

北日本の無施肥栽培における水稻収量の地域間変異とその寄与要因

細谷啓太¹⁾・杉山修一²⁾

(¹⁾ 岩手大学大学院連合農学研究科, (²⁾ 弘前大学農学生命科学部)

要旨：無施肥栽培は収量の著しい低下を招くと考えられているが、長期間無施肥でも慣行栽培に匹敵する収量を安定的に生産している農家が存在する。本研究では、無施肥条件におけるイネの生育と収量成立過程を明らかにすることを目的とし、青森、岩手、宮城、新潟の計16の無施肥農家水田の収量と収量形成要因を解析した。2011年から2013年までの過去3年間の全国の無施肥農家水田の平均収量は約300 kg/10aだったが、一部の水田においては420～480 kg/10aの収量が毎年安定的に生産されていた。収量解析の結果、収量はm²当たり籾数に強く依存し、特に穂数との間には高い正の相関関係($r=0.92^{***}$)が認められた。また、穂数と最も高い相関を示したのは移植日から出穂43日前までの日平均気温($r=0.66^{**}$)であった。無施肥水田土壌を用いて異なる移植日でイネのポット栽培試験を行った結果、分けつ増加速度は日平均気温($r=0.92^{***}$)と高い正の相関を示した。重回帰分析に基づくパス解析の結果、日平均気温が分けつ増加速度に与える影響は、気温の生育促進効果と、気温による土壌無機態窒素の供給増加効果がほぼ等しく貢献していることが分かった。これらのことから、北日本の無施肥栽培では栄養成長期の気温が高くなることを通じた穂数確保が高い収量を達成するために重要であることが示された。

キーワード：収量、水稻、窒素、日平均気温、農家水田、無機化、無施肥。

一般に長期間無施肥条件で水稻を栽培した場合、籾として外部に持ち出される栄養塩の補給がないために水田の収量は著しく低くなる。西尾(1997)は、籾による水田からの窒素収奪と雨水や灌漑水などの外部からの窒素供給の収支を試算して、無施肥連用20年目の水田で得られる玄米収量は250 kg/10a程度に下がると推定している。この予想収量は現在的水稻平均収量に比して50%以下と極めて低い。

しかし、農家レベルでは長期無施肥水田において250 kg/10aを大きく上回る収量を安定的にあげている事例も報告されている。例えば、滋賀県栗東町(現栗東市)の水田では27年間継続した無施肥栽培にもかかわらず400 kg/10a程度の収量が安定的に得られており(Okumura 2002)、また、籾を含む作物残渣をすべて水田外に搬出しているにもかかわらず、土壌中の全窒素量の減少が認められない(川村・中島 1979)などの事例が報告されている。長期無施肥でも高い収量が維持される要因としては灌漑水由来の窒素供給が多いこと(長谷川ら 1979)や、水田からイネが吸収した窒素の大部分が土壌由来であること(Okumura 2002)などが指摘されている。また、水稻以外でも、雑草や落葉を含めて圃場で生産された植物性有機物を圃場外に搬出している無施肥桑園では、19年にわたり慣行栽培と同等でかつ安定した収量を記録しており、土壌炭素・窒素量もおおむね平衡に保たれていた(栗田ら 2006)。また、埼玉県における無施肥栽培農家では、地上部作物残渣をすべて持ち出しながら慣行栽培と同等のトマトの出荷量を実現しており、さらには葉身の $\delta^{15}\text{N}$ 値は土壌に比較して低い値であることから、大気窒素の固定による作物の窒素吸収の可能性が示唆されている(小田 2011)。

このように、現時点ではソースは明らかとされていないが、天然由来の養分供給によって無施肥でも圃場の生産性が高く維持されている事例が散見される。

これらの事例は、無施肥栽培においても安定して高い作物生産が可能であることを示す事例ではあるが、あくまでも特定の水田・畑に限定した報告であり、すべての無施肥栽培が高い収量を達成できているわけではない。特に、無施肥栽培では農家間の栽培技術や地力などの差が収量に直接反映しやすいため、農家間に大きな収量差が出やすい。資源への依存度が極めて低く、農地の潜在的な生産力を利用する無施肥栽培の収量性および収量に寄与する要因の解析は、持続的な低投入稲作の構築という作物学的課題を解決する上で重要であるが、多数の農家水田を対象として水田間の収量性の差異を解析した研究報告は乏しい。

そこで本研究では、無施肥水田の収量性に寄与する要因を明らかにすることを目的として、(1)北日本の無施肥水田農家に対する収量性の聞き取り調査、(2)青森、岩手、宮城、新潟の計16の無施肥農家水田の収量と収量形成要因の現地調査、(3)無施肥水田土壌を用いた分けつ成長に対する気温の寄与率を調査したポット栽培試験を行い、無施肥水稻栽培の収量レベルと収量制限要因を解析した。

材料と方法

1. 聞き取り調査と調査水田の選定

無施肥農家水田の収量の実態把握は2014年に生産者へのアンケート調査により実施した。無施肥栽培の開始当初は、前年に施肥した肥料の残効があり無施肥栽培の影響が不鮮明となるため、本研究では無施肥歴が3年以上の水田

第1表 調査対象とした無施肥水田の概要.

