

23. システムダイナミクス法による人間活動の 地球環境影響評価モデル

ASSESSMENT MODEL FOR HUMAN IMPACT ON GLOBAL ENVIRONMENTAL
CHANGE USING SYSTEM DYNAMICS MODEL

後藤真太郎* ・ 酒井聡一** ・ 遠藤孝夫*

Shintaro GOTO*, Toshikazu SAKAI** and Takao ENDO*

ABSTRACT; Under the assumption that the population problem, the food problem and global warming due to energy consumption can be stabilized through managing land use, impacts of human activities such as consumption of food, energy and timber on global environmental changes, and global population capacity are analyzed using a system dynamics model developed in this research. In the model the world is divided into two groups: OECD countries and the others. Used global land use data set is land cover map derived from satellite data, and potential distribution of arable land is estimated by the method of Cramer and Solomon which takes into consideration spatial distribution of climate data such as precipitation and evapotranspiration. In addition, impacts of carbon dioxide emission from human activities on food production through global warming are included in the model as a feedback.

The results of the analysis for both BaU scenario and Toronto Conference scenario are similar to the results of existing models. Improving spatial resolution of the model by using global data on distribution of environmental variables and socioeconomic indices is left for further studies.

KEYWORDS; global environmental change, global warming, food problem, global population capacity

1 目的

地球の温暖化、酸性雨、熱帯雨林の減少、砂漠化などの地球環境に関する研究がなされており、これらの問題は互いに関連し合っている。例えば食料を維持するために森林を伐採し耕作地にする。その結果、CO₂の固定量が減少して大気中のCO₂濃度が増加し、地球の温暖化にも影響を与える。これらの問題の多くは、食料消費やエネルギー消費などの人間活動による影響が大きく寄与している。

本研究では食料消費やエネルギー消費などの人間活動が地球環境に及ぼす影響を評価するモデルを作成し、OECDと非OECD地域を対象として、1986年から2020年の影響の大きさを評価することを目的とする。

2 従来の研究

後藤[1]は人工衛星による植生分布図から潜在的な耕作可能地を求め、それらの場所で穀物が生産された場合に収容可能な人口を推算している。しかしこの研究では人間が穀物のみを食料としており、肉類の生産量が考

*; 金沢工業大学環境情報総合研究所 Environmental Information Research Lab., Kanazawa Inst. of Tech.

**; 金沢工業大学大学院（現（株）パスコ） Kanazawa Inst. of Tech. (PASCO Corporation at present)

慮されていない。肉類の生産量を考慮したものに佃[2]による研究がある。佃は中国を対象として、肉類を含めた食料生産により潜在的収容可能人口を求め、食料生産に伴う森林伐採とエネルギー消費によるCO2排出量も同時に評価している。

山本ら[3]は、土地利用、人口増加、生活水準の向上、森林破壊、CO2の排出などを総合的に評価してバイオマス利用可能量を求めている。このモデルでは、焼き畑による耕作地面積の増加にともなう森林面積の減少や、木材需要による森林伐採などの影響を評価する土地利用セクタと、エネルギー使用によって排出されるCO2を評価するエネルギーセクタの2つのセクタによって構成されている。

3 研究方法

3.1 研究の流れ

本研究では、人口・エネルギー消費に伴うCO2排出量・食料消費に伴うCO2排出量・木材によるCO2排出量・CO2排出によるフィードバックの5つの大きな部門があり、これらをシステムダイナミックスの手法を用いてモデル化を行う。また化石燃料使用量や、各化石燃料の使用割合などの将来予測に関して2つのケースを設け、各ケース毎の将来のCO2排出量、及び収容可能人口について評価を行う。

3.2 変数の定義

本研究で用いる各変数は以下の通りである。

- t：時間
- dt：時間幅
- POP：人口
- BIRTH, DEATH：出生人数, 死亡人数
- F_CNS：食料消費量
- F_CNS_CAP：一人当たりの食料消費量
- F_EXP, F_IMP：食料輸出入量
- PRD_HA：耕作地1ha当たりの食料生産量
- ARB_NPP：耕作地1ha当たりの純一次生産量
- F_CO2：食料消費に伴うCO2排出量
- E_CNS：エネルギー消費量
- E_CNS_CAP：一人当たりのエネルギー消費量
- COAL_CNS：石炭消費量
- OIL_CNS：石油消費量
- GAS_CNS：天然ガス消費量
- α, β, γ ：各エネルギー別CO2排出係数
- E_CO2：エネルギー消費に伴うCO2排出量
- FW_CNS：燃料用木材使用量
- RW_PRD：丸太生産量
- FW_CNS_CAP：一人当たりの燃料用木材使用量
- RW_PRD_CAP：一人当たりの丸太生産量
- WD_VLM：森林1ha当たりの使用可能樹木量
- WD_NPP：森林1ha当たりの純一次生産量
- FW_CO2：燃料用木材使用に伴うCO2排出量
- LU_CO2：土地利用変化に伴うCO2排出量

