

草地生態系管理のためのシステムモデル

誌名	農林水産技術研究ジャーナル
ISSN	03879240
著者	高橋, 繁男
巻/号	13巻4号
掲載ページ	p. 16-21
発行年月	1990年4月

農林水産省 農林水産技術会議事務局筑波産学連携支援センター
Tsukuba Business-Academia Cooperation Support Center, Agriculture, Forestry and Fisheries Research Council
Secretariat



草地生態系管理のためのシステムモデル

高橋 繁男

放牧草地は、草・家畜・土壤生物が生産・消費・分解を同時に行っている場である。そこでは、太陽エネルギーが草に取り込まれ、他の生物に移行して行き、窒素などの物質もまた生物間を循環している。エネルギーの流れと物質循環という観点から、草地生態系を理解するために構築されたシステムモデルを紹介し、管理技術に展開させるための問題点と将来展望を述べた。

1 はじめに

わが国の草地は、ススキ、ササ、ネザサなどからなる自然草地と、山林を開墾して牧草を播いて造成した人工草地に分けられる。日本の自然植生の気候的極相は森林といわれており、多くの自然草地は採草や家畜飼養の目的で利用され、放牧頭数の増減、火入れ等の人為的管理により植生の遷移を止めているので、半自然草地ともいえる。一方、人工草地は施肥管理、計画的な刈り取りや輪換放牧などによって、自然草地に比べてより農学的な技術で管理される。

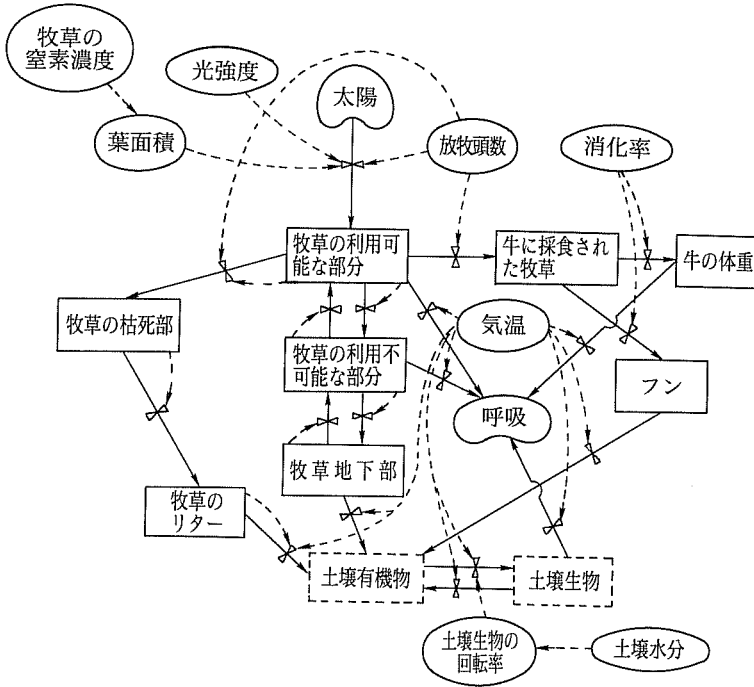
自然草地、人工草地を問わず、それを構成する生物的、環境的要因は多数であり、これらの要因は相互に複雑に関与し合っていて、草地生態系を構成している。このような草地を対象とした研究には、一定の広い土地面積と家畜頭数を要するので、普通作物での研究のような反復実験は困難である。従って、放牧草地における植物と家畜の生産に関与する要因を定量的に明

らかにすることもまた困難であった。1960年代後半に、草地研究へのシステム概念の導入と、コンピュータ利用の普及が合体して新しい研究方向を開いた。米国の Van Dyne (1969) の草原生産システムモデルに刺激され、わが国でも多くのシステムモデルが作られてきた。これらは、草地を一定の統一性を持つシステムと考え、要素間の相互関係を数学的なモデルで表現することにより、システムを構成している要素を結びつけるものである。

