

世界の農地・林地需要とその抑制ポテンシャル

田村 賢人¹・加用 千裕²・佐藤 翼³・橋本 征二⁴

¹学生会員 立命館大学大学院修士課程学生 理工学研究科 (〒525-8577 滋賀県草津市野路東1-1-1)
rv0013ir@ed.ritsumeai.ac.jp

²正会員 東京農工大学助教 農学部 (〒183-0057 東京都府中市晴見町3-8-1)

³非会員 東京農工大学大学院修士課程学生 自然環境保全学専攻 (〒183-0057 東京都府中市晴見町3-8-1)

⁴正会員 立命館大学教授 理工学部 (〒525-8577 滋賀県草津市野路東1-1-1)

世界のバイオマス資源需要量の増加は、土地利用の変化をもたらし、その変化は様々なプラネタリーバウンダリーに影響を与える。バイオマス資源需要がもたらすこれらの影響を明らかにすることは、将来の持続可能なバイオマス資源の利用を検討する上で重要である。本研究では、将来の食料・バイオ燃料・牧草および木材の需要量を推計し、その生産に必要な農地・林地の推計とその削減ポテンシャルについて検討を行った。その結果、農地面積は最大で4.5 Gha必要になると推計され、要拡大農地面積は、最大576 Mhaであった。また、将来の林地面積需要量は最大で4.6 Ghaとなり、2010年の実際の林地面積を上回る結果となった。肉食の削減や食品廃棄物の削減によって農地需要はある程度削減できるものの、土地利用を持続可能なものとするためには、木材需要の削減について更に検討する必要がある。

Key Words : SSPs(Shared Socioeconomic Pathways), biomass, land use, Planetary Boundaries

1. はじめに

世界のバイオマス資源需要量の増加は、農地や林地の需要を増大させ、それが土地利用の変化をもたらし、生物多様性の減少、窒素・リンの流出、淡水の利用、気候変動等の様々なプラネタリーバウンダリー¹⁾に影響を与える。バイオマス資源需要がもたらすこれらの影響を明らかにすることは、将来の持続可能なバイオマス資源の利用を検討する上で重要である。筆者らは、これまでに、食料・バイオ燃料に関わる将来の農地面積の需要量の推計を行った。その結果、2010年からの要拡大農地面積は2100年までに最大で400Mhaとなり、プラネタリーバウンダリーを脅かす値となった²⁾。

しかしながら、上記で検討している農地面積は、作物生産のための耕作地面積のみを指し、牧草地については考慮していない。2010年現在、世界の農地のおよそ7割を牧草地が占め³⁾、今後も、経済成長にともなう食生活の変化により畜産物の需要増加が予想されることから、牧草地を含めた農地面積需要量はさらに大きくなると考えられる。また、木材の需要は森林の伐採を招き、土地利用の変化の一因となっている。

本研究では、将来の畜産物需要量をもとにその生産に必要な牧草地の需要量を推計するとともに、将来の木材

需要量およびその生産に必要な林地の需要量を推計する。また、農地・林地面積の抑制ポテンシャルについて検討する。

2. 方法

(1) 研究の枠組み

本研究では、気候変動に関する政府間パネル (IPCC) による社会経済シナリオ (Shared Socioeconomic Pathways: SSPs) に基づいて2010年から2100年まで5年毎に推計を行った。SSPsでは、緩和策に対する困難度と適応策に対する困難度の組み合わせで5つのシナリオ (SSP1~SSP5) が設定され、SSP1: Sustainability (持続可能), SSP2: Continuation (過去の延長), SSP3: Fragmentation (分断), SSP4: Inequality (格差), SSP5: Conventional Development (在来型発展) の各シナリオが定義されている。このシナリオのデータベース⁴⁾では、これらのシナリオの、2010年から2100年までの各国の人口とGDPのシナリオを得ることができる。本研究では、これらすべてのシナリオについて、検討を行った。

