

農村社会におけるバイオマスエネルギーの生産と運輸部門への利用

Bioenergy Production and Utilization for Transportation Energy in Rural Society

小山瑞樹 (Mizuki Koyama)
宇都宮大学大学院農学研究科
ma098304@cc.utsunomiya-u.ac.jp

野口良造 (Ryozo Noguchi)
宇都宮大学農学部
noguchi@cc.utsunomiya-u.ac.jp

Abstract :

Bioenergy is now in the spotlight as a renewable energy for rural society. A scenario including diffusion of electric vehicle, biomass production by using abandoned cultivated land, population change, and improvement of fuel consumption for electric vehicle in Tochigi prefecture was used in this research. Biomass energy flow model with multiple kinds of biomass crop and energy was proposed, then simulation based on energy flow model was able to clarify the possibility of bioenergy utilization for transportation energy in rural society by using system dynamics model.

キーワード：自動車、バイオマス、電気自動車、エネルギーフローモデル、システムダイナミクス

要旨：再生可能エネルギーとして期待されているバイオマスエネルギーに着目し、得られたエネルギーを運輸部門に利用した場合の将来性について、システムダイナミクスによって考察した。栃木県を対象に、バイオマス生産のための投入エネルギー、人口の動態、電気自動車やガソリン自動車などの運輸技術の向上などをモデルに組み込み、耕作放棄地を利用した地域内でのエネルギー供給の可能性を明らかにした。

1. はじめに

電気自動車(Electric Vehicle、以下「EV」)やプラグインハイブリッド車(Plug-in Hybrid Vehicle、以下「PHV」)が、従来のガソリン自動車(Gasoline Vehicle、以下「GV」)よりも低燃費な性能を背景に、社会に普及し始めている[1][2]。また、収穫直後のバイオマスが持つエネルギー量に対する、自動車の移動のためのエネルギー量との比を表す「総合効率」を用いると、バイオエタノールによるGVの総合効率よりも、バイオマス発電によって得られた電力を利用するEVの総合効率の方が高いという試算結果もあり[3]、地域社会におけるバイオマスエネルギー利用によるEV普及の可能性について、研究が進められている[4]。

本研究では、野口ら[4]の研究において提案されたバイオマス作物やエネルギーを取り扱ったエネルギーフローモデルをもとに、システムダイナミクス(System Dynamics、以下「SD」)のシミュレーションツール「Powersim Studio」[5]を用いて、エネルギーフローモデル内のモジュールのSDモデル化を検討するとともに、SDによる農村社会におけるバイオマスエネルギーの生産と運輸部門への利用のシミュレーションを行い、その可能性について明らかにすることを目的とした。

2. システムダイナミクス(SD)によるモデル化

2. 1 エネルギーフローモデル

エネルギーフローモデル[4]はバイオマス生産、エネルギープラント、エネルギー消費による三つのモジュールで構成される(図1)。バイオマス生産体系へのエネルギー投入量に比例して生産されるバイオマス生産量 \mathbf{B} 、の変換係数を \mathbf{P} 、エネルギープラントにおけるバイオマス投入量に対するエネルギー生産量の変換係数を \mathbf{D} 、エネルギープラントに投入するバイオマス量に比例して生産されるエネルギーの変換係数を \mathbf{G} 、時系列のステップ(たとえば1年ごと)を k とし、エネルギープラントを通じてバイオマス生産から得られたエネルギー \mathbf{E}^k_{RenE} を、地域内の消費エネルギー \mathbf{E}^{k+1}_{RenFC} 、バイオマス生産体系へ投入するエネルギー $\mathbf{E}^{k+1}_{RenAgp}$ 、およびエネルギー

ギープラントへ投入するエネルギー E^{k+1}_P に利用すると、エネルギーフローの循環は、以下のように示される。

$$E^k_{RenE} = DPE^k_{RenAgp} \tag{1}$$

$$E^{k+1}_{RenFC} + E^{k+1}_{RenAgp} + GPE^{k+1}_{RenAgp} = E^k_{RenE} \tag{2}$$

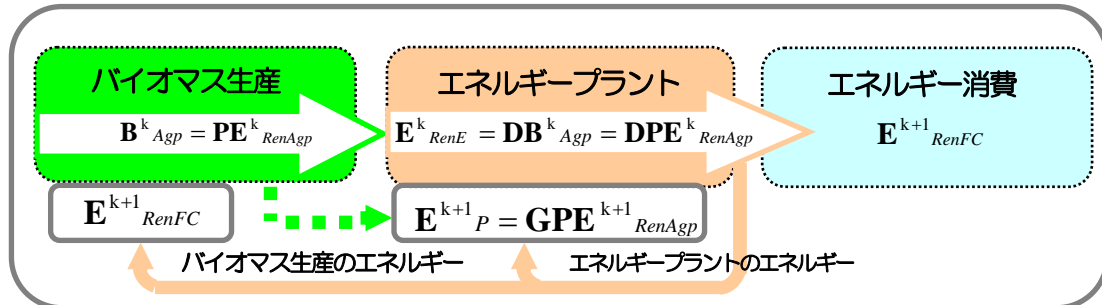


図1 バイオマス生産・エネルギープラントへの投入エネルギーを考慮したエネルギーフローモデル[4]

2. 2 バイオマス生産モデル

エネルギーフローモデルにもとづいて、SD によるバイオマス生産モデルを構築した(図2)。バイオマス生産モデルでは、単位面積当たりのそれぞれのエネルギーの種類にもとづくエネルギー投入量が決定されているため、栽培面積により各エネルギー投入量(直接エネルギー)とバイオマス生産量を決定した。また、シミュレーションではイネを用いたため、玄米収穫量とそれぞれの副産物比により稲わらと籾殻の収穫量を決定した。イネは9月に収穫され、1ヶ月間ストックした後にエネルギー変換プラントに投入することとした。なお、バイオマス生産に必要な、軽油、灯油については、今回の設定したエネルギープラントでは生産できないので、エネルギーフローモデルの外部から供給した。

