

14. 水田の土



水田とはイネを栽培してその子実（米）を収穫するための土地の利用形態である。水田というと、湛水され、イネが生育しているところがイメージされることが多いためか、水田≒湿地と思われがちである。世界的には確かにそれに近い水田も多い。しかし日本においては、棚田を見れば明らかなように、本来湛水するはずのない場所に、灌漑施設を作って人工的に湛水できるようにした水田が多い。湛水下の水田の中で起こっていることについては、非常に詳しい研究がなされてきた。その知見は、天然の湿地を理解するためにも有用である。

14.1. 水田の立地

気候条件による制約はあるが、森林や畑は世界中にあまり偏在することなくみられる。しかし、水田という土地利用形態はアジアに集中している。2010年のFAOの統計（FAO, 2010）によると世界の水田面積は約1億5千400万 ha であり、その90%はアジアの国々に集中している。

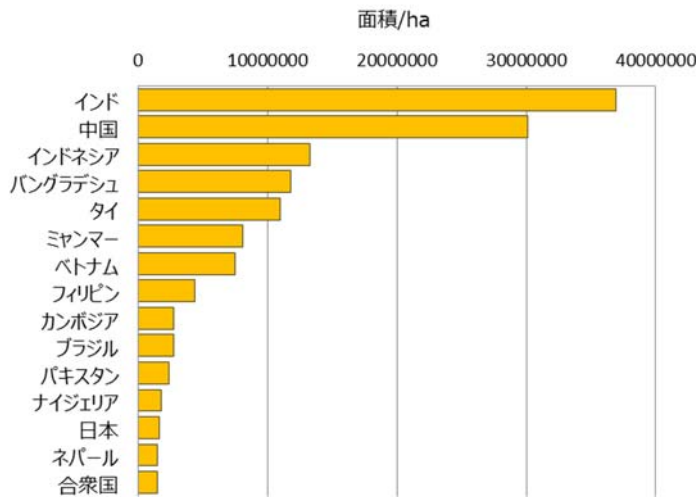


図 14.1 国別の水田面積。上位 15 ヶ国 (FAO, 2010)

日本における 2009 年の統計では、全耕地面積 4 千 600 万 ha のうち水田が 2 千 500 万 ha であり、約 54% を占めている（総務省統計研究所, 2011）。水田≒湿地という見方は当たらないとはいえ、水田の多くは比較的低地にあることは確かである。ここで低地というのは海拔が低いという意味ではなく、地表近くに地下水面がある場所、と考えた方が適当である。

図 14.2 は地下水面の位置を基準にした土の区分を示す。泥炭土と黒泥土は地下水面が地表よりもやや高いところで生成する。泥炭土と黒泥土は有機物含量が 20% を超えるような有機質土であるが、泥炭土はミズゴケなどの生物遺体が識別できるような土、それに対して黒泥土は黒色味がより強く、植物遺体であることが識別できないような土である。グライ土は、地下水面が地表面よりも低い、地下水の毛管上昇のため地表近くまで液相率が高く、酸素の供給不足のため酸化鉄鉱物や水酸化鉄鉱物の 3 価の鉄を電子受容体として利用する微生物の活動が優勢になるため 2 価鉄が生成され、土の断面全体が灰色を呈するような土である。灰色低地土は、地下水位はグライ土よりもやや低いものの、土が細粒であるため、湛水期間中は全層が水飽和に近い状態になり、グライ土に類似した灰色を呈する。褐色低地土は、地下水位がさらに低く比較的粗粒の土であるため、本来湛水することはないが、人工的に下層土を圧密して湛水するようにした土である。褐色低地土は、湛水期間中でも水飽和されるのは作土層だけであり、下層土には酸素が存在する。このため、作土層で生成した 2 価鉄イオンが下層に移動して酸化され、酸化鉄、水酸化鉄として沈殿する結果、作土層は灰色、下層土は褐色を呈する。

泥炭土、黒泥土はそのままではイネの栽培には適していないが、客土によってかさ上げしたり、水路を掘って排水したりすることによって水田として利用される。灰色低地土は、地形的に灌漑水を得やすいということもあり、日本の水田はこのタイプの土の上に作られているものが最も多い。それに次ぐのが褐色低地土である。褐色低地土は、灌漑水が得られ、作土下部の圧密によって透水性を調節することが可能であれば、作土の環境制御の自由度が高く、生産性

の高い水田とすることができる。

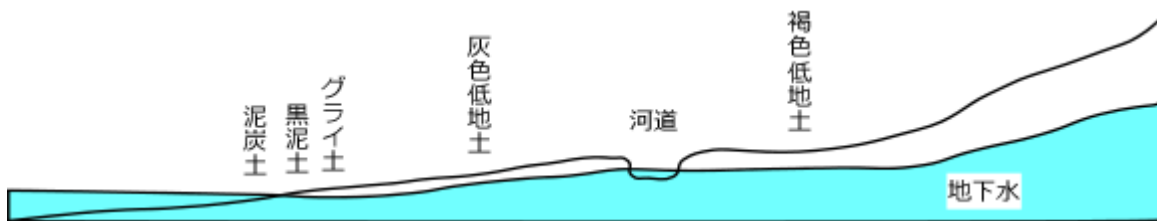


図 14.2 水田が立地する地形。

図 14.3 には例として、高知県安芸市の秋川下流域の鳥瞰図を示す。土壌調査結果によると、安芸川兩岸の自然堤防上には灰色低地土が、その後背地にはグライ土が分布しており、いずれも水田として利用されている。またやや山よりの部分には褐色低地土があり、その一部も水田として利用されている。



図 14.3 高知県安芸市における水田のタイプ。(Google Earth)

