膜にはAQP2が多く分布する。
- アクアポリンは水を通す孔があるタンパク質であるが、水が通るのになぜ13種類ものアクアポリンが必要なのか、しかも、臓器ごとに違うアクアポリンが分布するのか理由は解っていない。
- 北川は最近臓器の細胞の水について重要な発見をした。それは、細胞の中の水は臓器ごとに違うと言う実験結果である。例えば、脳の細胞の中の水はAQP4の透過性の高い水であり、腎臓の細胞の中の水はAQP2の透過性の高い水であった。その他の細胞水もそれぞれ特定のアクアポリン透過性の高い水であった。
- それぞれの細胞は同じ血液の水に浮いているにも拘らず中の水は血液とは違う水であると言う発見はアクアポリンの研究史上でも水の性質の研究史上でも画期的なことと自負しており、近い内に国際科学雑誌に投稿する予定である。

※北川科学総合研究所 北川良親  
先生の文献からの引用です

細胞は最適なアクアポリン活性水を求めている

●細胞の中の水が違うのは細胞に必要な化学反応がその水の中でうまく進行するためと考えられる。脳の細胞は神経伝達に必要な化学反応をもっぱら行っている。腎臓の細胞は老廃物の濾過と水の再吸収のための化学反応をもっぱら行っている。その化学反応はそれぞれの細胞の水の中で進行する。

●臓器は自分の好む水がある。脳の細胞はAQP3,4,5活性水を求めている。特にAQP4活性水を好んで集めている。肺はAQP5活性水を好んで集め、肺機能を活発にしている。心臓はAQP2,5活性水を好んで集め、心機能を高めている。肝臓はAQP1活性水を好んで集め、解毒などの化学反応を促進している。腎臓はいろいろなAQP2,3,4,5活性水の相互作用で尿濃縮の機能を活発に行っている。腸はAQP2,4,5活性水を好んで集め、消化吸収や免疫力工場の機能を活発化している。脂肪はAQP4,7活性水を好んで集め、脂肪の分解を活発化している。皮膚はAQP4,5活性水を好んで集め、皮膚の潤いと保湿機能を高めている。

●血液は全てのAQP活性水をまんべんなく含み、いろいろな臓器に水を供給している。

※北川科学総合研究所 北川良親先生の文献からの引用です

## 飲料水と臓器の細胞水の関係

●水には地下の岩石や溶けている成分の影響でさまざまな水の構造体ができていると考えられる。その構造体は水に記憶され維持されているようである（水の記憶については大論争があった）。だから、ミネラルウォーターにはAQP1透過性の高い水、AQP2透過性の高い水....とさまざまな水が存在する。

●図8に、脳の細胞を例としたAQP4活性水の取り込みの仕組みを示した。細胞膜にあるのはAQP4である。血液中の水分子は岩石やなんらかのエネルギーの影響を受けているような構造体を作っている。水色の領域に示した構造体はAQP4をよく通り、細胞内に取り込まれる。それで、脳の細胞内はAQP4活性水で満たされていると推定される。

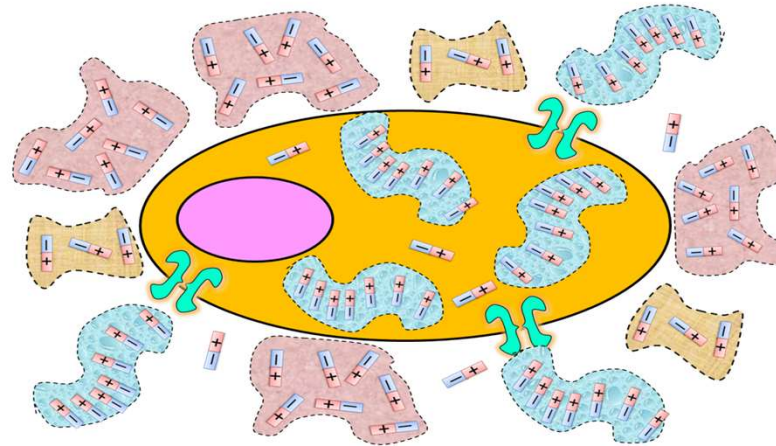


図8 AQP4を取り込む脳細胞

※北川科学総合研究所 北川良親先生の文献からの引用です



## 細胞にとって好みの水が必要

- アクアポリン遺伝子が働かないと細胞のアクアポリンが少なくなり、腎臓では尿濃縮能力が低下し尿崩症になる。しかし、それ以外はアクアポリン遺伝子の発現が低下しても目立った病気にならない。一体アクアポリンは何をしているのか分からないのである。
- しかし、北川の研究でアクアポリンを通りやすい水の構造があること、そして、細胞は好みの水を選んで取り込んでいることが分り、アクアポリンは水を選ぶ道具であることがだんだん分かってきた。
- 細胞にとって好みの水が必要だから、飲む水も選んで飲まなければ効果が現れないのである。

※北川科学総合研究所 北川良親  
先生の文献からの引用です

# 貴陽石セラミックボールによる水のアクアポリン2 (AQP2) および7 (AQP7) 透過性

## <試験方法>

### ●試料作製

蒸留水1Lに貴陽石セラミックボール5gを入れ、一晩置いたものを貴陽石水として用いた。

### ●アクアポリン水透過性の測定

腎臓のアクアポリン2 (AQP2) および脂肪細胞のアクアポリン7 (AQP7) を合成することができる RNA (cRNA) を注射したアフリカツメガエルの卵母細胞を用いた。水透過性は、卵を①貴陽石水あるいは蒸留水等に入れるか、②貴陽石水あるいは蒸留水で卵の培養に用いる Birth Medium を3倍希釈した液 (1/3 Birth Medium) で、卵の膨張率を測定して算出した。

## <結果> (1) 1/3 Birth Medium中でのア クアポリン2に対する水透過性の測定

図1に、腎臓のアクアポリン(AQP2)の水透過性に対する貴陽石水の効果を示した。この実験はBirth Mediumを貴陽石水あるいは蒸留水蒸で3倍に希釈した液を用いて行った。アクアポリンの測定は通常このような条件で行う。蒸留水に貴陽石を入れて、一晩置いた貴陽石水が33%も水透過性を促進した。

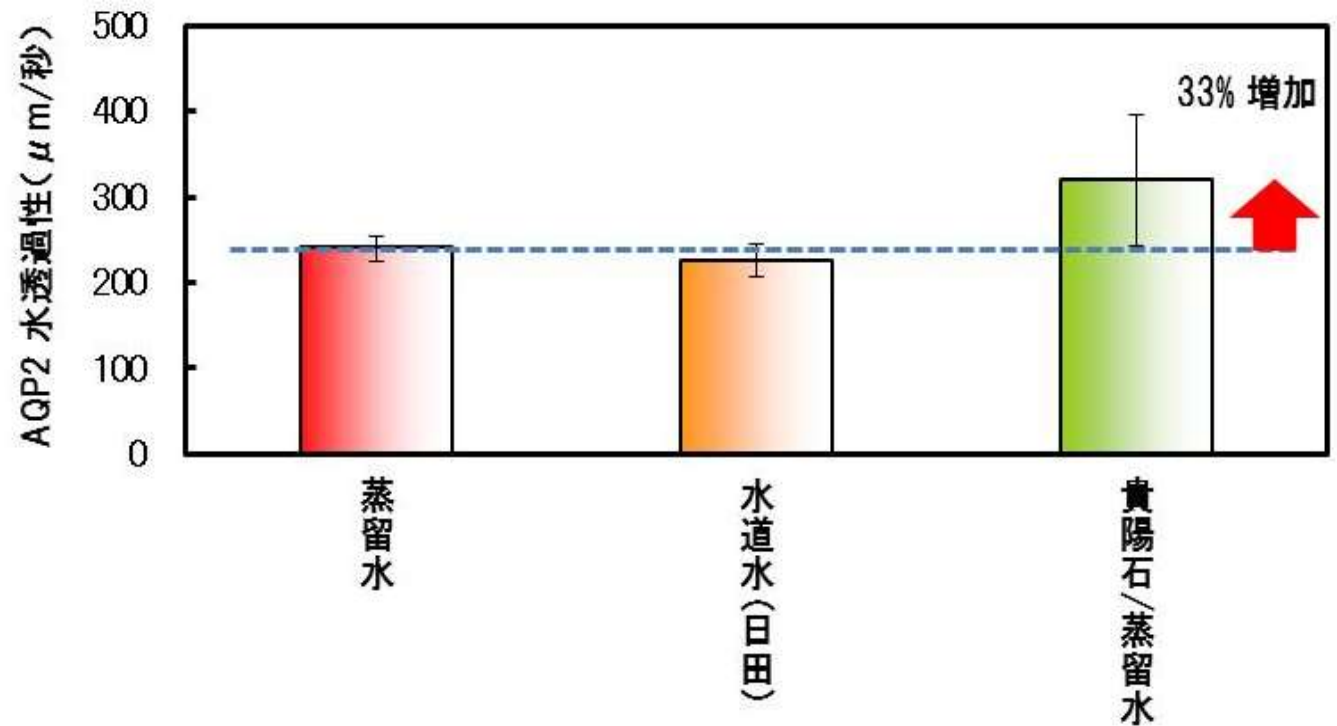


図1 アクアポリン2の水透過性に対する貴陽石水の作用 1/3 Birth Medium での実験

※北川科学総合研究所 北川良親先生が実施された研究報告書からの引用です

## <結果> (2) 貴陽石で処理した蒸留水でのアクアポリン2に対する水透過性の測定

測定時に、卵母細胞の培養液 (Birth Medium) を1/3に貴陽石水あるいは蒸留水で希釈すると、浸透圧が下がって、卵母細胞への水の通りが早くなり、水の透過性を測定することができる。しかし、Birth Mediumに含まれるNa<sup>+</sup>などの陽イオンあるいはCl<sup>-</sup>などの陰イオンの影響はどうか分からない。そこで、測定を塩類のない水そのもので行ってみた。結果は、図2に示したように、やはり、貴陽石水が33%水透過性を促進した。

