

北陸地域での水稻品種「つきあかり」の 安定多収実現に向けた簡便な生育量推定法

石丸努¹⁾・大平陽一¹⁾・岡村昌樹¹⁾・山口弘道¹⁾・古畑昌巳²⁾・吉永悟志³⁾

¹⁾ 農研機構中日本農業研究センター上越研究拠点, ²⁾ 農研機構東北農業研究センター大仙研究拠点,

³⁾ 農研機構中日本農業研究センター)

要旨：前報では北陸地域の水稲品種「つきあかり」において、精玄米重 750 g m^{-2} の収量限界を達成するためには籾数 35.7 千粒 m^{-2} を確保する重要性を示した。本報では北陸地域において、多収と良食味を両立可能な穂揃期における窒素栄養状態や、籾数 35.7 千粒 m^{-2} を達成するために必要な穂首分化期における生育量と穂肥窒素量との関係を検討した。籾数 35.7 千粒 m^{-2} を達成した場合、穂揃期における地上部窒素吸収量の理論値は 13.4 g m^{-2} 、玄米タンパク質含有率との相関が有意である葉色 (SPAD 値) の理論値は 41.9 であった。穂首分化期では生育指標値「草丈 (cm) \times 茎数 (本 m^{-2}) \times SPAD 値」は地上部窒素吸収量などの諸形質と密接な正の相関関係があり、各形質の相互関係は回帰直線で表すことができた。穂首分化期における携帯型の正規化植生指数 (NDVI) 測定機による NDVI 値は $0.26 \sim 0.75$ で、この範囲では生育指標値と密接な相関関係があることから、北陸地域の「つきあかり」栽培では、穂首分化期の生育量推定に携帯型 NDVI 測定機を利用できることが示された。同時に、携帯型 NDVI 測定機では NDVI 値が湛水深により大きく影響を受けるが、湛水深に応じて NDVI 値を補正し、穂首分化期の生育量を推定できることを明らかにした。

キーワード：水稻, 生育指標値, 正規化植生指数, 地上部窒素吸収量, つきあかり。

近年、我が国ではライフスタイルの変化に伴い家庭でのコメの消費が減少していく中で、中食や外食のコメの消費が増加している (米穀安定供給確保支援機構 2015)。中食・外食用のコメには、炊飯米表面の適度な硬さ、炊飯米の膨張率の高さ、炊飯後の品質保持能力、他品種とのブレンドへの適応性など、家庭用に求められるコメとは異なる炊飯適性が求められる (Kobayashi ら 2018)。また、業務・加工用水稲品種は比較的低価格で取引されるため、低コスト・省力で多収を達成することが不可欠である (農研機構次世代作物開発研究センター 2020)。

2016 年に農研機構中央農業研究センター (現 農研機構中日本農業研究センター) で育成された水稻品種「つきあかり」は炊飯直後の良食味だけではなく、炊飯後の品質保持能力にも優れる多収品種である (笹原ら 2018)。石丸ら (2022) は北陸地域の多地点・複数年における施肥試験を通じて、「つきあかり」は倒伏を回避しつつ、籾数 35.7 千粒 m^{-2} で精玄米重 750 g m^{-2} の多収と、玄米タンパク質含有率 7.1% の良食味の両立が可能な品種特性を有することを明らかにした。同時に石丸ら (2022) は、過剰な窒素吸収により籾数が過多となった場合には玄米タンパク質含有率が 7.0% を大きく上回るため食味の低下が懸念され、多収と良食味を両立させるためには、窒素吸収量や籾数を適正に保つための穂肥施用時の生育量推定が重要であることも指摘している。普及が最も進んでいる JA えちご上越管内

では、2020 年時点でおおよそ 1000 ha の作付けがなされており、2018 年から多収を目指した栽培指導が行われているものの、収量は $424 \sim 721 \text{ kg/10 a}$ (平均収量 \pm 標準偏差は $591 \pm 67 \text{ kg/10 a}$ 、参加生産者数 66) と生産者による違いが大きい (注: JA えちご上越、私信)。「つきあかり」は偏穂重型品種 (笹原ら 2018) であることなど、「コシヒカリ」に代表される北陸地域での従来の中間型品種とは生育特性が異なることが生産者にとって高位安定生産を困難にする一因であると想定される。収量限界を達成した際の成熟期の諸形質の理論値 (石丸ら 2022) に加えて、多収と良食味の両立のカギとなる生育段階である穂首分化期頃 (「つきあかり」での穂肥施用直前) や出穂期頃 (籾数が決定される) の生育量や窒素栄養状態の目安を示すことが、高位安定生産の達成に不可欠であると考えられる。

草丈・単位面積あたり茎数・SPAD 値の積で表される生育指標値は良食味米生産を目的とした穂肥施用量を判定する生育診断に利用されている (堀尾・紺屋 2007)。しかしながら近年では、就業農業人口の減少や担い手の高齢化に伴い、北陸地域では少数の農業事業体による経営規模の拡大が進んでおり (細山 2016)、省力で多収・良食味のコメ生産が可能な栽培体系が求められている。省力的な診断手法としてリモートセンシング技術があるが、ドローンや人工衛星を用いた手法ではコストや適時性、ドローン飛行時の安全性、専門技術の必要性など、現場に普及するにあた

2022 年 4 月 8 日受理。連絡責任者：石丸努 〒943-0193 新潟県上越市稲田 1-2-1

TEL 025-526-3218, FAX 025-524-8578, cropman@affrc.go.jp

本研究の一部は農林水産省委託プロジェクト「広域・大規模生産に対応する業務・加工用作物品種の開発」(平成 29~30 年) の支援を受けた。

り難しい課題が残されている（後藤ら 2018）. 正規化植生指数（Normalized Difference Vegetation Index : NDVI）は赤色光（RRed）および近赤外光（RNIR）の反射率から植生の分布や繁茂状況を知ることができ、作物の生育量推定に利用されてきた（鳥山 2009）. 携帯型 NDVI 測定機は穂肥施用時のイネ植物体の生育量や窒素吸収量を推定する簡易な生育量推定法として利用されている（浪川ら 2016, 後藤ら 2018, 西田ら 2018）. また、植物がすでに繁茂しており NDVI 値が 0.75 を超えるケースでは推定誤差が大きいいため、携帯型 NDVI 測定機は生育量推定に適さないという報告もある（荒井ら 2021）. 水稻品種「つきあかり」では生育指標値を用いた穂肥施用時の生育量推定が試みられておらず、生育量の推定に携帯型 NDVI 測定機をはじめとした簡易な手法が適用できるかどうかの検討もなされていない.

本研究は、①多収と良食味を両立しうる穂揃期の窒素栄養状態や穂首分化期の生育量推定に基づいた穂肥窒素施用量の提示、②携帯型 NDVI 測定機による生育量推定法の確立、を目的とする. 高位安定生産の達成に必要な「つきあかり」特有の形質や携帯型 NDVI 測定機による生育量推定法の注意点について報告する.

材料と方法

本研究は、緒言で述べた 2 つの目的を達成するため、実験を以下のように実験 1 と実験 2 に分けた.

