

近赤外分光分析による単味飼料を用いた濃厚飼料の飼料成分推定の検討

江口研太郎・野中和久

農研機構畜産草地研究所 家畜飼養技術研究領域, 那須塩原市, 329-2793

要 約

近赤外分光分析法により濃厚飼料（トウモロコシ穀実, ソルガム穀実, エンバク穀実, コムギ穀実, ハトムギ穀実, ソバ穀実, ごま穀実, ダイズ穀実, 飼料用粳米, 飼料用玄米, 黒もち玄米, 食用精米, 圧ぺんトウモロコシ, 圧ぺん大麦, 大豆粕, ナタネ粕, 小麦ふすま, 大麦ふすま, 米ぬか, ビートパルプ）の飼料成分を推定するユニバーサル検量線の作成を試みた。検量線評価時の決定係数 (R^2_v) 値と検量線作成時の標準偏差と検量線評価時の標準誤差の比 (RPD) 値の結果は, 乾物率 ($R^2_v = 0.86$; RPD = 2.7), 粗タンパク質 (CP) 含量 ($R^2_v = 0.99$; RPD = 9.2), 溶解性タンパク質 (CPs) 含量 ($R^2_v = 0.83$; RPD = 2.4), 非分解性タンパク質 (CPu) 含量 ($R^2_v = 0.88$; RPD = 2.9), 結合性タンパク質 (CPb) 含量 ($R^2_v = 0.78$; RPD = 2.0), 粗脂肪 (EE) 含量 ($R^2_v = 1.00$; RPD = 8.7), 酸性デタージェント繊維 (ADFom) 含量 ($R^2_v = 0.87$; RPD = 2.8), 中性デタージェント繊維 (aNDFom) 含量 ($R^2_v = 0.94$; RPD = 4.1) および澱粉含量 ($R^2_v = 0.96$; RPD = 5.4) であった。これらの結果から, 濃厚飼料は近赤外分光分析装置を用いて, 乾物率, CPu, CPs, ADFom 含量は準実用的な精度で推定できる可能性がある, aNDFom 含量は実用的で高い精度で推定できる可能性がある, 澱粉含量は実用的で非常に高い精度で推定できる可能性がある, CP と EE 含量は化学分析相当で極めて高い精度で推定できる可能性があると判定された。

キーワード：近赤外分光分析法, 濃厚飼料

緒 言

畜産現場で家畜に飼料を給与する場合, その栄養価は正しく求められなければならない。特に, 飼料の種類を変更する場合や, 飼料の生産地が変更された場合には化学分析を実施し正確な飼料成分を算出する必要がある。しかし通常, 飼料成分は時間と手間を要する化学分析により求められるため, 多くの場合, 代替措置として日本標準飼料成分表⁹⁾の数値が利用されている。しかし, その値は実際に用いる飼料と成分値が異なる場合も多く, 場合によってはその差は無視できない程度に達する。近赤外分光分析は迅速かつ安全な非破壊分析法であるため, TMR センターや飼料分析センター等の畜産現場において有効な飼料設計の手法として用いられている。一般的に, 近赤外分光分析で飼料成分を推定する場合, 検量線は単味飼料ごとに作成される。しかし仕入れた濃厚

飼料に応じて検量線を選択するのは効率が悪いと見做され, 1種類の検量線, すなわちユニバーサル検量線であらゆる濃厚飼料の飼料成分を推定できることが望ましい。そこで本試験では, 濃厚飼料としてトウモロコシ穀実, ソルガム穀実, エンバク穀実, コムギ穀実, ハトムギ穀実, ソバ穀実, ごま穀実, ダイズ穀実, 飼料用粳米, 飼料用玄米, 黒もち玄米, 食用精米, 圧ぺんトウモロコシ, 圧ぺん大麦, 大豆粕, ナタネ粕, 小麦ふすま, 大麦ふすま, 米ぬかおよびビートパルプを対象にし, 飼料成分として乾物率, 粗タンパク質 (CP) 含量, タンパク質画分, 粗脂肪 (EE) 含量, 酸性デタージェント繊維 (ADFom) 含量, 中性デタージェント繊維 (aNDFom) 含量および澱粉含量を推定できるユニバーサル検量線を作成し, その推定精度と各飼料種への適合性を検討した。

材料および方法

1. 供試試料

トウモロコシ穀実 10 点, ソルガム穀実 14 点, エンバク穀実 2 点, コムギ穀実 2 点, ハトムギ穀実 2 点, ソバ穀実 3 点, ごま穀実 3 点, ダイズ穀実 7 点, 飼料用粳米 5 点, 飼料用玄米 6 点, 黒もち玄米 2 点, 食用精米 6 点, 圧ペントウモロコシ 4 点, 圧ペン大麦 4 点, 大豆粕 5 点, ナタネ粕 3 点, 小麦ふすま 2 点, 大麦ふすま 2 点, 米ぬか 3 点, ビートパルプ 2 点の合計 87 点を供した。これらの単味飼料を粉碎機 (Wander Blender, 大阪ケミカル社, 大阪) を用いて ϕ 1mm の篩を通過する粒度に粉碎し, 化学分析および近赤外分光分析に供した。ただし, 澱粉の定量には同様の方法で ϕ 0.5mm の粒度に粉碎したサンプルを供した。