調査地域	水田名	土壌	無施肥歴 (年)	品種	移植日	出穂期	栽植密度 (株/m ²)
青森	中泊町	N1 泥炭土 (16A)	30	あねこもち	5月25日	7月下旬	18.1
	深浦町	N2 礫質灰色低地土, 灰色系 (13C)	3	こまの舞	6月10日	8月中旬	15.1
	八戸市	N3 灰色低地土, 下層有機質 (13H)	6	ほっかりん	6月10日	8月中旬	15.1
	弘前市	N4 腐植質黒ボクグライ土 (05B)	21	あきたこまち	6月1日	8月上旬	18.1
岩手	遠野市	N5 礫質褐色低地土 (12C)	7	ササシグレ	5月25日	8月上旬	15.1
	遠野市	N6 礫質褐色森林土 (06C)	5	ササシグレ	5月25日	8月上旬	16.6
宮城	加美町	N7 中粗粒灰色低地土, 灰褐色系 (13E)	7	ササシグレ	5月25日	8月上旬	15.1
	涌谷町	N8 細粒灰色低地土, 灰褐色系 (13D)	40	亀の尾	5月5日	7月下旬	9.1
	登米市	N9 細粒灰色低地土, 灰褐色系 (13D)	8	ササニシキ	5月24日	8月中旬	15.1
	加美町	N10 細粒灰色低地土, 灰褐色系 (13D)	7	みやこがねもち	5月30日	8月中旬	18.1
	栗原市	N11 中粗粒灰色低地土, 灰褐色系 (13E)	10	ササニシキ	6月1日	8月中旬	18.1
	石巻市	N12 泥炭土 (16A)	8	ササニシキ	5月25日	8月中旬	15.1
	新潟市	N13 細粒強グライ土 (14A)	3	コシヒカリ	6月8日	8月中旬	16.6
新潟	新潟市	N14 細粒強グライ土 (14A)	7	コシヒカリ	6月5日	8月中旬	15.1
	新潟市	N15 細粒グライ土 (14D)	3	コシヒカリ	5月6日	8月中旬	16.6
	新潟市	N16 細粒強グライ土 (14A)	3	コシヒカリ	6月3日	8月中旬	19.7

土壌分類は農業環境技術研究所, 土壌情報閲覧システムに拠った.

を無施肥水田と定義した. 作物残渣の土壌への鋤き込みは, 施肥と定義しなかった. また, 現地調査水田の選定において, 同時期の調査が可能な北日本地域の無施肥歴3年以上の水田16筆を選抜し(第1表), その後の解析対象とした.

2. 収量と収量構成要素の現地調査

収量と収量構成要素の解析は下記の通り実施した. 2014年9月末に各水田から生育が中庸なイネを成熟期に6株刈り取り, 自然乾燥により十分に乾燥させた. それぞれの稲株の穂数を数え, 6株の平均値を各水田の穂数とした. その後, 1株毎にすべての穂重を測定し, 1株の平均穂重に最も近い3穂を選抜した. 3穂の1穂粒数を数え, 平均値を1株の1穂粒数, 6株の平均値を水田の1穂粒数とした. 選抜した各株の平均的な3穂に着生する籾を穂から外し, ランダムに100粒選抜して比重1.06の塩水で水選し, 沈んだ籾の割合を登熟歩合とした. 登熟歩合の測定に用いなかった残りの籾をすべて籾摺りし, ランダムに玄米を100粒選抜して100粒重を測定した後, 10を掛けて1000粒重の値とした. 登熟歩合, 1000粒重いずれも6株の平均値を各水田の値とした. また, 玄米収量は各水田の株当たりの玄米収量(穂数×1穂粒数×登熟歩合×1000粒重)の値に栽植密度を掛け, m²当たりの玄米収量を求めた. 加えて収量データの精度を確認するため, 水田間の収量差の傾向が収量データと実収量でほぼ一致していることを生産者への聞き取り調査により確認した.

3. 土壌の化学分析および雑草発生量の調査

土壌サンプルは2014年4月中旬から下旬にかけて, 湛水前の水田における作土層(0–10 cm)をコアサンプラー

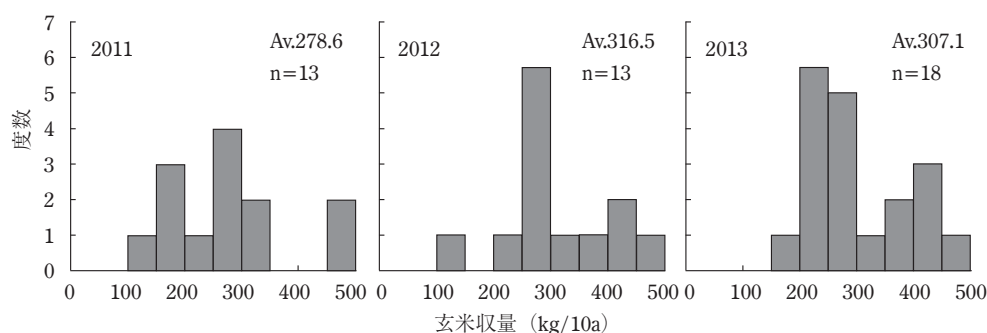
により採取し, 無機態窒素量, 可溶性リン量を測定した. 無機態窒素量は, アンモニア態窒素量および硝酸態窒素量の和とし, アンモニア態窒素量はインドフェノール法, 硝酸態窒素量はサリチル硫酸法を用いていずれも比色法によって測定した. 可溶性リン量は, トルオーグ法を用いた比色法によって測定した. 反復はいずれも3とした. 雑草の調査は, 水稻の穂孕み期に当たる7月下旬に20 cm×20 cmのコドラート内に生育しているすべての雑草を刈り取り, その総乾物量を雑草発生量とした. 反復は3とした.