対象地域は、上記シナリオから、人口のデータが得られる187の国と地域とし、将来における、作物需要量、

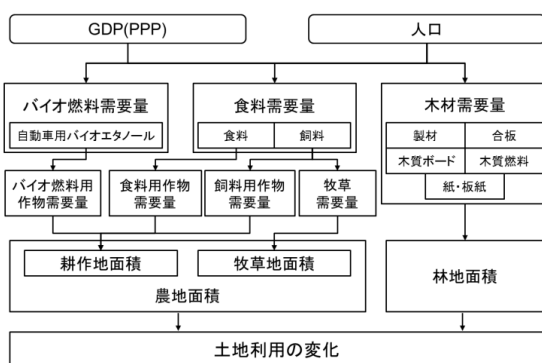


図-1 本研究の推計フロー

牧草需要量、木材需要量を推計し、それらを生産するのに必要な面積すなわち農地と林地の算出を行った。本研究のフローを図-1に示す。

(2) 農地面積需要量の推計

a) 耕作地面積需要の推計

田村ら²⁾の方法にもとづき将来の食料・飼料・およびバイオ燃料需要量を最新のデータに更新して推計しなおし、それらを生産するのに必要な作物の需要量を算出した。次に、その作物を生産するために必要な農地面積に換算し、それを耕作地需要量とした。

b) 牧草地需要量の推計

田村ら²⁾で推計した世界の187の国・地域の食料需要量をもとに、生産に牧草を必要とする牛肉、牛乳を対象に、生産するのに必要な牧草の量と牧草地の面積を推計した。

まず、 k 国の t 期における畜産物 i の需要量を満たすための牧草の需要量 $DM_{k,i}(t)(\text{kg DM})$ を下記の式(1)で算出した。

$$DM_{k,i}(t) = W_{k,i}(t) \cdot NE_{k,i} \cdot FM_{k,i} / ED_{k,i} \quad (1)$$

ここで、 $W_{k,i}(t)$ は k 国の t 期における畜産物 i の需要量 (kg) ⁴⁾、 $NE_{k,i}$ は k 国における畜産物 i 1kgあたりの家畜 i の

エネルギー需要量 (MJ/kg) ⁵⁾、 $FM_{k,i}$ は k 国における家畜 i の飼料のうちの牧草摂取割合 $(-)$ ⁶⁾、 $ED_{k,i}$ は k 国における牧草1kgあたりの家畜 i の摂取エネルギー量 (MJ/kg DM) ⁷⁾である。 $NE_{k,i}$ 、 $FM_{k,i}$ および $ED_{k,i}$ についてはWirsenius⁵⁾を参考に、187の国・地域を7つの地域に整理し、Wirsenius⁵⁾における1993年の値で一定値として推計を行った。また、 $ED_{k,i}$ に関して、Wirsenius⁵⁾では「Cropland pasture」「Permanent pasture, oversown」「Permanent pasture, native」の3つの牧草地が示されているが、「Permanent pasture, oversown」が最も現状の牧草地に近いので、その値を利用した。各地域における各パラメータの値を表-1に示す。

次に式(1)で求めた $DM_{k,i}(t)$ から、 k 国の t 期における家畜 i の牧草地需要量 $GL_{k,i}(t)$ を下記の式(2)により推計した。

$$GL_{k,i}(t) = DM_{k,i}(t) / Y_k / 1000 \quad (2)$$

ここで、 Y_k は k 国の牧草地1haあたりの牧草供給ポテンシャルの平均値 (Mg DM/ha) ⁸⁾である。最後に、式(3)により各国の牧草地需要量を合計することにより世界の牧草地需要量を算出した。

$$GL(t) = \sum_k \sum_i GL_{k,i}(t) \quad (3)$$

c) 農地面積需要量の算出

前項a)、b)で求めた耕作地面積需要量と、牧草地面積需要量を足し合わせることで、農地面積需要量とした。

(3) 林地面積需要量の推計

a) 木材需要量の推計

本研究では、Kayo et al.⁹⁾に基づいて、木材を製材、合板、木質ボード、紙・板紙、木質燃料の5用途に分けて需要量の推計を行った。各用途ごとに、OECDの33ヶ国とBRIICSの6ヶ国の合計39ヶ国を対象として、1人あたり購買力平価GDP⁷⁾を説明関数、1人あたり木材需要量を被説明変数として回帰分析を行い、全ての回帰係数の統計的有意性が確認できたモデルの中で最も決定係数の高いものを採用した。具体的には、製材、木質燃料の2用途