14.2. 水田で起こっていること

14.2.1. 日本におけるイネ栽培

現代の日本では、地域や栽培品種にもよるが 4 月～6 月に稚苗の水田への移植（田植え）が行われる。図 14.4 はその工程を示したものである。田植えに先立って、苗床に種もみを播種し、苗づくりが行われる。田植えは田植え機によって行われるので、苗は田植え機にセットするカセット式の育苗箱で育成される。育苗箱には人工的に造粒した培土が充てんされ、それに播種される。苗の準備ができたなら、冬季には落水してあった水田に灌漑水を入れて湛水状態にし、代掻きを行う。代掻きすると、濁水が発生して下方に浸透するが、この時亀裂をふさいで透水性が低下し、湛水が可能になる。また、発芽した雑草を死滅させる効果もある。このようにして湛水した水田に、田植え機を用いて稚苗を移植する。

移植後 2 週間程度、苗が活着するまでの間は常時数 cm～10 cm の深さに湛水する。その後は（福岡県の場合

合には), 湛水と落水を繰り返す(図 14.5)。湛水期間や湛水落水の反復様式は, イネの品種や移植時期, 気候などによってかなり異なる。ただし, どの地域や品種の場合でも移植後約 1 か月後程度の時期(分けつが最盛になる少し前)に落水し, 作土層に亀裂が入る程度に乾燥する。この操作を中干しとよぶ(図 14.6)。



図 14.4 日本のイネ栽培。上左：湛水前の乾燥した水田。上中：水路から水を導入して湛水開始。上右：代かき。下左：育苗。下中：田植え機用の苗のカセット。下右：田植え機による田植え。

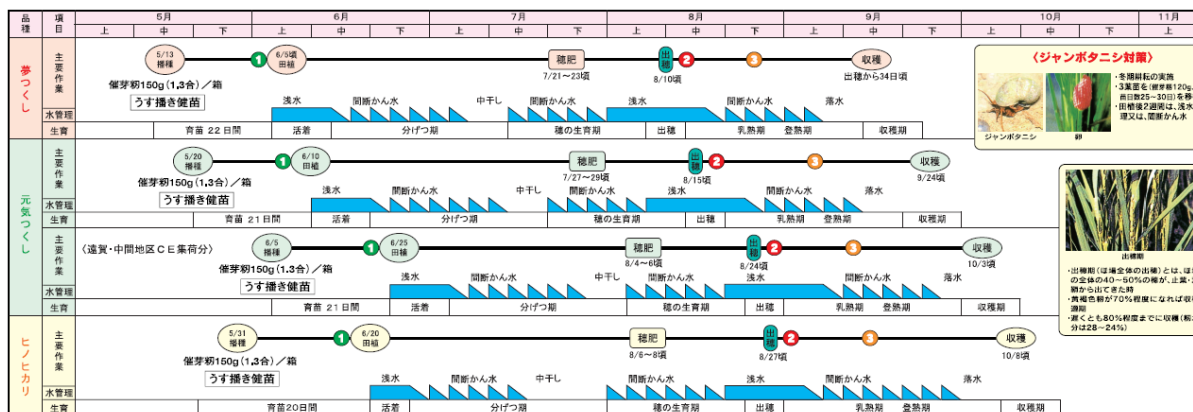


図 14.5 稲作ごよみ (JA 北九, 2011)。水色は湛水を示す。断続した水色の三角は湛水と落水の繰り返しを示す。

中干しによって, イネにはストレスがかかるが, それによって無効な分けつを抑制することができる。また土中に酸素を供給することによって, 有機物の無機化を促進し, それによるアンモニウムイオン, 硝酸イオンなどの無機態窒素の供給を増加させる効果もある。中干し後は湛水と落水を繰り返す, 出穂後 30 日程度経過して登熟期になったら稲刈りなどの農作業をしやすくするため落水する。



図 14.6 中干にてよって亀裂の入った水田。

14.2.2. イネ栽培中の水田

イネ栽培中の水田土の断面の様子および、生じている反応を図 14.7 に模式的に示す。水田の作土層は 10-20 cm の厚さがあり、作土層下部には鋤床（すきどこ）層とよばれる圧密層がある。鋤床層は、農作業による圧密と代掻き後の濁水の浸透にともなう目詰まりによって自然に形成されるが、新規に水田を造成するときには透水性を調節するためこれに相当する層を人為的な圧密によって作り出すこともある。鋤床層は完全な不透水層ではなく、湛水したときには 1 日当たり 10-30 mm の浸透が発生するように透水性を調節している。これは日減水深とよばれる。水が浸透することは、多量の灌漑水を必要とすることになるが、下層への溶存酸素の供給、灌漑水に溶存した養分の供給という点で利点がある。

湛水すると、土壤微生物の呼吸のため作土層からは分子状酸素が消失する。そうすると、硝酸イオン、4 価のマンガニオン（二酸化マンガンの鉱物として存在）、3 価の鉄イオン（酸化鉄鉱物、水酸化鉄鉱物として存在）、硫酸イオンなどが順に、微生物の呼吸のための電子受容体として利用される。つまりこれらの化合物が還元される。一般に、分子状酸素が存在するような状態を酸化状態、消失して上述の一連の還元反応が進行した状態を還元状態とよぶ。また、酸化状態であるような土層は酸化層、還元状態であるような土層は還元層とよばれる。湛水によって作土層の大部分は還元的になるが、作土層の最上部数 mm~20 mm 程度の部分は、浸透水によって溶存酸素が供給されるため湛水期間を通じて酸化状態に保たれる。

