基準品種を利用したデータ補完による北海道水稻の 発育予測モデルのパラメータ作成

濱寄孝弘^{*,†}・三浦 周^{**}・藤倉潤治^{**}・根本 学^{*}・井上 聡^{*}・広田知良^{*}

(^{*} 農研機構北海道農業研究センター 〒062-8555 北海道札幌市豊平区羊ヶ丘1
^{**} 道総研農業研究本部上川農業試験場 〒078-0397 北海道上川郡比布町南1線5号)

Parameter creation for a development prediction model of Hokkaido paddy rice
by data supplementation using standard cultivars

Takahiro HAMASAKI^{*,†}, Shu MIURA^{**}, Junji FUJIKURA^{**}, Manabu NEMOTO^{*}, Satoshi INOUE^{*} and Tomoyoshi HIROTA^{*}

(^{*}Hokkaido Agricultural Research Center, NARO, 1 Hitsujigaoka, Toyohira-ku, Sapporo, Hokkaido 062-8555, Japan.
^{**}Kamikawa Agricultural Experiment Station, Agricultural Research Department, HRO,
Minami 1-5, Pippu-cho, Hokkaido 078-0397, Japan.)

Abstract

Growth prediction models are used nationwide to support rice cultivation management and to predict/evaluate rice production. Development prediction models are also used in Hokkaido. The development index (DVI) model is easy to use and has a high prediction accuracy. However, DVI models are limited to 4 rice cultivars with an earliness of “early to medium”. Therefore, we prepared the parameters of a DVI growth prediction model for rice cultivars with different levels of earliness for the Hokkaido region. During the preparation we encountered an issue because the development prediction model was not able to properly predict the difference in earliness between cultivars. This occurred due to a systematic estimation error, dependent upon the survey area of the growth data which was different between the cultivars. As a solution, we supplemented the growth data of the cultivars with the data of a “standard cultivar” to make the DVI model parameters. This was possible because the correlation between cultivars during the developmental stage of rice plants cultivated in Hokkaido is represented by a linear equation with a slope of almost 1. With the DVI model created using supplemented data, it became possible to accurately predict the difference in earliness between cultivars. This method is effective for creating development prediction models for cultivars whose developmental data is limited to survey areas and new cultivars with little data available.

Key words: Data supplementation, Developmental index, DVI model, Hokkaido, Paddy rice

キーワード：水稻，DVI，データ補完，発育予測モデル，北海道

1. はじめに

気象データに基づき水稻の出穂期や成熟期を予測する発育予測モデルは、水稻の栽培管理、早期警戒情報の提供、収量予測、適地判定等、様々な利用されている (Horie *et al.*, 1995; Iizumi, 2007; 神田, 2007; 丹野ら, 2007)。北海道においては、日平均・最高・最低気温、日平均風速、日日照時間から求めた簡易有効気温を積算する簡易有効積算温度モデル (森田・村上, 1981; 村上ら, 1982; 竹川, 1991)、および、日平均気温等から求める発育速度 (DVR) を積算した発育指数 (DVI) を用いる DVI モデル (de Wit *et al.*, 1970; 堀江・中川, 1990; 田中, 2007) が水稻の発育予測に用いられている。

簡易有効積算温度モデルは、気温だけではなく日照時間や風速を用いることにより近似的に水温の影響も考慮されており、北海道内で広く用いられている。しかし、竹川 (1991) による簡易有効気温を求める式は道南の限られ

た地域での観測データに基づいて作成されている上、その当時とは、測候所およびアメダスの日照時間観測に用いる測器が、測定法の異なる測器に更新されている (気象庁, 2018)。旧日照計での観測値を新日照計での観測値に読み替える換算式は提供されているが (気象庁, 2018)、その逆の換算式は提供されておらず、旧日照計での観測値に基づき作成された簡易有効積算温度モデルを現在の日照計の値を用いて使用することは基本的に困難である。

一方、日平均気温のみを用いた DVI モデルは、簡易有効積算温度と比較して簡便で気象データも入手しやすく、また出穂期の推定精度はむしろ高いものの (広田・濱寄, 2015)、現在引用が可能な形でパラメータが公表されている粳 (うるち) 米品種は「きらら 397」と「ほしのゆめ」、「ななつぼし」、「ゆめびりか」 (田中, 2007; 長田ら, 2013; 田中, 2016) の全て「やや早」であり、早生や晩生など早晩性の異なる他の道内品種のモデルの作成が求められている。

そこで筆者らは現在栽培されている、道内の早晩性の異なる粳米 9 品種について気温を用いた DVI モデルのパラメータセットの作成を試みた。パラメータ作成に際し、使用するデータの取得地域に地域的な偏りがある品種や、

2018 年 11 月 29 日 受付, 2019 年 1 月 28 日 受理

[†]Corresponding Author: hamasaki@affrc.go.jp

DOI: 10.2480/cib.J-19-052

表 1. 対象とした品種の早晩性とデータの取得場所および年次.