4. 気象要因の解析

気象データは各調査水田に最も近い青森, 深浦, 八戸, 弘前, 遠野, 古川, 大衡, 石巻, 新潟, 巻の気象観測値を用いた(気象庁2014). 収量解析の結果, 収量への穂数の寄与率が高かったこと, および穂数が決定する時期はおおよそ出穂前43日と言われている(松島1973)ことから, 降水量, 日射量, 気温をいずれも各水田の移植日から出穂43日前までの期間における積算量を日数で割って日平均量として求め, 穂数への気象要因の影響を解析した.

5. 移植日を変えたポットによる栽培試験

2015年の4月に, 青森県青森市の無施肥歴6年の水田土壌を1/5000 a ワグナーポットに充填し, 使用するまで遮光条件で保管した. セル育苗によって育てた稚苗「つがるロマン」を, 2015年5月5日, 5月15日, 5月25日, 6月4日に1ポット当たり2本移植し, 2個体の平均値を各ポットの値として茎数の推移を測定した. 反復ポット数は3とした. 移植日を異にする土壌の窒素無機化速度とイネの分げつ増加速度の関係を明らかにするため, 吉野・出井



第1図 2011, 2012, 2013年の無施肥水田の玄米収量。

対象水田は無施肥歴が3年以上の水田とした。Av.は全体の平均収量を、nは水田数を示す。

(1977)の湿潤土湛水静置法を応用し、試験管に土壌を充填した後、移植日と同日からポット内の土壌に試験管を埋め込み、イネが窒素を吸収できない土壌を試験管内に作り、それ以外はポット内土壌と同じ環境条件で常時湛水で静置培養した。湛水開始後0日目、20日目、30日目に土壌を採集し、3.と同様の方法で無機態窒素量を測定し、日平均無機態窒素供給量を求めた。試験は弘前大学構内で行い、気温は弘前市における気象庁の観測データを用いた。分げつ増加速度に対して生育期間の平均気温と土壌窒素無機化率を従属変数とする重回帰分析を行い、得られた結果をもとに3変数間のパス分析を行った。回帰分析とパス分析は、いずれも統計ソフト (R ver.3.1.2) を用いて行った。

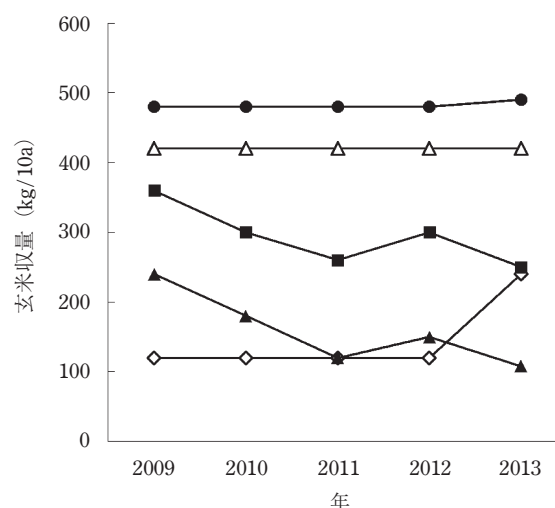
結 果

1. 農家無施肥水田の平均収量および収量の年次変化

聞き取り調査による全国の無施肥水田農家の2011年から2013年までの3年間の玄米収量のヒストグラムを第1図に示した。各年の無施肥水田全体の平均収量は2011年で278.6, 2012年で316.5, 2013年で307.1 kg/10aとおおよそ300 kg/10aを前後した。収量の変動パターンが異なる5農家(N3, N5, N7, N8, N9)の2009年から2013年の5年間にわたる収量の年次変化を第2図に示した。N3, N5, N7のように収量の年次変化が大きく常に400 kg/10a以下の低収量水田がある一方で、N8, N9の水田のように480, 420 kg/10aの収量が5年間にわたり安定的に得られている水田も見られた。

2. 収量と収量構成要素の関係

収量解析および収量形成要因の解析を行った無施肥水田16の概要を第1表に、収量と収量構成要素の結果を第2表に示した。玄米収量が最も高かった新潟の水田N15 (687 g/m²)と、最も低かった岩手の水田N6 (125 g/m²)との間には562 g/m²の収量差があった。県別にみると収量は新潟、宮城、青森、岩手の順で高い傾向が認められた。2014年以前の聞き取り調査と2014年の現地調査の収量は、16水田中12水田でおおむね一致したが、新潟の4水田に限り現地調査の収量が聞き取り調査に比べ著しく高かった。収量と



第2図 収量の変動パターンが異なる5無施肥水田の過去5年間の玄米収量の推移。

収量構成要素間の相関係数は、穂数, 1穂粒数, 登熟歩合, 1000粒重がそれぞれ0.92***, 0.72***, 0.11^{ns}, -0.27^{ns}を示し(第2表), 収量と穂数, 1穂粒数との間には有意な高い正の相関関係が認められた。したがって収量にはm²当たり粒数が大きく寄与していることが分かった。

