J. Jpn. Soc. Soil Phys.
土壌の物理性
No. 125, p.17 ～ 27 (2013)

論　文
Original Paper

# 播種時の過湿・過乾燥リスクを伴う粘土質転換畑におけるダイズの適切な播種条件の解析

吉田修一郎[1]・細川　寿[2]・足立一日出[3]

# Analysis of suitable condition for soybean planting in rotational clayey paddy fields under risk of excessive dry or wet condition

Shuichiro YOSHIDA[1], Hisashi HOSOKAWA[2] and Kazuhide ADACHI[3]

**Abstract:** Stabilization of soybean cultivation in rotational paddy fields is important issue for efficient utilization of Japanese arable land. The present study aimed to clarify the suitable condition of soybean planting for stable establishment in clayey paddy fields by taking account the particularity of physical properties of clayey paddy soils. The effects of four experimental factors: intensity of compression, days after tillage, seeding depth, and tilth on the germination and growth of soybean, were investigated by field experiments following the randomized block design. The seeding depth and the timing of seeding after tillage were revealed to be the most influential factor while compression had supplementary role. Mean dimension of aggregates did not affect the germination and growth under the poor tilth condition. The results suggest that seeding should be conducted soon after tillage but the optimal depth depends on the expected weather in the following days. However if drainage efficiency of the field can be improved, seeding deeply supposed to be less risky unless enough rain is surely expected.

**Key Words** : clayey paddy, soybean, soil aggregates, germination, establishment

## 1. はじめに

ダイズの出芽・苗立ちの安定化は，転換畑におけるダイズ作での単収向上において重要な要素である．出芽・苗立ちを不安定にする要因としては，播種後の土壌の過湿，過乾燥が挙げられる．土壌の過湿の影響については，発芽に不可欠な酸素の不足，乾燥種子が急激に吸水することによる組織の損傷とそれに続く栄養成分の浸出による種子活力の低下（例えば，浜口ら, 1985; 鄭・細部, 2000）などが明らかになっている．このような播種期の湿害は，出芽・苗立数の不良による栽植密度の低下のみならず，その後の生育不良にもつながる（有原, 1998）ため，様々な角度から研究がなされてきた．特に，本州の日本海側においては，過湿の原因となる排水不良が問題となる重粘土転換畑が多く存在し，湿害回避はダイズ作において重要な課題となっている．一方で，この地域ではダイズ播種時期に当たる 5 月下旬から 6 月上旬には連続晴天となる年が多く，播種後の過乾燥のリスクも同時に存在する．水分不足により，発芽が数日遅れる程度であれば，致命的な問題にはならない．しかし，播種直後に残存していた利用可能な土壌水分が，播種後に急速に減少する場合，種子が 途中まで吸水したのち再び乾燥したり，根が十分に発達する前に乾燥した環境におかれたりすると，発芽能力やその後の生育に致命的な影響を及ぼすことが指摘されている（Helms et al., 1996a）．このような種子周囲の土壌の過乾燥は，深部に播種することで回避できる（Stucky, 1976）が，大きな降雨が一旦あれば，逆に湿害リスクが高まる．

ダイズの出芽・発芽を左右する播種条件としては，上記の播種深度の他に，鎮圧（Hummel et al., 1981; 高橋ら, 2008），耕うん後播種までの日数（細川, 2005），砕土率（孫ら, 2004; Rathore et al., 1983）等が挙げられる．これらは，個別に主要因として影響を及ぼすと考えられるが，特定の組み合わせが相乗効果や相殺効果（交互作用）を持つことも考えられる．しかし，播種条件に関する多くの研究では，特定の要因のみに着目したものが多く，組み合わせによる効果の評価が十分に行われていると言えない．また，同一のほ場において，過乾燥条件の場合と過湿条件の場合の特徴を実証的に比較した研究は見られない．

本研究では，過湿や過乾燥，さらに砕土不良により，ダイズの出芽が問題となりやすい重粘土転換畑ほ場において，ダイズの播種条件の組み合わせが，乾燥傾向にある年と過湿傾向にある年の出芽・苗立ちに及ぼす影響を

[1]Graduate School of Agricultural and life sciences, The University of Tokyo, 1-1-1, Yayoi, Bunkyo-ku, Tokyo, 113-8657, Japan. Corresponding author : 吉田修一郎，東京大学大学院農学生命科学研究科
[2]National Agricultural Research Center, NARO, 3-1-1, Kannondai, Tsukuba, Ibaraki, 305-8666, JAPAN.
[3]Kubota Corporation, 1-1-1, Hama, Amagasaki, Hyogo, 661-8567, JAPAN.
2012 年 6 月 26 日受稿　2013 年 11 月 8 日受理

ほ場試験により統計的に解析し，そのメカニズムについて考察を行った．

## 2. 実験方法

中央農業総合研究センター北陸研究センター（新潟県上越市）内の転換畑ほ場を用いて，2006 年と 2007 年の 2 ヶ年にわたりダイズの出芽試験を行った．当該ほ場の土壌は，スメクタイト質の粘土を主に含む沖積土で，ほ場の平均粘土含量，シルト含量はそれぞれ 44 %，38 % と細粒分に富み，陽イオン交換容量は 26 $cmol_c kg^{-1}$ である．ほ場の耕作履歴は，試験前年まで 5 年間は水稲，さらにその前は 3 年以上畑作物が栽培されていた．

砕土目標を細と粗の 2 水準，播種日を砕土直後と 3 日後（2006）もしくは 5 日後（2007）の 2 水準，播種深度を 3 cm と 7 cm の 2 水準，鎮圧強度を 0 kPa，3 kPa，6 kPa，12 kPa の 4 水準，以上 4 要因をほ場内の南北 2 ブロックに分けて全 32 区に割り付けた．この実験計画のもとでは，2 水準の要因は 16 反復，4 水準の要因は 8 反復の試験となる．なお，鎮圧強度については，慣用の機械播種時の実測値である 6 kPa（高橋ら, 2008）を基準として，その大小の値を設定した．試験区の割付は，$L_{32}$ 直交表を用いた乱塊法によった．砕土処理の結果を評価するため，細 · 粗両区からそれぞれ 4 点を選び，耕うん直後の土壌をふるい分けすることにより土塊径分布を測定した．

各試験区内には，播種後の日数に応じて種子を掘り出してその水分や根の伸張を測定するための部分（Zone A）と，そのまま出芽させて各日の出芽数やその後の成長を記録するための部分（Zone B）の 2 ゾーンをそれぞれ設けた．所定の深さに確実に種子を播種できるように，Fig. 1 に示したような筒を播種床の所定の深さまで挿入し，種子を筒の中に落とし込んで上から軽く覆土した．すなわち，種子の下端が所定の深さとなるようにした．用いた種子は，選別を行った後にキヒゲン（米澤化学社）を塗布したもので，品種はエンレイ，種子水分は 11 % であった．