硝酸イオンの還元によって、作土層からは硝酸イオンは消失し、分子状窒素や一酸化二窒素として大気中に出ていく。この過程は脱窒とよばれる。ついで、二酸化マンガンの鉱物や酸化鉄鉱物、水酸化鉄鉱物の一部が溶解し、2 価のマンガニオン、2 価鉄イオンなどが生成する。この反応によって土色は灰色ないし青灰色を帯びようになる。硫酸イオンの還元が進行すると硫化物イオンが生成する。硫化物イオンは、土壤溶液の pH が 7 以下である場合には大部分は硫化水素 (H_2S) として存在し、硫化水素は生物にとっては猛毒である。しかし湛水下の水田では硫化水素の毒性によってイネが障害を受けることはほとんどない。それは、硫酸イオンの還元が進行し始める以前に 2 価マンガニオンや 2 価鉄イオンが生成しているため、生成した硫化物イオンは非常に溶解度の低い硫化鉄 (FeS) として土壤溶液から除去されるからである。

生成した 2 価マンガニオンや 2 価鉄イオンは陽イオン交換しながら浸透水とともに下層に移動する。褐色低地土の水田や、地下水位の低い灰色低地土の水田では、湛水中でも下層土は酸化的であるので、そこで再び酸化物、

水酸化物として沈殿する。鉄よりもマンガンの方が還元されやすく、したがって酸化されにくいので、酸化的下層土ではまず水酸化鉄鉱物が沈殿し、それよりも下層で酸化マンガンが沈殿する。

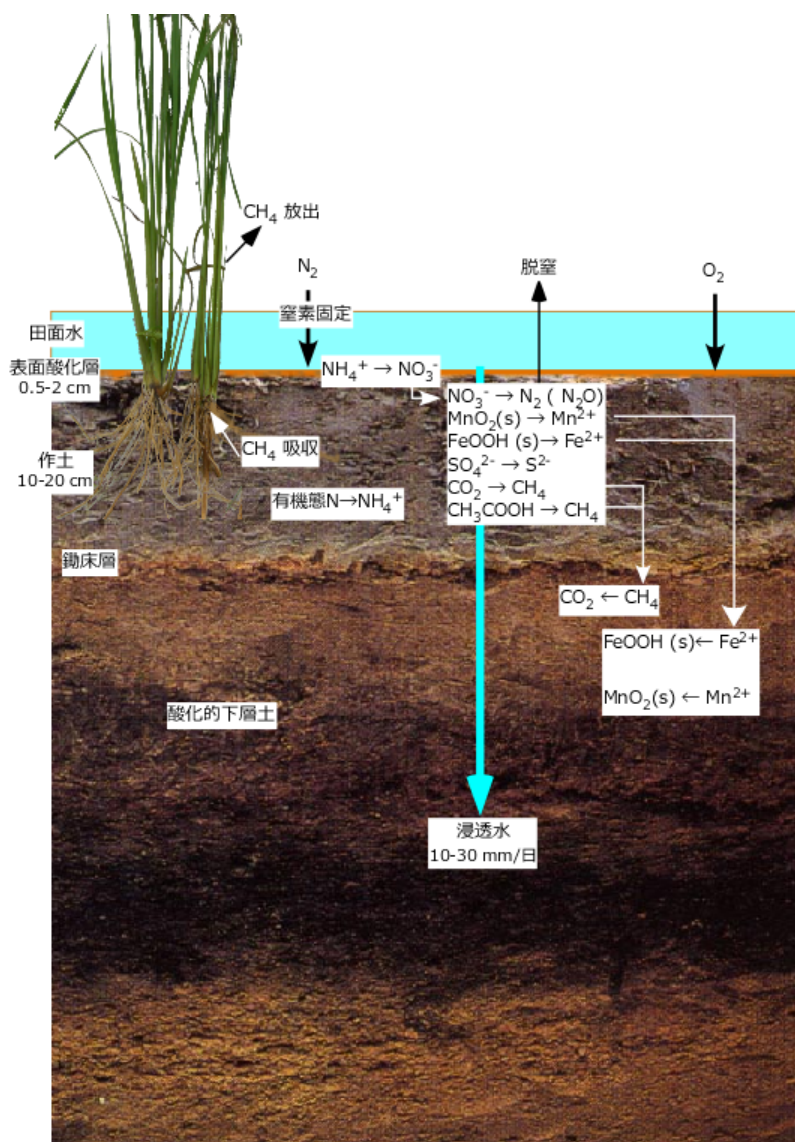


図 14.7 湛水中の水田における物質の動態.

硫酸イオンが消失するような状態まで還元が進行すると、メタン生成菌による二酸化炭素や酢酸の還元とそれに伴うメタンの生成が始まる。メタンの一部はイネの根から吸収され、イネの通気組織を通じて地上部に運ばれ葉面から大気に出ていく。また浸透水とともに下層に運ばれたメタンは、酸化的な下層土で酸化される。

水田の作土中でどのような還元過程が進行しているかは、酸化還元電位を測定することによっておおよそ推定することができる。土の酸化還元電位とは、土の目的部位に挿入した白金電極の起電力を、標準水素電極を基準として表したものである。実際には、標準水素電極は扱いにくいので、田面水に参照電極として塩化銀電極を挿入し、土の目的部位に白金電極を挿入して起電力を測定し、塩化銀電極の起電力を補正して計算により求める。この方法で白金電極を用いて測定した酸化還元電位と、それに対応する特徴的な物質変化を表 14.1 にまとめて示した。