品種名	早晩性	調査種別*	調査場所** およびデータ数						データ数 合計	取得年次***	奨決現地**** データ数
			北斗市	岩見沢市	比布町	訓子府町	滝川市	札幌市			
大地の星	早	定期作況	—	—	—	—	—	2	4	2012-2013	119
		奨決基本	17	34	34	—	—	28	—		
ゆめぴりか	やや早	定期作況	—	7	8	—	—	5	20	2008-2015	196
		奨決基本	16	19	18	—	—	20	—		
ほしのゆめ	やや早	定期作況	14	15	25	—	—	—	54	1996-2013	786
		奨決基本	42	42	43	—	12	38	—		
おぼろづき	やや早	定期作況	—	—	—	—	—	6	8	2012-2015	175
		奨決基本	18	26	28	—	—	30	—		
ななつぼし	やや早	定期作況	7	9	14	—	—	6	38	2002-2015	498
		奨決基本	34	36	36	—	2	33	—		
きらら 397	やや早	定期作況	26	39	47	—	—	6	120	1989-2015	1389
		奨決基本	59	61	62	18	28	42	—		
きたあおば	やや早	定期作況	—	—	—	—	—	2	4	2012-2013	—
		奨決基本	—	—	—	—	—	10	—		
ふっくりんこ	やや晩	定期作況	15	—	—	—	—	6	23	2001-2015	107
		奨決基本	30	26	6	—	—	12	—		
たちじょうぶ	かなり晩	定期作況	—	—	—	—	—	2	4	2012-2013	—
		奨決基本	—	—	—	—	—	6	—		

* 定期作況：定期作況調査（ただし、札幌と石垣は独自調査） 奨決基本：奨励品種決定基本調査

定期作況・定期作況調査（ただし、札幌市道総研は独自調査）
 ** 北斗市：道総研道南農業試験場，岩見沢市：道総研中央農業試験場，比布市：道総研上川農業試験場（1993年以前は旭川市）
 訓子府町：道総研北見農業試験場，滝川市：道総研中央農業試験場，札幌市：農研機構北海道農業研究センター
 石垣市：国際農業研究センター熱帯・島嶼研究拠点

*** 地点によって取得年次は異なる。全地点を合わせたデータの取得年の幅を示す。

**** 奨励品種決定現地調査

データ数自体が少ない品種は、それらデータに基づきパラメータを作成すると発育予測モデルの推定精度が低い懸念がある。そこで、道内の広い範囲でデータが取得されており、データの蓄積期間が長くデータ数が多い「きらら397」を「基準品種」とし、基準品種のデータを用いてパラメータ作成対象品種のデータを補完することで、モデルの推定精度の向上を図る方法を考案したので報告する。

2. 材料および方法

2.1 使用データ

対象とした水稻品種は、北海道で現在栽培されている9品種である。早晩性の早いものから、「早」の「大地の星」,「やや早」の「きらら397」,「ほしのゆめ」,「ななつばし」,「ゆめぴりか」,「おほろづき」,「きたあおば」,「やや晩」の「ふっくりんこ」,「かなり晩」の「たちじょうぶ」の9品種である。

データの入手元は、1) 地方独立行政法人北海道立総合研究機構（道総研）の定期作況調査、2) 奨励品種決定基本調査、3) 奨励品種決定現地調査、4) 独自調査の4種類あり、それぞれの調査地点は次の通りである：1) 定期作況調査：道総研農業研究本部上川農業試験場（比布町、ただし1993年以前は旭川市）、中央農業試験場（岩見沢市）、道南農業試験場（北斗市）、2) 奨励品種決定基本調査：上川農業試験場、中央農業試験場（岩見沢市、滝川市）、道南農業試験場、北見農業試験場（訓子府町）、国立研究開発法人農業・食品産業技術総合研究機構（農研機構）北海道農業研究センター（札幌市）、3) 奨励品種決定現地調査：今金町、八雲町、江差市、七飯町、知内町、厚沢部町、沼田町、深川市、妹背牛町、芦別市、新十津川町、美唄市、栗沢町、栗山町、由仁町、長沼町、南幌町、石狩市、当別町、恵庭市、共和町、仁木町、倶知安町、蘭越町、伊達市、壮瞥町、鶴川町、厚真町、平取町、新ひだか町、遠別町、羽

図 1. 北海道内のデータ取得地点

このほか、沖縄県石垣市（独自調査）がある。

幌町，小平町，当麻町，旭川市，鷹栖町，東川町，愛別町，和寒町，美瑛町，中富良野町，名寄市，士別市，池田町，音更町，美幌町，女満別町の現地調査圃場，4）独自調査：北海道農業研究センターおよび国立研究開発法人国際農林水産業研究センター熱帯・島嶼研究拠点（沖縄県石垣市）。

表1に、各品種の早晩性と定期作況調査、奨励品種決定基本調査、独自調査のデータの調査地点ごとのデータ数、データ取得期間、奨励品種決定現地調査のデータ数を示す。また図1に各地点の位置関係（北海道内のみ）を示す。各データの調査項目（本研究で利用した項目のみ抜粋）は、定期作況調査データと独自調査データでは移植日、苗の種別（中苗、成苗）、移植時葉令、幼穂形成期、出穂期で、奨励品種決定基本調査と奨励品種決定現地調査では移植日、苗の種別（中苗、成苗）、出穂期である。北海道農業