Zone A においては，9 cm × 75 cm 間隔で 2 粒ずつ播種した．Zone B においては，同じく 9 cm × 75 cm の間隔をあけて 1 粒ずつ播種した．2006 年の播種は 5 月 29 日および 6 月 1 日，2007 年の播種は，5 月 29 日および 6 月 3 日に行った．播種後，鎮圧処理を行う試験区においては，Fig. 2 に示した自作の鎮圧器具に所定の重量の錘を載せ，その自重によって播種した部分を静かに鎮圧した．この装置の接地面積は，機械作業で広く用いられている鎮圧輪が土壌と接触している面積を考慮して定めた．耕うん砕土作業は，トラクター（F475D，ヤンマー（株））にアップカットロータリー（ニプロ CU-1600）を装着し実施した．アップカットロータリーを用いると，比較的乾燥した上層の砕けやすい土が砕土後に表層近傍に集まりやすい．そのため，この試験ほ場のような砕土が困難な粘質な転換畑土壌においても，播種床となる地表に近い層の砕土率に十分な差異を与えることができる．砕土状態の細粗は，トラクターの走行速度とロータリーの回転速度の調整によって発生させた．Zone A においては，播種後所定の経過日数に応じて，一回に 4 粒ずつを掘り返し，種子水分や発芽状況，食害の有無を調べた．Zone B においては，出芽率および出芽後の生育経過を追跡した．

播種後の土壌のマトリックポテンシャルの変化につい

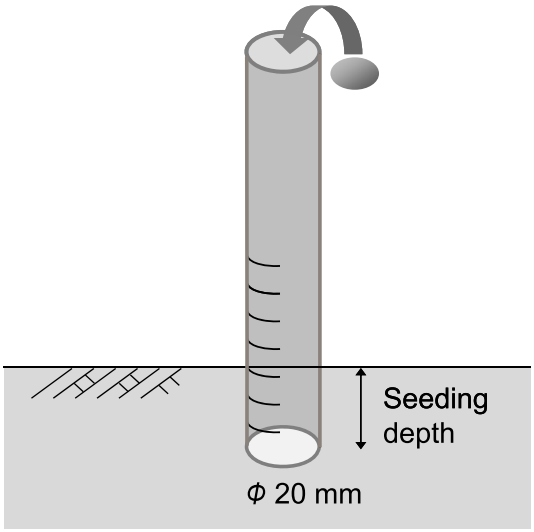



**Fig. 1** パイプを用いた播種方法.
Method of seeding using a plastic pipe.

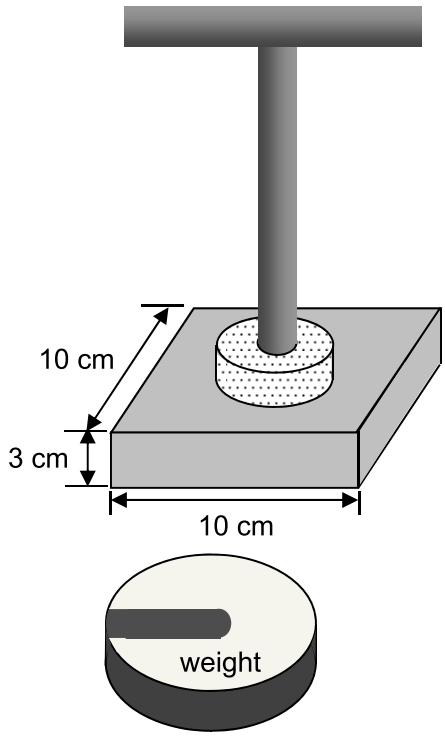



**Fig. 2** 定応力での鎮圧装置．試験区の設定に応じた鎮圧応力を，おもりの個数で調整して静的に与える．
Equipment for compression of seed-bed at designed stresses. Compression stresses following to the experimental design were imposed to seed-beds by adjusting the number of weights.

**Table 1**　砕土率および耕うん直後の作土層の平均含水比.
Tilth and mean water content of tilled layer after the tillage.

| Year | Layer | Treatment | Percentage of < 20 mm | | Percentage of < 10 mm | | Water content at the tillage gravimetric % | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 2006 | 0–10 cm | Coarse | 37.3 ± 6.9 | | 13.2 ± 2.2 | | 42.1 ± 0.5 | |
| | | | * | | * | | ns | |
| | | Fine | 60.1 ± 2.6 | | 21.4 ± 6.1 | | 41.7 ± 1.3 | |
| 2007 | 0–5 cm | Coarse | 51.8 ± 12.6 | | 24.1 ± 3.6 | | | |
| | | | * | | ns | | | |
| | | Fine | 69.6 ± 9.3 | | 32.1 ± 6.1 | | | |
| | 5 cm ～ | Coarse | 40.2 ± 10.2 | | 21.6 ± 2.4 | | | |
| | | | * | | * | | | |
| | | Fine | 60.2 ± 12.7 | | 30.0 ± 4.6 | | | |
| | Whole Layer | Coarse | 42.8 ± 4.4 | | 22.2 ± 2.6 | | 35.7 ± 1.0 | |
| | | | * | | * | | ns | |
| | | Fine | 62.4 ± 7.4 | | 30.6 ± 4.9 | | 37.0 ± 1.4 | |

1）各 4 区平均 ± 標準偏差.
2）* は 5 % の危険率で有意差あり，ns は有意差なしを示す.

ては，テンシオメータを用いて測定した．いずれの年も内径 13 mm の塩化ビニルパイプの先端に感知部の長さ 50 mm のポーラスカップを接着したものを用いた．ただし，2006 年はこれらを地表面から鉛直に挿入し，感知部の深さを 2.5 ～ 7.5 cm，7.5 ～ 12.5 cm とした．パイプ内の圧力は，圧力変換器を用いて連続観測を行った．テンシオメータは，試験ほ場内の細砕土区のうち，鎮圧 12 kPa 区と無鎮圧区の 2 点に設置した．一方，2007 年は塩ビ管を途中で L 字に曲げ，感知部を土層に水平に埋設し，反対側の端は地表に出るようにした．埋設深は，播種深度を考慮して 3 cm と 7 cm とした．地表に出ている端は，シリコン栓で密閉し，そこにマノメータと接続された注射針を定期的に挿して，負圧を計測した．設置個所は，耕うん直後に播種した試験区のうち，鎮圧 12 kPa 区と無鎮圧区の計 8 点とした．気温と降水量については，中央農業総合研究センター北陸研究センターの気象観測露場で測定されたデータを用いた．

## 3. 実験結果

### 3.1 播種前後の天候・土壌水分の変化

試験を実施した 2 カ年の播種時期の降雨条件は，Fig. 3 に示す通り対照的であった．2006 年は 1 回目の播種の前 7 日間の降水量が 16 mm と少なく，播種後も 10 日間無降雨日が続いた．ダイズの播種深度に相当する 2.5 ～ 7.5 cm 深の土壌の水ポテンシャルは，耕うんから 11 日目の最初の降雨の直前で −60 kPa に達した．一方，2007 年は，1 回目の播種前 7 日間の降水量は 7 mm であったが，その翌日から翌々日に 25.5 mm の降雨があった．そのため，2 回目の播種は 1 回目の播種（耕うん）の 5 日後とした．3 cm 深の全測点平均の土壌の水ポテンシャルは，2 回目の播種後に −45 kPa まで急速に乾いたが，7 cm 深では −2 kPa からゆっくりと −12 kPa まで乾燥が進んだ程度で，過湿傾向で推移した．

播種時期の設定は，各日の土壌水分の推移に影響しないことを考慮すると，両年各深度での播種後の土壌の水分条件については以下のように要約できる．2006 年は，2 回目（耕うん 3 日後）に浅層（3 cm）に播種された種子が，特に乾燥した条件下に置かれることとなった．2007 年については，1 回目（耕うん直後）に深層（7 cm）に播種された種子は，長期間過湿な条件下に置かれた．一方で，2 回目（耕うん 5 日後）に浅層（3 cm）に播種された種子は，播種後乾燥した条件下に 4 日程度置かれたが，その後降雨により土壌水分は回復した．