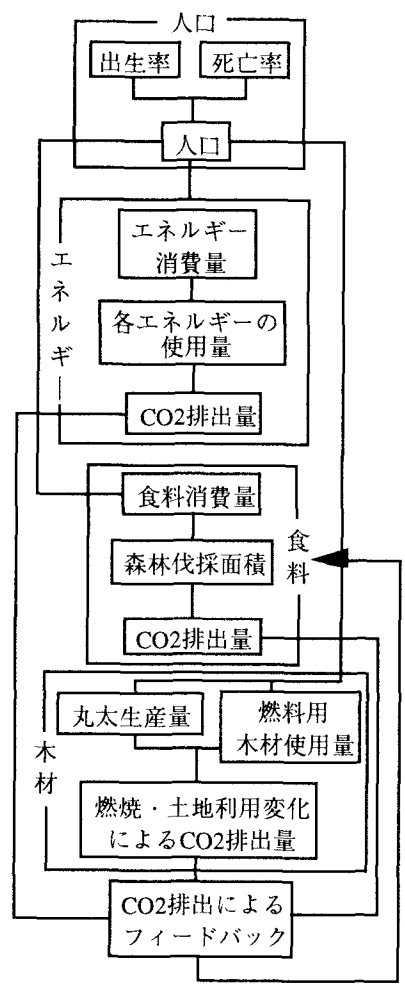


図1 研究の流れ

4 人口の推算

出生人数[4], 死亡人数[4]を用いて, 次の式(1)のように人口を求める.

POP(t)=POP(t-dt)+BIRTH(t)-DEATH(t) . . . (1)

5 CO2排出量の推算

本研究ではエネルギー消費・食料消費・木材使用時に排出されるCO2を対象としている.

5. 1 エネルギー消費に伴うCO2排出量の推算

対象とするエネルギーは石油・石炭・天然ガスであり, これらの化石燃料の使用時に排出されるCO2をエネルギー消費に伴うCO2排出量とする.

(A) エネルギー消費量

エネルギー消費量は, 人口と一人当たりのエネルギー消費量より求める.

E_CNS(t)=POP(t)×E_CNS_CAP(t) . . . (2)

(B) エネルギー消費に伴うCO2排出量

各エネルギーから排出される単位当たりCO2量はそれぞれ異なるため, 各エネルギーのエネルギー使用量全体に占める割合からそれぞれの消費量を求め, 各エネルギーのCO2排出係数[5]を用いて, それぞれのCO2排出量を求める.

E_CO2(t)=α COAL_CNS(t)+β OIL_CNS(t)+γ GAS_CNS(t) . . . (3)

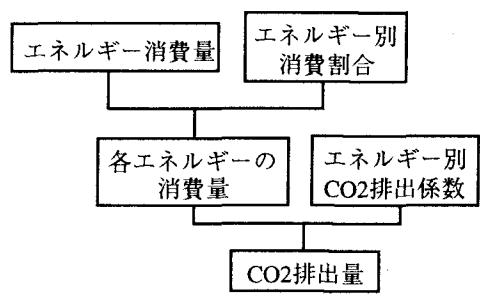


図2 エネルギー消費に伴うCO2排出量の推算方法

5. 2 食料消費に伴うCO2排出量の推算

現在の食料生産量を食料消費量が上回った場合, つまり食料が不足した場合, 耕作が可能な森林を伐採し, その地域を耕作地として食料生産量を増加し, 不足の食料を補っていく. その際伐採された森林からのCO2排出量, つまり失われる純一次生産量を食料消費に伴うCO2排出量として考える. これを潜在的に耕作が可能な地域が存在する限り行うものとする.

(A) 食料消費量

食料消費量は人口と一人当たりの食料消費量より求める.

F_CNS(t)=POP(t)×F_CNS_CAP(t) . . . (4)

(B) 食料生産量

現在の食料生産量の推算方法は籾谷[6]によって提案された方法を用いる. 主要な12品目の穀物生産量と4種類の肉類生産量を対象とする. 各地域で生産された穀物全てを人間が食料として消費しているわけではなく, この内の何割かは家畜の飼料として消費される. この家畜の飼料として消費された穀物量から肉類生産量を求め, 穀物生産量と肉類生産量の合計を現在の食料生産量とする. また, 現在の食料生産量を耕作地面積より, 耕作地1ha当たりの食料生産量を求める.