研究センターと国際農研熱帯・島嶼研究拠点で独自に取得したデータは、表 1 では調査項目が同じ定期作況調査データの行に含めた。なお、独自調査の沖縄県石垣市のデータは、北海道水稲への温暖化影響評価を目的に、現在の北海道より栽培期間中の平均気温がおよそ 5℃ 高い条件下で栽培・調査された (Nemoto *et al.*, 2016) ものであり、本研究ではモデルの適用温度範囲の高温側への拡大を目的として加えた。

発育予測モデルで使用する日平均気温は、農研機構より提供されているメッシュ農業気象データ (大野ら, 2016) を用いた。

2.2 使用した DVI モデル

本論文では、堀江・中川 (1990) の DVI モデルを基本に、北海道内の水稲品種は日長感応性が無い、もしくは非常に低い (細井, 1981; Ichitani *et al.*, 1997) ことから、発育速度 (DVR) の算出には日長時間は用いず日平均気温のみを用いる田中 (2007) のモデルを用いた。

$$DVI_n = DVI_{n-1} + DVR_n \quad (1)$$

ただし、幼穂形成期の $DVI = 1$ 、出穂期は 2

移植時の $DVI_0 = B \cdot (NLtp)$

$$DVR_n = 1 / (1 + \exp(-A_1 \cdot (T_n - Th_1))) / G_1 \quad (DVI_{n-1} < 1) \quad (2)$$

$$DVR_n = 1 / (1 + \exp(-A_2 \cdot (T_n - Th_2))) / G_2 \quad (1 \leq DVI_{n-1} < 2) \quad (3)$$

ここで、添字の n は基準となる日 (ここでは移植日) からの日数、 $NLtp$ は苗の葉令 (不完全葉を含まない)、 T は日平均気温、 A 、 Th 、 G 、 B はパラメータで、添字の 1 は移植から幼穂形成期まで、2 は幼穂形成期から出穂期までを示す。移植当日の DVI 初期値は苗の葉令から求められ、日々の DVI は前日の DVI に当日の DVR を加えた値である。発育ステージは移植日から幼穂形成期までと、幼穂形成期から出穂期の 2 つに分け、幼穂形成期の DVI は 1、出穂期の DVI は 2 に設定し、それぞれの期間で別個のパラメータを用いた。

2.3 発育予測モデルのパラメータ決定法と作成したモデルの精度検証

発育予測モデルのパラメータ作成には、2.1 で示したデータのうち、幼穂形成期のある定期作況調査データおよび独自調査データを用い、発育予測モデルの精度検証には奨励品種決定基本調査データを用いた。

しかし、入手したデータは、品種によってはデータが得られた地点が偏っており、またデータ数も異なっている (表 1)。「ふっくりんこ」は、定期作況調査が行われたのは北斗市のみであり、逆に「ゆめぴりか」は北斗市の定期作況調査データがない。「大地の星」「おぼろづき」「きたあおば」「たちじょうぶ」は定期作況調査データがなく、パラメータ作成に用いるのは独自調査のデータのみとなり、データ数は 4 から 8 とごく少ない。そこで、最もデータの蓄積期間が長く、調査地点も偏りが無い「きらら 397」を基準品種とし、次の方法で他品種のデータを補完した。

図 2 に、定期作況調査、奨励品種決定基本調査、奨励品

種決定現地調査、独自調査の全データを用いての「きらら 397」の出穂期に対する他各品種の出穂期の散布図を示す。いずれの品種の出穂期も「きらら 397」の出穂期に対し、ピアソンの積率相関の R^2 値が 0.95 以上の高い相関を示し、かつ、傾きもほぼ 1 であり、少なくともグラフに表示された範囲 (年の通日 (DOY) で 190 ~ 240 日) の出穂では、基準品種との早晩の逆転はないと判断できる。幼穂形成期も同様に R^2 値が 0.91 以上で (データ省略)、出穂期よりは低い値となったが、これは調査が定期作況調査と独自調査に限られ、データ数が少なかったためと推察され、幼穂形成期を経て出穂に至ることを考えると、幼穂形成期も出穂期と同程度の高い相関にあると考える。そこで、「きらら 397」を基準品種とし、その幼穂形成期、出穂期から、上記相関に基づき作成した線形回帰式により、それ以外の品種についても、「きらら 397」のデータと比較して調査されていない全ての地点や年次の幼穂形成期、出穂期を推定し、データを補完した。この補完の結果、全ての品種のデータ数は「きらら 397」と同じ 120 個となる。

データ補完の有無が発育予測モデルの推定精度におよぼす影響を検討するため、補完せずに実測のデータのみを用いた場合と、補完したデータを用いた場合の 2 通りで発育予測モデルのパラメータ A 、 B 、 Th 、 G を求めた。パラメータの最適化は、Simplex 法 (Nelder and Mead, 1965) による最小二乗法にて行なった。なお、Simplex 法の計算には、小林 (1981) が作成したプログラムの BASIC バージョンを Visual Basic for Applications 7.1 (Microsoft Corporation, Microsoft Excel for Mac 2016) に移植したものを使用した。