### 3.2 砕土率・耕うん直後含水比

耕うん直後にふるいを用いて測定した砕土率（2 cm 目のふるい通過率）を Table 1 に示した．砕土処理は，目標通りに粗砕土区と細砕土区の間で有意な違いを与えることができた．2007 年の結果が示すように，逆転ロータリーを用いたため，表層 5 cm の方がそれ以下より，10 % 程度良い砕土率となった．ただし，細砕土区においても，2 cm 以下の土塊が重量比で 70 % 以上とする一般的な砕土率の目標（例えば，新潟県農林水産部，2013）は両年とも達成できなかった．なお，耕うん直後の層平均含水比には，砕土の細粗による差はなかった．

### 3.3 種子の水分吸収

種子の水分吸収状況を年および播種日毎に Fig. 4 に示した．土壌水分の深さによる差異を反映して，7 cm 深の方がいずれの条件でも種子の水分吸収速度は高いが，播種直後に降雨があった 2007 年の 1 回目（耕うん同日）では，播種深度による違いは見られなかった．2006 年の播種日の違いによる影響は，7 cm 深では見られないが，3 cm 深では 2 回目（耕うん 3 日後）の播種で明らかに吸水が遅滞し，3 日後にはむしろ乾燥する傾向すら見られた．このように一旦吸水した後乾燥するような水分吸収パターンは，発芽の遅れのみならず種子の発芽能力を大幅に低下させるため，特に回避されるべきである．

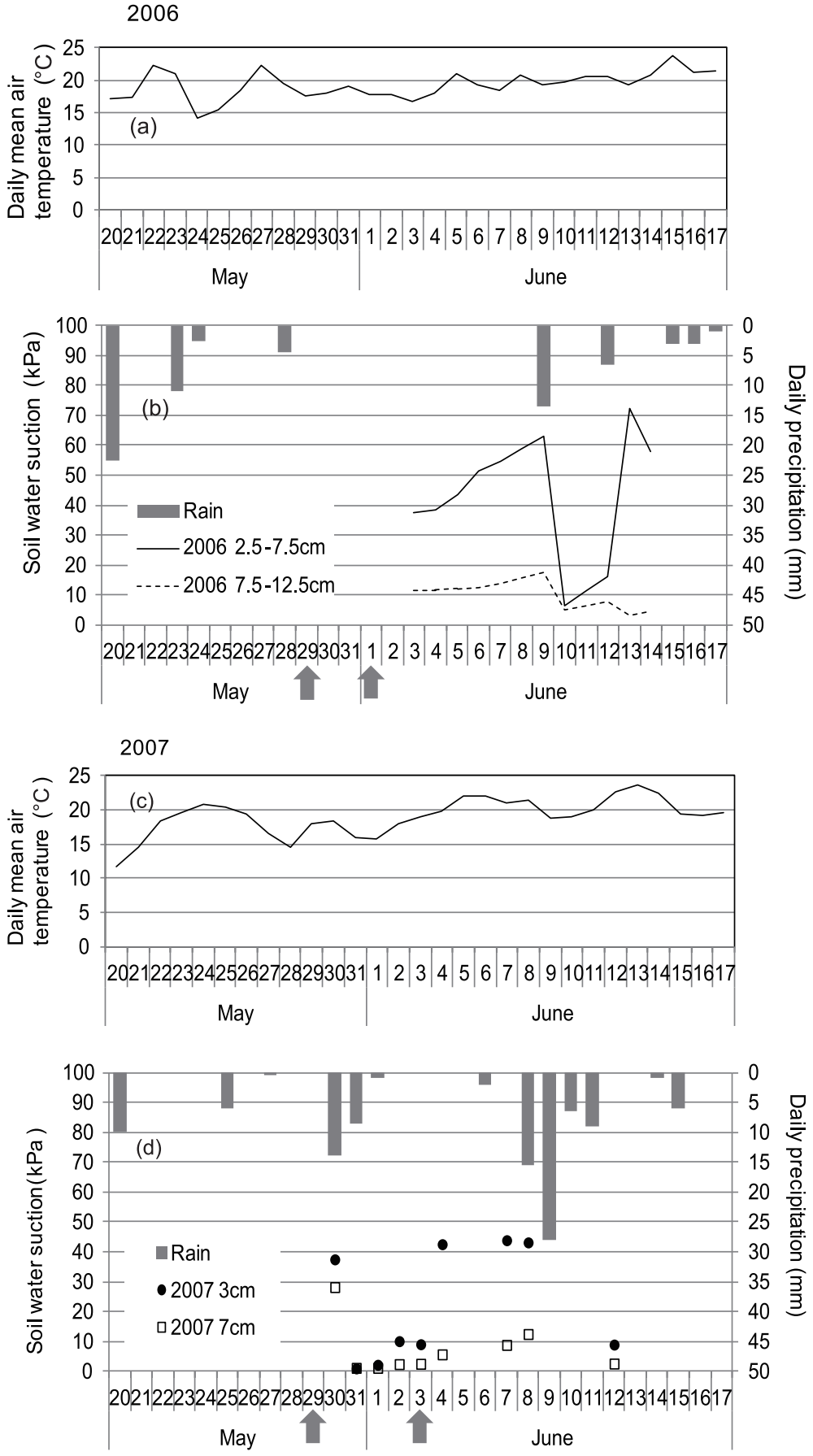



**Fig. 3** 播種前後の気温，降水量および土壌水ポテンシャルの推移．(a) 2006 年の気温，(b) 2006 年の降水量および土壌水ポテンシャル，(c) 2007 年の気温，(d) 2007 年の降水量および土壌水ポテンシャル．図下端の矢印は播種日を示す．
Change in air temperature, precipitation and soil water potential during the experiment. (a) Air temperature in 2006, (b) Precipitation and soil water potential in 2006, (c) Air temperature in 2007, (d) Precipitation and soil water potential in 2007. The arrows below the horizontal axes represent the planting dates.

