

湛水直播水稻における冠根の伸長角度および稈基部の物理的性質と耐倒伏性との関係

古畑昌巳¹⁾・有馬進²⁾

(¹⁾ 中央農業総合研究センター北陸研究センター, (²⁾ 佐賀大学農学部)

要旨: 現在, 普及面積が増加している点播や条播などの湛水土中播種ではころび型倒伏よりなびき型倒伏あるいは挫折型倒伏が生じることが多く, これらの耐倒伏性には従来報告されてきた深根性だけではなく, 稈基部の物理的性質も寄与している可能性が考えられる. そこで, 国内外 14 の品種・系統を供試し, コンクリート枠水田を使って湛水直播栽培した水稻について, 根の伸長角度および稈基部の物理的性質と耐倒伏性との関係を検討した. その結果, 播種深度に関わらず深根性, 断面係数および葉鞘付挫折時モーメントと耐倒伏性の間には有意な相関関係が認められたが, 葉鞘付挫折時モーメントは深根性に比べて標準偏回帰係数および偏相関係数が大きく, 稈基部の物理的性質が深根性に比べて点播や条播などの湛水直播水稻の耐倒伏性により密接に関係していることが示唆された.

キーワード: イネ, 押し倒し抵抗値, 冠根, 耐倒伏性, 断面係数, 根の伸長角度, 曲げ応力, 葉鞘付挫折時モーメント.

現在, 米の一部自由化への圧力が増す中で, 国内の水稻栽培にはより一層の省力・低コスト化が求められている. 湛水直播水稻栽培は, 育苗を行わないため移植栽培に比べて省力ではあるが, 移植水稻に比べて倒伏しやすく, この倒伏によって減収することが多いとされている. そのため, 湛水直播水稻の耐倒伏性を向上させる特性を明らかにすることは直播栽培を普及する上で大変重要である.

従来, 直播栽培について典型的な播種様式とされてきた表面散播でのころび型倒伏性の研究として, 寺島ら (1992) は地下部による株の支持力を品種間で比較した結果, アメリカ品種および半矮性インド型品種は日本品種に比べて地下部による株支持力が高いことを報告している. またその要因として, これらの品種は心土層や作土のより深い層に根を多く分布させたためであるとした (寺島ら 1994). さらに寺島ら (1995) は, 断根処理や作土層への不織布埋設によって押し倒し抵抗値が低下すること, 高密度に充填した土壌で生育した株は低密度に充填した株に比べて押し倒し抵抗値が高まることから, 耐ころび型倒伏性の改善には土壌密度の高い心土層に根を多く分配させる特性が重要であると結論づけた.

一方, 現在, 散播の普及面積はほぼ横ばい状態で推移しているのに対して, 点播 (下坪・富樫 1996a) や条播などの土中に播種する播種様式が普及面積を伸ばしているが, これらの様式は散播に比べて耐倒伏性が優れるため, 直播栽培の導入に当たって選択されていると考えられている. また, これらの播種様式ではころび型倒伏よりむしろなびき型倒伏あるいは挫折型倒伏が生じることが多いことから, 散播水稻でころび型倒伏が生じる主要因と考えられている地下部による株の支持力だけではなく, 移植水稻で挫折型やなびき型倒伏が生じる主要因と考えられている稈基部の挫折強度 (世古 1962, 氷高 1968, 八木 1983) も寄与

している可能性が高い.

そこで, 本研究では, 表面散播を想定した表面播種と点播を想定した土中播種という異なる播種深度に播種した場合の地上部・地下部の形質と耐倒伏性の関係を検討した.

材料と方法

1. 試験方法

本実験では, 移植栽培で育成され, 現在栽培されている日本稲 6 品種, 直播で育成されてきたため, 苗立ち性に優れ, ころび型倒伏は強いことが考えられるアメリカ稲 5 品種, 九州農試 (現九州沖縄農業研究センター 福岡県筑後市) で育成され, 育成地において直播栽培での耐倒伏性と収量性に優れ, 直播向き系統であると判断された西海 210 号, 西海 218 号および西海 228 号の 3 系統を供試した (第 1 表). 水田土壌 (細粒灰色低地土) を充填した 1 m × 1 m のコンクリートポットをあらかじめ耕起しておき, 1996 年 6 月 2 日に入水, 施肥, 代かきの後, 夕方から落水して飽水状態とした. 播種は, 過酸化カルシウム剤被覆種子を用いて 6 月 3 日にピンセットで種子が隠れる程度の播種深 (以下, 表面播種とする), 1.5 cm 程度の播種深 (以下, 土中播種とする) の 2 水準を設けておこなった. 播種密度は 51 個体/m² (14 cm × 14 cm) で, 1 株 1 本立てとし, 1 品種につき 4 ポット (各品種の表面播種・土中播種それぞれに 2 ポットずつ) 使用した. 施肥 (N 成分 g/m²) は化成肥料で基肥 6, 中間追肥 3, 穂肥 3 (P, K 成分は N 成分と同量) とし, 中間追肥は 7 月 12 日に全ての品種・系統に施用し, 穂肥は各品種・系統の出穂前 20 日前後に行った. 水管理は播種後に一時落水としたほかは, 水道水を掛け流して常時浅水管理とし, 病害虫防除は適宜行った.

第1表 供試14品種・系統の出穂期および総冠根数.

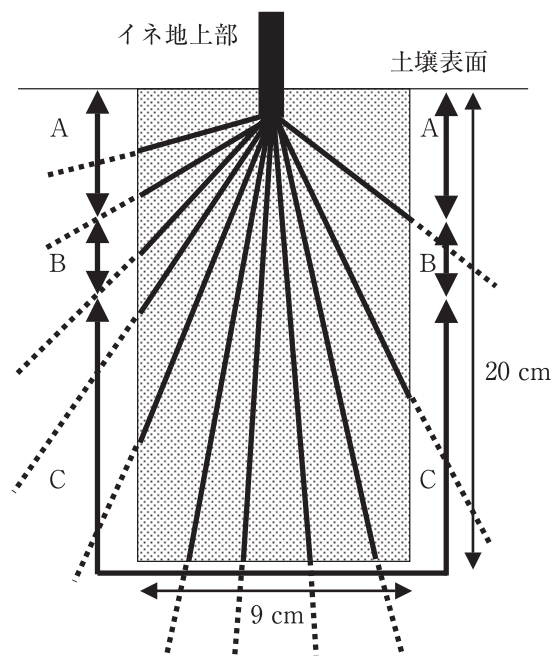
品種・系統名	出穂期 (月・日)	総冠根数 (本/株)
M202	8.9 (8.10)	336 (340)
キヌヒカリ	8.10 (8.11)	457 (393)
コシヒカリ	8.11 (8.12)	348 (331)
西海 228 号	8.16 (8.17)	551 (519)
M401	8.18 (8.21)	408 (379)
日本晴	8.20 (8.22)	581 (504)
西海 218 号	8.22 (8.23)	535 (513)
M7	8.22 (8.23)	371 (484)
New Bonnet	8.26 (8.26)	257 (264)
ヒノヒカリ	8.27 (8.28)	593 (496)
西海 210 号	8.28 (8.29)	467 (557)
Lemont	8.28 (8.30)	242 (221)
ユメヒカリ	9.6 (9.8)	449 (453)
レイホウ	9.8 (9.8)	693 (594)
t 検定	*	ns

左側の数値は表面播種の値, () 内の数値は土中播種の値を示す. *: 対応のある t 検定の結果, 表面播種および土中播種間において 5% 水準で有意差があることを示す. ns: 有意差なし.