作成したパラメータセットによる出穂期の予測精度を、奨励品種決定基本調査データを用いて検証した。その際、DVI の初期値の算出には移植時の葉令が必要であるが、奨励品種決定調査データには苗の種類 (中苗、成苗) はあるが葉令はないため、定期作況調査データより苗の種類ごとの平均の葉令を求め、移植時葉令は品種一律に中苗で 3.2、成苗で 4.1 とした。

3. 結 果

データ補完のない従来方式と、データを補完する補完方式の、品種ごとの出穂期の推定誤差を表 2 に示す。従来方式では、出穂期の推定誤差は RMSE で最大が「ふっくりんこ」の 3.6 日、最小が「きたあおば」の 1.7 日で、9 品種平均 2.8 日だったのに対し、補完方式では、最大が「大地の星」の 3.3 日、最小が「たちじょうぶ」の 2.2 日の平均 2.8 日で、補完方式も従来方式と平均の推定精度は変わらなかった。品種個別に見ると、「おぼろづき」と「ふっくりんこ」では、補完方式により 0.7 ~ 0.8 日推定誤差が減少した一方、「ゆめぴりか」で 0.2 日、「きたあおば」では 1.2 日、推定誤差が増大した。検証用データ (奨励品種決定基本調査) の調査地点別の推定誤差を表 3 に示す。上記、補完方式で誤差が減少した「おぼろづき」は、岩見沢市では従来方式と RMSE が変わらないものの、比布町、北斗市、札幌市では 0.9 ~ 1.2 日減少し、「ふっくりんこ」は比布町では補完方式による RMSE の減少は 0.2 日と僅かであるが、札幌市では 0.9 日、岩見沢市では 2 日以上、RMSE が減少した。一方、「ふっくりんこ」は北斗市では

図 2. 各品種と「きらら 397」との出穂期の相関
* マーカーの色の濃さはデータプロットの重なりを示す。

RMSE が 0.7 日増大した。補完方式により誤差が増大した「ゆめぴりか」は、岩見沢市で RMSE が 0.4 日減少しているものの、比布町で 0.7 日、北斗市で 0.4 日、札幌で 0.2 日増大した。「きたあおば」は、検証用のデータが札幌市での奨励品種決定現地調査データのみであり、上記 RMSE

の 1.2 日の増大は札幌市での値である。

品種の早晩性が正しく推定されているかについて、各品種の出穂期と「きらら 397」の出穂期との差の平均値を早晩性の指標とみなし、その実測値、従来方式による発育予測モデルでの推定値、補完方式による発育予測モデルでの

推定値を表4に示す。従来方式で作成した発育予測モデルでは、すべての品種について「きらら397」を基準とすると出穂を実測値より早めに推定しているとともに、早晩の順位が実測値と異なる結果となった。特に、「ふっくりんこ」は実測値よりも3.2日、早く推定され、実際には「やや早」の「きらら397」よりも2階級晩生の「やや晩」であるにも関わらず、「きらら397」よりも早く出穂すると推定された。また、「きたあおば」と「きらら397」との間、および、「おぼろづき」と「ななつぼし」との間の順位も逆転していた。一方、補完方式により、全体的に実測値より早めの傾向は残るものの、品種の早晩の順位は実測と同じとなり、「ふっくりんこ」の出穂期推定値の平均値は「きらら397」

より1.9日遅く、実測との差は0.7日まで減少した。

4. 考 察

従来方式でパラメータを作成した発育予測モデルによる出穂期の推定で見られた「きたあおば」と「きらら397」との早晩の逆転、「おぼろづき」と「ななつぼし」との早晩の逆転は、同じ「やや早」内でのわずかな差の逆転であり、実際の栽培でも起こりうる現象であろう。一方、「きらら397」と「ふっくりんこ」の出穂期の逆転は、早晩性「やや早」と「やや晩」の2階級の違いに渡るものであり、栽培管理や作況等の把握・予測に利用するにあたり、品種の特性上ほぼあり得ない「逆転」した予測結果をもたらす

表2. 従来方式と補完方式によりパラメータを求めた発育予測モデルの各品種の出穂期推定誤差の比較.

	検証用 データ数	移植期からの出穂期推定精度		
		推定誤差 (RMSE (日))		RMSE 差
		従来方式	補完方式	
大地の星	113	3.4	3.3	0.1
ゆめぴりか	73	2.6	2.8	-0.2
ほしのゆめ	177	3.1	3.0	0.1
おぼろづき	102	3.1	2.4	0.7
ななつぼし	141	2.6	2.6	0.0
きらら397*	270	3.2	(3.2)	(0.0)
きたあおば	10	1.7	2.9	-1.2
ふっくりんこ	74	3.6	2.8	0.8
たちじょうぶ	6	2.3	2.2	0.1
平均		2.8	2.8	0.0

* 基準品種のため、補完方式も従来方式と同じ値となる。

表4. 各品種の出穂期実測値と推定値それぞれの「きらら397」との差と早晩の順位.