実験 1. 穂首分化期と穂揃期における生育量調査

1. 栽培方法

2017～2019 年に石丸ら（2022）と同様な条件で、水稻品種「つきあかり」を農研機構中日本農業研究センター上越研究拠点（以下、中農研上越）の試験圃場（新潟県上越市鴨島）と 3 か所の生産法人の圃場（新潟県上越市板倉区、新潟市秋葉区、石川県野々市市）で栽培した. 肥効の異なる窒素肥料を施用量や施用時期を変え、計 47 の試験区を設け、それぞれの試験区に第 1 表と第 2 表のように試験区番号を付した. 各試験地の慣行栽培に従い、栽培適期の 4 月中旬に苗箱播種、4 月末から 5 月下旬に稚苗もしくは中苗を移植した. 中農研上越ではすべての試験区で手植えによる移植を行い、各処理区につき 3 反復の乱塊法とした. 3 か所の生産法人の圃場では機械移植を行った. 1 株あたりの植え付け本数はいずれの試験でも平均で 3 本程度である. 中農研上越での 1 反復あたりの栽培面積は 12.8 m²、生産法人の圃場面積は 20～100 a である. 穂肥は携帯型 NDVI 測定機による NDVI の測定後の出穂前 28～14 日前に施用した（第 1 表、第 2 表）. 各試験地で 7 月 22 日～8 月 2 日に出穂期に達した. 中農研上越での「つきあかり」の試験区間の出穂のずれは最大 4 日であった（データ省略）.

第 1 表 中日本農業研究センター上越研究拠点（上越市鴨島）における LP30 を用いた試験区.

基肥	穂肥	栽植密度 (株 m ⁻²)	試験年			
			2017 ^a	2018 ^a	2019 ^a	2020 ^b
0	0	22.2	1	13	23	
0	3	22.2	2		24	48
0	6	22.2	3	14	25	
3	0	22.2	4	15	26	
3	3	22.2	5	16	27	49
3	6	22.2	6		28	
6	0	22.2	7	17	29	
6	3	22.2	8	18	30	50
6	6	22.2	9	19	31	
3	3	11.1	10			
6	3	11.1	11	20		51
6	3	26.6	12	21		52
6	6	26.6		22		

各試験年の番号は試験区番号. 10 a の圃場に 1 プロット当たり 12.8 m²（2017～2019 年）および 10.8 m²（2020 年）の面積で栽培した. 栽植密度について、条間は 26.6 株 m⁻² の試験区のみ 25 cm、それ以外は第 2 表を含めて 30 cm. P₂O₅ と K₂O は基肥として 6 g m⁻² 施用した.

穂肥には硫酸を用い、NDVI 値の測定後、出穂およそ 25 日前と出穂およそ 15 日前の 2 回に分けて等量ずつ（3 g m⁻² の場合は 1.5 g m⁻² ずつ、6 g m⁻² の場合は 3 g m⁻² ずつ）施用した.

^a 実験 1. 試験区番号は石丸ら（2022）の第 1 表と同様.

^b 実験 2. 栽植密度 22.2 株 m⁻² で基肥窒素施用量 0, 3, 6 g m⁻², 栽植密度 11.1 株 m⁻² と 26.6 株 m⁻² で基肥窒素施用量 6 g m⁻² で栽培し、穂首分化期における湛水深別の NDVI 値の測定に供試した.

2. 調査項目

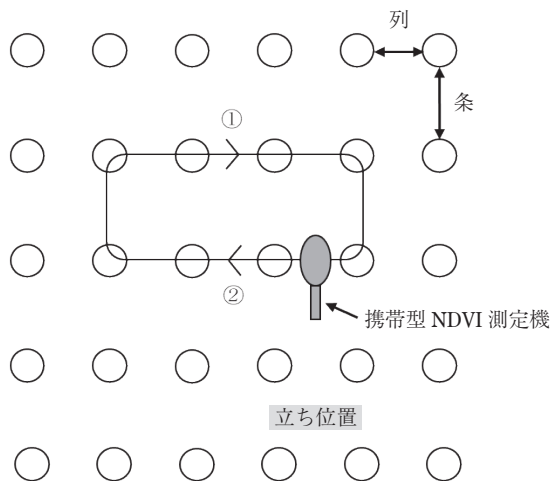
(1) 携帯型 NDVI 測定機による NDVI 値の測定

出穂前 30～25 日前の穂首分化期頃に携帯型の NDVI 測定機（GreenSeeker Handheld Crop Sensor, Trimble Agriculture 社）を用いて、浪川ら（2016）の方法に準じて NDVI 値を測定した. すなわち 2019 年の中農研上越を除き、慣行の湛水深（推定 5 cm 程度）の水田において、土の表面から 100 cm の高さで 10 秒間、各反復で抜き取りによる生育調査を行う区域を第 1 図のように NDVI 測定機を動かしながら測定し、時計回りと反時計回りの 2 回（1 回あたり 4～5 周回）の測定の平均値をその反復の NDVI 値とした. 穂肥施用までの肥料条件が複数試験区に存在する場合は、任意の 3 反復を選んで調査した（例：試験区番号 1～3 の各 3 反復ずつで基肥窒素施用量 0 g m⁻² が計 9 区あるうちの任意の 3 区）. 無風かできる限り風が収まった瞬間を選んで測定し、測定時の天候は晴天から小雨まで様々であった. 2019 年の中農研上越の圃場（試験区番号 23～25, 26～28, 29～31）では中干し直後の入水によりオーバーフローとなり、湛水深は不明であるが慣行よりも明らかに深水となっている条件で NDVI 値の測定を行った.

第2表 LP30 以外の緩効性肥料を用いた中農研上越（上越市鴨島）および生産法人圃場の試験区。

県	市町村	圃場位置	窒素施用量 (g m^{-2})		栽植密度 (株 m^{-2})	試験年	試験区 番号 ^b	基肥の種類
			基肥	穂肥 ^a				
新潟県	上越市	鴨島 ^c	6	3	22.2	2018	32	早生スーパー元肥パワフル 30
			6	6	22.2	2018	33	早生スーパー元肥パワフル 30
			9	3	22.2	2018	34	早生スーパー元肥パワフル 30
			12	0	22.2	2018	35	早生スーパー元肥パワフル 30
			12	3	22.2	2018	36	早生スーパー元肥パワフル 30
			12	0	22.2	2018	37	こしいぶきスーパー元肥 2 号, LP100, LPS40 を混合 ^h
新潟県	上越市	板倉区 ^d	12.1	0	18.5	2017	38	水稻一発 077 と発酵鶏糞を併用
			8.2	1.5	18.5	2018	39	水稻一発 077 と発酵鶏糞を併用
新潟県	新潟市	秋葉区 ^e	14.4	0	22.2	2018	40	こしいぶきスーパー元肥 2 号, LP100, LPS40 を混合 ^h
			14.4	0	22.2	2018	41	こしいぶきスーパー元肥 2 号, LP100, LPS40 を混合 ^h
			12	2	18.5	2019	42	早生スーパー元肥パワフル 30
			12	2	22.2	2019	43	早生スーパー元肥パワフル 30
			14	0	22.2	2019	44	こしいぶきスーパー元肥 2 号, LP100, LPS40 を混合 ^h
			14	0	18.5	2019	45 ^g	こしいぶきスーパー元肥 2 号, LP100, LPS40 を混合 ^h
石川県	野々市市	末松 ^f	8	4	16.7	2017	46	有機くんオール 10 号
			8	6	18.5	2018	47	有機くんオール 10 号