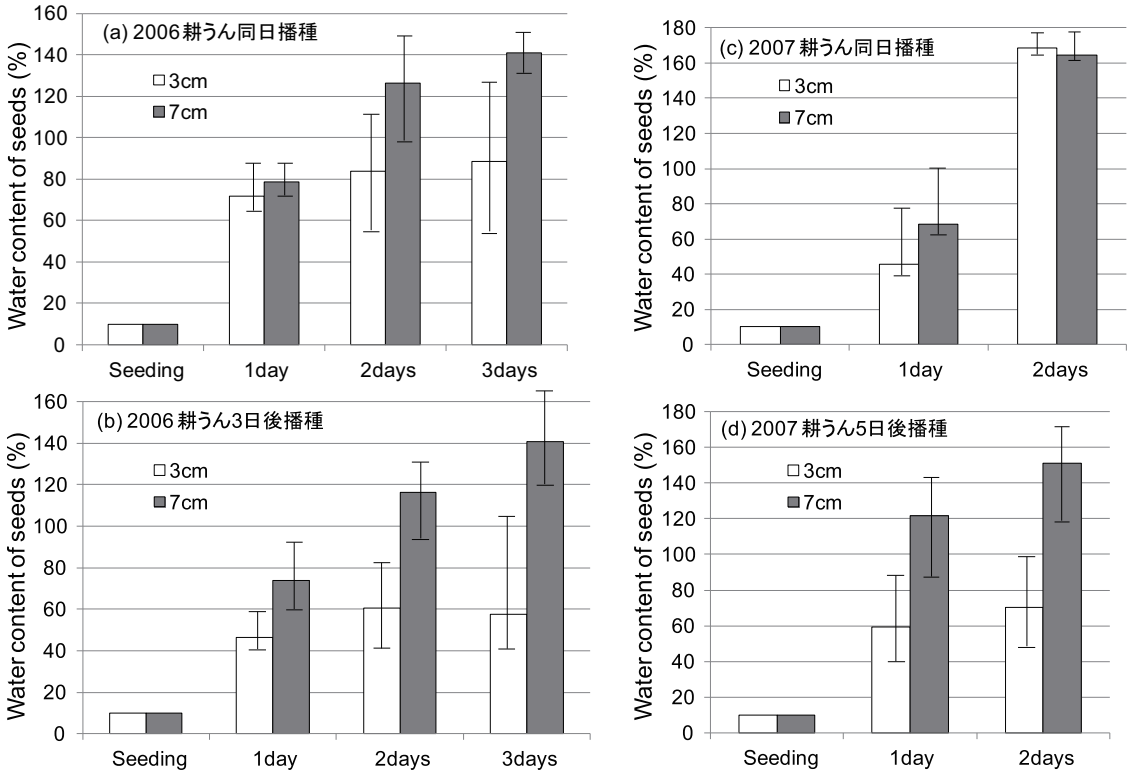



**Fig. 4**　播種後の種子水分の変化．(a) 2006 年耕うん同日播種，(b) 2006 年耕うん 3 日後播種，(c) 2007 年耕うん同日播種，(d) 2007 年耕うん 5 日後播種．播種日の効果のみをこの図では比較しており，各水準 16 区の結果の平均と標準偏差（他の要因による変動を含む）を示したものである．

Change in water content of seeds after planting. (a) Planted soon after the tillage in 2006, (b) Planted three days after the tillage in 2006, (c) Planted soon after the tillage in 2007, (d) Planted five days after the tillage in 2007. Data variation caused by the factors except planting day is represented by error bars: The figure compares the effect due to planting dates alone.

### 3.4 発芽後の成長

実験処理が種子の水分吸収およびその後の成長に与えた影響（効果）に関して，分散分析の結果とともに Fig. 5 ～ Fig. 7 に示した．それぞれのグラフの縦軸は，横軸の要因のみを変動させたときの「水準平均」を示したものであり，技術効果の比較のための分散分析において「効果」と（奥野，1994）呼ばれる量である．処理の組み合わせにより期待される値は，有意な要因（主要因および交互作用）によりもたらされる偏差，すなわち各縦軸の値と全体の平均値（一点破線，二点破線）との差の線形和に全体の平均を加えた値として推定される．Fig. 5 及び Fig. 6 の図中 × のプロットで示した 2007 年の播種 2 日後の発芽率および両年の播種 5 日後の発芽率については，データがそれぞれ飽和種子水分および発芽率 100 % に偏って分布していたため，分散分析は行っていない．

種子の水分吸収に対しては，前項で述べたように，播種深度と播種日の影響が非常に大きい．また，2007 年では，播種日により，深く播種することの効果に違いがみられた．すなわち，播種深度 × 播種日に有意な交互作用が認められた．2007 年においては，鎮圧が水分吸収に及ぼす影響が認められたが，その効果は小さかった．

水分吸収の差異を反映し，発芽率は，両年とも播種深度 7 cm が 3 cm よりも高くなった．また，2007 年には，耕うん直後の播種により，2 日後の発芽率は有意に高くなったが，5 日後には処理によらず高い発芽率になった．2006 年については発芽率に対する播種日による有意な効果は認められなかった．また発芽率に対する鎮圧の効果は，2006 年の播種 3 日後のみに認められた．

播種 2 週間後の出芽率に対しては，両年とも播種深度と播種日に有意な効果が現れた．ただし，播種深度の効果は，両年で正反対であった．すなわち，過乾燥傾向が強かった 2006 年には，7 cm の方が 3 cm よりも出芽率は高かった．一方過湿傾向にあった 2007 年には，3 cm の方が 7 cm よりも出芽率は高かった．播種日については，両年とも耕うん直後の方が高い出芽率となった．また，2006 年には無鎮圧と鎮圧との間に差が認められたが，2007 年には全く認められなかった．最適な処理を行った場合に期待される出芽率は，2006 年は 0.83（6 kPa，7 cm，0 日），2007 では 0.87（3 cm，0 日）であった．なお，括弧内は最適な処理（水準）の組み合わせを示したものである．これらの期待値は，全体の平均値（図中破線）に最適水準の出芽率と平均値の差（処理効果）を加算することで得られる．有意ではない要因については，加算しない．

2007 年には，タネバエによる食害が認められたため，播種 7 日後におけるタネバエの幼虫による種子の食害率を調査した．なお，2006 年はタネバエによる食害は見られなかった．Fig. 8 に示すとおり，タネバエによる種子

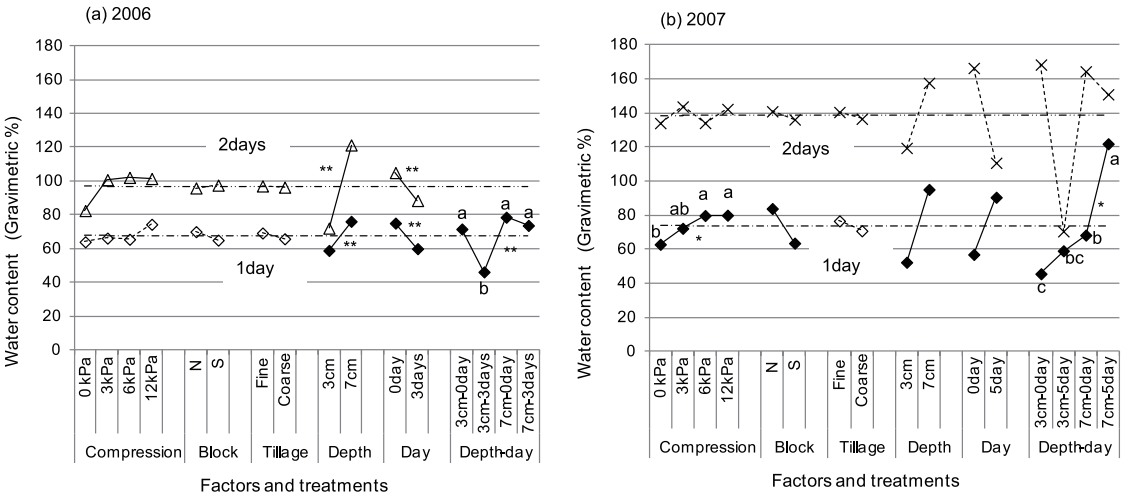



**Fig. 5** 各要因が種子の水分吸収に及ぼす影響．(a) 2006，(b) 2007.
1）** および * は，それぞれ 1 %, 5 % の危険率で有意な要因であることを示す.
2）アルファベットは，Tukey の法による多重比較の結果を示す．異なるアルファベットが付された処理間では 5 % の危険率で有意差があることを意味する.
3）塗りつぶされた記号は，有意差が認められた要因，白抜きは有意差が認められなかった要因，× はデータの特性から分散分析を行うのが不適当と判断されたものを表す.
Effects of factors on water absorption by seeds.
1) ** and * denote statistical significance level of $^{**}P > 0.99$ and $^{*}P > 0.95$, respectively.
2) Different letters denote statistically significant ($P > 0.95$) differences between the series of sampling dates from the summer to the following spring according to Tukey's multiple comparison.
3) The filled and open symbols represents statistically significant and non-significant factors, respectively. Crosses denote data sets inadequate for statistical analysis due to the nature of them.