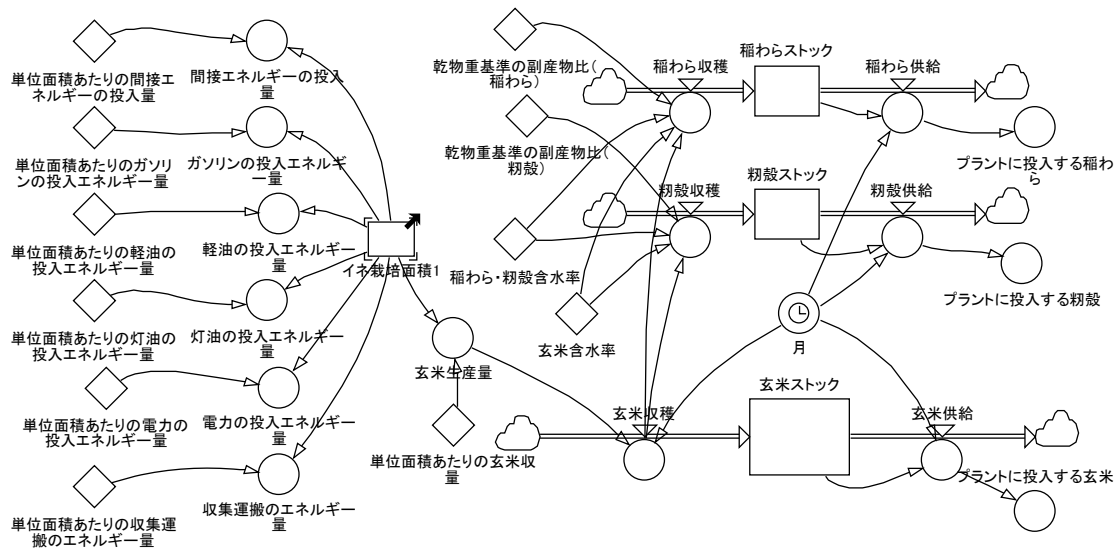


図2 バイオマス生産モデル

2. 3 エネルギープラントモデル

エネルギーフローモデルにもとづいて、SD によるエネルギープラントモデルを構築した(図3)。エネルギープラントモデルでは、イネをエタノールに変換するエネルギープラント(以下「エタノールプラント」)、電力に変換するエネルギープラント(以下「電力プラント」)を設定した。9月に収穫されたバイオマス(イネ)を、10月に、それぞれのエネルギープラントに投入し、エネルギーを生産することとした。生産されたエネルギーは、翌

年のエネルギー消費へ回すこととした。なお、エタノールプラントには電力と蒸気、電力プラントには電力が、エネルギープラントの稼動に必要な投入エネルギー(直接エネルギー)とした[6]。ただし、電力プラントでは電力が自家発電できるので、電力発電効率から計算を行った。またこれらの投入エネルギーは、エネルギープラントに投入されるバイオマス量に比例させた。なお、エネルギープラントに必要な蒸気については、今回の設定したエネルギープラントで生産できないので、すべて外部から供給した。

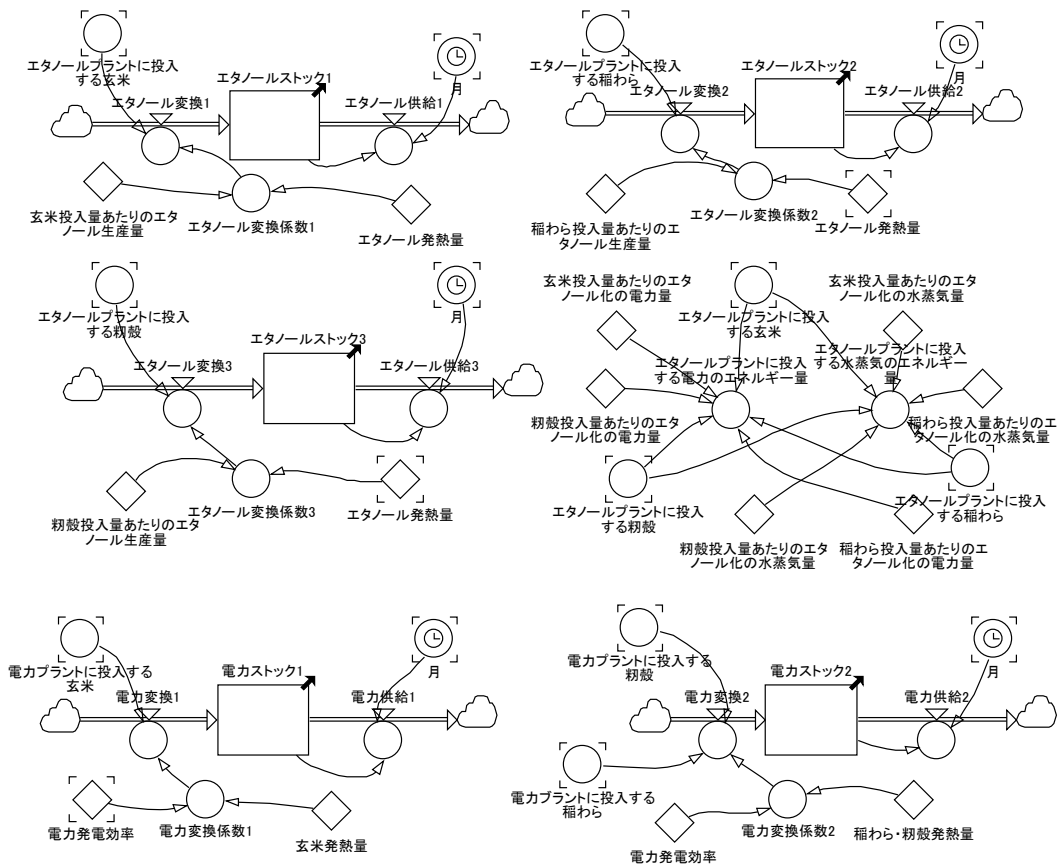


図3 エネルギープラントモデル (エタノールプラントと電力プラント)

