

水稻直播栽培における苗立ち安定化に関する研究

原 嘉隆

2016

第1章 緒論	4
第2章 水稻の苗立ちに及ぼす親世代への窒素施肥の影響	12
1. 章緒言	12
2. 試験	12
1) 親世代への窒素施肥履歴が種子の発芽日数に及ぼす影響	12
2) 親世代への窒素施肥履歴と種子の吸水における関係	15
3) 親世代への窒素施肥履歴と種子の出芽や苗立ちまでの所要日数における関係	16
4) 複数品種における親世代への窒素施肥による種子の初期生育促進効果の検証	18
5) 親世代窒素施肥履歴が異なる種子の苗立ち割合	20
3. 章考察	24
1) 親世代への多量窒素施肥による種子の生育促進効果	24
2) 苗立ち割合に対する初期生育速度の影響	26
3) 直播の苗立ち割合を高める方法	27
4. 章摘要	27
第3章 硫酸塩の施用による水稻の苗立ち阻害と種子近傍における硫化物イオンの生成	28
1. 章緒言	28
2. 試験	28
1) 硫酸アンモニウムの添加と土壌のオートクレーブが水稻の苗立ちに及ぼす影響	28
2) 硫酸塩とアンモニウム塩の添加が水稻の苗立ちに及ぼす影響	30
3) 種子と硫酸アンモニウムの添加が土壌の酸化還元電位に及ぼす影響	33
4) 硫酸塩とアンモニウム塩の添加が土壌溶液における元素濃度に及ぼす影響	34
3. 章考察	41
1) 硫酸塩の施用による水稻の苗立ち阻害	41
2) 種子近傍における土壌還元と無機栄養素の濃度	42
3) 種子近傍における硫化物イオン生成の可能性	43
4) 硫化物イオンによる水稻直播の苗立ち阻害	44
4. 章摘要	46

第4章 硫酸塩を施用した土壌におけるモリブデン酸塩の施用による水稻の苗立ち向上	47
1. 章緒言	47
2. 試験	47
1) 土壌へのモリブデン酸塩の添加が水稻の苗立ちに及ぼす影響	47
2) モリブデン塩を添加した土壌における播種深度の影響	51
3) モリブデン酸塩の添加が土壌の酸化還元電位に及ぼす影響	53
4) モリブデン酸塩の添加が土壌溶液のモリブデンと硫黄の濃度に及ぼす影響	54
3. 章考察	56
1) モリブデン酸塩の添加による苗立ちの向上	56
2) モリブデン酸塩の添加における播種深度の影響	58
3) 土壌の還元によって種子が障害を受けるしくみ	58
4. 章摘要	59
第5章 硫酸塩を施用した土壌におけるモリブデン化合物の種子被覆による水稻の苗立ち向上	61
1. 章緒言	61
2. 試験	61
1) 様々なモリブデン化合物を種子に被覆したときの苗立ち向上効果	61
2) 様々な条件においてモリブデン化合物を種子に被覆したときの苗立ち向上効果	63
3) 様々なモリブデン化合物の溶解性と pH	66
3. 章考察	67
1) 微溶性モリブデンの種子被覆による水稻の苗立ちの向上効果	67
2) 水稻直播におけるモリブデン化合物による被覆の有効性	69
4. 章摘要	70
第6章 総合考察	71
第7章 総合摘要	76
謝辞	77
引用文献	78
発表論文	86

第1章 緒論

国内の水稲作は海外に比べて生産費が高く、低コスト化が必要とされている。また、近年は高齢化による担い手の不足が深刻となっている。したがって、水稲栽培をより省力で低コストとすることが求められている。現在、日本における水稲作は、ほとんどが移植栽培で行われている。移植栽培は、苗箱に水稲種子を播種し、その中で育苗して、苗を水田に移植する方法である。この移植栽培の労働時間のうち、育苗と田植えにかかる時間は平均で 1/4 を占めている(農林水産省 2008)。また、栽培規模が大きくなるほど、スケールメリットによって、単位面積当たりの労働時間が短くなるのに対し、移植栽培での育苗にかかる時間はあまり短くならないため、育苗の負担感が高まる傾向にある。一方、苗を作らずに直接、水田に種子を播種する直播栽培は、育苗が不要で、省力的である。このため、直播栽培は、省力化と低コスト化を実現させる技術として期待されてきた(鈴木 2006)。しかも、移植栽培では、田植え作業などの春作業の労働時間の割合が高いため、春の労働量が最も多い。したがって、直播を導入すれば、春の労働量を低減でき、労働量のピークを抑えることができるので、労働力不足への対応や栽培規模の拡大が可能となる。

日本における直播の実施面積は増加傾向にあり、北陸など一部では全水田面積の1割に迫る地域もあるが、全国的には未だ 1%を超える程度である(農林水産省 2010)。これは、直播栽培にはまだ技術的に問題点があることを意味する。直播技術は、大きく分けると、移植栽培と同じように代かきした水田に種子を播種する湛水直播と、耕起した水田で代かきをせずに畑作物と同じように種子を播種する乾田直播に分けられる(丸山 2006, 寺島 2011)。栽培面積でおよそ 2/3 を占める湛水直播では、出芽や苗立ちの不良が起きやすいことが、問題点として挙げられる(山内 1997, 古畑 2009, 吉永 2011)。また、湛水直播では、播種深が浅いため、鳥害を受けやすく(矢治ら 2006)、西南暖地ではスクミリンゴガイの食害を受けやすい(和田 2006)。一方、栽培面積でおよそ 1/3 となる乾田直播では、畑条件に播種するため、出芽や苗立ちは比較的良好であるが、代かきをしていないので水田に水が溜まりにくい(岡武・長野間 2011)。したがって、除草剤や肥料の効きが悪く、特に雑草害を受けやすいことが、問題点として挙げられる(森田 2011)。また、乾田直播は、畑条件に播種するため、土壌が乾いている必要があるが、播種期が梅雨にかかりやすいため、雨によって土壌が濡れ、播種作業ができなくなる場合が生じる。このため、乾田直播は、適用できる水田や天候に制約がある。一方、湛水直播は、代かきによって水漏れを止めることができ、土壌

が濡れた状態で播種するため、水田や天候による制約が生じにくい。このことが乾田直播に比べて、湛水直播の栽培面積が広い理由と考えられる。

湛水直播での問題点である出芽や苗立ちの不良は、水田に張った水のために酸素が土壌中の種子に届きにくく、生育に必要な酸素が不足することが原因と考えられている。そこで、酸素を供給する過酸化カルシウム剤を種子に被覆した播種が普及している。さらに、過酸化カルシウム剤の被覆だけでは効果が不十分な場合があるため(Biswas et al. 2001)、播種後も土壌に酸素を入れるために水田の水を落とす落水出芽法が導入されている(大場 1997, Tsuchiya et al. 2004, 近藤 2006)。これによって、出芽や苗立ちの安定性が向上したが、落水期間が長いと除草効果が低下し、雑草害を受けやすくなる(中山・高林 1988)。この問題に対しては、高精度に圃場の均平を実現するレーザー均平作業機の導入によって迅速に落水できるようになり、細かい水管理が可能になったことや、ヒエなどの防除に効果的な除草剤が開発されたことから、水稻の出芽や苗立ちを促進するために一定期間を落水としても、雑草繁茂を抑制できるようになった(吉永 2011)。しかし、除草を徹底するために、移植に比べて除草剤を多く施用しなければならない場合も多い。したがって、種子被覆資材や除草剤の費用がかかることから、移植栽培と比較したときの生産コストの削減割合は1割程度に過ぎない(農林水産省 2008)。直播栽培では、育苗や田植えの手間はなくなるが、過酸化カルシウム剤の種子被覆や細かい水管理、また追加の除草剤散布の手間が必要である。このように、出芽や苗立ちは比較的安定し、雑草害を回避できるようになったが、そのためには直播特有の資材の費用や手間がかかることから、低コストで省力という直播本来の利点が損なわれている。また、近年は、水田を活用するため、食用だけでなく、豚や鳥や牛の餌とする飼料米、また茎葉を含めた地上部を牛の粗飼料とするホールクロップサイレージ用の水稻の栽培が増えている。これらの飼料用水稻の栽培では、収穫物による収益が少ないことから、食用に比べて費用を下げても省力的に栽培する必要があり、粗放でもより簡易な直播を導入する傾向がある。したがって、今後は、これまでの直播技術をより低コストで省力的に改良していくことが求められている。

近年、種子に鉄粉を被覆して、土壌表面に播種することで苗立ち不良を回避する鉄コーティング直播が開発された(山内 2004, 山内 2006, 山内 2011, 山内 2012)。鉄で被覆することで種子の重量が増し、水に流されにくくなり、酸素不足にならない土壌表面に播種できる。また、鉄の酸化によって強固な被覆層を形成するため、雀害に強い。さらに、播種数日前に被覆しなければならぬ過酸化カルシウム剤被覆とは異なり、鉄の被覆は前もって余裕があるときに実施できるので省力

的である。省力的に安定した苗立ちを確保できることから、鉄コーティング直播が普及しつつある。ただし、被覆後に鉄の酸化に伴って発熱することから、種子が消耗しないように発熱管理に手間がかかるということや、柔らかい土壌に播種した場合、被覆種子が土壌中に埋没して苗立ち不良となるという問題も生じている。また、鉄コーティング直播では、土壌表面に播種することから、コシヒカリのような長秆の品種では倒伏が起きやすく適用が難しいという問題もある。

このように、過酸化カルシウム剤の種子被覆と落水出芽法によって、出芽や苗立ちが安定化したものの、手間やコストがかかることが直播の普及を妨げており、一方、鉄コーティング直播では土壌表面に播種することで出芽や苗立ちの改善をはかったが、土壌表面に播種することによる倒伏の不安や種子が土壌に埋まったときの苗立ち不良の問題が残っている。したがって、直播の普及を進める観点から、さらに低コストで省力的な方法によって土壌中に播種された種子の出芽と苗立ちを安定化させることが求められている。具体的には、費用と手間がかかる過酸化カルシウム剤の種子被覆を省略もしくは簡易化しても、水稻の出芽や苗立ちを確保する技術を開発することが考えられる。そこで、過酸化カルシウム剤を被覆しない種子の苗立ちが不安定となる要因を明らかにすれば、その要因を回避することで、低コストで省力的な直播技術の開発につながることを期待される。

一方、これまで、水稻直播の苗立ちの安定化に関する研究は数多く行われており、その中で様々な要因の影響と、それを踏まえて適する条件や技術の提示がなされている。したがって、まずは、低コストで省力的という観点でこれらの技術を組み合わせることによって、水稻の出芽や苗立ちの安定化を図ることができると考えられる。そこで、以下に、関係する報告とともに、直播の出芽や苗立ちに影響を与える要因と、出芽や苗立ちの安定化に向けた技術をとりまとめた。

水稻はもともと無酸素条件で生育する能力を持っている(Yamauchi et al. 1993)。しかし、何も被覆していない水稻種子を土壌中に播種したとき、土壌中は酸素が少ない条件であるため、土壌中で種子が生育を継続するには限界があり、土壌からの出芽が遅いと生育が停止して枯死する。古畑ら(2006)は、同一品種内で、施肥や水管理などを変えて土中播種した結果から、出芽が速いほど最終的な生存割合が高いことを報告している。土壌中から速く抜け出して出芽すれば、酸素を利用できるので、生育を継続できる。このため、出芽を速めることは苗立ちの安定化につながる。出芽を速めるには、まず、浅く播種することが効果的である。一般的には深さ1 cmほどに播種することが好ましいとされる。これより浅すぎると、種子が露出して流されたり、苗が浮力で浮き上がり、根が土壌中に十分に入らず、土壌への定着が不良となる。そのようになると、成熟期における倒伏が

起こりやすくなる。また、播種する深さが浅いと、雀などに食べられるといった鳥害も生じやすくなる。一方、深く播種すると、出芽にかかる日数が長く、出芽が遅れて苗立ちが不良になりやすい。このため、1 cm ほどの深さに均一に播種することが望ましい。均一の深さに播種するには、レーザー均平作業機によって、水田を均平にしておくことが効果的である。また、代かきした直後の柔らかい土壌に、加速度を付けて種子を打ち込む打ち込み式代かき同時土中点播は、浅く均一に播種できる方法として優れている(吉永 2002)。また、播種後の落水管理は、通気性を向上させるため、出芽後の生育を促進する(古畑ら 2005a, 古畑ら 2005c, 古畑ら 2005d)。土壌の代かきを入念に行うと、落水時の通気性が低下し、生育促進効果が損なわれるため、苗立ちを向上させるためには、代かきを軽く実施した方が良い(古畑ら 2005b, 古畑ら 2005c, 古畑 2007)。

種子の特性としても、初期の生育が速いことは苗立ちの向上につながる(Seshu et al. 1988)。種子の初期生育を速める方法として、種子の比重選や播種前の催芽は、基本技術として行われてきた。比重選は、塩化ナトリウムや硫酸アンモニウムなどを溶かして、1.13 程度に比重を高めた溶液に種子を投入し、浮かんだ軽い種子を取り除いて、沈んだ重い種子のみを得る方法である。重い種子は軽い種子よりも初期の生育が速いとされ(上山 1975, Seshu et al. 1988)、生育が速い種子のみを選抜して播種することを目的としている。岡部ら(2004)は、直播における苗立ちは、より大粒の種子が優れていたことを報告している。しかし、栃本ら(1996)は、ジャポニカ品種の場合、種子の比重が 1.06 以上であれば直播の初期生育に差異がみられなかったことを報告している。また、催芽は、種子を水に浸けて予め発芽させておくことによって、播種から出芽までの時間を短縮する方法である。過酸化カルシウム剤を種子に被覆した後でも、種子を加温することによって、出芽までの日数が短くなる(吉永 2002)。このように、播種後の生育を速めることで、出芽が速まり、苗立ちの向上に寄与すると考えられる。これらは、播種前の処理によって初期生育を速める方法であるが、種子自体の生育能力を高めることも検討されてきた。品種間においても苗立ちの能力が異なり、初期生育が早い品種の方が遅い品種よりも苗立ちが良く(Yamauchi and Biswas 1997, Ogiwara and Terashima 2001, 古畑ら 2007a)、土中播種での苗立ちが優れる品種の選抜が行われている(Yamauchi et al. 2000, 太田 2003, 太田 2006)。品種間で種子の生育に違いが生じる要因について、秋田ら(1998)は、品種間における胚重と出芽速度には相関がみられず、胚重以外が出芽速度を支配している可能性を述べている。古畑ら(2007b)は、種子の糖含量が多い品種では、鞘葉の伸長が優れ、苗立ち割合も良い傾向が得られたことを報告している。

種子の初期生育を速める方法の一つとして、初期生育が速い種子を生産することが考えられる。三枝ら(1999)は、育苗が1週間程度の乳苗では、茎葉や根に含まれる窒素のほとんどが由来であることを示している。施肥によって作物の生育は促進されるが、種子の段階ではまだ養分の吸収能力が低いため、種子に保持されている養分が主に利用されると考えられる。これまで、窒素施肥量が多い植物から得られた種子の生育が速いことが、これまでに幾つかの作物で報告されている(Fox and Albrecht 1957, Schweizer and Ries 1969, Lowe and Ries 1973, Metivier and Dale 1977, Rahman and Goodman 1983, Lieffering et al. 1996)。これは、親世代への施肥によって、種子に養分が富化されることが原因と考えられる。したがって、水稻においても、親世代に窒素を多く施用して得られた種子は生育が速く、その結果として出芽や苗立ちが優れる可能性が考えられる。

苗立ちを向上する手段として、種子の環境要因を改善することも重要な手段となる。土壤が湛水されると、水によって酸素の供給速度が低下し、土壤中の微生物の活動によって、酸素が消費され、酸素不足となる。このため、播種後、水田の水を捨てて土壤に酸素を供給する落水出芽法は、水稻の出芽と苗立ちを促進する(大場 1997, Tsuchiya et al. 2004, 近藤 2006)。また、先に述べた過酸化カルシウム剤による種子被覆は、種子近傍に酸素を供給することで、水稻の出芽と苗立ちを促進する。このように、種子の出芽や苗立ちでは、まず酸素不足が生育抑制要因となっている。

また、土壤の酸化還元電位が高く保たれば、苗立ち割合も高く保たれることが報告されている(狩野ら 1985)。萩原(1993)は直播において苗立ちが悪くなる理由は、酸素不足だけでなく、むしろ土壤が還元されることに起因していることを示した。彼は、出芽や苗立ちの阻害要因を解明するため、土壤還元に着目した。土壤に稲わらを添加すると土壤が還元し、苗立ちを悪化させた(萩原ら 1986)。土壤に酸化還元指示薬であるメチレンブルーを添加し、種子近傍土壤の酸化還元状態の変化を観察した結果、胚の近傍から還元が進み、還元域は種子近傍に拡大した(萩原ら 1987, 萩原ら 1990)。そして、土壤を滅菌すると種子近傍でも土壤の還元がみられないことや、苗立ちも良好であったことから、土壤還元が苗立ちを不安定にしている要因と考えた。また、酸素を発生させる過酸化カルシウムだけではなく、酸素を発生させず土壤を酸化的に保つ効果しかない硝酸カリウムを種子に被覆した場合においても出芽や苗立ちの促進効果がみられたことから、土壤還元が出芽や苗立ちを阻害していると考えられた(Hagiwara and Imura 1991)。土壤還元が出芽や苗立ちを阻害する理由として、土壤還元によって二価鉄(高井 1961c, 但野 1976, Sasahara and Ikarashi 1989)や有機酸(高井 1961d, 田中・小野 2000)および硫化物(川口 1944)などの有害

物質の生成することが挙げられる。水稻の養分吸収において、有機酸や硫化物に比べて二価鉄の害が大きいという結果が報告されている(山口ら 1957)。Hagiwara and Imura(1993)は、これらの二価鉄や有機酸および硫化物が苗立ちに及ぼす影響を調べたところ、二価鉄の害が大きいという結果を報告している。二価鉄の生成はそのほとんどが微生物作用に起因している(加村・高井 1960)。一方、新発田・田中(2001)は、溶液中において、二価鉄イオンや酢酸イオンは発芽に影響を与えなかったが、硫化物イオンによって発芽が遅くなり、苗立ち割合との関係があったことを報告している。このように、土壌還元によって水稻種子の出芽や苗立ちが不安定となる要因はいくつか挙げられているものの、まだ明確になっていない。

かつて、水はけの悪い湿田で「秋落ち」と呼ばれる水稻の根腐れの症状が問題となり、先人によって調べられた結果、硫化物イオンの生成が原因であることが分かっている(岡島・高城 1959, 古坂 1968)。硫化物イオンは、土壌中の鉄によって不溶化され、無毒化される。そこで、水田では「秋落ち」を回避するため、含鉄資材の施用が奨励されてきた。しかし、有機物が多い水田では鉄を施用しても障害が起きる場合があり、これは有機物が多いと、鉄が存在していても有機物と結合状態にあるため、硫化物イオンは硫化鉄となりにくく、水稻に被害を与えると考えられる(佐藤・山根 1959)。また、土壌に硫安を添加することによって発芽やその後の生育が抑制されることが報告されている(川口 1944)。これは硫酸イオンから生成した硫化物イオンによって起きることが推察されている(大杉・川口 1938)。したがって、水稻における直播栽培でも、硫化物イオンが苗立ちを抑制しているのではないかと指摘されていた(赤松 1969)。しかし、硫化物イオンの生成は、土壌が著しく還元されたときのみ生成するとされており、還元が起きやすい風乾土を還元が起きやすい30℃のような高温で湛水しても2~3週間の培養が必要である(大杉・川口 1938, 川口・山本 1942, 川口 1944, 佐藤・山根 1959)。一方、風乾土ではなく、湿潤土を湛水で培養した場合は、30℃でさえ硫化物イオンの発生は確認できなかった(川口・山本 1942, 佐藤・山根 1959)。風乾土と違って、湿潤土は易分解性の有機物が消費されており、土壌の還元が進みにくいことが理由と考えられる(佐藤・山根 1959)。また、25℃で調べた結果では、風乾土を用いても硫化物の発生はみられなかった(大杉・川口 1938)。したがって、実際の直播水田で硫化物イオンが生成しているかということ、また生成しているとしても硫化物イオンが苗立ちを抑制するかということはよく分かっていなかった。実際、硫化物イオンが直播水稻の苗立ちを阻害するということは一般的に認知されておらず、直播を行う水田であっても硫酸アンモニウムなどの硫酸塩を施用されることはあった。

水田で窒素肥料として用いられるアンモニウム塩は、土壤中に播種された水稻種子の苗立ちを阻害する(Hara and Toriyama 1998b, 菅野ら 1999)。Yamamoto et al. (2004)は、寒冷地において何も被覆しない種子を用い、アンモニウム塩の肥料の苗立ち抑制効果を比較した結果、硫酸アンモニウムが最も苗立ちを阻害することを報告している。しかし、彼女らは、硫酸アンモニウムの施用に伴う苗立ちの悪化において、硫化物イオンの生成が関与している可能性を言及していない。一方、平野・佐藤(1981)は、pH を変えて硫酸塩と塩酸塩を石英砂に加え、水稻種子を播種すると、15, 25°Cにおいて、塩酸塩に比べて硫酸塩の方が苗立ち割合を低下させることを報告しており、硫酸イオン自体が苗立ちを阻害する可能性が示されている。このことは、土壤がしっかり乾かず、涼しい春の気象条件において、湛水したすぐ後の水田に種子が播種されるような現実的な状況でも、硫酸イオンが十分に存在するならば、直播の苗立ちを低下させる可能性を示唆する。しかし、硫酸イオンが苗立ちを阻害する理由が、硫酸イオンから硫化物イオンが生成されるからなのかは明らかになっていない。したがって、直播をおこなう冷涼な条件で硫化物イオンが生成するのか、また生成するならば、種子の苗立ちを抑制しているのかを明らかにすることが必要である。

湛水した土壤で硫化物イオンが生成しているかを調べることは難しい。なぜなら、二価鉄イオンの共存下で、硫化物イオンは簡単に難溶性の硫化鉄に変化するからである(熊田 1949, 古坂 1968, Ponnampereuma 1972)。しかし、硫化物イオンが生成する条件であるかは、酸化還元電位を計測して判断できる。硫化物イオンは酸化還元電位が、 $-0.2 \sim -0.05$ V に下がったときに生成するとされる(高井 1961a, 高井 1961b, 佐藤・山根 1976, Patrick and Jugujinda 1992, Marschner 1995)。萩原ら(1987)は、酸化還元指示薬を用いて、種子近傍の酸化還元電位が、種子が無い土壤の酸化還元電位よりも低かったことを示している。また、風乾履歴がある土壤を用いて 28°Cで計測した結果、種子近傍の酸化還元電位が -0.05 Vであったことを報告している。しかし、この程度の酸化還元電位では、硫化物イオンが生成しているかについて、明確に判断することが難しい。直播の条件において硫化物イオンが生成しているかを判断するには、乾燥履歴が無い土壤を用いて、より低温条件で、種子近傍において、詳しく調査する必要がある。直播において硫化物イオンが苗立ちを阻害していることが明らかとなれば、硫化物イオンを除くことで苗立ちを安定化できる可能性がある。すなわち、過酸化カルシウム剤を使わない方法を提案できる可能性があると考えられた。

以上を踏まえ、本論文は、水稻の直播栽培の普及を図ることを目的とし、直播栽培の普及面積の3分の2を占める湛水直播栽培のうち、特に耐倒伏性に優れた土中直播栽培において重要となる

苗立ちを安定化させるために、次の2点を検討した。1点目は、苗立ちの能力が優れる種子を利用することを目的とし、施肥条件を変えて水稻を栽培し、収穫した種子の生育や苗立ちを調べた。その結果、親世代に多量の窒素を施肥して収穫した種子は窒素含量が高く、窒素含量が高い種子は生育が速く、苗立ちも良いことを明らかにした(第2章)。2点目は、種子の苗立ちを抑制する要因を回避することを目的とし、硫化物イオンがその要因となっている可能性を調べた。その結果、硫化物イオンの基となる硫酸イオンの添加によって苗立ちが抑制されることを確認するとともに、土壤の酸化還元電位や土壤溶液の硫黄濃度などから、硫酸イオンから硫化物イオンが生成し、直播栽培における苗立ちを阻害している可能性を示した(第3章)。また、硫化物イオンの生成が水稻の苗立ちを阻害していることを明らかにするため、硫酸塩添加時における苗立ち不良が、硫化物イオンの生成抑制剤であるモリブデン酸塩を用いて改善されることを示すとともに、播種深度が深くなるとその改善効果が低下することや、モリブデン酸塩の添加は土壤の酸化還元電位に影響を与えず、種子近傍の硫化物イオンの生成を抑制することによって、苗立ちの阻害を改善していることを確認した(第4章)。さらに、実際の湛水土中直播栽培において、モリブデン酸塩を用いて硫化物イオンの生成を抑制することを目的とし、種子にモリブデン化合物を被覆して、硫酸塩添加時における苗立ち不良を改善する方法を検討した。その結果、微溶性のモリブデン化合物を種子に被覆することによって、苗立ち不良を改善することを明らかにした(第5章)。本論文では、日本土壤肥料学会英文誌(Hara and Toriyama 1998a, b)および日本作物学会英文誌(Hara 2013a, b, c)に発表した論文を元にとりまとめた。

第2章 水稻の苗立ちに及ぼす親世代への窒素施肥の影響

1. 章緒言

土中に播種された種子は酸素が少ない環境で生育しなければならない。土壌表面に芽を出せば、酸素が少ない環境から抜け出て、酸素を利用できるようになる。このため、種子の初期の生育が速ければ、速く酸素を利用できるようになり、速く枯死しにくい生育段階に達することができると考えられる。このため、種子の初期生育を速めることによって、苗立ちを向上できると予想される。これまで、窒素施肥量が多い植物から得られた種子の生育が速いことが、幾つかの作物で報告されている。しかし、水稻においても、窒素施肥量が多い親世代の作物から得られた種子の生育が速いのか、また湛水直播における苗立ちに及ぼす影響については明らかとなっていない。

そこで、本章では、湛水直播栽培において重要となる種子の苗立ちと、その苗立ちに関係が深い種子の初期生育に対して、親世代の窒素施肥履歴が及ぼす影響を解析した。

本章は、Hara and Toriyama (1998a, 1998b) を基に、加筆して取りまとめた。

2. 試験

1) 親世代への窒素施肥履歴が種子の発芽日数に及ぼす影響

親世代の水稻の窒素施肥方法を変えることで、得られる種子の生育に違いが見られるかを調べるため、窒素施肥量と栽植密度を変えて水稻を栽培し、得られた種子を水に浸けて発芽するまでの日数を生育の速さの指標として、それらの関係を調べた。

(1) 方法

1996年に、3水準の栽植密度(11, 22, 44 株 m^{-2} : それぞれ疎植区: L, 標準区: M, 密植区: Hと表記)と4水準の窒素施肥量(0, 5, 10, 20 $g\ m^{-2}$: それぞれ0, 5, 10, 20と表記)が異なる12区(例えば、H20は44 株 m^{-2} の密植区、窒素施肥量が20 $g\ m^{-2}$ の区を示す)において、水稻品種「どんとこい」を栽培した(原・鳥山 1997)。窒素肥料は被覆尿素(LP30とLPSS100を等量混合)を用いた。各区から種子を収穫した。以後、各区から収穫した種子は「種子区」と呼び、親世代の区名で表記した。種子は、風乾後、比重1.13で塩水選して、以下の調査に用いた。一部の種子を、70°Cで10日間乾燥し、各種子区について10反復で種子10粒の乾燥重を計量した。これらの試料をケルダール分解し、その分解液の窒素濃度を比色(TRAACS800, BRAN+LUEBBE株式会社)によ

って定量し、種子の窒素含量を求めた。また、各種子区において、種子 5 g を 20°C の水に浸漬し（深さは約 1 cm）、8 時間間隔で発芽した種子数を数え、その経時的なデータを Richards 関数に当てはめて (Hara 1999)、発芽に要した日数の中央値を算出し、発芽日数とした。