2. 地上部形質の調査および稈基部の物理的性質の測定

地上部形質の調査および稈基部の物理的性質の測定については外側 1 列を番外として除き, その内側で生育させた個体を供試した. 地上部については出穂後 2 週間目に稈長, 穂数を調査した後, 押し倒し抵抗値は上村ら (1985) の方法に準じて倒伏試験器 (大起理化工業製) を地際から 10 cm の高さに押し当て, 株を 45 度の角度まで押し倒す際の最大荷重を 20 個体調査した. さらに, この株を地際で刈り取って個体の地上部重を秤量し, 稈長, 地上部重から地上部モーメント (稈長と 1 穂あたりの生体重の積であり, 地上部の生育量を表す) を求めた. 湛水直播栽培での押し倒し抵抗値は, 湛水直播栽培の倒伏程度と相関が高く立毛状態で耐倒伏性の品種間差を評価できること, なびき型あるいは挫折型倒伏のみが生じる移植栽培での押し倒し抵抗値とも高い相関関係があることが報告されている (尾形・松江 1996). このため, 本実験では押し倒し抵抗値をなびき型あるいは挫折型倒伏の指標とした. また, 播種密度によって 1 株穂数, 株当たり押し倒し抵抗値, 倒伏程度は変化するが, 1 穂当たりの押し倒し抵抗値が倒伏程度との関係をよく表していること (尾形・松江 1998 b), 本実験では稈基部の物理的性質を 1 穂当たりの値で評価していることから, 押し倒し抵抗値の単位は 1 穂当たりの値 (g/ 穂) として評価検討した.

稈基部の物理的性質の測定については大川・石原 (1992) の方法に準じて行った. すなわち, 上記調査と同時期 (出穂後 2 週間目) に別のポットの 20 株から葉鞘を付けたままの最長稈を採取した. 採取後, 同日中に第 IV 節間 (穂首



第1図 イネの根系サンプリングの模式図.

アルファベットで示す矢印区間は, 水平 (0 度) から下方向へ A は 30 度未満, B は 30~45 度未満, C は 45 度以上の範囲に伸長した冠根を示す.

節間を第 I 節間とした) を支点間距離 6 cm の支点上に置き, 茎稈挫折強度試験機 (佐藤製作所製 EO-3 型) を用いて節間の中央部の挫折時最大荷重を測定した. 測定直後, 挫折箇所近傍を切断し, 切断面にインクをつけ紙が茎水分でにじまないようスタンプし, 稈横断組織面積を中空楕円とみなして計算した. これらの結果を用いて第 IV 節間の各物理量は, 北条・小田 (1965), 田原ら (1967) の材料力学的方法により, 以下の計算によって求めた.

葉鞘付挫折時モーメント (g cm)

: $1/4 \times (\text{葉鞘付き挫折時最大荷重}) \times (\text{支点間距離})$

断面係数 (mm³)

: $\pi/4 \times (a_1^3 b_1 - a_2^3 b_2) / a_1$

a_1, b_1 : それぞれ葉鞘付き稈の短半径 (mm), 長半径 (mm),

a_2, b_2 : それぞれ中空楕円の短半径 (mm), 長半径 (mm)

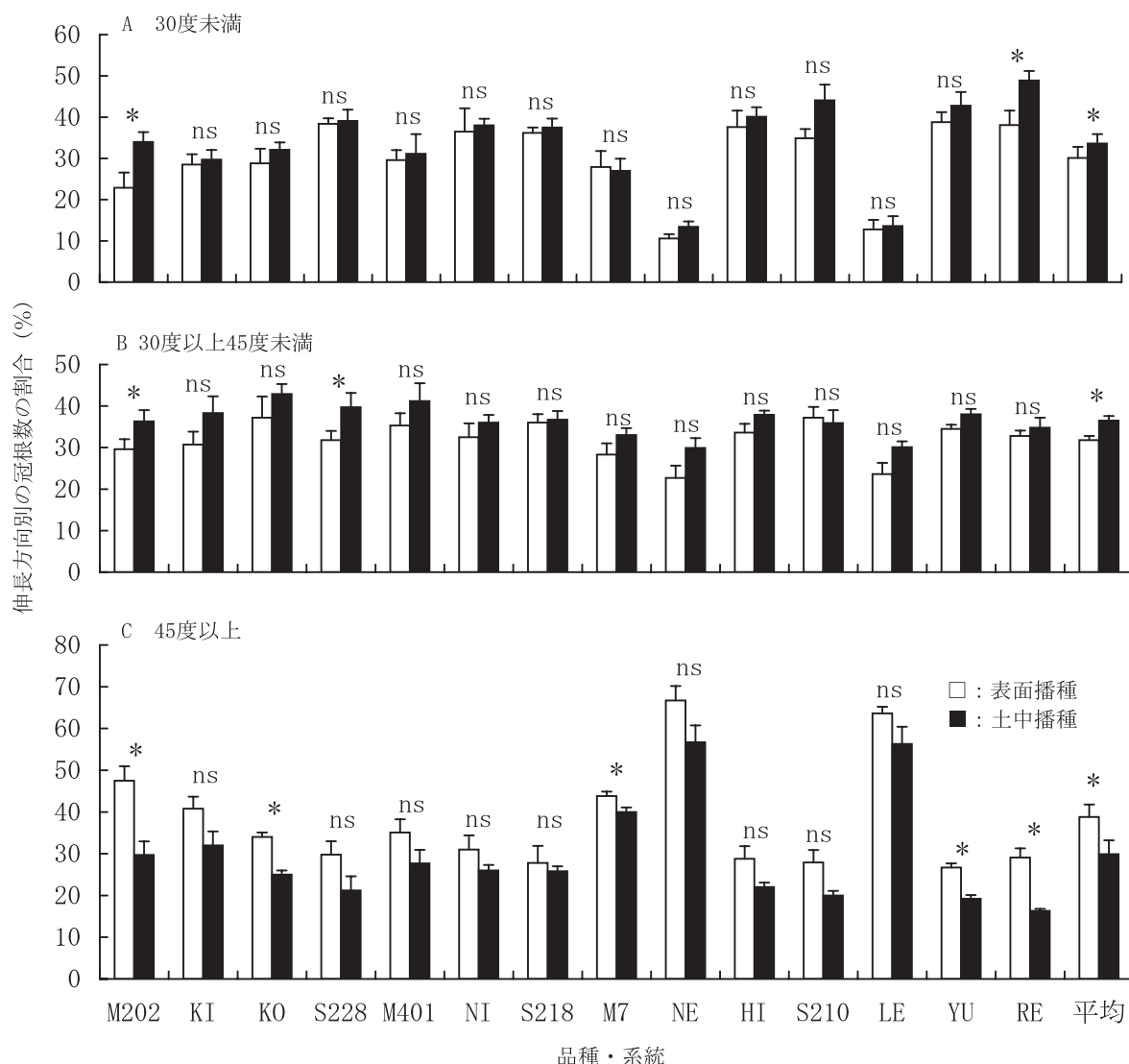
曲げ応力 (g mm⁻²)

: 葉鞘付挫折時モーメント / 断面係数

葉鞘付挫折時モーメントは葉鞘がついた状態での稈の折れにくさを数値で表したものであるが, さらにその構成成分として断面係数および曲げ応力に分けることができる. 断面係数は断面の持つ折れにくさを数値化したものであり, 曲げ応力は単位面積当たりの強さを表している.