2. 4 エネルギー消費モデル

エネルギーフローモデルにもとづいて、SD による乗用車普及にともなうエネルギー消費モデルを構築した(図4)。エネルギー消費モデルでは、人口減少率を考慮した人口の推移を求め、人口に比例した新車需要を決定し、また、電気自動車販売台数の増加率から、新車需要における電気自動車販売台数、ガソリン車販売台数を決定した。販売されたガソリン車と電気自動車は自動車の経済寿命で廃車とした。一方で、エネルギー消費量減少率よりガソリン車走行距離あたりのエネルギー消費量(直接エネルギー)を決定した。また、ガソリン車走行距離あたりのエネルギー消費量、1台あたりの年間走行距離、ガソリン車台数によって、ガソリン車による年間エネルギー消費量を求めた。同じように電気自動車による年間エネルギー消費量を求めた。

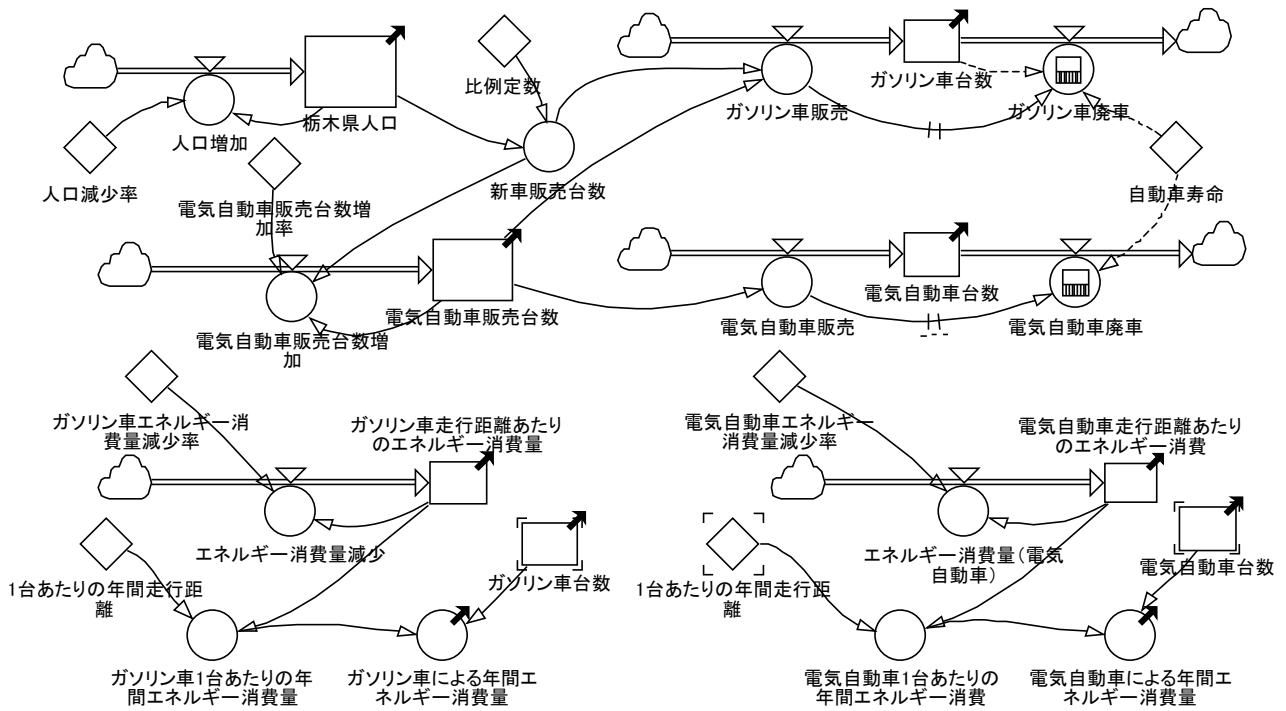


図4 乗用車普及にともなうエネルギー消費モデル

一方で、生産されたエネルギーの利用を行うために、エネルギーフローモデルにもとづいて、SD によるバイオマス生産におけるエタノール・電力消費モデルを作成した(図 5)。エネルギープラントで生産されたエタノールと電力は、このエタノール・電力ストックを介し、バイオマス生産に用いるガソリンの代替燃料と電力、エネルギープラントに用いる電力として利用することとした。また、バイオマス生産やエネルギープラントの稼働に必要なガソリン・電力が、エネルギーフローモデル内で不足した場合は、外部から供給した。SD のプログラムでは、エネルギープラントで生産されたエタノール・電力が 11 月にエタノール・電力ストックへ投入され、翌年の 5 月にバイオマス生産へ、10 月にエネルギープラントへ、11 月に GV・EV のエネルギー消費へ供給することとした。

