

Technical Manual for Land Use Allocation model

April, 2015

NIES

Tomoko Hasegawa et al.

Table of Contents

1. 土地利用分配モデルについて	- 3 -
1.1 基本的な考え方	- 3 -
1.2 定式化	- 3 -
1.3 パラメータ推定	- 7 -
1.4 用いるデータ	- 16 -
1.5 温室効果ガス排出量推計（オプション）	- 19 -
1.6 バイオマス供給関数の作成方法	- 21 -
1.7 よくある質問（FAQ）	- 22 -
1.8 今後の課題	- 22 -
1.9 記号一覧	- 22 -
2. Reference	- 24 -

1. 土地利用分配モデルについて

1.1 基本的な考え方

- 本モデルでは、土地所有者が経済合理性に基づき、各セルでの生産により得られる収益を最大化（費用最小化）するような土地利用の分配を決定する。ここで、収益を売上－費用と定義する。
- 単一の国・地域ごとに最適化問題を解く。本モデル内では地域を越えたやり取りは考えない。
- 人間の生産活動に関わる土地利用の需要は外生的に与える。すなわち、農畜林産物を生産に要する土地の需要を外生的に与え、その需要を満たす土地利用の分布を探索する。人間の生産活動に関わらない土地はそれ以外とする。
- 逐次モデルである。毎期の土地利用分布の結果を翌期に渡す。
- 地理情報は $0.5^\circ \times 0.5^\circ$ のセルである。
- 各セルでの単位面積当たりの潜在的生産量（以下、生産力とよぶ）は、生物物理的条件を考慮して算定される。

1.2 定式化

下記の定式は、特筆しない限り、ある年、ある国・地域についての定式を示す。

総収益を最大化する。

$$\Phi = \sum_{l,g} Z_{l,g} \rightarrow \text{Max.} \quad (\text{EQOBJ})$$

売上から費用（土地利用変換費用を含む）を引いたものを、収益と定義する。前期からの土地利用の転換に対して、土地利用変換費用 $a_{l,g}$ を与える。土地利用変換費用は、土地利用面積の増加分で計上する。

$$Z_{l,g} = Y_{l,g} \cdot \overline{S_{l,g}} - \overline{a_{l,g}} \cdot \Delta YP_{l,g}, \quad g \in G, l \in L \quad (\text{EQPRF}(l,g))$$

$a_{l,g}$: 土地転換費用(US\$)

土地利用変換費用を増加分で計上するために、土地利用変化分を増加分と減少分に分ける。

$$Y_{l,g} - \overline{Ypre_{l,g}} = \Delta YP_{l,g} - \Delta YN_{l,g} \quad (EQYPN(l,g))$$

$\Delta YP_{l,g} (>0)$: 土地利用面積の増加分

$\Delta YN_{l,g} (>0)$: 土地利用面積の減少分

セル内の各土地利用の面積のシェアが負値をとらないという制約条件を課す。

$$Y_{l,g} \geq 0, \quad g \in G, l \in L \quad (YLO(l,g))$$

セル内の各土地利用の面積がセルの面積を超えないという制約条件を課す。

$$\sum_l Y_{l,g} \leq 1, \quad g \in G, l \in L \quad (EQTOTY(g))$$

各土地利用の土地の需要（外生）と面積 $LDM_{l,l}$ もしくは面積率が等しくなるという制約条件を課す。

$$\sum_g \overline{GA_g} \cdot Y_{l,g} = \overline{LDM_l}, \quad l \in L \cap l \neq prmfrs \cap l \neq havfrs \cap l \neq afr \quad (EQLDM(l))$$

$$\sum_{l' \in mapl(l',l)} \sum_g \overline{GA_g} \cdot Y_{l',g} = \overline{LDM_l}, \quad l \in L \cap l \neq prmfrs \cap l \neq havfrs \cap l \neq afr \quad (EQLDM2(l))$$

木材生産用森林から切り出される炭素ストック量が、木材需要の炭素換算量（外生）と等しくなるという制約条件で与える。

$$\sum_g \overline{CS_{l,g}} \cdot Y_{l,g} \cdot \overline{GA_g} = \overline{CDM_l}, \quad l = havfrs \quad (EQCDM(l))$$

$CS_{l,g}$: セル g の土地利用区分 l での炭素ストック量 [MgC/ha]

植林により吸収される炭素フロー量が、植林によって吸収される炭素量（外生）と等しくなるという制約条件で与える。

$$\sum_g \overline{CF_{l,g}} \cdot Y_{l,g} \cdot \overline{GA_g} = \overline{CDM_l}, \quad l = afr \quad (EQCDM(l))$$

$CF_{l,g}$: セル g の土地利用区分 l での炭素フロー量(純吸収量, 吸収を負) [MgC/ha]

人間の生産活動に関わらない土地は、全土地から人間の生産活動に関わる土地を除いた残りとする。すなわち、森林・草地は、全体から森林・草地以外を除いた土地とする。

$$Y_{prmsec',g} = 1 - \sum_{l \neq prmsec} Y_{l,g} \quad (EQYPRMSEC)$$

保護区が他の土地に転換することを防ぐため、森林・草地の面積率は保護区面積率を下回らないという制約を課す。

$$Y_{prmsec',g} \geq \overline{Y_{protect}_g} \quad (EQYPROTECT(G))$$

$Y_{protect}_g$: 保護区面積率

一度植林するとその後伐採しないという想定のもと、セル内の植林の面積率が前年より減少しないよう制約を課す。

$$Y_{l,g} - \overline{Y_{pre_{l,g}}} \geq 0 \quad \perp \quad R_{SAFR_{l,g}} > 0, \quad l = afr \quad (EQYAFR)$$