(2) 結果

親世代への窒素施肥量が多いほど、種子の窒素含量が増加する傾向があった (図 2-1)。また、密植 (H) に比べて疎植 (L) で窒素含有量がわずかに高くなる傾向があった。発芽割合に相当する生存割合はいずれの種子区でもほぼ 100% であった。発芽日数は、種子の窒素含量が多いと短くなる傾向があった。このため、発芽日数と種子の窒素含量には密接な負の相関関係 ($r = -0.88$) があった (図 2-1)。一方、窒素含量が多い種子区 (H20, M20, L20, M10) において種子の乾物重が小さかったため、発芽日数と種子の乾物重との相関は低かった ($r = -0.21$ 、図 2-2)。

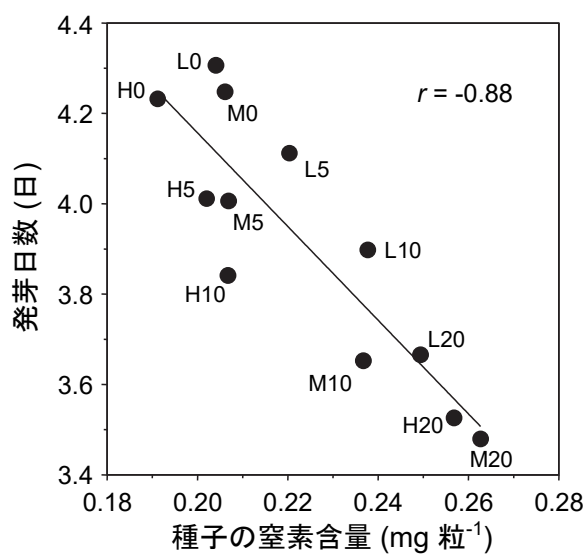


図2-1. 種子の窒素含量と発芽日数の関係

各種子区は、栽植密度(H: 44, M: 22, L: 11 株 m⁻²)と窒素施肥量(20, 10, 5, 0 g m⁻²)が異なる区から収穫された。

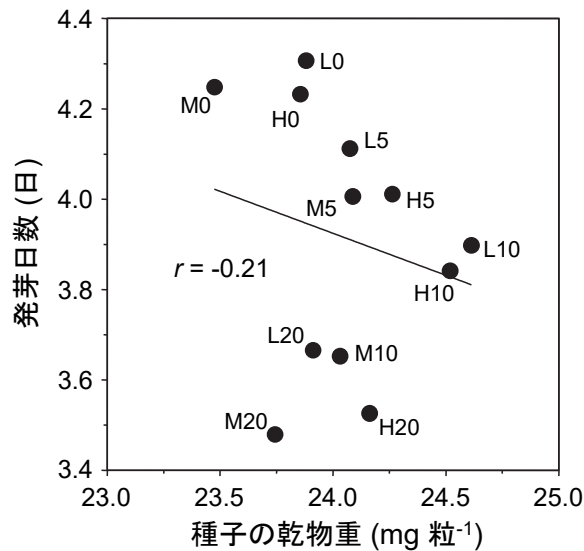


図2-2. 種子の乾物重と発芽日数の関係

各種子区は、栽植密度(H: 44, M: 22, L: 11 株 m⁻²)と窒素施肥量(20, 10, 5, 0 g m⁻²)が異なる区から収穫された。

(3) 考察

いずれの種子区においても発芽割合が高かったことは、発芽割合が親世代における窒素施肥や栽植密度には影響されなかったことを示唆する。次に、親世代への窒素施肥量が多い場合、種子の生育が速いことが示された。親世代への窒素施肥量が増加するほど、種子の窒素含量も高まる傾向があったので、種子の生育速度は種子の窒素含量と相関が得られた。

これまで、乾物重が大きい種子は生育が速いことが報告されている(上山 1975, Seshu et al. 1988)。本試験でも、窒素施肥量が 10 g m⁻² 以下ではこの傾向が確認された。しかし、窒素施肥量が 20 g m⁻² と極端に多い場合、窒素施肥量が 10 g m⁻² の場合に比べて、乾物重は小さいにもかかわらず、生育は速かったので、乾物重よりも窒素含量の影響が大きいと考えられた。

ただし、発芽日数と種子の窒素含量の散布図において、密植区と疎植区から得られた種子区の間には有意差(危険率 1.2%)が得られたことから、種子の窒素含量だけで発芽日数の変動を説明できないことが示唆された。栽植密度による違いは窒素の吸収様式の違いに相当する。すなわち、疎植区の場合、株間が広く、周辺土壌からより遅くまで窒素を吸収できるため、生育後期の親世代の窒素含有率が相対的に高くなると推測される。実際、疎植区(L)から収穫した種子の窒素含量は標準(M)や密植区(H)よりも高い傾向があった(図 2-1)。それにも拘わらず、疎植区(L)から収穫した種

子の発芽は標準(M)や密植区(H)よりも遅い傾向があった。このことから、疎植区(L)から収穫した種子には初期生育に利用されない窒素画分が多いと推測され、より効率よく種子の初期生育を速めるには、栽植密度を標準や密植区とするか、窒素を早めに供給すべきであると推測された。

2) 親世代への窒素施肥履歴と種子の吸水における関係

親世代への窒素施肥量が異なり、発芽日数も異なる種子区間において、発芽に至る過程における吸水の速さの違いを調べた。

(1) 方法

親世代の窒素施肥量別に栽植密度が異なる種子を混ぜて、新たに2種子区(L20, M20, H20より20N, L0, M0, H0より0N)を調整し、比重1.06で塩水選した。この2種子区の20Nと0Nの窒素含量は、それぞれ0.26, 0.20 mg 粒⁻¹であった。各種子区の種子を10gずつ20°Cで0~6日と日数を変えて浸種した。これらは紙タオルで拭いて1時間室内に置いた後に計量し、湿潤重とした。さらに、70°Cで10日間乾燥した後に計量し、乾燥重とした。湿潤重と乾燥重の差を吸水量とした。この結果から、各種子区について、浸種日数毎の含水比(吸水量/乾物重)を求めた。なお、各種子区の発芽日数を上記と同様に求めた。

(2) 結果

20Nの含水比の上昇は0Nよりも速く、特に浸種後1日目までに生じた差が大きかった(図2-3)。発芽日数の度数分布を、水分吸収曲線に重ねたところ、発芽日数の最も多い日数における水分含有率は、両種子区とも乾物重当たり約0.3 g g⁻¹で一致した。

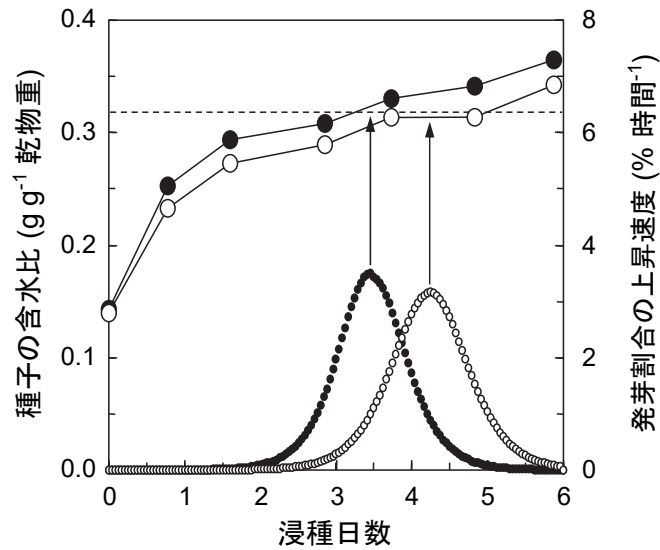


図2-3. 浸種時における種子の含水比と発芽割合の上昇速度
 種子の含水比を折れ線で示した。発芽割合の上昇速度は下部に示した。矢印は最も多くの発芽が起きる時点における含水比を示す。各種子区は窒素施肥量(黒丸: 20 g m⁻², 白丸: 0 g m⁻²)が異なる区から収穫された。

(3) 考察

親世代に多量の窒素を施用して得られた種子区は発芽が速く、水分吸収も速かった。発芽における水分含有率は、高橋(1962)によって報告されている値とも一致し、親世代への窒素施肥量に拘わらず同程度であった。このことから、親世代に多量の窒素を施用して得られた種子区は水分吸収が速いために、発芽が速くなっている可能性が考えられた。親世代への窒素施肥量が異なる種子間の生育日数差は第1日目に急速に拡大したことから、特に吸水に関係する器官において親世代への窒素施肥の影響が表れたと考えられた。

3) 親世代への窒素施肥履歴と種子の出芽や苗立ちまでの所要日数における関係

親世代への窒素施肥が異なる種子を、湛水土壤中に播種し、出芽や、その後の生育段階に至るまでの日数に違いが見られるか調べた。

(1) 方法

風乾した水田土壌(細粒質斑鉄型グライ低地土・強粘質)に塩化アンモニウム溶液を混ぜ、よく攪拌した。土壌表面水のアンモニウム態窒素濃度は 9.7 mg L⁻¹であった。土壌をプラスチック容器(34 × 17の区画に区切られ、各区画の大きさは、17 mm × 17 mm × 高さ 24.5 mm)に詰めて、

一晚静置した。上記の2種子区(20N, 0N)における浸種日数が20°Cで1~6日と異なる計12組について、各組119個の種子をピンセットで土壌表面下1cmに播種した。播種後に土壌表面をなでて、播種時にできた穴を塞いだ。育苗箱は、照明(25 kLx 12時間 / 暗黒 12時間)および空調(20°C)を制御した部屋に設置した恒温水槽(20°C)に沈めた。この後、出芽または苗立ちした幼苗数を毎日数えた。なお、出芽は土壌表面から幼芽が出たときとし、苗立ちは第4葉が抽出したときとした。上記と同様に、その経時的なデータをRichards関数に当てはめて(Hara 1999)、出芽または苗立ちに要した日数(浸種日数を含む)の中央値を算出し、出芽日数と苗立ち日数とした。

(2)結果

出芽割合はいずれの条件でもほぼ100%、苗立ち割合は94%以上となり、生存割合は十分高かった。生育にかかった日数は、出芽と苗立ちのいずれにおいても、20Nが0Nよりも短く、出芽日数で平均1.4日、苗立ち日数で平均2.6日の差となった(図2-4)。浸種日数が短いほど出芽や苗立ちが遅くなったが、浸種日数を含めると所要日数はほぼ同程度となった。ただし、20Nと0Nの差は浸種日数が長いほど小さくなる傾向があり、浸種日数が最も長い場合(6日)の生育日数の差は、発芽日数の差よりも小さくなった。

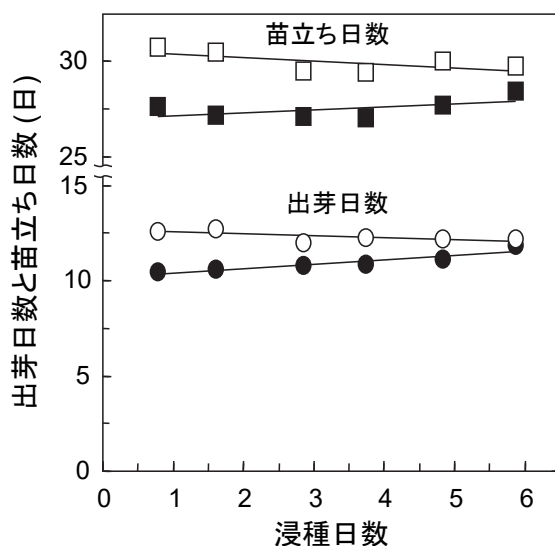


図2-4. 浸種日数が出芽や苗立ち日数に及ぼす影響
各種子区は窒素施肥量(黒丸: 20 g m⁻², 白丸: 0 g m⁻²)が異なる区から収穫された。

(3) 考察

出芽や苗立ちの所要日数の中央値は、浸種日数に拘わらず、親世代に窒素施肥した種子区で短くなった。この種子区間の差は、平均で、発芽日数(0.7 日) < 出芽日数(1.4 日) < 苗立ち日数(2.6 日)となり、生育段階が進むと拡大する傾向がみられたことから、発芽だけでなく出芽や苗立ちの段階においても、親世代への窒素施肥による生育促進効果があると考えられた。

一般に、水稻は浸種して催芽した種子を播種する。種子区間の差は浸種日数が短いほど大きくなる傾向がみられた(図 2-4)。土壌中は酸素が少なく種子の生育が水中よりも遅れる(高橋 1962)ため、浸種日数が短い場合、生育日数の差が拡大すると考えられる。逆に、浸種日数が延長しすぎると、生育が速い種子の幼芽が伸長し、遅い種子に比べて播種時に傷つきやすくなるため、両者の生育日数の差が縮小すると考えられる。例えば、機械播きでは種子の損傷を避けるために浸種日数を短くするべきと考えられるが、このように浸種日数が短い場合、親世代への窒素施肥による生育促進効果は重要となると考えられた。

4) 複数品種における親世代への窒素施肥による種子の初期生育促進効果の検証

様々な品種においても、親世代への窒素施肥による種子の生育促進効果がみられるかを調べるために、水稻 11 品種を用いて、窒素施肥量を変えて、種子を収穫し、発芽や出芽またはその後の生育段階に至るまでの日数に違いが見られるかを調べた。

(1) 方法

1997 年に窒素施肥量(0, 15g m⁻²)を変えて、外国品種を含む 11 品種の水稻を栽培し、種子を採取した(それぞれ-N, +N と表記)。得られた各品種の各種子区について、上記と同様に、乾物重と窒素含量と発芽日数を調べた。さらに、このうち 5 品種について、出芽日数と、その後の生育段階として第 3 または第 4 葉抽出までの日数を調べた。播種の深さは 2cm で、温度は 18°C とした。

(2) 結果

全品種で種子の窒素含量は+N が-N よりも高かった(図 2-5)。乾物重は-N と+N に大きな差がなかった。発芽割合は 94%以上であった。発芽日数は、11 品種中、日本稲 6 品種(コシヒカリ、キヌヒカリ、どんとこい、きらら 397、味こだま)で、+N が-N に比べて平均 0.42 日短かった(図 2-6)。外国稲のうち、蜜陽 23 を除いた 5 品種では、+N の発芽日数が-N よりも短い傾向はみられなかった。

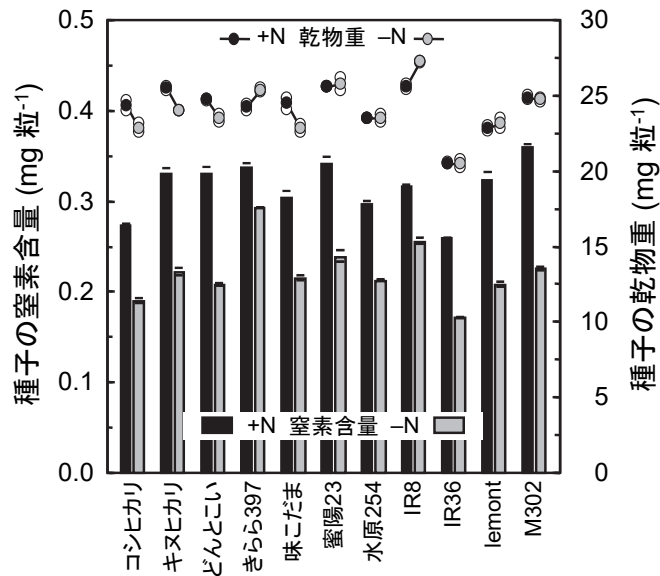


図2-5. 親植物への窒素施肥量が異なる種子の窒素含量と乾物重
親植物への窒素施肥量は0(-N), 15(+N) g m⁻²である。範囲は標準誤差を示す。

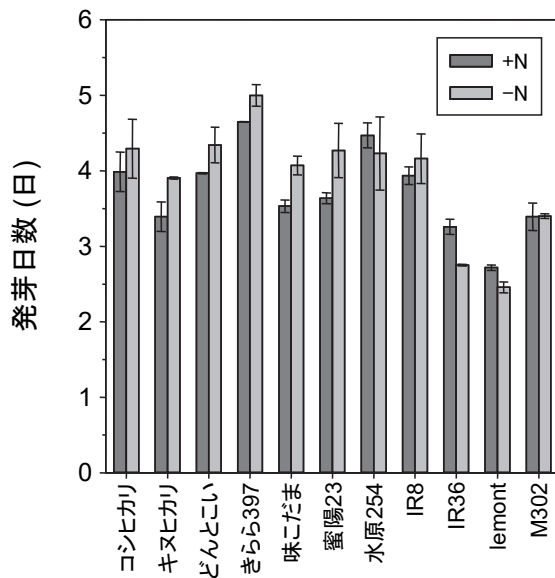


図2-6. 親植物への窒素施肥量が異なる種子の発芽日数
親植物への窒素施肥量は0(-N), 15(+N) g m⁻²である。範囲は標準誤差を示す。

親世代への窒素施肥による種子の初期生育促進効果が観察された日本稲 5 品種について、土中播種における生育を調べた結果、生存割合(最終的に第4葉を抽出した個体の割合から求めた)はいずれの品種でも 80%以上で、親世代への窒素施肥による差はなかった。しかし、出芽・第3葉抽出・第4葉抽出までの日数は、いずれの品種でも+N が-N より短くなった(図 2-7)。この差の平

均は、出芽で 1.9 日、第 3 葉抽出で 2.2 日、第 4 葉抽出で 6.8 日と、生育が進むほど拡大した。

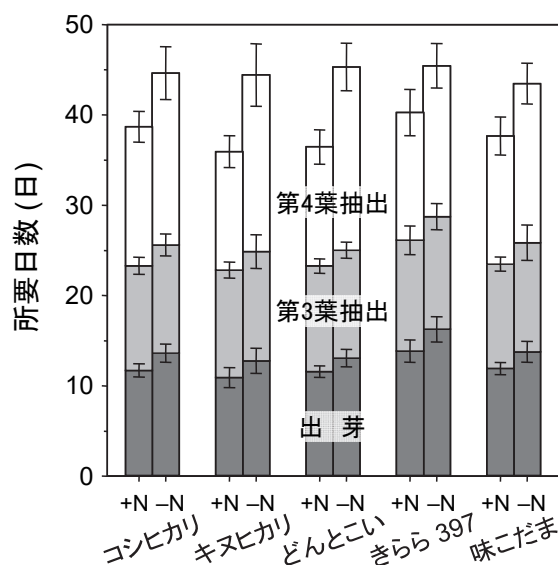


図2-7. 親植物への窒素施肥量が異なる種子の出芽とその後の生育
親植物への窒素施肥量は0(-N), 15(+N) g m⁻²である。所要日数は浸種後から出芽・第3葉抽出・第4葉抽出までの値である。中央値を棒グラフで、四分位偏差を範囲で示した。

(3) 考察

主に日本稲品種において、親世代への窒素施肥がある種子区では、初期生育日数の中央値が短くなり、その差は生育段階が進むと拡大した。このことは、少なくとも日本稲品種において、親世代への窒素施肥による種子の初期生育促進効果が得られることを示している。ただし、外国稲品種ではこのような傾向が得られなかった。この理由は分からなかった。

5) 親世代窒素施肥履歴が異なる種子の苗立ち割合

親世代への窒素施肥量を多くした種子の生育は速いことが分かったが、土壤に播種したときの苗立ち割合にも差がみられるかを調べるため、親世代への窒素施肥量が異なる種子を、土壤条件を変えて、土壤中に播種し、苗立ち割合に差異が得られるかを調べた。

(1) 方法

試験 1 で用いた栽植密度と窒素施肥量 (0, 5, 10, 20 g m⁻²) が異なる 12 種子区のうち、栽植密度を 2 水準 (11 (L), 44 (H) 株 m⁻²) に限定した 8 種子区を以下の試験に用いた。

水田圃場 (細粒質斑鉄型グライ低地土・強粘質) から供試土壤を入水前に採取し、一度風乾した

後に、同じ重量の水と塩化アンモニウムを加えてよく代かきし、溶液のアンモニウム態窒素濃度が 0.6, 2.5, 8.3 mg L⁻¹である 3 種類の土壌を調整した。これは、アンモニウム塩を添加することで苗立ち割合が低下しやすい条件を作ることを意図している (Hara and Toriyama 1988b)。これらは、それぞれ低 N 土、中 N 土、高 N 土と表記した。また、同じ圃場において施肥と代かきの後の土壌を採取し、これを未風乾土と表記した。この土壌溶液のアンモニウム態窒素濃度は 2.2 mg L⁻¹であった。

それぞれの土壌を試験 4 で用いたプラスチック容器に詰め、一晚静置した。約 4 日間浸種し、種子区あたり 119 粒をピンセットで播種した。播種位置を土壌表面とした表土播種の場合と、土中 1 cm とした土中播種の場合を設けた。さらに、2 日長く水に浸して幼芽を 10~15 mm に伸ばした種子を低 N 土に土中播種した区を別に設けた。これらの育苗箱は屋外に設置したプールに静置し、水深を 3~5cm に調整した (1997/5/20)。播種 1 カ月後 (1997/6/24) に苗立ち割合を調べた。期間中、水温を経時的に計測した。栽培期間の日平均温度は 17~28℃であり、平均は約 23℃であった。

(2) 結果

風乾して調整した土壌に土中播種した場合、土壌溶液のアンモニウム態窒素濃度が高いと苗立ち割合が低下する傾向がみられた (図 2-8)。未風乾土に土中播種した場合の苗立ち割合は風乾履歴土の場合よりも低くなった。このため、土中播種の場合、未風乾土 (平均 17%) < 高 N 土 (平均 26%) < 中 N 土 (平均 42%) < 低 N 土 (平均 69%) の順で苗立ち割合が低かった。一方、表土播種の苗立ち割合はいずれも 70% を越えて、土壌条件によってあまり影響されなかった。伸長種子を土中播種した場合の苗立ち割合は、表土播種と同程度に高くなった (平均 85%)。

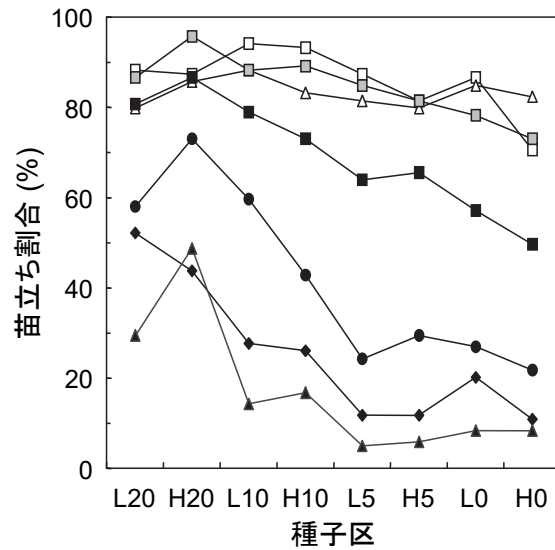


図2-8. 播種条件が異なる場合の各種子区の苗立ち割合

各種子区は、栽植密度(H: 44, L: 11 株 m⁻²)と窒素施肥量(20, 10, 5, 0 g m⁻²)が異なる区から収穫された。折れ線は、未風乾土(三角)または風乾履歴土(低N土: 四角、中N土: 丸、高N土: 菱形)において、表土播種(白抜記号)または土中播種(黒塗記号)した場合の苗立ち割合を示す。灰色記号は伸長種子を土中播種した場合を示す。

土中播種の場合、種子区によって苗立ち割合に大きな変異がみられ、親世代への窒素施肥量が少ない種子区において苗立ち割合が低い傾向がみられた。特に、全体的に苗立ち割合が低かった未風乾土や高 N 土に土中播種した場合、親世代への窒素施肥量が多い種子区(L20, H20, L10, H10)では苗立ち割合がそれほど低くなかったが、少ない種子区(L5, H5, L0, H0)は苗立ち割合が低かった。一方、伸長種子を播種した場合や表土播種の場合、苗立ち割合はあまり低下せず、親世代への窒素施肥との関係ははっきり現れなかった。

そこで、変異が大きかった土中播種(伸長種子の場合を除く)の各条件の苗立ち割合について、全種子区の平均からの変異を各種子区について求めて従属変数とし、種子の窒素含量を説明変数としたときの決定係数(r^2)は 0.73 となった(図 2-9)。このとき、L5 と H10 において窒素含量と平均苗立ち割合の明らかな逆転関係が得られた。一方、発芽日数を説明変数とするとそのような逆転関係も解消されて、決定係数(r^2)は 0.77 とより高くなった(図 2-10)。

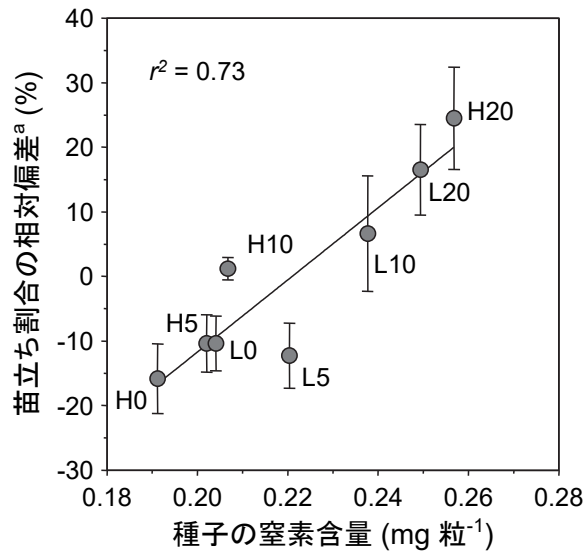


図2-9. 種子の窒素含量と苗立ち割合の関係

a: 各条件において全種子区の平均苗立ち割合からの各種子区の偏差を求め、各土中播種条件(伸長種子を除く)において各種子区毎のこの偏差の平均と標準偏差を求めた。

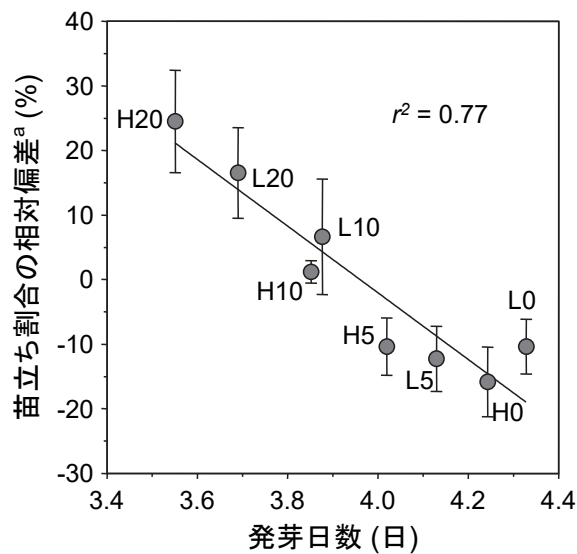


図2-10. 発芽日数と苗立ち割合の関係

a: 各条件において全種子区の平均苗立ち割合からの各種子区の偏差を求め、各土中播種条件(伸長種子を除く)において各種子区毎のこの偏差の平均と標準偏差を求めた。

(3) 考察

表土播種の場合、土壌溶液のアンモニウム態窒素濃度が高くても苗立ち割合は低下しなかった。

表土播種の場合、種子は酸素が十分多い環境に存在するため、アンモニウム態窒素濃度の上昇によって種子の生育が遅れても不利とならず、苗立ち割合が低下しなかったばかりか、アンモニウム態窒素が養分として利用されて、逆に生育が促進されたと推察された。また、伸長種子を土中播種した場合も苗立ち割合が顕著に低下しなかったことは、播種時にすでに芽が伸長していたために出芽が速く、苗立ちが低下しにくかったと推測された。この結果は、芽が伸びた種子を播種すれば出芽や苗立ちが向上することを示唆する。しかし、実際の直播では、機械で播種するため、芽が伸びた種子を用いると、芽が損傷し、逆に苗立ちが低下する恐れが考えられる。

土中播種の場合、土壌溶液のアンモニウム態窒素濃度が高いと苗立ちが低下しやすいことが示され、その中でも親世代への窒素施肥量が多い種子区の苗立ち割合の低下は小さかった(図 2-8)。このことから、親世代への窒素施肥量が多い種子区は少ない種子区に比べて生育が速いので(図 2-4, 2-7)、苗立ち割合が低下しやすい条件でもその低下が緩和されたと推測された。したがって、窒素を多量施肥した親世代から得られた生育が速い種子を播種すれば、苗立ち割合が低下しやすい環境でも苗立ちの低下が抑制される可能性が示唆された。