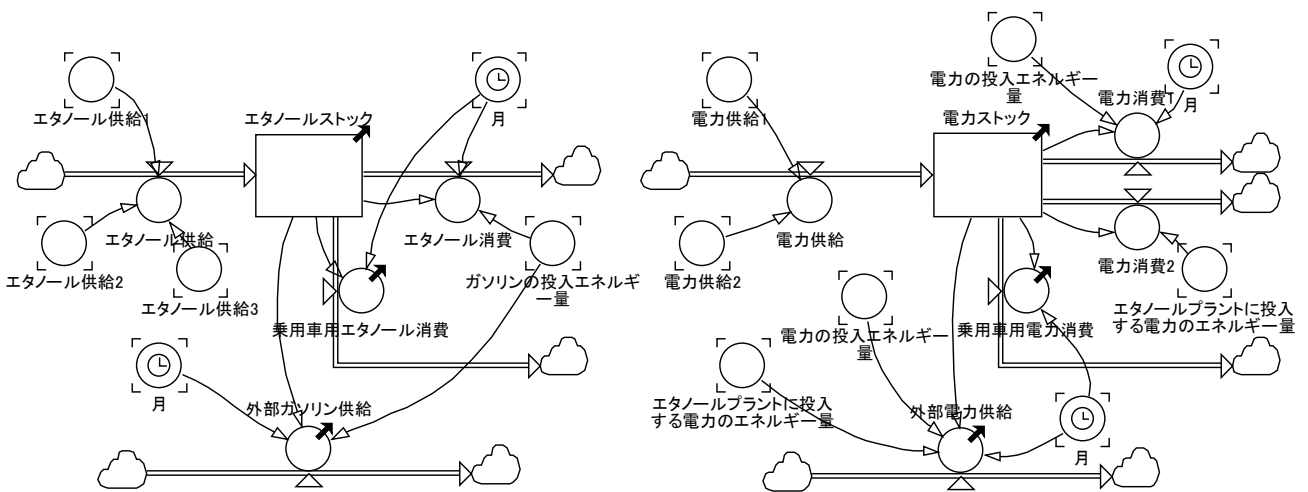


図5 エバイオマス生産におけるエタノール・電力消費モデル

2. 5 圃場面積動向モデル

エネルギーフローモデルにもとづいて、SD による圃場面積動向モデルを構築した(図6)。圃場面積動向モデルでは、耕作放棄地増加率と対象地域の耕地面積から耕作放棄地面積を求めた。耕作放棄地面積の上限は栃木県全耕地面積とした。また、耕作放棄地を全て利用可能とし、前年度に普及した EV に必要な全ての電力とバイオマス生産、エネルギー変換プラントに必要な電力を、優先的に、耕作放棄地で生産されたバイオマスによって賄うこととした。一方で、余剰の耕作放棄地で生産されたバイオマスはエタノールに変換し、ガソリン燃料の代替エネルギーとした。それでも余剰が生じた場合は、バイオマス生産量を減らすためにバイオマス生産面積を減少させた。なお、図6では、電力に変換するイネの栽培面積を「イネ栽培面積1」、エタノールに変換するイネの栽培面積を「イネ栽培面積2」と表した。

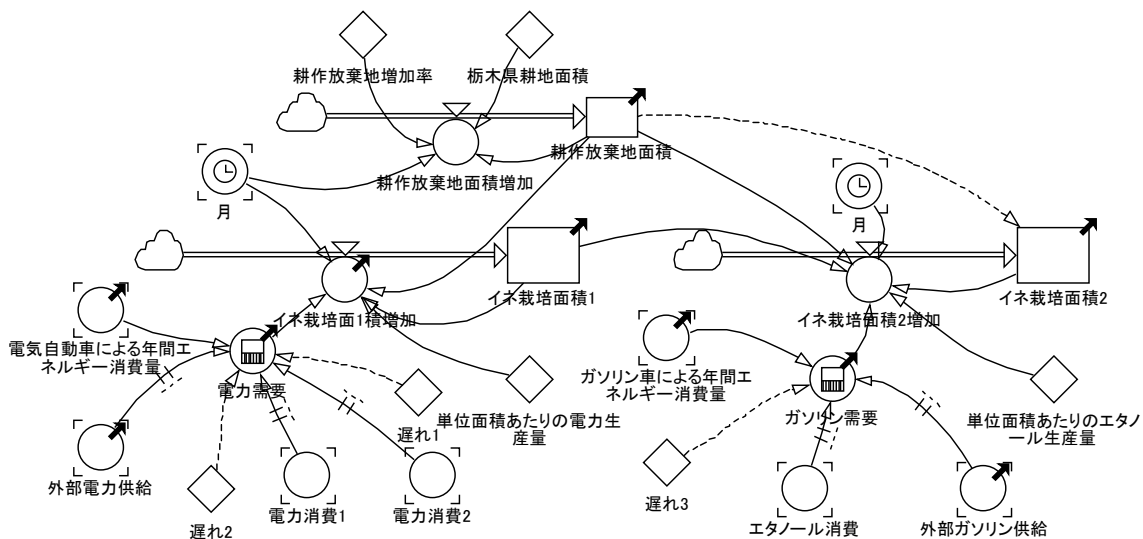


図6 圃場面積動向モデル

2. 6 自動車用エネルギー代替のシナリオ

栃木県を対象に、耕作放棄地を利用したバイオマス生産と EV の普及めざしたシナリオを設定した(表1)。人口減少率 0.699%/年を考慮し、電気自動車販売台数増加率 5%/年、ガソリン車の燃費性能の向上率 2.9%/年と同様に電気自動車の燃費性能の向上率を 2.9%/年、自動車の経済寿命を 12 年とした。また、バイオマス生産には、玄米収量の多い飼料米である、ふくひびき (収量: 8,250 kg/ha)を利用することとした。なお、シミュレーションでは、1 月単位を計算のステップとして計算を進めた。この表1に示されるシナリオは、EV が GV より高い燃費性能を持つことや、EV や PHV の普及が世界中で進められている背景から設定されたものであり、今後の新たな技術革新が EV や GV で行われる前提で SD モデルに用いた。エタノールプラントや電力プラントは、EV や GV と同様にエネルギー変換技術が向上することが予想されるが、ここでは考慮しなかった。