以下で、 $Y_{prmsec',g}$ を牧草地、森林、草地に区分する。

牧草地

牧草地は、分布を決定づけるメカニズムに関する十分な情報がないため、単純に基準年の参照土地利用分布に追加的な土地の増減を割り当てることにより、需要を満たす分布を得るとする。

$$sfpas0 = \frac{LDM_{pas'}}{\sum_g Y_{base_{pas',g}}}$$

$$Y_{pas',g} = \begin{cases} Y_{base_{pas',g}} \cdot sfpas & , if Y_{prmsec',g} \geq Y_{base_{pas',g}} \cdot sfpas0 \\ Y_{prmsec',g} & , if Y_{prmsec',g} < Y_{base_{pas',g}} \cdot sfpas0 \end{cases}$$

まず、基準年に牧草地が存在するセルに追加的な変化を一律に割りあてる。下記 Loop1 の 4 式を $ADDpas = 0$ 、もしくは、 $Ypas_nfull = 0$ となるまで繰り返す。前者は牧草地需要面積がすべて割り当てられたことを示し、後者は、基準年で牧草地が存在するセルに余剰の土地 $Y_{prmsc',g}$ が存在しなくなることを示す。

Step1: 選択されたセル内での牧草地変化

$$ADDpas = LDM_{pas'} - \sum_g Y_{pas',g} \quad (\text{Loop1-1})$$

$ADDpas(\geq 0)$: 追加する牧草地面積

$$Ypas_nfull = \sum_{g \text{ if } 0 < Y_{pas',g} < Y_{prmsc',g}} (GA_g \cdot Y_{pas',g}) \quad (\text{Loop1-2})$$

$Ypas_nfull$: 牧草地が存在するセルで、かつ、余剰の土地があるセルでの牧草地面積

$$sfpas = \frac{ADDpas}{Ypas_nfull} \quad (\text{Loop1-3})$$

$$Y_{pas',g} = \begin{cases} Y_{pas',g} \cdot (1 + sfpas) & , \text{if } Y_{prmsc',g} - Y_{protect_g} \geq Y_{pas',g} \cdot (1 + sfpas) \\ Y_{prmsc',g} - Y_{protect_g} & , \text{if } Y_{prmsc',g} - Y_{protect_g} < Y_{pas',g} \cdot (1 + sfpas) \end{cases}$$

(Loop1-4)

$ADDpas \neq 0$ の場合、Step2 に進む。

牧草地拡大の対象セルとして、基準年には牧草地が存在しないが基準年に牧草地が存在するセルに隣接し、かつ、炭素ストックがあるセルを選択する。

Step2: 隣接セルへの牧草地拡大

$$ADDpas = LDM_{pas'} - \sum_g Y_{pas',g} \quad (\text{Loop2-1})$$

$$PNBPAS_g = \sum_{g' \text{ if } Y_{pas',g'} > 0} WG_{g,g'}, \quad \text{if } Y_{pas',g} = 0 \text{ and } CDT_g > 0 \quad (\text{Loop2-2})$$

$PNBPAS_g$: 当該セルには牧草地が存在しないが、隣接するセルには牧草地が存在す

る、炭素ストックがあるセルのフラグ

$$AREA_npas = \sum_{g \text{ if } PNBPAS_g} (GA_g \cdot (Y_{prmsc',g} - Y_{protect_g})) \quad (\text{Loop2-3})$$

$AREA_npas$: 牧草地になるポテンシャル面積

$$sfpas2 = \frac{ADDpas}{AREA_npas} \quad (\text{Loop2-4})$$

$$Y_{pas',g} = \begin{cases} Y_{prmsc',g} \cdot sfpas2 & , \text{if } PNBPAS_g > 0, 0 < sfpas2 \leq 1 \text{ and } Y_{prmsc',g} - Y_{protect_g} \geq Y_{prmsc',g} \cdot sfpas2 \\ Y_{prmsc',g} - Y_{protect_g} & , \text{if } PNBPAS_g > 0, 0 < sfpas2 \leq 1 \text{ and } Y_{prmsc',g} - Y_{protect_g} < Y_{prmsc',g} \cdot sfpas2 \\ Y_{prmsc',g} - Y_{protect_g} & , \text{if } PNBPAS_g > 0, sfpas2 > 1 \end{cases}$$

(Loop2-5)

$ADDpas > 0$ 、かつ、 $sfpas2 \leq 1$ となった場合、 $ADDpas = 0$ となるまで、Step1, Step2を繰り返す。

森林・草地

森林・草地は炭素ストック量に基づいて区分する。森林と草地の境界基準 \overline{CSB} は基準年で森林面積が統計値とあうよう決定する。

$$Y_{prmfrc',g} = Y_{prmsc',g} \text{ if } \overline{CS_{l,g}} \geq \overline{CSB}$$

$$Y_{gl',g} = Y_{prmsc',g} \text{ if } \overline{CS_{l,g}} < \overline{CSB}$$

ただし、

\overline{CSB} : 森林と草地の境界基準となる炭素ストック量 [MgC/ha]

1.3 パラメータ推定

(1) $WG_{g,g'}$

$WG_{g,g'}$ はセル g, g' が隣接するかどうかを表す行列である。

$$WG_{g,g'} = \begin{cases} 1 & \text{if } g \text{ 番目のセルと } g' \text{ 番目のセルが隣接する} \\ 0 & \text{if } g \text{ 番目のセルと } g' \text{ 番目のセルが隣接しない} \end{cases}$$

		j				
		1	2	720		
i	1	g=1	g=2	g=3	...	g=720
	2	g=721	g=722	g=723	...	g=1440
		g=1441	g=1442	g=1443		
				...		
	360					
		赤いセルにとって隣接するセル				

図 1 セル番号と隣接するセルのイメージ

これは次のように算定できる。

$$WG_{g,g'} = \sum_{(i,j) \text{ if } MGL_{g,i,j}} \sum_{(i',j') \text{ if } MGL_{g',i',j'}} MIJ_{i,j,i',j'} \quad (WG(g,g'))$$