草地生態系を管理するためには、人為的管理要因の量と質や気象条件によって生態系がどのように反応するかを予測し、その予測に基づいて、適切な管理を行うことになる。

2 放牧草地の生産予測モデル

日本の放牧草地の生産量を予測する試みは大久保ら (1975) がシバ草地でのエネルギーの流れを表すモデルの発表が最初である。塩見ら (1982, 1983, 1988) はこのモデルを原型としてオーチャードグラス主体の寒地型混播放牧草地の生産量を予測するモデルに発展させた。こ



注) 実線はエネルギーの流れを、破線は情報の流れを示す。

図1 放牧草地のエネルギーの流れのコンパートメント・モデル
(塩見 1988; 一部改変)

のモデルは、放牧草地の人為的な管理の要因として、家畜の放牧頭数、窒素の施肥量を、気象要因としては、日射量と気温を取り込んでいる。その概略を図1に示した。モデルは、牛に利用できる草の部分、利用できない部分、枯死体、地下部、地表に蓄積した植物遺体、牛に採食された草、牛および排泄された糞の8つのコンパートメント(図では長方形の箱で示されている)から構成されている。それぞれエネルギー量で示されていて、各コンパートメントの時間当りのエネルギー収支を微分方程式で表した。光合成により牧草に蓄積される太陽エネルギー量は、牧草自体に有する季節的な生産性や、気温、日射量さらに家畜の被食量の影響を受ける。一方、家畜の増体量は、牧草から家畜へと流れるエネルギー量により決まるが、その量は面積当りの草量や消化率、放牧家畜の要求量に対する可食草の相対値などによって決まる。窒素の施肥量の効果は、牧草の葉面積の展開に働く。

このような相互関係を既知の情報やある仮定に基づいて数式で表す。

あるコンパートメントへの時間当りの流入量を I 、流出量を O とすると、その変化量 (dv/dt) は、 $dv/dt = I - O$ と表すことができる。

I および O は、種々の(時間あるいはコンパートメントの量など)関数で表される。

例えば、草の家畜に採食可能な量 (V_1 ; エネルギー量/ m^2) の1日の変化量は、

$$dV_1/dt = f_{01} \cdot Q + f_{21} \cdot V_2 + f_{31} \cdot V_3 - ((f_{12} + f_{14} + f_{19}) \cdot V_1 + F)$$

と表した。

ここで、 Q は太陽の放射量、 V_2 は草の家畜にとって不可食な量、 V_3 は牧草の地下部の量、 F は家畜による被食量であり、いずれも単位面積当りのエネルギー量である。 f_{01} は太陽エネルギーの草への変換効率、 f_{21} は不可食部から可食部への移行率、 f_{31} は地下部から可食部への移行率、 f_{12} は可食部から不可食部への移行

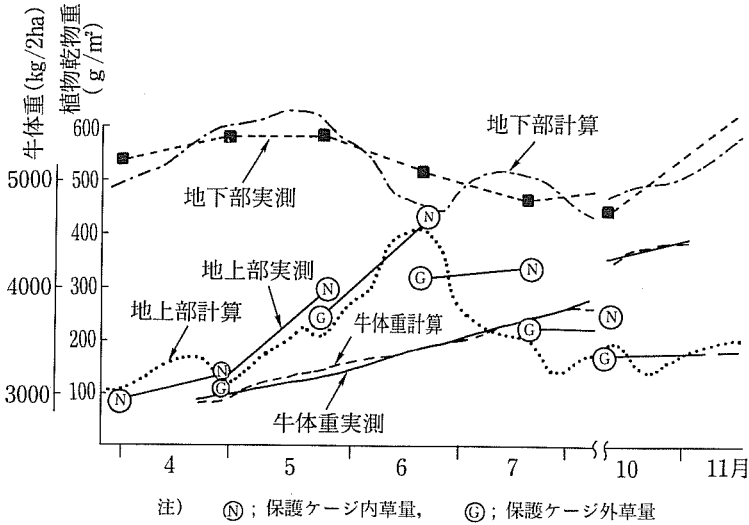


図2 放牧草地の草と牛体重変化の予測 (塩見 1983)

率, f_{14} は可食部の枯死率, f_{10} は可食部の呼吸率である。この方程式の右辺の正の項は流入量を, 負の項は流出量を示す。最終的には, これらのエネルギー量は, 植物に関しては乾物重に, 牛に関しては体重に換算される。このモデルでは, 8個のコンパートメントを持つので, このような微分方程式を8個持つ。これらの連立微分方程式を解析的に解くことは多くの場合不可能であり, コンピュータの助けをかりて数値的に解くことになる。

