

学 位 論 文 題 名

ウマの後腸における内容物通過メカニズムと 繊維消化との関連

学位論文内容の要旨

ウマは全世界でおよそ 5,800 万頭が飼育されており、主要な草食家畜として、ウシ、ヒツジ、ヤギ、スイギュウに次いで 5 番目に多く、今なお世界各地で重要な役割を果たしている。しかし、ウマが草類を人間の有用な資源に変換する消化吸収システムについては不明な部分が多い。草食動物は、繊維分解能を持つ微生物相を消化管内に持つことによって、植物由来の繊維成分を消化し、得られる発酵産物をエネルギー源としている。これは、草食動物がその進化の過程において、特定の消化管部位を微生物が生息できる発酵槽として発達させてきたことにより可能となった。草食動物種によって、発酵槽として発達させた消化管の部位は異なり、それぞれ独自の内容物の通過メカニズムと消化戦略を進化させたと考えられる。ウマは結腸発酵動物として、大きく発達した盲腸と結腸を持つ。結腸はさらに腹側結腸および背側結腸の 2 部位に分かれ、発酵槽は大きく 3 部位に分かれている。すなわち、ウマの発酵槽は内容物を滞留させる袋状の形態をした盲腸の後部に、巨大な筒状の形態をした結腸が連なって存在している。このようなウマ科における特異的な消化管形態によってもたらされる内容物通過メカニズムはほとんど明らかにされていない。

草食動物の消化管内容物の滞留時間は、繊維消化率を決定する重要な要因とされているが、ウマにおける従来の研究では、繊維消化率は消化管内容物の滞留時間に比例しない場合が多くみられる。したがって、ウマが他の草食動物にはない特異的な消化管内容物の通過メカニズムを有し、後腸における繊維消化と滞留時間あるいは内容物通過動態に関して独自の繊維消化戦略を持つ可能性がある。そこで本研究は、ウマにおける消化管内容物の滞留時間と繊維消化率の関係および盲腸・結腸での内容物通過動態について検討することで、ウマでの後腸における内容物通過メカニズムと繊維消化の関係を明らかにすることを目的とした。

結果は次のように要約される。

1) 「全消化管における内容物平均滞留時間と繊維消化率の関係」

ウマの消化管内容物滞留時間と繊維消化率との関係を明らかにする目的で、乾草の品質、形状および摂取量がウマの全消化管内での繊維消化率および内容物平均滞留時間に及ぼす影響について、北海道和種馬 4 頭を供試し検討した。全消化管内容物平均滞留時間は、高摂取量時が低摂取量時に比べ短く、細切飼料が粉碎飼料に比べ短いことが示された。また、繊維消化率は、高品質乾草が低品質乾

草に比べ高かったが、高品質乾草の高摂取量時には低摂取量時に比べ低いことが示された。高品質の乾草の摂取量の増加は、内容物平均滞留時間を短縮し、そのため繊維消化率が低下したと考えられた。しかし、低品質の乾草ではこのような関係は認められなかった。一方、Dhanao ら (1985) のコンパートメントモデルを利用し消化管部位別の滞留時間の解析を試みた結果、全消化管滞留時間の飼料摂取量による差異をもたらす消化管部位と、飼料形状による全消化管滞留時間の差異をもたらす消化管部位は異なることが示された。すなわち、消化管部位によっては内容物平均滞留時間に差が生じる場合があり、それによって繊維消化率は変動することが推察された。