3. 章考察

1) 親世代への多量窒素施肥による種子の生育促進効果

窒素施肥量が多い親世代から得られた種子区は、発芽が速いだけでなく、出芽や苗立ちまでの日数も短かった(図 2-4, 2-7)。この種子区間の差は、生育段階が進むにしたがって拡大する傾向がみられたことから、発芽だけでなく出芽や苗立ちの段階においても、親世代への窒素施肥履歴による生育促進効果があると考えられた。

親世代への窒素の多量施肥が種子の初期生育に及ぼす影響については、これまで、コムギ・オオムギ・ライムギ・エンバクのような畑作物において、親世代へ窒素施肥すると種子の窒素含量が増加し、種子の初期生育が促進されることが報告されている(Fox and Albrecht 1957, Schweizer and Ries 1969, Lowe and Ries 1973, Metivier and Dale 1977, Rahman and Goodman 1983, Lieffering et al. 1996)。しかし、親世代への窒素施肥の増加が逆に種子の初期生育を抑制させたという報告(Austin 1972)や影響が見られなかったという報告(Seshu et al. 1988)もある。コムギで試験をした Fox and Albrecht (1957)は、種子数が定まった後で多量の窒素を適切に施肥すれば、種子の窒素量が高まり、生育が速い種子を生産できたことを報告している。このことから、親世代へ

の窒素施肥が種子の生育抑制を招いた理由として、施肥水準がそれほど高くなかったか、窒素の追肥が早すぎたために、親世代が繁茂したにも拘わらず、それ以降の窒素が不足して種子に十分な窒素が分配されなかったことが推測された。このような問題は、過去の速効性窒素の基肥に頼った栽培で起こりやすかったと推測される。他にも、窒素施肥が生育抑制を招く要因として、天候が悪い場合や過剰な窒素追肥によって登熟が遅れることが推測された。それ故、親世代への窒素施肥は、種子の初期生育に対して良い影響と悪い影響を与える可能性がある。本試験では、生育途中にも窒素を供給できる肥効調節型肥料を用いるとともに、耐倒伏性が高い品種「どんとこい」を用い、さらに登熟期における天候も良かったので、多量の窒素施肥でも親世代は倒伏せず、受光体勢も良好で、種子の初期生育に良い影響を与えたと推測された。

オオムギでも報告されているように(Lieffering et al. 1996)、親世代に多量の窒素を施肥した種子区では吸水が速く、親世代に窒素を施肥しなかった種子区との発芽日数の差は、浸種後1日目大きく拡大した(図 2-3)。このため、親世代への窒素施肥が種子の初期生育を速める効果は、胚の極早い段階で動き出す組織に起因すると推測された。発芽までには胚乳はほとんど分解されない(星川 1975)、発芽が速くなったことに対して胚乳の影響は小さく、胚に原因があることが考えられる。しかし、親世代への窒素施肥の効果は、胚乳が消費される時期である幼植物においても観察され、生育段階が進むに従って拡大した(図 2-4, 2-7)ことから、親世代への窒素施肥は胚だけでなく胚乳にも影響を与えて、種子の生育を促進すると考えられた。

Lowe and Ries (1973)はコムギの幼植物の生育が胚よりも胚乳のタンパク質含量に影響を受けることを報告している。胚乳は分解が遅いが、総量として胚より多くのタンパク質が存在するため、幼植物の生育には胚乳の寄与が大きいと考えられる。本試験でも、親世代への窒素施肥によって、胚乳の窒素含量を反映すると考えられる種子の窒素含量が高まり、初期生育の速さとの関係が得られた。このように、親世代への窒素施肥は種子の窒素栄養を改善すると考えられる。

オオムギで試験をした Metivier and Dale (1977)は、種子から幼植物へ窒素が移行する時期は炭水化物が移行する時期に比べて早く、種子の窒素含量の増加は窒素よりも炭水化物の移行を速めることを報告している。この知見は幼植物における窒素濃度の上昇が炭水化物の移行を促進することを示唆する。窒素は作物の代謝に重要なタンパク質の材料となるため、種子の窒素含量が多いと、幼植物に多く窒素が供給されるので、幼植物の生育が速まると推測された。

本試験においても、窒素含量が高い種子は生育が速く(図 2-4, 2-7)、苗立ち割合が高かった

(図 2-9)。したがって、窒素含量が高い種子では、胚乳に蓄えられる窒素が多いために、幼植物に窒素が多く供給され、種子の生育が促進されたと考えられた。

ただし、本試験では、種子の窒素含量が同程度でも、密植区(H)の方が疎植区(L)よりも発芽が速い傾向が得られた(図 2-1)。このことは、初期の生育速度は単純に種子の窒素含量に依存していないことを示唆し、親世代への窒素施肥と種子の初期生育の関係を詳細に検討する必要があることを示している。おそらく、種子の生育初期には胚乳の分解がまだ十分ではないことから、胚に含まれる窒素量が重要であると考えられる。Okano and Kono(1993)は、種子への窒素転流を調べた結果、胚乳に比べて胚への窒素転流の時期が早いことを報告している。胚よりも胚乳の大きさが圧倒的に大きいため、種子の窒素含量は胚乳に含まれる窒素含量を反映すると考えられる。このため、種子の窒素含量が同じでも、胚に含まれる窒素含量が多ければ、発芽などの初期の生育が速いことが推察される。密植区(H)の親植物は根域が狭く、窒素の吸収が早い時期に偏っている。このように窒素吸収が早いことから、胚への窒素転流が多くなるため、種子の窒素含量が同じでも、その分だけ胚乳の窒素含量が多い他の種子区と比較して、発芽が速くなったと考えられた。

なお、星川(1975)は 3.2 葉期までに胚乳の 92%が消費されたことを報告しており、それ以降は胚乳の寄与が無くなるため、親世代への窒素施肥の効果は消えていくと考えられた。

2) 苗立ち割合に対する初期生育速度の影響

親世代への窒素施肥量が多いと、種子の発芽が速く、その後の生育も速い傾向があった。親世代への窒素施肥量が多く、発芽後の種子の生育が速い場合に比べて、親世代への窒素施肥量が少なく、生育が遅い場合は、土中播種した場合の苗立ち割合が低下する傾向がみられた。しかし、表土播種した場合は、このような傾向はみられなかった。

これらの傾向は、次のように説明されると推測された。土中播種の場合、種子は酸素を十分利用できないと推測される。この条件でも速く土壌表面上に出芽できれば、酸素を十分に利用できるため生育を続けられるが、出芽までに時間がかかると酸素が不足してより生育が遅く、様々な障害を受けて枯死しやすいので、親世代への窒素施肥量が少ないと、種子の初期生育が遅くなり、苗立ちが悪くなると推測された。一方、表土播種では、種子が土壌表面上にあり、酸素を十分に利用できるため、種子の生育が遅くても苗立ちが悪くならないと考えられる。

このことから、土中播種における苗立ち割合を向上させるには、土中にある種子が速やかに土壌

表面に出芽できるような状況を構築することが重要と考えられた。

3) 直播の苗立ち割合を高める方法

本試験の結果から、土中播種を行う場合、親世代に多量の窒素を施肥して得られる初期生育が速い種子を播種することにより、安定した苗立ち割合が得られにくい条件下においても、相対的に高い苗立ち割合が得られると期待された。

初期生育が速く苗立ちが安定した種子を得るためには、現時点では、親世代が倒伏しない程度に多量の窒素を施肥することぐらいしかわかっていない。親世代への窒素施肥によって種子の初期生育が速まる機作も不明である。このため、今後、初期生育が速く苗立ちが安定した種子を得るための親世代への適切な窒素施肥法について、より詳しく検討すべきと考えられた。

これらのより詳細な検討のためには、環境条件や種子の違いによる苗立ちの善し悪しを比較するための指標が必要である。苗立ち割合の場合、種子区間の差が土中播種で大きかったのに対し表土播種で小さかったように、条件が厳しすぎたり優しすぎたりすると、差が得られないため、苗立ちの善し悪しを比較する指標として使いにくい。一方、初期生育の速さであれば、条件に依存することなく変異が得られると推測されるので、使いやすいと推測される。出芽または苗立ちまでの日数は安定して変異が得られたことから、このような指標として適すると判断された(Hara 1999)。

4. 章摘要

水稻直播の苗成ちは種子の初期生育の影響を受けやすいので、種子の窒素栄養に関係が深い親世代の窒素施肥履歴が異なる場合について、得られた種子の初期生育の速さを調べ、苗成ち割合との関係を調べた。親世代への窒素施肥量が多いと、吸水や発芽やその後の生育が速くなる傾向が得られた。また、土中に播種すると、親世代への窒素施肥量が少ない種子に比べて、親世代への窒素施肥量が多い種子の苗成ちが良い傾向があった。親世代への窒素施肥量が多くなると、種子の窒素含量が多くなり、発芽や初期生育にかかる日数や苗成ち割合と種子の窒素含量とは高い相関がみられた。以上から、親世代への十分な窒素施肥は、種子の窒素含量を増加させ、種子の初期生育を促進し、苗成ちを向上させることが示唆された。したがって、水稻に窒素を倒伏しない程度に十分に施用し、窒素含量が高い種子を生産することが、水稻の直播における苗成ちを向上させる1つの方法となると考えられた。

第3章 硫酸塩の施用による水稻の苗立ち阻害と種子近傍における硫化物イオンの生成

1. 章緒言

風乾させた土壌を湛水し、30℃を超える高温にしたとき、土壌が著しく還元して硫化物イオンが生成し(大杉・川口 1938)、水稻の初期生育を阻害することが報告されている(川口 1944)。しかし、水稻の直播は、土壌が乾燥しにくい条件や、冷涼な条件など、土壌が還元しにくい条件で行われる場合が多く、実際の直播の条件で硫化物イオンが生成するか、また生成したとしても水稻の初期生育が阻害されるかは明らかとなっていない。したがって、水稻直播の苗立ちにおける硫化物イオンの影響を明らかにすることが必要である。しかし、硫化物イオンは酸素がない還元条件でのみ生成し、反応性が高いため、その生成を直接的に把握することが困難である。

そこで、本章では、水稻の直播として現実的な条件、すなわち、土壌が乾かない湿った条件、かつ冷涼な条件で、還元されると硫化物イオンになる硫酸塩を添加し、水稻の苗立ちが阻害されるかについて調べた。また、硫化物イオンが生成するかを判断するために、種子近傍土壌において酸化還元程度や土壌溶液の成分などを調べた。

本章は、Hara(2013a)を基に、加筆して取りまとめた。

2. 試験

1) 硫酸アンモニウムの添加と土壌のオートクレーブが水稻の苗立ちに及ぼす影響

土壌に添加する硫酸アンモニウムの量を変えて、土壌中に水稻種子を播種し、出芽や苗立ちまでの生存割合を調べた。合わせて、土壌をオートクレーブした場合も調べた。

(1) 方法

福岡県筑後市の水田(細粒質普通灰色低地土、軽埴土)から作土を採取し、風乾しない湿潤のまま10 mmの篩でふるった湿潤土を用いた。直径8 cmのポットに乾土換算で120 gの湿潤土を詰めた。また、半分のポットには、121℃で1 hのオートクレーブした土壌を詰めた。各ポットに、0.0～7.1 mmol kg⁻¹乾土に相当する硫酸アンモニウムと、1 mmol kg⁻¹乾土に相当する塩化アンモニウムを蒸留水に溶かして湿潤土に加え、水分の重量が乾土に換算した土壌の重量の1.5倍となるように水分量を調整した。塩酸カリウムは土壌溶液のイオン強度の影響を軽減するために加えた。湿潤土と溶液の混合物を1時間振盪したのち、冷蔵庫で2日静置すると、土壌の層と上澄みに分離

し、土壌の層の深さはおよそ 40 mm、上澄みの厚さは 15 mm 程度となった。上澄み液を一部採取し、比色法 (Bran+Luebbe QuAAtro) によってアンモニウム態窒素の濃度を、また、硫黄の濃度を ICP-AES 法 (Varian Vista AX) によって分析した。

1 つのポットに 9 粒のわずかに発芽させた水稻種子 (品種:ヒノヒカリ) を土壌 15 mm の深さでピンセットを用いて播種した。土壌は柔らかいので、播種した際の穴は自然に埋まった。ポットは、20°C 恒温で、12 時間隔で蛍光灯が点滅するグローブチャンバに入れた。ポットの位置の光量は $0.1 \text{ mmol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ であった。ポットには蒸留水を時々添加し、水位を 15 mm に維持した。土壌から芽が現れた時点を出芽とし、第 3 葉が現れた時点を目立ちとして、播種後 28 日目に目立ちと目立ちした個体の割合を調べた。1 条件に 6 つのポットを使用した。これらとは別に、オートクレーブしていない湿潤土を詰めて同様に溶液を添加した後、さらに 1 g kg^{-1} 乾土のメチレンブルーを加えて振盪したポットをいくつか設け、種子近傍の酸化還元電位の傾向を把握するために、透明なポットの側面に接して種子を播種した。酸素が存在する空気中で青色のメチレンブルーは、酸化還元電位がおおよそ 0.05 V 以下になると無色になる (萩原ら 1987)。

(2) 結果

$0.0 \sim 7.1 \text{ mmol kg}^{-1}$ の硫酸アンモニウムを添加したとき、上澄み液におけるアンモニウム態窒素の濃度は $0.0 \sim 1.7 \text{ mM}$ 、硫黄の濃度は $0.4 \sim 4.0 \text{ mM}$ となり、いずれも硫酸アンモニウムの添加量に応じて直線的に高くなった。

添加した硫酸アンモニウム量やオートクレーブの有無に関係なく、播種後およそ 1 週間で目立ちした。播種後 28 日目に目立ち割合は、オートクレーブをしない土壌を用いた場合 70~85%、オートクレーブをした土壌を用いた場合 91~98% であった (図 3-1)。このように、硫酸アンモニウムの量は、目立ちにはほとんど影響しなかった。一方、目立ち割合は、オートクレーブをしない土壌を用いた場合 0~69%、オートクレーブをした土壌を用いた場合 74~89% であった。オートクレーブをしない土壌を用いた場合、播種から約 2 週で鞘葉が枯死し始め、目立ち割合は、硫酸アンモニウムの添加量が増加するほど低下し、 1.4 mmol kg^{-1} のとき 22%、 3.6 mmol kg^{-1} のとき 0% となった。しかし、オートクレーブをした土壌を用いた場合、目立ち割合は、硫酸アンモニウムの添加量が多くても低下しなかった。

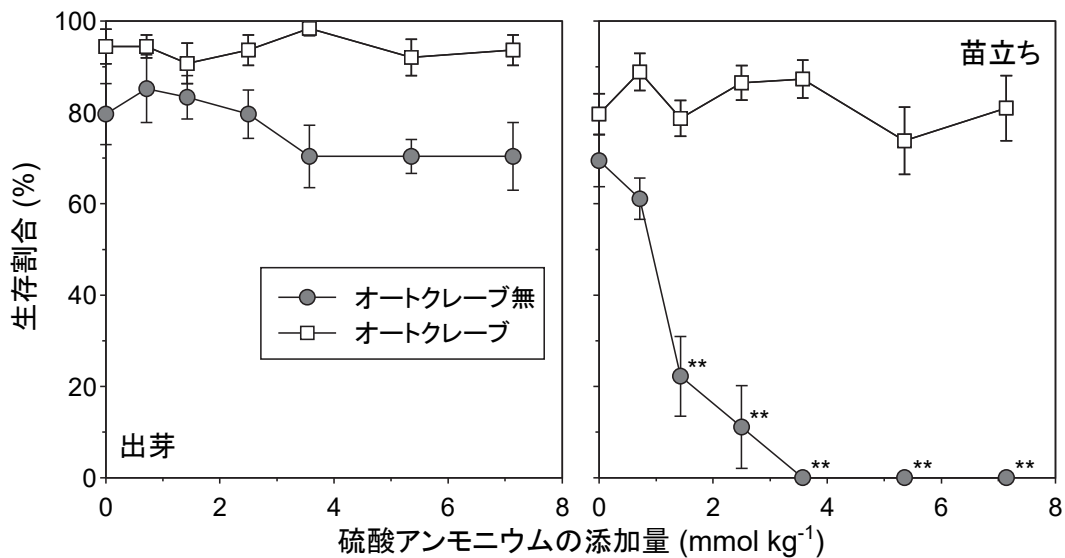


図3-1. 水稻の出芽と苗立ちの割合における硫酸アンモニウムとオートクレーブの影響

硫酸アンモニウムの添加量とオートクレーブ処理の有無が異なる土壤に種子を播種した。これらはグロースチャンバに入れて、20°Cで28日間、加温した。範囲は標準誤差を示す(6反復)。**, *は、硫酸アンモニウムを添加しない条件と比較して、危険率1, 5%で有意差があることを示す(Dunnettの多重比較法)。

オートクレーブをしない土壤を用いた場合、播種後3日程度で、種子近傍における土壤に混和したメチレンブルーの青色が退色し、播種後5日程度で、種子近傍に黒い輪が現れた。この輪は、硫酸アンモニウムの量が多いほど濃く、少ないほど薄かった。

(3) 考察

土壤をオートクレーブしなかった場合、出芽割合は、硫酸アンモニウムの添加によって低下しなかったが、苗立ち割合は低下した。また、土壤をオートクレーブした場合、出芽でも苗立ちでも、硫酸アンモニウムによる生存割合の低下はみられなかった。このことから、微生物と硫酸アンモニウムが合わさることによって、苗立ちが阻害されると考えられた。このことは、硫酸イオンが硫酸還元菌によって硫化物イオンに変化し、苗立ちを阻害したと考えることができる。また、種子の近傍に生じた黒い輪は、硫化物イオンが二価鉄イオンと結合した硫化鉄(熊田 1949, 赤松 1969, Ponnampereuma 1972, 木村ら 1984, 萩原ら 1987, 若尾 1987)と考えられた。

2) 硫酸塩とアンモニウム塩の添加が水稻の苗立ちに及ぼす影響

硫酸アンモニウムの添加が苗立ちを阻害することを踏まえ、構成する硫酸イオンとアンモニウムイ

オンのどちらの影響であるかを調べるため、硫酸アンモニウムの代わりに、硫酸カリウムと塩化アンモニウムを添加した場合の苗立ちへの影響を調べた。

(1) 方法

試験 1 と同様に、乾土で 100 g 相当の湿潤土をポットに詰めた。塩化アンモニウム、硫酸アンモニウム、または硫酸カリウムを、量を変えてポットに加えた。これらは、アンモニウムイオンや硫酸イオンの量で同じになるように、塩化アンモニウムの量は $0\sim 4\text{ mmol kg}^{-1}$ 、硫酸アンモニウムと硫酸カリウムの量は $0\sim 2\text{ mmol kg}^{-1}$ とした。試験 1 と同様に、 1 mmol kg^{-1} に相当する塩化カリウムを加え、水分の重量が乾土に換算した土壌の重量の 1.5 倍となるように調整し、播種のための土壌を準備した。

試験 1 と同様に、1 つのポットに 8 粒の発芽させた水稻種子 (品種:ヒノヒカリ) を土壌中に 15 mm の深さに播種した。ポットは、試験 1 と同じ光条件で、 20°C または 30°C に静置した。播種後 21 日目 (30°C) または 28 日目 (20°C) に、出芽と苗立ちした個体の割合を調べた。1 条件に 6 つのポットを使用した。

(2) 結果

アンモニウム塩も硫酸塩も添加しない場合、苗立ち割合は 20°C で 79%、 30°C で 67% と高かった (図 3-2)。塩化アンモニウムを添加した場合、苗立ち割合は 20°C で 73%、 30°C で 56% とやや低下した。硫酸アンモニウムを添加した場合の苗立ち割合は、 20°C で、 0.5 mmol kg^{-1} の添加で 47%、 1 mmol kg^{-1} の添加で 4% と著しく低くなった。 30°C では、 1 mmol kg^{-1} の添加で 33%、 2 mmol kg^{-1} の添加で 6% と低くなった。それ故、硫酸アンモニウムは、 20°C でも 30°C でも苗立ち阻害効果が強かった。硫酸カリウム 2 mmol kg^{-1} を添加すると、 20°C で 56%、 30°C で 39% まで著しく低下した。苗立ちに対する硫酸カリウムの阻害効果は、硫酸アンモニウムよりもやや弱いと考えられた。

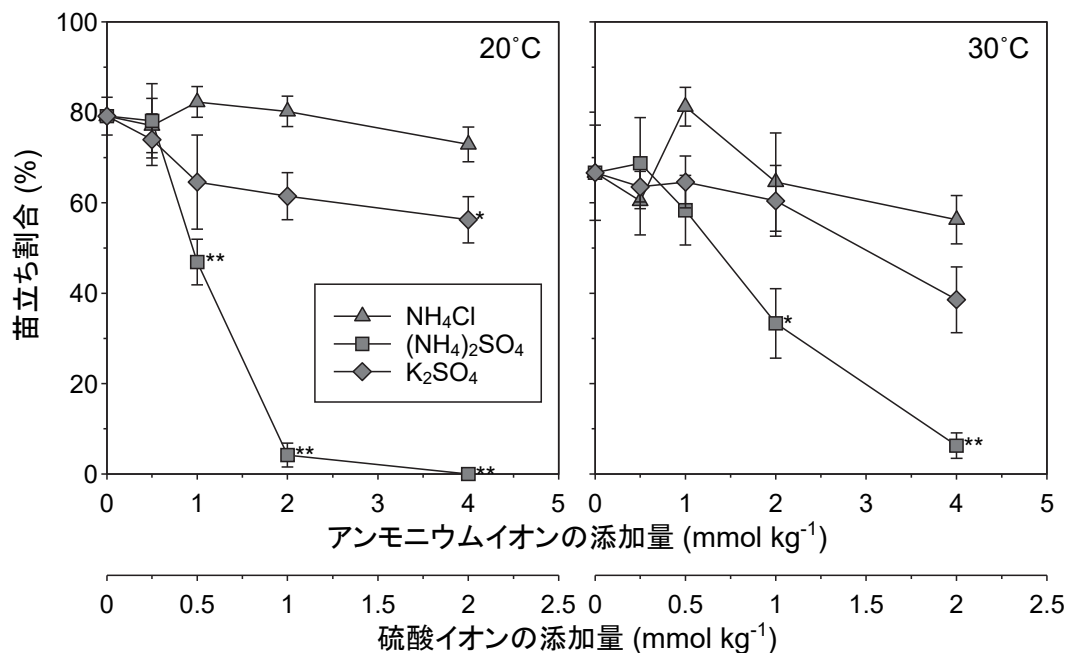


図3-2. 水稻の苗立ち割合におけるアンモニウム塩と硫酸塩の影響
 土壌には、無添加、または塩化アンモニウム「NH₄Cl」、硫酸アンモニウム「(NH₄)₂SO₄」、硫酸カリウム「K₂SO₄」を添加した。播種後、グロースチャンバに入れて、20°Cまたは30°Cで加温した。範囲は標準誤差を示す(6反復)。**, *は、アンモニウム塩も硫酸塩も添加しない条件と比較して、危険率1, 5%で有意差があることを示す(Dunnettの多重比較法)。

いずれの条件でも、種子近傍の土壌におけるメチレンブルーの青色は、播種後、20°Cで3日、30°Cで2日ほどで退色した。種子近傍の土壌には、播種後、20°Cで5日、30°Cで3日ほどで黒い輪が出現した。なお、この時点において、種子の鞘葉には枯死する気配はみられなかった。黒い輪の濃さは、硫酸アンモニウムや硫酸カリウムの添加量が多くなるほど濃くなった。一方、塩化アンモニウムを添加した場合、黒い輪の濃さはとても薄かった。

(3) 考察

土壌に、硫酸アンモニウムを添加すると試験1と同様に苗立ちが阻害された。それに比べて程度は小さかったが、硫酸カリウムの添加によっても苗立ちが阻害された。一方、土壌に塩化アンモニウムを添加しても苗立ちはほとんど影響を受けなかった。このことから、硫酸アンモニウムによる苗立ちの阻害は、アンモニウムイオンよりも硫酸イオンの影響が大きいと考えられた。このことから、硫酸イオンが硫化物イオンに変化し、苗立ちを阻害したと考えることができる。また、種子近傍の黒い輪も、硫酸アンモニウムや硫酸カリウムでは濃く生じたが、塩化アンモニウムの添加では薄かった。このことから、種子の近傍に生じた黒い輪は、硫酸イオンから生じた硫化物イオンが二価鉄イオ

ンと結合した硫化鉄(熊田 1949, 赤松 1969, Ponnampereuma 1972, 木村ら 1984, 萩原ら 1987, 若尾 1987)と考えられた。

3) 種子と硫酸アンモニウムの添加が土壤の酸化還元電位に及ぼす影響

土壤における硫化物イオンの生成状況を推測するため、種子の存在や硫酸アンモニウムの添加および温度が、硫化物イオンの生成の目安となる土壤の酸化還元電位に与える影響を調べた。

(1) 方法

試験 1 と同様に、乾土で 120 g 相当の湿潤土をポットに詰め、硫酸アンモニウム(3.6 mmol kg⁻¹)を添加したものとし、乾土を準備した。両者に、試験 1 と同様に、1 mmol kg⁻¹に相当する塩化カリウムを加え、水分の重量が乾土に換算した重量の 1.5 倍となるように調整し、振盪後、静置した土壤を準備した。

土壤の酸化還元電位は、白金電極(藤原製作所 EP-201)と比較電極(TOA-DKK REF4400-0.65C)の電位差から算出した。白金電極は、ポットの土壤の 3 cm の深さに刺した。また、別に、種子近傍の土壤の酸化還元電位を計測するため、発芽した水稻種子(品種:ヒノヒカリ)をポリエチレンの網で白金電極の先端に付けた。電極間の電位差は 1 時間おきに 2 週間、データロガー(Hioki 3645)を用いて自動的に計測した。種子を付けない状態では 5 反復で、種子を付けた状態では 8 反復で計測した。

酸化還元電位計の説明書(藤原製作所 EHS-120)や村上・粕淵(2007)によれば、酸化還元電位[Eh (V)]は、白金電極と比較電極の電位差[PD (V)]と温度[T (°C)]から算出される: $Eh = PD + 0.206 - 0.0007 \cdot (T - 25)$ 。

(2) 結果

種子を播種しなかった土壤の酸化還元電位は、加温後 14 日目までさえ、20°Cで 0.3 V、30°Cで -0.1 V までしか下がらなかった(図 3-3)。一方、種子近傍の土壤の酸化還元電位は、播種後 20°Cでは 4 日で、30°Cでは 2 日で、-0.2~-0.1 V 程度まで急激に低下し、その後、一定となった。土壤のみの場合も、種子近傍の土壤の場合も、酸化還元電位は、硫酸アンモニウムの添加によって影響を受けなかった。