の食害は，2007 年の 2 回目（耕うん 5 日後）に播種された種子のうち細かく砕土された試験区に集中して発生した．食害は，28 日後の出芽率（2 葉到達率）に明らかに影響を与えていた.

## 4. 考察

### 4.1 鎮圧の効果

播種後の土壌鎮圧は，土壌と種子の接触を向上させる作用と，下層からの液状水の移動を促進する作用の二つの効果が期待されることが古くから知られている（Johnson and Buchele, 1961; Johnson and Henry, 1964; Hummel et al., 1981）．Collis-George et al.（1966）や Hadas et al.（1974a, 1974b）は，土壌のマトリックポテンシャルが種子の吸水に影響を及ぼすのは，種子と土壌の水ポテンシャル差によるものではなく，種子と土壌の間の液相の接触面積に影響するためであると結論づけ，土壌と種子の密着を向上させる土壌鎮圧の効果を指摘している．また，高橋ら（2008）は粘土質転換畑土壌において，土壌鎮圧により下層から上層への水移動が促進され，土壌水分は表層から下層に向けて緩やかに増加する分布となることを認めた．逆に無鎮圧の場合には 4 cm 深以下とそれ以浅とで大きな水分の差異が生じ，表層に乾燥層が発達することを確認している.

砕土が不十分となりやすい粘土質土壌の作土表層では，土塊間に数ミリ以上の大きさの粗大な間隙が多く存在する一方で，土塊同士の接触が悪く，液状水の毛管移動に寄与する間隙の連続性が悪い．また，土塊間の粗大な間隙では，風による空気の流入や乱れにより，水蒸気のマスフローが起こる．その結果，地表近傍の土層のみが極度に乾燥する．鎮圧は，上記の土塊間間隙を圧縮し，土塊同士の密着を高める働きをするため，下層からの水分供給の促進と地表近傍での粗間隙を通じた水蒸気のマスフローの抑制に寄与すると考えられる.

本研究では，乾燥傾向にあった 2006 年において，鎮圧が種子水分や発芽・出芽率に影響を及ぼした（Fig. 5 ～ Fig. 7）．特に Fig. 6 に示された 3 日後の発芽率については，無鎮圧と 3 kPa での鎮圧の間に大きな有意な差が生じた．さらに，発芽率の交互作用を参照すると，3 cm 深では鎮圧の効果が現れていないのに対し，7 cm 深では無鎮圧とその他の鎮圧処理に著しい違いが現れた．このことから，2006 年の乾燥した条件下では，鎮圧は 3 cm（鎮圧前地表面基準）よりさらに深い層でより大きい効果を発揮したことになる．2006 年の播種後の 2.5 ～ 7.5 cm 層の平均水分ポテンシャルは −70 kPa までしか低下しておらず（Fig. 3），粘土質土壌で出芽率を低下させないことが確認されている範囲内（Heatherly et al., 1979）にあった．しかし，地表近傍の土塊表面は，著しく乾燥が進んでいたと考えられ，深さ 3 cm 付近では，土塊が種子に密着をしていても十分に水を供給できなかったものと考えられる．高橋ら（2008）は室内実験で，土壌の水分ポテンシャルを一定にコントロールしたときの，土塊径および鎮圧強度の違いによる種子の水分吸収速度の差異を調べている．水ポテンシャルが −10 kPa の高水分では，いずれの土塊径でも鎮圧により種子の水分吸収速度が高まる傾向を示したが，−0.1 MPa や −3.2 MPa で

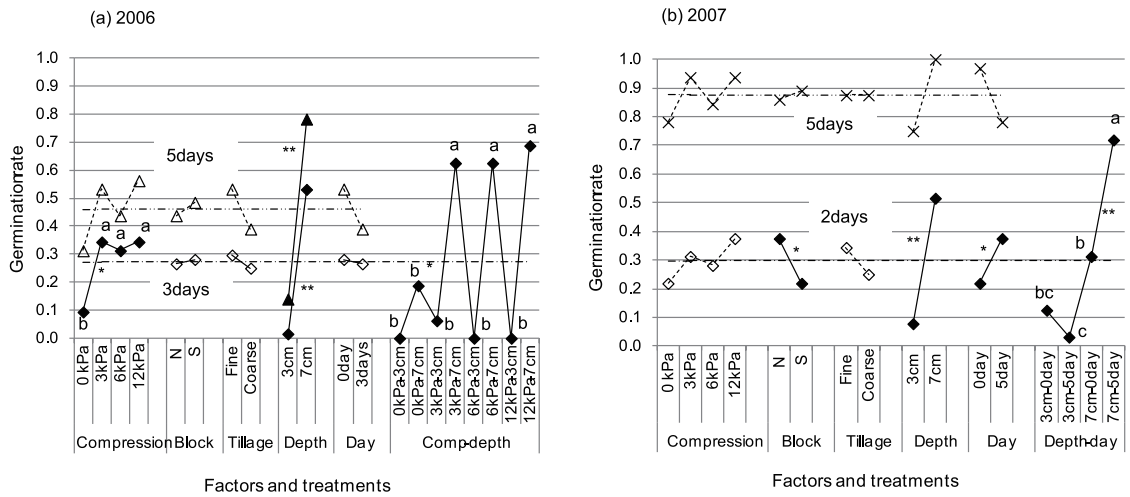



**Fig. 6**　各要因が種子の発芽率に及ぼす影響．（a）2006，（b）2007．
1）図中の日数は播種後の日数を示す．
2）** および * は，それぞれ 1 %, 5 % の危険率で有意な要因であることを示す．
3）アルファベットは，Tukey の法による多重比較の結果を示す．異なるアルファベットが付された処理間では 5 % の危険率で有意差があることを意味する．
4）塗りつぶされた記号は，有意差が認められた要因，白抜きは有意差が認められなかった要因，× はデータの特性から分散分析を行うのが不適当と判断されたものを表す．
Effects of factors on germination rate of seeds.
1) Days in the figure show the days after the planting
2) ** and * denote statistical significance level of $^{**}P > 0.99$ and $^{*}P > 0.95$, respectively.
3) Different letters denote statistically significant ($P > 0.95$) differences between the series of sampling dates from the summer to the following spring according to Tukey's multiple comparison.
4) The filled and open symbols represents statistically significant and non-significant factors, respectively. Crosses denote data sets inadequate for statistical analysis due to the nature of them.

は，鎮圧による明確な効果は認められなかった．この結果から，鎮圧による種子の水分吸収速度の向上は，主に鎮圧により播種床の水分を高く維持できることによるものであると結論づけている．本実験の結果から，このような水分分布に対する鎮圧の効果について言及することはできないが，高水分で鎮圧の効果が発現する点については，本研究で得られた結果と整合する．

鎮圧強度の影響については 3，6，12 kPa の設定で，乾湿どちらの年においても有意な違いは見られなかった（Fig. 5 ～ Fig. 7）．すなわち，鎮圧の有効性は明らかであるが，その強度や方法については，鎮圧輪により与えられる一般的な荷重範囲内（6 kPa 前後）であれば注意を要する問題ではないと考えられる．