表-1 牧草需要量の推計における各係数の値

地域	牛乳			牛肉		
	$NE_{k,i}$ (MJ/kg)	$FM_{k,i}$ (-)	$ED_{k,i}$ (MJ/kg DM)	$NE_{k,i}$ (MJ/kg)	$FM_{k,i}$ (-)	$ED_{k,i}$ (MJ/kg DM)
東アジア	10.96	0.63	7.7	313	0.65	7.7
東ヨーロッパ	9.95	0.50	8.4	160	0.38	8.4
ラテンアメリカおよびカリブ海諸国	13.2	0.76	7.4	264	0.74	7.4
北アフリカおよび西アジア	14.32	0.63	8.2	285	0.65	8.2
北アメリカおよびオセアニア	6.90	0.19	8.3	132	0.46	8.3
南アジアおよび中央アジア	13.82	0.37	7.4	499	0.40	7.4
サハラ以南アフリカ	29.1	0.69	7.3	373	0.69	7.3
西ヨーロッパ	7.42	0.21	8.4	126	0.40	8.4

では式(4)のように一次関数、合板、木質ボード、紙・板紙の3用途では式(5)のように上に凸の2次関数の回帰分析の結果を用いて推計した。

$$DW_{k,j}(t) = \alpha_1 GDP_{PC,k}(t) + \beta_1 \quad (4)$$

$$DW_{k,j}(t) = \alpha_2 \{GDP_{PC,k}(t)\}^2 + \beta_2 GDP_{PC,k}(t) + \gamma_2 \quad (5)$$

ここで、 $DW_{k,j}(t)$ は k 国の t 期における木材用途の1人1年あたり需要量(m^3 /人/年)、ただし紙・板紙は(kg /人/年)、 $GDP_{PC,k}(t)$ は k 国の t 期における購買力平価1人あたりGDP(2005年国際ドル)、 α_1 、 β_1 、 α_2 、 β_2 、 γ_2 はパラメータを表す。

次に、式(4)(5)で求めた木材需要量に各国各期における人口 $P_k(t)$ を乗ずることで、各国の各期における用途別の木材需要量 $DW_{Total,k,j}(t)$ (m^3)を算出した。

$$DW_{Total,k,j}(t) = DW_{k,j}(t) \cdot P_k(t) \quad (6)$$

さらに、丸太換算係数 $CF_k(m^3/m^3)^{8)}$ を乗ずることにより木材需要量の丸太換算量 $DL_k(m^3)$ を算出した。

$$DL_{k,j}(t) = DW_{Total,k,j}(t) \cdot CF_j \quad (7)$$

ただし紙・板紙については製品のすべてが木材由来ではないため丸太換算係数(m^3/kg)を乗じるとともに、木材パルプ利用率⁹⁾も考慮して丸太換算量 $DL_k(m^3)$ を算出した。

$$DL_{k,j}(t) = DW_{Total,k,j}(t) \cdot CF_j \cdot RWP_k \quad (8)$$

ここで、 RWP_k は k 国の木材パルプ利用率⁹⁾を表し、2008年の値で固定して用いた。また、木材パルプ利用率が不明の国・地域については、世界平均値を利用した。

b) 林地面積需要量の推計

前項a)で求めた丸太換算の木材需要量を林地の木材成長量¹⁰⁾(m^3/ha /年)で除すことにより、林地面積需要量を算出した。本研究では、木材の貿易を考慮できていないことから、各国の需要量と供給量のずれが生じるため、各国の林地の木材成長量を用いるのは不適切であると考えられる。そこで、本研究では木材成長量の世界平均を用いて算出を行った。