表 14.1 湛水した土における酸化還元電位と対応する物質変化

酸化還元電位 / mV	特徴的な物質変化
+500 ~ +300	分子状酸素の消失
+400 ~ +100	硝酸の消失, 分子状窒素, 一酸化二窒素の生成
+400 ~ -100	二酸化マンガン鉱物の部分的還元溶解, 2 価のマンガンイオンの生成
+200 ~ -200	水酸化鉄鉱物の部分的還元溶解, 2 価の鉄イオンの生成
0 ~ -200	硫酸イオンの還元, 硫化物イオン生成
-200 ~ -300	メタン生成
-200 ~ -400	分子状水素生成

14.3. 水田における主要元素の動態

14.3.1. 窒素の動態

表 14.2 は日本の農業試験研究機関の水田における化学肥料施用量, イネによる元素の吸収量および収穫物中の元素量の平均値を示す。この表に示しているのは化学肥料としての施用量のみであり, この他に堆肥などの有機質資材として施用されることが多い。この事例では窒素は 1 ha あたり 80 kg が施用され, イネには 111 kg が吸収されている。吸収量は施用量を上回っているが, 収穫物として水田外に持ち出されるのは 69 kg であり, 結局施用量が持ち出し量よりも多くなっている。

水田の場合, 施用窒素量よりも吸収量が多いということが起こりうるのには次のような理由が考えられる。

- 1) 化学肥料の他に窒素を含む有機質資材が施用され, その無機化によってアンモニウムイオンや硝酸イオンが供給される。
水田は, 作付中は湛水されていることが多く, 酸素の供給が十分でない。硝酸イオンや水酸化鉄鉱物などを電子受容体とする呼吸はエネルギー効率が相対的に低いため, 有機物の酸化分解速度も遅い。しかも, リグニンを分解する能力のある糸状菌は無酸素条件では活動できない。そのため畑と同量の有機質資材を施用したとしても, 残存する割合が高い。このため, 水田作土には畑と比較すると多量の有機物が集積しており, それが窒素などの給源になりうる。
- 2) 田面水中にはシアノバクテリア (らん藻) のような窒素固定能を持つ生物が生息しており, 生育期間中に, 窒素として 20 kg/ha 程度が固定される。
- 3) 灌漑水から, 生育期間中に窒素として 10 kg/ha 程度の無機態窒素の供給がありうる。

表 14.2 日本の農業試験研究機関の水田における化学肥料施用量，イネによる元素の吸収量および収穫物中の元素量。（尾和，1996）

作物名	収穫量	化学肥料施肥量/ kg ha ⁻¹			吸収量/ kg ha ⁻¹			収穫物中元素量/ kg ha ⁻¹		
		N	P	K	N	P	K	N	P	K
イネ	5960	80	40	72	111	24	130	69	16	22

一般にイネは施肥窒素の利用率が畑作物と比較して高いが、このことにも湛水が関係している。つまり、湛水期間中、作土は無酸素状態またはそれに近い状態にあることが多いので、肥料由来のアンモニウムイオンは亜硝酸化および硝酸化をうけることなく、陽イオンであるアンモニウムイオンの形態に留まる。アンモニウムイオンは層状ケイ酸塩に交換性陽イオンとして保持される割合が高いため、浸透水とともに溶脱しにくい。有機物の無機化で生成したアンモニウムイオンについても同様である。

水田における施肥窒素の利用率は高い。ただし、これは水田系外への流出が少ないという意味であり、ある年に施肥された窒素がその年生育するイネに高効率で吸収されるという意味ではない。窒素の安定同位体 ¹⁵N でラベルした化学肥料を施用して施肥窒素の行方を追跡した試験結果によると、イネが吸収する窒素のうちその年に施用された肥料に由来するものは 30-40% にすぎない。残りは土に蓄積した有機物の分解にもなって放出された窒素である。ただし、施用された窒素は、切り株などの収穫残渣の炭素化合物を基質として増殖する微生物に利用され、菌体として水田中に蓄積されるため、損失は少ないのである。

古くから、水田を耕起して作土を風乾状態にしたのちイネの作付を行うと、収穫量が増加することが知られていた。これは、作土を風乾状態にしたのち湛水すると非常に多量の窒素が無機化されることによるものである。この現象は乾土効果とよばれる。乾土効果は、乾燥というストレスにより水田作土の土壌微生物が死滅し、菌体を構成するたんぱく質などの窒素化合物が分解されることによると考えられている。この現象は、施肥窒素などが菌体に取り込まれて貯留されていることを示すものである。

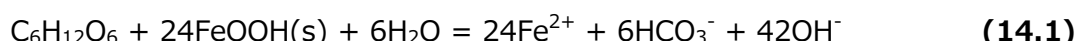
作土の最表層の数 mm～20 mm の表面酸化層における窒素の動態はその下の作土におけるものとは全く異なる。この層は浸透水によって溶存酸素が供給されるため常に酸化状態となっている。もしアンモニウム態の窒素肥料をこの層に散布すると、この層で亜硝酸化および硝酸化をうけて硝酸イオンに転換される。硝酸イオンは土にほとんど吸着されることなく還元的な作土へ移行し、そこで微生物によって電子受容体として利用され、分子状窒素または一酸化二窒素に転換して空気中へ散逸する。この反応は脱窒反応とよばれ、この機構は 1937 年に青峰重範と塩入松三郎によって発見された。この発見に基づき、窒素肥料を表層に散布するのではなく、作土の全層に混入する技術が提案されて普及し、イネによる窒素の利用率は劇的に向上した。