品種	きらら397との出穂期の差の平均(日)* および早晩の順位(括弧内)					
	実測値		推定値			
			従来方式	補完方式		
大地の星	-5.3	(1)	-6.7	(1)	-6.1	(1)
ゆめぴりか	-1.7	(2)	-2.7	(2)	-2.0	(2)
ほしのゆめ	-1.0	(3)	-2.5	(3)	-1.9	(3)
おぼろづき	-0.9	(4)	-1.2	(5)	-1.6	(4)
ななつぼし	-0.5	(5)	-2.1	(4)	-1.0	(5)
(きらら397	0	(6)	0	(8)	0	(6))
きたあおば	0.4	(7)	-1.1	(6)	0.2	(7)
ふっくりんこ	2.6	(8)	-0.6	(7)	1.9	(8)
たちじょうぶ	6.1	(9)	3.9	(9)	5.6	(9)

* 対象品種の出穂期-「きらら397」の出穂期

表3. 地域別出穂期推定誤差 (RMSE (日)).

		比布町	岩見沢市	北斗市	訓子府町	滝川市	札幌市
大地の星	従来方式	2.3	4.3	3.4	-	-	3.1
	補完方式	2.1	3.9	3.9	-	-	3.5
	N*	34	34	17	-	-	28
ゆめぴりか	従来方式	1.6	2.8	3.7	-	-	2.0
	補完方式	2.3	2.4	4.1	-	-	2.2
	N	18	19	16	-	-	20
ほしのゆめ	従来方式	1.5	4.7	2.6	-	4.1	2.4
	補完方式	1.6	4.1	2.9	-	3.6	2.4
	N	43	42	42	-	12	38
おぼろづき	従来方式	2.6	3.2	3.5	-	-	3.3
	補完方式	1.7	3.2	2.3	-	-	2.2
	N	28	26	18	-	-	30
ななつぼし	従来方式	1.5	3.8	2.8	-	0.7	1.6
	補完方式	1.6	3.3	3.3	-	1.6	1.7
	N	36	36	34	-	2	33
きらら397	(従来方式)	2.4	3.0	3.1	1.7	1.6	2.1
	N	62	61	59	18	28	42
きたあおば	従来方式	-	-	-	-	-	1.7
	補完方式	-	-	-	-	-	2.9
	N	-	-	-	-	-	10
ふっくりんこ	従来方式	2.4	5.1	2.4	-	-	2.3
	補完方式	2.2	3.0	3.1	-	-	1.4
	N	6	26	30	-	-	12
たちじょうぶ	従来方式	-	-	-	-	-	2.3
	補完方式	-	-	-	-	-	2.2
	N	-	-	-	-	-	6

*N: データ個数

発育予測モデルは、実用上受け入れがたい。発育予測モデルの推定精度が、モデルの作成に使うデータに依存することは従来指摘されており、モデルの安定性向上・広域適応性の確保には広範な地域でのデータ取得が望ましいとされる（堀江・中川, 1990; 中川・堀江, 1995; 中野ら, 2015）。今回、発育予測モデルパラメータ作成に用いたデータは、品種によっては調査地点や年数（データ個数）がごく限られており（表 1）、それが品種間の早晩の逆転を生じた原因の可能性がある。

今回基準品種とした「きらら 397」の出穂期について、パラメータの作成に使ったデータの調査地点別に、推定値と実測値との関係を図 3 に示す（道内のみ；定期作況調査と奨励品種決定基本調査データを合わせて示す）。実測値に対して北斗市では出穂が遅めに推定され、比布町と札幌市はやや遅め～同程度、岩見沢市では逆に早めに推定され、調査地点に依存する系統誤差が認められた。「きらら 397」以外の品種についても、従来方式でのモデルで推定した出穂期の、実測値からの偏差を調査地点ごとに平均して表 5 に示すとともに、さらに調査地点間の系統誤差の違いをよ

図 3. 地域別「きらら 397」出穂期推定値と実測値との関係
石垣市のデータは、栽培時期が他地点と半年ずれているため割愛した。

表 5. 調査地点に依存した出穂期推定値の系統誤差。

品種	出穂期推定値の偏差 * 平均値 ± SE (日)			
	比布町	岩見沢市	北斗市	札幌市
大地の星	-0.7 ± 0.4	-3.8 ± 0.4	2.8 ± 0.4	1.4 ± 0.4
ゆめぴりか	0.6 ± 0.3	-2.1 ± 0.4	2.4 ± 0.3	0.6 ± 0.3
ほしのゆめ	-0.1 ± 0.2	-4.0 ± 0.3	1.0 ± 0.2	-0.4 ± 0.2
おぼろづき	1.5 ± 0.4	-2.5 ± 0.4	1.9 ± 0.4	1.2 ± 0.4
ななつぼし	-0.3 ± 0.2	-2.7 ± 0.3	1.2 ± 0.2	-0.1 ± 0.2
きらら 397	0.7 ± 0.2	-2.6 ± 0.2	2.6 ± 0.2	1.7 ± 0.2
ふっくりんこ	-1.0 ± 1.0	-4.7 ± 0.4	-0.6 ± 1.0	-2.1 ± 1.0