鎮圧をしない場合には，耕うんされた土壌は自重のみにより圧縮される．耕うんされた土壌の湿潤密度は，砕土率の試験結果の際に定容積を採取した土塊の重量から 1.3 ～ 1.8 $Mgm^{-3}$ であったことがわかっている．この場合，深さ $z$ cm 深での自重は，$0.13z \sim 0.18z$ kPa と見積もられる．例えば 3 cm 深での鎮圧を行わない場合の荷重は，0.4 ～ 0.6 kPa となり，最小の荷重値 3 kPa の 1/5 ～ 1/8 である．地盤の圧縮量は，おおよそ圧縮荷重の対数値に比例するので，無鎮圧から 3 kPa まで荷重したときの圧縮効果は，3 kPa から 12 kPa まで 4 倍に荷重を増大させたときの効果より大きいはずである．このことから，鎮圧強度を大幅に高めれば，結果に違いが生じる可能性はある．しかし，出芽を阻害しない程度の圧縮を想定すると，3 ～ 12 kPa 程度の鎮圧が現実的であり，鎮圧強度が大きな影響を及ぼす状況は考えにくい．

### 4.2 耕うんから播種までの時間

播種期が乾燥傾向であった 2006 年と，逆に湿潤傾向であった 2007 年の結果（Fig. 5 ～ Fig. 7）から，耕うん同日播種と，数日後の播種との差異を比較すると，乾燥・湿潤どちらの条件においても，耕うんと同時に播種することは，出芽にプラスに働くことが確認された．2006 年には，水分吸収から出芽に至る全ステージにおいて，耕うん同日播種が良い成績であった．一方，2007 年には，播種後の降雨のタイミングが絡み，耕うん 5 日後播種区の方が良好となる時期も一時は見られた．しかし，最終的な出芽率は同日播種が勝った．

2007 年の 5 日後播種で出芽率が悪化した原因としては，タネバエの発生が，5 日後播種区にのみ見られたことが挙げられる（Fig. 8）．タネバエの成虫は耕起直後の湿った畑に集まり，土塊の間などに点々と産卵する．卵が孵化するまでに要する日数は 2 ～ 8 日とされる（農文協，1987）．耕うん直後に産卵されると，ダイズの生育速度が幼虫の成長速度より勝り，食害を受けずに出芽できる．しかし，2007 年の 5 日後播種区のように，湿潤な条件下にもかかわらず耕起後時間をあけて播種すると，幼虫の成長が先行し食害の発生を助長したものと考えられる．なお，砕土性の悪いほ場でタネバエの被害は発生しやすい（農文協，1987）とされるが，本試験においてタネバエの発生は細砕土区に集中していた．上記の砕土性

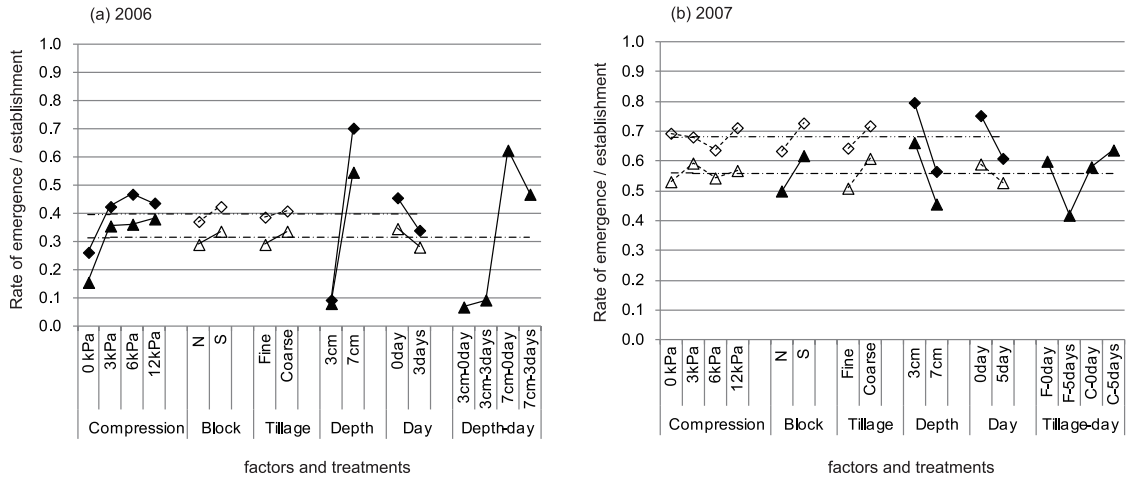



**Fig. 7** 各要因が播種 14 日後の出芽率および 28 日後の苗立ち率に及ぼす影響．(a) 2006, (b) 2007.
1) ** および * は，それぞれ 1 %, 5% の危険率で有意な要因であることを示す．
2) アルファベットは，Tukey の法による多重比較の結果を示す．異なるアルファベットが付された処理間では 5 % の危険率で有意差があることを意味する．
Effects of factors on emergence and establishment rate.
1) ** and * denote statistical significance level of $^{**}P > 0.99$ and $^{*}P > 0.95$, respectively.
2) Different letters denote statistically significant ($P > 0.95$) differences between the series of sampling dates from the summer to the following spring according to Tukey's multiple comparison.

との関係についての指摘は，劣悪な砕土によりダイズの出芽が遅れることによる食害リスクを問題にしているものとも考えられる．土塊径と産卵や孵化，そして幼虫の成長速度との関係，さらには，砕土率による地表面のわずかな乾燥度合いの影響についての複雑な因果関係については，本試験データから言及することはできない．なお，タネバエの被害が予測される場合にはキヒゲンより強い効果をもつ薬剤による防除が可能であることを付記する．

### 4.3 播種深度

ダイズの最適な播種深度については，推奨される値に幅があるが，多くは 3 ～ 4 cm とされている．ただし，いずれの地域でも，気象条件や土性に応じて，より深めや浅めにすることを推奨している．本研究では，鎮圧前の平均地表面を基準にし，種子の底面までの高さが 3 cm もしくは 7 cm となるように播種を行っているが，鎮圧後にはこれより浅い深度に種子が存在していたことになる．この意味で，本試験で採用した 3 cm および 7 cm という播種深度は，一般に適当な播種深度とされる 3 ～ 4 cm に対し，気象条件や土性による調整分の数センチを加除した深度と理解できる．

Fig. 5 ～ 7 に示されている通り，乾燥条件と湿潤条件で，明らかに出芽率に対する播種深度の効果は逆転しており，播種後の天候を考えて播種深度を決めることの重要性を示している．

浅い側の限界は，種子が必要な水分を吸収し胚軸を土中に伸ばすまでの間に種子と接する土壌が乾燥しすぎないという条件を満たす深さである．深さ 4 cm に播種されたダイズの種子の出芽率を，土壌の水ポテンシャルを −10 ～ −70 kPa の範囲で 7 段階に制御して調べた実験（Heatherly et al., 1979）によれば，粘質土では 2 週間で 80 % 以上の出芽率となる水ポテンシャルの範囲は，全処理域であったのに対し，砂質土では −40 ～ −60 kPa に限られた．すなわち，粘質土では，−70 kPa 以上の水ポテンシャルであれば，発芽や出芽に問題は起こらないと考えられるが，水ポテンシャルの低下により飽和度が低下する砂質土では，上記のような水ポテンシャル領域でも，種子への水の移動が抑制されうることを示している．

乾燥年である 2006 年においても 2.5 cm ～ 7.5 cm 層平均の水ポテンシャルは，テンシオメータによる計測が可能な −70 kPa 以内であった（Fig. 3b）．土壌が粘質土であることを考慮すれば，播種深度 7 cm では，その年の天候条件にかかわらず水分不足の問題は生じないと考えられる．一方，播種深度 3 cm では，天候条件によって土壌が過乾燥状態となることを播種後の種子水分変化（Fig. 4）が示唆している．適当な間隔の降雨がみられた 2007 年では，3 cm での水ポテンシャルが −45 kPa を超えた日はなく（Fig. 3d），出芽率は 7 cm よりも 3 cm の方が高くなった．一方，乾燥傾向が強かった 2006 年では，3 cm 深での水ポテンシャルの実測値が無いため，出芽に対して影響を及ぼす土壌の水ポテンシャルの下限値を示すことはできない．しかし，Fig. 4 (a) (b) が示すように，3 cm 層での種子水分増加が，播種 1 日後以降で停滞しているのは，乾燥層が播種後数日で 3 cm 以深に達したためであると考えられる．