(C) 潜在食料生産量

潜在食料生産量を求めるためには, まず潜在的に耕作が可能な地域の面積を求める必要がある. Cramerら[7]の方法を用いて潜在耕作可能地面積を求める. Cramerらは潜在耕作可能地に適している地域として, 次の3つの条件に当てはまる地域を指している.

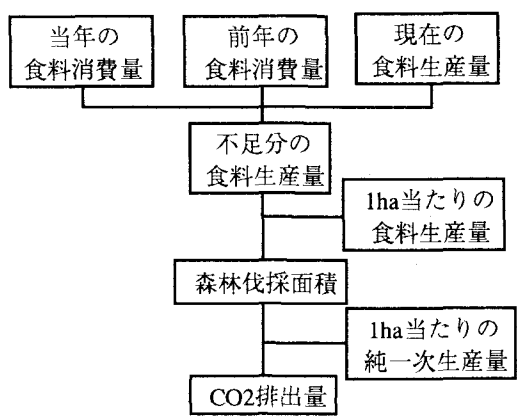


図3 食料消費に伴うCO2排出量の推算方法

- 1) 植物育成期間の温度の合計が2,000℃以上の地域
 - 2) 蒸発散に実際に使われる土壌水分と、必要とされる水分の比が0.45以上の地域
 - 3) 月平均気温の最低が15.5℃以上で、かつ条件2の年間の比が0.70以上の地域は除く
- (D) 潜在耕作可能地1ha当たりの純一次生産量

Box[8]の方法によりNOAAのNDVIデータを用いて伐採の対象地域である潜在耕作可能地の純一次生産量を求める。その求め方を以下に示す。

$$\text{Scaled NDVI} = 240 - (\text{NDVI} + 0.05) \times 350 \quad \dots (5)$$

$$\text{NPP} = -1467.82527 \times \log(1 - 2.5 \times \text{Scaled NDVI}) \quad \dots (6)$$

Scaled NDVI：NOAAで計測されたNDVI (0～255)

NDVI：正規化植生指標

NPP：純一次生産量

この結果と潜在耕作可能地面積より、潜在耕作可能地1ha当たりの純一次生産量を求める。

(E) 食料消費に伴うCO2排出量

現在の食料消費量と1年前の食料消費量の差に、食料輸出入量を考慮した値を不足分の食料とする。不足分の食料を補うために必要な森林伐採面積より食料消費に伴うCO2排出量を求める。

$$F_CO2(t) = \text{ARB_NPP} \times (F_CNS(t) - F_CNS(t-dt) + F_EXP(t) - F_IMP(t)) / \text{PRD_HA} \quad \dots (7)$$

5. 3 木材によるCO2排出量

木材から排出されるCO2は、木材を燃料として燃やした時に発生する場合と、燃料用と産業用の丸太を確保のために森林を伐採した時に排出される場合を想定する。

(A) 燃料用木材使用量・丸太生産量

一人当たり燃料用木材使用量・丸太生産量と人口を用いて燃料用木材使用量と丸太生産量を求める。

$$\text{FW_CNS}(t) = \text{POP}(t) \times \text{FW_CNS_CAP}(t) \quad \dots (8)$$

$$\text{RW_PRD}(t) = \text{POP}(t) \times \text{RW_PRD_CAP}(t) \quad \dots (9)$$

(B) 燃料用木材使用に伴うCO2排出量

木材を燃料として燃やした時、樹木に含まれるCO2が排出される。ホイタッカー[9]によると樹木に含まれるCO2は重量の約45%であるので、以下の式により求める。

$$\text{FW_CO2}(t) = 0.45 \times \text{FW_CNS}(t) \quad \dots (10)$$

(C) 土地利用変化に伴うCO2排出量

燃料用と産業用の丸太を確保するために森林を伐採した時に排出される場合は、丸太生産量と森林1ha当たりの使用可能樹木量[9]から森林伐採面積を求める。また5. 2 (D)と同様の方法で森林1ha当たりの純一次生産量を求め、丸太生産のために森林を伐採した時に排出されるCO2を求める。

$$\text{LU_CO2}(t) = \text{WD_NPP} \times \text{RW_PRD}(t) / \text{WD_VLM} \quad \dots (11)$$