(4) 林地面積需要量削減ポテンシャルの推計

上記方法で求めた推計結果をもとに、将来削減が期待できる林地面積需要量、すなわち削減ポテンシャルの推計を行う。林地面積需要量の削減方法には大きく分けて2つの方法が考えられる。一つ目は、農地面積需要量を削減することにより、将来の農地需要拡大に伴う林地の土地変化を削減する方法である。二つ目は、将来の木材需要量を削減することにより、利用する林地面積を減らす方法である。本研究では、一つ目の削減方法に対して、肉食需要の変化、食品廃棄物の削減による農地の削減ポ

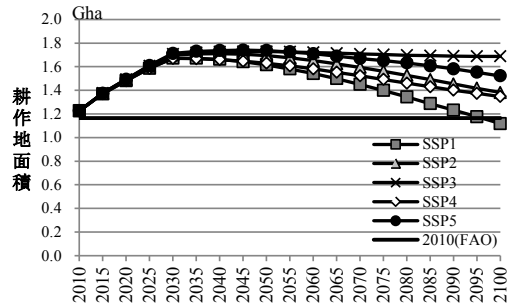


図-2 耕作地需要量

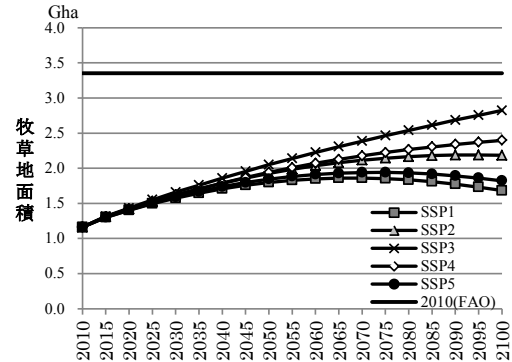


図-3 牧草地需要量

テンシャル、二つ目の削減方法に対して紙・板紙への木材需要量を削減した際の林地利用面積の削減ポテンシャルについて検討を行う。

3. 結果と考察

(1) 農地面積需要量

a) 耕作地面積需要

図-2に耕作地面積需要量の推計結果を示す。耕作地面積は最大で1.74 Gha (SSP5, 2045年) となりFAOSTATにおける2010年の実際の収穫面積 (1.16 Gha) から約1.4倍となる結果となった。すべてのシナリオにおいて、2030年ごろまで増加し、その後SSP3ではほぼ横ばいにその他のシナリオでは、人口の減少と、作物の単位面積当たりの収穫量 (収率) の上昇により、耕作地面積需要量は減少する結果となった。本研究において、収量に関しては、将来においても大きく改善されるシナリオで推計を行っているため、図-2の推計結果よりもさらに多くの耕作地面積が必要となる可能性が考えられる。

b) 牧草地面積需要量

図-3に牧草地面積需要量の推計結果を示す。牧草地面積需要量は最大で2.82 Gha (SSP3, 2100年) と推計され、推計した2010年の1.12 Ghaから、約2.4倍に増加すると推

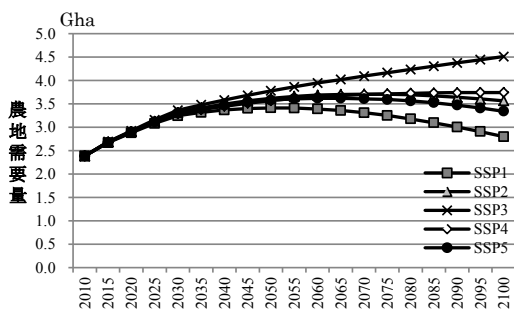


図4 農地面積需要量

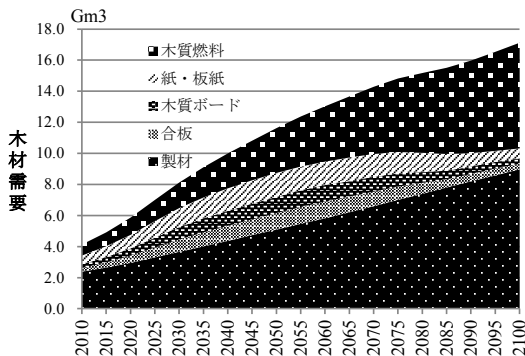


図5 木材需要量 (SSP5)