2. 飼料分析

乾物率は乾燥機 (DO-450FA, アズワン, 大阪) を用いて常法⁷⁾, すなわち 135°C で 2 時間乾燥することにより定量した。CP 含量はケルテックシステム (Kjeltec 2400/2460 Auto Sampler System, Tecator 社, デンマーク) を用いたケルダール法で定量した。CP のルーメン内での分解性の把握は生産性向上において重要である²⁾。特に高泌乳牛や子牛のように CP 要求量が高い場合は, 分解性タンパク質 (CPd) だけでは要求量を満たすことができないため, CP 要求量との差を非分解性タンパク質 (CPu) で補うことにより牛へのタンパク質供給を最も効率よく行うことが可能となる⁸⁾。これらの事情に応じて粗飼料^{6,15)} やサイレージ⁵⁾ のタンパク質画分に関しては近赤外分光分析法による検量線の作成が報告されている。本試験では, 濃厚飼料を対象にし, タンパク質画分として CPd 含量, CPu 含量, 溶解性タンパク質 (CPs) 含量および結合性タンパク質 (CPb) 含量を常法⁷⁾ に従って定量した。EE 含量はソックスレー抽出法⁷⁾ で, ADFom 含量と aNDFom 含量はデタージェント分析法^{7,11,12)} で定量した。澱粉含量は市販のキット (Total starch assay kit, メガザイム社, アイルランド) を用いて定量した。これらの化学分析値からタンパク質画分以外の成分は乾物中の各成分含有率として求めた。タンパク質画分については CP 中の成分含有率を求め, 近赤外分光分析用の化学分析値データとして用いた。

3. 近赤外スペクトル

近赤外分光分析装置には Model 6500 型 (FOSS NIRSystems 社, USA) を使用し, 本体には Spinning

Sample Module (FOSS NIRSystems 社, USA) を装着した。粉碎試料 (粒度 ϕ 1mm) は標準セルに詰め 400–2500nm の範囲について 2nm おきに吸光度を測定し 32 回反復走査した平均値をその吸光度とした。測定した近赤外スペクトルは VISION ソフトウェア (Ver.3.5, FOSS NIRSystems 社, USA) を用いて二次微分処理 (微分条件: セグメント 20, ギャップ 0) を施し検量線作成に供した。

4. 検量線の作成と評価

検量線作成用にはトウモロコシ穀実 8 点, ソルガム穀実 12 点, エンバク穀実 1 点, コムギ穀実 1 点, ハトムギ穀実 1 点, ソバ穀実 2 点, ごま穀実 2 点, ダイズ穀実 5 点, 飼料用粳米 4 点, 飼料用玄米 5 点, 黒もち玄米 1 点, 食用精米 5 点, 圧ペントウモロコシ 3 点, 圧ペン大麦 3 点, 大豆粕 3 点, ナタネ粕 2 点, 小麦ふすま 1 点, 大麦ふすま 1 点, 米ぬか 2 点, ビートパルプ 1 点, 合計 63 点を供した。検量線評価用にはトウモロコシ穀実 2 点, ソルガム穀実 2 点, エンバク穀実 1 点, コムギ穀実 1 点, ハトムギ穀実 1 点, ソバ穀実 1 点, ごま穀実 1 点, ダイズ穀実 2 点, 飼料用粳米 1 点, 飼料用玄米 1 点, 黒もち玄米 1 点, 食用精米 1 点, 圧ペントウモロコシ 1 点, 圧ペン大麦 1 点, 大豆粕 2 点, ナタネ粕 1 点, 小麦ふすま 1 点, 大麦ふすま 1 点, 米ぬか 1 点, ビートパルプ 1 点, 合計 25 点を供した。二次微分スペクトルの吸光度と化学分析値に基づいて, 重回帰分析 (MLR) 法によりソフトウェアの自動選択で第 4 波長まで使用した複数の検量線, および部分最小二乗 (PLS) 回帰分析法により因子数を 3 ~ 20 とし複数の検量線を作成した。そして, 検量線作成時の決定係数 (R^2_c) と標準誤差 (SEC), 検量線評価時の決定係数 (R^2_v) と標準誤差 (SEP) を求めた。最適な検量線には SEP が最も小さいものを採用した。検量線の推定精度は検量線作成時の標準偏差と検量線評価時の標準誤差の比 (RPD) 値 (検量線評価群の標準偏差 (SD) \div SEP)¹³⁾ で評価した。

結果および考察

供試した濃厚飼料の化学分析値は乾物率 87.4–92.5%, CP 含量 7.3–51.4%, CPu 含量 19.8–78.6%, CPs 含量 6.4–64.0%, CPb 含量 1.4–27.6%, EE 含量 0.6–53.7%, ADFom 含量 0.4–30.4%, aNDFom 含量 5.0–41.4% および澱粉含量 0.5–76.5% であった (表 1)。表 2 には検量線作成用サンプル群と検量線評価用サンプル群の化学分析値を示した。

