

土地劣化の影響評価モデルによる劣化防止・緩和策の費用便益分析

Cost-Benefit Analysis of Land Conservation by Assessment Model of Land Degradation

増富 祐司¹

松岡 譲²

Yuji Masutomi

Yuzuru Matsuoka

ABSTRACT: Food security is paramount importance in many countries of the world. With growing world population and economic growth, the demand for food and feed will continue to increase in the future. However, loss of soil productivity as a result of human-induced land degradation may threaten food security. Yet, we do not fully understand where, when, and how land degradation affects food security, how important this problem is relative to other constraints, and what policy and other actions to take to mitigate adverse effects of land degradation. To address this problem, we developed a global land degradation model to compute in a qualitative sense on the GIS and present current soil erosion hazard map. We also analyze costs and benefits of soil conservation on each country by deriving loss of productivity from the hazard map. The benefits/costs ratio of soil conservation is 5.2 for whole over the world.

KEYWORD: land degradation, soil erosion, global modeling, cost-benefit analysis

1. 研究の目的、背景と概要

Oldmann ら(1990)がおこなった Global Assessment of Soil Degradation(GLASOD)では、地球上で起こっている人為起源の土地劣化について表-1, 2, 3 のように推計した。これは 200 人以上の現地研究者によるレポートに基づいてなされたものであるため、土地評価の客観性について依然疑問が残るが、地球規模の土地劣化について我々が得られる唯一の情報源である。それによると、劣化した農地(耕地+牧草地)は 12 億 ha であり全農地(47 億 ha)の 27%になる。また土地劣化のタイプとして一番主要なものは土壌侵食であり水食と風食だけで 84%(16 億 ha)にもなる。

この報告を

表-1 土地劣化の割合

土地利用	全面積 [億ha]	劣化面積 [億ha]	劣化している割合 [%]
耕地	14.75	5.62	38.10
放牧地	32.12	6.85	21.33
合計 (農地)	46.87	12.47	26.61

の食糧供給への影響が懸念される。つまり、将来予想される人口増加と経済発展がもたらす食料需要に対して、土地劣化がどの程度影響を及ぼすか?ということである。これに関して、Pimentel ら(1995)は深刻な問題をもたらすと主張し、Crosson(1997)、Scherr(1999)らは地球規模では影

表-2 土壌劣化のタイプ

土壌劣化のタイプ	面積 [億ha]	割合 [%]
水食	10.9	55.7
風食	5.5	27.9
化学的劣化	2.4	12.2
物理的劣化	0.8	4.2
合計	19.7	100

響が小さいと主張する。ただ注意すべきは、後者の主張もグローバルには寄与は小さいが、地域により深刻な問題となりうると主張している点である。これらの研究は、過去から現在の状態をもとにした単純な外挿であったり、土地劣化のメカニズムを十分に考慮したようなモデルによる主張でもない。そこで本研究では以下の三点を

¹ 京都大学大学院地球環境学舎 Graduate school of Global Environmental Studies, Kyoto University

² 京都大学大学院地球環境学舎 Hall of Global Environmental Research, Kyoto University

目的とした解析を行なう。

1) 土地劣化のメカニズムを組み込んだ全球の土地劣化の程度、規模を予測できるモデルの作成。

2) 1) で作成したモデルを用いた将来の生産性低下の予測とその影響の評価。

3) 土地保全の有効性及び妥当性の評価。

1) のモデルでは、地形などのように土地劣化に影響するが時間変化しない要素と、気候や土地利用などのように人間活動による影響を受けたり変化が予想される要素を、同時に考えなければならない。これに関し今回考慮した要素は土地、地形、土地利用及び気候であり、それらの中で土地利用と気候を将来変動する要素として考えた。また本モデルでは、土地劣化の原因(表-3 参照)のうち最大の影響を与え全体の 35% にのぼる過放牧の影響をモデルに組み込んだ。また対象にした土地劣化のタイプは水食と風食であり、食糧の生産性と関係ない森林の土地劣化は考えず、農地の土地劣化のみを考慮した。水食に関しては Batjes(1996)、Hootmans(2001)のモデルを基にし、風食に関しては FAO/UNEP/UNEP(1979)のモデルを基にした。以上によりモデルを構築し、現在の水食、風食に関しての土地侵食危険度(soil erosion hazard)に関する全球規模の地図(30 秒×30 秒)をそれぞれ作成した。さらに目的 2) に関して、目的 1) で得られた土地侵食危険度地図をもとに現在の土地生産性の減少を見積もった。そして最後に目的 3) として目的 2) の結果から土地保全の有効性、妥当性を費用便益分析によって経済的に評価した。

表-3 劣化の原因	
劣化の原因	面積 [億ha]
過放牧	6.8
森林伐採	5.8
不適切な農業活動	5.5
植生の過剰採取	1.3
産業活動	0.2
合計	19.7