3. 穂数と穂数形成要因の関係

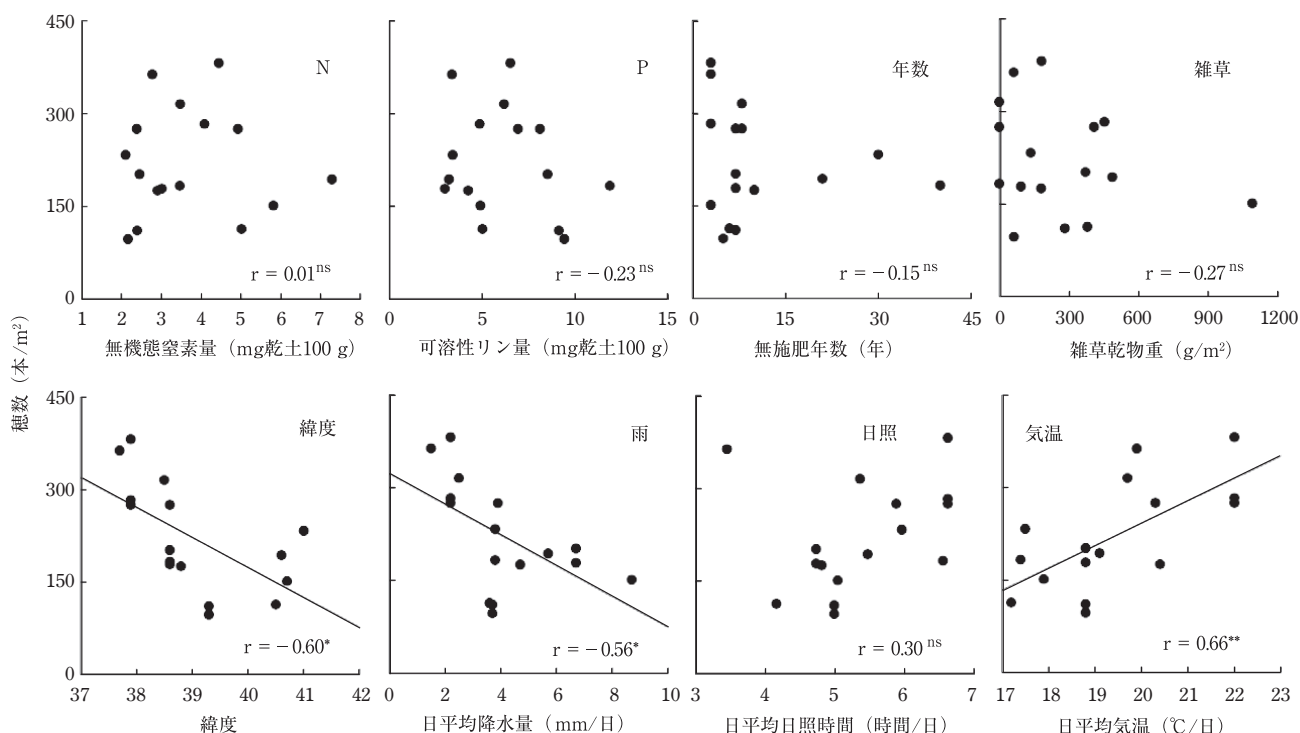
収量と最も高い相関を示した穂数と穂数形成にかかわる要因の間の関係を第3図に示した。穂数形成にかかわる要因として、土壌の栄養状態(湛水前の土壌中の無機態窒素量, 可溶性リン量, 無施肥年数), 雑草による生育抑制(穂孕み期の水田の雑草乾物重), 気象要因(緯度, 移植日から出穂43日前までの日平均降水量, 日平均日照時間, 日平均気温)の4要因, 計8変数について解析した。その内、穂数との間に有意な相関関係が認められたのは緯度, 日平均降水量, 日平均気温という気象要因だった。特に、穂数と日平均気温の間には、1%水準で有意な正の相関関係が認められた。これらの結果から土壌の栄養状態や雑草による生育抑制よりも生育期間中の気温が無施肥水田間の収量差に最も強く影響を与えていたことが分かる。

第2表 各無施肥水田の収量と収量構成要素.

調査地域	水田	面積当たり玄米収量 (g/m ²)	面積当たり穂数 (本/m ²)	1穂初数 (粒)	登熟歩合 (%)	1000粒重 (g)
青森	N1	354.2 ± 48 cdefg	233.3 ± 22.7 bcde	79.2 ± 4.0 def	84.8 ± 3.2 abc	22.2 ± 0.16 abc
	N2	255.5 ± 25 cdefg	151.5 ± 10.4 efg	78.2 ± 3.4 def	95.3 ± 0.7 a	22.5 ± 0.39 ab
	N3	157.2 ± 23 fg	113.6 ± 11.6 fg	67.4 ± 3.1 f	88.8 ± 2.0 ab	22.8 ± 0.24 a
	N4	248.3 ± 27 defg	193.9 ± 11.2 cdef	90.5 ± 1.9 cdef	69.2 ± 3.7 def	20.3 ± 0.27 f
岩手	N5	145.2 ± 17 fg	111.1 ± 7.5 fg	75.2 ± 4.3 ef	75.8 ± 3.2 bcde	22.4 ± 0.24 ab
	N6	124.9 ± 15 g	97.2 ± 9.0 fg	84.1 ± 3.1 def	69.7 ± 3.4 def	21.9 ± 0.08 abcd
宮城	N7	400.0 ± 51 bcdef	202.0 ± 10.1 bcdef	98.8 ± 7.6 bcde	86.2 ± 2.9 abc	22.7 ± 0.22 ab
	N8	481.7 ± 43 abcd	183.3 ± 18.1 defg	149.3 ± 4.6 a	79.5 ± 1.6 bcd	22.4 ± 0.28 ab
	N9	518.9 ± 24 abc	275.3 ± 9.1 abcd	101.7 ± 3.7 bcde	87.5 ± 1.3 ab	21.2 ± 0.22 def
	N10	248.9 ± 25 defg	178.8 ± 15.9 efg	109.6 ± 10.7 bcd	61.5 ± 4.3 f	21.3 ± 0.13 cdef
	N11	301.3 ± 30 cdefg	175.8 ± 15.3 efg	91.3 ± 2.5 cdef	84.3 ± 2.9 abc	22.3 ± 0.05 abc
	N12	444.1 ± 49 abcde	315.7 ± 19.3 ab	100.0 ± 5.1 bcde	64.0 ± 1.8 ef	21.7 ± 0.18 bcde
新潟	N13	619.6 ± 94 ab	283.3 ± 29.5 abc	118.5 ± 9.3 abc	81.5 ± 2.4 bcd	22.3 ± 0.21 abc
	N14	509.7 ± 74 abc	275.3 ± 18.1 abcd	105.8 ± 8.0 bcde	84.0 ± 2.0 abc	20.4 ± 0.18 ef
	N15	686.6 ± 128 a	363.6 ± 39.6 a	127.9 ± 9.4 ab	74.5 ± 2.2 cdef	20.9 ± 0.14 def
	N16	670.8 ± 43 a	381.8 ± 29.0 a	108.6 ± 8.6 bcd	81.8 ± 1.8 bcd	21.7 ± 0.31 abcd