図2に草量の季節変化と家畜の体重変化を, コンピュータシミュレーションにより得た結果と実測値を対比し示す。条件としては, 家畜は黒毛和種去勢牛, 放牧地は2haであり, 1牧区0.5haで4牧区を各区1週間放牧, 4月中旬の入牧時の合計体重は約3000kg, 窒素の施肥量は54kg/haである。図に示した草量は4牧区のうちの1つの牧区の状態を示す。モデルは, 実測値をよく再現していることがわかる。

このモデルを用いて, 家畜の放牧頭数を変更したときの家畜の生産量を予測し, 最適放牧頭数を決定することができる。

図3は, 気象条件を西那須野町の平年値, 窒素施肥量を年54kg/haとし, 放牧開始時の頭数を変えた場合の, 200日間の増体量を予測した

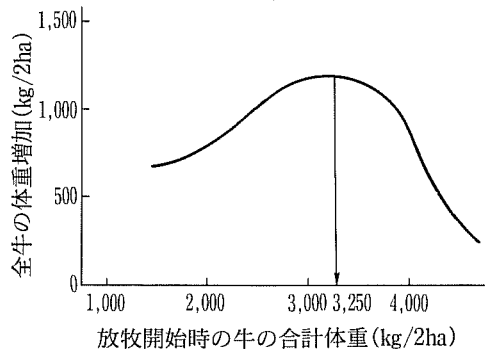


図3 放牧頭数と牛の増体重 (塩見 1983)

例である。この結果, 合計増体量が最大となるのは放牧開始時の牛の合計体重が3250kg/haのときである。気象の年変動があるので, 牧草の生産量にも変動が生じる。したがって, 実際の草地ではこの80%程度を最適とした。

松中ら (1988) は, 牧草のカリ濃度によりその生産量が規制される条件を取り入れた草地生産モデルを構築した。モデルは北海道の根釧地方での, カリ循環からみた育成牛の最適放牧方法とカリ施肥法の指針を得るために作成された。カリの施肥量に対して, 放牧頭数, 放牧日数を変化させたシミュレーションにより牧草と家畜の生産量を予測し, カリの施肥量に対する最適

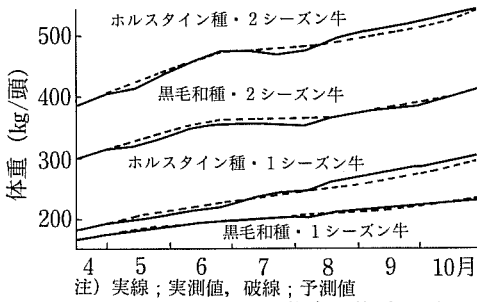


図4 モデルによる放牧牛の体重予測
(築城 1990)

放牧頭数を推定した。また、根釧地方の火山性土壌はカリ供給力が劣るので、刈り取り草地に比べて還元カリ量が多い放牧草地でも年間 130 kg/ha 程度の施肥が必要と推定した。

3 家畜の生産モデル

上記のモデルには家畜をも取り込んでいいるが、植物に重きを置いたモデルといえることができる。放牧草地での家畜の生産は多くの要因によって制限される。草の量と質は刻々と変化し、気温、日射、降水量などの気象要因が、家畜の採食草量を規制している。築城(1990)は、この要因を取り込み、牛の品種や放牧経験を考慮した放牧牛の生長サブモデルを構築した。このモデルは家畜体に蓄積されるエネルギーと窒素の時間当りの変化量を微分方程式で表し、体重と体蛋白質の蓄積量を予測するものである。

図4に放牧牛の体重変化を、モデルによる予測値と実測値を対比し示した。予測値は、実測した草量、草の消化率と窒素濃度、気温、および降水量をモデルに与えてシミュレーションにより得たものである。ホルスタイン種、黒毛和種ともに、予測値は実測値とよく一致している。

このモデルを用い乾物消化率の増体に及ぼす効果をシミュレーション実験により求めた。本州では一般に放牧牛の増体が夏期に停滞するが、7および8月に、あるいは8月に、草の乾物消化率を1%改善すると日増体量はそれぞれ1カ月に約1.5kgと約1.6kg高くなると推定した。