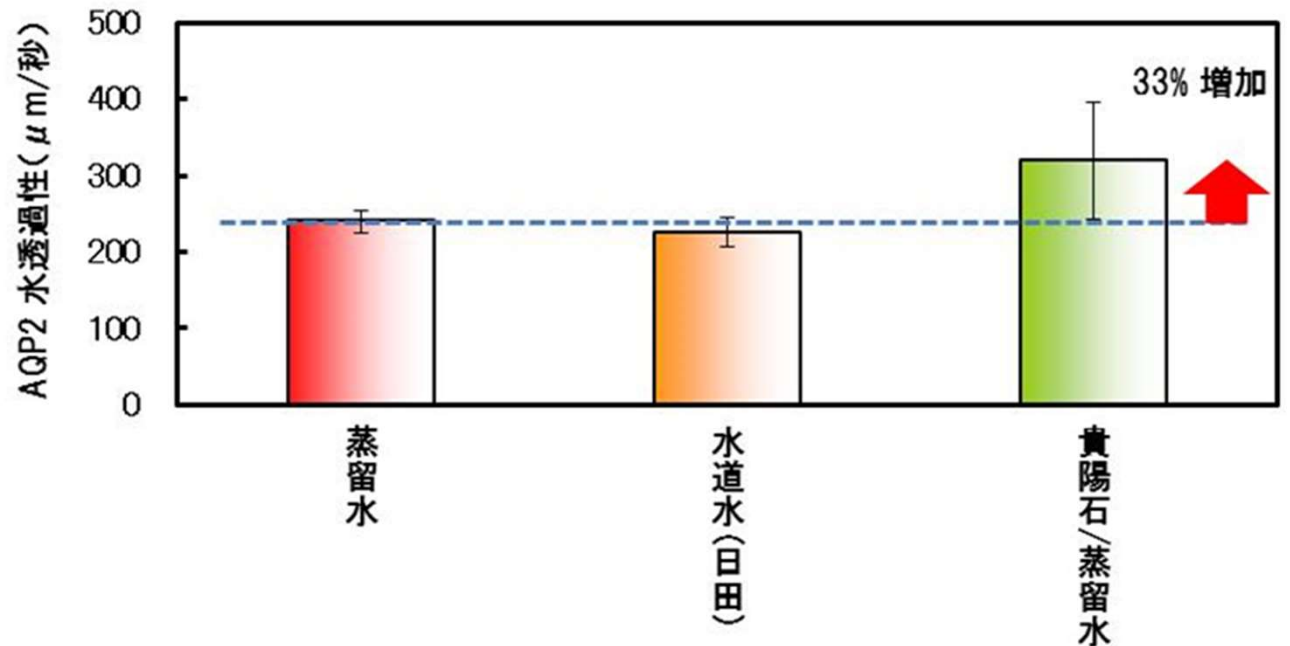


図2 アクアポリン2の水透過性に対する貴陽石水による作用 蒸留水中での実験

※北川科学総合研究所 北川良親先生が実施された研究報告書からの引用です

## <結果> (3) 貴陽石で処理した蒸留水でのアクアポリン7に対する水透過性の測定

次に、脂肪細胞に多く分布するアクアポリン7

(AQP7) に対する貴陽石水的作用を調べた。その結果、図3に示したように、貴陽石水はアクアポリン7の水透過性を121%促進することが分った。

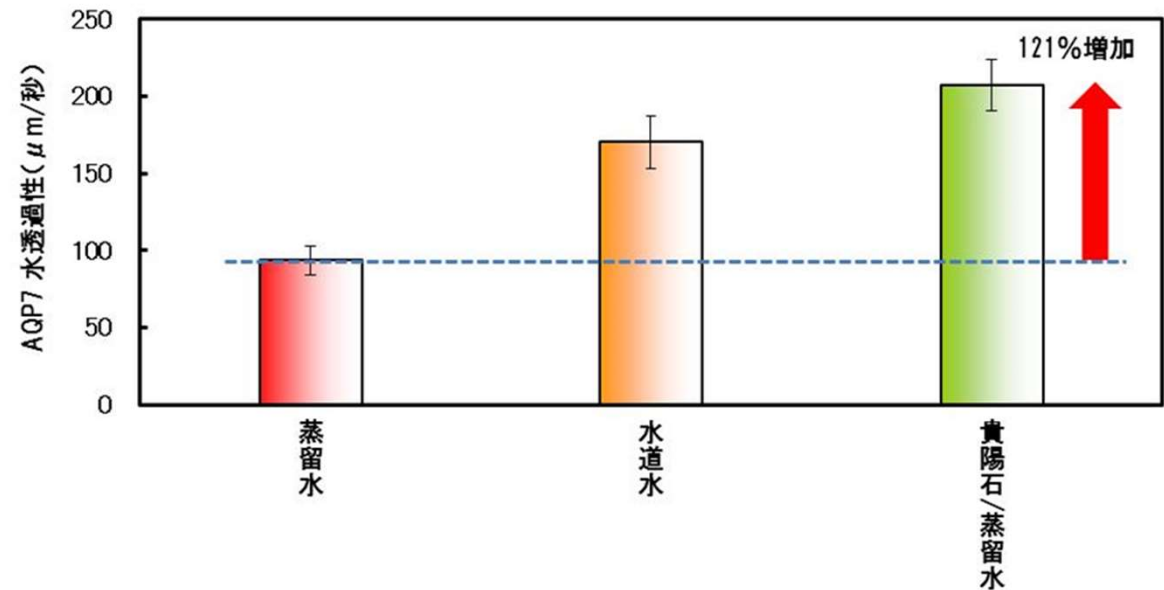


図3 脂肪細胞のアクアポリン7の水透過性に対する貴陽石水的作用 蒸留水中での実験

※北川科学総合研究所 北川良親先生が実施された研究報告書からの引用です

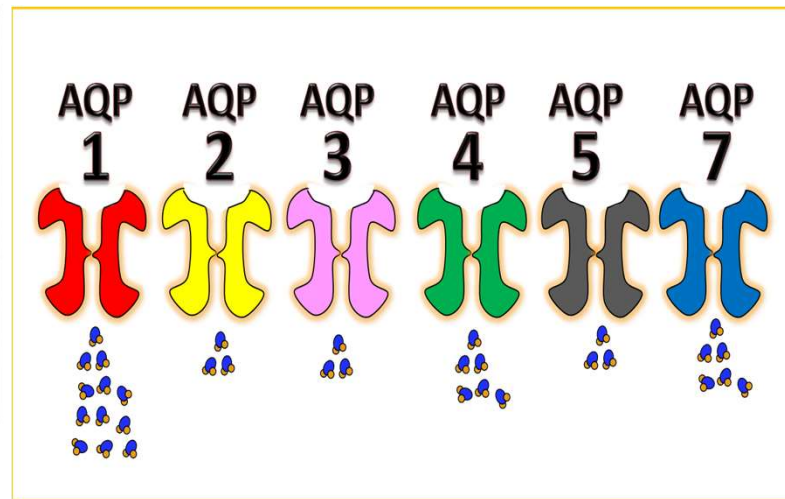
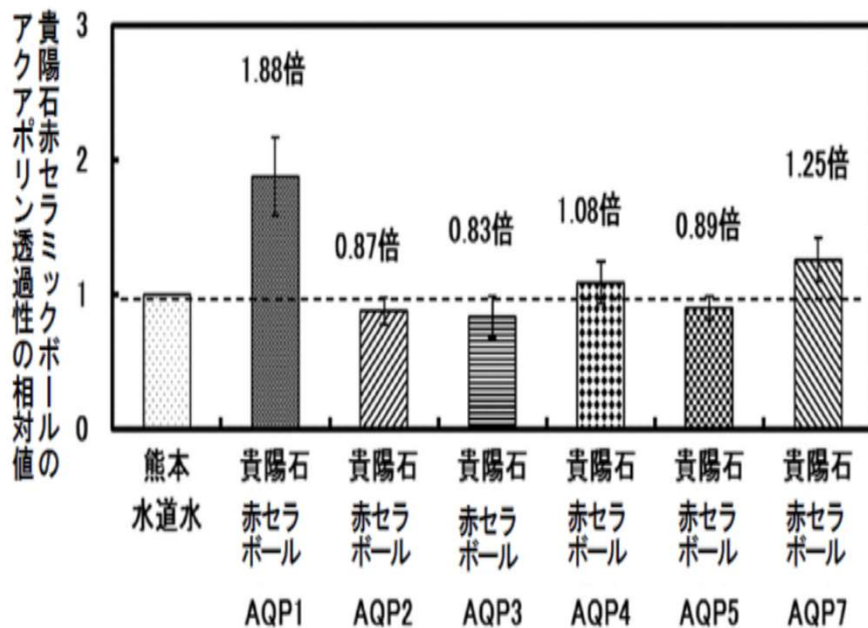
## <結果の総括>

- 今回の実験で、貴陽石水がアクアポリンの水透過性を促進することが明らかになった。これは大変興味深い結果である。
- 貴陽石水がアクアポリンの水透過性を促進する理由は、水分子はアクアポリンの孔を通る時水素結合が切れることから考察できる。
- つまり、アクアポリンを通りやすい水と言うのは、水素結合が切れやすいか切れている水が多いということではないかと考えられる。

※北川科学総合研究所 北川良親先生が実施された研究報告書からの引用です

# 貴陽石赤セラミックボールで処理するとアクアポリン1の透過性が高い水に変化する

水道水は一般的にアクアポリン透過性が特に高くはありません。しかし、水道水を貴陽石赤セラミックボールで処理すると、アクアポリン1(AQP1)透過性が1.9倍も高い水(同じく4が1.1倍、同じく7も1.25倍)に変化しました。



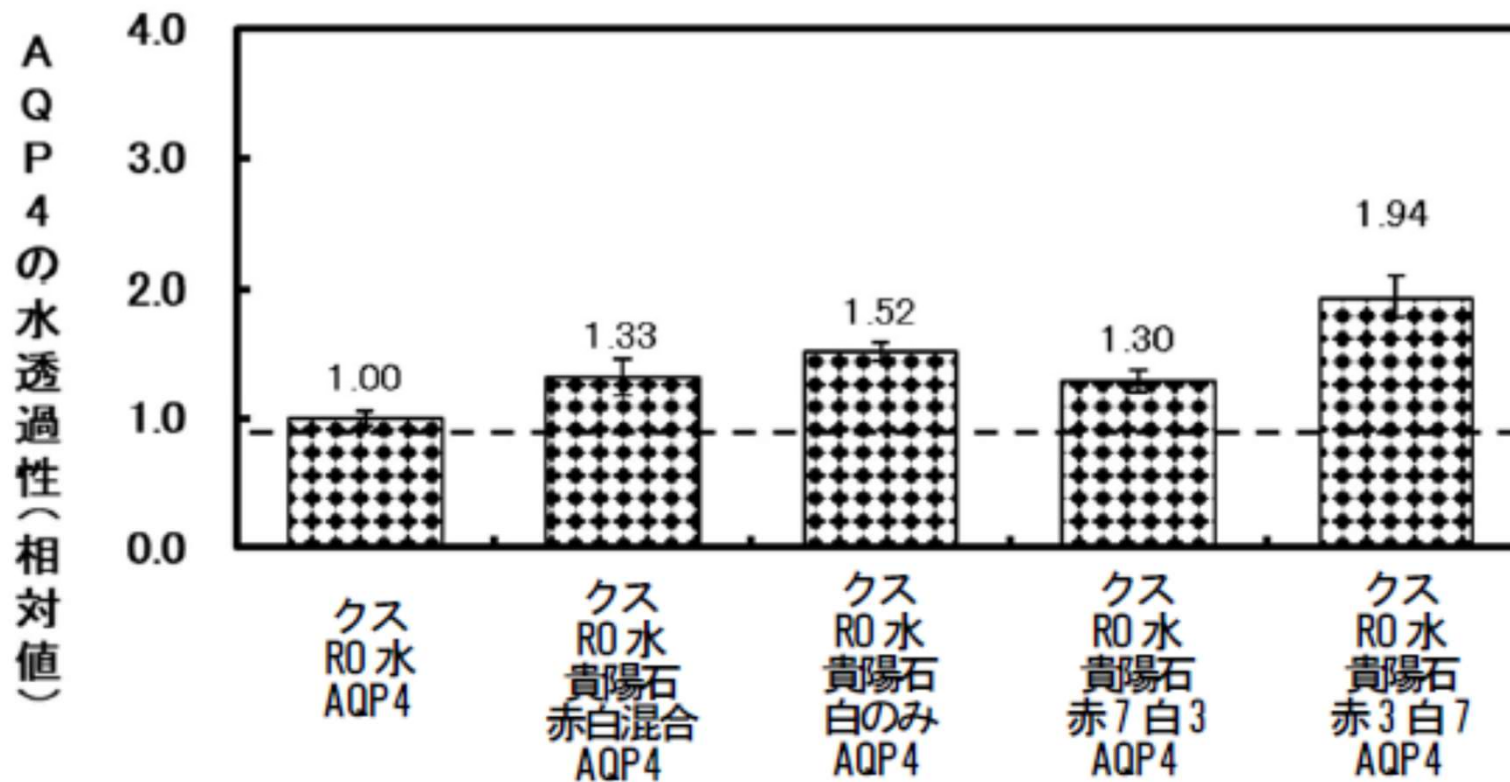
AQP1透過性が高い水は肝臓や眼や赤血球の細胞が好む水。AQP1透過性の高い水は身体全体を活性化する。