* 出穂期の推定値 - 実測値

「きたあおば」と「たちじょうぶ」は調査地点が札幌市のみのため割愛した。

り明らかにするため、表 5 で示した推定値の地点ごとの偏差の平均値と、そのさらに 4 地点平均との差、すなわち、地点ごとの出穂期推定値の系統誤差の地域間の偏差を表 6 に示す。表 6 より、他地点と比較して北斗市では出穂が 1.4 ～ 2.8 日遅く推定され、札幌市では 0 ～ 1.5 日遅く、比布町では「大地の星」の出穂は 0.7 日早めに推定されるものの、それ以外の品種は 0.1 ～ 1.1 日遅めに推定され、岩見沢市では逆に 2.3 ～ 3.7 日早めに推定されるなど、図 3 の傾向が他品種にも当てはまること、すなわち地域に依存する発育モデルの推定値の系統誤差は、品種に関わらず普遍的な現象であることが示された。

パラメータ作成に用いるデータの取得先が、大きな系統誤差を生じさせる地点に偏っている場合、そのデータに最適化して作成されたモデルは、他地点における発育予測に大きな誤差を生じることになる。今回取り扱った品種の中で、「ふっくりんこ」は出穂期が遅いため道南向けの品種として位置付けられ、定期作況調査データの調査地点は北斗市のみである。「ふっくりんこ」の発育モデルのパラメータ作成には、北斗市でのデータ 15 個に加え、札幌市と石垣市のデータがそれぞれ 6 個と 2 個、用られているものの（表 1）、上述の通り北斗市では他地域と比較して出穂が 1.4 ～ 2.8 日遅く、札幌市で 0 ～ 1.5 日遅く推定されるため、これらのデータに基づき作成したパラメータでは、他地域の出穂をより早く推定することになる。なお石垣島では実測より平均で 2 日早く推定されるが（データ省略）、データ数が 2 個と少ないため影響は小さいと考える。一方で「きらら 397」は定期作況調査が北斗市、岩見沢市、比布町で行われており、「ふっくりんこ」に比べると広範な地域に対してパラメータが最適化されている。これが出穂期の予測で「きらら 397」と「ふっくりんこ」に逆転を生じた原因であろう。

発育予測モデルによる推定結果に地域に依存した系統誤差を生じる原因は、発育予測式で考慮されていない気象要素、および気象以外の要因が水稻の発育に影響しているためと考える。一般に、水稻の発育には気温以外にも日長が影響し、そのため緯度の異なる地域間で品種の早晩性が入れ替わることもあるが（鳥山ら, 1969）、北海道の水稻品種は日長感性が無い、もしくは極めて低い（細井, 1981; Ichitani *et al.*, 1997) ため、上述の地域に依存した系統誤差は日長感性に起因するものではなく、気温・日長以外の

表 6. 調査地点ごとの出穂期推定値の系統誤差の地域間差。

品種	出穂期推定値の偏差平均値の 4 地点平均値との差 * (日)			
	比布町	岩見沢市	北斗市	札幌市
大地の星	-0.7	-3.7	2.8	1.5
ゆめぴりか	0.2	-2.5	2.1	0.2
ほしのゆめ	0.8	-3.1	1.9	0.5
おぼろづき	1.0	-3.0	1.4	0.7
ななつぼし	0.2	-2.3	1.7	0.4
きらら 397	0.1	-3.2	2.0	1.1
ふっくりんこ	1.1	-2.6	1.5	0.0

* 各地点の出穂期推定値の偏差平均値

- 出穂期推定値の偏差平均値の 4 地点平均値

要因によって生じていると考えられる。誤差の原因が明らかであれば、発育予測モデルにてその要因の影響を考慮するなどにより対処可能であるが、現時点では必ずしも明らかではない。発育予測に、地域に依存した系統誤差を生じていても、モデル作成データの調査地域と、発育予測の対象となる地域が一致していれば問題はない。しかし、想定される作付け地域に限られる品種の場合、モデルの作成に利用可能なデータの調査地域に限られることもある一方で、近年は気候変動・温暖化の影響や、また生産者や需要側の希望により、品種育成時には想定していなかった地域への作付け拡大が進んでいる。例えば今回示した「ふっくりんこ」は早晩性が「やや晩」であり、栽培地域は道南とされていたが、温暖化に伴い栽培対象地域がそれ以外の地域にも拡大しており、発育モデル作成データの取得地域と、その利用地域とに乖離が生じている。

発育予測モデルのパラメータ作成に使うデータが広範な地域で取得されていれば、比較的広域適用性の高いモデルの作成が期待できる。また、品種間の早晩性の違いを適切に反映したパラメータセットを得るには、品種間でデータ取得地域とデータ数が同じであることが望ましい。今回提案した方法は、「基準品種」のデータを使い、他品種のデータを補完することで、これらの条件を満たすデータセットを作出できる。この方法により、データの取得地域が限られた品種でも広域適用性を確保し、かつ、新規導入品種などデータ数が少ない品種でも信頼性の高い発育予測モデルのパラメータ作成が期待できる。