6 植林による炭素吸収

1980年に年間約0.11億ha[10]の植林が行われており、今後も毎年0.11億haの植林がなされるものと仮定する。植える樹木の種類による成長速度の違いや、植林する地域の土壌の肥沃度などによって炭素吸収能力が異なる

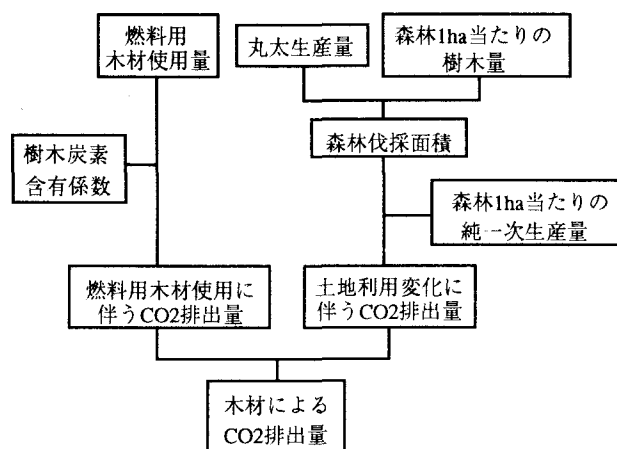


図4 木材によるCO2排出量の推算方法

ため、Brownら[11]に求められた炭素吸収能力2.8（最低値）～9.6（最高値）tC/haの単純平均をとった6.2tC/haを用いる。以上の値より植林によって毎年 6.89×10^7 (tC)の炭素吸収量が生じる。実際は樹木の成長と共に炭素吸収量は飽和するが、本研究では植林された樹木の炭素吸収量は将来的に変化せず、一定であるものとする。

7 穀物生産量の変化

農業技術の進歩とCO2排出による穀物生産量の変化を食料生産量・耕作地1ha当たりの食料生産量・潜在食料生産量にフィードバックさせる。

7. 1 CO2濃度増加によるフィードバック効果

CO2濃度が倍増すると穀物生産量が約30%増加するというUNEP[12]の推定に基づき、CO2濃度増加によるフィードバック効果を求めた。この時、CO2濃度と穀物生産量との間には線形関係があると仮定した。

7. 2 気温上昇によるフィードバック効果

CIA[13]によって研究された気温と降雨量の変化の影響による予想穀物生産量に基づき、気温上昇によるフィードバック効果を求める。ただし地球各地での温暖化がもたらす降雨パターンの変化は、まだ確実に把握されていないため、本研究では降雨量による影響を無視した。

7. 3 農業技術の進歩

1985年から1992年の耕作地1ha当たりの食料生産量の変化を農業技術の進歩として、以下のように仮定する。

- ・ OECD、非OECD地域ともに、1985年から1992年の伸び率で今後も耕作地1ha当たりの食料生産性が推移していく。

8 シミュレーション結果

エネルギー消費の将来予測に関しては、OECD（経済協力開発機構）事務局で開発されたGREENモデル[14]の2種類のシナリオの結果を用いてシミュレーションを行った。

- 1) CO2排出増を規制する政策を全く採らない現状維持（BaU）シナリオ
 - 2) OECD地域と非OECD地域に、炭素規制の面で異なる負担を課すトロント協定型シナリオ
- 以上の2種類のシナリオのシミュレーション結果を図5から図7に示す。