3. 結果と考察

自動車台数の推移は、図7に示されるように人口の減少とともに新車販売台数が減少したため、30年後には、EVが99万1,000台、GVが7,500台となった。シミュレーションを始めた年の自動車保有台数が約121万6000台であることを考慮すると、30年後には約20万台減少した。したがって、人口減少率約0.7%/年が、自動車の普及台数に大きく影響を与えた。耕作放棄地の利用の変化は、図8に示されるように、電力プラントに投入するイネの栽培面積が26年後に最大値を示した。また、図9にも示されるように、GV台数の減少とともにガソリン消費量が

減るなかでエタノール生産量が増加したため、26年後に、ガソリン需要量をエタノール生産量によって満たすことができた。つまり、26年後には、耕作放棄地を利用したバイオマス生産から得られる電力とエタノールによって、普及した全てのEV、および残存しているGVの全てのエネルギーを賄うことができた。

表1 バイオマスエネルギーによる自動車用エネルギー代替シナリオの基礎データ

	基礎データ	値	単位
栃木県の人口	栃木県人口[7]	2,015,233	人
	人口減少率[8]	0.699	%/年
栃木県の農地	栃木県耕地面積[9]	128,300	ha
	栃木県耕作放棄地面積[10]	8,609	ha
	耕作放棄地増加率[10]	4.2	%/年
栃木県の自動車	栃木県自動車保有台数(乗用車)[7]	1,215,917	台
	新車販売台数(乗用車)[11]	97,208	台
バイオマス生産	玄米収量(飼料米：ふくひびき) [6]	8,250	kg/ha
	ガソリンの投入エネルギー量[12]	603.8	MJ/ha
	軽油の投入エネルギー量[12]	3,213.5	MJ/ha
	灯油の投入エネルギー量[12]	2,331.3	MJ/ha
	電力の投入エネルギー量[12]	2,252.5	MJ/ha
	間接エネルギーの投入量[12]	14,206.6	MJ/ha
	収集・運搬のエネルギー量[6]	4,790.0	MJ/ha
	玄米含水率[6]	0.15	-
	乾物重基準の副産物比(稲わら) [6]	1.2	-
	乾物重基準の副産物比(籾殻) [6]	0.22	-
	稲わら・籾殻含水率[6]	0.3	-
エタノールプラント	エタノール発熱量[6]	22.1	MJ/L
	玄米：エタノール生産量[6]	0.43	L/kg
	稲わら：エタノール生産量[6]	0.25	L/kg
	籾殻：エタノール生産量[6]	0.22	L/kg
	玄米：エタノール化の電力量[6]	1.853	MJ/kg
	玄米：エタノール化の水蒸気量[6]	4.622	MJ/kg
	籾殻：エタノール化の電力量[6]	1.269	MJ/kg
	籾殻：エタノール化の水蒸気量[6]	3.628	MJ/kg
	稲わら：エタノール化の電力量[6]	1.443	MJ/kg
	稲わら：エタノール化の水蒸気量[6]	4.123	MJ/kg
電力プラント	電力発電効率[6]	0.72	-
	玄米発熱量[6]	14.63	MJ/kg
	稲わら・籾殻発熱量[6]	11.41	MJ/kg
自動車用エネルギー	電気自動車の燃費性能[13]	0.4	MJ/km
	ガソリン車の燃費性能[13]	2.23	MJ/km
	1台あたりの年間走行距離[14]	14,946	km/台
	電気自動車販売台数増加率[15]	5	%/年
	ガソリン車の燃費性能の向上率[16]	2.9	%/年
	電気自動車の燃費性能の向上率	2.9	%/年
	自動車の経済寿命	12	年

一方で、図8に示されるように、26年目以降、バイオマス生産はGVのエタノール分を満たすと同時に、GVの台数がさらに減少し、またGVもEV同様に燃費が向上したため、エタノールプラントへ投入するイネの栽培面積は減少した。さらに、エタノールの生産が減少すれば、エタノールプラントのための電力の消費量も減少するため、電力プラントに投入するイネの栽培面積も減少した。つまり、26年後にエタノール生産量がガソリン需要量に追いつくとともに、ガソリン需要量はその後のGV台数の変化にともなって減少を続けたため、図8に示されるように、26年後をピークにエタノールプラントに投入するイネの栽培面積が極端に減少し、ピークを示す結果となった。

今回のシミュレーションでは、耕作放棄地の利用において、EVのための電気エネルギーを優先的に確保した。したがって、図8に示されるように、電気自動車の普及に伴って電力プラントに投入するイネの栽培面積は増加するが、一方で電気自動車の性能が向上し、また人口の減少による自動車保有台数の減少により、EV全体の消費エネルギーが26年目をピークに減少したと考えられる。一方で、耕作放棄地において、電力プラントに投入するイネの栽培面積の余りの面積をエタノールプラントに投入するイネの生産に充てた。その結果、EVの普及に合わせて、電力プラントに投入するイネの栽培面積が耕作放棄地面積に比べて増加したため、18年後まではGV用のエタノールプラントに投入するイネの栽培面積は減少した。その後、耕作放棄地が増加するなかで、EV全体の消費エネルギーの伸びが減少する結果となり、エタノールプラントに投入するイネの栽培面積が増加した。