なお、品種間の早晩の違いを反映する出穂期予測法としては補完方式以外にも、「きらら 397」の出穂期予測値から図 2 の線形回帰式により各品種の出穂期を推定する方法が考えられるが、今回作成した生育予測モデルの利用目的の一つに不稔歩合予測があり、前歴期、危険期、開花期の推定に DVI 値を用いるため、幼穂形成期や出穂期の日付だけではなく生育途中の DVI 値が必要であることから、品種ごとの発育予測モデルの作成を行なった。参考として、上記「きらら 397」の出穂期推定日からの線形回帰による方法で求めた出穂期の推定誤差 (RMSE) は 9 品種平均で 2.9 日であり、従来方式および補完方式とほとんど変わらず、一方、同方法による品種間の出穂期の早晩の評価においては、補完方式でみられた「きらら 397」に対して他品種の出穂を若干早めに推定する傾向 (表 4) は見られなかった。補完方式でみられる「きらら 397」に対して他品種の出穂を若干早めに推定する傾向については、今後その原因と補正についての検討が必要であろう。

一方、補完方式によって作成したパラメータでは、必ずしも出穂期の推定精度は向上しなかった (表 2)。これは、データ補完方式では、地域に依存する系統誤差の原因そのものに対応し、誤差を解消しているのではなく、広範な地域のデータを用いることで、複数の地域に対応したパラメータを求めているためであろう。例えば、表 2 では、「きたあおば」の推定誤差が補完方式で増大しているが、「きたあおば」は検証用のデータの調査地点が札幌のみであり、パラメータ作成だけでなく検証用のデータも調査地点が偏っており、データの個数も少ないことから、逆にデータ補完により他地点にも合うパラメータとしたことで誤差

表 7. 補完方式によって作成した各品種の発育予測モデルパラメータ.

	移植日 ～幼穂形成期				幼穂形成期 ～出穂期		
	A_1	Th_1	G_1	B	A_2	Th_2	G_2
大地の星	0.283	16.81	21.95	0.089	0.248	17.21	17.02
ゆめぴりか	0.263	18.93	17.42	0.072	0.235	17.21	17.77
ほしのゆめ	0.235	18.24	18.60	0.055	0.172	17.67	16.38
おぼろづき	0.253	17.33	22.57	0.079	0.218	16.86	18.42
ななつぼし	0.250	17.37	22.50	0.079	0.208	16.67	18.63
きらら 397	0.264	17.58	21.83	0.055	0.195	17.71	16.27
きたあおば	0.261	17.11	22.81	0.071	0.172	18.14	16.90
ふっくりんこ	0.329	16.12	28.00	0.064	0.272	16.22	20.13
たちじょうぶ	0.264	16.53	26.17	0.051	0.244	16.28	21.80

が増大したと考える。

補完方式の実施には、適切な「基準品種」の設定が不可欠である。新しい品種の育成の際、および定期作況調査等では、「標準品種」のデータが取得されている。「きらら 397」は北海道の前標準品種として道内の広範な地域で栽培され、かつ、データの蓄積も多いことから、補完方式の基準品種として有効に活用でき、今回それ自身を含め、9 品種の発育予測モデルのパラメータセットを得た (表 7)。さらに、新しく育成された品種の発育データは近年の温暖化の影響により、かつてより温度の高い条件下で得られたものとなっているが、「きらら 397」は北海道において顕著な気温上昇 (札幌管区気象台, 2017; 広田ら, 2017) が見られる以前の 1980 年代からのデータが蓄積されており、それに基づき新しい品種のデータを補完することで、新しい品種についての発育予測モデルの適用温度域も広がるであろう。

水稻の新たな品種の育成は続いており、また気候変動に伴う作付け地域の拡大・移動は今後も続くと思われる。さらに、今後の担い手の減少、経営面積の拡大に伴い、作業競回避を目的に 1 経営体での早晩性の異なる複数品種の導入も進むであろう。栽培管理の適正化および効率化を支援する発育予測モデルの構築に、この手法の活用が期待される。

5. まとめ

北海道の主要な水稻品種について、気温を用いた DVI 発育予測式のパラメータセットを作成した。発育予測モデルのパラメータ作成に利用する発育データについて、品種による調査地点の偏りやデータ数、年度の違いがあるままパラメータを作成すると、そのパラメータによる出穂期の推定結果は、品種の早晩の順位を必ずしも反映しない、という問題を生じた。品種間のデータの調査地点やデータ数、年度を揃えるため、次の方法を提案した。すなわち、現在の主要品種で最も広範な地域で、かつ長期間のデータが得られている「きらら 397」を基準品種とし、発育予測モデル作成の対象となる品種では調査されていない地点・年度のデータを、その品種と基準品種との発育ステージ (幼穂形成期、出穂期) の線形回帰式に基づいて基準品種のデータから推定・補完する方法である。この補完方式により補完されたデータを用いて作成されたモデルパラメー

タに基づく発育予測の結果（出穂期の推定値）は、品種間の早晩の順位をより適切に再現した。

謝 辞

本研究の一部は、総合科学技術・イノベーション会議のSIP（戦略的イノベーション創造プログラム）「次世代農林水産業創造技術（管理法人：農研機構生物系特定産業技術研究支援センター）」の支援を受けて行った。また、本研究の一部はJSPS 科研費 JP25750119 の助成を受けたものである。

