

低タンパク質飼料と消化性を高める資材を活用した

環境負荷低減型養豚技術の開発 (第1報)

武田 真城・飯塚悟・新居 雅宏

要 約

地球温暖化対策は喫緊の課題であり、農業分野では一酸化二窒素 (N_2O) の発生量を削減する必要がある。養豚業では、排泄物に含まれる窒素から堆肥化の過程で N_2O が発生するが、低タンパク質飼料 (低 CP 飼料) を給与することで N_2O の発生量を削減できる。低 CP 飼料は発育成績の低下が懸念されるが、不足するアミノ酸を添加することで、発育成績を低下させずに N_2O の発生量を削減できる。しかし、窒素排泄量を削減する手法は本技術しか開発されておらず、アミノ酸製剤価格の高騰時でも、農家が窒素排泄量の削減に取り組めるように他の技術を開発することが必要である。本研究では、酵素を低 CP 飼料に添加することで、アミノ酸製剤を添加せずとも発育成績の低下を防ぐ技術の開発を試みた。WL 交雑種を 3 個体ずつ対照区及び低 CP 区、低 CP+酵素 (プロテアーゼ) 区に分けて 6 週間飼養した結果、低 CP 区の平均体重は対照区よりも低かった一方で、低 CP+酵素区は対照区と同程度であった。しかし、低 CP+酵素区では飼料要求率が対照区より高く、飼料給与量の増加が懸念された。低 CP 化が増体へ及ぼす負の影響はプロテアーゼを添加することで緩和できるが、本技術の普及を図るには飼料要求率を改善する必要がある。

目 的

人為的活動で排出される温室効果ガスによる地球温暖化は急速に進行し、2011-2020 年の世界平均気温は 1850-1900 年の平均気温から 1.09 °C 上昇した¹⁾。これに伴い激甚化した豪雨や猛暑災害が大きな被害を生み出しており、地球温暖化対策は全人類にとって喫緊の課題となっている¹⁾。

2021 年度に日本が排出した温室効果ガスの総量は 11 億 7,000 万 t であり、農業分野から約 3200 万 t が排出された²⁾。中でも一酸化二窒素 (N_2O) は、二酸化炭素の 298 倍の温室効果を持つことから、優先的に対策を行う必要がある。日本では農業分野からの N_2O 排出量が多く、家畜排泄物管理に伴う排出量は総排出量の約 20% に相当する²⁾。

養豚業では、堆肥化の過程で排泄物に含まれる窒素から N_2O が発生するため、窒素排泄量を削減

することが重要である。窒素排泄量を削減するには、飼料中のタンパク質含量を削減した飼料 (低 CP 飼料) の有効性が示されている³⁾。また、一般的に飼料はタンパク質含有量が高いほど高価となるため、低 CP 飼料は飼料価格の高騰対策としても期待できる。しかしながら、低 CP 飼料は飼料から摂取できる必須アミノ酸量が低下するため、発育成績が著しく低下する⁴⁾⁵⁾⁶⁾⁷⁾。

これに対し、Osada *et al.* (2011) は低 CP 飼料 (CP 含量 14.5%) に不足するアミノ酸を添加することで、慣行飼料 (CP 含量 17.1%) を給与した群と同等の発育成績で糞尿中の窒素排泄量を 29% 削減できることを示した。Osada *et al.* (2011) を基に、CP 含量を 1% 削減し、アミノ酸製剤を添加することで、発育成績を保ったまま窒素排泄量を削減する技術が開発され、J-クレジット制度に登録された⁹⁾。

一方で、低 CP 飼料を用いて窒素排泄量を削減する手法は上記の報告のみとなっている。よって、技術が普及した際には、アミノ酸製剤の需要増加により、価格が高騰する可能性がある。アミノ酸製剤の価格が高騰した際にも、農家が安定して温室効果ガスの削減に取り組むためには、アミノ酸製剤を用いずに、低 CP 飼料が発育成績へ及ぼす負の影響を緩和する技術を開発する必要がある。

アミノ酸製剤の添加以外に発育成績を改善する方法として酵素または抗菌性物質等の添加が考えられる。飼料へ酵素を添加することで、消化率が向上し、発育成績が改善されることが複数の研究により示されている^{10) 11)}。豚が消化・吸収できずに排泄している栄養素が、酵素の添加によって利用されるようになれば、アミノ酸製剤を用いずに低 CP 飼料による発育成績への負の影響を緩和できる可能性がある。

本研究では低 CP 飼料が育成期の子豚に与える影響の大きさを調査するとともに、低 CP 飼料への酵素添加が発育成績に及ぼす影響を検証した。これにより、新たな環境負荷低減型養豚技術を開発するためのフレームワークの構築を目指した。