表 1. 供試した濃厚飼料の飼料成分

試料名	<i>n</i>	DM(%)	CP(%)	CPu(%)	CPs(%)	CPb(%)	EE(%)	ADFom(%)	aNDFom(%)	澱粉(%)
トウモロコシ穀実	10	89.7±0.6	9.4±0.8	66.6±3.0	19.8±2.1	4.7±1.7	4.3±0.4	3.7±0.3	13.1±1.2	65.7±3.2
ソルガム穀実	14	92.1±1.3	13.4±2.7	69.8±5.1	16.9±2.4	17.5±2.9	3.5±0.6	9.3±4.5	20.9±8.5	62.1±10.4
エンバク穀実	2	91.3±0.7	16.6±2.1	49.3±2.8	32.1±2.0	5.9±1.4	6.4±0.4	2.4±0.4	19.2±3.2	57.5±1.4
コムギ穀実	2	92.2±0.2	14.7±0.4	26.8±3.3	32.7±3.4	2.1±0.2	1.8±0.2	3.8±0.8	26.1±3.9	63.2±2.7
ハトムギ穀実	2	90.0±0.1	13.4±0.1	71.4±5.2	14.4±4.6	26.3±1.8	4.8±0.7	30.1±0.5	41.4±1.6	35.8±2.1
ソバ穀実	3	89.8±0.2	14.6±0.7	36.3±2.6	50.9±4.7	9.6±0.9	2.2±0.2	18.5±1.6	21.8±0.7	55.9±4.6
ごま穀実	3	99.3±0.2	24.7±0.7	23.0±2.8	14.1±0.9	3.6±1.4	53.7±3.9	22.7±1.8	32.8±5.6	1.6±0.2
ダイズ穀実	7	93.3±0.4	43.6±2.3	31.0±3.6	54.6±5.1	3.9±1.5	19.2±0.7	13.5±1.1	18.8±2.8	0.5±0.2
飼料用粳米	5	88.2±0.7	7.8±0.5	66.1±1.5	13.6±2.6	11.0±2.3	2.1±0.2	12.4±1.0	20.9±2.8	61.2±1.4
飼料用玄米	6	87.4±1.0	8.6±0.6	61.4±5.6	15.2±5.4	8.9±0.7	2.5±0.4	2.1±0.5	9.8±4.0	73.6±3.0
黒もち玄米	2	88.6±1.3	9.1±0.0	66.9±2.8	17.9±5.9	9.1±1.9	3.3±0.1	2.1±0.2	16.0±2.6	70.2±1.2
食用精米	6	87.2±1.0	7.3±0.4	63.2±2.9	16.6±4.6	6.8±1.1	0.6±0.1	0.6±0.1	5.0±1.4	76.5±3.0
圧ペントウモロコシ	4	89.0±1.3	9.2±0.4	66.0±1.3	10.8±1.9	12.6±3.4	3.9±0.2	4.0±0.5	13.2±2.4	64.8±7.3
圧ペン大麦	4	90.9±1.4	12.5±0.8	35.1±4.6	13.0±2.1	12.6±2.0	2.5±0.3	6.0±2.4	28.5±4.3	54.1±3.9
大豆粕	5	91.1±2.4	51.4±0.4	33.7±3.0	16.5±3.4	2.5±0.5	2.5±0.6	8.0±1.1	13.4±3.0	1.4±0.6
ナタネ粕	3	90.8±2.8	43.5±6.6	31.6±8.9	38.7±24.1	6.3±0.3	6.2±5.8	24.0±3.3	32.0±5.7	0.9±0.9
小麦ふすま	2	93.3±4.9	19.2±1.7	36.3±1.0	32.9±6.4	3.1±0.3	3.6±2.4	15.3±0.1	48.2±0.4	11.2±0.2
大麦ふすま	2	92.0±1.2	17.2±1.4	35.6±4.9	35.6±2.7	5.0±0.7	4.2±0.4	12.0±3.1	38.1±13.0	16.3±2.4
米ぬか	3	90.4±1.0	17.1±0.6	56.4±0.6	37.0±5.3	5.0±0.6	21.8±1.0	16.5±2.5	32.3±2.6	9.6±1.6
ビートパルプ	2	92.5±0.0	8.5±0.8	46.2±0.9	12.5±2.3	10.6±0.7	0.7±0.0	24.1±0.0	48.6±0.7	0.9±0.5

DM：乾物率（原物中），CP：粗タンパク質（乾物中），CPu：非分解性タンパク質（CP中），CPs：溶解性タンパク質（CP中），CPb：結合性タンパク質（CP中），EE：粗脂肪（乾物中），ADFom：酸性デタージェント繊維（乾物中），aNDFom：中性デタージェント繊維（乾物中），澱粉（乾物中）。数値は平均値 ± 標準偏差。