ここで、 $MIJ_{i,j,i',j'}$ はセル(i,j)とセル(i',j')との関係を表し、隣接する場合は1、隣接しない場合は0とする。

$$MIJ_{i,j,i',j'} = \begin{cases} 1, & \text{if } \{abs(i-i') \leq 1 \text{ and } abs(j-j') \leq 1 \text{ and } (not(i=i' \text{ and } j=j'))\} = TRUE \\ 0, & FALSE \end{cases}$$

($MIJ(i,j,i',j')$)

(2) 土地転換費用 $a_{l,g}$

単位面積当たりの土地転換費用 $a_{l,g}$ は下記のように表せる。

$$a_{l,g} = pldc \cdot glmin_{l,g} + plcc_l + pirr_{l,g} + ctax \cdot CS_{l,g} \quad (A(l,g))$$

$a_{l,g}$: 土地転換費用(million US\$/ha)

$pldc$: 単位距離あたりの道路建設費(mil\$/km)

$glmin_{l,g}$: セル g に最も近い同じ土地利用区分 l のセルまでの距離(km)

$pirr$: 単位面積あたりの灌漑建設費(mil\$/ha)

$plcc_l$: 土地利用区分 l への土地利用変換費 (道路建設費を除く)(mil\$)

$ctax$: 炭素価格(mil\$/MgC)

$CS_{l,g}$:セル g の土地利用区分 l での炭素ストック量 [MgC/ha]

$glmin_{l,g}$ は次のように、当該セルから同じ土地利用区分のセルまでの最短距離と定義した。

$$glmin_{l,g} = \min_{g' | if Y_{pre_{l,g'}} > 0} GL_{g,g'}$$

農地については、当該セルから農地（作物種は考慮しない）のセルまでの最短距離と定義した。

$$glmin_{l_{crop},g} = \min_{(g',l_{crop'}) | if Y_{pre_{l_{crop'},g'}} > 0} GL_{g,g'}$$

ここで、 $GL_{g,g'}$: セル g, g' 間の距離(km)

道路建設費を除く土地利用変換費(人件費など) $plcc_{l,g}$ は下式のように定義した。つ

まり、地代から道路建設費を差し引いたものの最大値から、基準年に選択された土地での最小の収益との差分とした。将来は、これを賃金に比例して増加するとした。

$$plcc_l = \max_g (S_{l,g} - pldc \cdot glmin_{l,g}) - \min_{g' | if Y_{base_{l,g'}} > 0} S_{l,g'}$$

表 土地利用区分対応表 mapl(l,l')

土地利用区分(L)	土地利用区分(L) (灌漑有無区別)
PRM_FRS	PRM_FRS
HAV_FRS	HAV_FRS
AFR	AFR
PAS	PAS
PDR	PDR_FIRR
WHT	WHT_FIRR
GRO	GRO_FIRR
OSD	OSD_FIRR
C_B	C_B_FIRR
BIO	BIO_FIRR
OTH_A	OTH_A_FIRR
PDR	PDR_NOIRR
WHT	WHT_NOIRR
GRO	GRO_NOIRR
OSD	OSD_NOIRR
C_B	C_B_NOIRR
BIO	BIO_NOIRR
OTH_A	OTH_A_NOIRR
CROP_FLW	CROP_FLW
GL	GL
SL	SL
OL	OL

(3) 純利益 $S_{l,g}^t$

純利益 $S_{l,g}^t$ は土地利用 l での生産活動による単位面積当たりの売上から単位面積当たりの費用を差し引いて求める。売り上げは、単位面積当たりの生産量と生産者価格をかけたもの。費用は単位面積当たりの中間投入、労働、資本、生産税、補助金とする。対象地域内のセルでは、生産者価格と費用は一律とした。

$$S_{l,g} = \text{Revenue}_{l,g} - \text{Cost}_{l,g}$$

$$\text{Revenue}_{l,g} = \sum_{r \text{ if } MGR(g,r)} \left(\text{ProducerPrice}_{l,r} \right) \cdot \text{Yield}_{l,g}$$

$$\text{Cost}_{l,g} = \frac{\sum_{r \text{ if } MGR(g,r)} \left(\text{IntermediateInput}_{l,r} + \text{Capital}_{l,r} + \text{Labor}_{l,r} \right)}{\sum_{r \text{ if } MGR(g,r)} \left(\text{Area}_{l,r} \right)}$$

$MGR(g,r)$ はセル g と地域 r との対応表。

(4) セルと国の対応表

$$mapNIJ_{n,i,j} = \begin{cases} 1, & \text{if } mapNIJ0_{i,j} = ordN_n \\ 0, & \text{if not} \end{cases}$$

ここで、

$$ordN_n = order_n$$

$$mapRIJ_{r,i,j} = \sum_{n \text{ if } mapNR_{n,r}} mapNIJ_{n,i,j}$$

MAPGIJ(g,i,j)は、セル番号 g とセルの座標(i,j)の関係を表す行列で、次のように表す。

$$mapgij_{g,i,j} = \begin{cases} 1, & \text{if } \left\{ g = \frac{360}{GS} \cdot (i-1) + j \right\} = TRUE \\ 0, & \text{if } FALSE \end{cases} \quad (MGIJ(g,i,j))$$

$$mapRG_{r,g} = \sum_{(i,j) \text{ if } mapgij(g,i,j)} mapRIJ_{r,i,j}$$

$$GA_g = \sum_{(i,j) \text{ if } mapgij(g,i,j)} GAIJ_{i,j}$$

$$AREA0_{l,r} = \sum_{g \text{ if } mapRG(r,g)} (Y0_{l,g} \cdot GA_g)$$

$$GL_{i,j,i',j'} = \left(|i-i'|^2 + |j-j'|^2 \right)^{0.5} \cdot \frac{40,000km}{360/GS}$$

$$GL_{g,g'} = \sum_{map_gij(g,i,j)} \sum_{map_gij(g',i',j')} GL_{i,j,i',j'}$$

ただし、

N : 国番号 (1~357)