図：水道水を貴陽石で処理するとアクアポリン1・4・7透過性が高くなる

※北川科学総合研究所 北川良親先生が実施された研究報告書からの引用です



# 貴陽石赤3白7粒子は アクアポリン4の透過性を約2倍に上げる



AQP4透過性の高い水は脳の細胞が好む水。AQP4は、脳全体に発現している。



# 貴陽石を組合せ使用して、 AQP4 を良く通る水を開発しました



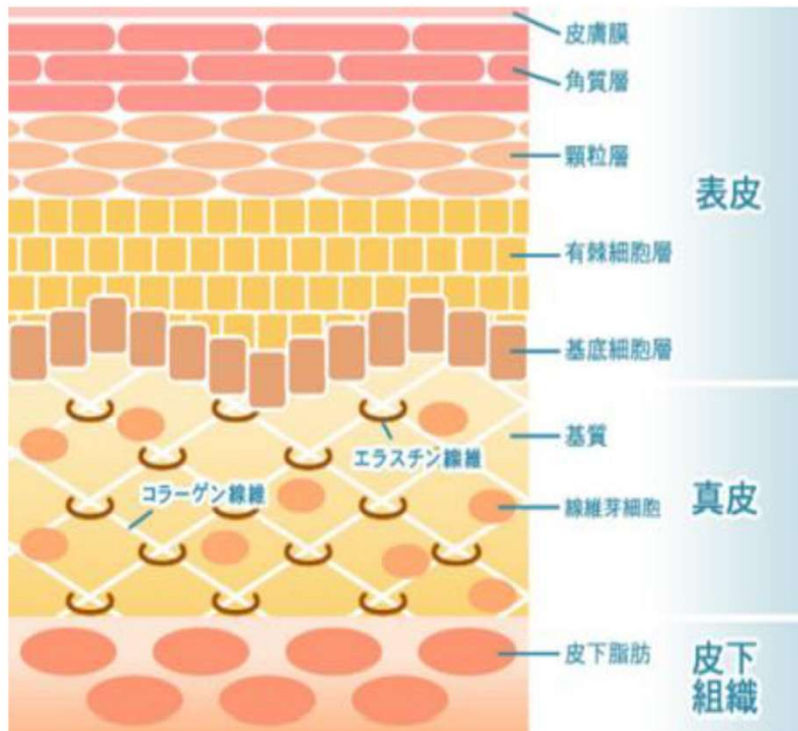
貴陽石を組合せ使用して、AQP4 を良く通る水を開発しました。

脳の細胞膜には AQP4 が多く分布し、水は AQP4 を通って細胞に入ります。そして脳細胞の中は AQP4 高透過性水で満たされています。

そこで、AQP4 を通しやすい水を研究開発しました。

この水を脳が疲れた人が飲めば脳が元気になると期待されています。

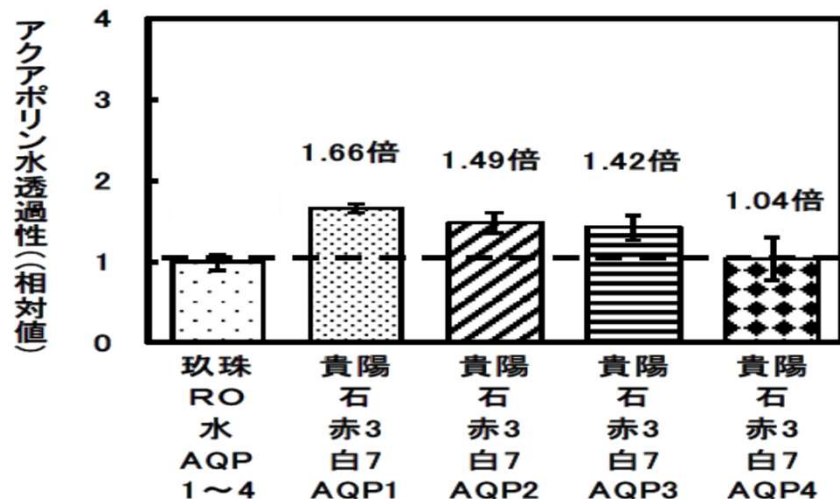
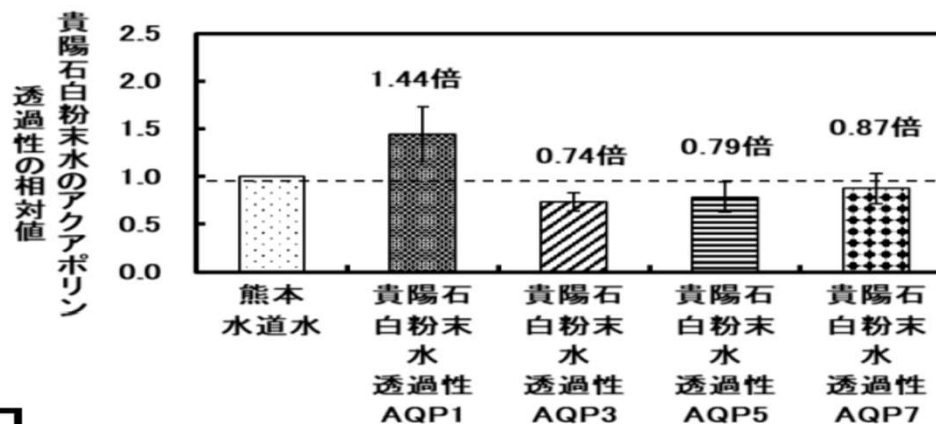
例えば皮膚組織に良くしみいる水も同じ手法で作ることができます



同じ手法で、皮膚組織に良くしみいる水を作ることができます。皮膚は表皮と真皮からできています。生きている細胞には AQP3 を良く通る飲む水が求められます。一方、皮膚表面の角質層は死んだ細胞の層です。化粧水などの水は角質層にしみこむ水が求められます。その水は恐らく AQP1、AQP2 および AQP3 を良く通る水と考えられます。

# 貴陽石と合わせることで水のがアップ！

貴陽石の白粉末は化粧品にも使われます。これが水に含まれると水のアクアポリン透過性が変化します。AQP1 透過性が水道水と比較して1.44 倍透過性が高くなります。

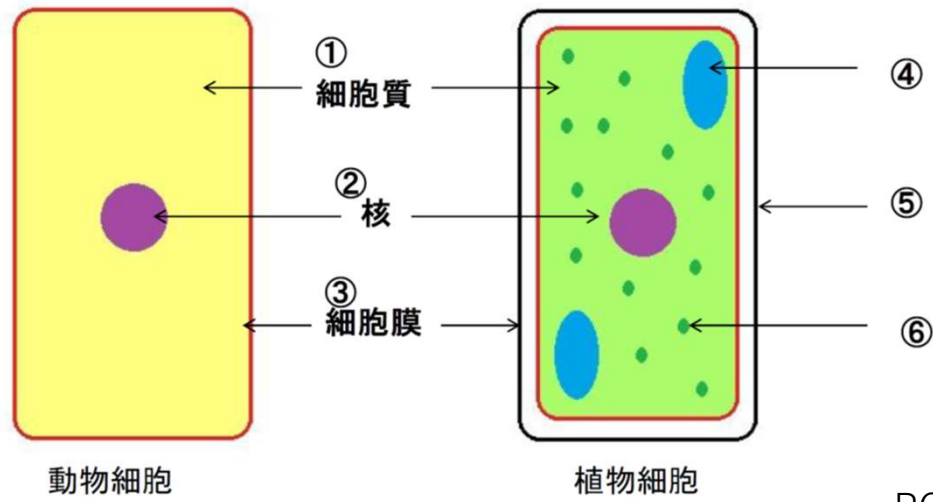


貴陽石には色々な種類があります。貴陽石赤3白7はAQP1、AQP2、AQP3の水透過性をクスの天然水に比べて1.66~1.42倍高くします。クスの天然水はAQP1とAQP5が高い性質がありますが、AQP2とAQP3は高くありません。貴陽石赤3白7はその透過性を高くします。

## 9. 植物アクアポリンと、貴陽石がアクアポリン透過水に及ぼす効果

# 動物細胞と植物細胞の違い

- 共通点は3つで、①細胞質、②核、③細胞質です。
- ④液胞、⑤細胞壁、⑥葉緑体は植物細胞特有のものであります。

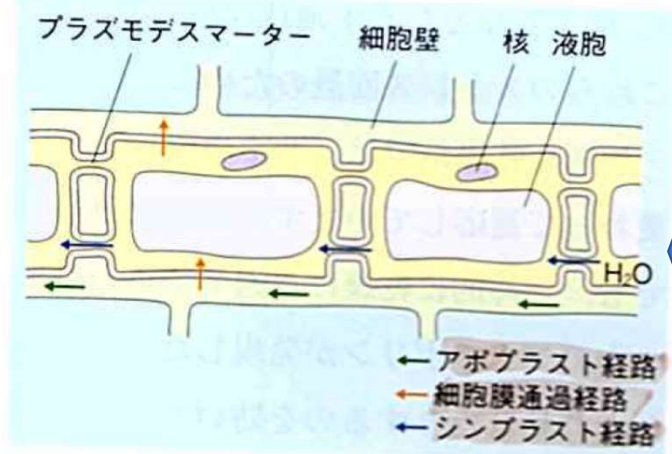


No	名称	はたらきなど	動物細胞にあるか
①	細胞質	細胞の細胞膜で囲まれた部分の原形質のうちで核以外の領域のこと。ミトコンドリア(細胞の呼吸)・リボソーム(タンパク質の合成)・ゴルジ体(様々な物質を分泌して細胞の活動を助ける)	○
②	核	この中には染色体があり、その中に遺伝子がある。酢酸カーミン液で赤色に染まる。酢酸オルセイン液で紫色に染まる。	○
③	細胞膜	細胞質の最も外側にあり、細胞から細胞質や核が漏れないようにしている袋	○
④	液胞	細胞の活動でできた不要な水分などをしまっておく場所。古い細胞ほど大きい。	×
⑤	細胞壁	細胞の形を維持して、植物の体を支えている。動物は骨や外骨格により体を支えているが、植物にはそれがいないために必要。	×
⑥	葉緑体	植物の光合成に関係するもの。葉の表皮や根にはない。	×

PC検索し、2020.05.24松本市立会田中学校 津金一彦氏まとめ  
 「動物細胞と植物細胞のちがい」から引用しました

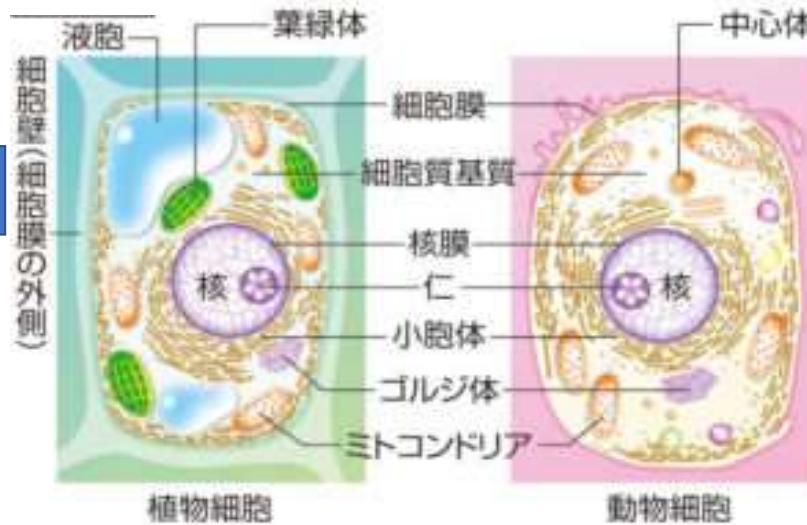


# 植物細胞と動物細胞の水移動の仕方

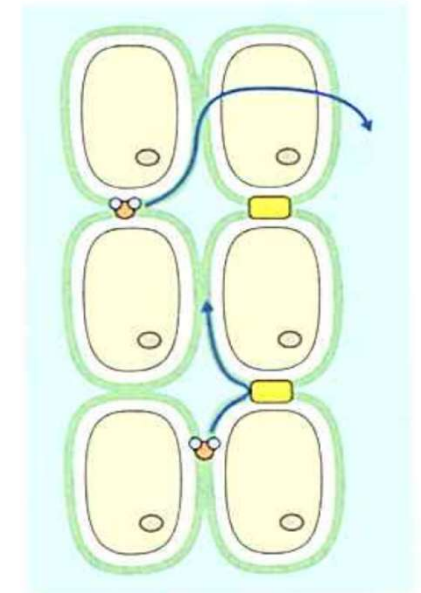


③ トウモロコシの根での水の通る経路

植物：細胞壁はセルロースでできているので、水分子にとってスカスカで容易に通り抜ける（アポプラスト経路）。細胞の中を貫く経路は、一つが細胞と細胞が細胞壁を貫いて繋がっている細い管を移動（シンプラスト経路）、もう一つがアクアポリンを通ることで細胞膜を横切って移動（細胞膜通過経路）。