3. 冠根の伸長角度の調査

冠根の伸長角度の推定は楠田 (1999) の方法に従った. すなわち, 上記 2 の調査と同時期 (出穂後 2 週間目) に直径 9 cm, 長さ 20 cm の金属製円筒サンプラーで土壌とともに根を採取し, 土壌を洗い落とした後, FAA 溶液内に保存



第2図 株当たり伸長方向別の冠根数の割合の比較。

伸長方向別の冠根数の割合は、水平（0度）から下方向への角度別の分布が推測される冠根数の割合を示す。品種・系統は、KI：キヌヒカリ、KO：コシヒカリ、S228：西海228号、NI：日本晴、S218：西海218号、NE：New Bonnet、HI：ヒノヒカリ、S210：西海210号、LE：Lemont、YU：ユメヒカリ、RE：レイホウ、その他は表記通り（第3図、第4図も同様）。バーは標準誤差を示す。*：対応のない（平均値のみ対応のある）t検定の結果、表面播種および土中播種間において5%水準で有意差があることを示す。ns：有意差なし。

し調査に供した。第1図のように円筒サンプラーで採取すると、外側の冠根は切断される。ここでは、全ての冠根が真っ直ぐに伸長したと仮定し、冠根の長さを調査することで伸長方向別の冠根数の割合を推定した。具体的には株の直径を2 cmと仮定し、冠根長4.2 cm未満のものを（水平0度から）30度未満に分布した冠根、冠根長4.2 cm以上5.4 cm未満のものを30度から45度に分布した冠根、冠根長5.4 cm以上のものを45度以上に分布した冠根として3種類に分別した。

結 果

1. 本実験における出穂期と倒伏状況

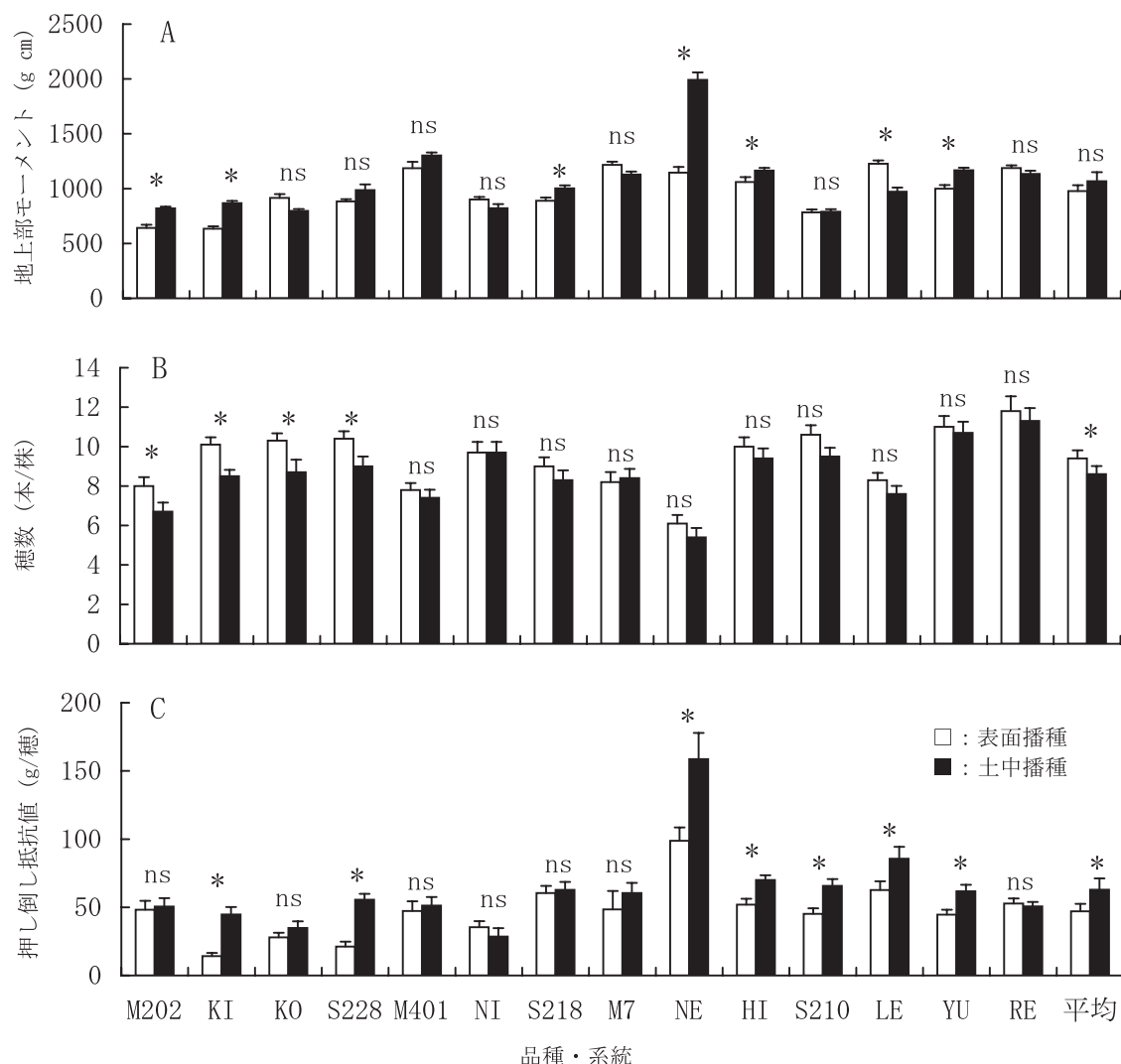
出穂期については、表面播種が土中播種に比べて若干早

まる傾向が認められた（第1表）。また、本実験の調査時期である出穂後2週間前後にはいずれの品種でも倒伏は生じなかった。また、登熟期後半にはコシヒカリなど一部の品種になびき型倒伏が生じたが、ころび型倒伏は生じなかった（観察結果）。