14.3.2. リンの動態

リンは、化学肥料からはリン酸イオン（主として H₂PO₄⁻、HPO₄²⁻）として供給される。有機質資材中の有機リン化合物の無機化によっても同様にリン酸イオンが供給される。リン酸イオン自体は、水田内では酸化還元によって形態が変化することはない。リン酸イオンは酸化鉄鉱物、水酸化鉄鉱物、酸化マンガン鉱物および層状ケイ酸塩鉱物表面のヒドロキシ基を置換して鉱物表面の金属イオン（鉄、アルミニウム、マンガンなど）に直接配位して表面錯体を形成する傾向が高い。このため、水田においてもリンの利用率は高くない（表 14.2）。しかし、作土が還元状態になると、酸化鉄鉱物、水酸化鉄鉱物、酸化マンガン鉱物中の 3 価の鉄イオンや 4 価のマンガンイオンが電子受容体として利用され還元される。このため、これらの鉱物は表面から部分的に溶解する。その結果、表面錯体として吸着され

ていたリン酸イオンが解放されて土壌溶液に溶出してくる。湛水した水田の土壌溶液の分析により、2 価鉄イオン濃度の上昇とリン酸イオン濃度の上昇が並行して起こることが確かめられている。

さらに、湛水下の水田の作土では、たとえば次のような反応によって炭酸水素イオン濃度も上昇する。



この反応は、酸化水酸化鉄鉱物の 3 価鉄イオンを電子受容体としてグルコースが酸化される反応である。湛水条件では発生した二酸化炭素は水に溶解して炭酸水素イオンになる。炭酸水素イオンは、オキソ酸イオンの一種であり、鉱物表面で表面錯体を形成する傾向がある。つまり炭酸水素イオンはリン酸イオンと競合するため、リン酸イオンの一部が脱着する。上の反応では、反応の進行とともに水酸化物イオンも生成するため pH が上昇する。リン酸イオンの表面錯体は pH が高くなるとやや不安定になるので脱着されやすい。このような様々な条件が複合して作用するため、水田における施肥リンの利用率は畑と比較すると高い。

14.3.3. 鉄, マンガン, イオウの動態と秋落ち

鉄, マンガンは、酸化状態の土においてはそれぞれ 3 価鉄および 4 価マンガンの酸化物や酸化水酸化物鉱物として存在している。これらの鉱物の溶解度は極めて低く、土壌溶液中の濃度は低い。しかし水田が湛水され、分子状酸素が消失するとマンガン, 鉄の順に還元され Fe^{2+} , Mn^{2+} として土壌溶液に溶出する。一部は陽イオン交換反応によって層状ケイ酸塩鉱物に保持されるが、一部は浸透水とともに下層へ移動する。一般に水田土壌の下層は、作土層と比較すると酸化的であり、そこで再び酸化物あるいは酸化水酸化物として沈殿する。図 14.8 は茨城県の、褐色低地土上の水田における遊離酸化鉄と酸化マンガンの分布を示す。比較のため、隣接する畑土壌のデータも示している。鉄は作土直下で、マンガンはそれよりもやや下部で再酸化されて沈殿していることがよくわかる。また、隣接する畑土壌と比較すると、作土の鉄, マンガン含量が著しく低下していることがわかる。灰色低地土の場合にも、傾向は弱いものの同じ傾向が認められる (三土, 1976)。

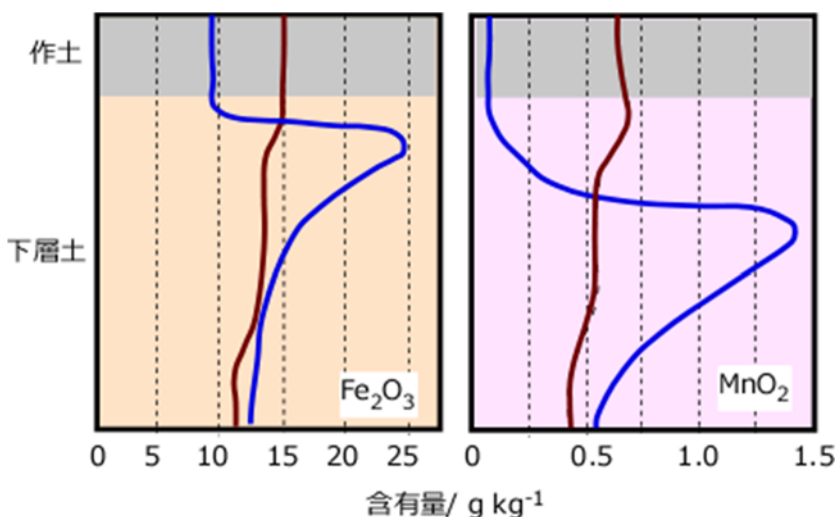


図 14.8 茨城県の褐色低地土上の水田 (青線) と隣接する畑土壌 (茶線) における鉄とマンガンの分布。全鉄および全マンガン含量ではなく、亜二チオン酸ナトリウムによって還元溶出しうる形態のもの。(三土, 1976)

このような傾向は、作土が砂質で透水性の高い土ではさらに強くなる。一般に水田では継続して何百年もイネの栽培がおこなわれるので、次第に作土の鉄およびマンガン含量は低下する。この現象を水田の老朽化といい、老朽化した水田を老朽化水田という。

マンガン、鉄の還元に次ぎ、湛水した水田の作土では硫酸イオンの還元も進行する。硫酸イオンは硫化物イオンに還元されるが、通常の水田では、硫酸イオンが還元されるような環境では作土の土壤溶液中には Fe^{2+} 、 Mn^{2+} が存在するため、直ちに硫化鉄、硫化マンガンとして土壤溶液から除去される。このため、植物に対する毒性の高い硫化水素イオン HS^- や硫化水素 H_2S の濃度がイネの根に害作用を及ぼすほどの濃度になることはない。