表 2. 検量線作成用および検量線評価用に用いた濃厚飼料の飼料成分

分析項目 ¹	検量線作成用					検量線評価用				
	<i>n</i>	最小値	最大値	平均値	標準偏差	<i>n</i>	最小値	最大値	平均値	標準偏差
DM (% FM)	63	85.6	99.2	90.6	2.7	24	86.9	99.5	91.2	3.0
CP (% DM)	63	7.0	51.6	17.1	13.2	24	6.9	51.8	20.2	15.0
CPu (% CP)	63	24.4	78.6	54.9	16.5	24	19.8	75.0	47.9	17.2
CPs (% CP)	63	6.4	64.0	22.7	13.8	23	6.5	55.9	23.4	13.4
CPb (% CP)	63	1.4	27.6	9.4	5.9	24	2.2	25.0	7.9	5.7
EE (% DM)	63	0.6	56.9	6.7	10.6	24	0.6	49.4	7.1	10.8
ADFom (% DM)	63	0.4	29.8	9.3	7.5	24	0.4	30.4	10.7	8.1
aNDFom (% DM)	63	2.5	48.5	20.0	11.0	24	4.9	49.1	23.1	12.1
澱粉 (% DM)	63	0.2	78.8	48.1	28.8	24	0.0	75.4	37.7	29.8

¹ 表 1 参照。

1. 乾物率

MLR 分析で求めた乾物率の R^2 値, SEP 値および RPD 値は, 0.84, 1.18% および 2.5 であった (表 3)。MLR 分析で選択した第一波長の吸収は 1954nm であり, これは水の結合音 (1930–1940nm) に帰属すると考えられた³⁾。PLS 回帰分析では 400–2500nm の全波長を用いるよりも可視光域を除いた 1100–2500nm の波長域を用いた方が検量線の精度は高くなった。PLS 回帰分析で求

めた乾物率の R^2 値, SEP 値および RPD 値は, 0.86, 1.11% および 2.7 であった (表 4)。PLS 回帰分析で作成した検量線は $2.4 < RPD < 3.0$ であるため, 準実用的な精度で推定できる可能性があると判定された (図 1)。なお, 濃厚飼料の乾物率に関しては既報^{4,14)} においても本試験と同等な精度の検量線が作成されている。

表3. 濃厚飼料の飼料成分の重回帰分析結果

分析項目 ¹	検量線作成用			検量線評価用				RPD ^{8,9}
	選択波長 (nm)	SEC ²	R_c^2 ³	SEP ⁴	R_v^2 ⁵	バイアス ⁶	スロープ ⁷	
DM (% FM)	1954, 2186, 1984, 692	0.55	0.96	1.18	0.84	-0.22	1.06	2.5
CP (% DM)	2194, 1736, 1964, 2376	1.56	0.99	2.10	0.98	0.07	0.95	7.1
CPu (% CP)	1996, 434, 2340, 1892	7.60	0.80	9.92	0.71	-4.10	0.97	1.8
CPs (% CP)	2130, 742, 2364, 968	9.33	0.58	11.08	0.34	0.30	0.72	1.2
CPb (% CP)	1908, 1830, 2372, 1340	3.70	0.63	3.78	0.65	-1.66	0.98	1.5
EE (% DM)	1724, 2302, 1042, 490	1.15	0.99	1.25	0.99	-0.26	1.02	8.6
ADFom (% DM)	1002, 1414, 2210, 2340	2.67	0.88	3.69	0.78	-0.25	1.02	2.2
aNDFom (% DM)	1754, 554, 2340, 2194	3.78	0.89	2.97	0.94	0.65	1.06	4.1
澱粉 (% DM)	1776, 2196, 1156, 1228	4.35	0.98	5.56	0.96	-0.33	0.99	5.4

¹ 表1参照.² 検量線が示した標準誤差.³ 検量線作成時の決定係数.⁴ 検量線評価時における標準誤差.⁵ 検量線評価時の決定係数.⁶ 化学分析値と近赤外分光分析推定値を1次式で表した時の切片.⁷ 化学分析値と近赤外分光分析推定値を1次式で表した時の勾配.⁸ 検量線作成時の標準偏差と検量線評価時の標準誤差の比.⁹ RPD<2.3: 精度は非常に低い. 2.4<RPD<3.0: 準実用的な精度で推定できる可能性あり. 3.1<RPD<4.9: 実用的で高い精度で推定できる可能性あり. 5.0<RPD<6.4: 実用的で非常に高い精度で推定できる可能性あり. 6.5<RPD<8.0: 実用的で極めて高い精度で推定できる可能性あり. 8.1<RPD: 化学分析相当で極めて高い精度で推定できる可能あり.