材料および方法

1) 供試豚及び飼育条件

同一の母豚から得た WL 交雑種 9 個体を供試豚とし、各試験区 3 個体ずつ（去勢雄 1 個体、雌 2 個体）の群飼とした。供試豚は 8 週齢時まで同一の豚房にて当研究課の慣行法で飼養し、試験用の隔離豚舎に移動させた後、試験を開始した。なお、試験開始前の供試豚の平均体重は 22.6 ± 1.7 kg であり、試験区間で平均体重に有意差がないよう区分けした。試験期間は令和 6 年 1 月 12 日から 2 月 23 日までの 42 日間とし、試験期間中は不断給餌及び自由飲水とした。

2) 給与飼料

給与した飼料の配合割合及び成分組成を表 1 に、各育成段階における栄養素の充足率を表 2 に示す。対照区の飼料は、育成期における CP 要求量を満たすように設計し、低 CP 区の飼料は対照区の飼料から CP 含有率が 4%低くなるように設計した。また、低 CP+酵素区では、低 CP 区の飼料にプロテアーゼ（2,100,000 IU、パワーセル C（牛）、株式会社インセクトバイオテック）を 0.1%混合したものを給与した。なお、CP 充足率は日本飼養標準・豚（2013 年版）より算出した。

3) 調査項目

(1) 発育成績

各試験区の平均体重及び 1 日平均増体重 (ADG)、飼料要求率を発育成績として測定した。試験開始前日及び試験開始後 1 週間ごとに体重測定を行い、平均体重及び ADG を算出した。飼料要求率は試験区ごとに試験期間中の増体重の合計値を算出し、各試験区の総飼料摂取量を増体重の合計値で除して求めた。

(2) 肉質成績

全ての供試豚を試験終了後に同一の豚房へと移動させ、肥育期の栄養素の要求率を満たす当研究課の慣行飼料を給与して出荷体重（110 kg）まで飼育した。出荷体重を満たした個体から出荷し、背脂肪厚及びロース芯面積、格付を調査した。

4) 統計解析

平均体重及び ADG、背脂肪厚、ロース芯面積は統計ソフト R¹²⁾を用いて Tukey-Kramer 検定により試験区間で有意性の検定を行った。

表 1. 飼料の配合割合および成分組成

	対照飼料	低CP飼料
配合割合 (%)		
トウモロコシ	54.518	60.055
グレインソルガム	18.000	18.000
(殻付き圧ベン) 大麦	3.800	2.000
大豆粕	14.800	6.000
ナタネ粕	1.000	8.300
ふすま	1.000	2.000
コーングルテンミール (CP60)	0.500	0.200
魚粉 (CP65)	4.700	0.400
植物性油脂	0.000	0.550
食塩	0.200	0.250
第二リンカル	0.300	0.950
炭酸カルシウム	0.800	0.830
塩酸L-リジン	0.090	0.090
DL-メチオニン	0.120	0.120
L-トレオニン	0.030	0.030
ビタミンK3-5%製剤	0.002	0.002
エーフィードE-SB (V.A&D3&E)	0.010	0.013
牛・豚用ビタミンB群プレミックス	0.040	0.120
牛・豚用ミネラル群プレミックス	0.090	0.090
成分組成 (%)		
TDN	76.9	76.7
CP	17	13
リジン	0.87	0.59
メチオニン+シスチン	0.62	0.53
トレオニン	0.57	0.42
トリプトファン	0.16	0.11

表 2. 栄養素の充足率 (%)

	育成期		肥育期	
	対照飼料	低CP飼料	対照飼料	低CP飼料
TDN	100	100	103	102
CP	100	76	110	84
リジン	100	68	121	82
メチオニン+シスチン	100	85	119	102
トレオニン	102	75	121	89
トリプトファン	100	69	114	79

結果および考察

1) 発育成績

試験終了時の平均体重及び総飼料摂取量、飼料要求率を表 3 に、試験開始前日及び試験期間中の平均体重、ADG の平均値の推移を図 1 に示す。平均体重は、対照区と低 CP+酵素区が同程度の値で

推移した一方で、低 CP 区は他の試験区よりも低い値だった。しかしながら、いずれの週齢でも、試験区間で平均体重に有意差は認められなかった。平均体重について、試験区間で有意差がなかったことは、供試豚が各区 3 個体と少なかったことに起因する可能性が高いため、今後は供試豚の個体数を増やした試験が必要である。しかしながら、本研究で示された平均体重の差から、飼料の低 CP 化により増体量が低下した可能性が高いと考えられる。また、プロテアーゼを添加することで、低下した増体量を補える可能性がある。