4 草種構成モデル

放牧草地は、人工草地、野草地を問わず、いくつかの草種から成り立っている。人工草地は、造成時に、家畜の生産にとって望ましい草種構成となるような草地を作るであろうから、その状態を維持したい。また、半自然草地では、人為的管理によって草種構成を維持しているので、安定状態を維持させる条件を知りたい。

小山ら(1989)は混播放牧草地の草種を長草型牧草(オーチャードグラス、トールフェスク、ペレニアルライグラス)と短草型牧草(ケンタッキーブルーグラス、レッドトップ、白クローバ)およびシバの3つに分類して、牛による被食の違いと草の光競争を要因としたモデルを発表した。牛は長草型牧草が優占するときには葉の部分の先ず採食し、ついで短草型牧草を食べる。シバは最も後回しになるが、踏みつけには強いと仮定する。このモデルによるシミュレーション結果は、1年間の草種構成の変化をよく表現したが、より長い年月の草種構成の変化を表すことはできなかった。

塩見(1987)はロトカ・ボルテラの競争モデルを発展させたモデルを考えており、北農試の高橋(1989)は採草地での草種構成モデルに取り組んでおり、今後の発展に期待したい。

5 草量予測のための簡易モデル

生産現場(個々の農家や生産団体)で、システムモデルを用いて草量を予測しようとするとき、その草地特有の初期値と係数の入力が必要とする。生産現場で、これらの値を得ることは困難であると考えられるので、入力すべき初期値や係数の少ないモデルの開発が行われた。塩見ら(1990)は、放牧草地の草の生長をロジックモデルで表し、条件により、6つのモデルを用意した(表1)。草量の初期値を与えることにより、将来の草量を予測できるが、草の

表1 草量予測モデル

(塩見ら 1990)

予測モデルのメニュー	必要な初期値と定数	モデルが用意する係数値
○短期予測 (10日間程度)		
・被食量(a)が一定		
放牧中 $dx/dt = rx(1-x/K) - a$	x, a	r
休牧中 $dx/dt = rx(1-x/K)$	x	r
○長期予測		
・被食量(a)が一定		
連続放牧 $dx/dt = r(t)x(1-x/K) - a$	x, a	r(t)
輪換放牧 $dx/dt = r(t)x(1-x/K) - a(t)$	x, a	r(t)
放牧中 $a(t) = a$		
休牧中 $a(t) = 0$		
・被食量は牛体重に依存し、牛は体重増加する		
連続放牧 $dx/dt = r(t)x(1-x/K) - a(x)/100 \cdot y/A$ $dy/dt = cy - ky^{3/4}$	x, y, A	r(t), a(x) c, k
輪換放牧 $dx/dt = r(t)x(1-x/K) - a(x, t)/100 \cdot y/A$ $dy/dt = cy - ky^{3/4}$	x, y, A	r(t), a(x) c, k
放牧中 $a(x, t) = a(x)$		
休牧中 $a(x, t) = 0$		

変数の説明

- X : 時刻 t における単位面積当りの牧草量 (乾物 g/m²)
- r, r(t): 牧草の生長係数 (モデルが用意)
- a : 1日当りの牛による被食量 (乾物 g/m²)
- a(x) : 草量に依存する体重当りの牛の採食率 (体重の%/日) (モデルが用意)
- y : 時刻 t における牛の合計体重 (トン)
- A : 一牧区の面積 (m²)
- c, k : 牛の牧草利用率とエネルギー消費に関する係数 (モデルが用意)

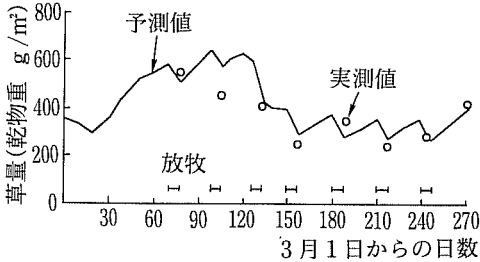
共通の仮定

k (牧草量の上限值) = 750 g/m²

表2 牧草生育期間の旬別日平均気温を用いた年次の分類 (1944年から42年間)