表中の数値は平均値 ± 標準誤差を示す.

同一アルファベットは Tukey の多重検定により水田間に 5% 水準で有意差がないことを示す. 収量と収量構成要素間の相関係数は, 穂数, 1穂初数, 登熟歩合, 1000 粒重がそれぞれ 0.92, 0.72, 0.11, -0.27.



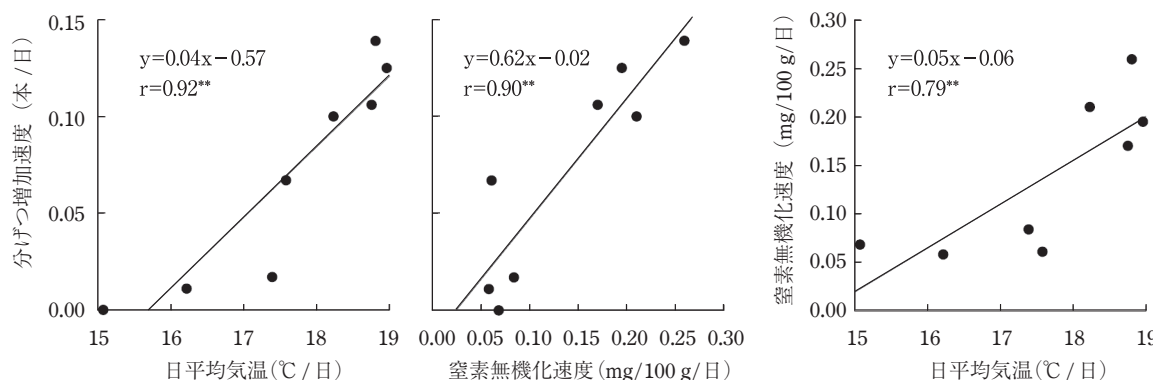
第3図 穂数と穂数形成要因の関係.

図中の N, P, 年数, 雑草, 緯度, 雨, 日照, 気温はそれぞれ 4 月下旬の土壌の無機態窒素量, 同じく可溶性リン量, 無施肥年数, 7 月下旬の雑草乾物重, 緯度, 移植日から出穂 43 日前までの日平均降水量, 同期間の日平均日照時間, 同期間の日平均気温を示す.

4. 分けつ増加速度に対する日平均気温および土壌窒素無機化速度の効果

日平均気温が分けつ増加速度に与える影響には, (1) 積

算気温としてイネの生育を促進する直接効果と, (2) 土壌有機物の分解を通じて窒素無機化を促進させる間接効果の 2 つが関与しているものと考えられる. そこで, 日平均気



第4図 分けつ増加速度、日平均気温および土壌中の窒素無機化速度の関係。

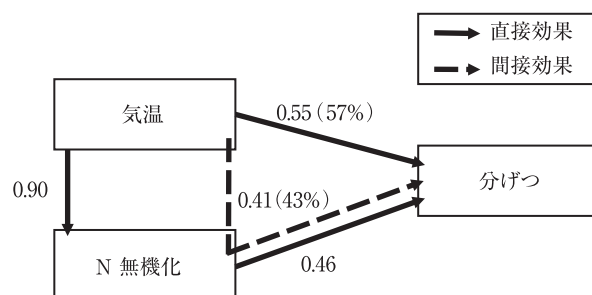
温がどのように穂数形成過程に影響しているかを直接効果と間接効果に分けて、その相対的影響力を評価した。生育期間の日平均気温、分けつ増加速度（直接効果）、土壌窒素無機化速度（間接効果）の3変数間の相関関係を第4図に示した。移植日が遅れるにつれて日平均気温は増加し、日平均気温と分けつ増加速度との間には有意な正の相関関係（ $r=0.92^{**}$ ）が認められた。同時に、日平均気温と窒素無機化速度との間にも有意な正の相関関係（ $r=0.79^{**}$ ）が認められた。また、直接効果を表す分けつ増加速度と間接効果を表す窒素無機化速度の間にも有意な相関関係（ $r=0.90^{**}$ ）があるため、両効果の相対的大きさを相関係数からは評価できない。そこで、この2つの効果の相対的な影響を明らかにするためにパス解析を行った（第5図）。その結果、日平均気温が分けつ増加速度に及ぼした総合効果の内、57%が直接効果で、残りの43%が土壌の窒素無機化を介した間接効果であることが明らかとなった。