表4. 濃厚飼料の飼料成分の PLS 回帰分析結果

分析項目 ¹	検量線作成用			検量線評価用				RPD ^{8,9}
	因子	SEC ²	R_c^2 ³	SEP ⁴	R_v^2 ⁵	バイアス ⁶	スロープ ⁷	
DM (% FM)	10	0.54	0.97	1.11	0.86	-0.28	1.04	2.7
CP (% DM)	11	0.70	1.00	1.63	0.99	-0.56	0.95	9.2
CPu (% CP)	15	5.33	0.92	5.89	0.88	0.71	0.95	2.9
CPs (% CP)	15	3.13	0.96	5.69	0.83	0.68	1.05	2.4
CPb (% CP)	15	2.10	0.90	2.79	0.78	-0.58	0.88	2.0
EE (% DM)	8	0.56	1.00	1.23	1.00	-0.03	1.00	8.7
ADFom (% DM)	9	2.19	0.93	2.89	0.87	0.11	1.00	2.8
aNDFom (% DM)	10	2.94	0.94	4.46	0.87	1.07	0.93	2.7
澱粉 (% DM)	10	3.64	0.99	7.14	0.94	-0.85	0.96	4.2

¹⁻⁹ 表1および表3参照.

2. 粗タンパク質

本試験では、MLR分析で求めたCP含量の R_v^2 値、SEP値およびRPD値は、0.98、2.10%および7.1であった(表3)。MLR分析で選択した第一波長の吸収は2194nmであり、これはCP由来の第1級アミド(-CONH₂)結合音(2140-2170nm)³⁾に帰属すると考えられた。一方、PLS回帰分析で求めたCP含量の R_v^2 値、SEP値およびRPD値は、0.99、1.63%および9.2であった(表4)。PLS回帰分析で作成した検量線は8.1<RPDであるため、化学分析相当で極めて高い精度で推定できる可能性があると判定された(図1)。

3. タンパク質画分

(1) 溶解性タンパク質 (CPs)

ダイズ穀実1点が検量線から大きく外れるため除いて試験した。MLR分析で求めたCPs含量の R_v^2 値、SEP値およびRPD値は、0.34、11.08%および1.2であった(表3)。粗飼料のCPsのMLR分析では、第一波長としてイネWCSでは2190nmが選択されており⁶⁾、これはCP由来の-CO-NH₂結合音(2140-2170nm)³⁾に帰属していると考えられた。同様に、イネ科牧草サイレージでは-CO-NH₂第1倍音(1600-1620nm)³⁾に帰属する1622nmが¹⁵⁾、イネ科牧草乾草ではメチレン(-CH₂)結