$ordN_n$: 国番号 n の通し番号 (1~357)

$mapNIJ0_{i,j}$: セル (i,j) についての国番号表

$mapNIJ_{n,i,j}$: 国番号 N とセル (i,j) の対応表

$mapRIJ_{r,i,j}$: 国コード r とセル (i,j) の対応表

$mapNR_{n,r}$: 国番号 N と国コード r の対応表

$mapSrG_{Sr,g}$: 国コード Sr とセル g の対応表

$Y0_{l,g}$: セル g の土地利用区分 l の面積率 (基準年)

GA_g : セル g の面積 [kha]

$AREA0_{l,r}$: 国コード r , 土地利用区分 l の面積 (基準年) [kha]

$LDMR_{l,r,t}$: 第 t 年, 国コード r , 土地利用区分 l の面積 [kha]

$WG_{g,g'}$: セル g, g' が隣接するかどうかを表す行列

$GL_{g,g'}$: セル g, g' 間の距離 [km]

(5) 森林の炭素量 ($CS_{l,g,t}$ 、 $CF_{l,g,t}$)

今後の展開のため、樹齢を考慮する場合としない場合の方法について記載するが、現段階では、下記の理由から、樹齢を考慮しない方法を用いる。

各セルの樹齢が不明な基準年のデータに基づく限り、基準年の炭素ストックやフローに樹齢が考慮されていないのに、翌年からの樹齢を考慮して積み上げても、非整合が生じる。モデルの用途によっては、樹齢を考慮しないことが結果を少し変えるかもしれないが、樹齢を考慮したマップがない限りはできない。利用可能になった段階で、あるいは、もっと必要に迫られた段階で、更新する。

樹齢を考慮しない場合、 $CS_{l,g}$ には、VISIT の 2000 年代のストック量、 $CF_{l,g}$ には、VISIT の 2000 年代のフロー量を用いる。

樹齢を考慮する場合は、下記のように算定する。

a) 木材バイオマス収量関数 ($WCS_{l,g,t,t'}$, $WFT_{g,t,t'}$)

森林の炭素量の経年変化について、Sohnngen *et al.* (2009)が定める木材バイオマス収量関数 ($WCS_{l,g,t,t'}$) (下式) を用いる。ここで、パラメータ δ_g :は、樹齢 60 年で VISIT の炭素ストック量に達するとして算定した。

$$WCS_{g,t,t'} = \delta_g \cdot \exp\left[5.2 - \frac{30}{t-t'}\right]$$

δ_g : パラメータ

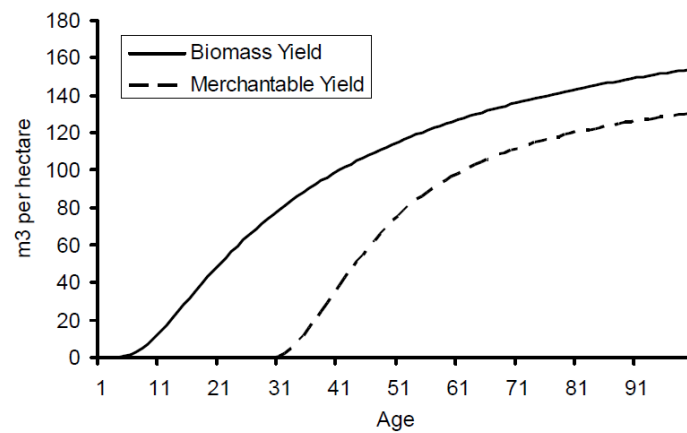
$WCS_{g,t,t'}$: セル g の第 t' 年に他の土地から転換された森林での第 t 年の炭素ストック量 [MgC/ha]

一方、フローは、Yield function の傾き、すなわち、前期からのストック量の変化とした。

$$WCF_{g,t,t'} = WCS_{g,t+1,t'} - WCS_{g,t,t'}$$

$WCF_{g,t,t'}$: セル g の第 t' 年に他の土地から転換された土地利用区分 l での第 t 年の炭素フロー量 [MgC/ha/year]

Figure 2. Biomass and Merchantable timber yield functions for upland hardwoods in the U.S. south.

図 Yield function (Sohngen *et al.* 2009)

樹齢 60 年($t-t'=60$)のときに 2000 年代の炭素ストック量に達成するよう、パラメータ δ を求め、それを当てはめた yield function ($WCS_{l,g,t,t'}$) をそのセルに用いる。

b) t 期の炭素ストック量 ($CST_{l,g,t,t'}$) とフロー量 ($CFT_{l,g,t,t'}$)

セル g の第 t' 年に他の土地から転換された土地利用区分 l での第 t 年の炭素ストック量 $CST_{l,g,t,t'}$ [MgC/ha] は次のように表せる。

- 1) 基準年より 60 年以上前に植林された森林は基準年の炭素ストック量、
- 2) 基準年より 60 年前より後に植林された森林は基準年の炭素ストック量にそれ以降の年のフローを累積した炭素量、
- 3) 基準年より後に植林された森林は植林以降の年のフローを累積した炭素量が、森林の炭素ストック量となる。
- 4) 作物・牧草地・草地には土地利用変化の履歴に関わらず一定とする。ストック量には IPCC ガイドラインが定める作物・牧草地の炭素ストック量とした。

$$CST_{l,g,t,t'} = \begin{cases} CSbase_{l,g}, & t = t', l = prmfrs, havfrs \\ CSbase_{l,g}, & t' + 60 \leq tbase \leq t, \quad l = afr \\ CSbase_{l,g} + \sum_{tbase \leq t' < t} WCF_{g,t',t'}, & tbase - 60 \leq t' \leq tbase \leq t, \quad l = afr \\ WCS_{g,t,t'}, & tbase \leq t' \leq t, \quad l = afr \\ 10 & t = t', l = lcrop \\ 2.5 & t = t', l = pas, gl \\ 0 & t = t', l = sl, oth \end{cases}, t' \leq t,$$