計された。本研究では、牧草需要量を面積に変換する際に、牧草地1haあたりの牧草の供給ポテンシャル（最大値）を用いているため最大の牧草地面積需要量においても、2100年までの期間で、現在の面積を拡大する必要はないという結果となった。しかしながら、供給ポテンシャル最大限まで牧草を利用した場合の砂漠化や土地の劣化等の環境影響は不明であるため、今後、その考慮は必要である。

c) 農地面積需要量

図4に耕作地面積需要量と牧草地面積需要量の結果を合わせた農地面積需要量の結果を示す。2100年までの推計期間において最も農地面積需要量が大きくなるのはSSP3であるという結果となった。SSP3は、緩和策、対応策ともに導入には大きな困難を伴う社会のシナリオであり、途上国では人口増加は止まらず、所得も増加しない¹⁰⁾とされている。先進国、途上国ともに経済発展が進むSSP5に比べてSSP3の農地面積需要量が大きくなっていることから、農地面積需要量に関しては人口増加が主な因子になっていると考えられる。

(2) 林地面積需要量

a) 木材需要量

将来の木材需要量が最大となったSSP5の結果を図5に示す。SSP5における木材需要量は最大で、17.1 Gm³とな

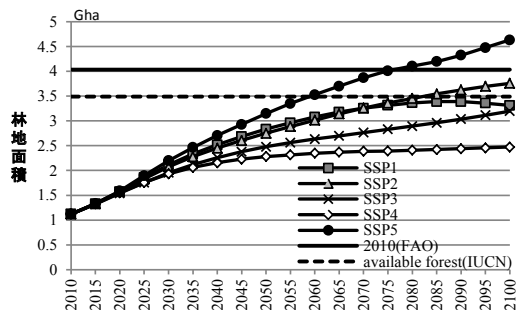


図6 林地面積需要量

り、2010年から約4.1倍となった。

用途別にみると、製材が半分程度を占め、2010年の1.28 Gm³から、およそ3.7倍の4.80 Gm³まで増加すると推計された。紙・板紙、木質ボード、合板に関しては、2010年以降一度増加するものの、SSP5においては、2050年付近でピークを迎え、その後、減少する結果となった。その他のシナリオでも、SSP1で2060年、SSP2で2070年でピークを迎え、その後減少する結果となり、SSP4では2050年まで増加をし、その後横ばい傾向、SSP3は2100年までの期間において、増加し続ける結果となった。また、SSP5においては、経済成長と共に木質燃料の需要が大幅に増加し、丸太換算の需要量は、2010年の0.72 Gm³から、2100年の6.80 Gm³まで約9.5倍の需要量となり、2010年時点で木材需要全体の2割程度を占めていたが、2100年にはおよそ4割まで需要がのびる結果となった。これは、1人あたり購買力平価GDPと木質燃料需要量の関係において一次曲線が最もフィットしたためであるが、経済成長に伴って木質燃料の需要が高まり続けるかどうかについては、検討の余地がある。

b) 林地面積需要量

木材需要量をもとに算出した林地面積需要量を図6に示す。今回算出した林地面積需要量は丸太換算の木材需要からの換算の際、樹木の成長量を用いているため、木材の需要により、伐採されて、荒地になる面積ではなく、その時点での需要をそれ以降も賄うために人為的な干渉が加わる面積を表している。本研究においては、SSP5における、林地の需要量が最も大きく4.63 Ghaとなり、FAOSTATにおける2010年の林地面積である、4.03 Ghaを2080年付近に超える結果となった。SSP5に次いで大きくなると予測されたSSP2においては、現在の林地面積を上回ることはないものの、IUCNにおける保護されている林地の面積（Protected land）を除いた林地の利用可能性を上回る結果となった。その他のシナリオでも将来にわたって林地面積需要量は増加し、最も需要量の少ないSSP4でも、2100年には2010年の約2.2倍まで需要量が増加する結果となった。人口増加の大きいシナリオである