2. 総冠根数および伸長方向別冠根数の割合の比較

株当たりの総冠根数については、表面播種と土中播種間では有意な差は認められなかった。また、New BonnetおよびLemontは他の供試品種・系統と異なり、総冠根数そのものが少なかった（第1表）。

伸長方向別の冠根数の割合を第2図に示した。播種法についてみると、30度未満（第2図A）、30度以上45度未



第3図 耐倒伏性に関する地上部形質の比較。

地上部モーメント = 稈長 × 1 穂生重。バーは標準誤差を示す。* : 対応のない (平均値のみ対応のある) t 検定の結果、表面播種および土中播種間において 5% 水準で有意差があることを示す。ns : 有意差なし。

満 (第2図 B), 45 度以上に分布する冠根数の割合 (第2図 C) では表面播種と土中播種それぞれの平均値間に 5% 水準で有意差が認められ、表面播種は土中播種に比べて 30 度未満および 30 度以上 45 度未満に分布する冠根数の割合が小さく、45 度以上に分布する冠根数の割合が大きい傾向を示した。品種についてみると、New Bonnet および Lemont は他の供試品種・系統と異なり、30 度未満に分布する冠根数の割合が著しく小さく (第2図 A), 45 度以上に分布する冠根数の割合が著しく大きかった (第2図 C)。

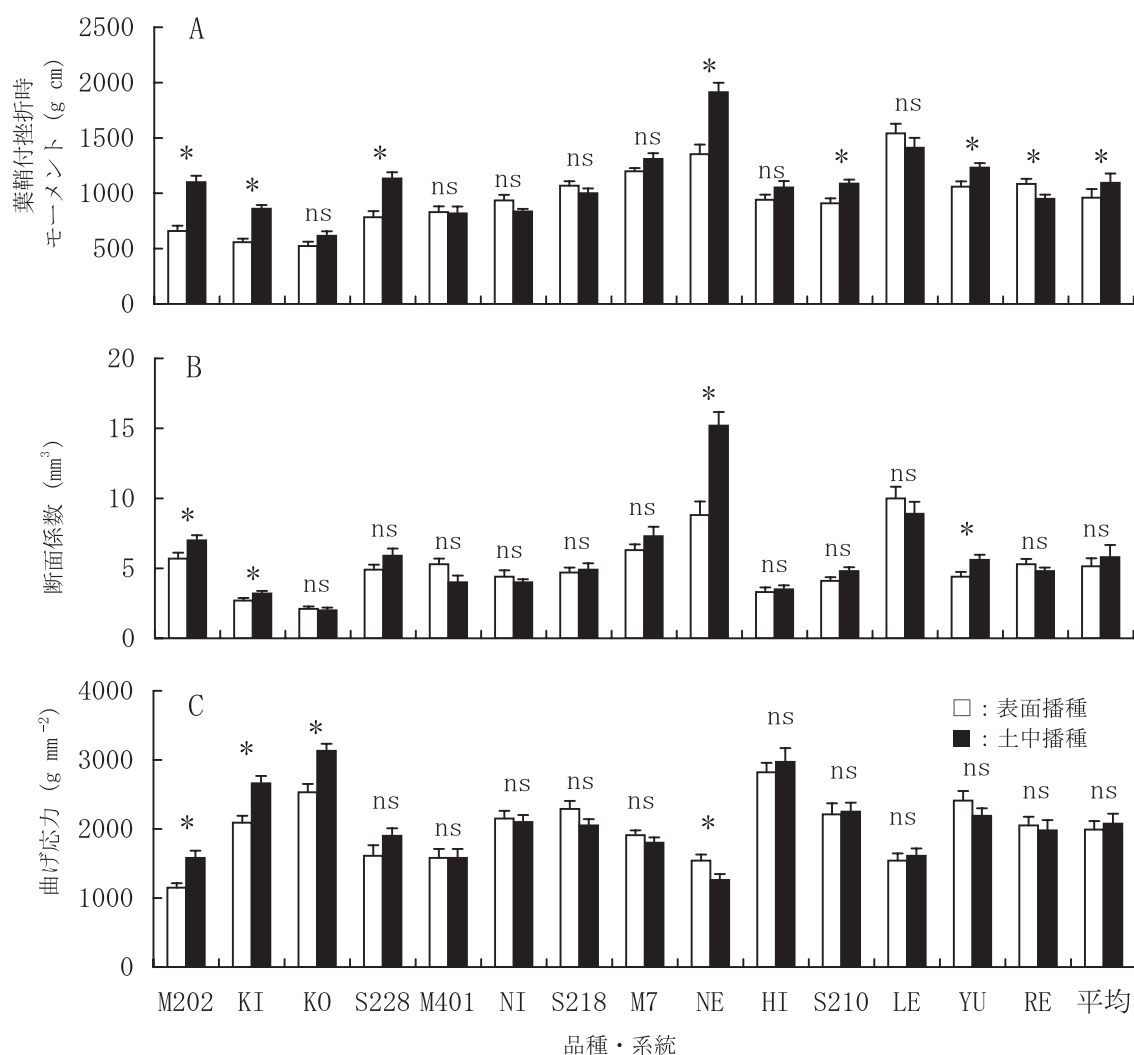
3. 耐倒伏性に関する地上部形質の比較

耐倒伏性に関する地上部形質を第3図に示した。播種法についてみると、稈長 (データ省略), 地上部モーメント (第3図 A) では表面播種と土中播種それぞれの平均値間に統計的な有意差は認められなかったが、穂数 (第3図 B), 押し倒し抵抗値 (第3図 C) では表面播種と土中播種

それぞれの平均値間に 5% 水準で有意差が認められ、表面播種は土中播種に比べて穂数が多く、押し倒し抵抗値は小さい傾向を示した。品種についてみると、New Bonnet は他の供試品種・系統に比べて穂数 (第3図 B) が少なく、地上部モーメント (第3図 A) と押し倒し抵抗値 (第3図 C) が大きかった。

4. 耐倒伏性に関する稈基部の物理的性質の比較

耐倒伏性に関する稈基部の物理的性質を第4図に示した。播種法についてみると、葉鞘付挫折時モーメント (第4図 A) では表面播種と土中播種それぞれの平均値間に 5% 水準で有意差が認められ、表面播種は土中播種に比べて葉鞘付挫折時モーメントは小さい傾向を示したが、断面係数 (第4図 B), 曲げ応力 (第4図 C) では表面播種と土中播種それぞれの平均値間に統計的な有意差は認められなかった。品種についてみると、New Bonnet および Lemont は葉