ただし、

$CST_{l,g,t,t'}$: セル g の第 t' 年に他の土地から転換された土地利用区分 l での炭素ストック量 [MgC/ha]

$CSbase_{l,g}$: セル g の基準年の土地利用区分 l での炭素ストック量 [MgC/ha]

pro_frs : 木材生産用植林

afr : 植林

$lcrop$: 農地

pas : 牧草地

gl : 草地

一方、フロー量は前期からのストック量の変化と表せる。

$$CFT_{l,g,t,t'} = CST_{l,g,t+1,t'} - CST_{l,g,t,t'}$$

$CFT_{l,g,t,t'}$: セル g の第 t' 年に他の土地から転換された土地利用区分 l での第 t 年の炭素フロー量（純吸収量，吸収を負）[MgC/ha/year]

c) t 期，セル g での炭素ストック量（ $CS_{l,g,t}$ ）とフロー量（ $CF_{l,g,t}$ ）

このとき、各セルの面積率の変化履歴を次のように表すと、

$$\Delta Y_{l,g,t} = Y_{l,g,t+1} - Y_{l,g,t}, \quad tbase \leq t, l = profrs, afr$$

$\Delta Y_{l,g,t}$: 第 t 年, セル g の土地利用区分 l の面積率の変化[year-1]

t 期のセル g での平均的な炭素ストック量 ($CS_{l,g,t}$) とフロー量 ($CF_{l,g,t}$) は、セル内で土地面積率の変化履歴 $\Delta Y_{l,g,t'}$ で重みづけした平均となる。

$$CS_{l,g,t} = \frac{\sum_{t'=\text{tbase} \leq t' \leq t} (CST_{l,g,t,t'} \cdot \Delta Y_{l,g,t'})}{\sum_{t'} (\Delta Y_{l,g,t'})}, \quad l = afr$$

$$CF_{l,g,t} = \frac{\sum_{t'=\text{tbase} \leq t' \leq t} (CFT_{l,g,t,t'} \cdot \Delta Y_{l,g,t'})}{\sum_{t'} (\Delta Y_{l,g,t'})}, \quad l = profrs$$

1.4 用いるデータ

d) 生産力マップ ($Yield_{l,g}$)

- 牧草・エネルギー作物、休耕地には、植生モデル VISIT による出力 (Ito and Inatomi 2011; Ito and Inatomi 2012)
- 2000 年代の 10 年間の平均値を用いた
- FAO (2013) から求めた作物別の炭素重量から作物重量への変換係数を用いて、VISIT のデータを炭素重量から作物重量へ変換した。牧草地については、GAEZ ver3.0 の換算係数 0.1 [乾燥重量／収穫重量] を用いた。炭素重量からバイオマス乾燥重量への換算には 0.47 [トン炭素重量／バイオマス乾燥重量] (Intergovernmental Panel on Climate 2006) を用いた。
- 作物には作物モデル GAEZ による出力 (Masutomi *et al.* 2009) を用いた。1981-2000 年平均気候での計算結果 (作物収量[kg/ha])。13 作物を CGE の財区分に対応 (下表)。灌漑面積率は現状 (MIRCA2000) で重み付け、農地面積率は考慮しない
- 基準年時点で CGE から出力される生産量と農地マップと生産力から算出される生産量にギャップがある場合、これら 2 つから調整係数を算定し、これを将来に渡り生産力に乗じることでギャップを埋める。

表 植生モデル VISIT での作物分類と本モデルでの対応表

土地利用区分	コード	植生モデルVISITでの分類
自然林	PRM_FRS	-
木材生産用森林	PRO_FRS	炭素ストック量
植林	AFR	炭素吸収量
牧草地	PAS	C4草本(自然植生)
エネルギー作物	BIO	C4草本(農耕地)
休耕地	CROP_FLW	C4草本(農耕地)
草地	GL	-
定住地	SL	-
ツンドラ、水面、など	OL	-

表 作物モデル GAEZ での作物分類と本モデルでの対応表

土地利用区分	コード	作物モデルGAEZでの分類
コメ	PDR	Wetland_Rice
コムギ	WHT	Wheat
トウモロコシ	GRO	Barley, Maize, Millet, Sorghum
油糧作物	OSD	Groundnut, Soybean
砂糖作物	C_B	Sugarbeet, Sugarcane
その他作物	OTH_A	Cassava, Sweet_Potato, White_Potato,

e) 土地利用マップ ($Y_{i,g}$)

- 作物別農地：Monfreda *et al.* (2008)の作物 175 種。作物分類の対応は附表に記す。
- 森林・牧草・定住地・ツンドラ・岩・水面：RCP (Hurtt *et al.* 2011)
- 休耕地：RCP の農地から(Monfreda *et al.* 2008)でカバーされているエリアを差し引いたものを休耕地とする。
- 保護区：UNEP-WCMC (2015)。保護区は将来に渡って固定する。
- ツンドラ・水面については RCP のデータを将来に渡って固定する。

f) 土地需要量 (LDM_i^t)

- AIMCGE モデルによる推計値
- 木材切り出し量：基準年は ForesSTAT(FAO)の体積を炭素重量に換算し、将来は CGE の出力に比例させた。変換には、0.5 トン炭素/トン木材乾燥重量 (IPCC, 2006 Table12.4)と山地ら(2000)による木材容積率 0.25~1.0[トン木材/m³]を用いた。