2) 「消化管部位別の繊維消化と内容物滞留時間の関係」

以上の知見を踏まえ、ウマの消化管部位別の内容物平均滞留時間および繊維消化の関係を明らかにする目的で、1) 飼料摂取量が各消化管部位での繊維消化率、内容物平均滞留時間および発酵様相に及ぼす影響、2) 各消化管部位での繊維消化率および内容物平均滞留時間の飼料摂取後の時間経過に伴う変化、についてサラブレッド種ウマ 16 頭を供試し検討した。飼料摂取量の増加により全消化管での繊維消化率が減少するが、この減少は盲腸と腹側結腸の間でもたらされることが明らかとなった。しかし、これらの部位の内容物平均滞留時間は飼料摂取量による影響を受けなかった。飼料摂取量の増加により背側結腸以降での滞留時間は短縮したが、同部位での繊維消化率に影響は見られず値は著しく低いものであった。各消化管部位における総揮発性脂肪酸濃度および繊維分解酵素活性は、飼料摂取量による影響はなかった。飼料摂取直後は摂取終了後 4 時間に比べて、盲腸と腹側結腸の間の繊維消化率は低かったが、内容物平均滞留時間はどの部位においても差がなかった。飼料摂取量および飼料摂取後の時間経過に関わらず、盲腸内での繊維消化率は一定であった。繊維成分の消化は、盲腸および腹側結腸内で行われていたが、これらの消化管部位内で内容物平均滞留時間と繊維消化には関連性が見られないことが示された。一方、飼料摂取量および飼料摂取後の時間経過により、盲腸と腹側結腸の間で繊維消化率に差が生じ、これは盲腸と腹側結腸の間での内容物の通過動態が、飼料摂取量レベルあるいは飼料摂取後経過時間によって異なるためであることが示唆された。以上から、小腸から流入した内容物が盲腸をバイパスし、腹側結腸に直接流入している可能性が示された。

3) 「盲腸および腹側結腸における内容物通過動態のダイナミクスモデルによる解析」

消化管内容物の盲腸バイパスを定量しその経路の存在を実証するため、盲腸と腹側結腸を中心とした複数の内容物通過経路からなるダイナミクスモデルを想定し、各経路の流量を推定した。サラブレッド種ウマ 8 頭を供試し、飼料摂取直後および摂取終了後 4 時間での小腸、盲腸および結腸での内容物通過動態を比較した。各経路の流量を定量するため、不消化マーカーとしてリグニンあるいは希土類元素を用いた。飼料摂取直後では摂取終了後 4 時間に比べ、盲腸バイパス経路の流量が顕著に増加した。すなわち、採食に伴い、小腸から後腸への内容物流入量は増加し、盲腸に留まらず直接腹側結腸へ通過する内容物量が増加することが示唆された。また、左背側結腸以降の部位では、盲腸をバイパスした内容物と、盲腸での滞留を経た内容物が混在することが推察された。

以上の結果から、ウマの後腸には、小腸から流入する内容物が盲腸をバイパスし、直接腹側結腸へ

流出する内容物通過メカニズムが存在することが明らかとなった。さらに、このメカニズムは、盲腸および腹側結腸での効率的な繊維消化のため、また飼料摂取量の変動による繊維消化率への影響を極力少なくするために重要な役割を果たしていることが示唆された。ウマは、後腸において摂取飼料を盲腸バイパスさせることで採食量を確保し、一方で盲腸に流入した摂取飼料は採食量に関わらず消化することで最低限の繊維消化率を保つという、特有の採食・消化戦略を持つことが推察された。

学位論文審査の要旨

主 査	教 授	近 藤 誠 司
副 査	教 授	小 林 泰 男
副 査	助教授	上 田 宏一郎
副 査	助教授	秦 寛
副 査	講 師	中 辻 浩 喜

学 位 論 文 題 名

ウマの後腸における内容物通過メカニズムと 繊維消化との関連

本論文は 6 章からなり、図 28、表 28、引用文献 70 を含む、総頁数 81 の和文論文であり、別に 5 編の参考論文が添えられている。

ウマは全世界でおよそ 5,800 万頭が飼育されており、今なお世界各地で重要な役割を果たしている。しかし、ウマが草類を人間の有用な資源に変換する消化吸収システムについては不明な部分が多い。草食動物は特定の消化管部位を繊維分解能を持つ微生物が生息できる発酵槽として発達させ、植物由来の繊維成分を消化し、得られる発酵産物をエネルギー源としている。草食動物種によって、発酵槽となる消化管の部位は異なり、それぞれ独自の内容物の通過メカニズムと消化戦略を進化させたと考えられる。ウマの発酵槽は盲腸、腹側結腸および背側結腸に大きく 3 部位に分かれている。このようなウマ科における特異的な消化管形態によってもたらされる内容物通過メカニズムは明確でない。