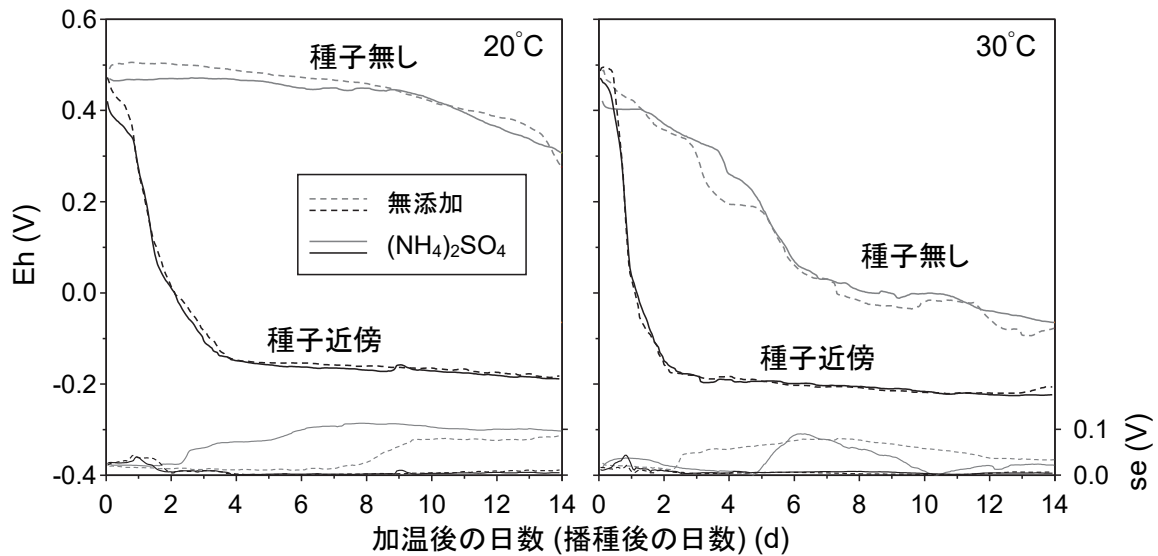


図3-3. 土壌の酸化還元電位における種子と硫酸アンモニウムの影響
 3.6 mmol kg⁻¹の硫酸アンモニウムを添加した土壌と添加しない土壌を準備し、半分に水稻種子を播種した。「種子無し」は、播種しなかった土壌の酸化還元電位を示す。「種子近傍」は、水稻種子を播種した近傍の土壌の酸化還元電位を示す。播種後に合わせて、20または30°Cに加温した。5~8反復で計測した。標準誤差を図の底に記載した。

(3) 考察

20°Cにおいて、種子が無い条件では、土壌の酸化還元電位はほとんど低下しなかった。しかし、種子の近傍ではわずか4日ほどで-0.2 Vに迫るまで急激に低下した。このことから、土壌のみでは酸化還元電位が低下しにくい冷涼な条件でも、種子の近傍では硫化物イオンが生じるほどまで局所的に土壌が還元されると考えられた。これまで、種子無しでの26~30°Cで土壌を湛水培養した試験でも得られているように(佐藤・山根 1959, 高井・手塚 1971, 山根・佐藤 1972)、硫酸アンモニウムの添加は酸化還元電位にほとんど影響を与えなかった。このことから、硫酸アンモニウムを土壌に加えた際に、水稻の苗立ちが阻害される原因は、種子近傍の局所的な土壌還元によって、有害な硫化物イオンが生成し、水稻が障害を受けるためと考えられた。

4) 硫酸塩とアンモニウム塩の添加が土壌溶液における元素濃度に及ぼす影響

種子近傍の土壌における化学変化を推測するため、種子の存在や硫酸塩とアンモニウム塩の添加および温度を変えて、土壌溶液を採取し、その中の元素の濃度変化を調べた。

(1) 方法

試験 1 と同様に、乾土で 120 g 相当の湿潤土をポットに詰め、何も加えないポットと、塩化アンモニウム、硫酸アンモニウム、または硫酸カリウムを加えたポットを準備した。アンモニウムイオンや硫酸イオンの量で同じになるように、塩化アンモニウムの量は 7.1 mmol kg^{-1} 、硫酸アンモニウムと硫酸カリウムの量は 3.6 mmol kg^{-1} とした。試験 1 と同様に、 1 mmol kg^{-1} に相当する塩化カリウムを加え、水分の重量が乾土に換算した重量の 1.5 倍となるように調整し、振盪した土壌を準備した。

土壌溶液は、長さ 5 cm、直径 6 mm の素焼き管と真空チューブを用いて、採取した (Toriyama et al. 1996)。種子近傍の土壌溶液を採取するために、素焼き管に 2 粒の種子 (品種: ヒノヒカリ) をポリエチレンの網でくくりつけ、土壌の中に埋めた。種子がない条件でも同様に土壌溶液を採取した。土壌溶液は 2 反復で採取した。土壌溶液は約 10 mL を 2~3 日間隔で採取し、採取後は沈殿を防ぐために、6 M 塩酸を 0.2 mL 加えた。土壌溶液の硝酸態窒素とアンモニウム態窒素の濃度は、比色法で定量した (Bran+Luebbe QuAAtro)。不揮発性有機態炭素 (以下単に、有機態炭素) と窒素は、全有機態炭素計 (Shimadzu TOC-VCPH & TNM-1) で分析した。その他の無機成分 (Ca, Fe, K, Mg, Mn, Na, S, Si, P) の濃度は、ICP-AES (Varian Vista AX) によって定量した。硫化物イオンの濃度は、*N,N*-ジメチル-*p*-フェニレンジアンモニウムを用いた吸光度法で定量した (日本工業規格 2008)。

(2) 結果

調整したポットの土壌溶液の窒素濃度は、アンモニウム塩を加えた試料で高くなった (図 3-4)。この濃度は、 20°C で 4 日、 30°C で 2 日の間、著しく減少した。これは硝酸態窒素の濃度の変化を反映しており、硝酸態窒素が無くなると (データ省略)、土壌溶液の窒素濃度は一定になった。アンモニウム態窒素はほぼ一定かわずかに減少した。これらの窒素関係の濃度に、種子の有無は、ほとんど影響していなかった。

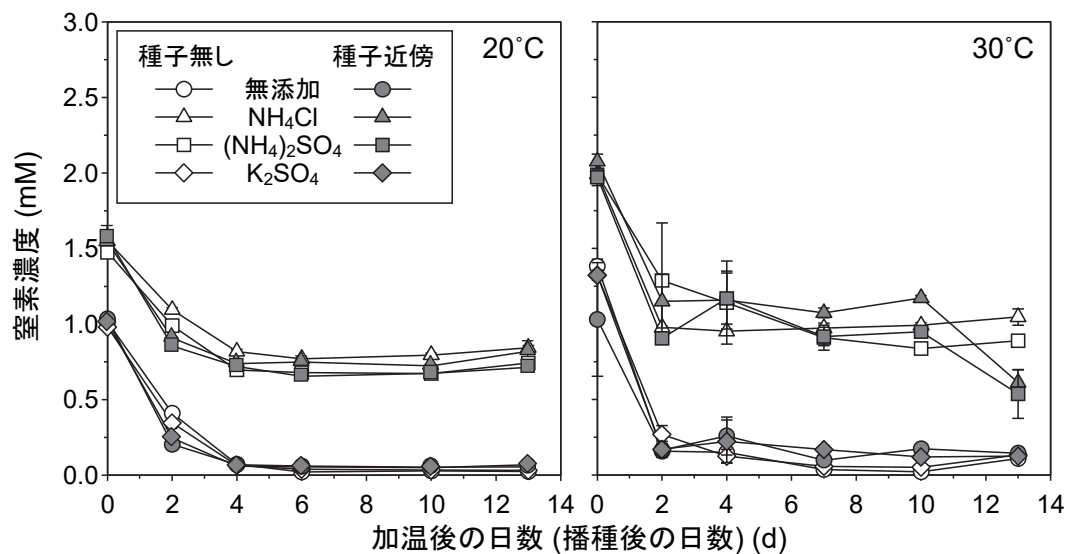


図3-4. 土壌溶液の窒素濃度における種子と添加した塩の影響

土壌には、無添加、または 7.1 mmol kg^{-1} の塩化アンモニウム「 NH_4Cl 」、 3.6 mmol kg^{-1} の硫酸アンモニウム「 $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ 」、 3.6 mmol kg^{-1} の硫酸カリウム「 K_2SO_4 」を添加した。その半分に水稲種子を播種した。「種子無し」は、播種しなかった土壌の土壌溶液を示す。「種子近傍」は、水稲種子を播種した近傍の土壌の土壌溶液を示す。播種後に合わせて、20または 30°C に加温した。範囲は標準誤差を示す(6反復)。

マンガン濃度は、種子が無い場合の土壌溶液よりも、種子近傍の土壌溶液において、早く急速に上昇した(図 3-5)。種子近傍の土壌溶液のマンガン濃度は、播種後、 20°C で4日、 30°C で2日後から上昇した。一方、種子が無い場合の土壌溶液のマンガン濃度は、播種後、 20°C で6日、 30°C で4日後から上昇した。

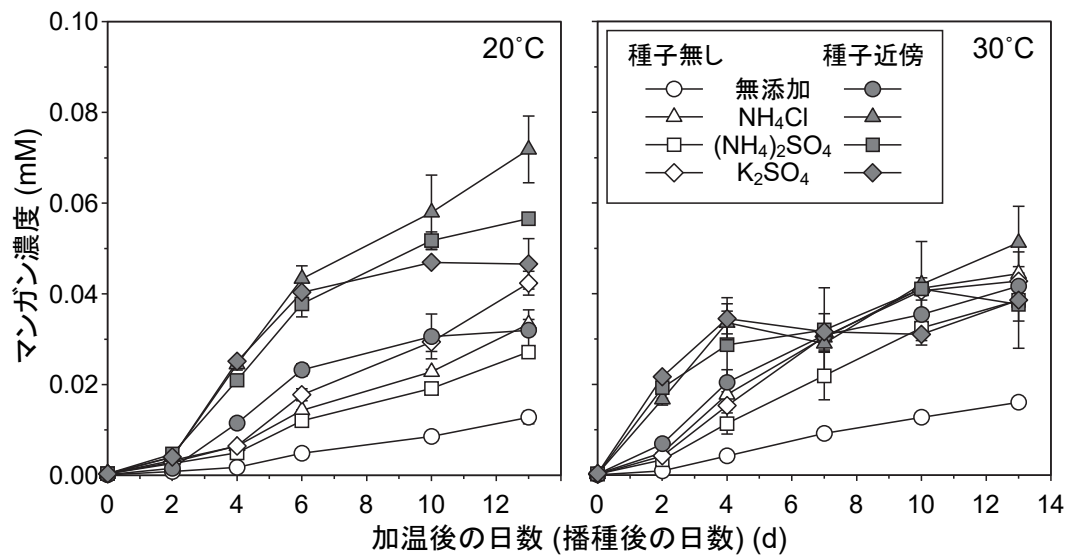


図3-5. 土壤溶液のマンガン濃度における種子と添加した塩の影響
 土壤には、無添加、または7.1 mmol kg⁻¹の塩化アンモニウム「NH₄Cl」、3.6 mmol kg⁻¹の硫酸アンモニウム「(NH₄)₂SO₄」、3.6 mmol kg⁻¹の硫酸カリウム「K₂SO₄」を添加した。その半分に水稲種子を播種した。「種子無し」は、播種しなかった土壤の土壤溶液を示す。「種子近傍」は、水稲種子を播種した近傍の土壤の土壤溶液を示す。播種後に合わせて、20または30°Cに加温した。範囲は標準誤差を示す(6反復)。

種子が無い場合の土壤溶液の鉄(図3-6)、リン(図3-7)、炭素(図3-8)の濃度は、ほぼ一定のままであったが、種子近傍の土壤溶液におけるこれらの濃度は、20°Cで6日、30°Cで4日後から上昇した。

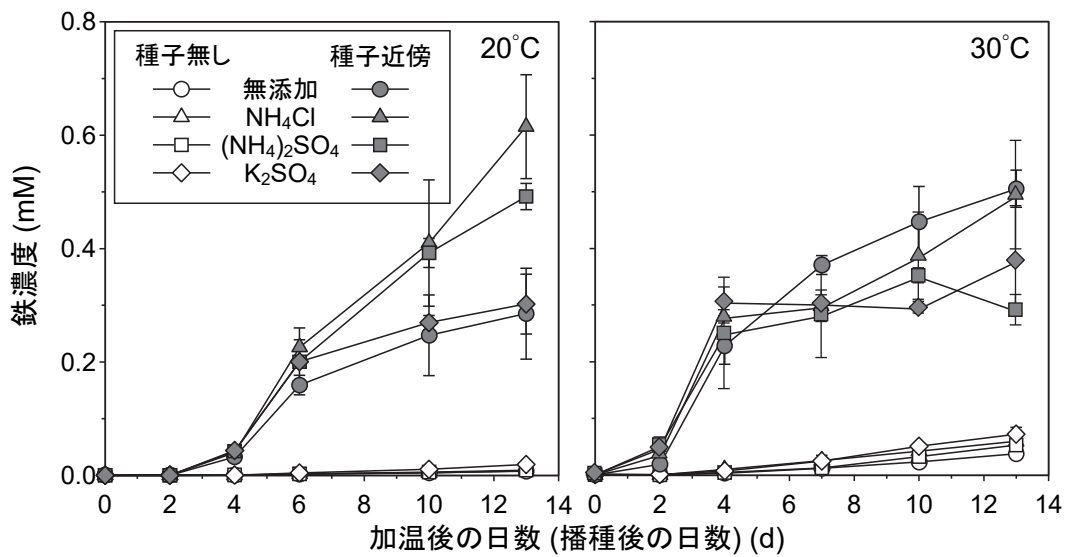


図3-6. 土壌溶液の鉄濃度における種子と添加した塩の影響

土壌には、無添加、または 7.1 mmol kg^{-1} の塩化アンモニウム「 NH_4Cl 」、 3.6 mmol kg^{-1} の硫酸アンモニウム「 $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ 」、 3.6 mmol kg^{-1} の硫酸カリウム「 K_2SO_4 」を添加した。その半分に水稻種子を播種した。「種子無し」は、播種しなかった土壌の土壌溶液を示す。「種子近傍」は、水稻種子を播種した近傍の土壌の土壌溶液を示す。播種後に合わせて、20または 30°C に加温した。範囲は標準誤差を示す(6反復)。

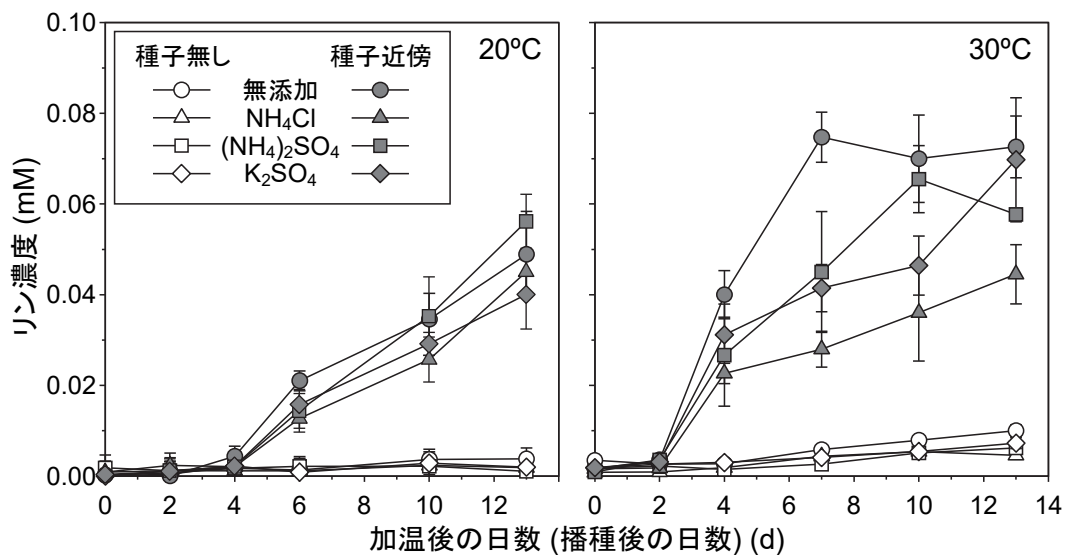


図3-7. 土壌溶液のリン濃度における種子と添加した塩の影響

土壌には、無添加、または 7.1 mmol kg^{-1} の塩化アンモニウム「 NH_4Cl 」、 3.6 mmol kg^{-1} の硫酸アンモニウム「 $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ 」、 3.6 mmol kg^{-1} の硫酸カリウム「 K_2SO_4 」を添加した。その半分に水稻種子を播種した。「種子無し」は、播種しなかった土壌の土壌溶液を示す。「種子近傍」は、水稻種子を播種した近傍の土壌の土壌溶液を示す。播種後に合わせて、20または 30°C に加温した。範囲は標準誤差を示す(6反復)。

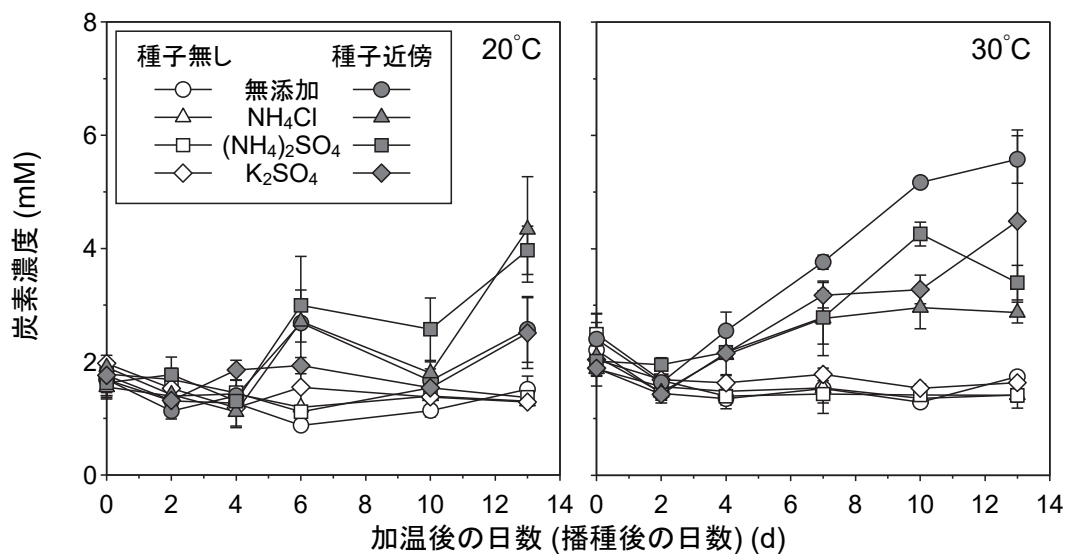


図3-8. 土壤溶液の炭素濃度における種子と添加した塩の影響

土壤には、無添加、または 7.1 mmol kg^{-1} の塩化アンモニウム「 NH_4Cl 」、 3.6 mmol kg^{-1} の硫酸アンモニウム「 $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ 」、 3.6 mmol kg^{-1} の硫酸カリウム「 K_2SO_4 」を添加した。その半分に水稻種子を播種した。「種子無し」は、播種しなかった土壤の土壤溶液を示す。「種子近傍」は、水稻種子を播種した近傍の土壤の土壤溶液を示す。播種後に合わせて、20または30°Cに加温した。範囲は標準誤差を示す(6反復)。

土壤溶液の硫酸の濃度は、硫酸塩を入れた場合、入れない場合に比べて、高くなった(図 3-9)。硫酸塩の添加にかかわらず、種子近傍の場合のみ、土壤溶液の硫酸濃度が減少し、種子が無い場合は減少しなかった。硫酸濃度の減少は、硫酸塩を添加しなかった場合に比べて、硫酸塩を加えた場合に大きく減少した。また、硫酸カリウムを加えた場合に比べて、硫酸アンモニウムを加えた場合に、土壤溶液の硫酸濃度の減少が大きかった。この減少は、20°Cで6日から、30°Cで4日後から始まった。種子の有無にかかわらず、土壤溶液の硫酸化物イオンは、 0.01 mM 以下と少なく、計量できなかった(データ略)。

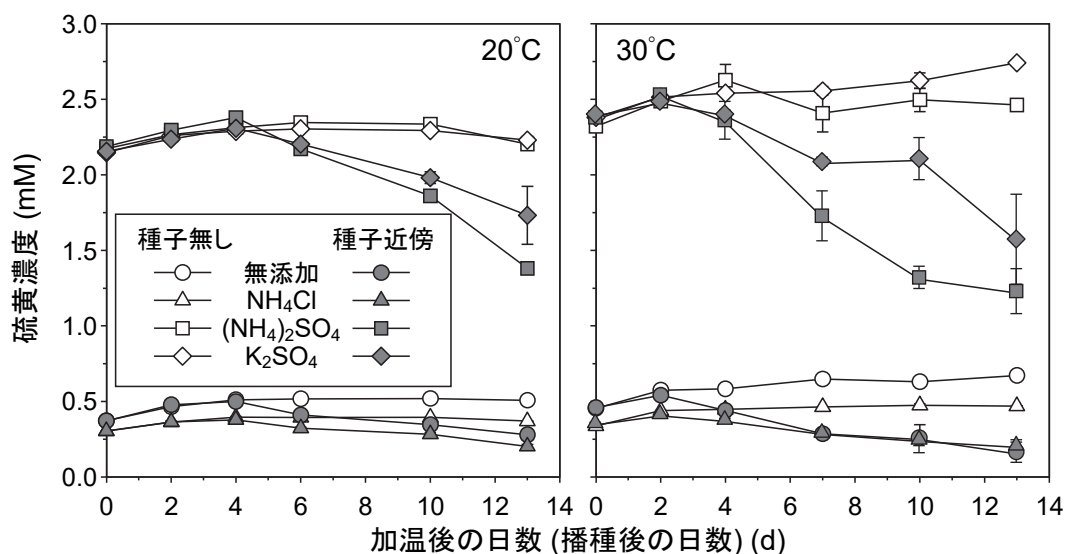


図3-9. 土壤溶液の硫黄濃度における種子と添加した塩の影響

土壤には、無添加、または 7.1 mmol kg^{-1} の塩化アンモニウム「 NH_4Cl 」、 3.6 mmol kg^{-1} の硫酸アンモニウム「 $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ 」、 3.6 mmol kg^{-1} の硫酸カリウム「 K_2SO_4 」を添加した。その半分に水稻種子を播種した。「種子無し」は、播種しなかった土壤の土壤溶液を示す。「種子近傍」は、水稻種子を播種した近傍の土壤の土壤溶液を示す。播種後に合わせて、20または30°Cに加温した。範囲は標準誤差を示す(6反復)。

他の無機元素(Ca, K, Mg, Na, Si)の濃度は、ほぼ一定であり、種子の有無にほとんど影響を受けなかった(データ略)。

(3) 考察

種子が無い土壤のみの場合に比べて、種子近傍では、鉄、リン、炭素の濃度が上昇する傾向がみられた。鉄やリンは土壤の還元に伴って増加することから、試験3で得られたように、種子近傍における土壤の酸化還元電位の局所的な低下を反映したものと考えられた。一方、硫黄濃度は、種子近傍において、逆に低下する傾向がみられた。佐藤・山根(1959)は、種子を播種しない土壤のみを30°Cで培養した場合、土壤中における硫酸イオンが減少し、それに合わせて硫化物イオンが上昇することを報告している。したがって、土壤中において、硫黄は硫酸イオンとして存在しており、土壤の還元とともに、硫化物イオンに変化すると考えられる。硫化物イオンは二価鉄イオンと結合して不溶性の硫化鉄を形成することから、種子近傍における硫黄濃度の低下は、可溶性の硫酸イオンが不溶性の硫化鉄に変化したことを反映していると考えられた。

しかし、硫化物イオンは、種子近傍の土壤溶液でもほとんど検出できなかった。これはおそらく、硫化物イオンが不安定であるので、すばやく二価鉄イオンと反応して不溶化される(古坂 1968,

Ponnamperuma 1972)ためと考えられる。または、種子から遠く離れた酸化的な土壌溶液の混入や、土壌溶液の採取から分析までに酸素が混入して、硫化物イオンが酸化されて消失してしまった可能性も考えられた。加えて、硫化物イオンは、採液時の減圧によって硫化水素として気化した可能性もある。したがって、硫化物イオンが検出できなかったことが、種子近傍で硫化物イオンが生成しなかったことを意味するわけではないと考えられた。

3. 章考察

1) 硫酸塩の施用による水稻の苗立ち阻害

30°Cでも20°Cでも、土壌への硫酸アンモニウムの添加によって、水稻の出芽は阻害されなかったが、苗立ちは阻害された(図 3-1, 3-2)。Yamamoto et al.(2004)は、平均温度が19°Cの水田において、無被覆の種子を播種した際、主要なアンモニウム肥料の中で、硫酸アンモニウムが苗立ちを最も阻害すると報告しており、今回の結果と一致する。また、ここでの結果は、湛水する前に土壌が乾かない条件で得られた。川口(1944)も、水稻の種子からの生育が、硫酸アンモニウムによって阻害されることを報告しているが、その試験では風乾土を用いて、30°Cを超える温度で保温された。川口は、硫酸アンモニウムによる阻害を硫酸イオンの還元によると結論づけている。土壌還元は高温で促進され(赤松 1969)、湛水前の土壌の風乾(川口・山本 1942, 佐藤・山根 1959)でも促進される。興味深いことに、今回の結果では、より低い20°Cで、かつ湛水前の土壌を乾かさない条件でも、硫酸アンモニウムの添加によって苗立ちは阻害された。この条件は、水稻の直播においてより現実的な条件である。

1~2 mmol kg⁻¹の硫酸アンモニウムの添加によって苗立ちは阻害された(図 3-1, 3-2)。この添加量は、上澄み液におけるアンモニウム態窒素の濃度が0.1~0.2 mM、硫黄濃度が1 mMに相当する。Yamamoto et al.(2004)は、アンモニウム態窒素が2~4 mg kg⁻¹のとき苗立ちは阻害されることを報告しており、それは硫酸アンモニウムで0.07~0.14 mMの濃度に相当する。したがって、ここで得られた結果は、Yamamoto et al.(2004)の結果とほぼ一致する。100 kgの風乾土を1 m²に換算すると、苗立ちの阻害を引き起こすのに十分な窒素量は2.8~5.6 g m⁻²に相当する。Yamamoto et al.(2004)の報告では4 g m⁻²の窒素施用で苗立ちは阻害された。したがって、硫酸アンモニウムによる苗立ちの阻害は、実際の直播圃場で起こりえると考えられる。

硫酸カリウムの施用も苗立ちを阻害するが、その阻害程度は硫酸アンモニウムに比べると弱いよ

うである(図 3-2)。塩化アンモニウムの施用では苗立ちがあまり阻害されなかった。これらの結果は、硫酸アンモニウムによる苗立ちの阻害は、アンモニウムイオンではなく硫酸イオンに起因していることを示唆している。苗立ちにおける硫酸アンモニウムの阻害効果は、硫酸カリウムよりも強そうである。これは、アンモニウムイオンも苗立ちを阻害する効果があるためと考えられる(Hara and Toriyama 1998b, 菅野ら 1999, Yamamoto et al. 2004)。相田・須藤(1954)は、硫化物イオンの生成がアンモニウムイオンによって増大することを報告していることから、硫酸イオンと硫化物イオンによる相乗効果も考えられた。一方、試験 2 で塩化アンモニウムによる苗立ちの阻害がみられなかったのは、硫酸イオン自体も少なく、アンモニウムイオンとの相乗効果がみられなかったことが考えられた。または、アンモニウムイオンは、土壤中における苗立ちを阻害する一方で、好气的条件では生育を促進する養分として利用されるので(Hara and Toriyama 1998b)、アンモニウムイオンによる苗立ち阻害が打ち消された可能性も考えられた。

2) 種子近傍における土壌還元と無機栄養素の濃度

これまでの研究では、湿潤土を湛水したときの酸化還元電位は、風乾土を湛水したときに比べてゆっくり低下することが報告されている(川口・山本 1942, 佐藤・山根 1959)。本章では、風乾していない土壌について調べたが、種子が無い場合よりも種子近傍の酸化還元電位は著しく速く低下した(図 3-3)。この結果は、風乾土を用いた萩原ら(1987)の報告とも一致している。

種子が無い場合に比べて、種子近傍の酸化還元電位がより低下する理由を調べるため、土壌溶液の無機栄養素の濃度と土壌の酸化還元電位における種子の有り無しの影響を調べた。土壌を湛水したときの還元過程では、主に、硝酸イオン、マンガン、鉄、硫黄が関与する(Marschner 1995)。硝酸イオンは、種子の存在に関係なく、加温してから 20°C で 4 日、30°C で 2 日までに急速になくなった(図 3-4)。マンガンは、種子の近傍において、加温後 20°C で 4 日、30°C で 2 日後に増加し始めたが、種子が無い場合に増加し始めたのは更にその 2 日後だった(図 3-5)。種子近傍の土壌溶液の鉄は、加温して 20°C で 6 日、30°C で 4 に増加したが、種子が無い場合はほとんど増加しなかった(図 3-6)。そして、その増加は、種子近傍の酸化還元電位が、約 -0.2 V という最低値に達した 2 日後に始まった(図 3-3)。これは、酸化還元電位が低下すると、二価鉄が増加する(浅見 1970)ことを反映していると考えられた。硫黄は、種子近傍の土壌溶液のみで減少がみられ、その減少は、播種してから 20°C で 6 日、30°C で 4 日後に始まった(図 3-9)。これは、酸化還元電位が、