- 水輸送の進化が、動物では循環系を発達させたのに対し、植物では細胞のかたまりの中をあたかも血管内のように水が透過できる。
- これは細胞膜と細胞内の水チャネルが、植物は高度に発達して可能になったと考えられる。



① 細胞間の水の移動

動物：水は細胞間隙を通ったり、細胞のアクアポリンを通して横切ったりする。タイトジャンクション (黄色の長方形) では、弾かれる。

# 植物にとってのアクアポリン必要性

- 生物界で植物ほどアクアポリンの種類が多いものはない。イネでは35種類のアクアポリンがあります。
- 植物は水と二酸化炭素（炭酸ガス）を素材にして光エネルギーを使って有機物を生成して生きています。植物にとって、水分代謝の調節は死活問題です。
- 植物の細胞レベルでは、細胞壁（細胞の形を維持し植物の体を支えている）の存在により急激な水の流入による膨圧にも耐え形態を維持する機構になっている。また、植物の生長や発達は、分裂組織における細胞分裂、それに続く細胞の肥大生長によって成り立っており、細胞内膨圧は細胞肥大の原動力となる。したがって、植物の代謝活性や生長および発達は、植物の水分状態と密接に関わっている。
- 耐乾性、耐冷性、耐病性などのストレス耐性や生長・繁殖などの植物生産性など農学的課題を解決する糸口が、アクアポリンの研究からつかめてきている。

# 植物でのアクアポリンの発見

- 水と植物の生長の関係を解明するために過去から多様な研究がされてきたが、植物における水チャンネル蛋白質は1990年代初頭に同定され（Maurel et al.1993）、アグリ教授のアクアポリンの発見(1992)に引き続き発表された。
- 植物でのアクアポリンの発見は衝撃的であり、植物の水輸送に関する研究の展開に明確な影響を与えた。
- アクアポリンの発見から20年後、植物アクアポリンは、水を輸送するだけでなく、二酸化炭素などのガス、栄養成分 [ホウ素 (B)、ケイ素 (Si)]、また活性酸素種 (ROS) などを輸送する多機能タンパク質として認識されるようになった (Hanba et al. 2004、Heckwolf et al. 2011、Takano et al. 2006、Ma et al. 2006、Dynowski et al. 2008)。
- アクアポリン研究は、膜分子生物物理学から細胞生物学およびシグナル伝達まで、植物学の多様な分野に広がっている。多面的な理解が進んだ結果、アクアポリンの機能は、植物生長および非生物学的ストレスに対して広く関わりと考えられるようになった。



# 植物アクアポリンの 特徴と活性調節

## ●アクアポリンの特徴

- (1) 水分子輸送速度が非常に高い。
- (2) 水分子 $H_2O$ は透過させても、水素イオン $H^+$ は通さない特殊な選択機能/分子構造を持ちます。
- (3) 分子種によってはグリセロール、尿素、アンモニア、二酸化炭素、酸素、過酸化水素、ホウ酸、ケイ酸、亜ヒ酸、アルミニウムなどの低分子を透過させることが報告されています。

## ●アクアポリンの活性調節

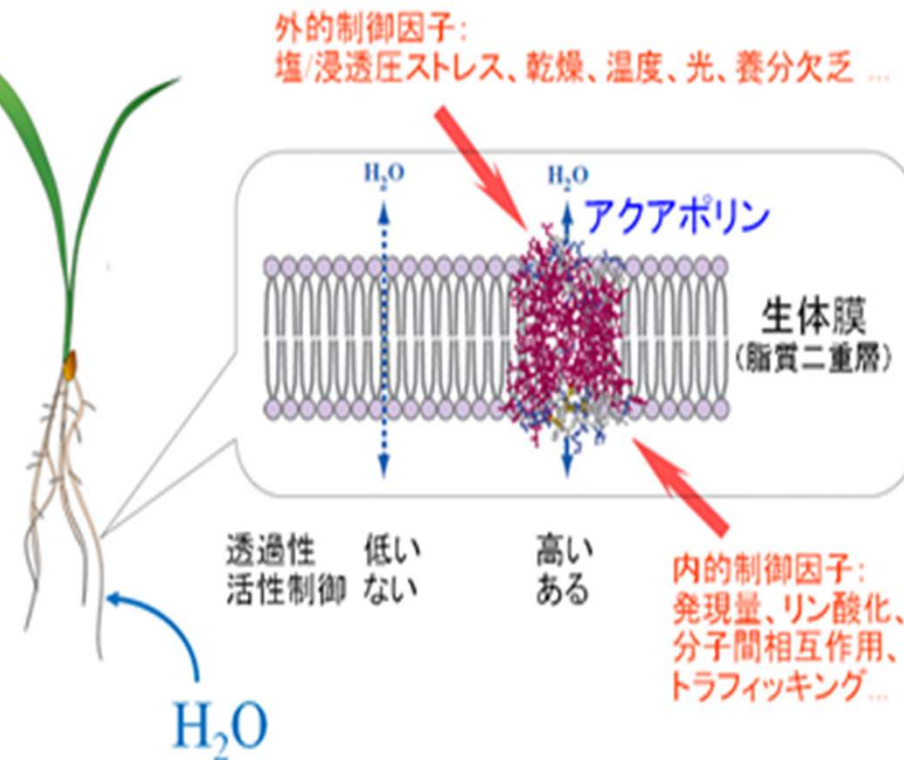
アクアポリンの活性は、遺伝子やチャネルタンパク質の発現量によって調節されるだけでなく、外界や生体内の環境変化に応じて素早く活性を変化させるために、以下のような調節機構が報告されています。

- ①チャネルタンパク質のリン酸化によるチャネルの開閉
- ②細胞質の変化によるチャネルの開閉
- ③トラフィックによる制御  
(アクアポリンが細胞膜と内膜系を行き来する)
- ④ヘテロマーの形成による活性変化(異種アクアポリンが四量体を形成)

アクアポリンの活性調節は、低酸素とか浸透圧ストレス(塩ストレスや乾燥によって起こります)などの環境下での根の水透過性制御と直接的に関係していることが示されています。

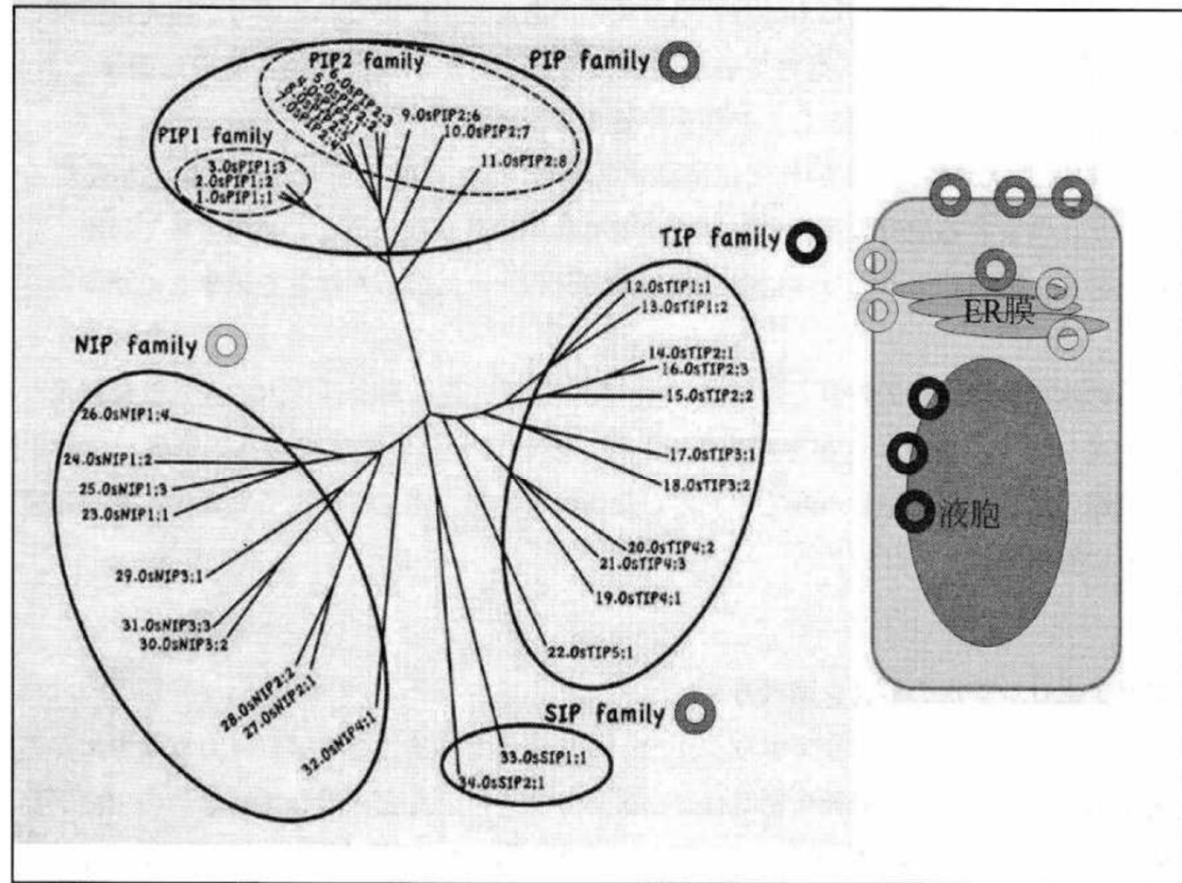
## アクアポリン: 水と中性低分子化合物の輸送体

外的制御因子:  
塩/浸透圧ストレス、乾燥、温度、光、養分欠乏 ...



# 植物アクアポリンの種類と分布

●高等植物のアクアポリンは、  
 PIP（原形質膜型、plasma membrane intrinsic protein）、  
 TIP（液胞膜型、tonoplast intrinsic protein）、  
 NIP（Nodulin-26 like intrinsic protein）、  
 SIP（small basic intrinsic protein）  
 の4つの主要グループに分類されます。