2. 既往の研究

2.1 全球規模(小縮尺)の土地劣化モデルに関する既往の研究として、本研究の基礎となった研究を簡単に説明する。FAO/UNEP/UNESCO(1979)は北アフリカ・中近東の土地劣化予察図の作成を行なった。この地図は土地、気候、植生、地形などのデータをもとに作成され、その時点での土地劣化の危険性を表した地図である。対象とする土地劣化のタイプは水食・風食だけでなく塩類集積等の化学的劣化も対象としている。Batjes(1996)、Hootmans(2001)は全球規模で水食危険度(erosion hazard)の将来予測を行なった。土地、地形、気候、土地利用のデータをもとに現在から将来(2050 年)までの水食危険度の地図を作成。土地、地形は時間変動しないものとし、気候と土地利用を変化させて将来の予測をおこなった。

2.2 土地劣化の経済評価について様々な研究がある。それぞれの研究は第 4 章で参照される。Pimentel ら(1995)はアメリカの土地侵食に関して費用便益分析を行なった。また Crosson(1997)GLASOD のデータをもとに経済損失を導出し、Born ら(2000)は IMAGE モデルを用いて将来の土地劣化とその費用便益分析をおこなっている。Young(1994)は南アジアにおいて収量の減少による経済損失を見積もった。

3. モデルと手法

3.1 水食

水食危険度 EW_a を次のようにして求める

$$EW_a = f(S, T, R, L) = \left\{ \frac{R + \frac{S + T}{2}}{2} \right\} \times L$$

S : 土壌因子、 T : 地形因子、 R : 降雨因子、 L : 土地利用因子

(1) S : 土壌因子

FAO の Digital Soil Map of The world から土壌のデータを得る。次の三つの因子により土壌因子 S が決定する。

1) 土性 シルトがもっとも水食を受けやすく、粘土がもっとも水食を受けにくい。

$$I_t = -0.005 \times Cl + 0.005 \times Si + 0.5$$

I_t : 土性指数

Cl : 土壌に含まれる粘土の割合 [%], Si : 土壌に含まれるシルトの割合 [%]

2) かさ密度 かさ密度が大きいと侵食を受けやすい。

$$\begin{cases} \text{if } bd < 1.15, \text{ then } I_b = 0 \\ \text{if } 1.15 < bd < 1.55, \text{ then } I_b = 2.5 \times bd - 2.875 \\ \text{if } bd > 1.55, \text{ then } I_b = 1 \end{cases}$$

I_b : かさ密度指数, bd : かさ密度 [g/cm³]

表-4 土壌厚と土壌厚指数の関係

土壌厚 [cm]	I_d : 土壌厚指数
0-15	1.00
15-50	0.9375
50-100	0.60
100-150	0.25
150-	0.00

3) 土壌厚 土壌厚がないと土壌水分が飽和しやすくなり、表面流出が大きくなり水食を受けやすい。表-3 参照

4) 土壌因子 S は各要素で得られた指数により次の式で与えられる。

$$S = 0.5 \times \text{MAX}(I_t + I_b, I_b + I_d, I_d + I_t)$$

(2) T : 地形因子; 傾斜がきついとところほど水食を受けやすい

GTPO30 の高度データを使用。これより 5 分×5 分グリッド内の最高高度 A_{mx} と最低高度 A_{mn} を計算し、次の式より得る。

$$\begin{cases} \text{if } (A_{mx} - A_{mn}) < 300m, \text{ then } T = (A_{mx} - A_{mn}) / 300 \\ \text{if } (A_{mx} - A_{mn}) > 300m, \text{ then } T = 1 \end{cases}$$

(3) R : 降雨因子

Link データの各月の降水量と雨日数を使用。雨の強度を各月の降水量をその月の雨日数で割ることにより表現する。そして最大の雨の強度と水食の降雨因子 R を次式のように結びつける。

$$Ia_m = P_m / PD_m$$

Ia_m : m 月の雨強度、 P_m : m 月の降水量、 PD_m : m 月の雨日数

$MxIa = \text{MAX}(Ia_1, Ia_2, \dots, Ia_12)$: 最高雨強度

$$\begin{cases} \text{If } MxIa < 2, \text{ then } R = 0 \\ \text{If } MxIa > 2 \text{ and } MxIa < 20, \text{ then } R = (MxIa - 2) / 18 \\ \text{If } MxIa > 20, \text{ then } R = 1 \end{cases}$$