考 察

1. 農家無施肥水田の収量性の実態と収量形成要因

西尾（1997）の窒素収支モデルによる無施肥水田の予想収量は250 kg/10a程度だが、聞き取り調査で得られた農家の無施肥水田の平均収量は300 kg/10a程度であり、50 kg/10a程度の差があった。しかし、注目すべきことは、長期的に無施肥で栽培を行っている2つの農家水田（N8, N9）では250 kgの倍近い420～480 kg/10aの高い収量が安定的に達成されていることである。この傾向は現地の収量解析によっても確認された。無施肥でも長期的に高収量が得られているこの事例は、長谷川ら（1979）や奥村（1988）によって報告された滋賀県の長期無施肥水田の報告と類似している。すなわち、長期間無施肥で高収量が維持できるメカニズムは明らかではないものの、ある条件の下では、無施肥栽培でも420～480 kg程度の収量を安定的に得ることは決して例外的な事例ではないことが分かる。

収量解析を行った2014年の収量とそれ以前の収量の誤差は、16無施肥水田中12無施肥水田は微小だったが、新潟の4無施肥水田においては2014年が例年に比べ多収だった。



第5図 分けつ増加速度に対する日平均気温と土壌中窒素無機化速度の効果を示したパス図。

図中の数値は各要因間の標準偏回帰係数p値を示し、（ ）内の％は気温が分けつ増加速度におよぼす総合効果を100%とした時の直接効果、間接効果それぞれの割合を示す。

た。この要因としては、新潟の無施肥水田では無施肥栽培を開始する3年前は堆肥などの大量の有機物を投入しており、他の無施肥水田に比べ全炭素・全窒素量、バイオマス炭素・窒素量が相対的に高く（図表省略）、無施肥栽培を開始する段階での土壌肥沃度が高かったことが考えられる。2014年の新潟の気候は例年に比べ4月から6月にかけて高温少雨であったため、土壌中の有機物の分解・無機化が進み、土壌からイネへの高い養分供給が高収量につながったことが推察される。

高収量だった新潟、低収量だった岩手の収量差は最大で561.7 g/m²にも達し、この水田間の収量差を引き起こした要因としては穂数、1穂粒数によるものが大きく、m²当たり粒数が収量性に大きく寄与していることが明らかとなった（第2表）。このことは、m²当たり粒数が決定する栄養成長期の段階で各水田の収量性がおおむね決定していることを示す。特に収量と穂数の間には $r=0.92^{***}$ の有意な高い正の相関関係が認められたことから、穂数の制限が無施肥水田の一般的な収量制限要因であることが示された。

2. 穂数に寄与する栄養成長期の諸要因

収量の形成過程は穂数、1穂粒数、登熟歩合、1粒重の順に決定する（松島1957）ことは広く知られており、穂数

が決定する時期はおおよそ出穂 43 日前までと言われている (松島 1973)。一般に、移植後のイネの生長に影響を及ぼす要因には、気温や日射量、土壌養分、雑草による生育抑制、病害虫による被害などが挙げられる。本研究においては調査対象とした水田において病害虫による被害は軽微だったことから病害虫被害は考慮しなかった。また、近隣の水田等から流入する窒素が収量性に影響を及ぼしている可能性が考えられたが、前年の調査において収量性の異なる 5 筆の無施肥水田について調査した結果、灌漑水窒素量と収量性に相関性はなかったことから、灌漑水を通じて流入する窒素量の収量への寄与は低いと判断し、本研究においては検討しなかった。

穂数と土壌養分、雑草発生量、無施肥期間との間には有意な相関関係がなかった (第 3 図)。これは、各要因が収量に寄与していないということ意味するのではない。例えば、新潟では雑草の発生量が多いがイネの生長がそれを上回るため、雑草によるイネの生育抑制の程度は軽微であったが、東北地方の低収量水田では雑草によるイネ収量の大きな阻害が見られた。結果的に、16 の無施肥水田全体の穂数の差に及ぼした一般的な要因としては、緯度、降水量、気温などの地理的、気象条件が大きかった (第 3 図)。特に穂数と日平均気温との間には、最も高い正の有意な相関関係が認められた。このことから、各水田間の穂数の差には移植日から出穂 43 日前までの気温が最も大きく関与していることが示された。

3. 気温がイネの分けつ成長に及ぼす効果

本研究の結果から、無施肥水田の収量性には緯度や生育初期の気温の強い影響があることが示された。2014 年の各県の慣行栽培法による玄米収量は、青森 610、岩手 562、宮城 559、新潟 547 kg/10a (農林水産省 2014) と、青森、岩手を含む高緯度地域の収量は全国平均収量 536 kg/10a よりも相対的に高く、この傾向は 1960 年頃から確認されている (村田 1964)。この要因の一つに気象要因の違いが挙げられるが、村田 (1964) は 8~9 月の日射量による登熟の影響を、福嶋ら (2015) は栄養成長期の日照時間の長短による穂数への影響を指摘している。すなわち、肥料の施用によって土壌中の養分が十分にある場合には、移植から出穂前後の日照が好適な高緯度地域において収量の有利性がある。