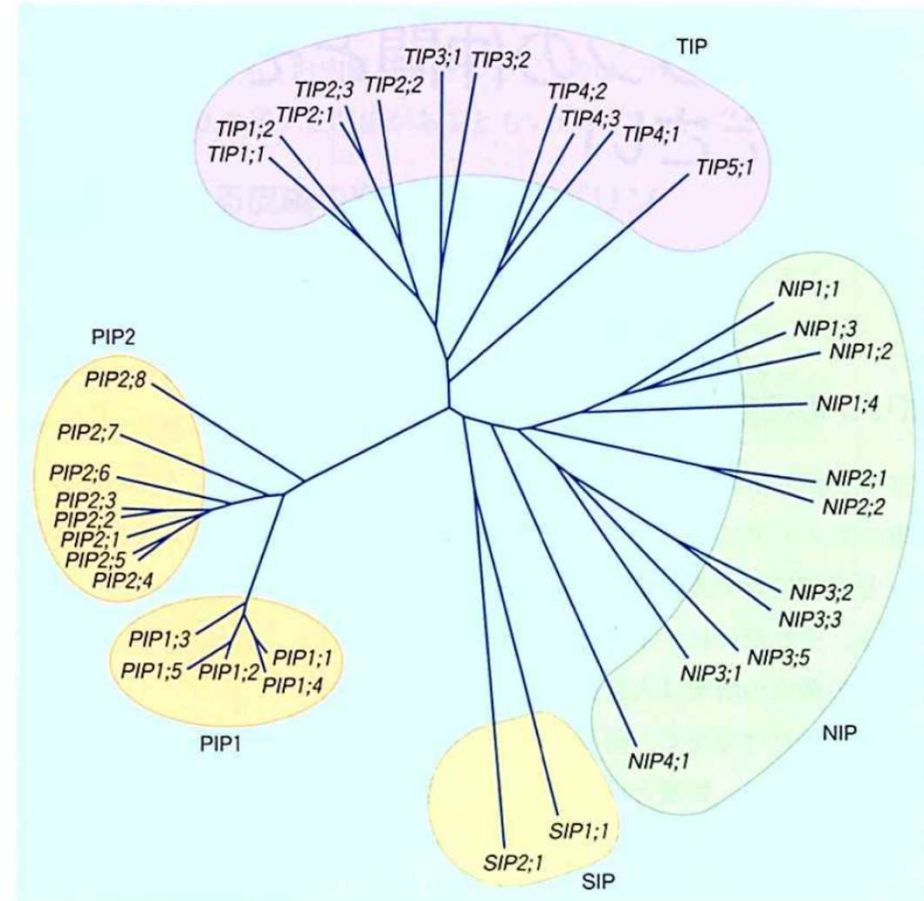
植物アクアポリンの種類と分布

※北川科学総合研究所 北川良親先生の文献からの引用です

# イネの植物アクアポリン種類の例

- PIP1型とPIP2型はいずれも細胞膜局在型のアクアポリン。PIP1型がほとんど水透過性がないのに比べPIP2型は高い水透過性を示すのが特徴。PIP1型はPIP2型と一緒に発現すると、PIP2型の水透過性を2倍近くにする。
- TIP型は細胞内の液胞に局在するアクアポリン。水透過性が高く、発現蛋白量の多いものが含まれる。
- NIP型は水とグリセロールの両方を透過する性質を持ついわゆるアクアグリセロポリンの一種。この中には水やグリセロール以外の溶質を通すものがある。
- SIP型は分子サイズが小さいことからこのように呼ばれている。ER膜（小胞体膜）に局在しているが機能はよくわかっていない。

※北川科学総合研究所 北川良親先生の共同執筆  
書籍「水とアクアポリンの生物学」（中山書店）  
からの引用です



① イネアクアポリンの系統樹

# 植物のアクアポリンと いろいろな物質の透過

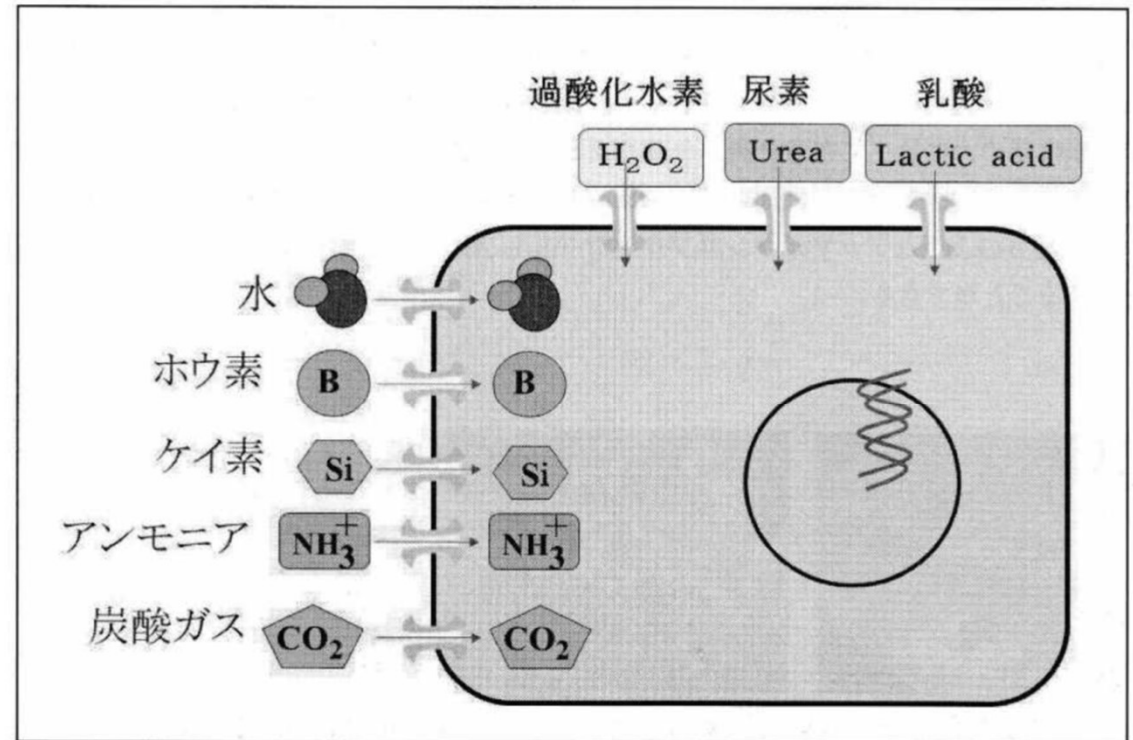
●植物のアクアポリンの間には水以外の溶質を透過するものが知られている。

●最もポピュラーなのはグリセロールの透過です。

●その他に、次のものが透過するアクアポリンがあることが明らかにされています。

二酸化炭素、ホウ素、ケイ素、  
尿素、乳酸、アンモニア、過酸化水素

などです。



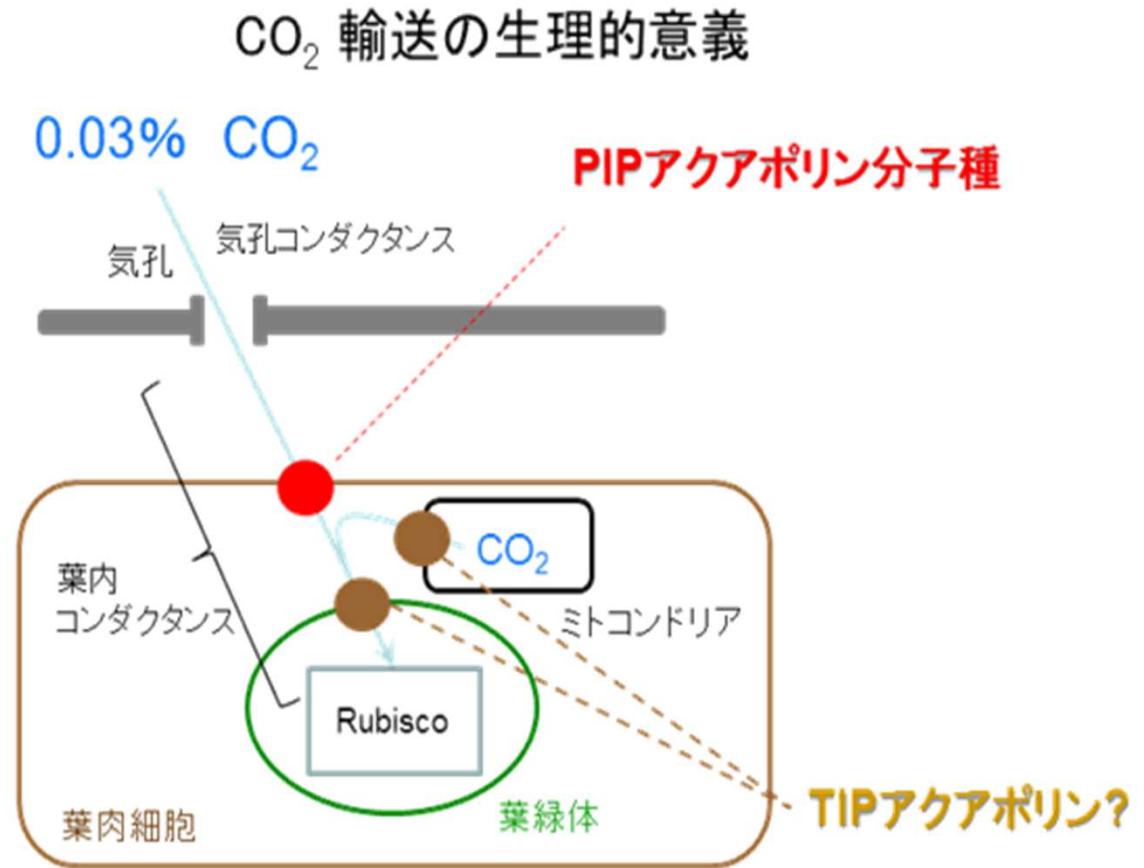
いろいろな物質を通す植物アクアポリン



## 例：二酸化炭素を透過する植物アクアポリン

●いくつかのPIP型アクアポリン分子種は原形質膜において細胞外から細胞内への二酸化炭素の取り込みに関与。

●TIP型アクアポリンは細胞内で葉緑体への二酸化炭素炭素の取り込みに関与して、葉緑体内のRubiscoに二酸化炭素をスムーズに供給することで光合成機能の向上に寄与していると考えられます。



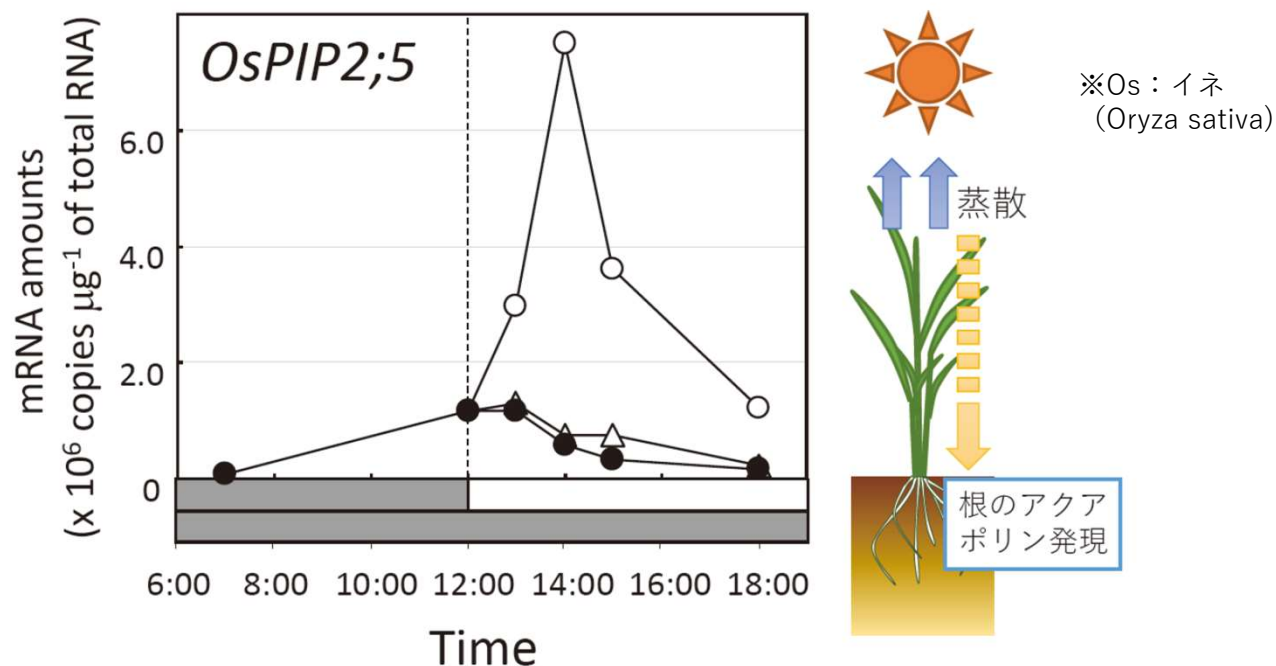
※岡山大学資源生物科学研究所「植物アクアポリンのホームページ」からの引用です

# 植物のストレス耐性とアクアポリン

●植物は動くことができないので、乾燥、低温・高温、浸透圧変化、病害虫など地球環境のストレスを絶えず受けて生きています。これらのストレス回避のために水分代謝が深く関係しています。