また、耕作放棄地の利用は、1年目から3年目にかけて、エタノールプラントに投入するイネの栽培面積と、電力プラントに投入するイネの栽培面積が、急激な増加や減少を示した(図8)。この理由は、シミュレーション開始の年にはEVは全く普及していないため、耕作放棄地によって、GV用のエタノールプラントに投入するイネのみを生産した。よって、1年目にエタノールプラントに投入するイネを、耕作放棄地面積の全てを用いて栽培した。2年目には、1年目のエタノールプラントで必要な電力と、普及したEVのための電力を確保するために、電力プラント用のイネの栽培面積を急激に増加させる必要があった。それらにともない、エタノールプラントへのイネの栽培面積を減少させる必要性が生じた。3年目には、2年目のエタノールプラントへ投入するイネの栽培面積の減少から、エタノールプラントに必要な電力は少なくなり、結果的に電力プラントのためのイネの生産はわずかに減少した。

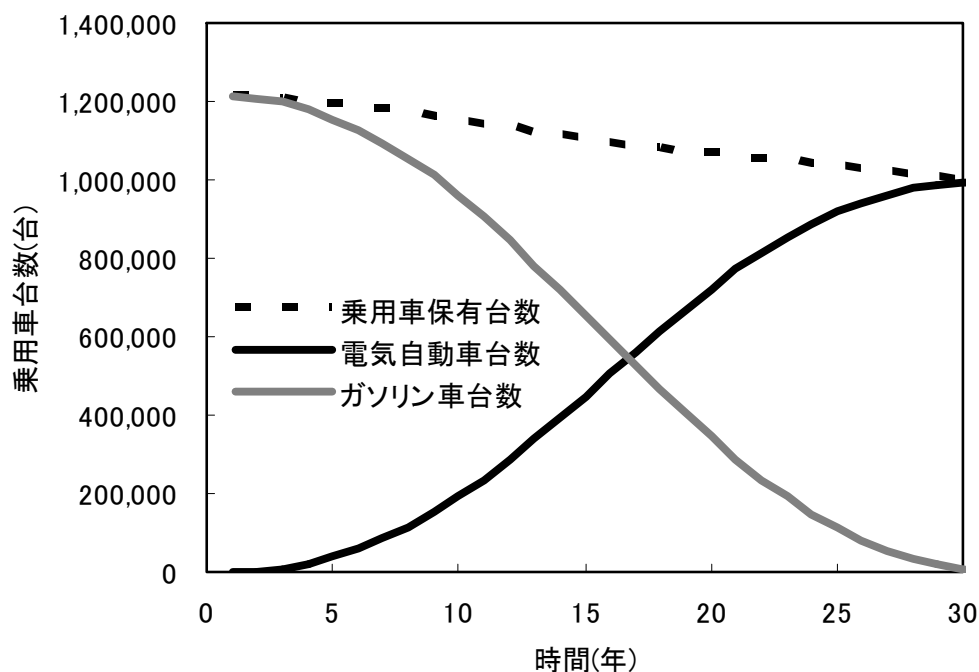


図7 EV(電気自動車)とGV(ガソリン自動車)の台数の増減

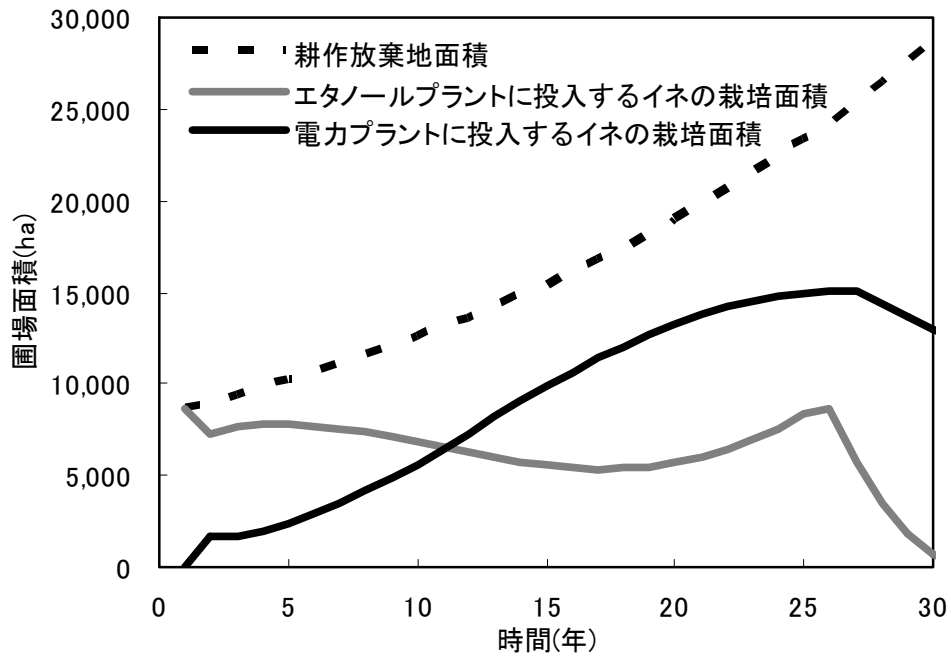


図8 耕作放棄地の利用の変化

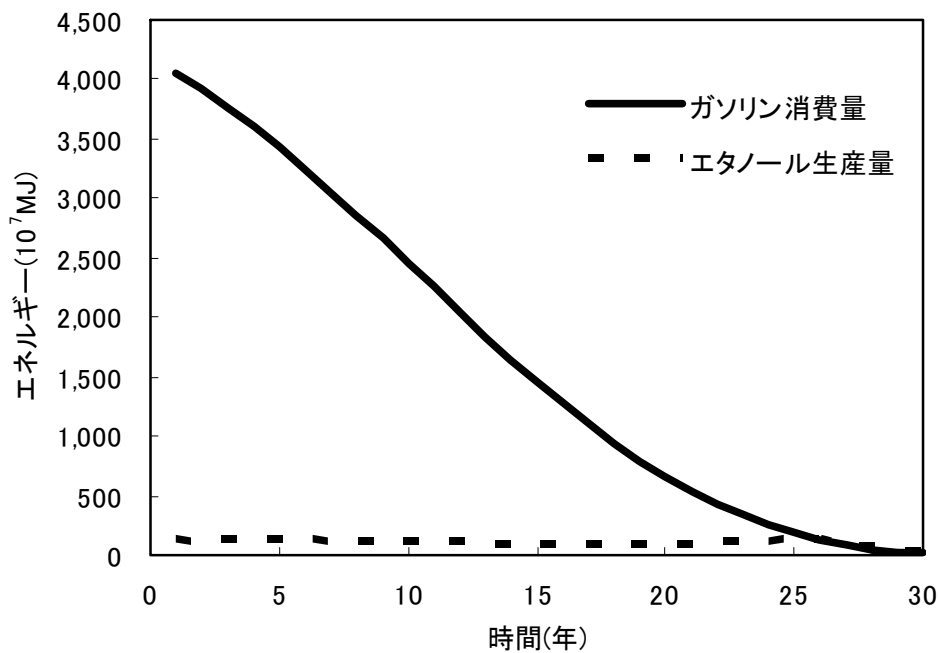


図9 エタノール生産量とガソリン消費量

バイオマス生産、エネルギープラントのための外部からのエネルギー供給において、エネルギーフローモデル内で消費される電力は、1年目 3.2×10^8 MJ、2年目 2.8×10^8 MJ、そして、3年目以降は生産されたエネルギーで賄うことができた。また、ガソリンは1年目に 5.2×10^6 MJ、外部から賄う必要があったが、2年目以降は生産されたエネルギーを優先的に使用することにより賄うことができた。しかし、図10に示されるように、バイオマス生産、エネルギープラントのための外部からのエネルギー供給として、蒸気、軽油、灯油は、外部から賄う必要が示さ