表 土地需要量の算定方法

土地利用区分	コード	算定方法
自然林*)	PRM_FRS	AIMCGEモデルによる推計値 (面積)
木材生産用森林	PRO_FRS	AIMCGEモデルによる推計値 (炭素重量)
植林	AFR	AIMCGEモデルによる推計値 (炭素重量)
牧草地	PAS	AIMCGEモデルによる推計値 (面積)
コメ	PDR	AIMCGEモデルによる推計値 (面積)
コムギ	WHT	AIMCGEモデルによる推計値 (面積)
トウモロコシ	GRO	AIMCGEモデルによる推計値 (面積)
油糧作物	OSD	AIMCGEモデルによる推計値 (面積)
砂糖作物	C_B	AIMCGEモデルによる推計値 (面積)
エネルギー作物	BIO	AIMCGEモデルによる推計値 (面積)
その他作物	OTH_A	AIMCGEモデルによる推計値 (面積)
草地	GL	AIMCGEモデルによる推計値 (面積)
定住地	SL	RCPの土地利用データを将来に渡って固定する
ツンドラ、水面、など	OL	RCPの土地利用データを将来に渡って固定する

*) 自然林のうち、森林保護区はマップ(UNEP-WCMC,2015)を用いて将来に渡って固定する。

表 AIMCGE モデルと本モデルの土地利用分類の対応表

本モデル	コード	AIMCGEモデル	コード
自然林	PRM_FRS	基準年の自然林	PRM_FRS
木材生産用森林	PRO_FRS	林業での土地利用面積	MNG_FRS
植林	AFR	増加した森林	PRM_FRS
牧草地	PAS	牧草地	GRAZING
農地		作物別土地投入量を与えた。対応する作物は別表を参照。	
エネルギー作物	BIO	エネルギー作物	BIOCROP
休耕地	CROP_FLW	休耕地	CROP_FLW
草地	GL	草地	GRASS

g) 単位面積当たりの費用と価格 ($Cost_{l,g}$, $ProducerPrice_{l,r}$)

- 単位面積当たりの費用は、AIMCGE モデルにより推計された社会会計表から作成
- 価格は AIMCGE モデルにより推計値を用いた
- バイオ燃料は $0.38\text{ktoe/kton} \times 0.5$ (燃料転換効率) を用いて $\text{mil}\$/\text{ktoe}$ から $\text{mil}\$/\text{kton}$ に変換した
- 自然林、草地、定住地、ツンドラ・水面などは土地利用変換の対象としない。現状から将来に渡って変化しないとする。したがって、収益はゼロとする。
- 道路建設費は WorldBank (2014) の世界平均値を、一人当たり所得 (IIASA 2012) に応じて変化させた。

表 AIMCGE モデルでの産業分類と本モデルの分類の対応表

本モデルでの土地利用区分	コード	AIMCGEモデルでの産業分類	コード
自然林	PRM_FRS	-	
二次林	MNG_GRS	林業	FRS
牧草地	PAS	肉牛	CTL
		乳牛	RMK
		その他畜産物	OTH_L
コメ	PDR	コメ	PDR
コムギ	WHT	コムギ	WHT
トウモロコシ	GRO	トウモロコシ	GRO
油糧作物	OSD	油糧作物	OSD
砂糖作物	C_B	砂糖作物	C_B
その他作物	OTH_A	その他作物	OTH_A
エネルギー作物	BIO	第2世代バイオエネルギー(作物残渣由来)	BTR3
休耕地	CROP_FLW	7作物(PDR, WHT, GRO, OSD, C_B, OTH_A, BTR3)の平均	
草地	GL	-	
定住地	SL	-	
ツンドラ、水面、など	OL	-	

1.5 温室効果ガス排出量推計 (オプション)

上で得られた土地利用分配の推計結果を用い、土地利用変化に伴う温室効果ガス排出量を推計する。

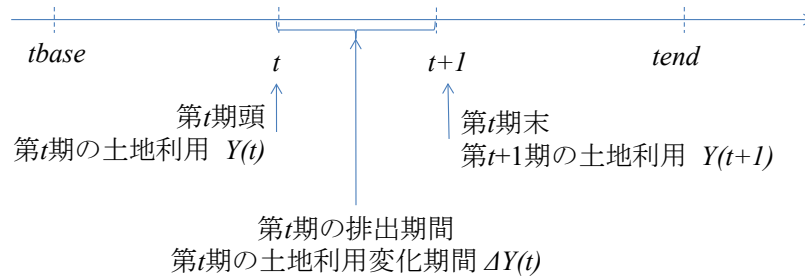


図 時間の定義

$$\Delta Y_{l,g,t} = Y_{l,g,t+1} - Y_{l,g,t}, \quad tbase \leq t \leq tend$$

$\Delta Y_{l,g,t}$: 第 t 年, セル g の土地利用区分 l の面積率の変化[1/year]

排出量 $GHGLG_{l,g,t}$ は次の式で求める。木材生産用森林については、切り出した炭素量を排出量とする。

$$GHGLG_{l,g,t} = \begin{cases} \sum_{tbase \leq t' \leq t} CDT_{l,g,t,t'} \cdot \Delta Y_{l,g,t'} \cdot GA_g \cdot \frac{44}{12} \cdot \frac{1}{1000} \cdot (-1), & l \in L, l \neq hayfrs \\ CDT_{l,g,t,t} \cdot Y_{l,g,t} \cdot GA_g \cdot \frac{44}{12} \cdot \frac{1}{1000} & l = hayfrs \end{cases}$$

ただし、

$GHGLG_{l,g,t}$: セル g の土地利用区分 l での第 t 年の GHG 排出量 (CO2 換算) (排出を正值で表す) [MtCO₂/cell/year]

GA_g : セル g の面積 [kha]

$CDT_{l,g,t,t'}$: セル g の土地利用区分 l での、第 t' 年の土地利用変化がもたらす、第 t 年の単位面積当たりの炭素量 (フローについては吸収が正值) [MgC/ha/year]

最後の (-1) は、植林 ($l = afr$) については吸収時 ($\Delta Y_{afr',g,t'} > 0$ かつ $CDT_{l,g,t,t'} > 0$) に