●アクアポリンはすみやかな発現誘導・抑制、ゲートの開閉調節、細胞内での局在性の変化等により比較的短時間で体内の水透過性を変化させ、**日々の環境変動下での吸水・蒸散の維持に貢献している。**

●樹木の乾燥ストレスによる気孔の開閉もアクアポリンが制御していることがわかりました（2019年京都大学・森林総研）。



第3図 地上部の加湿処理が根のアクアポリン発現の日周変動に及ぼす影響。

根の研究26 (3) : 39-55 (2017) 農研機構東北農業研究センター他「イネにおけるアクアポリンの機能と環境応答」より引用

<試験方法> 12時間明期/12時間暗期の人工気象室で栽培したイネ幼苗の明期開始から加湿処理を行い根特異的アクアポリンOsPIP2;5の発現量を比較した。

<試験結果> 図中○線：通常明暗日周（相対湿度60%）では日射量が多い日中に発現量が多いのに比べ、△線：明期開始から加湿し地上部湿度を100%にした場合は発現がみられなかった。（図中●線：明期開始時に暗期を追加）

## ミネラルスターで処理すると水田水のアクアポリン透過性が高い水に変化し、イネの収量も上がる

●水田にミネラルスターを加えて耕運しイネを育てた場合、イネ籾の収量は20%増加しました。

●ミネラルスターを処理した水田のイネの廻りの土の水を調べると、無処理の水田の土の水に比べて約1.2倍アクアポリン(PIP2;1)透過性が高くなっていました(図3)。

●イネのアクアポリンは36種類あります。その内の6種類(PIP2;1～PIP2;6)を使って調べました。

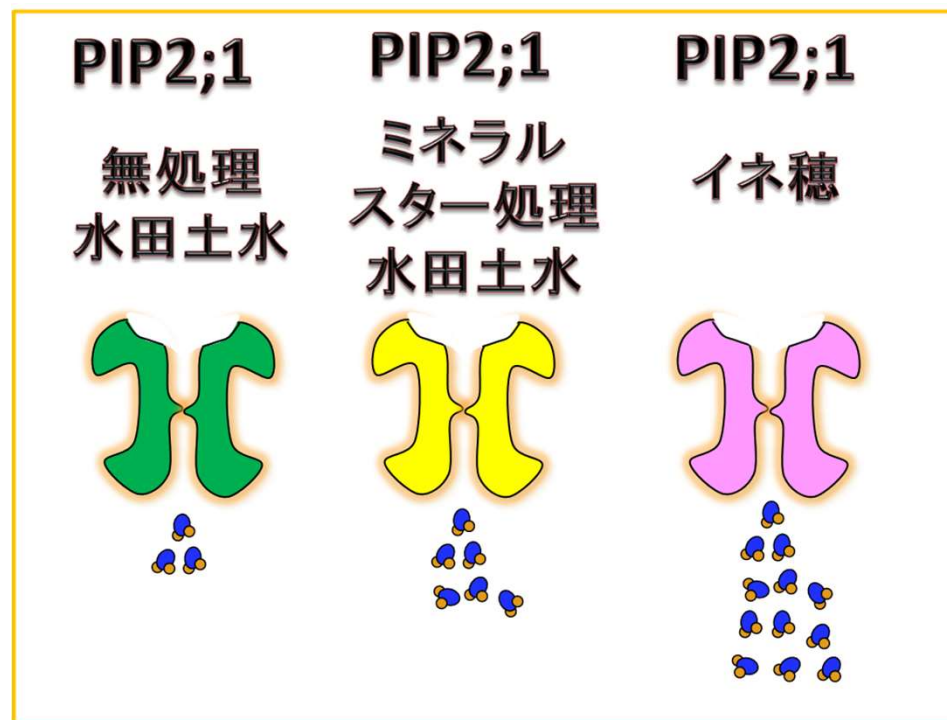


図3 ミネラルスター散布区の水田土水とイネ穂のアクアポリン(PIP2;1)の透過性



10. ミネラルスター施用による  
イネのアクアポリン透過性  
に関する試験結果の詳細  
2019年～2020年実施

# 2019年度の試験結果-1

2019年においては、①イネの各部位（根・葉・茎・穂）細胞水のイネアクアポリン（PIP）透過性の調査、②ミネラルスター処理水田土水のイネアクアポリン（PIP）透過性の調査を実施し、次の結果が得られた。

●①の結果：イネは主にPIP2;1およびPIP2;2を良く通る水を求めている。

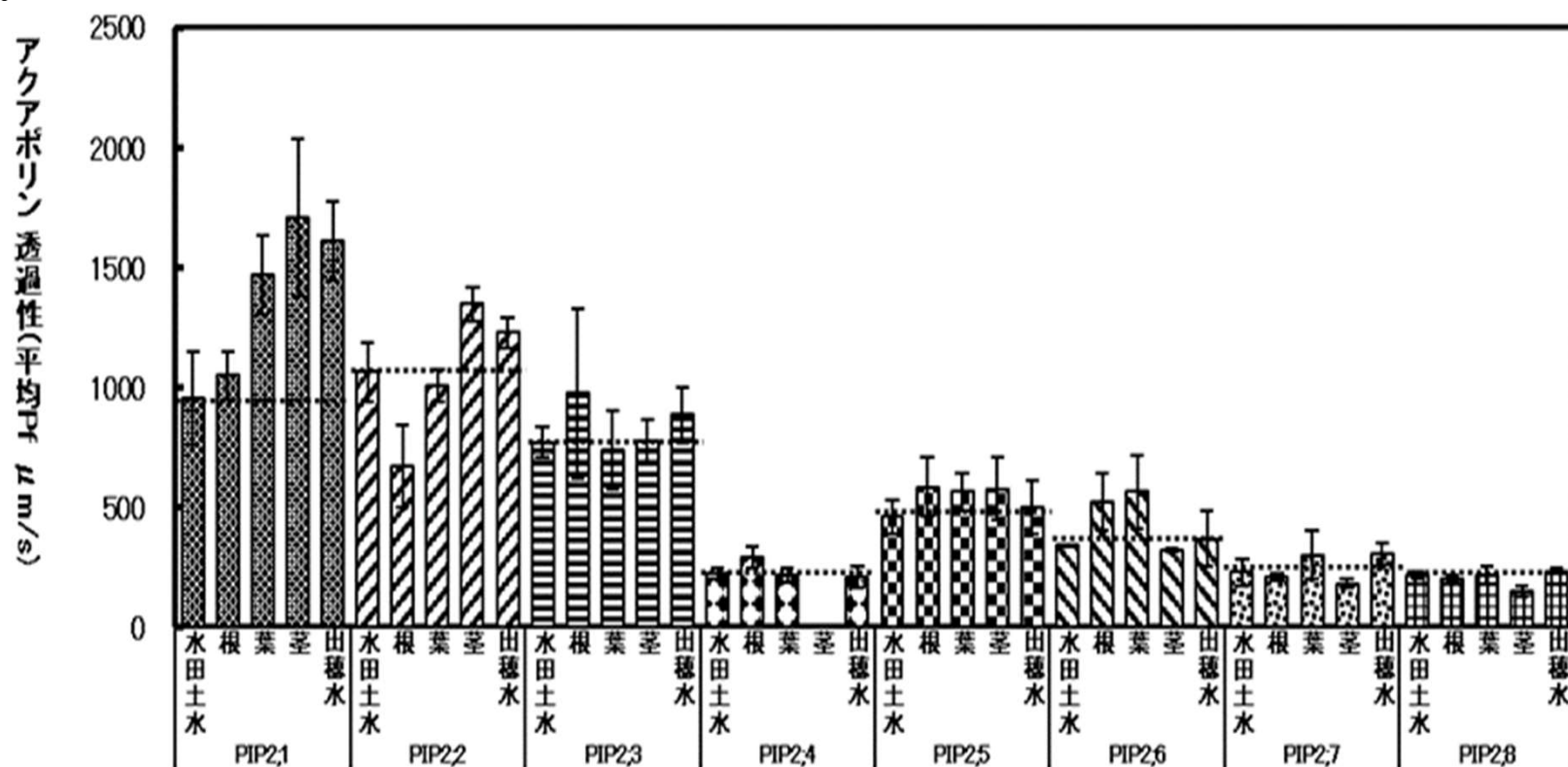


図1 イネ部位のアクアポリン透過性速度 (μm/s)

# 2019年度の試験結果-2

## ②ミネラルスター処理水田土水のイネアクアポリン（PIP）透過性の調査を実施

表1：イネ各部位細胞水およびミネラルスター処理水田土水のイネアクアポリン透過性調査の結果（表中○が相対値による透過性高を表す）

●②の結果：ミネラルスターによって水田土水が変化することが確認され、主にイネの根や葉や茎や実の育成に適したPIP2;1と、イネの実が登熟する時に適したPIP2;6に対する透過性が高くなる特徴があった。

イネアクアポリンの種類（PIP）		PIP2 ;1	PIP2 ;2	PIP2 ;3	PIP2 ;4	PIP2 ;5	PIP2 ;6	PIP2 ;7
イネ各部位	根（9/初採取）	○		○	○	○	○	
	葉（9/初採取）	○				○	○	○
	茎（9/初採取）	○	○			○		
	穂：幼穂期9/初～ 出穂期9/中	○	○	○		○		○
	穂：登熟期9/下			○	○		○	
ミネラルスター処理水田土壌水		○				○	○	

# 2020年度の試験

## ● (1) 2020年度の試験目的

2019年結果の確認と、ミネラルスター処理による水田のイネの収量と水田土水のアクアポリン水透過性との関係について検討するための試験を行った。

## ● (2) 試験方法

**2-1)試験水:**2020年、大分県山国町の農家に依頼し、ミネラルスター散布水田で育てたイネの生育に関する試験を行なった。対照として50m位離れているがほとんど同様の条件の水田で試験した。6/13と9/15に水田のイネの根廻りの土を採取し、凍結乾燥し、水田土水を回収した。同じ圃場のイネの出穂を9/3の乳熟期に採取し、同様に凍結乾燥し、出穂穂の水を回収した。

**2-2)アクアポリン水透過性の測定:**イネのアクアポリンPIP遺伝子（正確には遺伝子RNA）を顕微鏡下で、アフリカツメガエルの卵母細胞に1~25ng/50 nl注射した。PIP遺伝子として、PIP2;1、PIP2;2、PIP2;3、PIP2;5、PIP2;6の6種類を用いた。注射された卵母細胞を2~3日間培養液（Birth Medium）中で培養すると卵の表面の細胞膜にイネのアクアポリンが発現する。この卵を試験水の中に入れると、培養液より浸透圧が低いので、水が卵の中に入ってくる。水の入る量が多いと、卵はより速く膨らむ。この膨らむ速度を顕微鏡下でビデオ撮影し、体積を計算して、水の透過率を計算した。

# 2020年度の試験：結果および考察

## (1) ミネラルスター散布区の土壌分析結果・葉の葉緑素量推移・収量

●①土壌分析結果： ミネラルスター散布水田の土壌は出穂前の幼穂形成期の8月上旬に、ややアンモニア態窒素が増加している結果であった（表2）。

表2 ミネラルスター散布区の土壌分析

長尾氏水田圃場採取土壌の化学性分析結果の推移

分析項目	散布区			対照区		
	①5月14日採 取土	②6月12日採 取土	③8月7日採 取土	①5月14日採 取土	②6月12日採 取土	③8月7日採 取土
pH (H2O)	5.8	6.0	5.7	5.7	5.9	5.6
EC (mS/cm)	0.06	0.04	0.04	0.06	0.04	0.03
アンモニア態窒素 (mg/100g)	0.9	4.4	1.7	0.8	5.6	0.9
硝酸態窒素 (mg/100g)	0.7	0.3	0.3	0.7	0.2	0.1