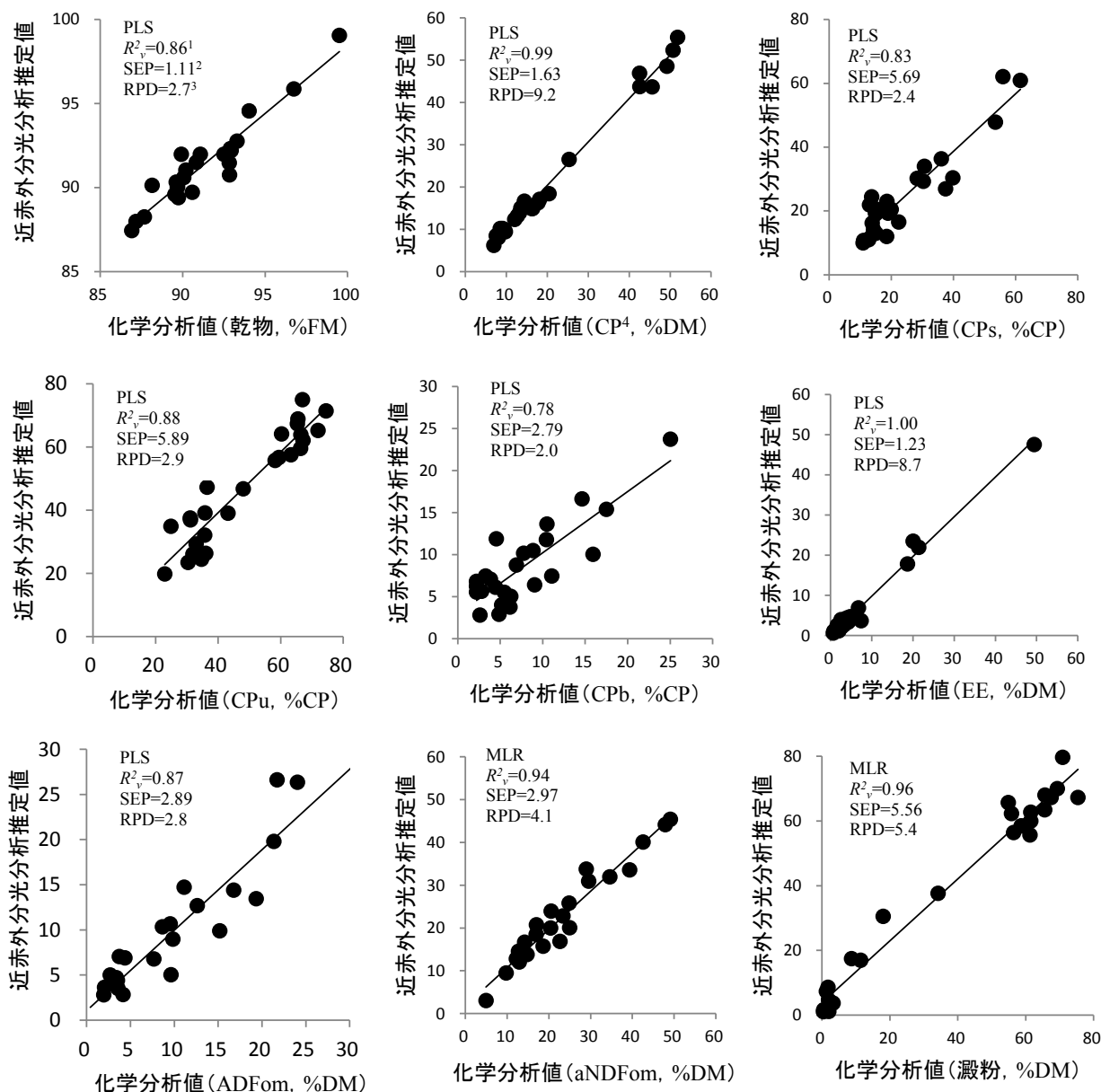


図1. 濃厚飼料の近赤外分光分析推定値と化学分析値との相関図

¹⁻⁴ 表1および表3参照

合音 (2320–2330nm)³⁾ に帰属する 2332nm が¹⁵⁾, トウモロコシサイレージではメチル (-CH₃) 第1倍音 (1770–1785nm)³⁾ に帰属する 1796nm が¹⁵⁾, また, アルファルファでは -CH₂ 第2倍音 (1200–1210nm)³⁾ に帰属する 1262nm が¹⁵⁾, それぞれ選択されている。本試験では 2130nm が第一波長に選択されたが, これはイネ WCS の場合と同様に CP 由来の -CONH₂ 結合音 (2140–2170nm)³⁾ に帰属していると考えられた。PLS 回帰分析では, 二次微分の前に標準正規確率変量 (SNV) 処理をすることで検量線の精度はより高まった。PLS 回帰分析

で求めた CPs 含量の R^2_v 値, SEP 値および RPD 値は, 0.83, 5.69% および 2.4 であった (表3)。PLS 回帰分析で作成した検量線は $2.4 < RPD < 3.0$ であるため, 準実用的な精度で推定できる可能性があるかと判定された (図1)。

(2) 非分解性タンパク質 (CPu)

MLR 分析で求めた CPu 含量の R^2_v 値, SEP 値および RPD 値は, 0.71, 9.92% および 1.8 であった (表3)。粗飼料の CPu の MLR 分析において, 第一波長としてイネ科牧草サイレージでは 2170nm, イネ科牧草乾草では 2162nm が選択されており¹⁵⁾, これらは CP 由来

の $-\text{CONH}_2$ 結合音 (2140–2170nm)³⁾ に帰属していると考えられた。同様に、トウモロコシサイレージでは $-\text{CH}_3$ 第1倍音 (1710–1730nm)³⁾ に帰属する 1740nm が選択された。本試験では 1996nm が第一波長に選択され、これは CP 由来の第2級アミド ($-\text{CONH}-$) 結合音 (1990–2010nm)³⁾ に帰属していると考えられた。PLS 回帰分析では全波長を用いるよりも可視光域を除いた 1100–2500nm の波長域を用いた方が検量線の精度は高くなった。PLS 回帰分析で求めた CPu 含量の R^2_p 値, SEP 値および RPD 値は, 0.88, 5.89% および 2.9 であった (表4)。PLS 回帰分析で作成した検量線は $2.4 < \text{RPD} < 3.0$ であるため, 準実用的な精度で推定できる可能性があると判定された (図1)。

(3) 結合性タンパク質 (CPb)

MLR 分析で求めた CPb 含量の R^2_p 値, SEP 値および RPD 値は, 0.65, 3.78% および 1.5 であった (表3)。粗飼料の CPb の MLR 分析において, 第一波長としてイネ WCS では 1982nm が選択されており⁶⁾, これは CP 由来の第1級アミン ($-\text{NH}_2$) 結合音 (1970–2010nm)³⁾ に帰属していると考えられた。同様に, イネ科牧草サイレージでは $-\text{CONH}_2$ 結合音 (2140–2170nm)³⁾ に帰属する 2118nm が¹⁵⁾, トウモロコシサイレージでは $-\text{CONH}_2$ 第1倍音 (1510–1530nm)³⁾ に帰属する 1516nm が¹⁵⁾, イネ科牧草乾草とアルファルファではそれぞれ $-\text{CH}_2$ 第2倍音 (1200–1210nm)³⁾ に帰属する 1218nm, 1236nm が選択されている¹⁵⁾。本試験では 1908nm が第一波長に選択され, これは CP 由来の $-\text{CONH}-$ 第2倍音 (1910–1930nm)³⁾ に帰属していると考えられた。PLS 回帰分析は全波長を用いるよりも可視光域を除いた 1100–2500nm の波長域を用いた方が検量線の精度は高くなった。PLS 回帰分析で求めた CPb 含量の R^2_p 値, SEP 値および RPD 値は, 0.78, 2.79% および 2.0 であった (表4)。RPD < 2.3 であるため CPb 含量は実用的な分析精度で推定することは困難であると判定された (図1)。