約-0.2 Vという最低値に達した2日後に相当する(図 3-3)。このように、鉄や硫黄の濃度の変化には、種子の存在が強く、影響を与えていた。

リンや炭素の濃度も、種子の存在に影響を受けた。リンは種子近傍の土壤溶液のみでしか増加しなかった。これは鉄の増加と一致していた。おそらく、リンは鉄の還元に伴って溶解するためと考えられる。炭素も、種子近傍の土壤溶液でのみ増加した。このことは、可溶性の有機物が増加していることを示している(図 3-8)。これらの物質はおそらく、窒素を含まない有機酸と思われる。なぜなら、土壤溶液の窒素濃度は増加していなかったためである(図 3-4)。種子近傍の土壤溶液における炭素濃度の変化は、酸化還元電位が-0.2 Vの最低値に達してから2日後に始まった。一方、種子が無い場合の土壤溶液の炭素濃度はほとんど変化しなかった。これは、鉄や硫黄やリンの濃度変化と同じ傾向である。これらの変化が酸化還元電位の影響を受けていることは明らかであるが、炭素濃度の変化が直接的に酸化還元電位に影響を受けているかは不明である。可溶性の有機物が、酸化還元電位の低下に伴って土壤から生成するのかもしれないし、種子から有機物が供給されるのかもしれない。種子近傍の強い土壤還元は種子から供給される有機物が微生物によって分解される結果として起きるのかもしれない。

3) 種子近傍における硫化物イオン生成の可能性

播種して、20°Cで4日、30°Cで2日で、種子近傍の酸化還元電位は-0.2 Vまで低下し、一定となった(図 3-3)。硫化物イオンが生成する酸化還元電位は-0.2~-0.05 Vとされているので(高井 1961a, 高井 1961b, 佐藤・山根 1976, Patrick and Jugujinda 1992, Marschner 1995)、この結果は、30°Cだけでなく20°Cにおいても、播種後すぐに種子近傍で硫化物イオンが生成していることを示唆している。

硫酸塩の添加に関係なく、硫黄濃度は種子近傍でのみ減少した。この減少は播種して20°Cで6日、30°Cで4日後に始まっており(図 3-9)、そのときは酸化還元電位が-0.2 Vに到達した2日後に相当する(図 3-3)。さらに、試験2において、播種して20°Cで5日、30°Cで3日後に、種子の周りに黒い輪が観察され、合わせて土壤溶液の硫黄濃度が減少し始めた。この結果は、播種後数日で硫化物イオンが種子近傍の土壤で生成されていることと、二価鉄イオンの存在する土壤中において不溶性の黒い硫化鉄が生成し(熊田 1949, 赤松 1969, Ponnampereuma 1972, 木村ら 1984, 若尾 1987)、硫黄が減少していることを示唆している。

硫化物イオンは、盛夏において十分大きくなった水稻の生育さえ阻害する。この「秋落ち」と呼ばれる現象は、土壌の酸化還元電位の低下によって起きる(岡島・高城 1959, 古坂 1968)。硫化物イオンの研究では、風乾した水田土壌がよく用いられた(大杉・川口 1938, 川口・山本 1942, 川口 1944, 佐藤・山根 1959)。土壌を湛水した際の還元は、温度によって促進されるが、さらに事前の土壌の乾燥によっても促進され、土壌を湿潤条件におくことによって抑制される(川口・山本 1942, 佐藤・山根 1959)。そして、大杉・川口(1938)によれば、風乾した土壌を湛水した場合でさえ、25℃以下で硫化物イオンは生成しないことが報告されている。それ故、実際の水田における直播に相当するような、土壌が事前に乾かない冷涼な条件で硫化物イオンが生成するか明らかになっていない。

本章の研究においては、土壌を水田から湿ったままで採取し、乾燥させることなく、20℃で湛水させた。したがって、種子近傍における土壌の酸化還元電位と土壌溶液の硫黄濃度の急速な低下は(図 3-3, 3-9)、土壌が乾かない条件でさえ、また冷涼な条件でさえ、種子近傍では硫化物イオンが生成していることを示唆している。このような条件はより現実的であり、さらに暖かい地域での直播では、硫化物イオンが生成している可能性がより高いと考えられる。

水稻は根に酸化層を形成し、この酸化力が大きい品種ほど、硫化物イオンによる秋落ちへの抵抗性が強い(岡島・高城 1959)。しかし、土壌中に播種された水稻種子は、酸素がある地上から離れ、光合成も行えないため、種子近傍を酸化的に保つことが困難である。その結果、十分生育した水稻が根腐れを起こすような著しい還元条件でなくても、硫化物イオンの影響を受けやすいと思われる。岡島(1960)は、十分生育した水稻であっても、窒素欠乏にすると根の酸化力が低下し、硫化物イオンが生成することを報告している。水稻直播における種子では、この酸化力が全くない状況であり、従来研究されてきた秋落ちが起きないような条件でも、種子近傍では硫化物イオンが生成して、障害を受けやすいと考えられた。

4) 硫化物イオンによる水稻直播の苗立ち阻害

川口(1944)は、風乾土を湛水にして 32~35℃にする条件では、硫酸アンモニウムを添加すると、水稻の発芽と生育の生育が抑制されることを報告しており、硫化物イオンによって生育抑制が起こることを述べている。したがって、硫化物の生成が、直播の苗立ちを阻害する一つの要因であると考えられる。この考えは、試験2において、鞘葉に枯死の兆候が見られる前に、種子の近傍に黒い

輸が観察されたことによっても支持される。硫酸塩を加えた湛水土壌の苗立ちも阻害された(図 3-1, 3-2)。さらに、これらの現象は、オートクレーブした土壌を用いた場合、生じなかった(図 3-1)。このことは、土壌微生物によって硫酸塩から硫化物が生成する(古坂 1968)ので、硫化物イオンの生成が土壌滅菌によって阻害されたことを示している。これらの結果は、土壌が湛水の前に乾燥しなくても、また、20°C程度の冷涼な条件における直播においても、土壌に硫酸イオンが十分にあるならば、種子近傍における土壌微生物による硫酸イオンからの硫化物イオンの生成が、苗立ちを阻害していることを示している。加えて、30°Cよりも20°Cの方がゆっくりと土壌が還元される(図 3-3)のに対し、苗成ちは30°Cよりも20°Cでより阻害された(図 3-2)。これは、30°Cよりも20°Cの方が、種子が還元された土壌から出芽するのに時間がかかり、不利な条件に長く閉じ込められるためと考えられる。

有害な硫化物イオンは、二価鉄と結合することによって、無害の硫酸鉄に変化する(熊田 1949, 赤松 1969, Ponnampereuma 1972, 若尾 1987)。硫化物イオンが成熟した水稻に障害を与えることで生じる秋落ちが起きないようにするために、水田に鉄資材が施用されてきた。水田土壌に必要な遊離酸化鉄の最少量は 15 g kg^{-1} である(後藤ら 2003)。本章の試験で用いた土壌の遊離酸化鉄(Asami and Kumada 1959)の量は 18 g kg^{-1} で、その基準値を超えていた。加えて、種子近傍の土壌溶液には、鉄が十分あり、消費してなかった(図 3-6)。それ故、鉄イオンが消失していても、種子の周辺では硫化物イオンが新しく生成し、二価鉄イオンと結合していない状態のものがあるため、種子が阻害されると考えられる。対照的に、Hagiwara and Imura (1993)は、硫化ナトリウムを添加しても、水稻の苗成ちにほとんど影響しなかったことを報告している。これは硫化物イオンの高い反応性のためと考えられる。加えられた硫化物イオンはすぐに湛水土壌中の二価鉄イオンと結合する。生成された不溶性の硫化鉄は有害ではないので(熊田 1949)、水稻の生育を阻害しなかったと考えられる。

水稻の苗成ちは、硫酸塩を加えられなかった土壌よりも加えられた土壌で阻害された(図 3-1, 3-2)。硫化物イオンの基である硫酸アンモニウムを添加しても、土壌の酸化還元電位に影響がみられなかった(図 3-3)ことから、硫酸イオンは土壌還元に影響しないと考えられる。それ故、硫酸塩の添加は、より多くの硫酸イオンが硫化物イオンに変化し、それが種子に障害を与えたと考えられた。したがって、水稻直播栽培では、硫黄を含まない肥料を用いる必要があると考えられる。

硫黄はもともと土壌に存在している。種子近傍の土壌溶液は、硫酸イオンの添加にかかわらず、

経時的に硫黄濃度が低下していた(図 3-9)。硫酸塩の添加をしなくても、土壌では硫化物イオンが生成し、苗立ちを阻害すると考えられる。用いた土壌の有効態硫黄の量は 2.0 mmol kg^{-1} ($63 \mu\text{g g}^{-1}$) である。鈴木(1977)によれば、有効態硫黄が 0.3 mmol kg^{-1} ($10 \mu\text{g g}^{-1}$) 以下の場合、硫黄を施用する必要があると報告している。用いた土壌の有効態硫黄の量が水田において一般的なのかは、情報が限られていて分からないが、硫酸塩の添加をしなくても、土壌から硫化物イオンが生成し、苗立ちを阻害する一因となっていることが考えられた。

4. 章摘要

水稻栽培において、直播は省力的であるが、普及はまだ十分でない。この理由として、苗立ちが良くない場合があることが挙げられる。ここでは、窒素肥料である硫酸アンモニウムの施用で、湛水土壌中に播種した際の苗立ちが抑制される現象を調べた。まず、塩化アンモニウムを施用しても苗立ちは抑制されにくかったが、硫酸塩である硫酸アンモニウムや硫酸カリウムを施用すると 20°C でも苗立ちは抑制された。ただし、土壌をオートクレーブすると、硫酸アンモニウムを施用しても苗立ちは抑制されなかった。また、種子近傍土壌の酸化還元電位は、 20°C でも数日で硫化物イオンが生成しうる水準まで低下した。酸化還元電位の低下に伴って、種子近傍の土壌溶液の硫黄濃度も低下した。このことから、種子近傍では水溶性の硫酸イオンが硫化物イオンに変化し、さらに二価鉄イオンと反応して不溶性の硫化鉄になったと考えられた。したがって、春の冷涼条件や土壌が湛水前に乾燥しない場合でも、硫酸イオンが土壌に十分存在するならば、土壌中に播種された種子近傍では、微生物によって硫化物イオンが生成され、苗立ちが抑制されると考えられた。

第4章 硫酸塩を施用した土壌におけるモリブデン酸塩の施用による水稻の苗立ち向上

1. 章緒言

前章において、涼冷な条件でさえ、土壌に硫酸塩を添加すると水稻の苗立ちが低下することを明らかにした(Hara 2013a)。また、種子近傍の酸化還元電位は、局所的に低下するために硫酸イオンから有害な硫化物イオンが生成し、苗立ちを阻害することが示唆された。

モリブデン酸塩は、硫酸還元菌による硫酸塩からの硫化物の生成を阻害することが報告されている(堀ら 1990, Biswas et al. 2009)。したがって、モリブデン酸塩を用いることによって、硫酸塩からの硫化物の生成を阻害すれば、苗立ちが向上できる可能性が考えられた。

そこで、本章では、硫化物イオンが生成しやすいように硫酸塩を添加した湛水土壌に、モリブデン酸塩を添加して、水稻の苗立ちに及ぼす影響を調べた。

本章は、Hara (2013b)を基に、加筆して取りまとめた。

2. 試験

1) 土壌へのモリブデン酸塩の添加が水稻の苗立ちに及ぼす影響

硫化物イオンが生成しやすいように硫酸塩を添加した湛水土壌に、硫化物イオンの生成抑制剤であるモリブデン酸塩を様々な量で添加し、水稻種子の苗立ちが向上するかを調べた。

(1) 方法

福岡県筑後市の水田(細粒質普通灰色低地土、軽埴土)から作土を採取し、風乾しない湿潤のまま10 mmの篩でふるった湿潤土を、直径8 cmのポットに乾土換算で100 gずつ詰めた。このポットに、4 mmol kg⁻¹乾土に相当する硫酸アンモニウムと、1 mmol kg⁻¹乾土に相当する塩化アンモニウムを蒸留水に溶かして加えた。さらに、モリブデン酸カリウムを0.00, 0.38, 0.75, 1.5, 3.0, 7.5, 15, 30 mmol kg⁻¹乾土と量を変えて、蒸留水に溶かして添加した。最終的に、水分の重量が乾土に換算した重量の1.5倍となるように水分量を調整した。湿潤土と溶液の混合物を1時間震盪したのち、冷蔵庫で2日静置した。1つのポットに8粒の発芽させた水稻種子(品種:ヒノヒカリ)を土壌の中に15 mmの深さでピンセットを用いて播種した。播種後、長さ5 cm、直径6 mmの素焼き管と真空チューブを用いて(Hara 2013a)、各条件につき2つのポットから、約10 mLの土壌溶液を採取した。ポットは、20°Cまたは30°Cの恒温で12時間隔で蛍光灯が点滅するグローブボックスに入れられた。ポット

の位置の光量は $0.1 \text{ mmol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ であった。ポットには蒸留水を時々添加し、水位を 15 mm に維持した。土壌から芽が現れた時点を出芽とし、第3葉が現れた時点を苗立ちとして、播種後 21 (30°C) または 35 (20°C) 日目に出芽と苗立ちした個体の割合を調べた。最終的な苗立ち割合が 20%を超えた場合のみに、Richards 関数を用いて(Hara 1999)、日々の苗立ち数の調査データから、苗立ちにかかった日数の中央値を算出した。1 条件に 6 つのポットを使用した。土壌の還元の様子と黒い硫化鉄の生成を観察するために、それぞれの条件において別にポットを準備し、 1 g kg^{-1} 乾土のメチレンブルーを加え、透明なポットの側面に接して種子を播種した。

(2) 結果

20°C と 30°C で試験した出芽と苗立ちの割合は、同様の傾向がみられた(図 4-1)。モリブデン酸カリウムを添加しない場合、出芽割合は 30~50%であり、この割合は大まかにはモリブデン酸カリウムの量が増えるほど高くなる傾向がみられた。モリブデン酸カリウムの量が $0.75 \text{ mmol kg}^{-1}$ 以下、または 30 mmol kg^{-1} 以上の場合、苗立ち割合は 10%未満であった。しかし、モリブデン酸カリウムの量が $1.5 \sim 15 \text{ mmol kg}^{-1}$ のとき、苗立ち割合が向上した。土壌溶液のモリブデン濃度は、モリブデン酸カリウムの添加量に比例して上昇する傾向がみられ(図 4-2)、苗立ちが向上したときの土壌溶液のモリブデン濃度は $0.04 \sim 1.5 \text{ mM}$ であった。苗立ち割合が向上したとき、水稻の生育はモリブデン酸カリウムの添加量が多くなるほど遅れる傾向がみられ、苗立ちに至るまでの日数は、モリブデン酸カリウムの添加量が多くなるほど長くなった(図 4-3)。

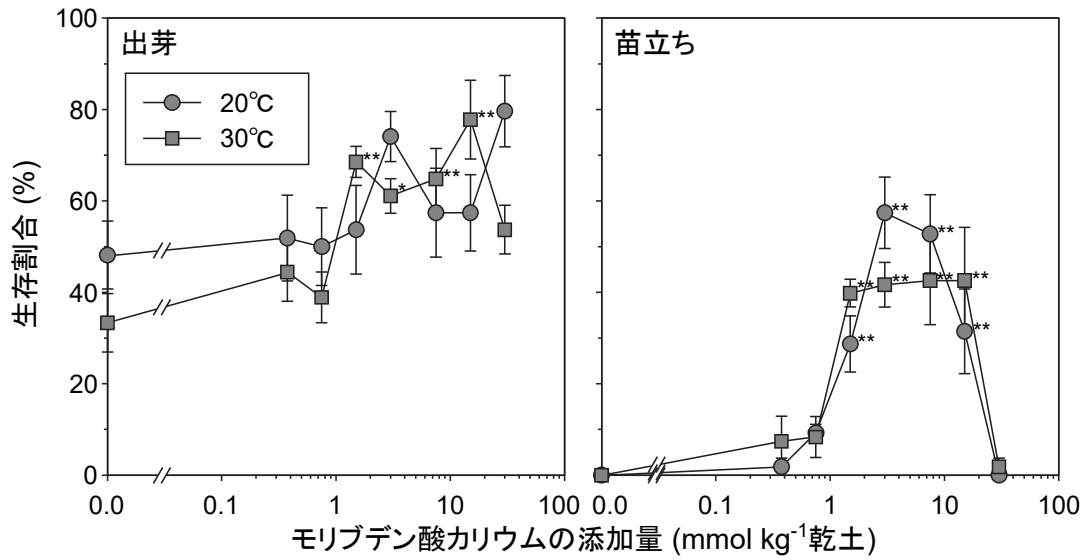


図4-1. 水稻の出芽と苗立ちの割合におけるモリブデン酸カリウムの影響
 モリブデン酸カリウムの添加量が異なる土壤に水稻種子を播種した。これらはグロースチャンバに入れて、20または30℃で加温した。範囲は標準誤差を示す(6反復)。**, *は、モリブデン酸カリウムを添加しない条件と比較して、危険率1, 5%で有意差があることを示す(Dunnettの多重比較法)。

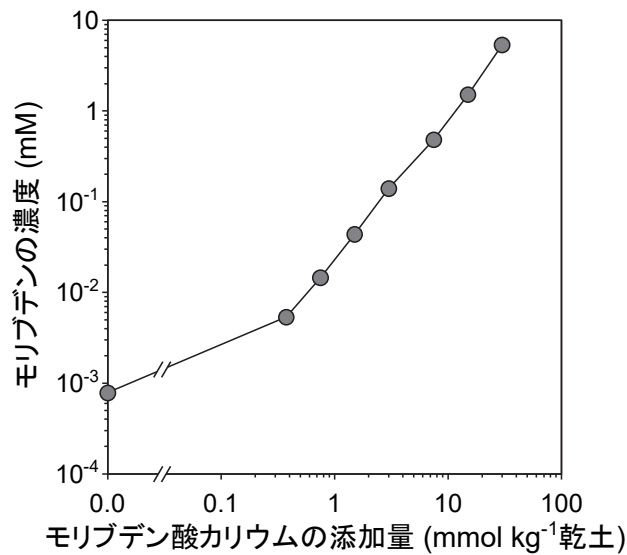


図4-2. 播種食後の土壤溶液におけるモリブデンの濃度
 2反復の標準誤差は、範囲を示せないほど小さかった。

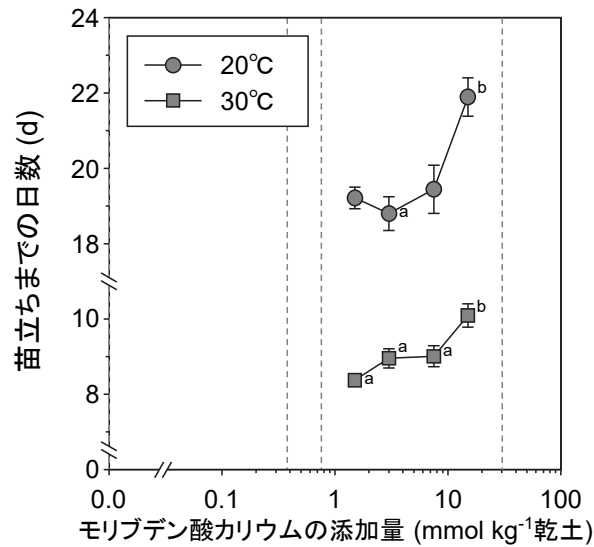


図4-3. モリブデン酸カリウムの添加量が苗立ちまで日数に及ぼす影響
 苗立ちまでの日数は中央値で示した。モリブデン酸カリウムの添加量が0.00, 0.38, 0.75, 30 mmol kg⁻¹乾土のとき、苗立ち割合は20%を超えなかった。このとき、苗立ちまでの日数の中央値を計算しなかった(灰色の破線で示した)。範囲は標準誤差を示す(6反復)。同じ温度における異なる英文字は、危険率5%で有意差があることを示す(Tukeyの多重比較法)。

モリブデン酸カリウムを添加しなかったとき、メチレンブルーを入れた場合の種子近傍の土壌のメチレンブルーの青色は、播種してから30°Cで2日、20°Cで3日ほどで無色に変化した。色の変化に必要な日数は、モリブデン酸カリウムの量が多くなるに従って、1日ほど長くなる傾向があった(データ略)。

モリブデン酸カリウムの添加量が1.5 mmol kg⁻¹以下のとき、種子周辺に黒い輪が現れた(図4-4)。20°Cに比べて30°Cで黒い輪の出現が速かったが、いずれの温度でもモリブデン酸カリウムの添加量が増加するほど、黒い輪の出現は遅れた。

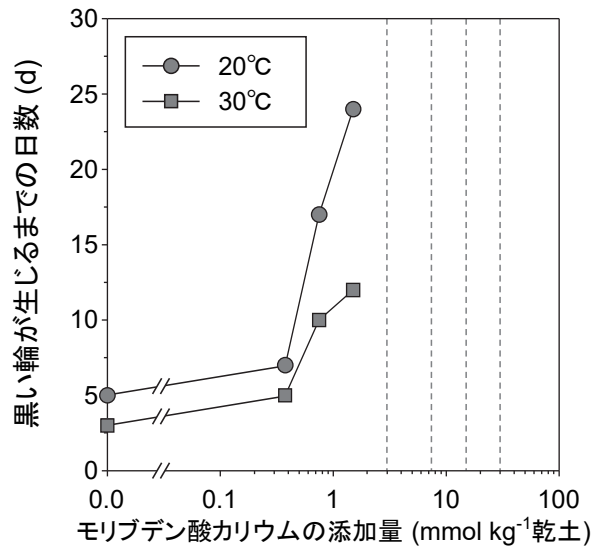


図4-4. モリブデン酸カリウムの添加量が黒い輪が生じるまでの日数に及ぼす影響

黒い輪が生じるまでの日数は、8粒の水稻種子を播種したポットにおいて、種子近傍に最初に黒い輪が生じたまでの日数を意味する。モリブデン酸カリウムの添加量が3.0 mmol kg⁻¹乾土以上のとき、黒い輪は生じなかった(灰色の破線で示した)。

(3) 考察

モリブデン酸カリウムの添加量が 1.5 mmol kg⁻¹ 以下のとき、種子近傍に黒い輪が現れたが、それ以上の添加量では現れなくなった。また、黒い輪が現れた場合でも、モリブデン酸カリウムの添加量が多いほど、出現は遅くなった。モリブデン酸イオンは硫化物イオンの生成を抑制するので、黒い輪は硫化鉄であると示唆される(熊田 1949, 赤松 1969, Ponnampereuma 1972, 木村ら 1984, 萩原ら 1987, 若尾 1987)。また、モリブデン酸カリウムの添加がないと、苗立ちが得られなかったが、モリブデン酸カリウムの添加量を 1.5~15 mmol kg⁻¹ とすると明瞭な苗立ち向上がみられた。このことから、硫化物イオンの生成が苗立ちを阻害していたことが示唆された。モリブデン酸カリウムの添加量が 15 mmol kg⁻¹ のとき、苗立ちに達するまでの日数が長くなり、添加量が 30 mmol kg⁻¹ のとき、苗立ち割合も低下した。このことから、モリブデン酸カリウムの添加量が多すぎると、過剰害が生じることも示唆された。

2) モリブデン塩を添加した土壤における播種深度の影響

試験 1 において、モリブデン酸カリウムの添加によって、水稻の苗立ちが向上することが明らかと

なった。モリブデン酸カリウムを添加すると、深く播種しても安定して苗立ちするのかについて確認するため、播種深度を変えて苗立ち割合を調べた。

(1)方法

土壌を試験 1 と同様に準備した。ただし、モリブデン酸カリウムの添加量は 1.5, 3.0, または 7.5 mmol kg⁻¹ 乾土とした。モリブデン酸カリウムの添加量をこのように設定したのは、試験 1 の結果から種子を 15 mm の深さに播種した際の苗立ち割合が高いことが推定されたためである。必要な播種深度が得られるよう、土壌を増量し、発芽した 8 粒の種子を深さ 20~40 mm に播種した。30℃における出芽と苗立ちの割合を試験 1 と同様に調べた。1 条件に 6 つのポットを使用した。

(2)結果

水稻の出芽と苗立ちの割合は、播種深度が深くなるほど低下した(図 4-5)。播種深度が 40 mm のとき、モリブデン酸カリウムの添加量にかかわらず、苗立ち割合はほぼゼロとなった。1.5~7.5 mmol kg⁻¹ 乾土のモリブデン酸カリウムの添加量の違いによって、出芽や苗立ちの割合に大きな差異はみられなかった。

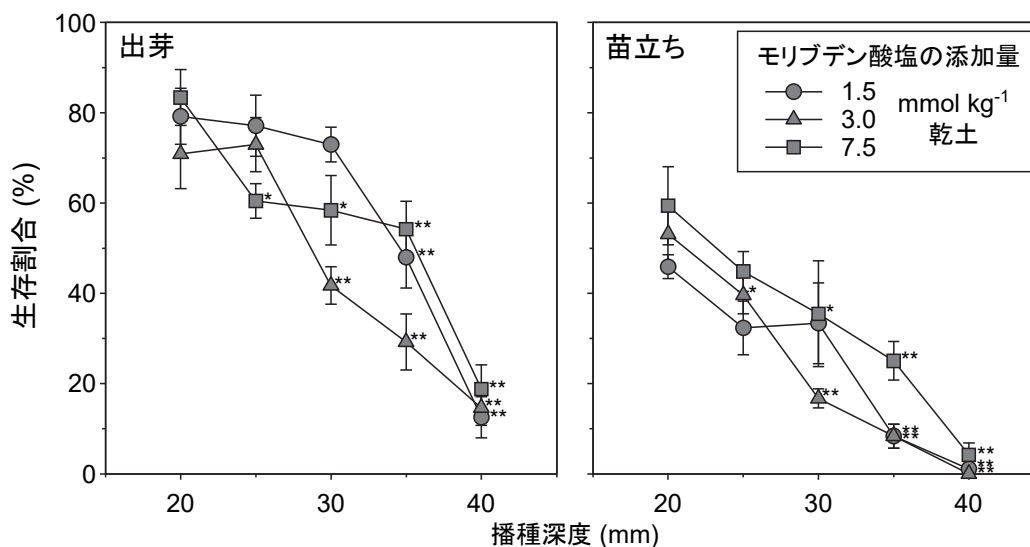


図4-5. 水稻の出芽と苗立ちの割合におけるモリブデン酸カリウムの影響
 モリブデン酸カリウムの添加量が異なる土壌に水稻種子を播種した。これらはグロースチャンパに入れて30℃で加温した。範囲は標準誤差を示す(6反復)。**, *は、播種深度が20 mmのときに比べて、危険率1, 5%で有意差があることを示す(Dunnettの多重比較法)。

(3) 考察

深く播種するほど、出芽や苗立ちにおける生存割合は低くなった。したがって、モリブデン酸カリウムの添加によって硫化物イオンの生成を抑制しても、深く播種すると苗立ちしにくくなると考えられた。深く播種するほど出芽割合も低下していることから、出芽に至るまでの鞘葉の伸長の長さには限界があり、出芽できないことが苗立ちの低下につながっていると考えられた。

3) モリブデン酸塩の添加が土壌の酸化還元電位に及ぼす影響

モリブデン酸カリウムの施用による苗立ち向上効果の機作として、モリブデン酸カリウムが土壌を酸化的に保ち、硫化物イオンの生成を抑制して、苗立ちを向上させた可能性も考えられた。このため、モリブデン酸カリウムの施用条件において、種子近傍土壌の酸化還元電位を計測した。