# 2020年度の試験：結果および考察

## (1) ミネラルスター散布区の土壌分析結果・葉の葉緑素量推移・収量

●②葉の葉緑素量推移： 栄養生長期（6/6田植～7月下旬頃）を過ぎ、交代期（8/上～8/下）の8月7日幼穂形成期、および生殖生長期（9/上～収穫まで）の9月15日登熟期・10月9日収穫1日前に葉緑素を計測した結果、散布区は対照区と比べて葉緑素量が低下していった（表3）。イネは、生殖生長に入るまでに栄養生長で体を完成させる。生殖生長に入ってから、すでに吸収された体内の有機態窒素が使われる。ミネラルスター散布区は対照区と比べて体内窒素が有効に使われたと考えられる。

表3 葉緑素量（スパッド値）測定結果推移  
（コニカミノルタのスパッド計で測定） n=10

区	①8月7日 幼穂形成期	②9月15日 登熟期	③10月9日 収穫1日前
散布区	35.3	23.4	7.2
対照区	35.7	25.3	13.6

# 2020年度の試験：結果および考察

(1) ミネラルスター散布区の土壌分析結果・葉の葉緑素量推移・収量

●③収穫量：ミネラルスター散布区のイネの収量は、対照区と比べて21%増加した（表4）。

表4 ミネラルスター散布区のイネの収量

項目	実面積当たり		10a当り換算	
	栽培面積 m <sup>2</sup>	左の収穫量 kg	収穫量 kg	対照を100とした指数
散布区	885	611	690	121
対照区	750	427	569	100

# 2020年度の試験：結果および考察

## (2) ミネラルスター散布区の水田土水のアクアポリン透過性

- 図2 (次ページ) に、ミネラルスター散布水田土水および対照水田土水のアクアポリン透過性の結果を示した。
- 田植え (6/6) 後の栄養生長期の活着期に当たる6/13は、ミネラルスター散布区のPIP2;1、PIP2;2およびPIP2;6に対する透過性が対照区の1.2倍、1.14倍および1.16倍高かった。(本結果は2019結果と同じ)
- イネの穂の細胞の中の水を生殖生長期の乳熟期に当たる9/3に調べると、特にPIP2;1透過性が高いことが分った。即ち、乳熟期のイネの籾はPIP2;1を一番求めていると解釈できる。
- 生殖生長期の登熟期に当たる9/15になると、ミネラルスター散布区のPIP2;5およびPIP2;6に対する透過性が対照区の1.18倍および1.25倍高かった。(本結果は2019結果と同じ)

# 2020年度の試験：結果および考察

## (2) ミネラルスター散布区の水田土水のアクアポリン透過性一図

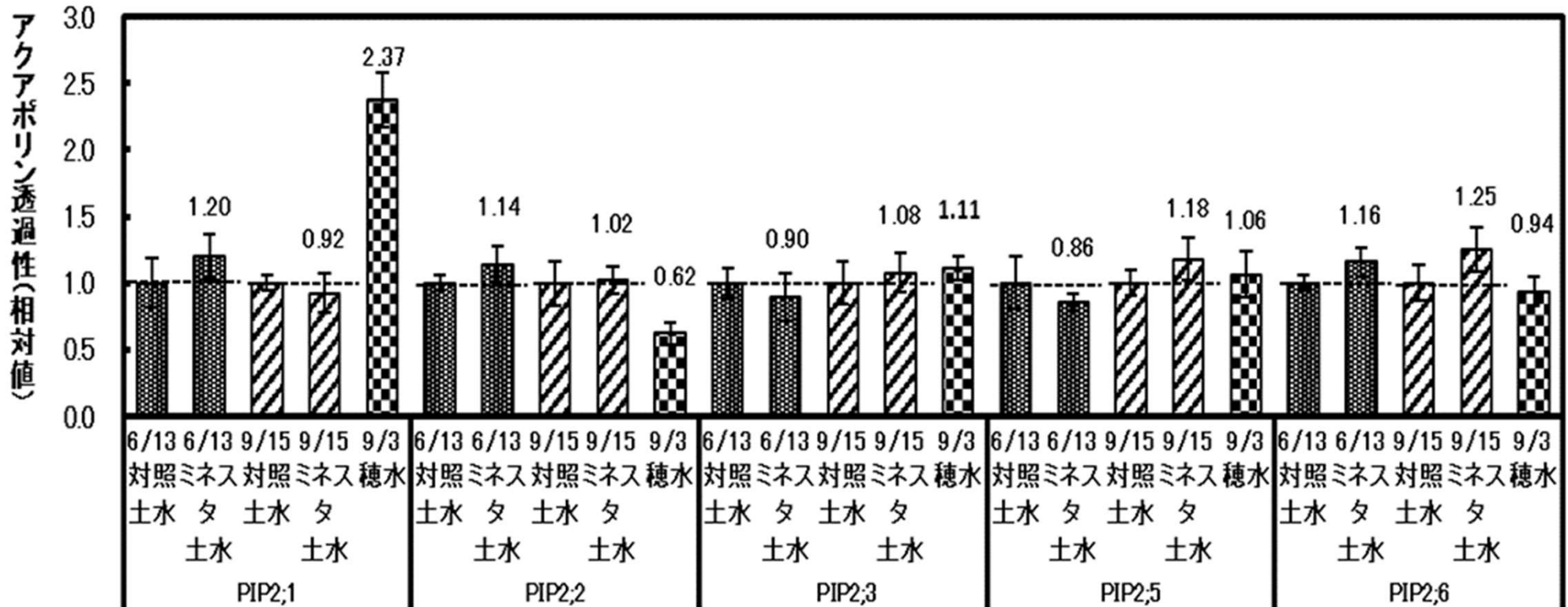


図2 ミネラルスター散布水田土水のアクアポリン (PIP) 透過性 (相対値)

# 2020年度の試験：結果および考察

## (3) 総括

- ミネラルスター散布区は、穂が求めるイネアクアポリンPIP2;1透過性のある水田土水が多くなった (図2)。
- イネが求めるイネアクアポリン水が多くなったことが、①穂肥が必要とされている8/7幼穂形成期のアンモニア態窒素が増えたこと (表2)、②葉の葉緑素量の推移で示されるように、窒素の効率的な吸収と体内で有効に使われたこと (表3) に繋がっている可能性があり、そのことが原因の一つとして収量が21%増加した (表4) と考えられる。

以上



## 11. 【付録：2020年イネ生育データ込みの全試験結果のまとめ】

ミネラルスター処理によるイネの生育および収量調査ならびに  
処理水田土水のアクアポリン透過性に関する試験結果報告書

合名会社群馬長石

- 試験期間 2020年5月14日（散布日）～2020年10月10日（収穫日）
- 試験場所 大分県中津市山国町のN氏水稲圃場
- 栽培品種 イネ（ヒノヒカリ） 田植え日 2020年6月6日 畦間25cm・株間17cm（m<sup>2</sup>当たり24株）
- 試験区の設定 N氏水稲圃場のうち2面を使用し、圃場1面ずつを散布区と対照区とした。

面積は、散布区圃場が885m<sup>2</sup>、対照区圃場が825m<sup>2</sup>である。  
両圃場共に、元肥として、園芸化成骨粉入り264号

（N12-P16-K14-Mg3）を5月14日に40kg/10a  
施肥した。追肥は実施せず。



- 試験品（ミネラルスター）の散布区への散布日・散布量

散布日	1回目（5月14日）	2回目（8月7日）
10a 当り散布量	100 kg（5袋）	20 kg（1袋）

### ＜試験結果＞

(1) 10月9日調査データと10月10日収穫量データは表1のとおりである。散布区は対照区と比較して、草丈が若干低く、茎が若干太く、葉の緑色は薄く、根が発達していた(4ページ写真1参照)。また、穂数が多く、粒数も多く、千粒重も重くなっていた。収穫量も21%増の結果であった。

**表1 10月9日調査データおよび10月10日収穫量データ**

項目	10月9日調査データ (両区3株調査)										10月10日収穫量データ	
	草丈cm (平均)	スパッド 値 (平 均)	葉色ス ケール値	根重g (平均)	茎数/株 (平均)	穂数/株 (平均)	粒数 (合計)	粒重 g (合計)	一粒重 mg	千粒重 g	10a当り実収穫量 kg	対照を100 とした指 数
散 布 区	103	7.2	1	1.6	18.7	18.7	4602	105.59	22.94	22.94	690	121
対 照 区	106	13.6	1.5~2	1.3	17	17	4589	101.01	22.01	22.01	569	100

(2) 葉緑素量の推移を表2に示す。栄養生長期(6/6 田植～7月下旬頃)を過ぎ、交代期(8/上～8/下)の8月7日幼穂形成期、および生殖生長期(9/上～収穫まで)の9月15日登熟期・10月9日収穫1日前に葉緑素を計測した結果、散布区は対照区と比べて葉緑素が低下していった。散布区は対照区と比べて生殖生長期に体内窒素が有効に使われたと考えられる。また、土壌化学性調査では、アンモニア態窒素の他に交換性カリも多くなっており、炭水化物の蓄積や開花結実も促進されたと考えられる。

**表2 葉緑素量(スパッド値)測定結果推移**

(コニカミノルタのスパッド計で測定) n=10

区	①8月7日 幼穂形成期	②9月15日 登熟期	③10月9日 収穫1日前
散布区	35.3	23.4	7.2
対照区	35.7	25.3	13.6



(3) 土壤化学性の推移を表3に示す。散布区の対照区と比べた傾向は次のとおりである。

- ①アンモニア態 N は、幼穂形成期の 8 月 7 日に増えた。土壤中の有機態 N が土壤微生物の働きでアンモニア態 N に変化したものと考えられる。
- ②交換性のカリが期間中継続して増えた。
- ③ミネラルスター散布後にケイ酸が増加した。

表3 土壤化学性分析結果の推移

分析項目	散布区				対照区			
	①5月14日散布前採取土	②6月12日採取土	③8月7日採取土	④9月15日採取土	①5月14日散布前採取土	②6月12日採取土	③8月7日採取土	④9月15日採取土
pH (H2O)	5.8	6.0	5.7	6.0	5.7	5.9	5.6	5.9
EC (mS/cm)	0.06	0.04	0.04	0.05	0.06	0.04	0.03	0.04
アンモニア態窒素 (mg/100g)	0.9	4.4	1.7	1.2	0.8	5.6	0.9	1.2
硝酸態窒素 (mg/100g)	0.7	0.3	0.3	0.1	0.7	0.2	0.1	0.1
CEC (塩基置換容量, meq/100g)	22.9	20.7	23.2	26.5	24.0	24.9	24.6	26.5
交換性石灰CaO (mg/100g)	267.0	265.0	239.0	316.0	249.0	276.0	228.0	325.0
交換性苦土MgO (mg/100g)	56.0	50.0	46.0	56.0	49.0	48.0	42.0	51.0
交換性加里K2O (mg/100g)	25.0	32.0	15.0	16.0	23.0	26.0	10.0	11.0
可給態リン酸P2O5 (mg/100g)	47.0	38.0	30.0	37.0	56.0	45.0	46.0	48.0
SiO2 (mg/100g)	23.0	26.0	13.0	15.0	15.0	16.0	12.0	15.0
Fe2O3 (%)	0.51	0.46	0.46	0.41	0.55	0.54	0.48	0.49
腐植 (%)	3.3	2.9	2.8	2.9	3.6	3.1	3.0	2.9

#### (4) ミネラルスター処理水田土水のアクアポリン透過性調査

##### 1) 試験水の採取

6/13 活着期と 9/15 登熟期に両区水田のイネの根廻りの土を採取し、凍結乾燥し、水田土水を回収した。同じ圃場のイネの出穂を 9/3 の乳熟期に採取し、同様に凍結乾燥し、出穂穂水を回収した。

##### 2) アクアポリン水透過性の測定

イネのアクアポリン PIP 遺伝子（正確には遺伝子 RNA）を顕微鏡下で、アフリカツメガエルの卵母細胞に 1~25ng/50 nl 注射した。PIP 遺伝子として、PIP2;1、PIP2;2、PIP2;3、PIP2;5、PIP2;6 の 6 種類を用いた。注射された卵母細胞を 2~3 日間培養液（Birth Medium）中で培養すると卵の表面の細胞膜にイネのアクアポリンが発現する。この卵を試験水の中に入れると、培養液より浸透圧が低いので、水が卵の中に入ってくる。水の入る量が多いと、卵はより速く膨らむ。この膨らむ速度を顕微鏡下でビデオ撮影し、体積を計算して、水の透過率を計算した。