引用文献

- de Wit CT, Brouwer R, Penning de Vries FWT, 1970: The simulation of photosynthetic systems. *Proceedings of International Biological Program/Plant Production Technical Meeting*, 47-70.
- 広田知良・濱寄孝弘, 2015: 気候変動に対応した水稻作付け指標改定の考え方. 北海道の農業気象 **67**, 49-56.
- 広田知良・山崎太地・安井美裕・古川準三・丹羽勝久・根本 学・濱寄孝弘・下田星児・菅野洋光・西尾善太, 2017: 気候変動による北海道におけるワイン産地の確立－1998年以降のピノ・ノワールへの正の影響－. 生物と気象 **17**, 34-35.
- 堀江 武・中川博視, 1990: イネの発育過程のモデル化と予測に関する研究 第1報 モデルの基本構造とパラメータの推定法および出穂予測への適用. 日本作物学会紀事 **59**, 687-695.
- Horie T, Nakagawa H, Ohnishi M, Nakano J, 1995: Rice production in Japan under current and future climates. In *Modeling the impact of climate change on rice in Asia* (ed. By Marthens RB *et al.*). CAB International, Oxford, U.K., 143-164.
- 細井徳夫, 1981: 気象要因による水稻生育の変動性に関する研究, V. 日本の主要水稻品種の感温性, 感光性, 基本栄養生長性と出穂日数の制御要因の地域的特徴. 育種学雑誌 **31**, 239-250.
- Ichitani K, Okumoto Y, Tanisaka T, 1997: Photoperiod sensitivity gene of Se-1 locus found in photoperiod insensitive rice cultivars of the northern limit region of rice cultivation. *Breeding Science* **47**, 145-152.
- Iizumi T, Hayashi Y, Kimura F, 2007: Influence on rice production in Japan from cool and hot summers after global warming. *Journal of Agricultural Meteorology* **63**, 11-23.
- 神田英司, 2007: 東北地方における水稻冷害の早期警戒システムの開発に関する研究. 東北農業研究センター研究報告 **107**, 71-117.

気象庁, 2018: 気象観測統計の解説.

<https://www.data.jma.go.jp/obd/stats/data/kaisetu/index.html> (アクセス日: 2018/10/18)

- 小林和彦, 1981: シンプレックス法により多変数関数の最小値を求めるためのサブルーチン. 農林水産研究計算センター報告, A シリーズ **17**, 51-71.
- 森田弘彦・村上利男, 1981: 寒地水稻の計画作期について 第3報 簡易積算有効気温による作期の計画化. 日本作物学会紀事 **50**, 別号 1, 1-2.
- 村上利男・森田弘彦・土井康生・今野一男, 1982: 寒地水稻の計画栽培に関する解析的研究. 北海道農業試験場研究報告 **133**, 61-100.
- 長田 亨・五十嵐俊成・吉田慎一, 2013: ブランド米生産に向けた「ゆめぴりか」の栽培指針. 北農 **80**, 2-9.
- 中川博視・堀江 武, 1995: イネの発育過程のモデル化と予測に関する研究 第2報 幼穂の分化・発達過程の気象的予測モデル. 日本作物学会紀事 **64**, 33-42.
- 中野聡史・熊谷悦史・島田信二・鮫島良次・大野宏之・本間香貴・白岩立彦, 2015: ダイズ品種の発育モデルの作成と気温上昇が発育速度に及ぼす影響の広域推定. 日本作物学会紀事 **84**, 408-417.
- Nelder JA, Mead R, 1965: A simplex method for function minimization. *The Computer Journal*. **7**, 308-313.
- Nemoto M, Hamasaki T, Matsuba S, Hayashi S, Yanagihara S, 2016: Estimation of Rice Yield Components with Meteorological Elements Divided According to Developmental Stages. *Journal of Agricultural Meteorology* **72**, 128-141.
- 大野宏之・佐々木華織・大原源二・中園 江, 2016: 実況値と数値予報, 平年値を組み合わせたメッシュ気温・降水量データの作成. 生物と気象 **16**, 71-79.
- 札幌管区気象台, 2017: 北海道の気候変化【第2版】これまでの120年とこれからの予測. 札幌管区気象台. 37pp.
- 竹川昌和, 1991: 気象条件から求めた地帯別水稻品種選定の基準－とくにアメダスゾーンメッシュについて－. 北海道立農業試験場集報 **63**, 41-52.
- 田中英彦, 2007: 気象データに基づく予測システムと活用 ①作物生育予測 1. 水稻. 畑で読む北海道の農業気象（水島俊一監修）. 北海道協同組合通信社, 札幌市, pp.182-185.
- 田中英彦, 2016: 北海道における水稻の冷害とその対策. 北海道の農業気象 **68**, 17-20.
- 丹野 久・田中英彦・古原 洋・佐々木亮・三浦 周, 2007: 寒地水稻の湛水土中直播栽培における簡易有効積算気温による品種選定. 日本作物学会紀事 **76**, 591-599.
- 鳥山国土・坂本 敏・岩下友記・徐 進生, 1969: 異なる緯度で栽培した日本稲の出穂性について. 中国農業試験場報告 A **17**, 1-16.