

# 酒造原料米の溶解性予測システムの確立に関する研究

—酒造原料米の吸水性及び消化性の重回帰分析による予測—

齋藤健太\*<sup>1</sup> 横堀正敏\*<sup>1</sup> 樋口誠一\*<sup>2</sup> 和田健太郎\*<sup>1</sup>

## Study on Establishment of Prediction System of Rice Solubility for Sake Making

—Prediction by Multiple Regression Analysis of Water Absorption and Digestibility of Rice for Sake Making—

SAITO Kenta\*<sup>1</sup>, YOKOBORI Masatoshi\*<sup>1</sup>, HIGUCHI Seiichi\*<sup>2</sup>, WADA Kentaro\*<sup>1</sup>

抄録

清酒の品質に影響を及ぼす酒造原料米の溶解性を迅速かつ簡便に予測するシステムの確立を目指した。本研究では溶解性に関連する酒造原料米の「吸水性」及び「消化性」の予測を試みた。尿素崩壊性試験、ラピッドビスコアライザー及び近赤外分析で得た迅速分析値を説明変数、酒造用原料米全国統一分析値を目的変数とした重回帰分析により予測式を作成した。さらにパス解析によって吸水性及び消化性の因果関係を見える化した。

キーワード：米，清酒，溶解性，消化性，吸水性，重回帰分析，パス解析

### 1 はじめに

酒造原料米（以下、原料米）の溶解性とは、掛米の消化性のことである。醪の段階で、麴や原料処理などを調整することで、掛米の溶け方が制御されている（図1参照）。

原料米の溶解性は、同じ品種であっても生産年や生産地の気象条件に左右され、醸造工程や清酒の品質に影響する<sup>1)</sup>。そのため、仕込み前に原料米の溶解性を把握することが望まれる。しかし、原料米の分析には時間と手間がかかるため、多くの酒造現場で行われず、新米の溶解性は把握されないまま仕込まれ、造り手の経験則で管理されている。他方、酒米研究会が提供している酒造用原料米全国統一分析値の情報提供は遅く、仕込み前には間に合わない。また、同研究会の原料米の溶解性予測は気候による漠然とした予測であり、定量化されたものではない。

そこで本研究では、仕込み前の情報提供を実現する溶解性予測システムの確立を目指し、まずは溶解性に関連する原料米の「吸水性」及び「消化性」の予測を試みた。尿素崩壊性試験、ラピッドビスコアライザー（以下、RVA）及び近赤外分析（以下、NIR）といった迅速な分析法を組合せて原料米の溶解性が予測可能か検討した。

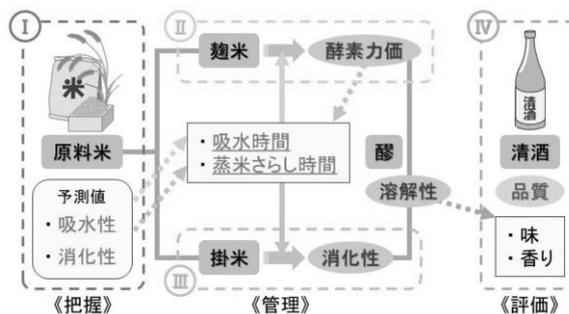


図1 原料米の溶解性の関係

### 2 実験方法

#### 2.1 試料

品種、産地及び収穫年の異なる埼玉県産の原料

\*<sup>1</sup> 北部研究所 食品・バイオ技術担当

\*<sup>2</sup> 北部研究所 食品プロジェクト担当

米 21 点を試料とした (表 1 参照)。酒造用原料米  
全国統一分析法<sup>2)</sup>に従い、精米歩合 70%、白米水  
分 13.5±0.3%に調製し、以下の試験に供した。

## 2.2 酒造用原料米全国統一分析法

千粒重、水分、精米歩合、砕米率、吸水性 20  
分、吸水性 120 分、蒸米吸水率、消化性 Brix、消  
化性フォルモール態窒素 (以下、消化性 F-N)、  
タンパク質及びカリウムの測定は酒造用原料米全  
国統一分析法<sup>2)</sup>に従った。各測定は 2 回繰り返し、  
平均値を求めた。