a 穂肥はいずれも NDVI 値の測定後に施用した。b 実験 1. 試験区番号は石丸ら (2022) の第 2 表と同様。c 中農研上越。穂肥の施用量と時期は第 1 表と同じ。d 穂海農耕。穂肥には尿素を使用。e 白銀カルチャー。育苗は密苗栽培。穂肥には穂肥 500 号を使用。f ぶった農産。2018 年のみ密苗栽培。穂肥には有機入りいしかわライト 550 を使用。g 出穂期が若干遅れたため、穂揃い期の抜き取り調査は行われなかった。h 混合比率は窒素含量の比率で、こしいぶきスーパー元肥 2 号:LP100:LPS40 = 5.0:3.5:3.5。



第1図 携帯型NDVI測定機による調査方法の模式図。

○は稲株を表す。

8株抜き取り調査を行う場合、携帯型NDVI測定機を時計回り(①)と反時計回り(②)の2回(1回あたり4~5周回)測定し、平均値をそのプロットのNDVI値とした。

立ち位置は測定対象の条から1条開けた。

(2) 穂首分化期と穂揃期の生育調査

穂首分化期に、中農研上越では各反復から4株(11.1株 m^{-2} の試験区)あるいは8株(第1表と第2表の11.1株 m^{-2} 以外の試験区)、生産法人の圃場では任意の3か所から8株ずつ、携帯型NDVI測定機による測定と同じ区域

での抜き取りによる生育調査を行った。各株について草丈(茎の最下部から葉身の頂部まで)、茎数、最上位完全展開葉(次の葉がある程度抽出している)あるいは最上位完全展開葉から一つ下の葉の中央部で葉緑素計(SPAD-502plus, コニカミノルタ社)によりSPAD値を測定後、根と土をきれいに除き、80℃で3日以上通風乾燥し、地上部の乾物重を測定した。穂首分化期に中農研上越および新潟県秋葉区の試験区から採取した83株について、同じ株の最上位完全展開葉と最上位完全展開葉から一つ下の葉のSPAD値を測定したところ、平均値はそれぞれ44.7と44.4を示し、有意な差は見られなかったため(データ省略)、「つきあかり」ではSPAD値を最上位完全展開葉と最上位完全展開葉から一つ下の葉のいずれかで測定すればよいと考えられた。生育指標値は草丈(cm)、単位面積あたり茎数(本 m^{-2})およびSPAD値の積で表した。また、穂揃期にも穂首分化期と同様の方法で各反復から4株または8株を抜き取り、各株について葉緑素計により止葉の中央部でSPAD値を測定後、根と土をきれいに除き、80℃で3日以上通風乾燥し、地上部の乾物重を測定した。

(3) 窒素含量の測定

穂首分化期と穂揃期の各生育調査時に採取した株のうち中庸な草丈、茎数、SPAD値を持つ1株(抜き取り株数が4の試験区の場合)あるいは2株(抜き取り株数が8の試験区の場合)について、乾燥サンプルを適当な長さに裁断し十分に混ぜた後、裁断サンプルの一部をサンプルミル

(Cyclotec1093, FOSS 社) により粉碎した. 粉末サンプルの窒素含有率を, 全炭素・全窒素分析器 (JM3000CN, J-SCIENCE LAB 社) により測定した. 窒素含有率に単位面積あたりの乾物重を乗じて単位面積あたりの地上部植物体の窒素吸収量を算出した.

(4) 成熟期の籾数と玄米タンパク質含有率

成熟期の単位面積あたり籾数と玄米タンパク質含有率の算出については, 前報の石丸ら (2022) のデータを用いた.

実験 2. 携帯型 NDVI 測定機による湛水深別の NDVI 値の測定

1. 栽培方法

2020 年に水稻品種「つきあかり」を中農研上越の試験圃場で栽培した. 第 1 表の 2017~2019 年の栽培と同様に基肥には LP30 を用い, 22.2 株 m^{-2} の栽植密度で 0 g m^{-2} , 3 g m^{-2} , 6 g m^{-2} , 11.1 株 m^{-2} と 26.6 株 m^{-2} の栽植密度で 6 g m^{-2} の窒素を施用した (第 1 表). 1 株 3 本で手植え, 各処理区の面積は 10.8 m^2 とし, 各処理区につき 3 反復の乱塊法とした.

2. 調査項目

(1) 穂首分化期の湛水深別の NDVI 値の測定と生育調査

出穂前 30~25 日前の穂首分化期頃に携帯型の NDVI 測定機 (GreenSeeker Handheld Crop Sensor, Trimble Agriculture 社) を用いて, 湛水深以外は実験 1 と同様な方法で NDVI 値を測定した. 中干し最終日の出穂およそ 30 日前に湛水深 0 cm での NDVI 値を測定したのち湛水を開始し, 湛水深 5 cm , 湛水深 10 cm 程度まで順次入水後, それぞれの湛水深で NDVI 値を測定した. 携帯型 NDVI 測定機による測定と同じ区域の各反復から 4 株 (11.1 株 m^{-2} の試験区) あるいは 8 株 (第 1 表と第 2 表の 11.1 株 m^{-2} 以外の試験区) を抜き取り, 実験 1 と同様に草丈, 茎数, SPAD 値を測定した.

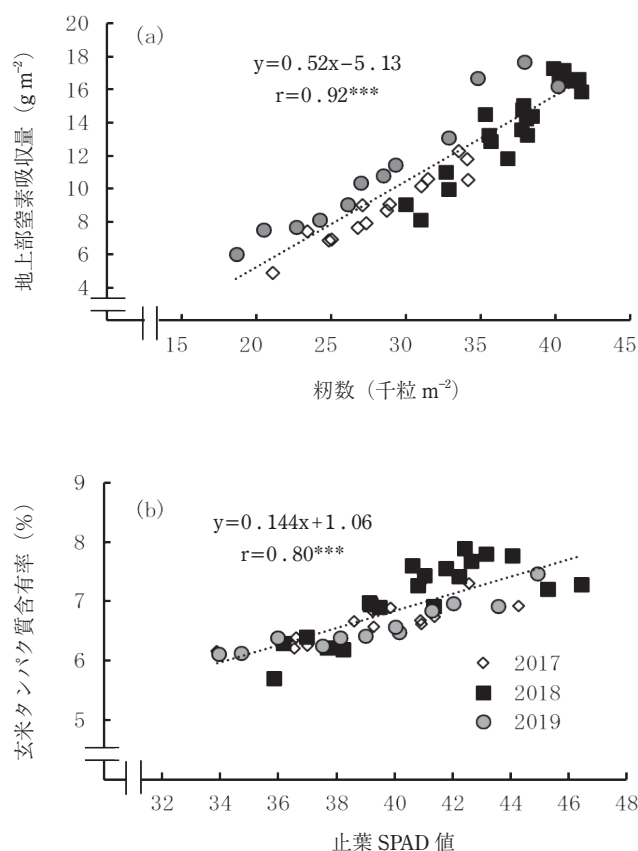
(2) 統計解析

統計ソフト R (ver. 3.6.2) を用いた. 「つきあかり」の 22.2 株 m^{-2} の栽植密度と基肥窒素施用量 6 g m^{-2} における NDVI 値については, それぞれ施肥量と湛水深, 栽植密度と湛水深を要因として分散分析を行い, 有意性がみられた場合はさらに Tukey-HSD の多重検定により湛水深の平均値の有意差検定を行った. また, 湛水深別の NDVI 値と生育指標値との関係について, 共分散分析を行った.