##### 3) アクアポリン透過性調査の結果と考察

図 1 に、ミネラルスター散布水田土水および対照水田土水のアクアポリン透過性の結果を示した。

田植え（6/6）後の活着期に当たる 6/13 は、ミネラルスター散布区の PIP2;1、PIP2;2 および PIP2;6 に対する透過性が対照区の 1.2 倍、1.14 倍および 1.16 倍高かった。

イネの穂の細胞の中の水を乳熟期に当たる 9/3 に調べると、図 1 に示したように、特に PIP2;1 透過性が高いことが分った。即ち、乳熟期のイネの糸は PIP2;1 を一番求めていると解釈できる。

登熟期に当たる 9/15 になると、ミネラルスター散布区の PIP2;5 および PIP2;6 に対する透過性が対照区の 1.18 倍および 1.25 倍高かった。



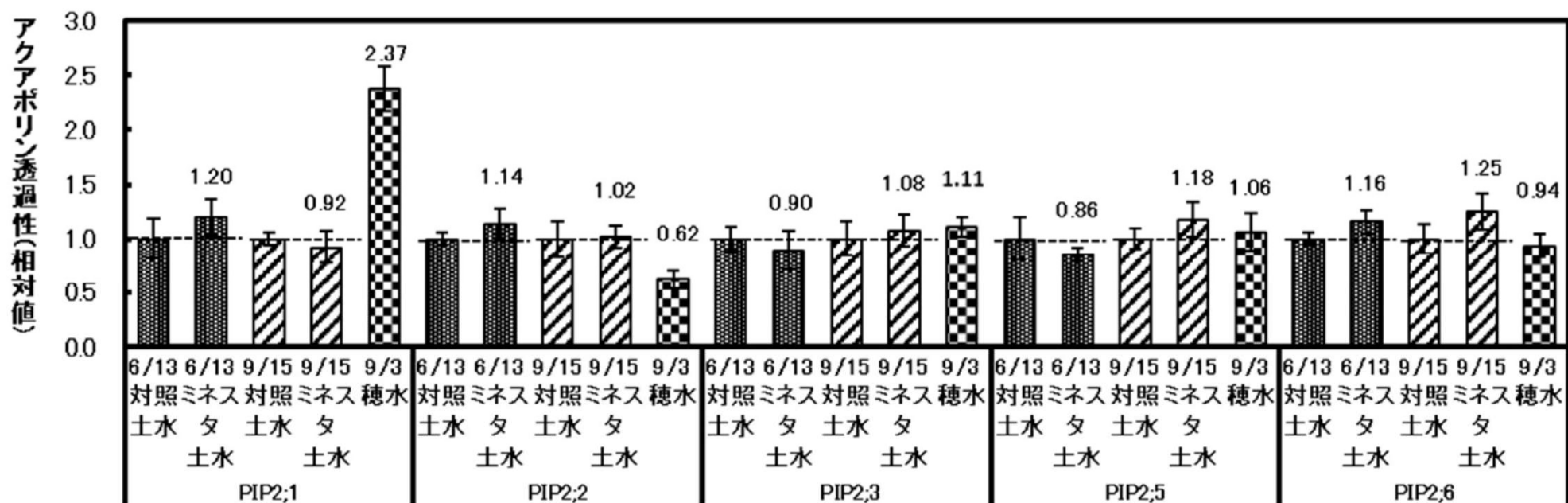


図1 ミネラルスター散布水田土水のアクアポリン (PIP) 透過性 (相対値)

以上の結果、ミネラルスター散布区は穂が求める PIP2;1 透過性のある水田土水が多くなった (図1)。

イネが求めるイネアクアポリン水が多くなったことが、①穂肥が必要と言われている 8/7 幼穂形成期のアンモニア態窒素が増えたこと (表3)、②葉の葉緑素量の推移で示されるように、窒素の効率的な吸収と体内で有効に使われた (表2) ことに繋がっている可能性があり、そのことが原因の一つとして収量が 21% 増加したと考えられる。

(5) お米の品質調査

収穫後のお米の品質診断（㈱サタケ穀物分析センターに依頼し、㈱サタケの米食味計 RLTA10A による食味値・タンパク質・アミロース・脂肪酸度を分析）を行った。その診断結果は表4と図1のとおりである。結果について、①両区ともに全国平均より、良い結果であった、②両区を比べると、脂肪酸度が、散布区は対照区より0.7低く優れた値であり、食味値・タンパク質・アミロースは同等であった。

表4 米粒食味計 RLTA10A（サタケ製）による内観品質評価のデータ

分析項目	分析結果		全体平均 (過去3年全分析 実施結果から集計 値)	評価基準の説明
	散布区	対照区		
食味値 (点)	76	76	74.1	官能食味評価と米の内部品質の関連性の永年の研究成果の基づき食味値を算出。数値が高いほどおいしいことを示す。
タンパク質 (%、乾物)	7.3	7.4	7.8	米の中のタンパク質の占める割合を示す。数値が低いほどふっくらとしたご飯に炊き上がり高評価となる。
アミロース (%)	19	18.9	19.1	デンプンの中におけるアミロースの占める割合を示す。数値が低いほど粘りがあり高評価となる。
脂肪酸度 (KOHmg/100g)	14	14.7	15.3	米から脂質を抽出した養液（酸性）を中和するのに要する水酸化カリウム（KOH、アルカリ性）の量mgを米（乾物）100gに対して表した数値。数値が高いほど酸化（古米化）が進んでいることを示す。
<参考> 水分 (%)	13.7	14.1	14.1	米の中における水分の占める割合を示す。14～15%が最適。収穫後の乾燥程度に関わる項目なので、ここでは参考とする。

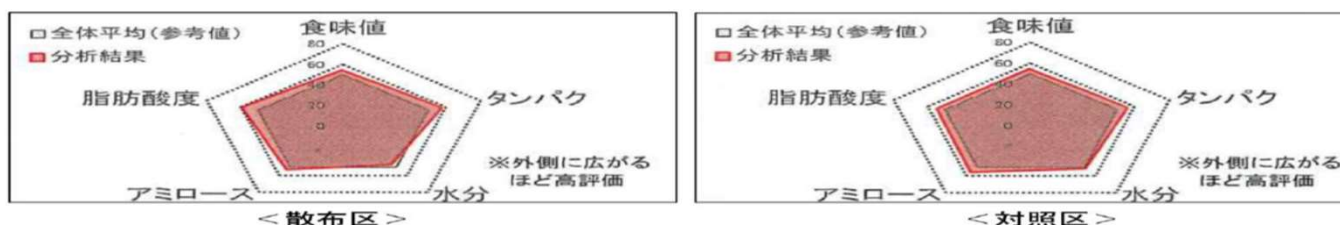


図1 お米品質調査結果の偏差値チャートグラフ（全体平均を偏差値50として表示）



写真1 <10月9日（収穫1日前）の散布区と対照区の状況>



散布区



散布区

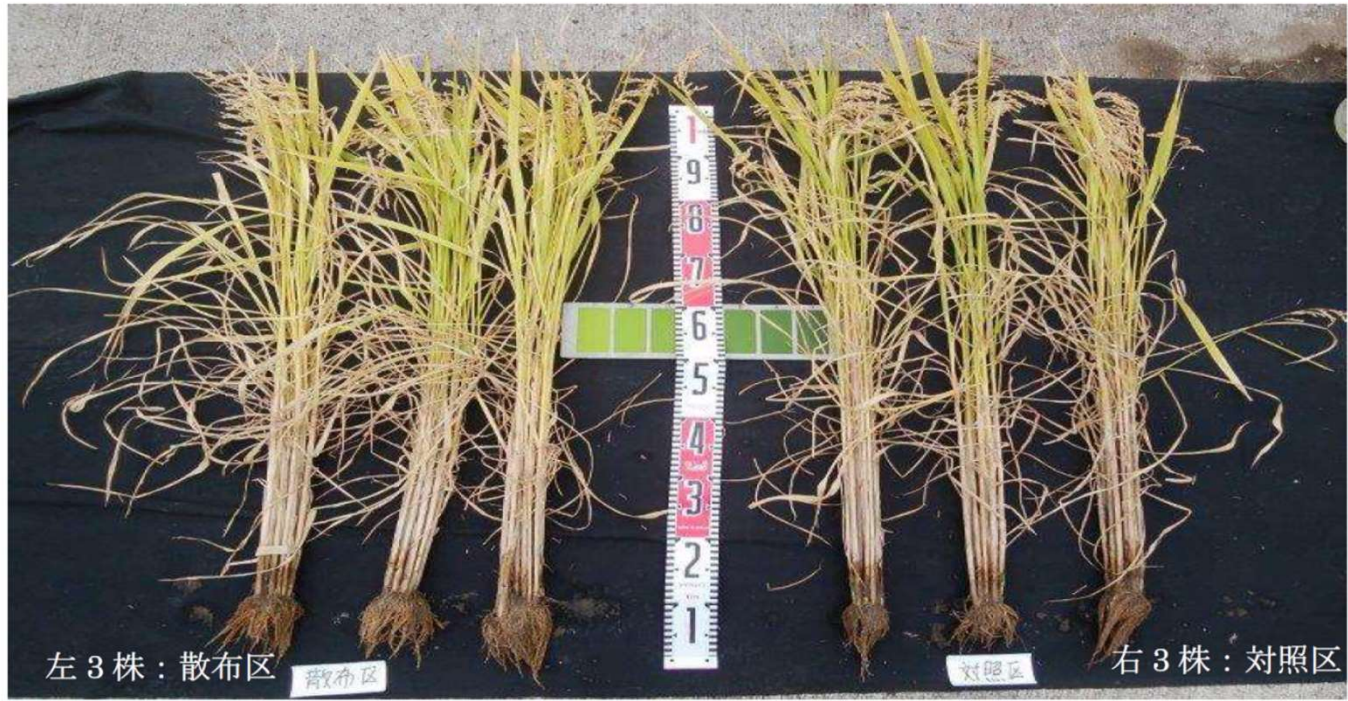


対照区



対照区





以上

## 12. <引用・参考にした文献・資料>

- 「水とアクアポリンの生物学」 (2008年、中山書店、佐々木成編集、北川先生も執筆者のお一人)
- 「アクアポリン革命」 (2016年、梓書院、北川良親)
- 「アクアポリンの構造、機能、およびその多様性—脊椎動物を中心として」 (生化学第86巻第1号、pp.41-53、2014、静岡大鈴木・田中)
- 「アクアポリン研究の現在」 (東京医科歯科大 佐々木成、第19回大学と科学公開シンポジウム代表挨拶資料)
- 「アクアポリン水チャネルの分布と機能」 (第25回聴覚生理研究会Otol Jpn 17(3);173-177,2007、群馬大学院医学系研究科 高田)
- 岡山大学資源生物科学研究所「植物アクアポリンのホームページ」
- ウィキペディア「アクアポリン」
- 植物の「みずみずしさ」の分子機構解明とその応用のための基盤研究 (2006~2010実施、新技術・新分野創出のための基礎研究推進事業、岡山大・名古屋大・秋田県立大・東北農業研究センター)
- 「植物小胞体膜アクアポリンの分子生理学的機能の解明」 (名古屋大学大学院生命農学研究科 佐藤、2019年4月博士論文)
- 「イネにおけるアクアポリンの機能と環境応答」 (根の研究26(3);39-55,2017、東北農業研究センター他、石川他)
- 秋田県立大学名誉教授・北川科学総合研究所代表社員 北川良親氏の多数の発表論文および研究報告資料から多数引用させていただきました。また、貴陽石のアクアポリン透過水に及ぼす効果についても試験していただきました。