**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 -](#_Toc444001182)

[1.1 基本的な考え方 - 3 -](#_Toc444001183)

[1.2 定式化 - 3 -](#_Toc444001184)

[1.3 パラメータ推定 - 7 -](#_Toc444001185)

[1.4 用いるデータ - 16 -](#_Toc444001186)

[1.5 温室効果ガス排出量推計（オプション） - 19 -](#_Toc444001187)

[1.6 バイオマス供給関数の作成方法 - 21 -](#_Toc444001188)

[1.7 よくある質問（FAQ） - 22 -](#_Toc444001189)

[1.8 今後の課題 - 22 -](#_Toc444001190)

[1.9 記号一覧 - 22 -](#_Toc444001191)

[2. Reference - 24 -](#_Toc444001192)

# 土地利用分配モデルについて

## 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、農畜林産財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°×0.5°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。

## 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。

 (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*al,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。

 (EQPRF(*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。

 (EQYPN(*l,g*))

土地利用面積の増加分

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。

 (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。

 (EQTOTY (*g*))

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

 (EQLDM(*l*))

 (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。

 (EQCDM(*l*))

: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。

 (EQCDM(*l*))

: 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。

 (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。

 (EQYPROTECT(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。

 (EQYAFR)

以下で、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。





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、もしくは、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

 (Loop1-1)

: 追加する牧草地面積

 (Loop1-2)

: 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

 (Loop1-3)

 (Loop1-4)

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

 (Loop2-1)

 (Loop2-2)

: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

 (Loop2-3)

: 牧草地になるポテンシャル面積

 (Loop2-4)

 (Loop2-5)

、かつ、となった場合、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は基準年で森林面積が統計値とあうよう決定する。





ただし、

: 森林と草地の境界基準となる炭素ストック量 [MgC/ha]

## パラメータ推定

1. 

はセルg,g’が隣接するかどうかを表す行列である。





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’*))

ここで、MIJi,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,ji’,j’*))

1. 土地転換費用

単位面積当たりの土地転換費用は下記のように表せる。

 (A(*l,g*))

: 土地転換費用(million US$/ha)

: 単位距離あたりの道路建設費(mil$/km)

: 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)

: 単位面積あたりの灌漑建設費(mil$/ha)

: 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$)

: 炭素価格(mil$/MgC)

:セルgの土地利用区分*l*での炭素ストック量 [MgC/ha]

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。



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。



ここで、: 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)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。



表　土地利用区分対応表mapl(l,l’)



1. 純利益

純利益は土地利用*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。



はセルgと地域rとの対応表。

1. セルと国の対応表





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。

 (MGIJ(g,*i,j*))











ただし、

: 国番号 (1~357)

:国番号*n*の通し番号(1~357)

: セル(*i,j*)についての国番号表

: 国番号*N*とセル(*i,j*)の対応表

: 国コード*r*とセル(*i,j*)の対応表

: 国番号*N*と国コード*r*の対応表

:国コード*Sr*とセル*g*の対応表

:セルgの土地利用区分*l*の面積率（基準年）

: セルgの面積 [kha]

: 国コード*r*, 土地利用区分*l*の面積（基準年）[kha]

: 第*t*年, 国コード*r*, 土地利用区分*l*の面積 [kha]

: セルg, g’が隣接するかどうかを表す行列

: セルg, g’間の距離[km]

1. 森林の炭素量（、）

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、には、VISITの2000年代のストック量、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。

1. 木材バイオマス収量関数（，）

森林の炭素量の経年変化について、Sohngen *et al.* (2009)が定める木材バイオマス収量関数（）（下式）を用いる。ここで、パラメータは、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。



パラメータ

: 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。



: 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]



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、パラメータを求め、それを当てはめたyield function（）をそのセルに用いる。

1. *t*期の炭素ストック量（）とフロー量（）

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  [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。



ただし、

: 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]

: 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]

: 木材生産用植林

: 植林

: 農地

: 牧草地

: 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。



: 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]

1. *t*期, セル*g*での炭素ストック量（）とフロー量（）

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、



: 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（）とフロー量（）は、セル内で土地面積率の変化履歴で重みづけした平均となる。





## 用いるデータ

1. 生産力マップ（）

* 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



表　作物モデルGAEZでの作物分類と本モデルでの対応表



1. 土地利用マップ（）

* 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。

1. 土地需要量（）

* 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



表　AIMCGEモデルと本モデルの土地利用分類の対応表



1. 単位面積当たりの費用と価格（, ）

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0.38ktoe/kton\*0.5(燃料転換効率)を用いてmil$/ktoeからmil$/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



## 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



: 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。



ただし、

: セルgの土地利用区分*l*での第*t*年のGHG排出量（CO2換算）（排出を正値で表す）[MtCO2/cell/year]

: セルgの面積 [kha]

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値）[MgC/ha/year]

最後の(-1)は、植林()については吸収時(かつ)にとし、植林以外については面積の減少時(かつ)に排出とするため。

ここで、



表　土地利用変化により変化する炭素(*CDT*)の考え方



## 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



## 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。

## 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。

## 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



記号

: グリッドサイズ[°]　(=0.5)

: 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）（=）

: セル*g*, 土地利用区分*l*の単位面積あたりの純利益

: セル*g*, 土地利用区分*l*の単位面積当たりの調整費用

: 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

: セル*g*, 土地利用区分*l*の目的変数

: セル*g*, 土地利用区分*l*の面積割合　（0～1）

:土地利用区分*l*の土地面積の需要（外生変数）

:土地利用区分*l*の土地の需要（炭素換算重量）（外生変数）

: パラメータ

b: パラメータ

: パラメータ

: パラメータ

# Reference

FAO. 2013. *FAOSTAT*. Retrieved from: <http://faostat.fao.org/default.aspx>.

Hurtt 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*](http://www.protectedplanet.net)*.*

WorldBank. 2014. *Unit Costs of Construction and Maintenance Works*. Retrieved from: <http://siteresources.worldbank.org/INTROADSHIGHWAYS/Resources/338993-1122496826968/kmcosts.pdf>

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