結果および考察

1. 多収と良食味を両立しうる穂揃期の窒素栄養状態

「つきあかり」において, 精玄米重 750 g m^{-2} の収量限界を達成するためには籾数 35.7 千粒 m^{-2} が必要である (石丸ら 2022). 水稻の籾数は出穂期までの窒素吸収量に強く影響を受けることから (和田 1969), 「つきあかり」におけ



第 2 図 穂揃期における地上部窒素吸収量と籾数 (a), 玄米タンパク質含有率と止葉 SPAD 値 (b), との関係. 2017 (◇), 2018 (■), 2019 (●).

*** は相関係数が 0.1% 水準で有意であったことを示す.

る穂揃期の窒素吸収量と籾数との関係を解析した. 穂揃期における 46 試験区 (サンプリングが行われなかった試験区番号 45 を除く) で抜き取り調査を行ったところ, 籾数と地上部窒素吸収量との関係は回帰式 $y = 0.52x - 5.13$ ($r = 0.92$; 第 2 図 a) で表すことができ, 籾数 35.7 千粒 m^{-2} のときの地上部窒素吸収量は 13.4 g m^{-2} となった. また穂揃期の止葉の葉色は玄米タンパク質含有率に大きな影響を及ぼす (若松ら 2008). 「つきあかり」の成熟期の解析により, 収量限界 750 g m^{-2} のときの玄米タンパク質含有率は 7.1% であり (石丸ら 2022), 穂揃期の葉色値と玄米タンパク質含有率との関係 ($y = 0.144x + 1.06$, $r = 0.80$; 第 2 図 b) より, 穂揃期の止葉の葉色値は 41.9 となる. 以上, 穂揃期における抜き取り調査により, 多収と良食味を両立しうる理想的な穂揃期の窒素栄養状態を示すことができた.

2. 籾数 35.7 千粒 m^{-2} を達成するための穂首分化期の生育量と穂肥窒素量との関係

穂首分化期における 28 試験区で, 草丈は $37.4 \sim 64.3 \text{ cm}$, 単位面積あたり茎数は $195.6 \sim 564.1 \text{ 本}$, SPAD 値は $36.5 \sim 48.1$ と試験区間で幅広い変異がみられ, 28 試験区

第3表 「つきあかり」の穂首分化期における諸形質の相関関係。

y x	草丈 (cm)	茎数 (本 m^{-2})	葉色	生育指標値 ($\times 10^5$)	NDVI ^a	地上部乾物重 ($g\ m^{-2}$)	地上部窒素吸収量 ($g\ m^{-2}$)
草丈 (cm)	-	-	-	-	$y=0.0094x+0.098$ $r=0.78^{***}$	$y=8.27x-274.9$ $r=0.83^{***}$	$y=0.25x-8.47$ $r=0.83^{***}$
茎数 (本 m^{-2})	-	-	-	-	$y=0.0008x+0.291$ $r=0.89^{***}$	$y=0.63x-79.6$ $r=0.89^{***}$	$y=0.0195x-2.7343$ $r=0.90^{***}$
葉色	-	-	-	-	$y=0.0224x-0.385$ $r=0.64^{***}$	$y=16.0x-532.9$ $r=0.62^{***}$	$y=0.57x-19.9$ $r=0.72^{***}$
生育指標値 ($\times 10^5$)	$y=1.65x+37.7$ $r=0.85^{***}$	$y=26.2x+141.4$ $r=0.93^{***}$	$y=0.56x+38.5$ $r=0.73^{***}$	-	$y=0.0231x+0.3725$ $r=0.93^{***}$	$y=18.9x-16.8$ $r=0.95^{***}$	$y=0.5923x-0.8282$ $r=0.98^{***}$
NDVI	-	-	-	-	-	$y=719.6x-261.9$ $r=0.87^{***}$	$y=21.7x-7.91$ $r=0.88^{***}$
地上部乾物重 ($g\ m^{-2}$)	-	-	-	-	-	-	$y=0.0306x-0.0646$ $r=0.96^{***}$
地上部窒素吸収量 ($g\ m^{-2}$)	-	-	-	-	-	-	-

各欄で上段は回帰式、下段は相関係数を表す。*** は 0.1%水準で有意性があることを示す。

^a 2019 年の中農研上越（上越市鴨島）における NDVI 値は深水条件下で測定したため、回帰式の解析からは除外した。

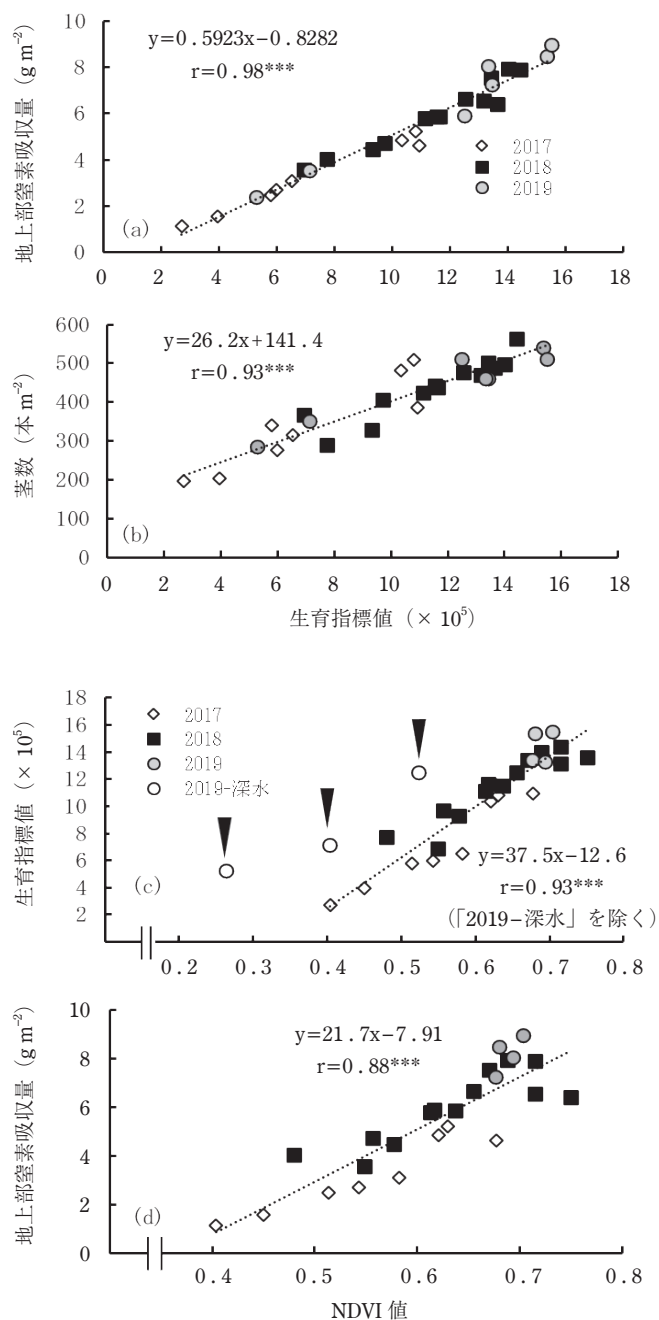
の草丈の平均±標準偏差は 54.7 ± 7.2 cm、茎数の平均±標準偏差は 411.5 ± 101.1 本 m^{-2} 、SPAD 値の平均±標準偏差は 44.3 ± 2.8 であった（データ省略）。また地上部窒素吸収量は $1.14 \sim 8.97\ g\ m^{-2}$ であった（データ省略）。