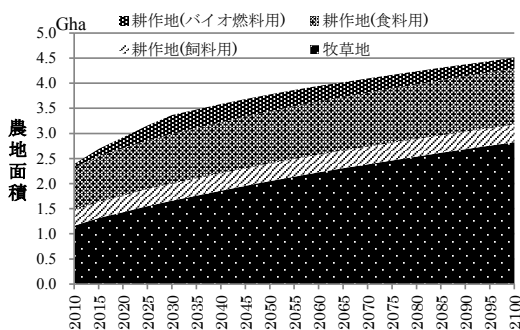


図-7 用途別農地需要量 (SSP3)

SSP3よりも、経済成長の大きいシナリオである、SSP5やSSP2の方が将来の林地面積需要量が大きくなったことから、林地面積需要増加の主な要因は経済成長であると考えられる。

(3) 林地面積需要量抑制ポテンシャル

a) 農地面積需要量削減ポテンシャル

将来の農地面積需要量が最も大きいと推計されたSSP3シナリオの用途別農地面積需要量を図-7に示す。バイオ燃料用の農地はごく一部で食料に關係する農地が需要の大部分を占めた。飼料用の作物用の耕作地と牧草地を合わせた、飼料に關する農地は全体の約7割を占め、肉食を削減することで多くの農地を削減することが可能であることがわかる。仮に、現在の先進国の食料消費パターンから、10%の肉食を削減した場合、最大およそ320 Mhaの農地が削減できると推計された。要拡大農地面積が最大である、SSP5の2045年における576 Mhaを肉食の削減だけで削減する場合、その期間において、現在の先進国の摂取レベルから、27%の肉食の削減が必要である。次に、食品廃棄物に關する考察を行う。FAOSTAT³⁾によると、2010年において、世界全体でおよそ4.52 Gtの食品廃棄物が発生しており、これはFAOSTAT³⁾における食料需要量の8.6%を占める。仮にすべての食料廃棄物を削減した場合、最大500 Mhaの農地が削減できると推計された。しかしながら、技術面・経済面から、すべての食料廃棄物を削減することは、不可能である。Foresight¹³⁾によると、イギリス政府は、2050年までに食品廃棄物を半減することを目標としており、この値は現実的で実現可能な値だとされている。仮にこの目標を全世界にあてはめて考えると、将来、最大250 Mhaの農地を削減することができる。これにより、要拡大農地面積をプラネタリーバウンダリー（400Mha）の範囲内に収めることができるが、現状の農地面積を拡大せずに食料の生産を行うためには、他の対策と組み合わせて実施する必要がある。

b) 林地面積需要量削減ポテンシャル

本研究においては、木材5用途のうち、最も削減が容易である紙・板紙用の木材の削減について検討を行った。紙・板紙の削減方法としては、紙・板紙の需要量を減らす方法、木材以外の原料を利用して製造する方法、再生紙を利用する方法等が考えられるが、本研究では、方法は問わず、紙・板紙製造用の木材需要量を半減させた場合の削減ポテンシャルについて検討した。その結果、林地面積の削減ポテンシャルは最大でも、90 Mhaと推計された。これは、最も林地面積需要量がすくないSSP4の需要増加量1120 Mhaの約6.7%にしか満たない。また、SSP5の林地面積需要量は利用可能な林地を最大1140 Mha、SSP2では270Mha上回っているため、林地の保護を確実にするためには、更なる木材需要の削減が必要である。

4. おわりに

本研究では、2100年までの長期の期間にわたって、IPCCの作成した社会経済シナリオにもとづき、バイオ燃料・食料・飼料に關わる作物と牧草、5用途における木材需要の推計を行い、それらの生産に必要な農地・林地面積需要量の推計を算出した。また、それらの需要の削減ポテンシャルについて、いくつかの条件をもとに推計を行った。その結果、将来、耕作地面積は最大で1.74 Gha、牧草地面積は最大2.82 Gha必要であると推計され、要拡大農地面積は、最大576 Mhaであった。また、将来の林地面積需要量は4.63 Ghaで、2010年の実際の林地面積を上回る結果となった。