(1) 方法

モリブデン酸カリウムの添加の有無を変えて、試験 1 と同様にポットを準備した。添加ありでは、第 2 節の結果から、苗立ち割合が高く生育が速い条件として、モリブデン酸カリウムの添加量を 1.5 mmol kg^{-1} 乾土とした。前章の方法 (Hara 2013a) に従って、発芽した水稻種子 (品種: ヒノヒカリ) をポリエチレンの網で包んで、白金電極に付けた。白金電極と比較電極をポットに入った湛水土壌に、深さを 3 cm として差し込んだ。ポットは、試験 1 と同様に、 20°C と 30°C で保温した。1 条件に 6 つのポットを使用した。2 つの電極の電位差を、データロガーを用いて、1 時間おきに 2 週間計測した。酸化還元電位 [Eh (V)] は、白金電極と比較電極の電位差 [PD (V)] と温度 [T ($^{\circ}\text{C}$)] から算出した: $\text{Eh} = \text{PD} + 0.206 - 0.0007 \cdot (T - 25)$ 。

(2) 結果

種子近傍の酸化還元電位は急速に低下し、播種後 20°C では 4 日、 30°C では 2 日で、およそ -0.2 V まで低下した (図 4-6)。酸化還元電位は、モリブデン酸カリウムの添加によって影響を受けなかった。

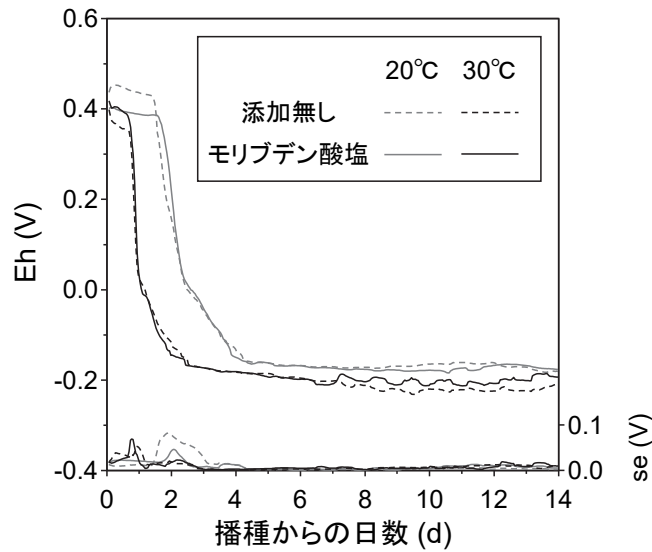


図4-6. 種子近傍土壌の酸化還元電位におけるモリブデン酸塩の影響
 1.5 mmol kg⁻¹のモリブデン酸カリウムを添加した土壌と添加しない土壌を準備し、水稻種子を播種した。播種後に合わせて、20または30°Cに加温した。5~6反復で計測した。標準誤差を図の底に記載した。

(3) 考察

モリブデン酸カリウムの添加は、種子近傍の土壌における酸化還元電位にほとんど影響を与えなかった。このことから、モリブデン酸カリウムは、土壌を酸化的に保って硫化物イオンの生成を抑制するのではなく、土壌は硫化物イオンが生成するほど還元的になっているにもかかわらず、硫化物イオンの生成を抑制すると考えられた。

4) モリブデン酸塩の添加が土壌溶液のモリブデンと硫黄の濃度に及ぼす影響

モリブデン酸カリウムの施用による水稻の苗立ち向上の機作を推測するため、モリブデン酸カリウムを施用した場合における種子近傍の土壌溶液を採取し、モリブデンと硫黄の濃度を計測した。

(1) 方法

ポットを試験1と同様に準備した。前章(Hara 2013a)に記載したように、素焼き管を使って、ポットの土壌溶液を採取した。具体的には、種子近傍の土壌溶液を採取するために、2粒の発芽した種子(品種:ヒノヒカリ)をポリエチレンの網で包んで、素焼き管に付け、これをポットの底に差し込んだ。種子が無い条件の土壌溶液を採取するために、種子を付けずに同様に素焼き管を土壌に差し込んだ。1条件に2つのポットを使用した。2~3日おきに、真空採血管を用いて、およそ10 mLの土

壤溶液を採取し、析出を防ぐために、6 M の塩酸を 0.2 mL 加えた。硫黄とモリブデンの濃度は、ICP-AES(誘導結合プラズマ発光分光分析装置、Varian Vista AX)を用いて分析した。

(2)結果

モリブデン酸カリウムを添加しなかったとき、種子の有りに関係なく、土壤溶液のモリブデン濃度は 0.00 mM であった(図 4-7)。モリブデン酸カリウムを施用したとき、土壤溶液のモリブデン濃度は、最初、0.04~0.08 mM で、その後、急激に減少し、0.01~0.03 mM となった。種子近傍の土壤溶液の濃度は、播種後1週間は、種子が無い条件での土壤溶液よりも高かった。温度は、モリブデンの濃度にほとんど影響しなかった。

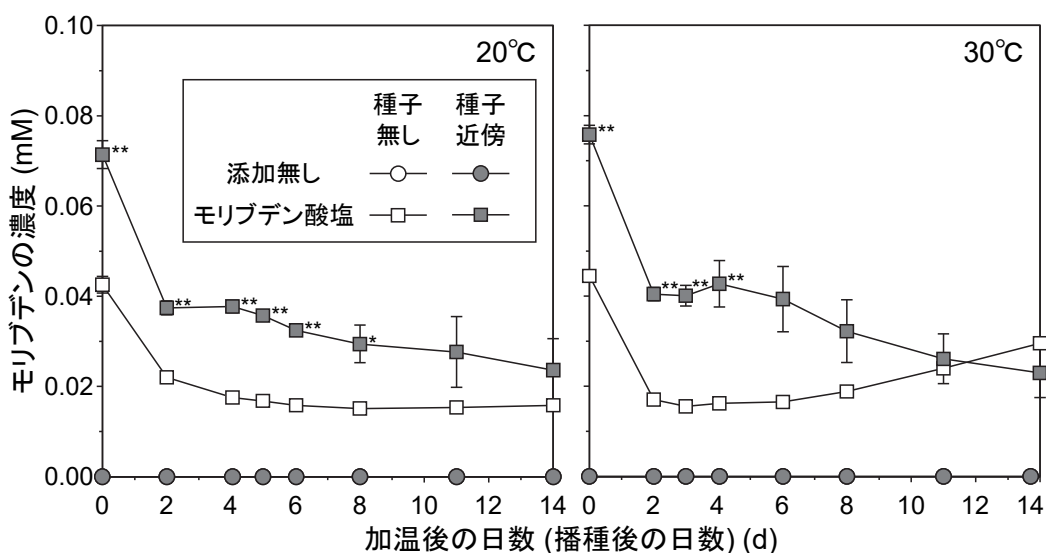


図4-7. 土壤溶液のモリブデンの濃度における種子やモリブデン酸塩添加の影響

1.5 mmol kg⁻¹のモリブデン酸カリウムを添加した土壌と添加しない土壌を準備し、水稻種子を播種した。播種後に合わせて、20または30°Cに加温した。「種子無し」は、播種しなかった土壌の土壤溶液を示す。「種子近傍」は、水稻種子を播種した近傍の土壌の土壤溶液を示す。範囲は標準誤差を示す(3~4反復)。**, *は、「種子無し」に比べて「種子近傍」の濃度が、危険率1, 5%で有意差があることを示す。

種子が無い条件の土壤溶液の硫黄濃度はほとんど減少しなかったが、種子近傍の土壤溶液の硫黄濃度は減少した(図 4-8)。モリブデン酸カリウムを添加しない場合、この減少は播種後、20°Cで5日、30°Cで2日後に始まった。モリブデン酸カリウムを添加した場合、硫黄濃度の減少が遅れた。この減少は、播種後、20°Cで11日後、30°Cで8日後であった。

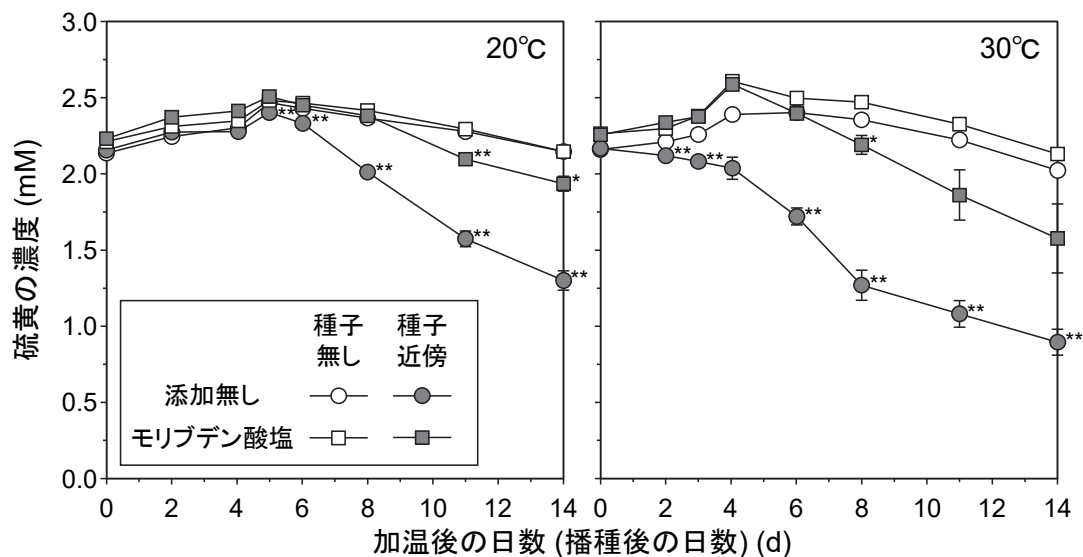


図4-8. 土壤溶液の硫黄の濃度における種子やモリブデン酸塩添加の影響

1.5 mmol kg⁻¹のモリブデン酸カリウムを添加した土壤と添加しない土壤を準備し、水稻種子を播種した。播種後に合わせて、20または30°Cに加温した。「種子無し」は、播種しなかった土壤の土壤溶液を示す。「種子近傍」は、水稻種子を播種した近傍の土壤の土壤溶液を示す。範囲は標準誤差を示す(3~4反復)。**, *は、「種子無し」に比べて「種子近傍」の濃度が、危険率1, 5%で有意差があることを示す。

(3) 考察

モリブデン酸カリウムを添加した場合、土壤溶液のモリブデン濃度は高く推移した。種子の近傍におけるモリブデンの濃度は、種子が無い条件に比べて高く推移したが、この理由は不明である。また、種子が無い条件では、硫黄の濃度はあまり変動しなかったが、種子の近傍の土壤溶液では、硫黄濃度が経時的に低下した。これは、硫黄が不溶化していることを意味しており、硫酸イオンが還元されて硫化物イオンとなり、二価鉄イオンと結合して不溶性の硫化鉄となっていることを示唆していると考えられた。なお、モリブデン酸カリウムを添加した場合でも、種子近傍土壤の硫黄濃度は低下したが、モリブデン酸カリウムを添加した場合に比べてその低下は遅く、その程度は小さかった。これは、モリブデン酸イオンによる硫化物イオンの生成抑制を反映すると考えられた。

3. 章考察

1) モリブデン酸塩の添加による苗立ちの向上

20°Cでも30°Cでも、1.5~15 mmol kg⁻¹乾土のモリブデン酸カリウムを土壤に添加することによって、

水稻の苗立ちが向上した(図 4-1)。全てのポットに塩化カリウムを添加しているため、この効果はカリウムイオンによるものではないと考えられる。モリブデンは植物の微量必須元素の一つであり、肥料としても用いられる(Marschner 1995, MacLeod et al. 1997)。それゆえ、モリブデンの栄養的効果によって、苗立ちが向上した可能性は否定できない。しかし、他の微量必須元素と比較してもモリブデンの必要量は低いため(Marschner 1995)、その可能性は低いと考えられる。むしろ、モリブデン酸イオンの添加によって、苗立ちを抑制する要因が除かれたと考えるべきである。

種子の近傍の酸化還元電位は、モリブデン酸塩の添加によって影響を受けず、急速に低下し、約-0.2 V で一定となった(図 4-6)。酸化還元電位が-0.05~-0.18 V になると硫化物イオンが生成するとされているので(Marschner 1995)、観察された酸化還元電位から、硫化物が生成していると考えられた。しかし、水稻の苗成ちはモリブデン酸塩の添加によって改善された。このことは、モリブデン酸塩の添加は、酸化還元電位に影響せずに苗成ちを改善することを示している。一方、水稻直播で、酸素発生剤として用いられている過酸化カルシウムは、酸化還元電位を高く保つことで苗成ちを向上させる(萩原ら 1990)。

種子近傍に生じた黒い輪は硫化鉄と考えられる(熊田 1949, 赤松 1969, Ponnampereuma 1972, 木村ら 1984, 萩原ら 1987, 若尾 1987)。黒い輪の出現は硫化物イオンが発生したことを示唆する。このことは、種子近傍で硫黄の濃度が低下したこと(図 4-8)によっても支持されると考えられる。なぜなら、種子近傍の還元化によって硫化物イオンが生成すると、可溶性の硫酸イオン(可溶性の硫黄)は不溶性の硫化鉄(不溶性の硫黄)に変化する。1.5 mmol kg⁻¹ 乾土以下のモリブデン酸カリウムを添加したとき、添加しない場合に比べて、黒い輪の出現と種子近傍での硫黄濃度の減少が遅れた(図 4-4, 4-8)。さらに、3 mmol kg⁻¹ 乾土以上のモリブデン酸カリウムを添加したとき、黒い輪は出現しなかった。このときの土壌溶液のモリブデン濃度は 0.14 mM 以上である(図 4-2)。モリブデン酸イオンの濃度が 0.2 mM 以上のとき、硫化物イオンを生成する硫酸還元菌の増殖が半分には抑えられることが報告されている(Biswas et al. 2009)。硫化物イオンの基になる硫酸イオンとモリブデン酸イオンは分子構造が似ているので、モリブデン酸イオンの添加が硫化物イオンの生成を抑制したと考えられる(堀ら 1990, Marschner 1995, MacLeod et al. 1997)。

1.5~15 mmol kg⁻¹ 乾土のモリブデン酸カリウムを添加することによって、苗成ち割合が改善した(図 4-1)。このとき、土壌溶液のモリブデンの濃度は0.04~1.5 mMであった。このことは、土壌へのモリブデン酸塩の添加が、硫化物の生成を抑制することによって、苗成ちを向上させていることを

示唆している。そして、硫酸塩を添加した湛水土壌における水稻の苗立ちを阻害していた主たる要因が硫化物の生成であったことを示唆している。前章では、硫酸塩を添加した湛水土壌における苗立ち不良が、土壌をオートクレーブすることによって改善された(Hara 2013a)。このことも、硫酸還元菌によって算出される硫化物イオン(古坂 1968)によって、苗立ちが阻害されていたことを示唆すると思われる。

モリブデン酸塩を 30 mmol kg^{-1} 以上添加したとき、出芽は改善し、種子近傍に黒い硫化鉄が出現しなかったにもかかわらず、水稻の苗成ちは改善しなかった(図 4-1, 4-4)。加えて、水稻の生育は、モリブデン酸塩の添加量が多くなるほど遅くなった(図 4-3)。試験 1 では、モリブデン酸塩の添加量が多い場合、種子近傍のメチレンブルーの退色も遅れた。これらの結果は、多量のモリブデン酸塩の添加が、水稻の生育を遅らせることを示唆している。したがって、水稻の苗成ちを向上させるために適したモリブデン酸添加量は、およそ $1.5 \sim 15 \text{ mmol kg}^{-1}$ 乾土であり、このときのモリブデン濃度はおよそ $0.04 \sim 1.5 \text{ mM}$ であった。

2) モリブデン酸塩の添加における播種深度の影響

3 mmol kg^{-1} 乾土のモリブデン酸カリウムを施用すると、苗成ちに至るまでの間、硫化物イオンの生成が抑制された(図 4-4)。モリブデン酸塩を施用した場合でも、水稻の苗成ちは、播種深度が深くなると悪くなった。水稻の出芽も悪くなったので、苗成ち割合の低下は出芽割合の低下の影響を受けたと考えられる。播種深度が深くなるほど、出芽割合が悪くなったのは、硫化物イオンの生成によるものではなく、鞘葉の生育能力に限界があったためかもしれない。一般に、過酸化カルシウムを種子被覆してその後落水する方法で望ましいとされる播種深度は $10 \sim 20 \text{ mm}$ とされる(吉永ら 2007)。モリブデン酸塩を添加し、 20 mm の深さに播種して、落水しなかったときの苗成ち割合は約 50%であった(図 4-5)。この結果は、播種深度の影響が、モリブデン酸塩を添加した場合でも、過酸化カルシウム剤で被覆した場合でもあまり変わらないことを示している。また、モリブデン酸塩によって、硫化物イオンの生成を阻害したとしても、水稻種子を浅く播種することが望ましいことを示唆している。

3) 土壌の還元によって種子が障害を受けるしくみ

モリブデン酸塩は、硫酸還元菌によって、硫酸イオンから硫化物イオンが発生することを抑制す

ることが報告されている(堀ら 1990, Biswas et al. 2009)。本章の結果において、モリブデン酸塩の添加によって苗立ちに明確な向上が得られたことは、硫酸還元菌から生成される硫化物が、水稲直播における苗立ち阻害の一要因であったことを示している。この考えは前章において、硫酸塩を施用すると湛水土壤中に播種された種子の苗立ちを抑制したことや、冷涼な温度であっても、硫化物が生成する程度までに酸化還元電位が急速に低下したこととも矛盾しない(Hara 2013a)。

モリブデン酸塩の添加によって、硫化物イオンが生成されなければ、土壤の酸化還元電位が低くても苗立ちした(図 4-1, 4-6)。このことは、硫酸塩濃度が低く、硫化物イオンが生成されなければ、酸化還元電位が低い条件でも水稲は苗立ちする可能性を示している。

二価鉄イオンや有機酸も水稲の苗立ちを阻害すると考えられている(Hagiwara and Imura 1993)。しかし、本章の試験 4 において、土壤溶液の鉄濃度を調べたところ、0.5 mM を超えていたが、水稲は苗立ちした。したがって、硫化物イオンによって障害を受けたときに、二価鉄イオンや有機酸は水稲の苗立ちを阻害するかもしれないが、硫化物イオンによって障害を受けてなければ、苗立ちを阻害しない可能性もある。また、二価鉄が硫酸還元菌の生育における制限因子になっていることや、有機酸は硫酸還元菌の電子供与体や炭素供給源であることが分かっている(Marchal et al. 2001)。このことから、二価鉄イオンや有機酸は硫化物の生成を促進することによって、苗立ちを阻害している可能性も考えられた。本研究で、硫化物イオンが苗立ち阻害の一因であることが明確になったが、苗立ちには他の要因による阻害も報告されていることから、それらの解明も必要である。

4. 章摘要

水稲栽培において、直播は省力的な方法であるが、その普及はまだ十分でない。土壤が著しく還元した際に生成する硫化物イオンは、水稲の苗立ちを抑制する一因と疑われる。硫化物イオンは微生物によって硫酸イオンから生成されるが、モリブデン酸イオンはその生成を抑制する。そこで、硫酸塩を施用した湛水土壤中での水稲の苗立ちに対するモリブデン酸塩の効果を調べた。硫酸塩を施用した湛水土壤に、乾土あたり 1.5~15 mmol kg⁻¹ のモリブデン酸カリウムを施用すると、水稲の苗立ちは向上した。また、モリブデン酸カリウムの施用によって、種子近傍の土壤溶液における硫黄濃度の低下が遅れ、種子近傍における不溶性の硫化鉄と思われる黒い環状斑の生成も遅れた。硫化鉄の生成抑制は、モリブデン酸塩によって硫化物イオンの生成が抑制されたことを示唆する。モリブデン酸塩の施用にかかわらず、種子近傍の酸化還元電位は硫化物イオンが生成す

る水準まで低下したので、モリブデン酸塩は酸化還元電位を介して硫化物の生成を抑制したのではないと推察された。以上のようなモリブデン酸塩による水稻の苗立ち向上は、硫黄に富む土壌において、モリブデン酸塩の施用によって湛水直播での苗立ちが向上する可能性とともに、硫化物イオンが水稻直播の苗立ちを抑制する一因になっている可能性を示している。

第5章 硫酸塩を施用した土壌におけるモリブデン化合物の種子被覆による水稻の苗立ち向上

1. 章緒言

前章において、モリブデン酸塩を土壌に添加すると、硫酸イオンからの有害な硫化物イオンの生成が阻害され、水稻の苗立ちが向上することを示した(Hara, 2013b)。モリブデン酸塩の添加による苗立ち向上は、特に土壌に硫黄が多い水田で、起きると考えられる。しかし、水田に均一にモリブデン酸塩を添加するには、多量のモリブデン酸塩が必要となる。

そこで、本章では、土壌に添加するよりも必要量が少なくなると期待される、種子へのモリブデン化合物の被覆によって、水稻の苗立ちを向上させることを検討した。前章において、水溶性のモリブデン酸カリウムを土壌に多量に施用すると、水稻の生育が抑制されることが観察されたので、水に溶けにくい微溶性のモリブデン化合物を用いることにした。ここでの目的は、種子被覆に適した種類のモリブデン化合物と、適した使用量を明らかにすることである。まず、検討しやすい 30°Cの条件で様々なモリブデン化合物を種子被覆して効果を調べた。次に、その中から選んだものについて、幾つかの条件で種子被覆の効果を調べた。

本章は、Hara(2013c)を基に、加筆して取りまとめた。

2. 試験

1) 様々なモリブデン化合物を種子に被覆したときの苗立ち向上効果

入手できた微溶性のモリブデン化合物を、様々な量で催芽種子に被覆し、硫酸アンモニウムを添加した湛水土壌中に播種して、20°Cにおける苗立ち割合を調べた。

(1) 方法

市販の洗濯糊を10倍に希釈したポリビニルアルコール溶液に、催芽した水稻種子(品種:ヒノヒカリ)を1分間浸漬し、脱水してから、7種類のモリブデン化合物について、量を0~2 mol-Mo kg⁻¹ 乾粒と変えて、被覆した。被覆に用いたモリブデン化合物は、モリブデン金属微粉末(MoM と略、以下同じ)、三酸化モリブデン(MoO)、モリブデン酸(MoH)、モリブデン酸マグネシウム(MoMg)、モリブデン酸カルシウム(MoCa)、リンモリブデン酸アンモニウム(MoPNH)、リンモリブデン酸カリウム(MoPK)である。

福岡県筑後市の水田(細粒質普通灰色低地土、軽埴土)から作土を採取し、風乾せずに 10 mm

の篩でふるった湿潤土を、直径 8 cm のポットに乾土換算で 100 g ずつ詰めた。このポットに、4 mmol kg⁻¹ 乾土に相当する硫酸アンモニウムと、1 mmol kg⁻¹ 乾土に相当する塩化アンモニウムを蒸留水に溶かして加え、水分の重量が乾土に換算した重量の 1.5 倍となるように水分量を調整した。湿潤土と溶液の混合物を 1 時間震盪したのち、冷蔵庫で 2 日静置した。窒素の施用量は、1 m² の土壌の量を 100 kg と仮定して、11 g m⁻² となる。この量は一般的な基肥施用量よりも多いが、添加した硫酸イオンからの硫化物イオンの生成を促進することで、モリブデン化合物の効果を明らかにする目的で行った。

前章と同様に、1 つのポットに 8 粒の被覆した水稻種子を土壌の中に 15 mm の深さでピンセットを用いて播種した (Hara, 2013b)。ポットは、30°C の恒温で 12 時間隔で蛍光灯が点灯するグローブチャンバに入れた。ポットの位置の光量は 0.1 mmol m⁻² s⁻¹ であった。ポットには蒸留水を時々添加し、水位を 15 mm に維持した。第 3 葉が現れた時点を苗立ちとして、播種後、21 日目に苗立ちした個体の割合を調べた。1 条件に 6 つのポットを使用した。

(2) 結果

催芽種子を湛水土壌中に播種し、30°C に静置したとき、モリブデン化合物を被覆しなかった場合の苗立ち割合は 20% 未満であったが、0.05~2 mol-Mo kg⁻¹ 乾粒で MoO, MoH, MoPNH を被覆した場合、0.05~1 mol-Mo kg⁻¹ で MoMg を被覆した場合、1 mol-Mo kg⁻¹ で MoCa を被覆した場合、また、0.05 または 2 mol-Mo kg⁻¹ で MoM を被覆した場合、水稻の苗立ち割合が向上した (図 5-1)。MoCa や MoM の苗立ち向上効果は、他の化合物に比べて小さかった。また、MoO, MoH, MoMg, MoCa を被覆した場合、0.5~2 mol-Mo kg⁻¹ 乾粒というように量が多いと、苗立ち向上効果が弱まる傾向が得られた。しかし、MoPNH や MoPK で被覆した場合は、2 mol-Mo kg⁻¹ でも、苗立ち効果は弱まらなかった。

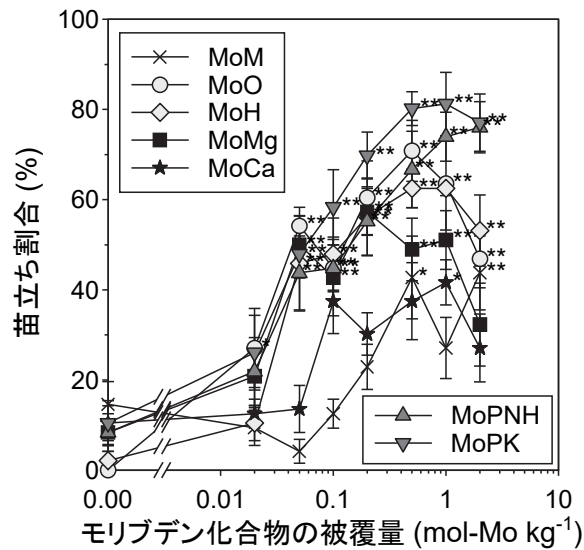


図5-1. 様々なモリブデン化合物を被覆した水稻種子の苗立ち割合

モリブデン化合物を浸種種子に被覆、30°C・蛍光灯下(12 h d⁻¹, 0.1 mmol m⁻² s⁻¹)で栽培した。モリブデン化合物の略号は次の通り。MoM: モリブデン金属粉、MoO: 三酸化モリブデン、MoH: モリブデン酸、MoMg: モリブデン酸マグネシウム、MoCa: モリブデン酸カルシウム、MoPNH: リンモリブデン酸アンモニウム、MoPK: リンモリブデン酸カリウム。範囲は標準誤差を示す(6反復)。**, *は、モリブデン化合物を被覆しない条件と比較して、危険率1, 5%で有意差があることを示す(Dunnettの多重比較法)。

(3) 考察

ある程度の量を被覆したとき、いずれのモリブデン化合物を被覆した場合でも、水稻の苗立ちが向上する傾向がみられた。したがって、これらのモリブデン化合物が、モリブデン酸イオンを供給することによって、硫化物イオンの生成が抑制され、苗立ちが向上することを示唆している。MoO, MoH, MoMg, MoCa を被覆した場合、被覆量が多すぎると、苗立ち割合の向上が抑制される傾向がみられた。前章では、水溶性のモリブデン酸カリウムを多量に施用した際、苗立ちの向上が抑制される過剰害が生じる傾向がみられた。したがって、これらの微溶性資材でも、被覆量が多すぎると、過剰害が生じることが示唆された。しかし、MoPNH や MoPK では、実施した被覆量が最も多い条件でも、苗立ち割合の向上が抑制される傾向はなかった。

2) 様々な条件においてモリブデン化合物を種子に被覆したときの苗立ち向上効果

被覆量が多い条件でも苗立ち向上効果が低下しなかった MoPNH と MoPK、および安価な MoO を用いて、さらに、催芽条件、温度条件、光条件を変えて、これらのモリブデン化合物を被覆した場合の苗立ち割合を調べた。