## 2.3 尿素崩壊性試験

白米整粒 10 粒を 3.5M 尿素溶液 10mL に 15°C で  
24 時間浸漬後、ろ過した。ろ液 10mL に 0.2% ヨウ  
素/ヨウ化カリウム溶液 250 μL を加えて呈色し  
た。呈色した溶液を波長 530, 600, 620, 660, 680nm  
の吸光度を紫外可視分光光度計 (UV-3600、島津  
製作所) で測定した。3 回繰り返し測定し、平均  
値を求めた。

## 2.4 RVA による糊化粘度特性の解析

白米をバイブレーションサンプルミル  
(TI-100、アドバンテック) を用いて粉碎試料と  
した。粉碎条件は酒造用原料米全国統一分析法<sup>2)</sup>  
に従った。この粉碎試料 3.5g (水分 14.0%換算)  
に蒸留水 25.0g を加えて RVA (RVA-3D、Newport  
Scientific 社) を用い、糊化粘度特性を解析した。  
温度条件は 50°C で 1 分間保持、93°C まで 10.75°C/  
分で昇温、93°C で 7 分間保持、50°C まで 10.75°C/  
分で降温、50°C で 5 分間保持した。3 回繰り返し  
測定し、糊化温度 (以下、Tv)、最高粘度 (以下、  
PV)、最低粘度 (以下、MV)、最終粘度 (以下、  
FV)、ブレイクダウン (以下、BD)、セットバ  
ック (以下、SB) について平均値を求めた。粘度  
は RVU で表示した。

## 2.5 NIR

近赤外スペクトルの測定には、フーリエ変換赤  
外分光分析装置 (Frontier MIR/NIR plus NIRA、

PerkinElmer Japan) を用いた。近赤外反射アクセ  
サリー (NIRA) の窓板を白米 (米粒のまま) で覆  
い、セラミックディスクをリファレンスとして反  
射モードで測定した。637~2700nm の範囲を 0.3  
~0.4nm 間隔で、積算回数は 32 回とした。3 回繰  
り返し測定し平均値を求めた。

データ処理は、最小二乗法を基にした平滑化と  
数値微分を行い<sup>3)</sup>、915, 1000, 1200, 1270, 1355,  
1460, 1580, 1708, 1776, 1825, 1936, 2058, 2106,  
2174, 2282, 2320, 2430nm の各波長スペクトル  
における 2 次微分ピーク面積の平均値を求めた。

## 2.6 統計解析

重回帰分析では R (version 3.5.0) のパッケージ  
car を用い、ステップワイズ法で説明変数を選択し  
た。多重共線性の検定では分散拡大係数 (VIF) 2  
以下の測定値を説明変数として採用した。またエ  
クセル統計を用い、重回帰式の算出及び残差分析  
を行った。

パス解析 (共分散構造分析) では R (version 3.5.0)  
のパッケージ lavaan (0.6-1) 及び semPlot を用い  
た。因果モデルの適合度指標については、 $\chi^2$  検定  
の p 値は 0.20 以上、CFI は 0.95 以上、RMSEA は  
0.05 未満、SRMR は 0.05 未満を適合とした<sup>4)</sup>。

## 3 結果及び考察

### 3.1 各種分析値

一例として、さけ武蔵 (平成 29 年産、埼玉県川  
越市鴨田 No.1) の RVA の粘度及び温度を図 2 に、  
NIR の反射率及び 2 次微分値を図 3 に示した。

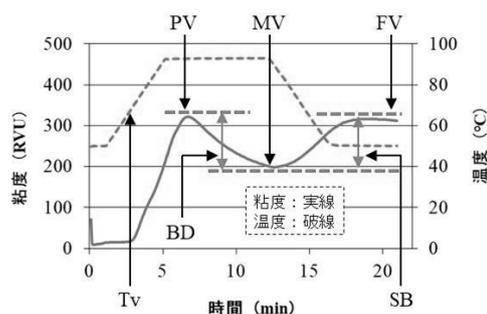


図 2 RVA の粘度及び温度

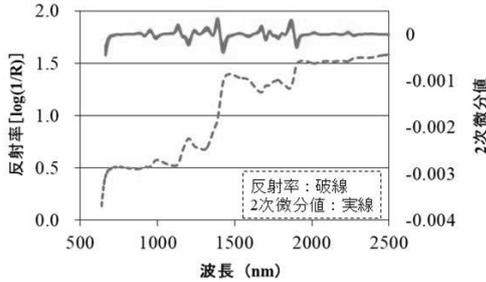


図3 NIRの反射率及び2次微分値

統計解析に用いた酒造用原料米全国統一分析値及び迅速分析値(尿素崩壊性試験、RVA及びNIR)を表1に示した。統計解析に用いた説明変数を表1の $X_1 \sim X_{12}$ とした。