穂首分化期において生育指標値およびその構成要素と、地上部窒素吸収量は、それぞれ有意な正の相関関係があった（第3表；第3図a）。単位面積あたり茎数は生育指標値（ $y=26.2x+141.4$, $r=0.93$, 第3図b）や地上部窒素吸収量（ $y=0.0195x-2.7343$, $r=0.90$, 第3表）と極めて密接な関係があった。石丸ら（2022）は成熟期の解析により、単位面積あたり穂数は精玄米重（収量）と有意な正の相関関係があることを示している。以上の結果は、生育指標値の構成要素のうち単位面積あたり茎数が窒素栄養状態による違いを最も受けやすいことを示唆するとともに、偏穂重型である「つきあかり」の多収達成のためには分けつ期に十分な茎数を確保することが重要であることを意味する。また単位面積あたり茎数は、「つきあかり」において葉緑素計が利用できない場合に穂首分化期の生育量を推定する最も簡便な指標となり得ることを示唆する。収量限界を達成するために必要な穂首分化期頃の具体的な生育指標値や茎数の目安については後述する。

NDVI 値は 2019 年の深水条件での測定を除くと諸形質と密接な相関関係があり（第3表）、生育指標値と NDVI 値は $y=37.5x-12.6$ の回帰式（第3図c, $r=0.93$ ）地上部窒素吸収量と NDVI 値は $y=21.7x-7.91$ の回帰式（第3図d, $r=0.88$ ）で表すことができた。浪川ら（2016）や西田ら（2018）は湛水条件で携帯型 NDVI 測定機（本研究と同一機種）を用い、東北地域の水稲品種では有効茎決定期から減数分裂期までの NDVI 値が $0.2 \sim 0.75$ の範囲に収まること、植物体の地上部窒素吸収量や生育指標値の推定

が可能であること、を明らかにしている。一方で荒井ら（2021）は、関東地域の中生から晩生の品種に対して携帯型 NDVI 測定機による生育量推定を試みたが、出穂およそ 30 日前の穂首分化期ではすでに植物体が繁茂しており、特に NDVI 値が 0.75 を超えるケースでは推定誤差が大きい。ため、携帯型 NDVI 測定機は生育量推定に適さないと結論付けた。本研究では北陸地域での早生品種「つきあかり」を実験に供試しており、28 試験区の NDVI 値は $0.26 \sim 0.75$ の範囲であったことから、穂首分化期における NDVI 値と生育指標値との間に高い相関が得られたものと考えられる。

穂首分化期の地上部窒素吸収量や穂首分化期から穎花分化終期までの地上部窒素吸収量は初数の決定に大きな影響を及ぼす（和田 1969）。また、第3図aで示したように、草丈・単位面積あたり茎数・SPAD 値の積で表される生育指標値は地上部窒素吸収量と高い正の相関があるため、穂肥施用時の追肥の要否判定指標として用いられ、穂肥窒素量の調整により目標初数の確保が可能と考えられる（金田ら 1986）。そこで 2017～2019 年の中農研上越で行った施肥試験（試験区番号 1～31）において、生育指標値を説明変数 X_1 、穂肥窒素量を説明変数 X_2 、初数を応答変数 Y とする重回帰分析を行ったところ、 $Y = 1.22 \times X_1 + 0.89 \times X_2 + 16.7 \cdots$ (i) の式で表すことができた。得られた重回帰式の決定係数は $R^2=0.72$ であり（第4図）、各パラメータとも 1%水準で有意であった。第4図において 2019 年では 2017 年と 2018 年に比べて初数実測値が初数予測値よりも低い傾向にあったが、穂首分化期から出穂期までの日射量が 2019 年では 2017 年と 2018 年に比べて低かったことに起因すると考えられる（2017 年の $18.4\ MJ\ m^{-2}\ 日^{-1}$ 、2018 年の $20.8\ MJ\ m^{-2}\ 日^{-1}$ に対し、2019 年は $15.1\ MJ\ m^{-2}$

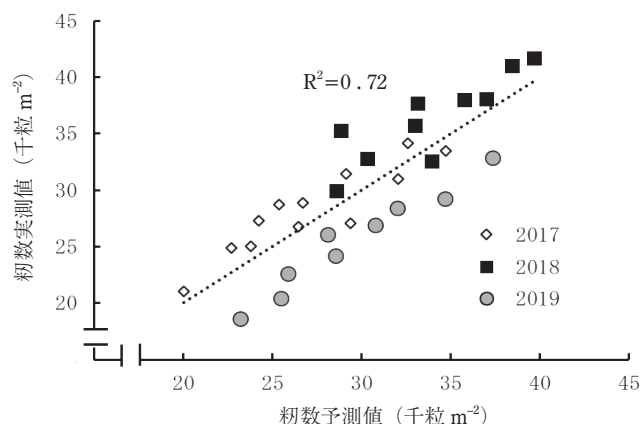


第3図 穂首分化期における生育指標値と地上部窒素吸収量 (a), 茎数 (b), NDVI 値 (c), および NDVI 値と地上部窒素吸収量 (d), との関係. 2017 (◇), 2018 (■), 2019 (●), 2019-深水 (○).

*** は相関係数が 0.1% 水準で有意であったことを示す.

(c) では 2019-深水 (図中に○と矢頭で表示) を回帰式から除外し, (d) では表示していない.

日⁻¹; 石丸ら 2022). 次に (i) で得た籾数の予測値を基に目標籾数を 35.7 千粒 m⁻² に設定した場合, 穂肥窒素量を Y, 生育指標値を X とした回帰式は $Y = -1.38X + 21.4 \cdots$ (ii) となった. すなわち (ii) の回帰式より, 生育指標値が 15.5 (第3表の関連形質の回帰式より NDVI 値が 0.73, 茎数が 548 本 m⁻²) の場合は穂肥の施用が理論上必要なく,



第4図 穂首分化期の生育指標値と穂肥窒素量を説明変数とする籾数に対する重回帰の予測値と実測値.