(1) 方法

試験 1 において、有望と考えられた MoO、MoPNH、MoPK を、催芽した種子と、催芽していない種子(非催芽種子)に試験 1 と同様に被覆した。この種子を、試験 1 と同様に、調整した土壤に 15 mm の深さに播種し、次の条件で栽培した。(a) 非催芽種子を播種し、20°C の恒温で 12 時間隔で蛍光灯が点灯するグロースチャンバに入れた。(b) 非催芽種子を播種し、30°C の恒温で蛍光灯が点灯するグロースチャンバに入れた。(c) 催芽種子を播種し、20°C の恒温で 12 時間隔で蛍光灯が点灯するグロースチャンバに入れた。(d) 催芽種子を播種し、20°C の恒温で 12 時間隔でメタルハライドランプが点灯するグロースチャンバに入れた。このときの、ポットの位置の光量は $0.4 \text{ mmol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ であった。試験 1 と同様に、播種後、21 日目(30°C)または 28 日(20°C)に苗立ちした個体の割合を調べた。1 条件に 6 つのポットを使用した。

(2) 結果

MoO、MoPNH、MoPK を非催芽種子に被覆して 20°C としたとき(図 5-2a)、非催芽種子に被覆して 30°C としたとき(図 5-2b)、催芽した種子に被覆して 20°C (図 5-2c) としたとき、同様に、 $0.05 \sim 2 \text{ mol-Mo kg}^{-1}$ 相当のモリブデン化合物を被覆すると、苗立ちが向上した。さらに、催芽種子に被覆して、20°C で、光量が多いメタルハライドランプの下に置いたときも、同様に、 $0.05 \sim 2 \text{ mol-Mo kg}^{-1}$ 相当のモリブデン化合物を被覆すると、苗立ちが向上した(図 5-2d)。しかし、モリブデン化合物の被覆量が $0.1 \sim 2 \text{ mol-Mo kg}^{-1}$ と多くなると、苗立ち割合はあまり変わらなくなるか、やや低下する傾向もみられた。

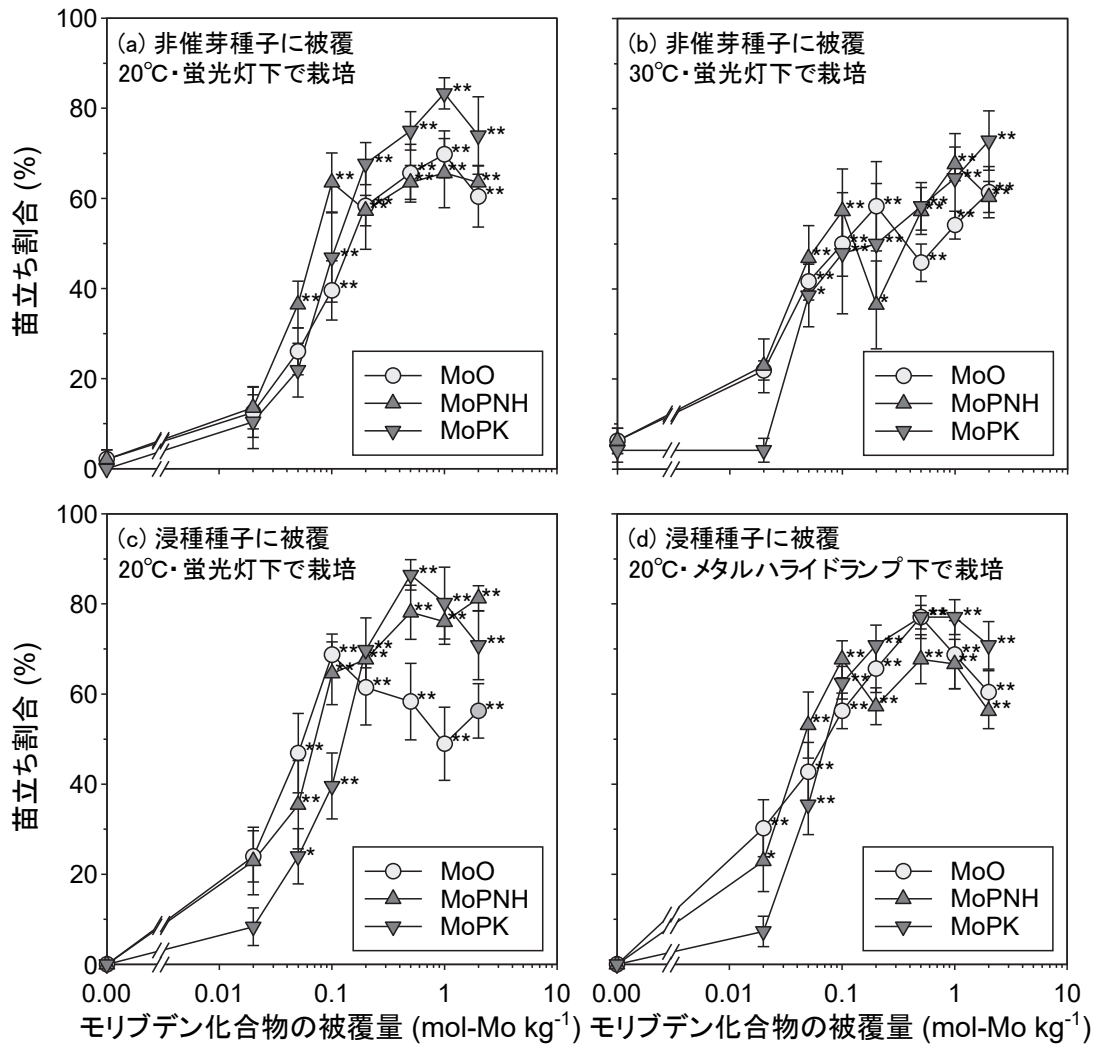


図5-2. 浸種の有無・温度・光量が異なる様々な条件における
モリブデン化合物を被覆した水稻種子の苗立ち割合

モリブデン化合物を浸種していない乾燥種子または浸種種子に被覆し、20または30°Cで、蛍光灯(0.1 mmol m⁻² s⁻¹)またはメタルハライド灯(0.4 mmol m⁻² s⁻¹)で照らして(12 h d⁻¹)、栽培した。モリブデン化合物の略号は次の通り。MoO: 三酸化モリブデン、MoPNH: リンモリブデン酸アンモニウム、MoPK: リンモリブデン酸カリウム。範囲は標準誤差を示す(6反復)。**, *は、モリブデン化合物を被覆しない条件と比較して、危険率1, 5%で有意差があることを示す(Dunnettの多重比較法)。

(3) 考察

調査した4条件における苗立ちの傾向は、全体的に試験1と同様であり、モリブデン化合物の被覆量が多くなるほど、苗立ちが向上する傾向がみられた。また、非催芽種子に被覆して30°Cで蛍光灯下に置いた場合や浸種種子を被覆し20°Cで蛍光灯下に置いた場合、MoPNHやMoPKを被覆したときに比べてMoOを被覆したときに、被覆量が多いと苗立ち割合の上昇がやや小さくなる

傾向があったが、全体として被覆した化合物による差異も小さかった。全体的に、苗立ちが顕著に向上していくのは被覆量が $0.1 \text{ mol-Mo kg}^{-1}$ までで、被覆量がそれを超えても、苗立ち割合のさらなる向上はわずかであるか、逆に小さくなる場合もみられた。このことから、苗立ち向上のための技術に用いる場合、被覆量は $0.1 \text{ mol-Mo kg}^{-1}$ 程度で良いと考えられ、その程度であれば安価な三酸化モリブデンでも遜色はないと考えられた。

3) 様々なモリブデン化合物の溶解性とpH

モリブデン化合物の効果の違いを理解するために、用いたモリブデン化合物の溶解性および pH を計測した。合わせて、モリブデン化合物の多くは水に溶けると酸性を示すので、土壤に添加したときの pH の変化による影響を調べるため、酸化マグネシウムを混合して pH を上げた場合についても、モリブデン化合物の溶解性および pH を計測した。

(1) 方法

それぞれのモリブデン化合物は、約 25°C の室温で、 0.1 M-Mo となるように蒸留水を加えてから、十分に懸濁させ、遠心分離 ($10,000 \text{ rpm}$, 10 分) を行った。上澄み液を $10\sim 100$ 倍に希釈して、ICP-AES (誘導結合プラズマ発光分光分析装置、Varian Vista AX) を用いてモリブデンの濃度を定量した。加えて、同様に作成したモリブデンの懸濁液の pH を pH メーター (Fisher Scientific AR50) で計測した。また、これらのモリブデン化合物が、土壤中で中和された場合を想定して、モリブデン化合物と当量の 0.1 M の酸化マグネシウムを混合した場合についても、同様に、溶解度と pH を計測した。

(2) 結果

モリブデン化合物のみを懸濁したときの懸濁液のモリブデンの濃度は、MoPNH が最も低く (0.2 mM)、MoCa (1.2 mM)、MoM (2.9 mM)、MoPK (4.2 mM) が MoPNH よりも少し高くなった (表 5-1)。MoO と MoH は $8\sim 9 \text{ mM}$ とほぼ同じ濃度であった。一方、MoMg は 92 mM と高く、全て溶けた場合が 100 mM となることを考慮すると、92%が溶解したことになる。また、MoM、MoO、MoH、MoPNH、MoPK を懸濁させたときの pH は $2.5\sim 4.0$ の酸性であり、MoMg、MoCa を溶解させたときの pH は $6.1\sim 7.4$ の中性であった。

表5-1. 酸化マグネシウムの無添加または添加条件におけるモリブデン化合物の溶解性とpH

モリブデン化合物 ^{a)}	酸化マグネシウム無添加 ^{b)}		酸化マグネシウム添加 ^{c)}	
	Mo (mM) ^{d)}	pH ^{e)}	Mo (mM) ^{d)}	pH ^{e)}
MoM	2.9	3.5	9.3	9.8
MoO	8.1	2.5	101	5.9
MoH	8.8	3.6	102	8.8
MoMg	92	6.1	94	9.7
MoCa	1.2	7.4	1.1	10.2
MoPNH	0.2	4.0	97	6.1
MoPK	4.2	3.2	99	6.2

(a) モリブデン化合物の略号は次の通り。MoM: モリブデン金属粉、MoO: 三酸化モリブデン、MoH: モリブデン酸、MoMg: モリブデン酸マグネシウム、MoCa: モリブデン酸カルシウム、MoPNH: リンモリブデン酸アンモニウム、MoPK: リンモリブデン酸カリウム (b) モリブデンとして0.1 molに相当する化合物を1 Lの蒸留水に入れて懸濁させた (c) モリブデンとして0.1 molに相当する化合物に、pHを上げる目的で当量の酸化マグネシウムを加えて、1 Lの蒸留水に入れて懸濁させた (d) 上澄み液におけるモリブデンの濃度 (e) 懸濁液のpHの値

一方、モリブデン化合物と合わせて、当量の酸化マグネシウムを混合して懸濁させたときの上澄み液のモリブデン濃度は、MoCa が 1.1 mM と低く、次いで MoM が 9.3 mM と低かった(表 5-1)。その他の MoO、MoH、MoMg、MoPNH、MoPK はおよそ 100 mM となり、ほぼ全てが溶解していた。このときの pH は、MoO、MoPNH、MoPK が 6 程度であり、MoM、MoH、MoMg、MoCa が 8.8~10.2 で、アルカリ性であった。

(3) 考察

試験 1 や試験 2 において、苗立ち向上効果が高く、多量に被覆しても苗立ち向上効果が低下しにくかった MoPNH や MoPK は、水における溶解度が低いが、pH が上がるにしたがって、溶解度が高くなることが分かった。このことが、比較的多量に被覆しても苗立ち向上効果が低下せず、しかも土壌の pH 緩衝効果によって pH が徐々に上昇したときに、適度なモリブデン酸イオンが供給されるため、苗立ち効果が安定して得られると考えられた。安価な MoO も、水における溶解度はやや高かったものの、同様に pH が上がるにしたがってモリブデンの溶解度が高まることから、実際での利用において適していると考えられた。

3. 章考察

1) 微溶性モリブデンの種子被覆による水稻の苗立ちの向上効果

試したどのモリブデン化合物を種子に被覆した場合でも、硫酸塩を添加して湛水した土壌に播種したときの水稻の苗立ちが向上した(図 5-1)。被覆した種子を土壌に播種した際、種子に被覆し

たこれらの微溶性モリブデン化合物から、モリブデン酸イオンが少しずつ供給されると考えられる。前章において土壌にモリブデン酸カリウムを添加したときと同じように(Hara, 2013b)、モリブデン酸イオンは硫酸イオンから有害な硫化物イオンの生成を抑制して、水稻の苗立ちを向上させると考えられる。モリブデン酸塩ではないモリブデン金属粉(MoM)でさえ、被覆すると苗立ち向上効果が得られた。これは、モリブデン金属の表面が酸化されており、その三酸化モリブデン酸からモリブデン酸イオンが少しずつ供給されていると考えられる。このことは、MoMの懸濁液が、三酸化モリブデンの懸濁液と同様に酸性になっており、酸化マグネシウムを添加すると、モリブデンの濃度がわずかに上昇すること(表 5-1)からも推察される。

三酸化モリブデン(MoO)とモリブデン酸(MoH)とモリブデン酸マグネシウム(MoMg)は、他の化合物と比べて、溶解性が高かった(表 5-1)。苗立ちの改善効果は、モリブデンとして $0.2\sim 0.5$ mol-Mo kg^{-1} 乾粒を被覆したとき、高くなった。さらに、モリブデン被覆量が多くなると、苗立ち改善効果が低下する傾向があった。特に、最も溶解しやすいモリブデン酸マグネシウムは、モリブデンの被覆量を多くすると、苗立ちが大きく低下する傾向がみられた。このことは、モリブデン酸イオンが多すぎると苗立ち向上効果が弱まることを示している。一方、リンモリブデン酸アンモニウム(MoPNH)やリンモリブデン酸カリウム(MoPK)による苗立ち向上効果は、他の化合物に比べて、被覆量が多い条件でも弱まることはなかった。このことは、MoPNH や MoPK の溶解性が他の化合物よりも低いからと考えられる。

モリブデン金属粉(MoM)とモリブデン酸カルシウム(MoCa)の苗立ち向上効果は、他のモリブデン化合物と比べて、かなり低かった(図 5-1)。これは、これらの化合物の溶解度が低すぎるからと考えられる。MoM の低い溶解性は、モリブデン金属の表面にわずかな酸化物が存在し、それからしかモリブデン酸イオンが溶解しないためと考えられる。MoCa の低い溶解性は、その化学的特性によると考えられる。MoPNH と MoPK の溶解性は低いにもかかわらず、苗立ちの向上効果は高かった。このことは、これらの化合物は pH の上昇に伴って溶解性が高まるためと考えられる(表 5-1)。MoPNH や MoPK によって被覆された種子が土壌に播種されると、土壌には pH の緩衝作用があるので、種子の近傍の pH は $6\sim 7$ に上昇すると考えられる。MoPNH や MoPK のようなリンモリブデン酸塩は、pH が $5\sim 6$ ぐらいで、溶解度が高いモリブデン酸塩に変化する(Tsigdinos 1974)。それ故、MoPNH や MoPK はそれ自体の溶解性が低いにもかかわらず、土壌中に適量のモリブデン酸イオンを供給できると考えられた。さらに、多量の MoPNH や MoPK で被覆した場合でさえ、苗立ち向上

効果が抑制されることはなかったが、これは元々の溶解性が低いためと考えられる。それにもかかわらず、MoMとMoCaを除けば、いずれの資材も、種子に適切な量(0.05~0.5 mol-Mo kg⁻¹ 乾粃)を被覆すると、苗立ちが向上した。

2) 水稻直播におけるモリブデン化合物による被覆の有効性

20℃や30℃の温度条件や、0.1, 0.4 mmol m⁻² s⁻¹の光条件にかかわらず、MoO や MoPNH や MoPK を用いた種子被覆によって苗立ちが向上した(図 5-1, 5-2)。苗立ちにおけるそれぞれのモリブデンの効果は、温度や光条件、または被覆前の浸種の有無にかかわらず、安定して得られた。したがって、これらのモリブデン化合物は、硫化物イオンが生成しうる水田において水稻直播を行う場合に、水稻の苗立ちを向上するために利用できると考えられる。

本章の試験において、土壌への硫酸アンモニウムの添加量が一般的な量よりも多かった(10 g N m⁻²)。しかし、一般的な量に匹敵するような窒素で2~4 g m⁻²程度の硫酸アンモニウムの施用でも、水稻の苗立ちは障害を受ける(Yamamoto et al. 2004, Hara 2013a)。したがって、これらのモリブデン化合物で被覆された種子は、硫酸アンモニウムなどの硫酸塩を含んだ基肥肥料として施用した際に、効果を発揮すると考えられる。前章の結果によれば、硫酸塩を添加しない場合でさえ、硫化物イオンは、もともと土壌に存在している硫酸イオンから生成される。したがって、硫酸アンモニウムを施用しなくても、硫黄が多い水田においては、モリブデン化合物の種子被覆が効果的であると考えられた。

水稻の苗立ちを向上するために種子被覆することに必要なモリブデン化合物は、およそ 0.1 mol-Mo kg⁻¹ 乾粃(図 5-1, 5-2)であった。もし、10 a の水田に種子を3 kg 播種する場合、必要なモリブデン含量は10 a あたり0.3 mol-Mo である。一方、前章の結果によれば、同様に水稻の苗立ちを向上するために、播種前に水田土壌にモリブデン化合物を施用する場合、必要なモリブデン量はおよそ2 mmol kg⁻¹ 乾土である。この場合、1 m² の水田を100 kg の乾土と換算すると、必要なモリブデンの量は10 a あたり200 mol-Mo となる。したがって、必要なモリブデン量は、土壌への施用に比べて、種子被覆ではかなり少なくて済む。10 a 分の種子被覆に、最も安価である三酸化モリブデン(MoO₃)を用いる場合の必要な量は、43 g (0.3 mol-Mo)であり、1 kg の Mo を3,000 円として、その費用は130 円となる。この費用はかなり安いので、モリブデン化合物による種子被覆が、実際の水稻栽培に利用できると考えられる。

加えて、モリブデンは植物の微量必須元素であり、しばしば肥料にも加えられる(Marschner 1995, MacLeod et al. 1997)。一般的な施用法によれば、モリブデン欠乏の作物に対して、10 aあたり30～50 g (約 0.1～0.3 mol-Mo)のモリブデン酸ナトリウムやモリブデン酸アンモニウムが施用される(高橋ら 1980)。種子被覆のためのモリブデン化合物の使用量は、肥料としての使用量に比べても少ない。したがって、種子被覆によってモリブデンを使用することで、作物や水田に悪い影響が生じる可能性は低いと考えられる。

今後は、様々な条件において、モリブデン化合物の種子被覆が水稻の苗立ちや生育や収穫に及ぼす効果を調べる必要がある。また、その効果と、水田土壌の硫黄含量との関係を調べることで、モリブデン化合物の適切な利用に必要と考えられる。

4. 章摘要

水稻栽培において、直播は省力的な方法であるが、苗立ちが不安定であることもあり、その普及はまだ十分でない。これまで、硫酸塩を施用した土壌中に水稻種子を播種するとその苗立ちが不良となるが、可溶性のモリブデン酸を土壌に施用することで、その苗立ちが改善することを報告した。ここでは、土壌に可溶性のモリブデン酸塩を施用することに替えて、モリブデン資材の必要量を減らすため、微溶性のモリブデン資材を種子に被覆して苗立ちを向上させることを検討した。その結果、硫酸塩を施用した土壌中に播種した場合において、試したいずれの微溶性モリブデン資材を種子に被覆しても苗立ちが改善した。特に、モリブドリン酸アンモニウムとモリブドリン酸カリウムは効果的で、多量に被覆しても苗立ちが阻害されにくかった。また、最も安価なモリブデン資材である三酸化モリブデンも効果的であった。したがって、これらのモリブデン資材を水稻種子に被覆することによって、硫黄が多い湛水土壌における水稻の苗立ちを改善できる可能性がある。

第6章 総合考察

これまでも水稲作では省力化や低コスト化が求められてきたが、高齢化による担い手不足やTPP（環太平洋戦略的経済連携協定）への参加といった農産物自由化路線から、以前にも増して、省力化や低コスト化の要請が強くなっている。直播は、最も手間がかかる苗作りが不要となることから、省力化や低コスト化を達成する方法として期待されてきた。また、水稲を牛、豚、鳥などの家畜の餌として利用する飼料用水稲の普及に伴って、食用よりも粗放的で良いので、より省力的で低コストな直播を活用する動きがある。田植えと同じように代かきをする湛水直播は、代かきをしない乾田直播と異なり、代かきによって漏水を止めることができるので、ほとんどの水田に適用でき、また土壌が濡れていても作業ができるため、天候に左右されず、日程的な許容性も高い。その湛水直播では、苗立ちが不安定なことが大きな問題点であった。しかし、様々な技術が開発され、現在では、湛水直播では、酸素を供給する過酸化カルシウム剤を被覆した種子を土壌中に播種し、かつ水田を湛水せずに、落水したままで管理することで、安定的な苗立ちを確保できるようになった。しかし、直播面積は未だ 1%程度であり、普及は遅々としている。この要因は、移植の方法が高度に機械化されて、省力的で低コストとなってきたので、相対的に現在の直播の方法の省力性や低コスト性が際立たないためと考えられる。したがって、直播の方法もより省力的で低コストとすることが課題となっている。湛水直播において、過酸化カルシウムの種子被覆は、苗立ち安定化に重要な技術となっている。しかし、その被覆は手間がかかり、また忙しい播種の直前に被覆する必要があるなど、負担も大きい。また、資材費も、例えば 10 a に 3kg の種子を播種すると 1,500 円ほどかかる。そこで、過酸化カルシウム剤を使わなくても、苗立ちを安定化させる簡易な方法を開発する必要がある。また、そのためには、湛水直播で、過酸化カルシウムを被覆しない、そのままの種子を播種したときに、苗立ちが低下する要因を明らかにすることが重要である。

本研究で、第 2 章では、苗立ちに優れることが期待される、初期生育が速い種子を生産することを目的に、親世代の水稲に対する施肥の違いが、収穫された種子の発芽や出芽およびその後の生育まで(第 3, 4 葉抽出)にかかる日数に及ぼす影響を調べた。その結果、親世代への窒素施肥量が多いと発芽や出芽およびその後の生育までにかかる日数が短くなった。また、その生育にかかる日数の差は、生育段階が進むにしたがって拡大する傾向が得られた。また、土壌中に播種したときの苗立ち割合は、親世代への窒素施肥量が多く、発芽が速い種子ほど高い傾向が得られた。

親世代への窒素施肥量が多いと、種子の窒素含量が高い傾向があり、種子の窒素含量と発芽日数、また種子の窒素含量と苗立ち割合にも高い相関が得られた。したがって、種子の窒素含量が高いことが水稻の初期生育を速め、水稻の初期生育が速いことが苗立ち割合を高めたと考えられた。ただし、親世代を疎植と密植で育てた場合、疎植で育てた親世代から得られた種子の発芽が速い傾向がみられたことや、発芽が速い種子と遅い種子に分けたところ、種子の窒素含量に有意差が得られなかったことから、生育の速さは、当然ながら種子の窒素含量以外の要因も関与することが示唆される。例えば、種子重の影響や、親世代の窒素栄養条件が良いことから種子の生育が進んでいることなども考えられる。しかし、いずれにしても、採種用の水稻の栽培を行う際、窒素を十分に施肥することによって、直播に適した生育が速い種子を得ることができると考えられた。これまでの移植栽培に合わせた採種では、倒伏や病虫害の危険性を最小限とするために、食用栽培よりも施肥窒素量を控える傾向にある。窒素施用量を過度に抑制して種子を得ると、種子の生育は遅くなってしまい、直播には不向きとなる。したがって、倒伏や病虫害において問題ない程度に、窒素施肥量を増やすことが望ましいと考えられる。この方法は、採種時の栽培法を変えるだけで、直播栽培において特別な作業を必要としない。また、種子処理や播種技術およびその後の管理技術など、その他の苗立ちを向上させる技術を組み合わせで実施することが可能である。したがって、苗立ち向上技術の一つとして利用できると考えられた。

第3章では、硫化物イオンが湛水直播の苗立ち阻害要因になっているのか調べるため、直播条件を想定し、採取して湿潤なままの土壌を用い、硫化物イオンの元になる硫酸塩を土壌に添加して、水稻種子を播種したとき、20℃において、出芽には影響を与えないものの、苗立ちを著しく阻害することを明らかにした。また、種子近傍の酸化還元電位を計測し、20℃において、種子が無い土壌では、ほとんど酸化還元電位が低下しないのにもかかわらず、種子近傍では3日程度で、硫化物イオンが生成することを示唆する程度まで低下した。さらに、それに続いて、種子近傍の土壌溶液における硫黄濃度が低下し、種子近傍に黒輪が現れた。以上のことから、これまで、硫化物イオンが生成するということが示されてなかった20℃程度の冷涼な温度でも、種子近傍だけは特異的に還元し、硫化物イオンが生成し、二価鉄イオンと結合して黒い不溶性の硫化鉄を生じていることが示唆された。したがって、硫酸塩を土壌に添加すると水稻の苗立ちが低下するのは、種子近傍で硫酸イオンから硫化物イオンが生成し、水稻種子に害を及ぼすためと考えられた。一方、土壌をオートクレーブすると、硫酸塩を土壌に添加しても苗立ちは阻害されなかった。このことは、オートク

レーブによって硫酸還元菌が死滅したことで、硫酸イオンから硫化物イオンが生成されなくなったため、苗立ちが阻害されなくなったと考えられた。以上のことから、直播が行われる冷涼な条件でも、種子近傍では特異的に、酸化還元電位が低下しており、硫化物イオンが生じることが苗立ち低下の一因となっていると考えられた。

第4章では、さらに硫化物イオンが苗立ちを阻害していることを明らかに示すため、硫化物イオンの生成を抑制する効果ともつモリブデン酸塩を土壤に添加した。その結果、モリブデン酸塩の添加量を増やすと、種子近傍の黒輪の生成がみられなくなり、種子近傍の硫黄濃度の低下も抑制された。さらに、モリブデン酸塩の添加によって、水稻の苗立ちも改善された。以上の結果は、モリブデン酸イオンによって、硫化物イオンが生成しなくなり、それによって水稻の苗立ちの阻害がなくなったことを示している。したがって、この結果からも、硫化物イオンの生成が水稻の苗立ちを阻害していたことを示している。

第3章と第4章の結果から、水稻直播栽培においては、まず、硫酸アンモニウムなどの硫酸塩を含んだ肥料を施用すべきではないことが示唆された。20°C程度の冷涼な条件の場合、土壤のみでは、硫化物イオンが生成するほど低い水準まで、酸化還元電位が低下しない。また、水稻は苗立ちして葉を展開すると、根域を酸化的に保つ能力を持つ。このため、水稻の苗を用いる移植では、苗の近傍土壤は硫化物が生成するほど還元されてないと推測される。また、湛水直播でも過酸化カルシウムを種子に被覆した場合、播種後、しばらくは過酸化カルシウムの働きによって、土壤が酸化的に保たれる。この結果、これまでの水稻作において、冷涼な春においては硫化物イオンの障害を受けなかったと考えられる。しかし、湛水直播で種子に過酸化カルシウムを被覆しない場合、土壤近傍は、硫化物イオンが生成するほど還元される。このため、湛水直播において、種子への過酸化カルシウムの被覆を省くには、硫化物イオンを生成させないようにすべきであり、その一つの方法として、硫酸アンモニウムなどの硫酸塩を含んだ肥料を施用しないようにすべきと考えられた。また、家畜ふん堆肥にも硫酸イオンは多く含まれている(小柳 2008)。例えば、豚ふん堆肥現物 1 kg m^{-2} を施用した場合、硫酸イオン含量を平均的な 50 mmol kg^{-1} 現物として、施用される硫酸イオンは 50 mmol m^{-2} となる。作土の重量を 100 kg m^{-2} とすると、 0.5 mmol kg^{-1} の硫酸イオンの添加となり、第3章の結果(図 3-2)から、苗立ちが阻害されることが予想される。したがって、家畜ふん堆肥は、有機物源として土壤還元を促進することによる悪影響も挙げられるが、硫酸イオンの供給源という点からも、水稻湛水直播の前には施用しないことが望ましいと考えられた。