第4図 耐倒伏性に関与する稈基部（第IV節間）の物理的性質の比較。

バーは標準誤差を示す。*：対応のない（平均値のみ対応のある）t検定の結果，表面播種および土中播種間において5%水準で有意差があることを示す。ns：有意差なし。

鞘付挫折時モーメント（第4図A），断面係数（第4図B）が大きく，キヌヒカリ，コシヒカリ，ヒノヒカリは曲げ応力（第4図C）が大きかった。

5. 耐倒伏性と地上部，地下部および稈基部の物理的性質との関係

株当たりの総冠根数と押し倒し抵抗値との関係を第5図に示した。表面播種と土中播種いずれにおいても総冠根数と押し倒し抵抗値との間に有意な関係が認められなかった。

株当たりの伸長方向別冠根数の割合と押し倒し抵抗値との関係を第6図に示した。表面播種では，30度未満の表層に分布する冠根数の割合が大きい品種で押し倒し抵抗値が小さくなる傾向が認められ，両者の間には相関係数が -0.552 で5%水準の有意な負の相関関係が認められた（第6図A）。また，30度以上45度未満に分布する冠根数の割合と押し倒し抵抗値との間には有意な相関関係は認められ

なかった（第6図B）が，45度以上の深層に分布する冠根数の割合が大きい品種では押し倒し抵抗値が大きくなる傾向が認められ，両者の間には相関係数が 0.567 で5%水準の有意な正の相関関係が認められた（第6図C）。

一方，土中播種では伸長方向別冠根数の割合と押し倒し抵抗値との関係が表面播種の場合より明確となり，30度未満および30度以上45度未満の層に分布する根の割合が大きい品種で押し倒し抵抗値が小さく，相関係数は30度未満で -0.614 ，30度以上45度未満で -0.663 となり，それぞれ5%水準で有意な負の相関関係が認められた（第6図D，E）。また，45度以上では相関係数が 0.617 で5%水準の有意な正の相関関係が認められた（第6図F）。

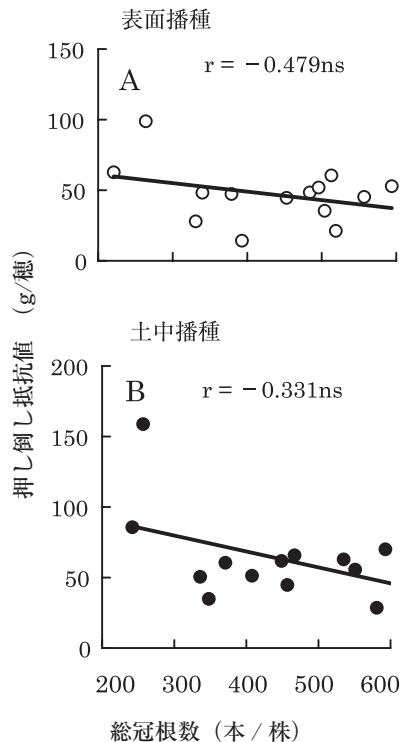
地上部モーメントおよび1株穂数と押し倒し抵抗値との関係を第7図に示した。稈長は，表面播種，土中播種ともに押し倒し抵抗値と有意な相関関係を示さなかった（データ省略）。表面播種，土中播種ともに地上部モーメントが大きい品種で押し倒し抵抗値も大きくなる傾向が認めら

れ、相関係数が表面播種で0.538, 土中播種で0.839となり、それぞれ5%, 1%水準で有意な正の相関関係が認められた(第7図A, B)。さらに、深度に関わらず1株穂数が多い品種で押し倒し抵抗値は小さい傾向が認められ、相

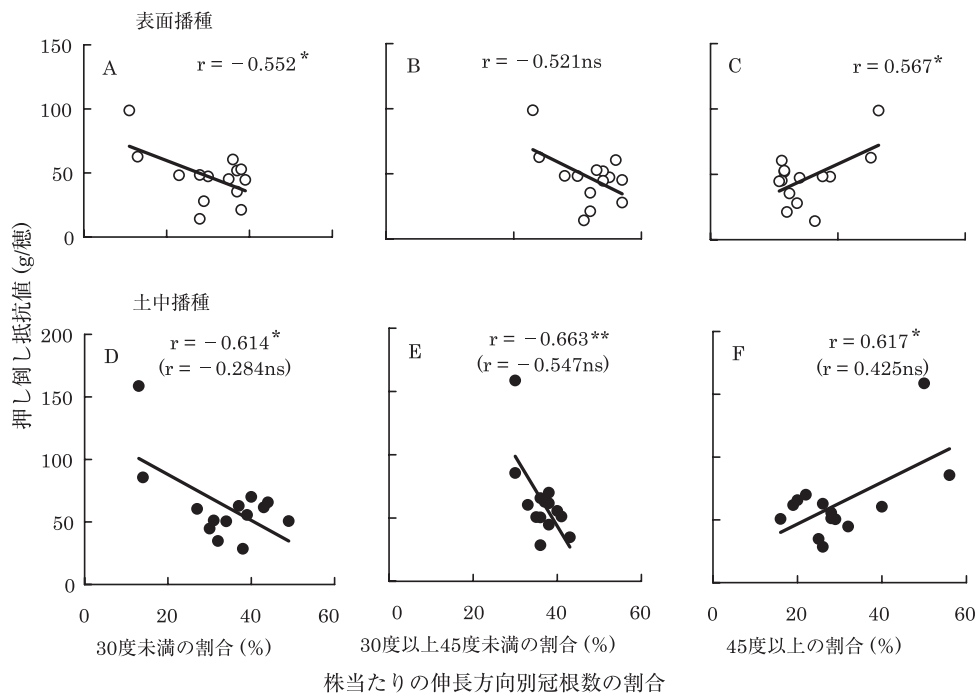
関係数が表面播種で-0.627, 土中播種で-0.578となり、それぞれ5%水準で有意な負の相関関係が認められた(第7図C, D)。

稈基部の物理的性質と押し倒し抵抗値との関係を第8図に示した。表面播種では、葉鞘付挫折時モーメントが大きい品種で押し倒し抵抗値も大きくなる傾向が認められ、同様の傾向は土中播種にも認められた。両者の間の相関係数は表面播種で0.754, 土中播種で0.903となり、いずれも1%水準で有意な正の相関関係が認められた(第8図A, B)。また、表面播種, 土中播種ともに、断面係数が大きい品種で押し倒し抵抗値が大きくなる傾向が認められ、相関係数は表面播種で0.722, 土中播種で0.900となり、いずれも1%水準で有意な正の相関関係が認められた(第8図C, D)。一方、表面播種および土中播種の曲げ応力と押し倒し抵抗値との間には有意な相関関係はなかった(第8図E, F)。

上述の倒伏関連形質が湛水直播水稻の耐倒伏性の指標である押し倒し抵抗値に關与する度合いを明らかにするために、倒伏関連形質を説明変数とした重回帰分析をおこなった。説明変数の選択に当たって表面播種, 土中播種ともに押し倒し抵抗値と単相関が高かった45度以上の冠根数の割合, 1株穂数, 地上部モーメント, 葉鞘付挫折時モーメントを説明変数とし、これらの変数と明らかに関係性がある(独立性の低い)変数(30度未満の冠根数の割合, 30度以上45度未満の冠根数の割合, 稈長, 断面係数, 曲げ応力)は説明変数から除いた。その結果、表面播種では、葉鞘付挫折時モーメントの標準偏回帰係数および偏相関係数の値は他の形質に比べて大きくF値は5%水準で有意と