2017 (◇), 2018 (■), 2019 (●). 2017~2019 年に中農研上越で行った施肥試験 (試験区番号 1~31) の結果を解析.

生育指標値が 14.1 (第3表の関連形質の回帰式より NDVI 値が 0.70, 茎数が 510 本 m⁻²) の場合は 2 g m⁻², 生育指標値が 12.6 (第3表の関連形質の回帰式より NDVI 値が 0.66, 茎数が 472 本 m⁻²) の場合は 4 g m⁻², 生育指標値が 11.1 (第3表の関連形質の回帰式より NDVI 値が 0.63, 茎数が 432 本 m⁻²) の場合は 6 g m⁻² の穂肥窒素の施用が目安となる. また, 生育指標値が 11.1~15.5 の範囲では, 穂首分化期の葉色値は 46.0 前後となり (第3表), 籾数が 35.7 千粒 m⁻² で玄米タンパク質含有率が 7.1% の場合, 穂揃期の SPAD 値が 41.9 (第2図 b) であることから, 穂首分化期から出穂期頃に葉色を高く維持することが多収達成のための籾数確保に重要であると考えられる. 新潟県の「コシヒカリ」では, 倒伏や玄米タンパク質含有率を抑え良食味のコメを生産するために, 穂肥窒素施用時 (出穂前 18 日の花粉母細胞分化期) の葉色の目安を SPAD 値で 32~35, 出穂期の葉色の目安を 32~33 と設定している (新潟県農林水産部 2011). 穂首分化期と花粉母細胞分化期で穂肥窒素の施用推奨時期は異なるものの, 穂首分化期から出穂期頃における「つきあかり」の葉色は「コシヒカリ」の葉色を大きく上回って推移する. 多収に対する穂首分化期までの茎数確保の重要性に加え, 出穂期頃までの葉色維持の重要性が生産者に十分浸透することで, 「つきあかり」のコメ生産は高位安定化に向かうのではないかと推察される. 穂肥窒素の施用は植物体の窒素吸収促進を通じて籾数を増加させる効果があるが (金田ら 1986), 「つきあかり」では理論上, 籾数 37.8 千粒 m⁻² を超えると整粒歩合が 70% を下回り, かつ玄米タンパク含有率が 7.2% を上回る (石丸ら 2022). 加えて, 穂首分化期以降の追肥は節間伸長を促進し, 「つきあかり」では稈長が 85 cm になると倒伏の危険性が高まる (石丸ら 2022). 過剰な籾数による玄米の外観品質や炊飯米の食味低下, 倒伏の危険性を避けるためにも, 穂肥施用直前の穂首分化期頃に生育調査を実施し, 葉色を適正

第4表 基肥窒素量と湛水深（上段）、栽植密度と湛水深（下段）を要因とした穂首分化期におけるNDVI値.

基肥窒素量 ¹⁾		湛水深 (cm)		
(g m ⁻²)		0	5	10
0 (試験区番号 48)		0.59	0.45	0.37
3 (試験区番号 49)		0.65	0.52	0.45
6 (試験区番号 50)		0.70	0.60	0.54
分散分析		***		
基肥窒素量 × 湛水深		ns		
平均値	湛水深	0.64 ^a	0.53 ^b	0.45 ^b

栽植密度 ²⁾		湛水深 (cm)		
(株 m ⁻²)		0	5	10
11.1 (試験区番号 51)		0.66	0.56	0.50
22.2 (試験区番号 50)		0.70	0.60	0.54
26.6 (試験区番号 52)		0.71	0.62	0.58
分散分析		***		
栽植密度 × 湛水深		ns		
平均値	湛水深	0.69 ^a	0.59 ^b	0.54 ^c

, * はそれぞれ1%と0.1%水準で有意性があることを示す。
nsは有意性なし。

平均値(湛水深)のアルファベットはTukey-HSDの多重比較において5%水準で有意性があることを示す。

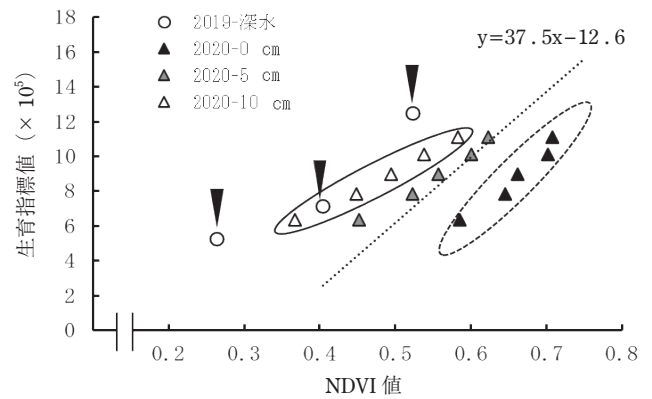
¹⁾ 栽植密度はいずれの基肥窒素量とも22.2株m⁻²。

²⁾ 基肥窒素量はいずれの栽植密度とも6g m⁻²。

に制御する必要がある。本研究で示した穂首分化期の生育量と穂肥窒素量との関係については、重粘土質である新潟県上越市の中農研圃場において得られたものであり、上越地域における「つきあかり」の収量や品質の高位安定化を目指した適切な生育管理の目安として役立つことが期待される。

3. 湛水深が携帯型NDVI測定機によるNDVI値に与える影響

第3図cにおいて、2019年の中農研上越での深水条件におけるNDVI測定値は他の年度や試験地に由来する回帰式から明らかに逸脱していた。西田ら(2018)は慣行の湛水条件で本研究と同一機種の携帯型NDVI測定機を用いて生育時期別・NDVI測定高別の生育量の推定を行い、携帯型NDVI測定機によるNDVI測定法の確立のためには土壌条件や湛水深がNDVI値に与える影響をさらに検討しなければならない可能性を指摘している。本研究で2019年の中農研上越におけるNDVI測定値が回帰式から大きく逸脱したのは湛水深による影響だと仮定し、2020年に中農研上越で湛水深別のNDVI値を測定した。湛水深0 cm, 5 cm, 10 cmのうち、NDVI値は湛水深0 cmで最も高く、基肥窒素量と湛水深、栽植密度と湛水深を要因とした分散分析にお



第5図 穂首分化期における湛水深別のNDVI値と生育指標値との関係(実験2)。

2019-深水(○), 2020-0 cm(▲), 2020-5 cm(△), 2020-10 cm(△). 湛水深0 cmのNDVI値の各点は破線で、湛水深10 cmのNDVI値の各点は実線で囲んでいる。第3図cで示した2017~2019年の慣行湛水深のNDVI値の各点は省略し、回帰直線のみを点線で表示。