草食動物の消化管内容物の滞留時間 (MRT) は、繊維消化率を決定する重要な要因とされているが、ウマにおける従来の研究では、繊維消化率は MRT に関連しない場合が多くみられる。したがって、ウマが他の草食動物にはない特異的な消化管内容物の通過メカニズムを有し、後腸における繊維消化と MRT あるいは内容物通過動態に関して独自の消化戦略を持つ可能性がある。本研究は、ウマにおける MRT と繊維消化率の関係および盲腸・結腸での内容物通過動態について検討することで、ウマでの後腸における内容物通過メカニズムと繊維消化の関係を明らかにすることを目的とした。得られた結果の概要は以下の通りである。

1) 乾草の品質、形状および摂取量がウマの全消化管内での繊維消化率および MRT に

及ぼす影響について、北海道和種馬 4 頭を供試し検討した（試験 1）。全消化管 MRT は、高摂取量時が低摂取量時に比べ短く、細切飼料が粉碎飼料に比べ短いことが示された。また、繊維消化率は、高品質乾草が低品質乾草に比べ高かったが、高品質乾草の高摂取量時には低摂取量時に比べ低いことが示された。高品質乾草の摂取量の増加は、MRT を短縮し、そのため繊維消化率が低下したと考えられた。しかし、低品質乾草ではこのような関係は認められなかった。一方、Dhanao ら（1985）のコンパートメントモデルを利用し消化管部位別の MRT の解析を試みた結果、全消化管 MRT の飼料摂取量による差異をもたらす消化管部位と、飼料形状による全消化管 MRT の差異をもたらす消化管部位は異なることが示された。すなわち、消化管部位によっては MRT に差が生じる場合があり、それによって繊維消化率は変動することが推察された。

2) 飼料摂取量が各消化管部位での繊維消化率、MRT および発酵様相に及ぼす影響（試験 2-1）、各消化管部位での繊維消化率および MRT の飼料摂取後の時間経過に伴う変化（試験 2-2）、についてサラブレッド種ウマ 16 頭を供試し検討した。飼料摂取量の増加により全消化管での繊維消化率が減少するが、この減少は盲腸と腹側結腸の間でもたらされることが明らかとなった。しかし、これらの部位の MRT は飼料摂取量による影響を受けなかった。各消化管部位における総揮発性脂肪酸濃度および繊維分解酵素活性は、飼料摂取量による影響はなかった。飼料摂取直後は摂取終了後 4 時間に比べて、盲腸と腹側結腸の間の繊維消化率は低かったが、MRT はどの部位においても差がなかった。繊維成分の消化は、盲腸および腹側結腸内で行われていたが、MRT と繊維消化には関連性が見られないことが示された。一方、盲腸と腹側結腸の間で繊維消化率に差が生じ、小腸から流入した内容物が盲腸をバイパスし、腹側結腸に直接流入している可能性が示された。

3) 盲腸と腹側結腸を中心とした複数の内容物通過経路からなるダイナミクスモデルを想定し、各経路の流量を推定した（試験 3）。サレブレッド種ウマ 8 頭を供試し、飼料摂取直後および摂取終了後 4 時間での小腸、盲腸および結腸での内容物通過動態を比較した。各経路の流量を定量するため希土類元素を用いた。飼料摂取直後では摂取終了後 4 時間に比べ、盲腸バイパス経路の流量が顕著に増加した。すなわち、採食に伴い、小腸から後腸への内容物流入量は増加し、盲腸に留まらず直接腹側結腸へ通過する内容物量が増加することが示唆された。

以上のように本研究は、ウマの後腸には小腸から流入する内容物が盲腸をバイパスし、直接腹側結腸へ流出する内容物通過メカニズムが存在することを明らかとした。さらに、このメカニズムは、盲腸および腹側結腸での効率的な繊維消化のため、また飼料摂取量の変動による繊維消化率への影響を極力少なくするために重要な役割を果たしていることが示唆された。この成果は、ウマの消化生理や採食消化戦略について新たな知見を示したものであり、学術面において高く評価され、ウマの飼養管理への応用

面での貢献度も大きい。

よって審査員一同は、宮地 慎が博士（農学）の学位を受けるに十分な資格を有するものと認めた。