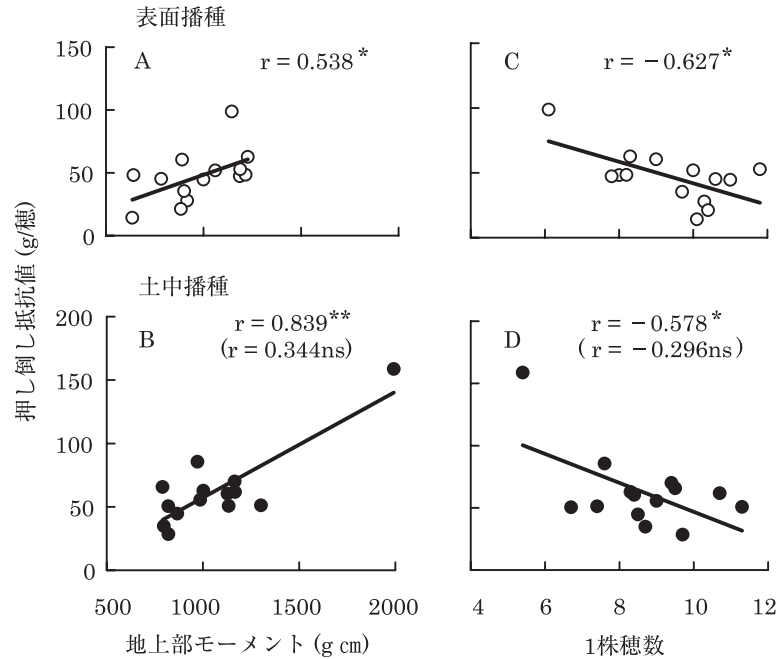


第5図 株当たりの総冠根数と押し倒し抵抗値との関係。
nsは有意な関係なし。



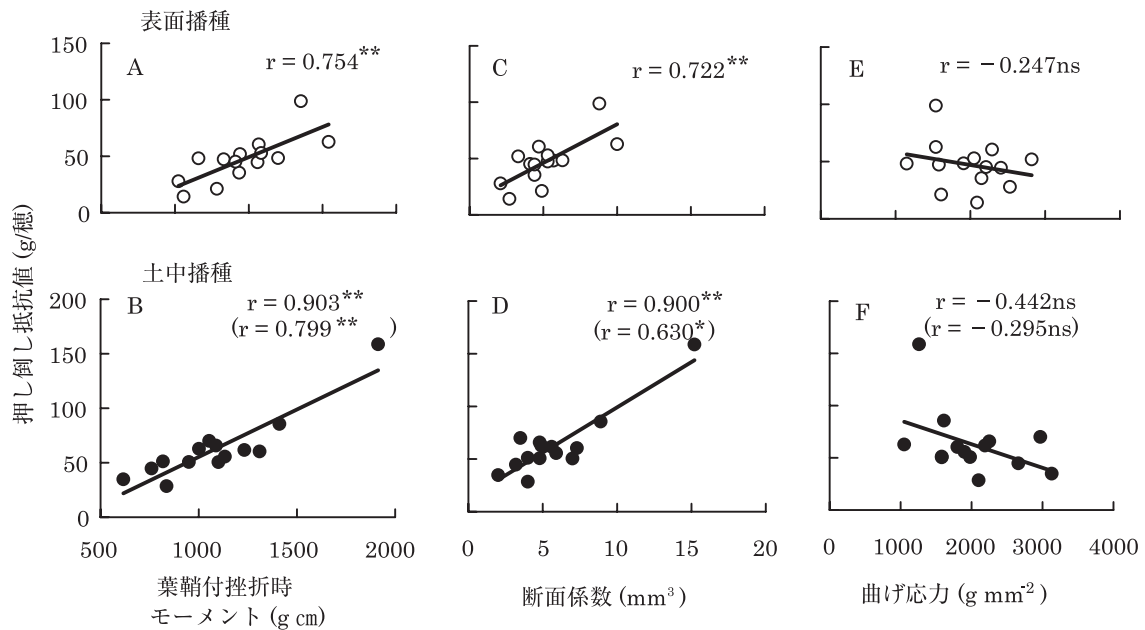
第6図 株当たりの伸長方向別冠根数の割合と押し倒し抵抗値との関係。

**は1%水準, *は5%水準で有意な相関関係があることを示す。nsは有意な関係なし。()はNew Bonnetを除いた場合の相関係数を示す。



第7図 地上部モーメントおよび1株穂数と押し倒し抵抗値との関係。

** は1%水準, * は5%水準で有意な相関関係があることを示す。ns は有意な関係なし。() は New Bonnet を除いた場合の相関係数を示す。



第8図 稈基部の物理的性質と押し倒し抵抗値との関係。

** は1%水準, * は5%水準で有意な相関関係があることを示す。ns は有意な関係なし。() は New Bonnet を除いた場合の相関係数を示す。

なった(第2表)。また、土中播種では地上部モーメントのF値が5%水準で有意となったが、葉鞘付挫折時モーメントと押し倒し抵抗値との関係が表面播種の場合より明確となり、葉鞘付挫折時モーメントの標準偏回帰係数および偏相関係数の値は他の形質に比べて大きくF値は1%水準で有意となった(第3表)。

考 察

1. 播種深度が耐倒伏性に及ぼす影響

本実験で播種法について比較すると、地上部形質について表面播種では土中播種に比べて穂数は多くなり(第3図B)、押し倒し抵抗値は小さい(第3図C)傾向が認められ

第2表 押し倒し抵抗値に対する倒伏関連形質の重回帰分析 (表面播種).

説明変数	標準偏回帰 係数	偏相関 係数	F 値	重相関 係数
45 度以上の冠根数の割合	-0.15	-0.16	0.23	0.84*
1 株穂数	-0.51	-0.51	3.23	
地上部モーメント	-0.03	-0.03	0.01	
葉鞘付挫折時モーメント	0.66	0.60	5.15*	

* は 5%水準で有意. n=14.

第3表 押し倒し抵抗値に対する倒伏関連形質の重回帰分析 (土中播種).

説明変数	標準偏回帰 係数	偏相関 係数	F 値	重相関 係数
45 度以上の冠根数の割合	-0.02	-0.04	0.01	0.95**
1 株穂数	-0.16	-0.32	1.04	
地上部モーメント	0.35	0.61	5.40*	
葉鞘付挫折時モーメント	0.59	0.74	10.61**	

** は 1%水準, * は 5%水準で有意. n=14.

た. また, 地下部形質について表面播種では土中播種に比べて 30 度未満の表層に分布する冠根数の割合が小さく (第2図 A), 45 度以上に分布する冠根数の割合が大きい傾向を示した (第2図 C). これに関して, 耐ころび型倒伏に優れる品種では土壌の深層に根を分布させる傾向にあること (寺島ら 1994) から, 表面播種では土中播種に比べて根の支持力が高まりやすい可能性が考えられた. 一方, 寺島ら (2002) は, 耐ころび型倒伏性について根の支持力だけではなく, 株基部の直径等形態的な要因も併せて全体の抵抗性を支配していることも示唆している. 表面播種では土中播種に比べて葉鞘付挫折時モーメントが小さいこと (第4図) から稈基部の物理的性質が土中播種に比べて劣ったため, 地下部形質による株支持力が十分であっても押し倒し抵抗値が小さくなったと考えられた.