第 5 章では、実際の水稲湛水直播栽培において、硫化物イオンの害を取り除くために、モリブデン酸イオンを積極的に用いる方法を検討した。モリブデン酸塩は過剰に種子に被覆すると生育障害を引き起こす傾向がみられたので、水溶性のモリブデン酸塩ではなく、微溶性のモリブデン化合物を使用することを検討した。その結果、モリブデン酸マグネシウムなどのモリブデン酸塩だけでなく、三酸化モリブデンやモリブデン金属粉末、またリンモリブデン酸塩を種子に被覆した場合でも、硫化物イオンが生成しやすいように硫酸塩を添加した土壌において、苗立ち向上効果がみられた。その中でも、三酸化モリブデン、モリブデン酸、リンモリブデン酸アンモニウム、リンモリブデン酸カリウムは、水にはあまり溶解しないが、酸化マグネシウムを混合して pH を上げると、ほとんど溶解した。したがって、これらのモリブデン化合物を種子に被覆して播種すると、土壌の pH 緩衝作用によって、少しずつモリブデン酸イオンが供給されることが期待される。モリブデンイオンの過剰害を抑制して、硫化物イオンの生成を抑制する方法に適していると考えられた。その中でも、三酸化モリブデンは、価格が安く、費用は 10 a あたり 130 円で済む。過酸化カルシウム剤では 10 a 当たり 1,500 円かかるので、三酸化モリブデンを用いた方法は、圧倒的に安く済む。また、使用する資材量も 3 kg の種子にわずか 43 g の三酸化モリブデンを被覆するだけである。したがって、硫化物イオンの生成を抑制する目的として、実際に利用できると考えられた。さらに、使用する資材量が少ないため、他の資材との混合も可能となる。例えば、これまでの過酸化カルシウム剤と併用して、相乗効果を期待することや、過酸化カルシウム剤の量を減らして併用し、費用を削減することも考えられる。また、鉄コーティング資材に混合し、土中に埋没した際の硫化物イオンの害を回避できることも期待される。今後、具体的な検討が必要であるが、資材費が安く、資材量が少ないことを活かして、硫化物イオンの生成を抑制する手段として、利用できると考えられる。

移植栽培が大部分を占める日本の水稲作において、省力化および低コスト化を進める手段として、直播栽培の導入が期待されてきた。移植に近い代かき土壌に播種する湛水直播において、最大の問題点は出芽や苗立ちが不安定であることである。これまで出芽や苗立ちの安定化には、過酸化カルシウムの種子被覆が必要であったが、過酸化カルシウムの種子被覆は、資材費とともに手間がかかり、直播に期待される省力性や低コスト性が不十分であった。本研究では、種子近傍での特異的な硫化物イオンの生成によって苗立ちが阻害される実態が明らかになった。過酸化カルシウムの種子被覆を行わない条件で、苗立ちを向上する方法として、①種子自体の生育を早めるため、親世代に窒素を十分に施用して得られる種子を用いること、②硫化物イオンが種子近傍で

生成することが苗立ち阻害の一因であるとして、硫化物イオンの生成抑制剤であるモリブデン酸イオンを供給する微溶性のモリブデン化合物、特に安価な三酸化モリブデンを種子に被覆することを提案した。これらを、これまで明らかとなっている出芽や苗立ちを向上させる様々な技術と組み合わせることによって、今後、湛水直播の苗立ちの安定化を通じて、省力的で低コストな湛水直播栽培の確立に貢献することが期待される。

第7章 総合摘要

水稲栽培において、直播は省力的で低コストと期待されるが、普及はまだ十分でない。水稲湛水直播を普及させるための課題となっている出芽や苗立ちの安定化を省力的で安価に達成するために、出芽や苗立ちに影響を与える要因について解析した。まず、生育が速い種子では苗立ちが高くなる知見が得られていることを考慮し、前世代の水稲への窒素施肥が種子の生育や出芽および苗立ちに及ぼす影響を調べた。その結果、前世代の水稲に窒素を施肥し、種子の窒素含量を高めることによって、種子の発芽やその後の生育が速まり、土壌中に播種した場合でも苗立ち割合が高まることが明らかとなった。したがって、採種用の水稲栽培における窒素施肥量を十分に与えることで、直播に適した苗立ち能力が高い種子を得ることができると考えられた。また、冷涼な直播の時期における有害な硫化物イオンの生成状況を調べるため、20℃において硫酸塩を土壌に添加し、苗立ちが低下することを確認した。種子の近傍が局所的に著しく還元的になっており、種子近傍の土壌溶液の硫黄濃度も低下していることなどから、硫化物イオンが生成していることが推測された。土壌のオートクレーブやモリブデン酸塩の添加によって、水稲の苗立ちが改善したことからも、硫化物イオンの生成が苗立ちを阻害していることが示された。このことから、直播では硫酸塩を含む肥料や堆肥を施用しない方が良いことが示唆された。さらに、モリブデン酸塩が硫化物イオンの生成を阻害することを利用し、微溶性のモリブデン化合物を種子に被覆して、硫化物イオンの害を受けないようにする技術を開発した。これらの方法は、水稲湛水直播の苗立ちを改善する方法として利用できると考えられた。

謝辞

本研究は、水稻直播の普及に向けた苗立ちの安定化のための研究として、北陸農業試験場(新潟県上越市、現農研機構中央農業総合研究センター北陸研究センター)および農研機構九州沖縄農業研究センターにおいて、1996年～2011年に実施したものである。

本研究の遂行にあたっては、北陸農業試験場水田利用部土壌管理研究室長であった鳥山和伸氏(現国際農林水産業研究センター)に、長期にわたって懇切な御指導と御助言および御激励をいただいた。また、北陸農業試験場での研究遂行にあたっては、北陸農業試験場水田利用部長であった伊藤秀文氏、執行盛之氏、および同部土壌管理研究室長であった亀川健一氏に、御指導と御助言をいただいた。また、同研究室の中島秀治氏、関矢博幸氏(現農研機構東北農業研究センター)、高橋智紀氏(同東北農業研究センター)には、研究への御助力と御助言をいただいた。また、同試験場業務科諸氏および非常勤職員の諸氏にも多大な御助力をいただいた。農研機構九州沖縄農業研究センターでの研究遂行にあたっては、同センター水田作研究部長であった脇本賢三氏、堀末 登氏、同センター水田作研究領域長であった田中基晴氏、岡本正弘氏(現同センター所長)、安東郁男氏(現農研機構作物研究所)、田坂幸平氏、および同研究部水田土壌管理研究室長であった土屋一成氏に、御指導と御助言をいただいた。また、同研究室の草佳那子氏(現農研機構中央農業総合研究センター)、同センター水田作研究領域土壌研究グループの増田欣也氏、中野恵子氏には、研究への御助力と御助言をいただいた。また、同試験場業務科諸氏および非常勤職員の諸氏にも、多大な御助力をいただいた。さらに、水稻直播の研究者や水稻農家を始めとする多くの方からも、御助言や御協力をいただいた。

本論文のとりまとめにおいては、京都大学農学研究科の間藤徹教授に、機会を与えていただくとともに、懇切な御指導と御校閲をいただいた。また、同研究科の小林優准教授、落合久美子助教にも、御指導と御助言をいただいた。これらの方々には心より感謝申し上げます。

引用文献

- 相田徳二郎・須藤恒二 1954. 湛水土壤に於ける硫化水素発生の微生物学的研究 硫酸還元菌の硫化水素発生に及ぼす栄養条件(豫報)東北地方の低位生産水田に関する研究(第7報). 東北大農研彙報 6: 19-25.
- 赤松誠一 1969. 水稻の散播に関する研究(第9報)発芽苗立ちと収量の関係、および発芽障害とその防除対策. 岡山大農報 33: 95-104.
- 秋田重誠・尹炳星・椛木信幸 1998. 低温・湛水土壤中下でのイネの出芽速度と胚重の関係. 日作紀 67: 318-322.
- Asami, T. and Kumada, K. 1959. A new method for determining free iron in paddy soils. Soil Plant Food 5: 141-146.
- 浅見輝男 1970. 水田土壤中における遊離鉄の行動に関する研究(第2報)水田土壤中における遊離鉄の還元とEh, pHの変化およびアンモニアの生成について. 土肥誌 41: 7-11.
- Austin, R. B. 1972. Effects of environment before harvesting on viability. In Viability of Seeds, Ed. E. H. Roberts. Chapman and Hall Ltd., London. 114-149.
- Biswas, J. K., Ando, H., Kakuda, K. and Purwanto, B. H. 2001. Effect of calcium peroxide coating, soil source, and genotype on rice (*Oryza sativa* L.) seedling establishment under hypoxic conditions. Soil Sci. Plant Nutr. 47: 477-488.
- Biswas, K. C., Woodards, N. A., Xu H. and Barton, L. L. 2009. Reduction of molybdate by sulfate-reducing bacteria. BioMetals 22: 131-139.
- Fox, R. L. and Albrecht, W. A. 1957. Soil fertility and the quality of seeds. Res. Bull. Missouri Agric. Exp. Stn., 619, 2-23
- 古畑昌巳・楠田宰・福嶋陽 2005a. 落水処理による土壤三相構造の変化が湛水直播水稻の出芽と苗立ちに及ぼす影響. 日作紀 74: 1-8.
- 古畑昌巳・楠田宰・福嶋陽 2005b. 代かき程度が湛水直播した水稻の落水条件下における出芽と苗立ちに及ぼす影響. 日作紀 74: 9-16.
- 古畑昌巳・楠田宰・福嶋陽 2005c. 水稻の湛水直播・落水栽培における落水時期が出芽・苗立ちに及ぼす影響. 日作紀 74: 134-140.

- 古畑昌巳・楠田宰・福鳶陽 2005d. 圃場における播種前の代かきおよび播種後の落水程度が打込み点播機を利用した湛水直播水稻の出芽と苗立ちに及ぼす影響. 日作紀 74: 212-217.
- 古畑昌巳・岩城雄飛・有馬進 2006. 湛水土中直播水稻の出芽・苗立ちと出芽速度および種子の代謝産物との関係. 日作紀 75: 182-190.
- 古畑昌巳 2007. 水稻の打込み式代かき同時土中点播栽培における播種後落水および施肥が出芽・苗立ちに及ぼす影響. 九州沖縄農研報 48: 79-124.
- 古畑昌巳・岩城雄飛・有馬進 2007a. 出芽速度および嫌気条件における鞘葉の伸長速度が湛水直播水稻の出芽・苗立ちに及ぼす影響. 日作紀 76: 10-17.
- 古畑昌巳・岩城雄飛・有馬進 2007b. 湛水土中直播水稻の出芽・苗立ちと鞘葉の伸長特性および種子の糖含量との関係. 日作紀 76: 100-107.
- 古畑昌巳 2009. 湛水直播水稻の出芽・苗立ち向上に向けて. 日作紀 78: 153-162.
- 古坂澄石 1968. 水田土壌における硫酸還元菌群の化学的活性について. 東北大農研彙報 19: 101-184.
- 後藤英次・三浦周・野村美智子・稲津脩 2003. 北海道の水田土壌における化学性の現状とその問題点. 土肥誌 74: 475-483.
- 萩原素之・井村光夫・三石昭三 1986. 水稻の湛水土壌中直播における異常還元と出芽苗立ち. 北陸作物学会報 21: 21-23.
- 萩原素之・井村光夫・三石昭三 1987. 湛水土壌中に播種した水稻種籾近傍の酸化還元状態. 日作紀 56: 356-362.
- 萩原素之・井村光夫・三石昭三 1990. 酸素発生剤を被覆した水稻種籾の近傍で起こる局所的土壌還元と発芽・出芽との関係. 日作紀 59: 56-62.
- Hagiwara, M. and Imura, M. 1991. Promotion of Seedling Emergence of paddy rice from flooded soil by coating seed with potassium nitrate. Jpn. J. Crop Sci. 60: 441-446.
- 萩原素之 1993. 水稻の湛水土壌中直播における出芽・苗立ちに関する研究. 石川農業短大特研報 20: 1-103.
- Hagiwara, M. and Imura, M. 1993. Seedling emergence and establishment of direct-sown paddy rice in soils incorporated with substances produced in reductive paddy soil. Jpn. J. Crop Sci. 62: 609-613.

- 原嘉隆・鳥山和伸 1997. 窒素施肥量と栽植密度が水稻品種「どんとこい」の生育と収量に及ぼす影響. 北陸農試報 40: 79-85.
- Hara, Y. and Toriyama, K. 1998a. Seed nitrogen accelerates the rates of germination, emergence and establishment of rice plants. *Soil Sci. Plant Nutr.* 44: 359-366.
- Hara, Y. and Toriyama K. 1998b. Ammonium nitrogen in soil solution and seed nitrogen affect the percentage of establishment of rice plants in submerged soil. *Soil Sci. Plant Nutr.* 44: 415-422.
- Hara, Y. 1999. Calculation of population parameters using Richards function and application of indices of growth and seed vigor to rice plants. *Plant Prod. Sci.* 2: 129-135.
- Hara, Y. 2013a. Suppressive effect of sulfate on establishment of rice seedlings in submerged soil may be due to sulfide generation around seeds. *Plant Prod. Sci.* 16: 50-60.
- Hara, Y. 2013b. Improvement of rice seedling establishment in sulfate-applied submerged soil by application of molybdate. *Plant Prod. Sci.* 16: 61-68.
- Hara, Y. 2013c. Improvement of rice seedling establishment in sulfate-applied submerged soil by seed coating with poor-soluble molybdenum. *Plant Prod. Sci.* 16: 271-275.
- 平野哲也・佐藤敦 1981. 干拓地土壌における水稻直播栽培の発芽苗立の安定向上に関する研究(第3報) 培地の pH 値と発芽苗立について. 日作東北支部報 24: 1-2.
- 堀謙三・犬伏和之・松本聡・和田秀徳 1990. 湛水土壌系におけるメタン生成と硫酸還元阻害剤の適正濃度. 土肥誌 61: 647-648.
- 星川清親 1975. イネの生長. 農山漁村文化協会, 東京. 38-39.
- 上山泰 1975. 種もみの比重および重さが乾田直播水稻の出芽に及ぼす影響. 日作紀 44: 414-418.
- 加村崇雄・高井康雄 1960. 水田土壌中の鉄化合物の形態変化について(第3報): 第2鉄還元過程における微生物の役割. 土肥誌 31: 499-502.
- 菅野千秋・佐藤健司・酒井博幸 1999. 土壌溶液のアンモニア態窒素濃度が直播水稻の出芽に及ぼす影響. 日作東北支部報 42: 5-7.
- 狩野幹夫・塩幡昭光・酒井一 1985. 水稻湛水土壌直播栽培に関する研究(第1報) 出芽・苗立の安定化と播種期幅. 茨城農試研報 25: 83-95.
- 川口桂三郎・山本快二 1942. 畑地状態土壌と水田状態土壌との連繫的研究(第一報) 土壌の還

- 元力の喪失に就て. 農学研究 34: 377-397.
- 川口桂三郎 1944. 水田状態土壤中に於ける硫酸アンモニアの水稲幼植物並びに籾発芽に対する有害作用に就いて. 農学研究 36: 484-486.
- 木村真人・和田秀徳・高井康雄 1984. 水稲根周辺における水酸化鉄, 二酸化マンガ, 硫化鉄沈殿の生成: 水稲根圏に関する研究(第8報). 土肥誌 55: 332-337.
- 近藤始彦 2006. 水稲の直播栽培における水管理と施肥管理－現状と課題－. 農業技術 61: 493-497.
- 熊田恭一 1949. 水稲幼植物の根圏土壤に関する研究(第1報) 根圏土壤の微細構造及び根の酸化力について. 土肥誌 19: 119-124.
- Lieffering, M., Andrews, M. and McKenzie, B. A. 1996: Nitrate stimulation of mobilization of seed reserves in temperate cereals: Importance of water uptake. *Ann. Bot.*, 78, 695-701.
- Lowe, L. B. and Ries, S.K. 1973: Endosperm protein of wheat seed as a determinant of seedling growth. *Plant Physiol.*, 51, 57-60
- MacLeod, J. A., Gupta, U. C. and Stanfield, B. 1997. Molybdenum and sulfur relationships in plants. In U. C. Gupta ed., *Molybdenum in agriculture*. Cambridge University Press, Cambridge. 229-244.
- Marchal, R., Chaussepied, B. and Warzywoda, M. 2001. Effect of ferrous ion availability on growth of a corroding sulfate-reducing bacterium. *Int. Biodeterior. Biodegradation* 47: 125-131.
- Marschner, H. 1995: *Mineral Nutrition of Higher Plants*. 2nd ed. Academic Press, London. 369-379. 626-641.
- 丸山幸夫 2006. 直播栽培技術の開発状況と技術的問題点. 農業技術 61: 488-492.
- Metivier, J. R. and Dale, J. E. 1977: The utilization of endosperm reserves during early growth of barley cultivars and the effect of time of application of nitrogen. *Ann. Bot.*, 41, 715-728
- 森田弘彦 2011. 雑草防除. 農業技術大系「作物編」追録 33-2-1: 技 402 の 24-30.
- 村上大亮・粕渕辰昭 2007. 水田土壤の Eh 測定に用いる白金電極の反応. 土壤物理性 106: 3-10.
- 中山壮一・高林實 1988. 水稲の湛水直播栽培における芽干しの時期および期間によるピラゾレート剤の除草効果の変動. 雑草研究 33: 180-184.

- 日本工業規格 2008. 硫化物イオン(S²⁻). 工場排水試験方法 (JIS K 0102). 日本規格協会, 東京. 135-138.
- 農林水産省 2008. 水稲直播栽培の現状について .
http://www.maff.go.jp/j/seisan/ryutu/zikamaki/z_genzyo/pdf/all.pdf
- 農林水産省 2010. 水稲直播栽培技術の普及状況 .
http://www.maff.go.jp/j/press/seisan/sien/100611_1.html
- Ogiwara, H. and Terashima, K. 2001. A varietal difference in coleoptile growth is correlated with seedling establishment of direct seeded rice in submerged field under low-temperature conditions.. *Plant Prod. Sci.* 4: 166-172.
- 大場茂明 1997. 落水出芽法の由来. *農業技術* 52: 33-34.
- 太田久稔 2003. 水稲の湛水直播栽培における土中出芽性の新たな検定方法と土中出芽性の新たな遺伝資源. *日作紀* 72: 295-300.
- 太田久稔 2006. 直播栽培適性水稲品種育成の現状と今後の方向. *農業技術* 61: 498-502.
- 岡武三郎・長野間宏 2011. 乾田直播イネの生育と栽培の基本. *農業技術大系「作物編」追録* 33-2-1: 技 351-359.
- 岡部繭子・玉井富士雄・元田義春・田辺猛・武田元吉 2004. 水稲の栽培・収穫法および種子の大きさが発芽・出芽性に及ぼす影響. *東京農大農学集報* 49: 113-118.
- 岡島秀夫・高城成一 1959. 水稲の硫化水素障害をめぐる諸問題. *土肥誌* 29: 577-582.
- 岡島秀夫 1960. 水稲根群の生理機能に関する研究.とくに窒素栄養を中心にして. *東北農研彙報* 12: 1-146.
- 大杉繁・川口桂三郎 1938. 水田に於ける硫酸アンモニヤ施肥に依る障害に就て(第一報) . *土肥誌* 12: 453-462.
- 小柳渉 2008. 堆肥中の硫酸根 | 土壌の塩類集積を低減する家畜ふん堆肥の利用法. *畜産環境技術情報* 41: 13-15.
- Patrick, W. H. Jr., and Jugsujinda, A., 1992. Sequential reduction and oxidation of inorganic nitrogen, manganese, and iron in flooded soil. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 56: 1071-1073.
- Ponnamperuma, F. N., 1972. The chemistry of submerged soils. *Adv. Agron.* 24, 29-96.
- Rahman, M. A. and Goodman, P. J. 1983. Effect of seed nitrogen on response to applied nitrogen in

- six spring barley (*Hordeum vulgare* L.) cultivars in a glasshouse. *Plant Soil*, 73, 203-209.
- 三枝正彦・花木真由美・伊藤豊彰 1999. 各種水稻苗における籾由来窒素の利用. *日作紀* 68: 95-98.
- Sasahara, T. and Ikarashi, H. 1989. Differences in seedling emergence and growth among rice (*Oryza sativa* L.) ecospecies under reduced soil conditions. *Jpn. J. Breed.*, 39, 495-498.
- 佐藤郁生・山根一郎 1959. 硫化水素生成における土壤有機物の役割. *東北大農研彙報* 11: 145-157.
- 佐藤和夫・山根一郎 1976. たん水土壤の Eh の低下と硫化鉄の生成について. *土肥要旨集* 22: 18.
- Schweizer, C. J. and Ries, S. K. 1969. Protein content of seed: Increase improves growth and yield. *Science*, 165, 73-75.
- Seshu, D. V., Krishnasamy, V. and Siddique, S. B. 1988: Seed vigor in rice. In *Rice Seed Health*. International Rice Research Institute, Manila. 315-329.
- 新発田修治・田中一生 2001. 水稻の低温苗立性と硫化物による発芽阻害との関係. *日作紀* 70(別 2): 213-214.
- 鈴木皓 1977. 硫黄栄養が作物のアミノ酸代謝におよぼす影響ならびに作物の硫黄栄養の診断法に関する研究. *農技研報* B29: 49-106.
- 鈴木富男 2006. 水稻直播栽培の普及状況と今後の推進方向. *農業技術* 61: 481-487.
- 但野利秋 1976. 水稻の鉄過剰障害対策に関する作物栄養学的研究. *北大農邦文紀要* 10: 22-68.
- 高橋英一・吉野実・前田正男 1980. モリブデン. 新版 原色 作物の要素欠乏過剰症. 農文協, 東京. 180-185.
- 高橋成人 1962. 稲種子の発芽に関する生理遺伝学的研究 とくに発芽を支配する遺伝要因について. *東北大農研彙報* 14: 1-87.
- 高井康雄 1961a. 水田土壤の還元と微生物代謝(1). *農業技術* 16: 1-4.
- 高井康雄 1961b. 水田土壤の還元と微生物代謝(2). *農業技術* 16: 51-53.
- 高井康雄 1961c. 水田土壤の還元と微生物代謝(3). *農業技術* 16: 122-126.
- 高井康雄 1961d. 水田土壤の還元と微生物代謝(4). *農業技術* 16: 162-166.

- 高井康雄・手塚千史 1971. 水田土壌と畑土壌の硫酸還元菌について. 土肥誌 42: 145-151.
- 田中福代・小野信一 2000. 有機質資材を施用した水田土壌における芳香族カルボン酸の集積と起源および水稲の生育阻害. 土肥誌 71: 350-355.
- 寺島一男 2011. 直播栽培の特徴と課題. 農業技術大系「作物編」追録 33-2-1: 技 337-347.
- 栃本義博・野口雅弘・樋口正・田坂幸平・屋代幹雄・椛木信幸 1996. 水稲湛水直播栽培における出芽向上技術. 日作紀 65(別 2): 221-222.
- Toriyama, K., Hara, Y. and Sakai, H. 1996. Effect of soil solution $\text{NH}_4\text{-N}$ concentration on growth of direct-seeded rice. In proceedings of international symposium on “Maximizing sustainable rice yields through improved soil and environmental management”, Bangkok. 649-659.
- Tsigdinos, G. A. 1974. Ind. Eng. Chem., Prod. Res. Develop. 13: 267-274.
- Tsuchiya, M., Sato T., Maruyama, S. 2004. Growth enhancement by drainage during seedling establishment in rice direct-sown into puddled and leveled soil: Comparison with seed coating with calcium peroxide. Plant Production Sci. 7: 324-328.
- 和田節 2006. 直播水稲におけるスクミンゴガイ対策. 農業技術 61: 539-542.
- 若尾紀夫 1987. 硫黄の酸化と還元. 農業技術体系 土壌肥料 1: 土壌と根圏 V 109-112.
- 渡邊寛明・川名義明 2006. 直播栽培の雑草管理. 農業技術 61: 503-508.
- 矢治幸夫・関矢博幸・鈴木祥悟・東淳樹・渡邊寛明 2006. 直播栽培における鳥害回避策. 農業技術 61: 534-538.
- 山口 尚夫, 白鳥 孝治, 小原 明 1957. 湿田の稲作改善に関する栽培技術的研究 : IV 水稲赤枯れに関する調査研究. 日本作物學會紀事 26: 3-7.
- Yamamoto, A., Hatanaka, A. and Ito, O. 2004. Inhibition of seedling establishment by nitrogen application in direct sowing culture of paddy rice in cold region. Soil Sci. Plant Nutr. 50: 103-107.
- 山根一郎・佐藤和夫 1972. たん水土壌の Eh におよぼす硝酸塩・硫酸塩・二酸化マンガンの影響. 土肥誌 43: 66-70.
- Yamauchi, M., Aguilar, A.M., Vaughan, D.A. and Seshu, D.V. 1993: Rice (*Oryza sativa* L.) germplasm suitable for direct sowing under flooded soil surface. Euphytica, 67, 177-184.
- 山内稔 1997. 湛水土壌中における直播水稲の苗立ち. 土肥誌 68: 467-476.

- Yamaguchi, M. and Biswas, J.K. 1997. Rice cultivar difference in seedling establishment in flooded soil. *Plant and Soil* 189: 145-153.
- Yamauchi, M., Aragonés, D. V., Casayuran, P. R., Cruz, P. C. S., Asis, C. A., Jr. and Cruz, R. T. 2000. Seedling establishment and grain yield of tropical rice sown in puddled soil. *Agronomy Journal* 92: 275-282.
- 山内稔 2004. 水稻の鉄コーティング湛水直播. *農及園* 79: 947-953.
- 山内稔 2006. 鉄コーティング技術の開発, 普及状況及び問題点. *農業技術* 61: 552-555.
- 山内稔 2011. 鉄コーティングを用いた湛水直播. *農業技術大系「作物編」追録* 33-2-1: 技 395-402.
- 山内稔 2012. 鉄コーティング種子を用いた水稻湛水直播技術. *日作紀* 81: 148-159.
- 吉永悟志 2002. 打ち込み式代かき同時土中点播機を用いた水稻の湛水直播栽培における生産性の向上. *九州沖縄農研報* 41: 53-116.
- 吉永悟志・境谷栄二・吉田宏・山本晶子・若松一幸・菊池栄一・本間昌直 2007. 東北地域の水稲湛水直播栽培における酸素発生剤被覆量と苗立ちとの関係. *日作紀* 76: 445-449.
- 吉永悟志 2011. 湛水直播イネの生育と栽培の基本. *農業技術大系「作物編」追録* 33-2-1: 技 385-394.

本論文に転載した原著論文

Hara, Y. and Toriyama, K. 1998. Seed nitrogen accelerates the rates of germination, emergence and establishment of rice plants. *Soil Sci. Plant Nutr.* 44: 359–366.

<http://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/00380768.1998.10414457#>

Hara, Y. and Toriyama K. 1998. Ammonium nitrogen in soil solution and seed nitrogen affect the percentage of establishment of rice plants in submerged soil. *Soil Sci. Plant Nutr.* 44: 415–422.

<http://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/00380768.1998.10414463#>

Hara, Y. 2013. Suppressive effect of sulfate on establishment of rice seedlings in submerged soil may be due to sulfide generation around seeds. *Plant Prod. Sci.* 16: 50–60.

<http://www.tandfonline.com/doi/full/10.1626/pps.16.50>

Hara, Y. 2013. Improvement of rice seedling establishment in sulfate-applied submerged soil by application of molybdate. *Plant Prod. Sci.* 16: 61–68.

<http://www.tandfonline.com/doi/full/10.1626/pps.16.61>

Hara, Y. 2013. Improvement of rice seedling establishment in sulfate-applied submerged soil by seed coating with poor-soluble molybdenum. *Plant Prod. Sci.* 16: 271–275.

<http://www.tandfonline.com/doi/full/10.1626/pps.16.271>