表1 酒造用原料米全国統一分析値及び迅速分析値(尿素崩壊性試験、RVA及びNIR)

原料米	酒造用原料米全国統一分析値										迅速分析値										
	品種	産地	収穫年	砕米率	白米水分	吸水性		蒸米吸水率	消化性		タンパク質	カリウム	尿素崩壊性	RVA			NIR				
						20分	120分		Brix	F-N				530nm	Tv	BD	SB	1555nm	1460nm	1825nm	2058nm
五百万石	小千谷市	H28	3.4	13.6	26.1	30.0	33.2	8.5	0.7	5.2	550	0.229	69.7	140	119	6.7E-05	1.1E-02	1.0E-04	3.0E-04	5.8E-04	2.5E-04

表2 重回帰式

重回帰式
式(1) 吸水性20分 = $-0.053X_1 + 30019X_2 + 27.05$
式(2) 吸水性120分 = $12266X_3 + 0.17X_4 + 13308X_5 - 0.021X_1 + 23.88$
式(3) 消化性Brix = $-0.38X_6 + 16949X_2 + 0.05X_7 + 25.93$
式(4) 消化性F-N = $0.12X_4 + 1.31X_8 + 8680X_2 + 5.84$
式(5) 消化性F-N = $3171X_2 + 0.21X_8 - 72.6X_9 + 0.64$
式(6) 消化性F-N = $0.10X_{10} + 0.27X_8 + 1450X_2 - 0.25$
式(7) 蒸米吸水率 = $0.06X_1 - 96604X_{11} + 7234X_{12} + 39.4$

表3 回帰統計、分散分析及び残差分析

	回帰統計		分散分析		残差分析	
	決定係数 $R^2$	補正 $R^2$	F値	p値	バラツキ最小(%)	バラツキ最大(%)
式(1)	0.63	0.59	15.27	1.3E-04	-5.4	6.8
式(2)	0.82	0.77	17.67	1.0E-05	-6.5	4.8
式(3)	0.69	0.63	12.50	1.5E-04	-7.8	9.6
式(4)	0.79	0.75	20.90	6.1E-06	-4.8	8.3
式(5)	0.78	0.74	20.26	7.5E-06	-11.5	14.8
式(6)	0.90	0.88	49.96	1.2E-08	-6.6	11.6
式(7)	0.59	0.52	8.21	1.3E-03	-6.3	8.4

残差分析では、重回帰式のバラツキを回帰残差/予測の平均値×100で表した。

表 4 重回帰式の各説明変数の標準偏回帰係数

	説明変数	標準偏回帰係数	t値	p値	
式 (1)	X <sub>1</sub>	-0.54	-3.29	4.0E-03	**
	X <sub>2</sub>	+0.38	2.33	3.1E-02	*
式 (2)	X <sub>3</sub>	+0.47	3.47	3.1E-03	**
	X <sub>4</sub>	+0.33	2.50	2.3E-02	*
	X <sub>5</sub>	+0.30	2.22	4.1E-02	*
	X <sub>1</sub>	-0.22	-1.48	1.6E-01	n.s.
式 (3)	X <sub>6</sub>	-0.69	-4.29	4.9E-04	***
	X <sub>2</sub>	+0.52	3.81	1.4E-03	**
	X <sub>7</sub>	+0.33	2.08	5.3E-02	.
式 (4)	X <sub>4</sub>	+0.54	3.66	1.9E-03	**
	X <sub>8</sub>	+0.27	1.72	1.0E-01	n.s.
	X <sub>2</sub>	+0.27	2.07	5.4E-02	.
式 (5)	X <sub>2</sub>	+0.69	4.38	4.1E-04	***
	X <sub>8</sub>	+0.31	2.01	6.1E-02	.
	X <sub>9</sub>	-0.26	-1.81	8.8E-02	.
式 (6)	X <sub>10</sub>	+0.46	5.04	1.0E-04	***
	X <sub>8</sub>	+0.41	4.67	2.2E-04	***
	X <sub>2</sub>	+0.32	3.24	4.9E-03	**
式 (7)	X <sub>1</sub>	+0.67	3.87	1.2E-03	**
	X <sub>11</sub>	-0.58	-2.80	1.2E-02	*
	X <sub>12</sub>	-0.45	-2.16	4.6E-02	*