播種深度が深いときの問題の一つは通気性である．通気性は，土壌構造の安定性や降雨による停滞水の排除に要する時間などが影響する．粘土質転換畑での播種床の排水・通気条件の改善方法としては，畦立て栽培が挙げられる．細川 (2005) は，アップカットロータリーによる耕うん・畦立てと播種を同時に行う機械作業システムを

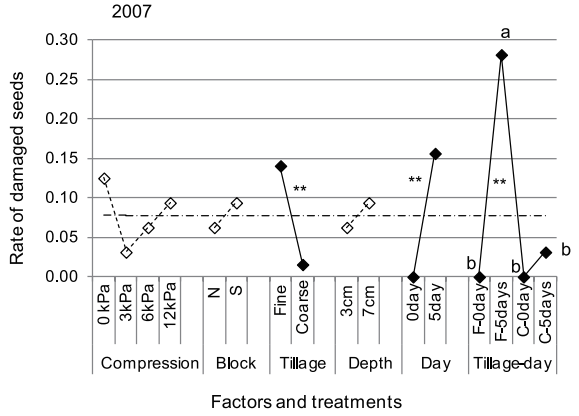



**Fig. 8**　各要因がタネバエによる食害に及ぼす影響.
1）** および * は，それぞれ 1 %, 5 % の危険率で有意な要因であることを示す.
2）アルファベットは，Tukey の法による多重比較の結果を示す．異なるアルファベットが付された処理間では 5 % の危険率で有意差があることを意味する.
Effects of factors on damage of seeds by seed-corn flies.
1) ** and * denote statistical significance level of $^{**}P > 0.99$ and $^{*}P > 0.95$, respectively.
2) Different letters denote statistically significant ($P > 0.95$) differences between the series of sampling dates from the summer to the following spring according to Tukey's multiple comparison.

開発し，排水性・通気性の改善効果を確認している．また，硬盤破砕や暗渠排水システムの強化が出芽時の排水性の改善に与える効果についても複数の報告がある（例えば，原口, 1994; 足立ら, 2002）.

深播きのもう一つの問題は，出芽までに日数を要するために，途中で病害に感染したり，出芽後の生育が悪くなったりするリスクを抱えることである.

本試験は 3 cm と 7 cm の 2 水準のみ行っているため，この間の播種深度で結果がどのような傾向になりうるかは言及できない．しかし，砕土性や排水性が不良な本試験ほ場においては，乾燥・過湿，どちらのリスクもある程度回避できるいわば「無難な」深度は，鎮圧前の地表面を基準として，3 cm と 7 cm の間に存在すると推察される.

### 4.4 砕土率

砕土率については，ダイズの栽培において重要視されている項目である．2 cm 以下の土塊の重量割合が 70 % 以上，あるいは平均土塊直径 1.5 cm 以下が，一般に広く採用されている目標である．本実験ではアップカットローターを用いたため，砕土率は，表層の方が高くなった（Table 1 の 2007 年のデータ）．相対的に砕土が良好な 0 ～ 5 cm 層においては辛うじて約 70 %（2007 年）となったが，全層平均の砕土率のレンジは，37 % ～ 62%（両年）であり，細砕土区でも十分な砕土とは言えない．土塊の大きさと出芽率の関係については，孫ら（2004）がポット試験により示した結果が明確な特徴を提示している．この実験では，覆土は 20 mm で，潅水は播種後一回であるが，蒸発を抑制するために播種後はシートで地表面は被覆された．播種 7 日後のダイズの出芽率は，土塊径 10 mm 以下では約 80 % となった．しかし，10 mm 以上では，土塊径が大きくなるにつれて出芽率は低下し，10 ～ 20 mm の土塊では約 60 %，20 ～ 40 mm の土塊では 20 % 以下であった．すなわち，20 mm 以上の土塊の水分は，ダイズの出芽にあまり寄与しないことが示されている．これは 20 mm 以下の土塊の割合が砕土性の指標として広く利用されていることの合理性を示している．さらに細かい粒径レンジでラッカセイの発芽を比較した実験（Khan and Datta, 1983）でも，土塊径と発芽に要する時間との間には明確な関係が示されている．この実験では，土塊径のレンジ 0.25 ～ 0.50 mm，1 ～ 2 mm，2 ～ 4 mm に対して，発芽に要した時間は 69，81，120h であった．以上から，センチメートルオーダーの土塊径の差異は，出芽の可否に，数ミリのオーダーの土塊径の差異は，発芽に至る速度に影響すると考えられる.

機械播種では，砕土率が悪いと播種深度が不安定となるため，砕土率は播種深度にも関係すると考えられる．耕起砕土後にツースハローとカルチパッカで均平を行って播種すれば，砕土率が播種精度に影響を及ぼさないとする報告（西入ら，1976）もみられるが，ロータリーによる砕土だけでは，砕土率が悪い粘質土において安定した播種深度を確保するのは困難である．この影響は数センチのオーダーの土塊が多いときに問題となると考えられる.

砕土性は，土壌水分の移動にも影響を及ぼす．Ojeniyi and Dexter（1984）は，土塊径を 4 ～ 8 mm，8 ～ 16 mm に調整した土層において，土塊径と土壌水分との間に負の相関があったことを示している．すなわち，土塊径が大きいと，下層からの毛管水の上昇は起こりにくくなるとともに，土塊間間隙を通じた水蒸気のマスフローが促進され，地表面近傍の土壌水分の減少が著しくなる．種子が乾燥層より下にあれば，必ずしもこの特徴は悪い影響を及ぼさないが，浅い層に播種されると水分吸収は大幅に遅延する.

以上のように，既往の研究では，砕土性と発芽・出芽率の間には明確な関係が提示されてきた．しかし，本実験では，明確な違いは確認されなかった（Fig. 5 ～ Fig. 7）．その原因として，一つは手播きを行ったことにより播種深度が安定したこと，二つ目は砕土率のレンジが推奨される水準より悪く，発芽の促進に寄与する細かい土塊画分の差の絶対量が十分ではなかったためと考えられる．さらなる砕土率の向上が可能であれば，全体的に高位の発芽条件となることが推察されるが，一方で，重粘土転換畑において，砕土性を向上させることは容易ではなく，転換直後の畑や粘土含量が著しく高いほ場においては，播種深度や播種のタイミングを慎重に検討することで砕土性の悪さをカバーすることも必要と言える.