しかし極端に老朽化した水田では作土の土壤溶液の Fe^{2+} 、 Mn^{2+} などの濃度が高くない。このような硫酸アンモニウムのような硫酸イオンを含む肥料を多用すると、生成した硫化物が硫化鉄、硫化マンガンとして除去されず、イネの根は硫化水素による障害をうける。1940年代に、砂質の水田で、「秋落ち」とよばれる、生育後期に発生する障害が多発した。生育前期には生育は正常であったにもかかわらず、後期（秋）になると根腐れを発症したのである。この障害の原因が水田の老朽化と、その結果としての硫化水素による障害であることが明らかになった。老朽化水田における秋落ちは、酸化鉄を含む土壤改良資材の施用、酸化鉄鉱物含量の高い土の作土への混入、窒素肥料として硫酸アンモニウムの代わりに尿素など硫酸イオンを含まないものを利用する、などの対策によって回避することができるようになった。

14.3.4. メタンの生成

作土における還元が進行し、酸化還元電位が -200 mV を下回るようになると、酢酸などの有機酸や二酸化炭素が電子受容体として用いられるようになり、メタンが生成される。メタン生成のためのもっとも重要な基質は酢酸であるが、プロピオン酸や、炭素数が $4\sim 10$ の直鎖脂肪酸、安息香酸などの芳香族脂肪酸を基質として利用する細菌も見いだされている（中村・鎌形, 2006）。プロピオン酸、イソ吉草酸のような脂肪酸や安息香酸のような芳香族脂肪酸は還元的な環境での有機物の分解において生成されやすいが、これらは植物に対する生育阻害作用を持つ。水田作土の還元が進行し、メタン生成が行われるようになるということは、生育阻害作用を持つ有機酸濃度を減少させるという点では、好都合な面がある。

一方、メタンは地球温暖化ガスのひとつであり、二酸化炭素と比較すると温暖化に対する効果が 21 倍高い（地球温暖化係数 = 21 ）ので、地球環境保全という観点からは発生は好ましくない。世界の水田からのメタン発生量は、地表全体からのメタン発生量の約 10% を占め、畜産（牛などの反芻動物の胃内でのメタン発酵とゲップによる大気への放出）に次いで発生量が多い。

水田における高品質な米の持続的生産と地球環境保全を両立させるためには、還元的な環境における有機物の分解にともなう有機酸類の集積を回避しながらメタンの生成および大気中への放出を低減するための技術が重要である。そのため、精力的な試験研究が行われており、稲ワラなどの新鮮な有機物をすきこむことを止めてたい肥に代えること、中干期間を延長することなどによりメタン発生を相当抑制することができることが明らかになっている。

14.4. 水田土壌の管理

14.4.1. 水田土壌の改善目標

表 14.3 に水田土壌の改善目標を示す。ここに示したのは福岡県の例であるが、都道府県別の類似データが農林水産省のホームページで公開されている（農林水産省, 2012）。

水田の作土では無機態窒素がアンモニウムイオンとして存在するので、その保持に係る性質として陽イオン交換容量は非常に重要である。また、水田に特徴的な項目として、可給態窒素含量、可給態ケイ酸含量、遊離酸

化鉄含量がある。可給態窒素含量は、土の全窒素含量ではなく、湛水環境においたとき、土に含まれる有機態窒素の分解によって放出される無機態窒素（主として NH_4^+ ）の量である。

可給態ケイ酸もまた、湛水環境で土から溶出するケイ酸である。イネは特に多量のケイ酸をモノケイ酸（ H_4SiO_4 ）として吸収する。ケイ素は必須元素ではないが、吸収されたケイ酸は細胞壁から外に分泌され細胞表面にポリケイ酸として沈着する。このポリケイ酸は茎葉に剛性を与え、風による倒伏軽減、吸汁性の昆虫や糸状菌による病害を軽減する効果がある。

表 14.3 水田土壌の改善目標の例（福岡県）

項目	土の種類					
	非火山灰土			火山灰土		
	粘質	壤質	砂質	黒ボク土	淡色黒ボク土	
pH(H_2O)	6.0-6.5	6.0-6.5	6.0-6.5	6.0-6.5	6.0-6.5	
陽イオン交換容量/ $\text{cmol}_c \text{ kg}^{-1}$	> 15	> 12	> 8	> 15	> 15	
塩基飽和度 /%	Ca	40-60	43-64	51-77	40-60	40-60
	Mg	5-10	5-11	6-13	5-10	5-10
	K	1-2	1-2	1-2	1-2	1-3
Ca/Mg 比	4-12	4-12	4-12	4-12	4-12	
Mg/K 比	2-10	2-10	2-10	2-10	2-10	
可給態リン酸/ mg/ kg	100-500	100-500	100-500	100-500	100-500	
腐植含量/%	> 3	> 3	> 3	-	-	
可給態窒素/ mg/ kg	80-200	80-200	80-200	80-200	80-200	
可給態ケイ酸/ mg/ kg	150-300	150-300	150-300	150-300	150-300	
遊離酸化鉄%	> 1	> 1	> 1	> 1	> 1	
作土の厚さ/ cm	> 15	> 15	> 15	> 15	> 15	
有効根群域の深さ/ cm	> 60	> 60	> 60	> 60	> 60	
現地乾燥密度/ g/cm^{-3}	0.8-1.1	0.8-1.1	0.8-1.1	0.8-1.1	0.8-1.1	
粗孔隙率/ %	> 15	> 15	> 15	> 20	> 20	
有効根群域の 最高緻密度/ mm	< 22	< 22	< 22	< 22	< 22	
有効根群域の 最小透水係数/ cm s^{-1}	> 10^{-5}	> 10^{-5}	> 10^{-5}	> 10^{-5}	> 10^{-5}	
地下水位/ cm	< 60	< 60	< 60	< 60	< 60	