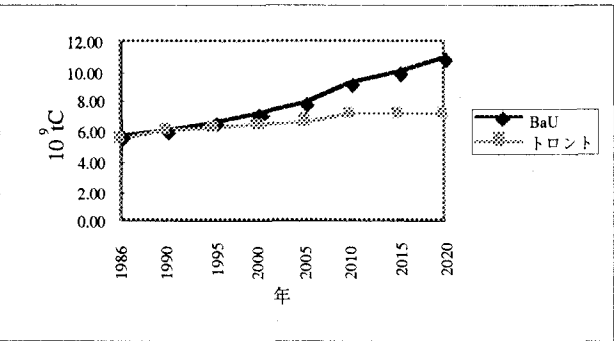


図5 エネルギー消費に伴うCO2排出量

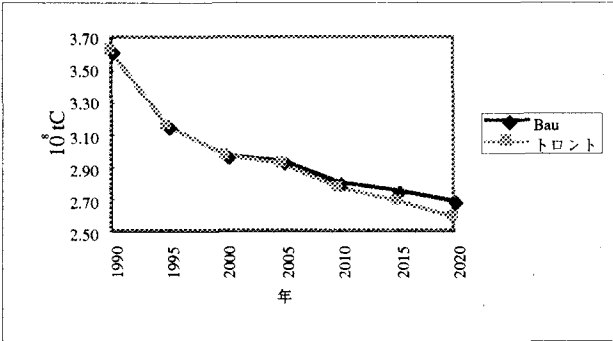


図6 食料消費に伴うCO2排出量

本研究で得られた結果の妥当性を検証するために、人間活動によるCO2排出量をIPCC[15]の研究結果と比較する。その結果を図8に示す。

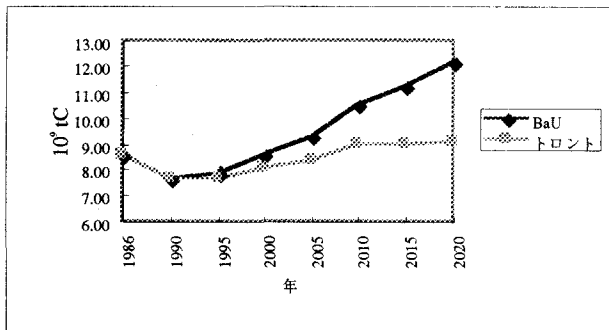


図7 人間活動によるCO2排出量

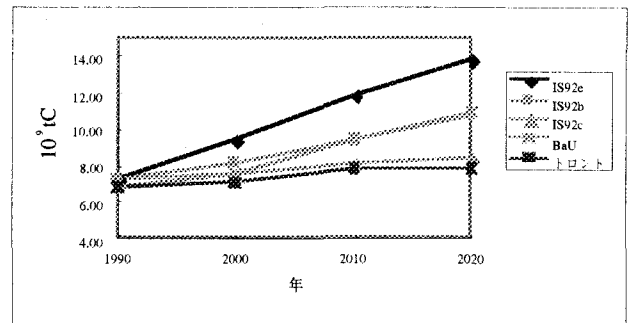


図8 人間活動によるCO2排出量の検証

9 結論

研究の結果、以下のことが明らかとなった。

- ・エネルギー消費と土地利用変化と木材使用によって排出されるCO2の将来予測を行うモデルを作成した。
- ・本研究で得られた結果と他の研究とを比較した結果、本モデルに妥当性があると考えられる。
- ・2種類のシナリオにおける2020年のCO2排出量は、それぞれ現在の1.6倍、1.2倍になり、CO2排出の増加は、人口増加によるエネルギー消費の増加が主な原因として考えられる。
- ・シミュレーションの結果、2020年時点で80億人以上の人口を養うことが可能であることがわかった。

引用文献

- [1]後藤真太郎, 村井俊治, 本多嘉明, 朝倉堅五, NOAA衛星データを利用した人口収容限界の予測, 写真測量とリモートセンシング, Vol. 31, 1992.
- [2]佃卓治, 人間活動の地球環境に及ぼす影響のモデル化に関する研究—中国への適用—, 金沢工業大学大学院経営工学専攻平成7年度修士論文, 1996.
- [3]山本博巳, 山地憲治, 世界エネルギー・土地利用モデルによるバイオマス利用可能量の分析, 電力中央研究所, 研究報告Y94004, 1994.
- [4]United Nations, World Population Prospects 1990, 1991.
- [5](財)日本エネルギー経済研究所・エネルギー計量分析センター, エネルギー・経済統計要覧, 省エネルギーセンター, 1996.
- [6]粕谷恵介, 人工衛星NOAAデータによる人口収容力の推算, 金沢工業大学経営工学科平成5年度卒業論文, 1994.
- [7]W.P.Cramer and A.M.Solomon, Climatic Classification and Future Global Redistribution of Agricultural Land, Climate Research, Vol. 3, 1993.
- [8]E.O.Box, Quantative Evaluation of Global Primary Productivity Models Generated by Computers, Primary Productivity of the Biosphere(ed. H.Lieth and H.Whittaker), Springer-Verlag New York Inc., 1975.
- [9]P.H.ホイタッカー(宝月欣二訳), 生態学概説, 培風館, 1974.
- [10]FAO/UNEP, 熱帯林資源調査, 1981.
- [11]S.Brown, A.E.Lugo and J.Chapman, Canadian Journal of Forest Research 16, 1986.
- [12]United Nations Environment Programme, The Changing Atmosphere, UNEP Environment Brief No.1, Nairobi, 1988.
- [13]Central Intelligence Agency, Relating Climate Change of its Effects, GC78-10154, 1987.
- [14]OECD, Economics and Statistics Department, ESD/CPE/WP1(92)2, 1992.
- [15]IPCC編, IPCC地球温暖化第二次レポート, 環境庁地球環境部監修, 1996.