4. 粗脂肪

MLR 分析で求めた EE 含量の R^2_p 値, SEP 値および RPD 値は, 0.99, 1.25% および 8.6 であった (表3)。MLR 分析では第一波長に 1724nm を選択しており, これは EE 由来の $-\text{CH}_2$ の第1倍音 (1735–1750nm)³⁾ に帰属すると考えられた。一方, PLS 回帰分析で求めた EE 含量の R^2_p 値, SEP 値および RPD 値は, 1.00, 1.23% および 8.7 であった (表4)。MLR 分析および PLS 回帰分析で作成した検量線はともに $8.1 < \text{RPD}$ であるため, 化学分析相当で極めて高い精度で推定できる可能性があ

ると判定された (図1)。

5. ADFom

MLR 分析で求めた ADFom 含量の R^2_p 値, SEP 値および RPD 値は, 0.78, 3.69% および 2.2 であった (表3)。甘利ら¹⁾ は牧草を用いた ADF の MLR 分析では第一波長に 2281nm を選択しており, セルロースの吸収に由来することを明らかにした。本試験では 1004nm が第一波長に選択され, これは既報¹⁾ と同様にセルロースの吸収を由来としており, $-\text{CH}_3$ の結合音 (1010–1020nm)³⁾ に帰属していると考えられた。一方, PLS 回帰分析で求めた ADFom 含量の R^2_p 値, SEP 値および RPD 値は, 0.87, 2.89% および 2.8 であった (表4)。PLS 回帰分析で作成した検量線は $2.4 < \text{RPD} < 3.0$ であるため, 準実用的な精度で推定できる可能性があると判定された (図1)。

6. aNDFom

MLR 分析で求めた aNDFom 含量の R^2_p 値, SEP 値および RPD 値は, 0.96, 2.97% および 4.1 であった (表3)。MLR 分析では第一波長に 1754nm を選択しており, これはセルロース由来のメチン ($-\text{CH}$) の第1倍音 (1755–1775nm)³⁾ に帰属すると考えられた。一方, PLS 回帰分析で求めた aNDF 含量の R^2_p 値, SEP 値および RPD 値は, 0.87, 4.46% および 2.7 であった (表4)。MLR 分析で作成した検量線は $3.1 < \text{RPD} < 4.9$ であるため, 実用的で高い精度で推定できる可能性があると判定された (図1)。

7. 澱粉

MLR 分析で求めた澱粉含量の R^2_p 値, SEP 値および RPD 値は, 0.96, 5.56% および 5.4 であった (表3)。MLR 分析では第一波長に 1776nm を選択しており, これは澱粉由来の $-\text{CH}$ の第1倍音 (1755–1775nm)³⁾ に帰属すると考えられた。一方, PLS 回帰分析で求めた澱粉含量の R^2_p 値, SEP 値および RPD 値は, 0.94, 7.14% および 4.2 であった (表4)。MLR 分析で作成した検量線は $5.0 < \text{RPD} < 6.4$ であるため, 実用的で非常に高い精度で推定できる可能性があると判定された (図1)。

8. 今後の課題

本試験ではいずれの飼料成分においても成分レンジが広がったので R^2_p 値と RPD 値は高い値を示したが, 各飼料種の SEP 値は日本標準飼料成分表⁹⁾ で示されている SD 値と比較して高いため, 必ずしも作成した検量線が高い精度を持つとはいえない。今後, 複数の試料数を

用いて本検量線の各飼料種への適合性を検討する必要がある。具体的にはプレディクションの残差（化学分析値と近赤外分光分析推定値との差）に極端なズレが生じてないか、また、各飼料種の SEP 値を日本標準飼料成分表⁹⁾に記載されている SD 値と比較し、極端なズレが生じてないか確認することにより、本試験で作成したユニバーサル検量線が有効なものであるか判断する必要がある。ユニバーサル検量線に関しては残差による補正が、めんつゆで行われている¹⁰⁾。このことは濃厚飼料についても当てはまる可能性がある。本試験で飼料成分別に残差を算出したところ、その値が大きい飼料種も見られた。今後、飼料種の個数を十分な量集め、残差平均を求め、それを飼料種固有の値とみなし補正することで、分析精度はより高められる可能性がある。また、CPb 含量の高い濃厚飼料を集めて成分レンジを広げ、CPb 含量を実用的な分析精度で推定できる検量線を作成することも必要である。

謝 辞

本試験を実施するにあたり、材料を提供していただいた畜産草地研究所の伊吹俊彦上席研究員、永西修上席研究員、樋口幹人主任研究員、玉置宏之主任研究員、松山裕城主任研究員、宮地慎主任研究員、松尾守展主任研究員、北海道農業研究センターの青木康浩主任研究員、九州沖縄農業研究センターの高井智之主任研究員、神谷充主任研究員、原貴洋主任研究員、大木信彦研究員に深くお礼申し上げます。