いて、基肥窒素量や栽植密度のみならず、湛水深もNDVI値に大きな影響を与えていた(第4表)。第3図cのNDVI値と生育指標値で得られた回帰直線と比較すると、湛水深0 cmでのNDVI値は回帰直線の上方に、湛水深10 cmでのNDVI値は回帰直線の下方に、湛水深5 cmでのNDVI値はほぼ回帰直線上に、それぞれプロットされていた(第5図)。すなわち、湛水深が浅いとNDVI値はイネの生育量の過大評価に、湛水深が深いとNDVI値はイネの生育量の過小評価につながる。これまでに、水田では水が近赤外光の波長帯を吸収するため、NDVI値が低く見積もられることが報告されており(Casanovaら1998)、本研究でもCasanovaら(1998)を支持する結果が得られた。また、本研究ではグライ低地土(新潟県上越市鴨島と上越市板倉区)、灰色低地土(新潟県秋葉区)、低地水田土(石川県野々市市)の土壌分類条件下(農研機構農業環境変動研究センター2019)でNDVI値を測定した。NDVI値は土性の影響を受けることが知られている(Hoshiら1984)。本研究で生育指標値とNDVI値の間に密接な関係がみられたが(第3図c)、その理由として本研究の調査地の土性はNDVI値に影響を与えるほどの違いがなかった可能性や、湛水により土性の違いの影響を最小限にとどめることができた可能性が考えられる。NDVI値は水の濁り具合にも影響を受けことが報告されているが(Kankeら, 2016)、生育指標値とNDVI値の間に密接な関係(第3図c)により、本研究では水の濁り具合はNDVI値に影響を与えるほどではなかったと考えられる。

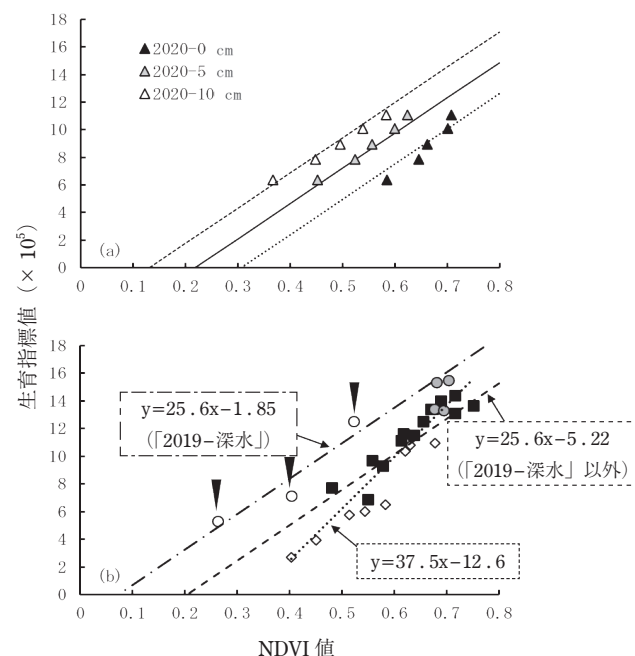
4. 湛水深を考慮に入れたNDVI値による生育指標値の推定

北陸地域での「つきあかり」では中干し期間中が梅雨と重なり、長雨の場合は中干し期間を延長し、生育量推定の

第5表 第5図で示した回帰直線 ($y=a_n + b_n x$) の共分散分析による検定結果.

検定の内容	応答変数	生育指標値 (Y)
	因子	湛水深 (X)
	共変量	NDVI 値
回帰直線の平行性		$P=0.785$
帰無仮説: $b_1=b_2=\dots=b_n=\beta$		棄却されない
回帰直線の傾きの有意性		$P<0.001$
帰無仮説: $\beta=0$		棄却される
回帰直線の切片の相違性		$P<0.001$
帰無仮説: $a_1=a_2=\dots=a_n=\alpha$		棄却される

有意水準は5%.



第6図 湛水深0 cm, 5 cm, 10 cmの回帰式に共通な回帰係数(25.6)で補正した湛水深別のNDVI値と生育指標値との関係(a)と第3図cに湛水深(X_2)を考慮に入れた生育指標値(Y)とNDVI値(X_1)に関する重回帰($Y=25.6 \times X_1 + 0.445 \times X_2 - 7.84$)を適用した場合の回帰式の当てはまり(b)(実験2).
(a) 2020-0 cm (▲), 2020-5 cm (△), 2020-10 cm (○).
(b) 各試験区のシンボルは第3図cと同様. $y=37.5x-12.6$ は第3図cで示した湛水深を考慮に入れない場合の回帰式.

適期である穂首分化期頃にまだ湛水しない場面や、逆に中干し後の強雨により湛水深が慣行よりも一時的に深くなる場面が想定され、湛水深の違いにより、携帯型NDVI測定機による生育量推定が困難になることが予想される。そこで本研究では、携帯型NDVI測定機による「つきあかり」の生育量推定の汎用性を模索するために、湛水深を考慮に入れたNDVI値による生育指標値の推定が可能かどうかを検討した。

まずNDVI値を共変量、湛水深を因子X、生育指標値を応答変数Yとする共分散分析による検定を行ったところ、

第6表 湛水深(X_2)を考慮に入れた生育指標値(Y)とNDVI値(X_1)に関する重回帰($Y=25.6 \times X_1 + 0.445 \times X_2 - 7.84$)を第3図cに適用した場合の推定湛水深、および推定生育指標値の決定係数(R^2)と平均二乗誤差(RMSE).

	補正式を適用した第3図cにおける試験区の種類	
	「2019-深水」以外 (25 試験区)	「2019-深水」 (3 試験区)
推定湛水深 (cm)	5.90	13.4
決定係数 (R^2)	0.78	0.90
平均二乗誤差 (RMSE)	1.66	0.98

推定湛水深は最小二乗法により算出した。

湛水深別の回帰係数に有意差がみられず、回帰直線の傾きの有意性と切片の相違性は認められたため(第5表)、第6図aに示すように傾きは共通で、湛水深により切片の異なる直線に回帰できた。この結果についてNDVI値を説明変数 X_1 、湛水深を説明変数 X_2 、生育指標値を応答変数Yとする重回帰式で表すと、 $Y=25.6 \times X_1 + 0.445 \times X_2 - 7.84 \cdots$ (iii)となった。得られた重回帰式の決定係数は $R^2=0.92$ であった。異なる湛水深の条件でも、第6図aのように湛水深別の回帰直線を切片(生育指標値が0の場合のNDVI値)で補正することができると考えられた。

さらに、湛水深(X_2)を考慮に入れた生育指標値(Y)とNDVI値(X_1)に関する(iii)の重回帰を第3図cに示した生育指標値(Y)とNDVI値(X)との関係に適用したところ、2019年の深水処理(2019-深水)以外の25試験区では $Y=25.6X-5.22$ 、2019-深水の3試験区では $Y=25.6X-1.85$ 、の回帰式で表すことができ(第6図b)、2019-深水以外の25試験区の湛水深は5.9 cm、2019-深水の3試験区の湛水深は13.4 cm、と推定された(第6表)。2019-深水以外の25試験区の推定湛水深が5.9 cmであったことは、NDVI値を測定した水田が慣行の湛水深(推定5 cm程度)であったことに矛盾せず、湛水深(X_2)を考慮に入れた生育指標値(Y)とNDVI値(X_1)に関する(iii)の重回帰の妥当性を裏付けた。