本実験では同一播種密度条件で行ったが, 本実験の表面播種はヘリ散布などによるばらまき散播様式を想定したため種子が隠れる程度の播種深度とし, 土中播種は打込み点播様式を想定したため播種深度を約 1.5 cm に設定した. 播種様式と耐倒伏性との関係については下坪・富樫 (1996b) および尾形・松江 (1998b) により点播水稻の耐倒伏性が最も強く, 散播水稻の耐倒伏性が弱いことが示されている. さらに吉永ら (2001) は点播と散播を同一播種深度, 同一播種密度とした場合, 播種密度が高まるにつれて散播では耐倒伏性は大きく低下するが, 点播では低下しにくいことを明らかにし, 点播様式が高密度条件で耐倒伏性を低下させない要因として高密度条件であっても 1 株穂数を確保しやすく 1 穂当たりの挫折重の低下程度が小さいことを挙げている.

2. 地下部形質と耐倒伏性との関係

従来, 直播水稻の典型的な播種様式とされてきた表面散播における耐倒伏性の研究として, 耐ころび型倒伏に優れる品種では土壌の深層に根を分布させる傾向にあること (寺島ら 1994), 押し倒し抵抗値の大きい品種は, 36 度~54 度に分布する冠根が地上部の支持に重要な役割を担っていること (坂田ら 2004) が報告されている. 本研究では総冠根数が多い品種が必ずしも押し倒し抵抗値が高くなかったが (第5図), 伸長方向別冠根数の割合について 45 度以上に分布する冠根数の割合が大きい (深根性が高い) 品種では押し倒し抵抗値は大きく, 45 度以上に分布する冠根数の割合が小さい (深根性が低い) 品種では押し倒し抵抗値は小さく, 表面播種および土中播種ともに耐倒伏性と深根性の間に有意な相関関係が認められた (第6図). このことは湛水直播栽培では, 表面散播以外の点播を含む土中播種においても深根性による根の支持力が耐倒伏性に寄与していることを示唆している. また, 耐倒伏性に寄与する深根性以外の形質として倒伏程度と根の太さとの間に有意な相関関係があったこと (尾形・松江 1996), 引っ張りによる破断強度および冠根直径と押し倒し抵抗値との間に有意な相関関係があったこと (坂田ら 2003) が報告されている. これらの報告は, 深根性に加えて他の地下部形質の評価によっても耐倒伏性に優れた品種を選抜できることを示唆しているが, 地下部形質の調査には手間がかかるため, より簡易である押し倒し抵抗値の測定による耐倒伏性の選抜法も提案されている (尾形・松江 2000).

3. 地上部形質および稈基部の物理的性質と耐倒伏性との関係

本実験では, 稈長と押し倒し抵抗値との相関関係は認め

られなかったが、地上部モーメントが大きい品種では押し倒し抵抗値は大きく、地上部モーメントが小さい品種では押し倒し抵抗値は小さかった（第7図A, B）。また、1株穂数が少ない品種では押し倒し抵抗値は大きく、1株穂数が多い品種では押し倒し抵抗値は小さかった（第7図C, D）。これに関して、尾形・松江（1998a）は、日本の良食味品種において倒伏程度の強弱が異なる2群の倒伏関連形質を比較した結果、耐倒伏性強の品種群は、耐倒伏性弱の品種群に比べて稈長が有意に短かったと報告している。一方、大川・石原（1992）は、我が国では耐肥性の水稻を育成する中で短稈化による地上部モーメントの低下によって耐倒伏性を獲得してきたとする一方、地上部モーメントが大きい長稈品種であっても葉鞘付挫折時モーメントが大きい特性を持つことによって倒れにくい品種があることを指摘している。本実験では、日本稲に加えて葉鞘付挫折時モーメントの大きいLemont およびNew Bonnetを含んだアメリカ稲や良食味品種以外の品種とも交配した九州農試育成系統を供試品種に加えたことから、尾形・松江（1998a）の報告と異なり稈長と耐倒伏性の関係が認められなかったと考えられた。さらに、本実験では表面播種、土中播種に関わらず1株穂数と断面係数および葉鞘付挫折時モーメントとの間には負の、地上部モーメントと断面係数および葉鞘付挫折時モーメントとの間には正の相関関係が認められた（データ省略）。このことは、本実験で供試した品種において1株穂数の少ない品種あるいは地上部モーメントが大きい品種では稈基部が太く断面係数が大きいことによって葉鞘付挫折時モーメントが大きくなった結果、耐倒伏性が高まったことが推察された。

耐倒伏性と稈基部の物理的性質との関係について、移植栽培の耐倒伏性が稈基部の挫折強度と関係があることが既に知られており（世古1962, 永高1968, 八木1983）、乾田直播栽培（宮坂・高屋1982）、湛水直播栽培（尾形・松江1998a, 三王ら2001）でも倒伏と稈基部における物理的性質との間に高い相関関係が認められることが報告されている。本実験では、葉鞘付挫折時モーメントおよび断面係数が大きい品種では耐倒伏性の指標である押し倒し抵抗値が大きく、葉鞘付挫折時モーメントおよび断面係数が小さい品種では押し倒し抵抗値が小さくなり（第8図）、これら稈基部の物理的性質は伸長方向別冠根数の割合と比べて耐倒伏性と高い相関関係を示した（第2表, 第3表）。さらに、本実験で供試したNew Bonnetは耐倒伏性に優れていたが、地上部および地下部形質が他の品種・系統と大きく異なっているためにNew Bonnetを除いた場合、稈基部の物理的性質と耐倒伏性との間には引き続き有意な相関関係が認められたが、深根性、地上部モーメント、1株穂数と耐倒伏性との間には有意な相関関係が認められなくなった（第6, 7, 8図）。これらのことは湛水直播水稻の耐倒伏性について深根性に比べて稈基部の物理的性質の寄与程度が大きいことを示唆している。さらに、本実験は単年度の結果では

あるが、別の年次においても稈基部の物理的性質と耐倒伏性との間には高い相関関係があることを確認し、これらの形質に出穂後日数の経過が影響を及ぼしていることについて検討を行っている。この詳細については別途報告している（古畑・有馬2007）が、New Bonnet, Lemontといった品種との交配を通じて従来の品種と比較して断面係数および葉鞘付挫折時モーメントが大きく湛水直播栽培において耐倒伏性の優れる品種育成が可能であると考えられた。