引用文献

- 1) 甘利雅弘・阿部亮・河野澄夫・趙来光 (1991). 近赤外スペクトルにおける粗飼料中の繊維性成分の吸収特性, 畜試研報, 51, 11-27.
- 2) 阿部亮 (2010). 牧草・飼料作物の栄養学 (1), 畜産の研究, 64, 787-791.
- 3) 尾崎幸洋・河田聡 (2008). 近赤外分光法 (日本分光学会編), 学会出版センター, 東京, 216-219.
- 4) 原田英雄・山本るみ子・大竹良知 (1998). 近赤外分光法 (NIRS) による濃厚飼料中の化学成分の測定及びそこにおけるスペクトル前処理の効果, 愛知県農総試研報, 251-256.
- 5) Hoffman, P.C., Brehm, N.M., Bauman, J.B. and

- Undersander, D.J. (1999). Prediction of laboratory and in situ protein fractions in legume and grass silages using near-infrared reflectance spectroscopy, *J. Dairy Sci.*, 82, 764-770.
- 6) 平川達也・棟加登きみ子 (2008). 近赤外分析計を用いた飼料イネの飼料成分迅速推定法, 福岡農総試研報, 27, 81-85.
- 7) 自給飼料品質評価研究会編 (2009). 三訂版 粗飼料の品質評価ガイドブック, 日本草地畜産種子協会, 東京, 196p.
- 8) 増子孝義・花田正明・中辻浩喜 (2010). 乳牛栄養学の基礎と応用, デーリー・ジャパン社, 東京, 57-62.
- 9) 農業・食品産業技術総合研究機構編 (2009). 日本標準飼料成分表, 2009 年版. 中央畜産会, 東京, 287p.
- 10) 篠部恭三・小早川知子・西山健治 (1995). 近赤外分光法のめんつゆ類品質管理への応用 (第 1 報) 単一検量線による全窒素, 食塩, アルコールの測定, 醬研 21, 1-6.
- 11) Van Soest, P.J. (1963). Use of detergents in the analysis of fibrous feeds, II, A rapid method for determination of fiber and lignin, *J. Assoc. Off. Agric. Chem.*, 46, 829-835.
- 12) Van Soest, P.J. and Wine, R.H. (1967). Use of detergents in the analysis of fibrous feeds, IV, Determination of plant cell wall constituents, *J. Assoc. Off. Agric. Chem.*, 50, 50-55.
- 13) Williams, P.C. (2001). Implementation of near-infrared technology, In: *Near-Infrared Technology in the Agricultural and Food Industries*, 2nd Edition (Eds Williams P.C. and Norris K.H.), American Association of Cereal Chemist Press, St. Paul, Minnesota, 145-169.
- 14) Xiccato, G., Trocino, A., De Boever, J.L., Maertens, L., Carabano, R., Pascual, J.J., Perez, J.M., Gidenne, T. and Falcao-E-Cunha, L. (2003). Prediction of chemical composition, nutritive value and ingredient composition of European compound feeds for rabbits by near infrared reflectance spectroscopy (NIRS), *Anim. Feed Sci.*, 104, 153-168.
- 15) 山本美加・土屋いづみ・元藤映了 (2000). 近赤外分析法によるタンパク質分画の検量線の作成, 石川畜総合研報, 34, 32-35.

The Feasibility of Near Infrared Reflectance Spectroscopy for the Analysis of Feed Composition of Concentrated Feed Used Feed Ingredients

Kentaro EGUCHI and Kazuhisa NONAKA

Animal Feeding and Management Research Division,
NARO Institute of Livestock and Grassland Science, Nasushiobara, 329-2793 Japan

Summary

In this study, we established the universal calibration equation for determining the feed composition of concentrated feed (corn grain, sorghum grain, oats grain, wheat grain, Job's tear grain, buckwheat grain, sesame grain, soy bean grain, unhulled rice, hulled rice, black waxy hulled rice, polished rice, corn crush, barley crush, soybean meal, rapeseed meal, wheat bran, barley bran, rice bran, beet pulp). The results showed that near-infrared reflectance (NIR) analysis enabled the rough prediction of the concentrations of dry matter (DM), crude protein degradable (CPd), crude protein undegradable (CPu), crude protein soluble (CPs), crude protein bound (CPb), crude protein (CP), ether extracts (EE), ADFom, aNDFom and starch, with computation of the validation correlation (R^2_v) and standard deviation/square error of prediction values (RPD). These values were determined to be as follows: DM, 0.86 and 2.7; CPu, 0.88 and 2.9; CPs, 0.83 and 2.4; CPb, 0.78 and 2.0; CP, 0.99 and 9.2; EE, 1.00 and 8.7; ADFom, 2.89 and 0.87; aNDFom, 0.94 and 4.1; starch, 0.96 and 5.4. These results in this study indicated that DM, CP, CPu, CPs, EE, ADFom, aNDFom and starch content in concentrated feed might be predicted by using near-infrared spectroscopy.

Key words: near-infrared spectroscopy, concentrated feed