遊離酸化鉄とは、土の全鉄ではなく、亜二チオン酸ナトリウムのような還元剤によって2価鉄に還元されるような鉄の量を Fe_2O_3 という組成で表示したものである。湛水中の作土に2価鉄イオンが存在することは、硫化水素による障害回避のために非常に重要である。

透水係数の改善目標は畑と比較すると1桁低く設定されている。水田は湛水する必要があるのであまり透水係数が高いことは問題であるが、透水性が極端に低いと灌漑水の浸透がなく、結果として溶存酸素の供給速度も低くなり、作土における還元反応が進みすぎる。

14.4.2. 陽イオン交換容量

水田では陽イオン交換反応によるアンモニウムイオンの保持が非常に重要である。肥料として施用されたアンモニウムイオンの大部分はいったん交換性陽イオンとして層状ケイ酸塩鉱物に保持され、徐々に利用される。湛水中に有機物の分解によって生成したアンモニウムイオンについても同様である。

このため、陽イオン交換容量の大小は窒素利用率の高低に直接関係する。図 14.9 は、1950 年代初頭に行われていた米作り日本一コンテストの成績上位水田における、作土の厚さと陽イオン交換容量の関係を示したものである。土の陽イオン交換容量が大きい水田では作土の厚さが薄く、陽イオン交換容量の小さい水田では厚い傾向が明らかである。これらの水田はいずれも、コンテストでの上位入賞水田であり、生産をあげるために様々な工夫が凝らされていたはずである。深耕するには大きなエネルギーと労力を要するにも関わらず、陽イオン交換容量の小さい場合には深耕によって 20 cm 以上の作土厚さが確保されている。この傾向は水田における陽イオン交換容量の重要性を示す証拠となると思われる。

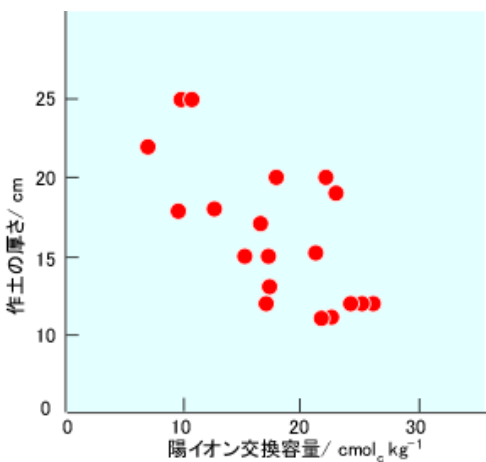


図 14.9 多収穫水田における作土の厚さと土の陽イオン交換容量の関係。(青峰, 1955)

14.4.3. 可給態窒素

栽培期間中の有機物の無機化によって供給される無機態窒素も、イネの栽培にとっては非常に重要である。水田ではイネが密植され、湛水されるため、生育期間中の追肥作業は非常に困難である。しかも、水田表面に散布された化学肥料中の窒素は、それが硝酸態であればそのまま作土内に浸透して脱窒によって失われる。アンモニウム態であれば、表面酸化層で硝酸に転換されたのちに作土に浸透して脱窒によって失われるために利用率が低い。かといって、栽培期間中の作土に混入することは不可能である。また、植付前に基肥（もとごえ）として多量の窒素肥料を与えると、徒長や無効分けつにつながる可能性がある。

このような理由で、イネの栽培においては、生育期間の土の有機物の分解による無機態窒素のゆっくりとした供給は非常に重要である。そのため、水田でも化学肥料と同時に堆肥などの有機質資材が施用され、栽培期間中に分解されうるような有機物を集積させる努力がなされてきた。その結果、適切に管理された水田では、有機物の分解による窒素の供給が多く、無肥料で栽培しても収穫量はあまり低下しないほどである。イネ栽培期間中に有機物の分解によって供給される窒素はしばしば地力窒素とよばれる。図 14.10 に示す試験結果はその一例である。この試験では、窒素、リン、カリウムを標準量与えた試験区を基準として、全く肥料を与えなかった試験区、窒素だけを与えなかった試験区、リンだけを与えなかった試験区およびカリウムだけを与えなかった試験区における相対収穫量を示している。こ

のような試験は三要素試験とよばれる。すべての試験区で、イネの相対収穫量が畑作物であるオオムギの相対収穫量を上回っている。特に無窒素区では大麦の収穫量は完全区の 50%以下に低下するのに対し、イネの場合には 80%以上を確保している。

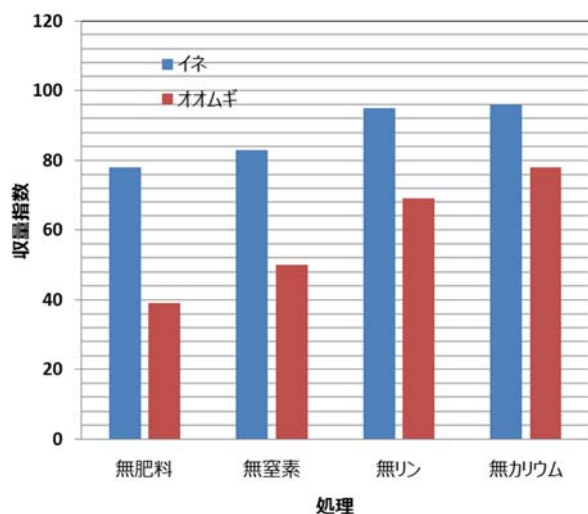


図 14.10 イネと大麦に対する三要素試験結果の平均。調査点数はイネについて 1161~1185 件、オオムギは 822~841 件（久馬ら, 1984 の p. 173 のデータから作図）。