類型 No.	1	2	3	4	5	6
特徴	3月上中旬 高温; 7, 8 月低温; 10 月中下旬高温	3月上中旬, 4月下旬から 8月上旬まで 低温; 他は平 年並み	4月下旬まで 極めて低温; 他はほぼ平年 並み	3, 4月やや 高め; 他は平 年並み	5月上旬まで 低め; 5月中 旬から7月中 旬まで高温; 8月下旬から 再び低温	全般的に高め で推移; 4月, 7月, 9月に 高温

注) 西那須野における1944年から42年間の値を k-means 法により分類。 (塩見ら 1990)



注) 3月上旬の草量実測値を初期値とし、牛体重の値に実測値を与えてモデル6により予測。草の生長係数は類型2の値を用いた。

図5 放牧草地草量の実測値(1988)とモデルによる予測値

生長係数は季節により、また気象条件によっても異なる。現状では長期の気象変化を予測するのは困難であるので、過去の気象をいくつかの類型に分類し(表2)、その類型ごとに旬別の生長係数表を作成する。そして、その年に起こりそうな気象型を想定して、それに応じた生長係数を採用する。図5に実測値とモデルによる予測値を示した。このような簡易なモデルでも、比較的精度よく草量予測ができることがわかる。

6 将来展望

農業生産活動にとって将来予測は、より良い結果を得るために、いつ何をなすべきか、という管理のための意志決定の助けとなる。その予測手段として最も確かな方法はシステムモデルによると考えられる。

草地生態系のエネルギー、物質循環あるいは草種構成の変化を表すモデルを構築する際に、まだ十分に解明されていない事柄にぶつかる(なにがわかっていないかを見つけることも、モデル構築の目的の一つではあるが)。そのため、ある現象を単純化し、いくつかの仮定を取り入れることになる。このようにして構築されたモデルの普遍性は、実測データで検証される必要がある。しかし、日本各地の放牧草地において実測データはほとんどないのが現状である。

現在、草地の草の量・質や草種構成割合を非破壊的に、かつ広い範囲で測定する技術の開発

が進められている。このようなバイオマス測定センサーによる測定手法の進歩によって、多くの草地で刻々の草量が測定されるなら、それはモデルの検証データとして活用され、より精度の高い予測モデルの開発につながる。また、草量測定の自動化が可能となれば、日本各地のいくつかの地点に草地バイオマス測定・モニターを設置して、毎日の草量を測定し、これをモデルの初期値とし、気象予測データと結び付けることにより、草量予測を行うことができる。現在の天気予報のように、農業管理情報として広く利用されることになる。

(草地試験場 生態システム研究室長)

参考文献

- 1) Van Dyne, G. M. (1969) Science series # 3. Range Science Department, Colorado State University. : 1-50
- 2) Okubo, T., Hirosaki, S. and Okuno, T. (1975) JIBP Synthesis 13
- 3) Shiyomi, M., Takahashi, S., Akiyama, T., Hirosaki, S. and Okuno, T. (1982) Bull. Natl. Grassl. Res. Inst. 22 : 27-43
- 4) Shiyomi, M., Takahashi, S., Akiyama, T. and Hakamata, T. (1983) Bull. Natl. Grassl. Res. Inst. 26 : 17-29
- 5) Shiyomi, M., Koyama, N., Tsuiki, M., Akiyama, T. and Takahashi, S. (1983) Bull. Natl. Grassl. Res. Inst. 39 : 24-39
- 6) 松中照夫・小関純一・近藤照(1988) グリーンエネルギー計画成果シリーズⅢ系(生産環境) No. 4, 農林水産技術会議事務局, 102-115
- 7) 築城幹典・小山信明・塩見正衛(1990) 草地試研報, 43(投稿中)
- 8) 小山信明・塩見正衛・築城幹典(1989) 草地試研報, 40 : 1~12.
- 9) 塩見正衛(1987) 個体群生態学会報, 43 : 49-62
- 10) 高橋俊・小山信明・佐藤康夫・名田陽一(1989) 日草誌, 35(別) : 209-210
- 11) 塩見正衛・築城幹典・小山信明・高橋繁男(1990) 日草誌(投稿中)