れた。エタノールプラントは、プラント外からの蒸気と電気の供給を必要とする。また、耕作放棄地を利用したイネの栽培には、軽油、灯油が必要となる。したがって、耕作放棄地を利用したイネの栽培面積の変動、およびエタノールプラントへ投入するイネの栽培面積の変動(図8)は、軽油、灯油、蒸気の変動と連動したため、図10に示されるように、26年後に、蒸気、軽油、灯油のピークが示された。また、蒸気のエネルギー量は、他の軽油、灯油のエネルギーに比べて大きいので、図10では、26年後のピークを顕著に表す結果となった。

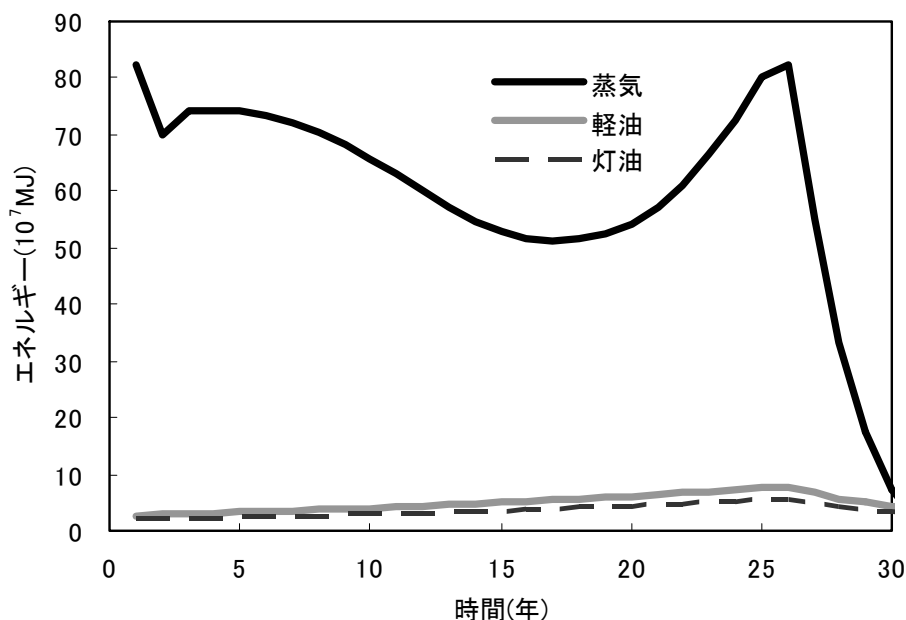


図10 バイオマス生産、エネルギープラントのための外部からのエネルギー供給

さらに、バイオマス生産モデル(図2)における玄米ストックの変化は、図11で示されるように、9月に収穫されたイネが10月にエネルギープラントへ回されるので、エタノールプラントに投入するイネの栽培面積と連動した変化となった。また、エタノールプラントや電力プラントで生産されたエタノールと電力は、11月にストックされ、翌年の5月にバイオマス生産、翌年の10月にエタノールプラントの稼働に、翌年の11月にGVやEVで消費されることとなっている。したがって、たとえば電力ストックは、図12に示されるように、電力プラントに投入されるイネの栽培面積と連動する傾向を示した。また、毎年5月には、電力ストックからバイオマス生産で消費する電力を供給したため、それぞれのピークがわずかに凸形になった。なお、今回のシミュレーションでは時系列のステップを1月単位としたが、実際に電力はストックするのが難しいなどの問題が生じるため、実際の現象に近づけるためには、より小さい時系列のステップを設定する必要がある。

加えて、EVの燃費性能は0.40MJ/kmから30年後に0.17 MJ/km、GVの燃費性能は2.23MJ/kmから30年後に0.94 MJ/kmとなった。また、30年後の耕作放棄地の面積は、現在の栃木県耕地面積128,300haに対して28,755haとなった。以上の結果から、表1に示されたようなバイオマスエネルギーによる自動車用エネルギー代替シナリオ(EVの普及、EVとGVの燃費性能の向上、耕作放棄地面積増加、人口の減少など)において、26年後に、自動車用エネルギーが栃木県内で自給できる可能性が明らかとなった。