一方、無施肥栽培においては高緯度地域の収量が低い傾向にあった理由として第一に挙げられるのが土壌からの無機態窒素の供給である。佐本ら (1966) は、移植日と施肥量を変えた水稻の生育比較試験から、早植の場合は低温の影響で地力の発現が小さく肥料への依存度が高まるが、晩植の場合は高温の影響で肥料よりも地力依存度が高まると論じている。土壌中の窒素の無機化、すなわち地力の発現は、温度への依存性が極めて高く (Hasegawa and Horie 1994)、また湿潤前の土壌を乾燥させることによって地力

窒素の発現を増大させた場合、イネの吸収窒素量は増加する (安藤ら 1995) ことが知られている。すなわち、栄養成長期が比較的低温で経過する高緯度地域では、土壌からの窒素供給力が低いためにイネの窒素吸収量も低く、したがって分けつ速度が下がるということが考えられる。加えて、イネの生育適温は 18~33℃であるため、この範囲外では同化産物量が不足し分けつの増加が抑制される (後藤・星川 1989) ことが知られている。

気温の穂数形成に与える影響を明らかにする目的で行われたポット試験によって、イネの分けつ増加速度に対して、高温による生育促進と無機化窒素供給の増加が直接的・間接的に影響を与えることが明らかにされた (第 5 図)。また、その程度は直接効果が 57%、間接効果が 43% とほぼ等しい大きさであった。本研究における水田間では無効茎割合に大差はなく、穂数と分けつ数との間には有意な正の相関関係 ($r=0.92^{***}$) が認められた (図表省略) ことから、穂数=分けつ数と概ね解釈できる。本研究では、無施肥水田の収量は新潟、宮城、青森、岩手の順で高かったが、高緯度地域における無施肥水田の収量低下の主要な原因は、低温による地力窒素の供給不足によりイネが十分に窒素を吸収できず、分けつ発生が抑制されることで生じた穂数減少が穂数制限につながったためと考えられた。逆に低緯度地域では、高温による地力窒素の発現度が高く、無施肥ながら土壌から供給される窒素量が高かったことが高収量の要因となったと考えられた。この結果は、寒冷地においては暖地に比べて窒素施肥量が高い傾向にあり (長谷川・近藤 2007)、イネの窒素吸収における施肥窒素への依存度が高いことと一致する。

4. 寒冷地域における無施肥・晩植栽培の検討

本研究結果から示されるように、高緯度地域において肥料を施用することなく収量増を図るためには、無機化窒素の供給とイネ生育初期の積算気温を高めることが穂数確保を通じた収量向上のための絶対条件になる。そのためには移植日を遅らせる晩植が最も簡便で効果的な対策と思われる。本研究においては未検討だが、晩植の場合湛水前の土壌の乾燥が進むことで地力窒素の発現が増大し (丸本 1997)、イネの窒素吸収量が高まる (安藤ら 1995) いわゆる「乾土効果」も期待できる。したがって晩植には無機化窒素の供給や光合成速度の増加などのプラスの影響が期待されるが、一方で過度な晩植は出穂まで日数の短縮化による栄養生長量不足と、登熟期の日射量不足による登熟不良のマイナスの影響が懸念される。ここでは、高緯度地域における無施肥栽培の晩植が収量性に及ぼす影響についてプラス・マイナスの両面から考察し、適切な移植時期について検討したい。

丸山・田中 (1985) は、北陸農試内で 4 月 16 日から 7 月 23 日までの期間に計 8 回の移植日を設け、それぞれの移植日の環境条件の変化、およびイネの生育収量の変動に

について解析した。その結果、5月28日の移植までは最も収量の高い4月16日植えに対し6%程度の収量減に留まるが、その後6月11日、6月25日、7月9日植えと遅れるにつれて収量減は15%、25%、54%と大きくなった。この収量減の要因は各移植日によって異なり、6月11日、6月25日植えは栄養生長量の不足による m^2 当たり粒数の減少、7月9日植えにおいては登熟歩合が50%を下回ったことに拠った。この試験ではいずれの移植日においても十分な肥料が施用されているため、出穂日の遅延に伴う登熟不良、収量減の可能性は5月28日植えの晩植まではほぼ存在しないと考えられる。その後の6月の移植においては、出穂まで日数は減少するが、無施肥栽培の場合は無機化窒素の供給増加が期待でき、無施肥・早植に比べて m^2 当たり粒数は増加することが予想される。

本試験において調査した新潟の無施肥水田において最も晩植だったN13の水田でも、移植日は6月8日だったが、 619 g/m^2 の高い収量が得られており登熟歩合も81.5%と登熟不良とは言えなかった。また、2015年の弘前市の農家無施肥水田の事例では、土壌を十分に乾燥させた後、あきたこまち稚苗を6月10日に植えたが、出穂日は8月10日で登熟期の日照時間は十分に確保でき、 407 本/m^2 の穂数が得られた。この穂数は5月31日移植の近隣の無施肥水田の 259 本/m^2 に比べ格段に多く、高緯度地域の無施肥水田の穂数としても特筆して高かった。これらの事例から推測して、少なくとも6月10日頃までの晩植ではプラスの影響の方が大きいと考えられるが、どの程度の晩植が最も適切かは地域ごとに検討を必要とする。また、水利用においては各地域の水利条件に拠る所が大きいため、各地域の事情を踏まえた上で移植日を検討することが無施肥栽培の収量増加において重要であると考えられる。

謝辞：本研究の遂行にあたり、生産者諸氏には貴重な時間を割いて頂き栽培管理に関する貴重な情報、およびイネ、土壌を惜しみなく提供して頂いた。ここに記して謝意を表する。

引用文献

安藤豊・丸本卓哉・和田源七・中村勉 1995. 乾燥期間が土壌有機態窒素の無機化、水稻の窒素吸収に及ぼす影響について。土肥誌 66:

499-505.