\*\*\* : p<0.001    \*\* : p<0.01    \* : p<0.05  
 . : p<0.1    n.s. : 非有意

表 4 の標準偏回帰係数の絶対値で示される説明変数 X の重回帰式への影響の大きさは、式 (1) で X<sub>1</sub>>X<sub>2</sub>、式 (2) で X<sub>3</sub>>X<sub>4</sub>>X<sub>5</sub>>X<sub>1</sub> の順であった。吸水性 20 分には X<sub>1</sub> が負の方向に、X<sub>2</sub>、X<sub>3</sub>、X<sub>4</sub> 及び X<sub>5</sub> が正の方向に影響した。

消化性 Brix への説明変数 X の影響の大きさは、表 4 より式 (3) で X<sub>6</sub>>X<sub>2</sub>>X<sub>7</sub>、式 (4) で X<sub>4</sub>>X<sub>8</sub>=X<sub>2</sub> の順であった。消化性 Brix には X<sub>6</sub> が負の方向に、X<sub>2</sub>、X<sub>4</sub>、X<sub>7</sub> 及び X<sub>8</sub> が正の方向に影響した。RVA の Tv (X<sub>6</sub>) が負の方向に影響したことは先行研究<sup>1)</sup>と一致した。Tv とアミロペクチンの短鎖/長鎖比の間に負の相関があり、アミロペクチンの短鎖/長鎖比が大きい(アミロペクチンの側鎖が短い)ほど、澱粉の老化が遅く米が硬くなりにくい<sup>1)</sup>ため消化されやすいためと報告されている<sup>1)</sup>。

式 (1) 及び式 (3) と比較して、砕米率を説明変数に含めた式 (2) 及び式 (4) は補正 R<sup>2</sup> が大きく、バラツキが小さかった。このことから、吸水

性20分及び消化性 Brix の重回帰式には外的損傷の影響を考慮した方が高い予測精度を得られると考えられる。したがって、砕米率及び心白率といった構造要因を説明変数 X に追加することで、さらに高い予測精度が得られることが予想される。

消化性 F-N への影響の大きさは、表 4 より式 (5) で X<sub>2</sub>>X<sub>8</sub>>X<sub>9</sub>、式 (6) で X<sub>10</sub>>X<sub>8</sub>>X<sub>2</sub> の順であった。消化性 F-N には X<sub>2</sub> 及び X<sub>8</sub> が正の方向に、X<sub>9</sub> が負の方向に影響した。また、表 3 に示した重回帰式のバラツキのとおり、式 (5) の消化性 F-N の予測値は平均値に対して 10%以上の差があり、予測精度が低かった。一方、説明変数にタンパク質 (X<sub>10</sub>) を含めた式 (6) ではバラつきが若干改善され、補正 R<sup>2</sup> も大きかった。これは、消化性 F-N がタンパク質の溶けやすさの指標であるためと考えられる。さらに、式 (5) 及び式 (6) に含まれる NIR の 2174nm の 2 次微分ピーク面積値 (X<sub>2</sub>) がタンパク質由来である<sup>5)</sup>ことから、消化性 F-N にタンパク質が深く関わっていることが予想され、予測精度向上のために X<sub>10</sub> (タンパク質) を含めたことが適切であったと示唆される。

蒸米吸水率への影響の大きさは、表 4 より式 (7) で X<sub>1</sub>>X<sub>11</sub>>X<sub>12</sub> の順で、X<sub>1</sub> が正の方向に、X<sub>11</sub> 及び X<sub>12</sub> が負の方向に影響した。NIR の 2106nm の 2 次微分ピーク面積値は、澱粉由来である<sup>5)</sup>ことと、RVA の BD (X<sub>1</sub>) が影響したことから、蒸米吸水率には澱粉の寄与が大きいと考えられる。

### 3.3 パス解析による原料米の吸水性及び消化性見える化

図 4 に原料米の吸水性及び消化性の因果モデルを、表 5 に各因果モデルの適合度指標を示した。パス係数の標準化推定値が正の場合は実線で、負の場合は破線でパスを表示した。迅速分析値のみで因果モデルを作成したモデル No.1 では適合度指標 (表 5) の RMSEA 及び SRMR の値が大きく、基準を満たさなかった。一方、モデル No.1 から吸水性20分を除外したモデル No.2 では、適合度指標の基準を満たした。また、砕米率 (X<sub>4</sub>) を説明変数に含めたモデル No.3 では、適合度指標の基準を