総飼料摂取量は対照区と低 CP 区が同程度であり、低 CP+酵素区は他の 2 区より 30-40 kg 多かった。Cole *et al.* (1968) は、飼料のエネルギー含量の低下に伴い飼料摂取量が増加することを報告した。しかしながら、本研究で用いた飼料の DE は対照飼料が 3.40 Mcal/kg、低 CP 飼料が 3.39 Mcal/kg であり、大きな差はない。また、低 CP 区は対照区と同程度の総飼料摂取量であるため、低 CP+酵素区で総飼料摂取量が増加した原因が低 CP 飼料である可能性は低い。Yejin *et al.* (2019) は、プロテアーゼを添加すると、添加しなかった場合より平均日飼料摂取量及び ADG が増加し、飼料要求率が改善されたと報告している。このことから、総飼料摂取量の増加はプロテアーゼの影響であることが示唆された。また、本研究でも、飼料の栄養条件が同じである低 CP 区と低 CP+酵素区を比較した場合には、低 CP+酵素区で総飼料摂取量が多かった一方で増体量も大きかったことで、飼料要求率はわずかながら改善された。しかし、対照区と同程度にまでは改善されなかった。飼料要求率から、1 kg の増体に要する CP 量を算出すると、対照区が 401 g、低 CP 区が 362 g、低 CP+酵素区が 351 g となった。また、1 kg の増体に要する飼料費は対照区が 1,156 円、低 CP 区が 1,343 円、低 CP+酵素区が 1,312 円

であった。よって、低 CP 飼料にプロテアーゼを添加する手法は、窒素摂取量を削減する手法としては有効だが、飼料要求率及び飼料コストが増加するため普及性に懸念が残った。

表 3. 試験終了時の発育成績

	平均体重 (kg)	総飼料摂取量(kg)	飼料要求率
対照区	55.0	230.8	2.36
低CP区	49.2	222.4	2.79
低CP+酵素区	55.6	265.2	2.70

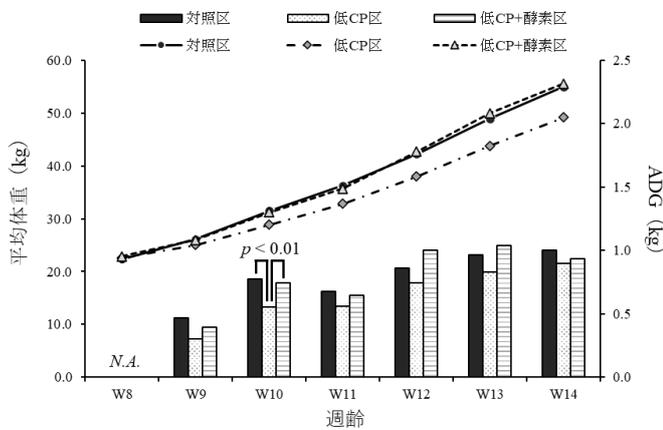


図 1. 平均体重および ADG の推移

*折れ線は平均体重，縦棒は ADG を示す。

2) 肉質成績

各試験区の肉質成績を表 4 に示す。背脂肪厚及びロース芯面積は試験区間で有意差がなかった。背脂肪厚は低 CP+酵素区，低 CP 区，対照区の順に厚かった一方で，ロース芯面積は対照区と低 CP 区は同程度であり，低 CP+酵素区が最も大きかったが差はわずかだった。また，格付は対照区が低 CP

区及び低 CP+酵素区より高く，低 CP 区と低 CP+酵素区は同じだった。

飼料を低 CP 化した場合には，体内でタンパク質の分解に要するエネルギーが少なくなるため，余剰エネルギーが脂肪として蓄積されるとともに，脂肪酸合成能が上昇することで体脂肪量が増加する³⁾。また，低リジン飼料を給与した場合には，ロース芯面積が小さくなることが報告されているが¹⁵⁾，本研究では試験区間にほぼ差はなかった。一方，背脂肪厚については，対照区に比べて低 CP 区が厚い傾向がみられた。背脂肪厚が厚くなりすぎると，格付が低下する原因となるため，飼料中のタンパク質の利用度をさらに高める手法を探索する必要がある。

本研究では，飼料を 4%低 CP 化することで増体量が低下すること及び，増体への負の影響はプロテアーゼの添加により緩和できることが示された。一方で，プロテアーゼを添加した場合には飼料要求率及び飼料コストが増加することに加え，低 CP 飼料の影響で背脂肪厚が厚くなる可能性があるため，普及性について課題が残った。今後は，プロテアーゼと併用することで飼料要求率をより改善できる添加剤を探索し，低 CP 飼料でも標準的な CP 含有量の飼料を用いた場合以下の飼料コストで養豚生産を行える技術の開発を目指す。