以上より本研究において、(iii)で示した重回帰式により湛水深が異なる場合でも湛水深を共変量、NDVI値を説明変数とした生育指標値の推定が可能であることが明らかとなった。ただし、携帯型NDVI測定機の測定の高さや測定機を静止あるいは移動させながらの測定方法の違いによりNDVI値は若干変化することが知られていることから(浪川ら2016)、測定高を土の表面から100 cmに保ち、第1図のように測定機を移動させながらNDVI値を測定する必要がある。

謝辞: 本試験の実施にあたり協力いただいた有限会社穂海農耕、株式会社ぶった農産、株式会社白銀カルチャーの皆様、中農研上越の業務科職員(野崎育雄氏・清水宏彰氏・市橋正則氏・矢崎孝司氏)と契約職員(柳澤千晶氏・上坂

直美氏)に感謝の意を表します。上越地域の生産者圃場における2020年の「つきあかり」収量データは、JA えちご上越より提供いただいた。

引用文献

- 荒井(三王)裕見子・岡村昌樹・建石邦夫・矢部志央里・萩原均・吉田ひろえ・吉永悟志・小林伸哉 2021. 非破壊計測による水稻生育形質の推定精度の検討. 日作紀 90: 160-167.
- 米穀安定供給確保支援機構 2015. ライフスタイルの変化と米消費の動向. 米に関する調査レポート H26-6: 1-21.
- Casanova, D., Epema, G.F. and Goudriaan, J. 1998. Monitoring rice reflectance at field level for estimating biomass and LAI. *Field Crops Res.* 55: 83-92.
- 後藤元・井上吉雄・中場勝 2018. 携帯型NDVI測定器を用いた水稻品種「つや姫」の生育診断. 日作東北支部報 61: 31-32.
- 堀尾光広・紺屋秀之 2007. 水稻の生育・栄養診断への携帯式生育情報測定装置の利用. 農機誌 69: 8-11.
- Hoshi, T., Ishida, T. and Nakayama, K. 1984. Experimental study on the spectral reflectance of paddy soils in the field survey. ISE-TR-84-47. Institute of Information Science and Electronics, University of Tsukuba, Japan. 1-15.
- 細山隆夫 2016. 農地・構造政策と大規模水田作経営の展開－北海道・北陸を中心に－. 農業経済研究 88: 51-66.
- 石丸努・大平陽一・大角壮弘・古畑昌己・大川泰一郎・吉永悟志 2022. 水稻新品種「つきあかり」の北陸地域における多収条件－成熟期の諸形質の解析より－. 日作紀 91: 49-58.
- 金田吉弘・児玉徹・三浦昌司・長野間宏・佐々木昭太郎 1986. 八郎潟干拓地における水稻の栄養診断と追肥の要否判定. 東北農業研究 39: 55-56.
- Kanke, Y., Tubana, B., Dalen, M. and Harrell, D. 2016. Evaluation of red and red-edge reflectance-based vegetation indices for rice biomass and grain yield prediction models in paddy fields. *Precis. Agric.* 17: 507-530.
- Kobayashi, A., Hori, K., Yamamoto, T. and Yano, M. 2018. Koshihikari: a premium short-grain rice cultivar – its expansion and breeding in Japan. *Rice* 11: 15.
- 浪川茉莉・西田瑞彦・高橋智紀・金田吉弘 2016. 携帯型NDVI測定機によるNDVI値と水稻窒素吸収量の関係. 土肥誌 87: 450-454.
- 新潟県農林水産部 2011. 水稻栽培指針. 平成 23 年 3 月.
- 西田瑞彦・浪川茉莉・工藤洋晃・大平陽一・高橋智紀 2018. 生育時期別に異なる高さで測定した携帯型NDVI測定機によるNDVI値と極穂重水稻「いわいだわら」の窒素栄養指標値との関係. 土肥誌 89: 146-151.
- 農研機構次世代作物開発研究センター 2020. 様々な用途に向くお米の品種シリーズ. 茨城. 1-38.
- 農研機構農業環境変動研究センター 2019. 日本土壌インベントリー. <https://soil-inventory.rad.naro.go.jp/> (2022 年 3 月 2 日閲覧).
- 笹原英樹・後藤明俊・重宗明子・長岡一朗・松下景・前田英郎・山口誠之・三浦清之 2018. 早生で多収の極良食味水稻品種「つきあかり」の育成. 農研機構研究報告中央農研 6: 1-21.
- 鳥山和伸 2009. 非破壊的手法による作物栄養診断の最前線 1. 水稻: リモートセンシングによる窒素栄養診断. 土肥誌 80: 66-74.
- 和田源七 1969. 水稻収量成立におよぼす窒素栄養の影響－とくに収穫期以後の窒素の重要性について－. 農技研報 16: 27-167.
- 若松謙一・佐々木修・上蘭一郎・田中明男 2008. 水稻登熟期の高温条件下における背白米の発生に及ぼす窒素施肥量の影響. 日作紀 77: 424-433.

Simple Methods to Estimate Growth Traits in a High Yielding Rice Cultivar ‘Tsukiakari’ in Hokuriku Regions : Tsutomu ISHIMARU¹⁾, Youichi OHDAIRA¹⁾, Masaki OKAMURA¹⁾, Hiromichi YAMAGUCHI¹⁾, Masami FURUHATA²⁾ and Satoshi YOSHINAGA³⁾ (¹⁾Joetsu Research Station, Central Agricultural Research Center, National Agriculture and Food Research Organization (CARC, NARO), Joetsu 943-0193, Japan; ²⁾Daisen Research Station, Tohoku Agricultural Research Center, NARO; ³⁾CARC, NARO)

Abstract : For the early maturity and high palatable rice cultivar, ‘Tsukiakari’, to attain the maximum grain yield of 750 g m⁻², it is important to achieve 35700 spikelets per square meter. We examined the relationship between growth parameters and amount of nitrogen application at the panicle neck node differentiation stage, to attain a high yield and high palatability. Based on a significant linear regression between growth traits, shoot nitrogen content and leaf color based on the single photon avalanche diode (SPAD) value at full heading stage were estimated to be 13.4 g m⁻² and 41.9, respectively, when 35700 spikelets per square meter was achieved. Growth parameters showed a close correlation at the panicle neck node differentiation stage, represented by a significant linear regression. The normalized difference vegetation index (NDVI) value was in the range of 0.26–0.75 and showed a positive and close correlation with growth index value (plant height cm × number of tillers per square meter × SPAD value), indicating that NDVI can be used to estimate the growth index value in ‘Tsukiakari’ at the panicle neck node differentiation stage. We also elucidated that the NDVI value was greatly affected by water depth in the paddy field, and developed a calculation model to estimate the growth parameters of ‘Tsukiakari’ at the panicle neck node differentiation stage by adjusting the NDVI value to the water depth.

Key words : Growth index value, NDVI, Rice, Shoot nitrogen content, ‘Tsukiakari’.