以上のことから、湛水直播栽培した水稻では、播種深度に関わらず伸長方向別の冠根数の割合および稈基部の物理的性質である葉鞘付挫折時モーメントおよび断面係数と耐倒伏性との間には有意な相関関係が認められたが、葉鞘付挫折時モーメントに代表される稈基部の物理的性質が深根性に比べて耐倒伏性に密接に関係していることが示唆された。

謝辞：本実験を遂行するにあたって、九州農業試験場（現九州沖縄農業研究センター）栽培生理研究室長であった楠田宰博士（現農研機構本部総合企画調整部研究管理役）には懇切なるご指導を賜りました。また、西海系統の特性については育成地である九州沖縄農業研究センター稲育種ユニット（筑後水田作研究拠点）の梶亮太主任研究員および同ユニットの主任研究官であった平林秀介氏（現作物研究所稲マーカー育種研究チーム主任研究員）に適切なご助言を頂きました。ここに記して深く感謝いたします。

引用文献

- 古畑昌巳・有馬進 2007. 湛水直播水稻における出穂後日数の経過が耐倒伏性と稈基部の物理的性質に及ぼす影響. 日作紀 76 : 529-539.
- 水高信雄 1968. 水稻の倒伏と被害の発生機構に関する実験的研究. 農技研報 A15 : 1-175.
- 北条良夫・小田桂三郎 1965. 大麦の強稈性に関する研究. 第2報 稈における物理的性質の発達. 日作紀 33 : 259-267.
- 楠田宰 1999. 稲体近傍土壌溶液中NH₄-N濃度の低減パターンによる水稻根系分布の推定. 根の研究 8 : 17-19.
- 宮坂昭・高屋武彦 1982. 乾田直播水稻における倒伏防止に関する研究. 第1報 密播条件下での倒伏抵抗性の品種間差異. 日作紀 51 : 360-368.
- 尾形武文・松江勇次 1996. 北部九州における水稻湛水直播栽培に関する研究. 第1報 耐倒伏性の評価方法. 日作紀 65 : 87-92.
- 尾形武文・松江勇次 1998a. 北部九州における水稻湛水直播栽培に関する研究. 一良食味品種の耐倒伏性に関する指標形質の評価一. 日作紀 67 : 159-164.
- 尾形武文・松江勇次 1998b. 北部九州における水稻湛水直播栽培に関する研究. 一苗立ち密度ならびに播種様式が水稻の生育, 収量および米の食味特性に及ぼす影響一. 日作紀 67 : 485-491.
- 尾形武文・松江勇次 2000. 湛水直播用の水稻品種育成のための押し倒し抵抗値による耐倒伏性の選抜効果. 日作紀 69 : 159-164.
- 大川泰一郎・石原邦 1992. 水稻の耐倒伏性に関与する稈の物理的性質の品種間差異. 日作紀 61 : 419-425.
- 坂田勲・坂井真・井辺時雄 2003. 水稻品種における耐ころび型倒伏

- 性と幼植物の冠根の伸長角度, 直径および破断強度との関係. 日作紀 72 : 56-61.
- 坂田勲・鎌谷俊樹・河合靖司・小柳敦史 2004. 水稻品種の押し倒し抵抗値に及ぼす伸長角度別の冠根の切断処理の影響. 日作紀 73 : 1-5.
- 三王裕見子・大川泰一郎・相沢奈美江・平沢正 2001. 湛水直播栽培した水稻の生育と倒伏およびこれに関係する性質の品種間差異. 日作紀 70 : 515-524.
- 世古秀生 1962. 水稻の倒伏に関する研究. 九州農試彙報 7 : 419-499.
- 下坪訓次・富樫辰志 1996a. 水稻の代かき同時土中直播栽培に関する研究. 1 点播直播について (予報). 日作紀 65 (別 1) : 12-13.
- 下坪訓次・富樫辰志 1996b. 水稻の代かき同時土中直播栽培に関する研究. 2 点播水稻と条播水稻の押倒し抵抗の比較. 日作紀 65 (別 1) : 14-15.
- 田原虎次・藍房和・渡辺直吉・下田博之 1967. イネの材料力学的性質に関する研究. 第1報 乳熟期における茎稈の強さについて. 農機誌 29 : 137-142.
- 寺島一男・秋田重誠・酒井長雄 1992. 直播水稻の耐倒伏性に関する生理生態的形質. 第1報 押し倒し抵抗測定による耐ころび型倒伏性の品種間比較. 日作紀 61 : 380-387.
- 寺島一男・尾形武文・秋田重誠 1994. 直播水稻の耐倒伏性に関する生理生態的形質. 第2報 耐ころび型倒伏性品種の根の生育特性. 日作紀 63 : 34-41.
- 寺島一男・秋田重誠・酒井長雄 1995. 直播水稻の耐倒伏性に関する生理生態的形質. 第3報 根の土壌中分布特性と耐ころび型倒伏性との関係. 日作紀 64 : 243-250.
- 寺島一男・酒井究・梶本信幸 2002. 直播水稻における一株の生育量と耐ころび型倒伏性との関係. 日作紀 71 : 161-168.
- 上村幸正・松尾喜義・小松良行 1985. 湛水直播水稻の倒伏抵抗性について. 日作四国支紀 22 : 25-31.
- 八木忠之 1983. 水稻の強稈性に関する育種学的研究 1. 強稈性および関連形質の品種間差異. 育種 33 : 411-422.
- 吉永悟志・脇本賢三・田坂幸平・松島憲一・富樫辰志・下坪訓次 2001. 打込み式代かき同時土中点播栽培による湛水直播水稻の耐倒伏性向上 一播種様式および苗立ち密度が耐倒伏性に及ぼす影響一. 日作紀 70 : 186-193.

Correlation of Lodging Resistance with Physical Characteristics of the Basal Culm and Rooting Behavior in Rice Direct Seeded in a Flooded Paddy Field : Masami FURUHATA¹⁾ and Susumu ARIMA²⁾ (¹⁾Natl. Agr. Res. Cent. Hokuriku Res. Cent., Joetsu 943-0193, Japan; ²⁾Fac. Agr., Saga Univ.)

Abstract : In submerged direct seeding such as hill seeding and row seeding, lodging was not caused easily compared with broadcast seeding. Not only deep rooting but also physical characteristics of the basal culm were considered to contribute to lodging resistance. Then, we examined the correlation of lodging resistance with the rooting behavior and physical characteristics of the basal culm in 14 rice cultivars direct seeded in a flooded paddy field. As a result, deep rooting, the section module and breaking strength of culm with leaf sheaths were significantly correlated with lodging resistance regardless of seeding depth. In addition, the standardized partial regression coefficient and partial correlation coefficient between lodging resistance and breaking strength of culm with leaf sheaths was higher than lodging resistance and deep rooting. These results suggest that lodging resistance in rice cultivated by submerged direct seeding such as hill seeding and row seeding was more closely correlated with the physical characteristics of the basal culm than with deep rooting.

Key words : Bending stress, Breaking strength of culm with leaf sheaths, Crown root, Growth angle of root, Lodging resistance, Pushing resistance, Rice, Section module.