$GHGLG_{l,g,t} < 0$ とし、植林以外 $l \neq afr$ については面積の減少時 ($\Delta Y_{l,g,t'} < 0$ かつ

$CDT_{l,g,t,t'} > 0$) に排出 $GHGLG_{l,g,t} > 0$ とするため。

ここで、

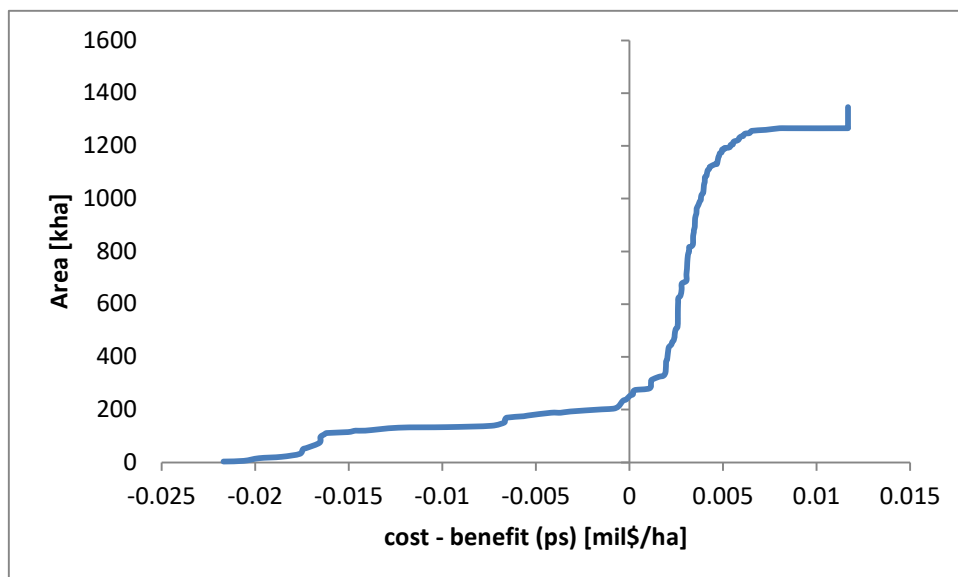
$$CDT_{l,g,t,t'} = \begin{cases} CST_{l,g,t,t'}, & l \in prmfrs, hayfrs, lcrop, pas, gl \\ CFT_{l,g,t,t'}, & l = afr \end{cases}$$

表 土地利用変化により変化する炭素(CDT)の考え方

土地利用区分	コード	バイオマス変化量の考え方
自然林	PRM_FRS	<伐採された土地 ($\Delta Y < 0$) > バイオマスストック量がそのまま排出され则认为
木材生産用森林	HAV_FRS	バイオマスストック量がそのまま排出され则认为
植林	AFR	バイオマスフロー量分が吸収され则认为
牧草地	PAS	バイオマスストック量がそのまま排出され则认为
コメ	PDR	バイオマスストック量がそのまま排出され则认为
コムギ	WHT	バイオマスストック量がそのまま排出され则认为
トウモロコシ	GRO	バイオマスストック量がそのまま排出され则认为
油糧作物	OSD	バイオマスストック量がそのまま排出され则认为
砂糖作物	C_B	バイオマスストック量がそのまま排出され则认为
エネルギー作物	BIO	バイオマスストック量がそのまま排出され则认为
その他作物	OTH_A	バイオマスストック量がそのまま排出され则认为
休耕地	CROP_FLW	バイオマスストック量がそのまま排出され则认为
草地	GL	バイオマスストック量がそのまま排出され则认为
定住地	SL	変化なし
ツンドラ、水面、など	OL	変化なし

1.6 バイオマス供給関数の作成方法

- 収量関数（横に収量[トン/ha]、縦に土地面積[ha]をプロット）の基準年 (Monfreda *et al.* 2008)との比較
- 供給関数（横に生産費用[US\$/トン]、費用[トン]をプロット）の比較
- CGE の GRO を想定
-



1.7 よくある質問 (FAQ)

Q: バイオ作物の参照マップについて

A: バイオ作物の基準年のマップはない。参照するマップはないが、所与の土地需要を満たすよう、他の土地利用との競合を考慮しつつ、収益の高いグリッドから順に導入される。

1.8 今後の課題

- 結果の分析方法
- バイオマス量・排出量の計算
- 家畜の飼料中の C と食肉中の C のバランス、家畜の炭素効率を考える
- C4crop の生産力 (BIO で利用) が C4natural (PAS で利用) より小さい?
- 国土面積に対する割合で制約することについて
- 106, 17 地域で扱うため、全球面積にもれがある。全球面積と合計が一致しない。
- CGE 出力データ処理関連
 - AIMCGE での 2 次林の出力の扱い
 - エネルギー作物の生産量が入っておらず、収益の計算のところで価格が 2005 年ベースになっている
- 用いたデータの見直し
 - VISIT データの crop intensity, crop calendar, 成長過程
 - Rammankutty の forage を牧草地に分類するか
 - 休耕地マップを算定する際の二毛作は考慮されていない
- 世界全体を試算したあと、RCP と CGE の出力値の値があうか確認
- グリーンランドが南米に入っている。

1.9 記号一覧

サフィックス

g: セル番号。全セルに 1 から順にふられた通し番号。

i: マップ上での各セルの縦方向の位置を表す番号 (i = 1~360)

j: マップ上での各セルの横方向の位置を表す番号 (j = 1~720)

l: 土地利用区分

表 対象とする土地利用区分とコード一覧

その他森林・草地 PRM_SEC

土地利用区分	コード
自然林	PRM_FRS
木材生産用森林	MNG_GRS
牧草地	PAS
コメ	PDR
コムギ	WHT
トウモロコシ	GRO
油糧作物	OSD
砂糖作物	C_B
エネルギー作物	BIO
その他作物	OTH_A
草地	GL
定住地	SL
ツンドラ、岩、水面、など	OL

記号

GS : グリッドサイズ[°] (=0.5)