### 4.5 播種深度と排水性

播種床層の土壌水分分布が，予測される天候条件のもとで正確に推定できるようになったとしても，天候の予測に不確実性があれば，依然として大きなリスクが付きまとう．Fig. 4 ～ Fig. 7 が示す通り，播種深度が，発芽，出芽に及ぼす影響は決定的であり，降雨条件に応じた播

種深度の設定が，非常に重要であることは明らかである．しかし，播種後の降雨を正確に予測することは年によっては難しく，乾燥，過湿による大きなリスクを回避できる条件設定が必要である．本試験結果が示すように，過乾燥リスクは地表 3 cm では非常に高いが，7 cm では連続干天下でも問題とならない．一方，湿害リスクは深い位置で高まるが，その影響の程度は排水性の良否に左右されると考えられる．よって，湿害リスクを意識しすぎて日常的に浅く播種するより，排水性の確保に努めつつ，深い層に播種することが，リスクの少ない播種方法と考えられる．

## 5. まとめ

砕土性が不良な重粘土転換畑におけるダイズの出芽・苗立ちを安定化させる播種条件を明らかにするために，播種時期に乾燥傾向の強かった 2006 年と，標準的な降雨が見られた 2007 年にほ場試験を行った．その結果，以下の結果を得た．

1）ダイズの出芽・苗立ちに対しては，播種深度および耕うんから播種までの期間が最も影響の強い要因であった．播種後の降雨の有無によらず，耕うん後は速やかに播種することで出芽・苗立ちは安定化した．

2） 最適な播種深度は，播種後無降雨が続く場合には深い方が有利であるが，すぐに降雨がある場合には浅い方が出芽後の生育は良好であった．降雨の見通しによる播種深度の調整は特に重要な要素である．

3）鎮圧は，乾燥条件下において，播種深度にかかわらず発芽を促進する効果（直接効果）を示したが，特に土壌の水ポテンシャルが −70 kPa を下回らなかった 7 cm 層では，相乗効果（交互作用）をもたらした．しかし，水ポテンシャルがこれより低い 3 cm 層では，相乗効果は発揮されなかった．また，鎮圧強度の違い（3, 6, 12 kPa）は，発芽や生育に影響を及ぼさなかった．

4）2 cm 以下の土塊の割合が 40 ～ 60 % 程度の不良な砕土条件下では，手播きにより播種深度を揃えると，砕土率の良否はダイズの発芽，苗立ちに有意な影響を及ぼさなかった．

## 謝辞

実験は，中央農業総合研究センター北陸研究センター業務科各位の全面的な支援により行われました．ここに感謝の意を記します．

## 引用文献

足立一日出, 細川 寿, 吉田修一郎, 松崎守夫 (2002): 重粘土転換畑における本暗渠に浅層暗渠を組み合わせた暗渠排水システムの排水特性. 農業農村工学会論文集, 220: 35–41.

有原丈二 (1998): 出芽で決まる大豆の収量. 農業技術体系作物編 6, 追録, 20 技 178 の 10.

Braunack, M.V. (1995): Effect of aggregate size and soil water content on emergence of soybean (Glycine max, L. Merr.) and maize (Zea mays, L.). Soil and Tillage Research, 33: 149–161.

Collis-George, N. and Hector, J.B. (1966): Germination of seeds as influenced by matric potential and by area of contact between seed and soil water. Australian Journal of Soil Research, 4:145–164.

Khan, A.R. and Datta, B. (1983): Effect of aggregate size on water uptake by peanut seeds. Soil and Tillage Research, 3: 171–184.

Hadas, A. and Russo, D. (1974a): Water uptake by seeds as affected by water stress, capillary conductivity, and seed-soil water contact. I. Experimental study. Agronomy Journal, 66: 643–647.

Hadas, A. and Russo, D. (1974b): Water uptake by seeds as affected by water stress, capillary conductivity, and seed-soil water contact. II. Analysis of experimental data. Agronomy Journal, 66: 647–653.

浜口秀生, 石本政男, 吉田 堯 (1985): 土壌水分と出芽. 農業技術体系作物編, 6, 技 92.

原口暢朗 (1994): 輪換畑における麦あと大豆出芽時の湿害回避に及ぼす硬盤破砕効果の評価法. 農業土木学会論文集, 172: 29–38.

Heatherly, L.G. and Russell, W.J. (1979): Effect of soil water potential of two soils on soybean emergence. Agronomy Journal, 71: 980–982.

Helms, T.C., Deckard, E.L., Goos, R.J. and Enz, J.W. (1996a): Soil moisture, temperature, and drying influence on soybean emergence. Agronomy Journal, 88: 662–667.

細川 寿 (2005): 湿害回避のための大豆耕うん同時畦立て作業技術. 農業技術, 60 (6): 254–257.

Hummel, J.W., Gray, L.E. and Nave, W.R. (1981): Soybean emergence from field seedbed environments. Transactions of the ASAE, 24: 872–879.

Johnson, W.H. and Buchele, W.F. (1961): Influence of soil granule size and compaction on rate of soil drying and emergence of corn. Transactions of the ASAE, 4 (2): 170-174.

Johnson, W.H. and Henry, J.E. (1964): Influence of simulated row compaction on seedling emergence and soil drying tates. Transactions of the ASAE, 7 (3): 252–255.

新潟県農林水産部 (2013): 平成 25 年度水稲，大麦，大豆，そばの技術対策情報. 5 月の技術対策. http://www.pref.niigata.lg.jp/HTML_Simple/171/972/gitai5,0.pdf

農文協 (1987): 作物病害虫百科 診断と防除 2 ムギ，マメ類，飼料作物. 農文協編, pp. 259–264, 農山漁村文化協会, 東京.

西入恵二, 川村五郎 (1976): 水田転換畑におけるダイズの機械化栽培について. 第 1 報 作土の土塊分布とダイズの生育. 東北農業試験場研究速報, 20: 7–13.

Ojeniyi, S.O. and Dexter, A.R. (1984): Effect of soil structure on soil water status. Soil and Tillage Research, 4: 371–379.

Rathore, T.R., Ghildyal, B.P. and Sachan, R.S. (1983): Effect of surface crusting on emergence of soybean (Glycine max L. Merr) seedlings. 1: Influence of aggregate size in the seedbed. Soil and Tillage Research, 3: 111–121.

孫 宇梅, 伊藤道秋, 荒木 肇, 山下米治 (2004): 作物の出芽，生育に及ぼす土塊の大きさの影響. 農作業研究, 39(3): 141–156.

Stucky, D.J. (1976): Effects of planting depth, temperature, and cultivars on emergence and yield of double cropped soybeans. Agronomy Journal, 68 (2): 291–294.

高橋智紀, 細川　寿, 松崎守夫 (2008): 重粘質転換畑における土壌鎮圧によるダイズ種子の吸水抑制効果. 日本土壌肥料学雑誌, 79: 1–7.

鄭　紹輝, 綿部隆太 (2000): 浸水によるダイズ種子からの糖溶出と出芽の関係. 日本作物学会紀事, 69 (4): 250–524.

## 要　　旨

粘質土壌の低い砕土性を考慮しつつ，ダイズの安定的な出芽・苗立ちのための適切な播種条件を明らかにすることを目的として，ほ場における要因試験を行った．4 つの要因，すなわち播種深度，耕うん後の播種日，播種後の鎮圧の有無・強度，砕土率が，播種後の種子水分，発芽率，出芽率，苗立ち率に及ぼす影響を解析した．重粘土転換畑におけるダイズの出芽・苗立ちに対しては，1）播種深度および耕うんから播種までの期間が，影響の強い要因であり，耕うん後の速やかな播種が重要であること，2）播種深度は，無降雨が続く場合には深い方が有利であるが，すぐに降雨がある場合には浅い方が出芽後の生育は良好であること，3）鎮圧は，十分な土壌水分のもとでは発芽の促進に相補的に働き，また，強度の違いはほとんど影響を及ぼさないこと，4）不十分な砕土条件下においては，播種深度を揃えた場合，砕土率に差があっても（全層平均の砕土率 37 % ～ 62 % ），ダイズの出芽・苗立ちに有意な違いが生じないこと，が明らかになった．

**キーワード**：粘土質水田，ダイズ，播種，土塊，発芽，苗立ち