福寛陽・太田久稔・梶亮太・津田直人 2015. 生産力検定試験成績を利用した水稻の収量形成要因の解析。日作紀 84: 249-255.

後藤雄佐・星川清親 1989. 水稻の分けつ性に関する研究。第4報 分けつ性に及ぼす温度の影響。日作紀 58: 68-73.

長谷川浩・竹内史郎・奥村俊勝 1979. 長期無施肥田における水稻諸形質の位置的変動 (II). 近畿大学農学部紀要 12: 109-115.

Hasegawa, T. and Horie, T. 1994. A simplified model for estimating nitrogen mineralization in paddy soil. Plant Prod. Sci. 63: 496-501.

長谷川利伸・近藤始彦 2007. 日本における水稻の収量ポテンシャルの推定 - 生育モデルからのアプローチ - 日作紀 76(別2): 166-167.

川村三郎・中島照夫 1979. 長期無施肥水田土壌における二三の植物養分の動態について。近畿大学農学部紀要 12: 157-169.

気象庁 2014. 気象統計情報 (青森・深浦・八戸・弘前・遠野・古川・大衡・石巻・新潟・巻). <http://www.data.jma.go.jp/obd/stats/etrn/index.php> (2015/10/8 閲覧).

柴田光雄・白岩立彦・堀江武 2006. 長期無施肥栽培桑園の土壌全窒素含量および全炭素含量と収量の推移。日作紀 75: 28-37.

丸本卓哉 1997. 土壌微生物バイオマス窒素の動態に関する研究。土肥誌 68: 229-232.

丸山幸夫・田中孝幸 1985. 水稻の作期が生育収量に及ぼす影響。北陸農試報 27: 80-99.

松島省三 1957. 水稻収量の成立と予察に関する作物学的研究。農技研報 A5: 1-271.

松島省三 1973. 稲作の改善と技術。養賢堂. 1-393.

村田吉男 1964. わが国の水稻収量の地域性に及ぼす日射と温度の影響について。日作紀 33: 59-63.

西尾道徳 1997. 有機栽培の基礎知識。農村漁村文化協会. 1-289.

農林水産省 2014. 平成 26 年産水陸稲の収穫量。 <http://www.e-stat.go.jp/SG1/estat/List.do?lid=000001129556> (2015/10/8 閲覧).

小田正人 2011. 無施肥圃場で栽培したトマトの吸収した窒素の $\delta^{15}\text{N}$ 分析による由来推定。日作紀 80: 457-461.

奥村俊勝 1988. 水稻の窒素栄養の動態からみた無施肥田と施肥田の比較栽培学的研究。京都大学博士論文 (国立国会図書館, 博士論文目録 89-A-86).

Okumura, T. 2002. Rice production in unfertilized paddy field—mechanism of grain production as estimated from nitrogen economy—. Plant Prod. Sci. 5: 83-88.

佐本啓智・杉本勝男・山川勇・鈴木嘉一郎・宇田昌義 1966. 栽培時期を異にする水稻の生育経過に関する研究。日作紀 35: 54-58.

吉野喬・出井嘉光 1977. 土壌窒素供給力の有効積算温度による推定法について。農事試研報 25: 1-62.

Factors Contributing to Yield Variation among Unfertilized Paddy Fields in Northern Japan : Keita HOSOYA¹⁾ and Syuichi SUGIYAMA²⁾ (¹⁾*The United Graduate School of Agricultural Science, Iwate Univ., Iwate 020-8550, Japan;* ²⁾*Faculty of Agriculture and Life Science, Hirosaki Univ.*)

Abstract : Unfertilized crop cultivation system (unfertilized cultivation) is believed to reduce the yield markedly. However, some rice farmers using unfertilized cultivation attain high yields, which are comparable with those obtained in conventional farming. In the present study, we surveyed 16 rice farmers employing unfertilized cultivation in Aomori, Iwate, Miyagi, and Niigata prefectures. Our objective was to identify factors contributing to yield variation. During 2011–2013, the mean annual rice yield obtained by these farmers was 300 kg per 10a; however, some farmers consistently achieved annual yields of 420–480 kg per 10a. The yield was highly correlated with the grain number per m², especially with the panicle number ($r=0.92^{***}$). In addition, the panicle number showed a strong correlation with the average air temperature from transplanting to 43 days before heading ($r=0.66^{**}$). We conducted a rice growth experiment in pots using unfertilized paddy soil and transplanting at four different days. The tillering rate was highly correlated with the average air temperature during the growing period ($r=0.92^{***}$). The results of path analysis based on multiple linear regression revealed that the effects of air temperature on the tillering rate were derived from a direct effect on rice growth (57%) and from increased nitrogen mineralization in the soil (43%). Our findings indicate that ensuring an adequate accumulated temperature during the early vegetative growth period is crucial in unfertilized rice cultivation in northern Japan.

Key words : Average air temperature, Farmer's field, Nitrogen mineralization, Rice, Unfertilized, Yield.