満たし、さらに吸水性20分、消化性 Brix 及び消化性 F-N の全ての関係が見える化された。

モデル No.3において吸水性20分と消化性 Brix の間に正の相関関係（偏相関係数0.63）が認められた。また吸水性20分及び消化性 Brix への碎米率の影響を示した標準化推定値（図4、 $p < 0.001$ の値）はそれぞれ0.39、0.57と大きかった。したがって、3.2で考察したとおり、碎米率（ $X_4$ ）の影響が大きいことがパス解析で図示できた。またタンパク質由来となる NIR の2174nm の2次微分ピーク面積値から消化性 F-N への標準化推定値も0.71（ $p < 0.001$ ）と大きく、消化性 F-N はタンパク質の影響が大きいこともパス解析で図示できた。

#### 4 まとめ

##### (1) 重回帰分析による予測式の作成

尿素崩壊性試験、RVA 及び NIR で得た迅速分析値を説明変数として、従来分析に時間がかかっていた吸水性 20 分、蒸米吸水率、消化性 Brix 及び消化性 F-N を目的変数とした重回帰予測式を作成した。

##### (2) 原料米の吸水性及び消化性に見える化

パス解析によって吸水性 20 分、消化性 Brix 及び消化性 F-N の因果関係が見える化した。吸水性 20 分及び消化性 Brix に碎米率が、消化性 F-N にタンパク質が影響していることが示唆された。

本研究では吸水性及び消化性に対する因果モデルを作成したが、今後は溶解性を潜在変数とした因果モデルを作成して、原料米の溶解性を見る化する。

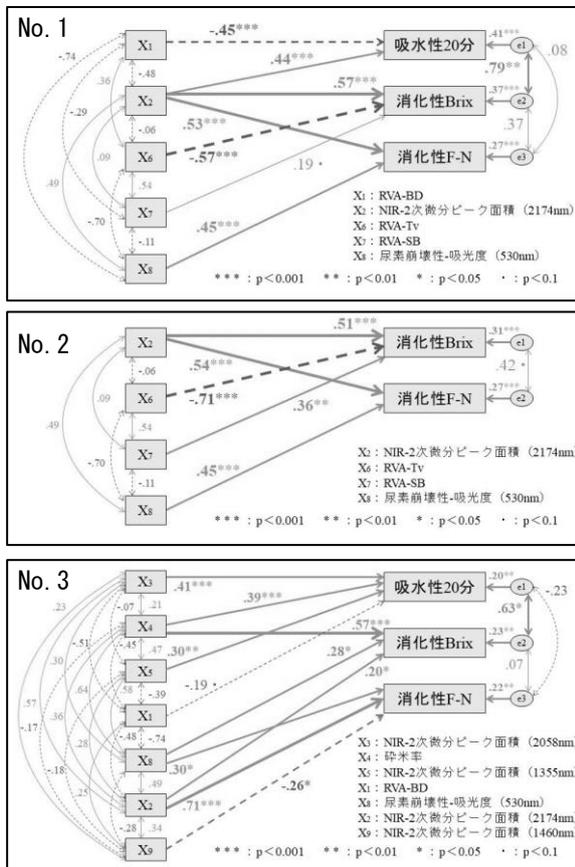


図4 吸水性及び消化性の因果モデル

表5 各因果モデルの適合度指標

因果モデル No.	カイ2乗適合度検定					
	$\chi^2$	自由度	p値	CFI	RMSEA	SRMR
No.1	8.599	8	0.377	0.998	0.060	0.057
No.2	1.017	3	0.797	1.000	0.000	0.013
No.3	10.997	11	0.444	1.000	0.000	0.042

#### 参考文献

- 奥田将生：米のデンプン構造と醸造特性・気象条件との関係，*生物工学会誌*，**90**，5(2012)227
- 酒米研究会編：酒造用原料米全国統一分析法，酒米研究会，(1996)
- 吉村季織，高柳正夫：Microsoft Excel を用いたケモメトリクス計算(5)―平滑化と数値微分―，*Journal of Computer Chemistry, Japan*，**11**，3(2012)149
- 朝野熙彦，鈴木督久，小島隆矢：入門共分散構造分析の実際，講談社，(2005)122
- 夏賀元康：近赤外分光法による穀物の品質測定（第1報）近赤外分光法の基礎特性，*北海道大学農学部邦文紀要*，**19**，2(1994)257