農地・林地面積需要の削減ポテンシャルとしては、肉食の10%の削減により320 Mha、食品廃棄物の半減により250 Mhaの農地が削減できると推計された。推計された要拡大農地面積、最大576 Mhaを完全に削減するためには27%の肉食の削減が必要となる。また、食品廃棄物の半減により、要拡大農地面積をプラネタリーバウンダリーの範囲内に収めることはできるが、これだけでは農地拡大を抑えることはできないため、その他の対策との組み合わせが必要となる結果となった。また、紙・板紙に利用する木材を半減することで、最大90 Mhaの林地面積需要が削減できるという結果となった。この値は、林地面積需要量のごく一部であるため、林地の保護を確実にするためには、更なる木材需要の削減のための対策が必要である。

なお、本研究においては、バイオ燃料・食料・飼料・木材の輸出入は考慮していないため、自国で消費されたバイオ燃料・食料・飼料・木材は、すべて国内で生産されたと仮定している。実際は各地域で消費されるバイオ燃料・食料・飼料・木材には外国で生産されたものも含まれるため、今後は貿易に關する考察も必要である。ま

た、林地に関しては、紙・板紙の削減のみでは林地の保護には不十分であるため、その他の用途の木材の需要削減に関してもこれからの課題である。

謝辞：本研究は、環境省環境研究総合推進費（S-11-2）による成果である。ここに記して深謝する次第である。

参考文献

- 1) Rockstrom, J. et al.: Planetary boundaries: Exploring the safe operating space for humanity, *Ecology and Society*, 14(2), art.32, 2009
- 2) 田村ら：食料・バイオ燃料に関わる将来の農地需要とその抑制案，第 42 回環境システム研究論文発表会講演集，pp.33-38，2014
- 3) FAO: FAOSTAT, <http://faostat.fao.org/>, accessed in Jun 2014
- 4) IISAS: SSP Database, <https://secure.iiasa.ac.at/web-apps/ene/SspDb/dsd?Action=htmlpage&page=about>, accessed in Jul 2014.
- 5) Wirsenius, S: Human Use of Land and Organic Materials: Modeling the Turnover of Biomass in Global Food System, Chalmers University of Technology and Goteborg University, 2000
- 6) C, Kayo et al.: Socioeconomic development and wood consumption, *Journal of Forest Research*, 20(3), pp.309-320, 2015.
- 7) World Bank : <http://data.worldbank.org/>, accessed in Jun 2014.
- 8) FAO: GENEVA TIMBER AND FOREST DISCUSSION PAPER 49—FOREST PRODUCT CONVERSION FACTORS FOR THE UNECE REGION—, 2010.
- 9) RISI: Global Industry Statistics Database, 2009.
- 10) FAO: BULL, G, MABEE, W, and SCHARPENBERG, R, Global fibre supply model, 1998
- 11) 藤森真一郎，増井利彦：将来の気候変化を評価するための温室効果ガス排出経路と社会経済シナリオ，*日本エネルギー学会誌*，92，196-203，2013.
- 12) IUCN : Guidelines for Protected Area Management Categories. IUCN and World Conservation Monitoring Centre (WCMC), Gland, Switzerland and Cambridge, UK. , 1994.
- 13) Foresight : The future of food and farming: challenges and choices for global sustainability. Final project report. United Kingdom Government Office for Science, London, 2011

(2015. 8. 28受付)

GLOBAL DEMAND FOR AGRICULTURAL AND FOREST LAND AND ITS SAVING POTENTIAL

Kento TAMURA, Chihiro KAYO, Tsubasa SATO, and Seiji HASHIMOTO

Increasing global demand for biomass resources will affect on change in land-use and various other planetary boundaries. Quantitative linkage between biomass resource use and planetary boundaries needs to be taken into account in assessments of sustainable biomass resource use. In this study, we developed models for estimating the future demand for crops, grasses and timber and for estimating the demand for agricultural and forest land: and we discussed potential measures to save the demand for land. Results show that the demand for agricultural land could reach 4.5 Gha, and maximum 567 Mha of agricultural land would be required additionally in the future. Also, 4.6 Gha of forestland would be needed at most, which is more than the forestland in 2010. We can reduce a certain amount of agricultural land by reducing meat consumption and food waste. However, we need to examine further the reduction potential of wood demand for sustainable land use.