表 4. 肉質成績

	出荷時体重 (kg)	背脂肪厚 (cm)	ロース芯面積 (cm ²)	格付 (個体数)
対照区	113.3 ± 6.2	2.3 ± 0.6	21.6 ± 2.0	上 (1)、中 (2)
低CP区	113.9 ± 3.7	2.7 ± 0.2	21.5 ± 2.4	中 (1)、並 (2)
低CP+酵素区	121.5 ± 4.2	3.0 ± 0.4	22.1 ± 1.8	中 (1)、並 (2)

文 献

- 1) IPCC, 2021: Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Masson-Delmotte, V., P. Zhai, A. Pirani, S.L. Connors, C. Pean, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Golgfarb, M.I. Gomis, M. Huang, K. Leitzell, E. Lonnoy, J.B.R. Matthews, T.K. Maycock, T. Waterfield, O. Yelekci, R. Yu and B. Zhou (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 2391 pp. Doi: 10.1017/9781009157896.
- 2) 国立環境研究所地球システム領域地球環境研究センター温室効果ガスインベントリオフィス (GIO) 編, 環境省地球環境局総務課脱炭素社会移行推進室 監修. (2023). 日本国温室効果ガスインベントリ報告書 2023 年. 国立研究開発法人 国立環境研究所.
- 3) 古谷 修・渡部正樹・阿部博行・清水俊郎・大門博之・佐藤圭子・今田哲雄・佐藤金一 (1997). アミノ酸添加低蛋白質飼料の給与による肉豚における窒素排泄量の低減. 日豚会誌, 34(1): 15 – 21.
- 4) 斎藤守. (2001). ニワトリおよびブタからの環境負荷物質の低減化に関する栄養飼料学的研究の動向. Anim. Sci. J. 72 (8) : 177 – 199.
- 5) Ogino A., T. Osada, R. Takada, T. Takagi, S. Tsujimoto, T. Tonoue, D. Matsui, M. Katsumata, T. Yamashita and Y. Tanaka (2013). Life cycle assessment of Japanese pig farming using low-protein diet supplemented with amino acids. *Soil. Sci. Plant Nutr.* 59: 107 – 118.
- 6) He L., L. Wu, Z. Xu, T. Li, K. Yao, Z. Cui, Y. Yin and G. Wu (2015). Low-protein diets affect ileal amino acid digestibility and gene expression of digestive enzymes in growing and finishing pigs. *Amino Acid* DOI: 10.1007/s00726-015-2059-1
- 7) Park S., J. J. Lee, B. M. Yang, J. H. Cho, S. Kim, J. Kang, S. Oh, D. Park, R. Perez-Maldonado, J. Cho, I. Park, H. B. Kim and M. Song (2020). Dietary protease improves growth performance, nutrient digestibility, and intestinal morphology of weaned pigs. *J. Anim. Sci. Technol.* 62 (1): 21 – 30.
- 8) Osada T., R. Takada and I. Shinzato (2011). Potential reduction of greenhouse gas emission from swine manure by using a low-protein diet supplemented with synthetic amino acids. *Anim. Feed Sci. Technol.* 166 -167: 562 – 574.
- 9) 農林水産省. (2024). 「みどりの食料システム戦略」技術カタログ ~現在普及可能な新技術~ (ver.4.0). pp122.
- 10) Zuo J., B. Ling, L. Long, T. Li, L. Lahaye, C. Yang and D. Feng (2015). Effect of dietary supplementation with protease on growth performance, nutrient digestibility, intestinal morphology, digestive enzymes and gene expression of weaned piglets. *Anim. Nutri.* 1: 276 – 282.
- 11) Choe, J., K. S. Kim, H. B. Kim, S. Park, J. Kim, S. Kim, B. Kim, S. H. Cho, J. Y. Cho, I. H. Park, J. H. Cho and M. Song (2017). Effects of protease on growth performance and carcass characteristics of growing-finishing pigs. *SA. J. of Anim. Sci.* 47 (5): 697 – 703.
- 12) R Core Team (2020). R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. URL: <https://www.R-project.org/>.
- 12) Cole, D. J. A., Duckworth, J. E. and Cuthbertson, A.

- (1968) . Factors affecting voluntary feed intake in pigs. 3. The effect of a period of feed restriction, nutrient density of the diet and sex on intake, performance and carcass characteristics. *Anim. Prod.* 10 : 345 – 357.
- 13) Yejin M., Y. Choi, Y. Kim, Y. Jeong, D. Kim, J. Kim, H. Jung and M. Song (2019) . Effects of protease supplementation on growth performance, blood constitutions, and carcass characteristics of growing-finishing pigs. *J. Anim. Sci. Technol.* 61(4): 234 – 238.
- 14) Witte, D., M., Ellis, F., Mckeith and E., Wilson (2000) . Effect of dietary lysine level and environmental temperature during the finishing phase on the intramuscular fat content of pork. *J. Anim. Sci.* 78 : 1272 – 1276.