本研究では、エネルギーフローモデルをシステムダイナミクスにより作成したことにより、要素間の関係が視覚化され直感的に因果関係を示すことが可能となり、エネルギーフローモデル[4]の数式をそのまま時間的変化の動的モデルとして応用できるだけでなく、エネルギー種類別のエネルギーフロー、バイオマスの種類別のマテ

リアルフローを容易に取り扱うことができた。また、データの変更から、さまざまなシナリオに対するシミュレーションが可能であり、広大なバイオマス生産圃場を有する地域社会において、低炭素社会の将来設計の指針として活用することが可能であると考えられる。今後、このモデルを実際の場面で応用するためには、バイオマス生産に関する季節変動や年変動、食料との競合、社会インフラの経済性を考慮する必要があると考えられる。

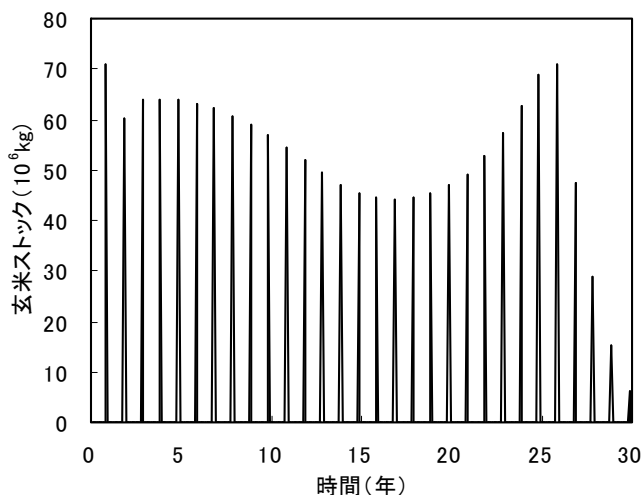


図11 玄米ストック

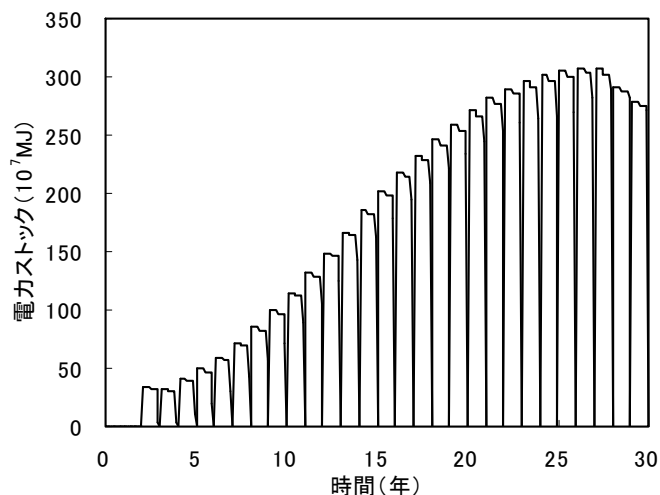


図12 電力ストック

参考文献

- [1]Mitsubishi Motors：三菱自動車が目指す技術，<http://www.mitsubishi-motors.co.jp/corporate/technology/environment/miev.html>，2007年
- [2]TOYOTA：トヨタ自動車，プラグインハイブリッド車の国土交通大臣認定を取得，http://www.toyota.co.jp/jp/news/07/Jul/nt07_037.html，2007年
- [3]堀尾正毅：再生可能エネルギーとバイオマス，現代化学2007年9月，26-30，2007年
- [4]野口良造・小山瑞樹：地域循環型バイオマスエネルギーによる自動車用エネルギー代替の可能性，農業情報研究，(投稿中)
- [5]松本憲洋：Powersim Studio7 簡易マニュアル，POSY Corp, 3-4，2006年
- [6]佐賀清崇・横山伸也・芋生憲司：稲作からのバイオエタノール生産システムのエネルギー収支分析，エネルギー資源学会，29(1):56，2007年
- [7]栃木県：栃木の統計，<http://www.pref.tochigi.jp/pref/toukei/toukei/1182414601763.html>，2008年
- [8]国立社会保障・人口問題研究所：日本の将来推計人口，<http://www.ipss.go.jp/pp-newest/j/newest03/newest03point.pdf>，2006年
- [9]農林水産省：平成20年耕地面積，<http://www.maff.go.jp/toukei/sokuhou/data/kouti2008/kouti2008.pdf>，2008年
- [10]農林水産省：都道府県別統計書09 栃木県，<http://www.e-stat.go.jp/SG1/estat/List.do?bid=000001009910&cycode=0>，2008年
- [11]下野新聞：県内は5年連続前年割れ，2009年1月6日，下野新聞社，2009年
- [12]野口良造・齋藤高弘：インベントリ分析による機械化水稻生産のエネルギー消費量・効率の考察，農業情報研究，17(1)，20-30，2008年
- [13]日本自動車研究所：JHFC総合効率検討結果，http://www.jhfc.jp/data/report/2005/pdf/result_ref_3.pdf，2006年
- [14]NPO法人移動送迎支援活動情報センター：移動・送迎サービスの事故とリスクマネジメントに関する調査，<http://www.e-sora.net/ksts/jikotyousa.pdf>，2006年
- [15]環境省：低炭素社会づくり行動計画，http://www.env.go.jp/press/file_view.php?serial=11912&hou_id=10025，2008年
- [16]経済産業省：乗用車等の新燃費基準(トッランナー基準)の策定について，http://www.enecho.meti.go.jp/policy/saveenergy/data/070702-01_press_nenpi.pdf，2007年