適切に管理された水田では、有機物の分解にともなう無機態窒素の供給量が多いため、施肥設計においてはその供給量を考慮しなければならない。そのために土の試料を密閉容器に入れて湿水して一定温度で培養し、生成した無機態窒素量を測定する、という分析が行われる。この方法によって測定された窒素量を可給態窒素量とよぶ。標準的な分析法では、15 g の土試料をガラス製の培養ビンにいれ、水 20 mL を加えて 30 °C で 4 週間培養したのち、生成したアンモニウムイオンを 10% 塩化カリウム水溶液 250 mL を用いて抽出して測定する。

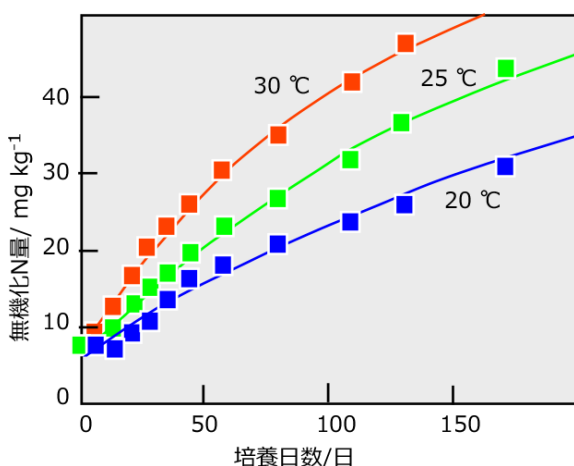


図 14.11 灰色低地土の培養による窒素の無機化。（杉原ら, 1986）

図 14.11 はこのようにして測定された窒素の無機化量と培養時間の関係である。窒素の無機化は微生物の関与する反応であるので、温度に依存し、温度が高くなると無機化速度が大きくなっている。温度が 25 °C の場合、150

日の培養による窒素無機化量は約 40 mg/kg である。土の乾燥密度を 1.0 g/cm³とし、作土の厚さを 15 cm とすると、これは 60 kg/ha の窒素に相当する。

窒素の無機化反応速度は、図 14.11 に示したような事例では、次のような反応速度式で近似することができる

$$N = N_0 [1 - \exp[-kt]] + C \quad (14.2)$$

ここで N は無機化窒素量、 N_0 は無機化可能な有機態窒素量、 k は反応速度定数、 t は培養時間である（杉原ら、1986）。また C は培養開始時にすでに土に存在する無機態窒素量である。反応速度定数は温度の関数であり、次式によって無機化反応の見かけの活性化エネルギーと関係づけることができる。

$$k = A \exp \left[-\frac{E_a}{RT} \right] \quad (14.3)$$

ここで A は定数、 E_a は見かけの活性化エネルギー、 R は気体定数、 T は絶対温度である。土の窒素無機化特性をこのようなやり方で把握しておけば、地温の推移から窒素の無機化量を推定することができる。このような考え方を施肥設計や水田土壌の管理に応用するための研究が行われているが、無機化の速度は常にこのような単純な関数で表現できるとは限らず、またパラメータ推定のための実験にも時間と労力を要することから、標準的な手法として利用されるまでには至っていない。

14.5. 問題

- 1) 冬季に落水していた水田を湛水した後の、作土層における物質変化および土層分化について説明しなさい。
- 2) ある水田で秋落ち現象が発生した。秋落ちとはどのような現象で、どのような機構によって発生するか説明しなさい。また、それに対してどのような対策をとるか具体的に述べなさい。
- 3) 中干期間の延長が水田からのメタン発生抑制に効果があるのは何故か説明しなさい。
- 4) 図 14.10 に示す三要素試験の結果において、水田では無リン区、無カリウム区の相対収量がほとんど低下していない。この理由として考えられることをあげなさい。
- 5) 水田の表層にアンモニア態窒素肥料を施用した場合、水稻による利用効率が著しく低いのは何故か説明しなさい。
- 6) 作土全層にアンモニア態窒素肥料を施用したとき、畑土壌の場合よりも窒素の利用効率が高いのは何故か説明しなさい。
- 7) 夏季に水稻栽培を、冬季にキャベツの栽培をしている地域の地下水の硝酸イオン濃度を調査したところ、水稻栽培を開始して 1 か月後から硝酸イオン濃度が低下し始め、水稻栽培期間にわたって低い濃度に保たれた。しかし、キャベツ栽培を開始して 1 か月後から再度硝酸イオン濃度が上昇した。このような変動の原因を考察しなさい。

14.6. 引用文献

青峰重範 (1955) 多収穫水田の土壌条件. 農業技術 10, 297-301.

Food and Agricultural Organization of the United Nations (2010) FAOSTAT, <http://faostat.fao.org/default.aspx>

- JA 北九 (2011) 平成 23 年 JA 北九稲作ごよみ.
- 久馬ら (1984) 新土壌学, 朝倉書店.
- 三土正則 (1976) 水田土壌. アーバンクボタ 13, 16-19.
- 中村浩平・鎌形洋一 (2006) メタン生成にかかわる共生微生物系の研究と最新動向. J. Environ. Biotech. 5, 81-89.
- 農林水産省 (2012) 都道府県施肥基準等.
http://www.maff.go.jp/j/seisan/kankyo/hozen_type/h_sehi_kizyun/
- 尾和尚人 (1996) 我が国の農作物の養分収支. 環境保全型農業研究連絡会ニュース 33, 428-445.
- 三枝正彦・木村真人(編) (2005) 土壌サイエンス入門, 文英堂.
- 総務省統計研究所 (2011) 日本の統計 2011, 総務省統計局.
- 杉原進・金野隆光・石井和夫 (1986) 土壌中における有機態窒素無機化の反応速度論的解析法. 農環研報 1, 127-166.