$D_{l,g}$: セル g , 土地利用区分 l の規模拡大に伴う収穫逓減率 (0~1) ($=\frac{1}{2 \cdot R_{l,g}}$)

$S_{l,g}$: セル g , 土地利用区分 l の単位面積あたりの純利益

$Q_{l,g}$: セル g , 土地利用区分 l の単位面積当たりの調整費用

$R_{l,g}$: セル g , 土地利用区分 l の規模拡大に伴う収穫逓減の度合い

$Z_{l,g}$: セル g , 土地利用区分 l の目的変数

$Y_{l,g}$: セル g , 土地利用区分 l の面積割合 (0~1)

LDM_l : 土地利用区分 l の土地面積の需要 (外生変数)

CDM_l : 土地利用区分 l の土地の需要 (炭素換算重量) (外生変数)

$a_{l,g}$: パラメータ

b : パラメータ

β : パラメータ

γ : パラメータ

2. Reference

- FAO. 2013. *FAOSTAT*. Retrieved from: <http://faostat.fao.org/default.aspx>.
- Hurt G C, Chini L P, Frolking S, Betts R A, Feddema J, Fischer G, Fisk J P, Hibbard K, Houghton R A, Janetos A, Jones C D, Kindermann G, Kinoshita T, Klein Goldewijk K, Riahi K, Shevliakova E, Smith S, Stehfest E, Thomson A, Thornton P, Vuuren D P and Wang Y P 2011 Harmonization of land-use scenarios for the period 1500–2100: 600 years of global gridded annual land-use transitions, wood harvest, and resulting secondary lands *Climatic Change* 109, 1-2, 117-61.
- IIASA. 2012. *Shared Socioeconomic Pathways (SSP) Database Version 0.9.3*. Retrieved from: <https://secure.iiasa.ac.at/web-apps/ene/SspDb>
- Intergovernmental Panel on Climate C. 2006. 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories, Prepared by the National Greenhouse Gas Inventories Programme. In Eggleston H S, Buendia L, Miwa K, Ngara T and Tanabe K (Eds.), IGES. Retrieved from: <http://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/index.htm>.
- Ito A and Inatomi M 2011 Water-Use Efficiency of the Terrestrial Biosphere: A Model Analysis Focusing on Interactions between the Global Carbon and Water Cycles *Journal of Hydrometeorology* 13, 2, 681-94.
- Ito A and Inatomi M 2012 Use of a process-based model for assessing the methane budgets of global terrestrial ecosystems and evaluation of uncertainty *Biogeosciences* 9, 2, 759-73.
- Masutomi Y, Takahashi K, Harasawa H and Matsuoka Y 2009 Impact assessment of climate change on rice production in Asia in comprehensive consideration of process/parameter uncertainty in general circulation models *Agriculture, Ecosystems & Environment* 131, 3-4, 281-91.
- Monfreda C, Ramankutty N and Foley J A 2008 Farming the planet. Part 2: Geographic distribution of crop areas, yields, physiological types, and net primary production in the year 2000 *Global Biogeochemical Cycles* 22, 1.
- Sohngen B, Golub A A and Hertel T W 2009 The Role of Forestry in Carbon Sequestration in General Equilibrium Models.
- UNEP-WCMC I a. 2015. *The World Database on Protected Areas (WDPA)* [On-line], [May, 2015 of the version downloaded], Cambridge, UK: UNEP-WCMC. Available at: www.protectedplanet.net.
- WorldBank. 2014. *Unit Costs of Construction and Maintenance Works*. Retrieved from:

http://siteresources.worldbank.org/INTROADSHIGHWAYS/Resources/338993-112_2496826968/kmcosts.pdf

附表 本モデルと Monfreda et al.(2008)の作物分類との対応表

土地利用区分	コード	Monfreda et al.(2008)の作物分類での分類
イネ	PDR	rice
コムギ	WHT	buckwheat, wheat
トウモロコシ	GRO	barley, cerealnes, fonio, greencorn, hop, maize, maizefor, millet, mixedgrain, oats, rye, ryefor, safflower, sorghum, sorghumfor
油糧作物	OSD	canaryseed, carob, castor, coconut, groundnut, hempseed, kapokseed, linseed, oilpalm, oilseedfor, oilseednes, rapeseed, sesame, soybean, sunflower
砂糖作物	C_B	sugarbeet, sugarcane, sugarnes
その他作物	OTH_A	abaca, agave, alfalfa, almond, aniseetc, apple, apricot, areca, artichoke, asparagus, avocado, bambara, banana, bean, beetfor, berrynes, blueberry, brazil, broadbean, cabbage, cabbagefor, carrot, carrotfor, cashew, cashewapple, cassava, cauliflower, cherry, chestnut, chickpea, chicory, chilleetc, cinnamon, citrusnes, clove, clover, cocoa, coffee, cotton, cowpea, cranberry, cucumberetc, currant, date, eggplant, fibrenes, fig, flax, fornes, fruitnes, garlic, ginger, gooseberry, grape, grapefruitetc, grassnes, greenbean, greenbroadbean, greenonion, greenpea, hazelnut, hemp, jute, jutelikefiber, kapokfiber, karite, kiwi, kolanut, legumenes, lemonlime, lentil, lettuce, lupin, mango, mate, melonetc, melonseed, mixedgrass, mushroom, mustard, nutmeg, nutnes, okra, olive, onion, orange, papaya, pea, peachetc, pear, pepper, peppermint, persimmon, pigeonpea, pimento, pineapple, pistachio, plantain, plum, poppy, potato, pulsenes, pumpkinetc, pyrethrum, quince, quinoa, ramie, raspberry, rootnes, rubber, sisal, sourcherry, spicenes, spinach, stonefruitnes, strawberry, stringbean, swedefor, sweetpotato, tangetc, taro, tea, tobacco, tomato, triticales, tropicalnes, tung, turnipfor, vanilla, vegetablenes, vegfor, vetch, walnut, watermelon, yam, yautia,