(4) L : 土地利用因子

土地の利用の仕方によって、水食の受けやすさが変わる。森林より農地のほうが水食をうけやすいし、農地でも放牧地や耕地によって侵食の受けやすさは異なり、また作物によっても変化する。本研究では作物に関する違いは考慮せず、耕地の L を 0.7 とした。放牧地においては過放牧による水食の受けやすさの増大を考慮して、各国の家畜頭数密度を求めて次の式により L を求めた。

$$\begin{cases} \text{if } SrS < 230, \text{ then } L_g = SrS / 230 \\ \text{if } SrS > 230, \text{ then } L_g = 1.0 \end{cases}$$

L_g : 放牧地の土地利用因子

SrS : Cc (環境容量) を越えた家畜頭数密度 [AU/ha] の 1961 年から 1990 年までの和

$Cc = 0.3$ [AU/ha] に設定

AU = 牛の頭数 + 0.2 × (羊, 山羊の頭数) + 1.2 × (馬, バッファロー, らくだ, ラバ, ロバの頭数)

3.2 風食

風食危険度 EW_i を次の式から求める

$$WE_i = g(C, S, L) = C \times S \times L$$

C : 気候因子、 S : 土壌因子、 L : 土地利用因子

(1) 気候因子 C

気候の風食危険度へ影響がある要素は、風速、降水量、可能蒸発散量、灌漑水量(灌漑地のみ)である。後ろの三つ要素は土壌水分と風食の関係を考慮に入れた要素である。気候因子は次式で与えられる。

天水地で

$$C = 0.01 \times \sum_{i=1}^{12} \left\{ V^3 \times \left(\frac{PET - P}{PET} \right) \times n \right\}$$

V : 地上 2 m の月平均風速 [m/s], P : 年降水量 [mm/yr]

PET : 可能蒸発散量 [mm/yr], n : その月の日数

灌漑地で

$$C = 0.01 \times \sum_{i=1}^{12} \left\{ V^3 \times \left(\frac{PET - (P + Q)}{PET} \right) \times n \right\}$$

Q : 灌漑水量 [mm/yr]

If $C \leq 0$, then $C = 0$

表-5 土壌因子 S

土性	Phase	土壌因子
Coarse	non-stony	3.5
	stony	1.75
medium	non-stony	1.25
	stony	0.62
fine	non-stony	1.85
	stony	0.92

(2) 土壌因子 S

粗い土壌ほど風食を受けやすい。FAO の土性の分類: coarse, medium, fine と Phase の分類: stony, non-stony より S を分類。表-5 参照

(3) 土地利用因子 L

風食も水食と同様に土地利用によって危険度が異なる。ここでは天水耕地は 0.55、灌漑耕地は 0.2、放牧地は水食と同じ扱いをした。

3.3 GIS について

(1) グリッドサイズ: 30 秒×30 秒

(2) 範囲: 全球; 90N-90S, 180W-180E

(3) 上記の設定にてそれぞれのグリッドごとに水食、風食危険度を求めて地図を作成した。危険度の強さは 4 段階(no degraded, low, moderate, strong)に分けられている。

3.4 生産性のロスと費用・便益分析

(1) Young(1994), Crosson(1997)を参考に生産性のロスは危険度の強さの四段階それぞれに、0%、10%、25%、50%の生産性のロスを仮定した。

(2) Dregne and Chow(1992)を参考に天水耕地、灌漑耕地、放牧地それぞれにおいて ha 当りの生産の経済価値を 95\$, 625\$, 17.5\$ とし、保全の便益を算出する。費用は Pimentel(1995)を参考に耕地の保全費用を 40\$/ha、放牧地を 5\$/ha とし算出した。

4 結果と考察

4.1 危険度地図

図-1 水食危険度地図

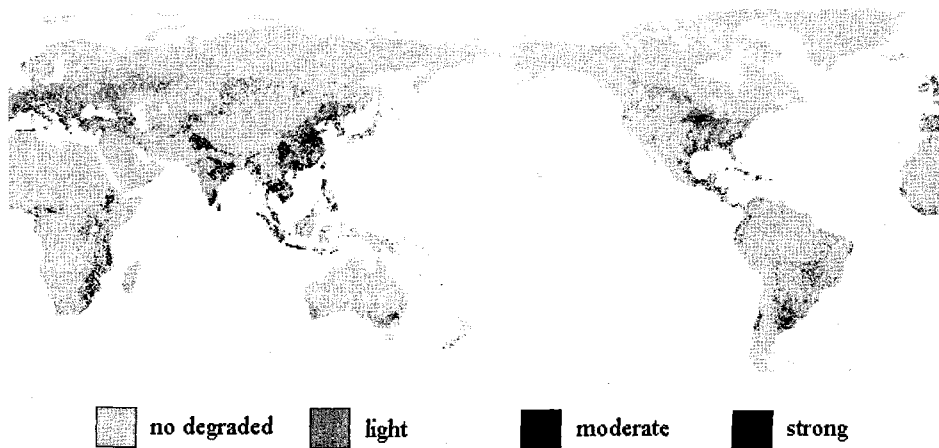
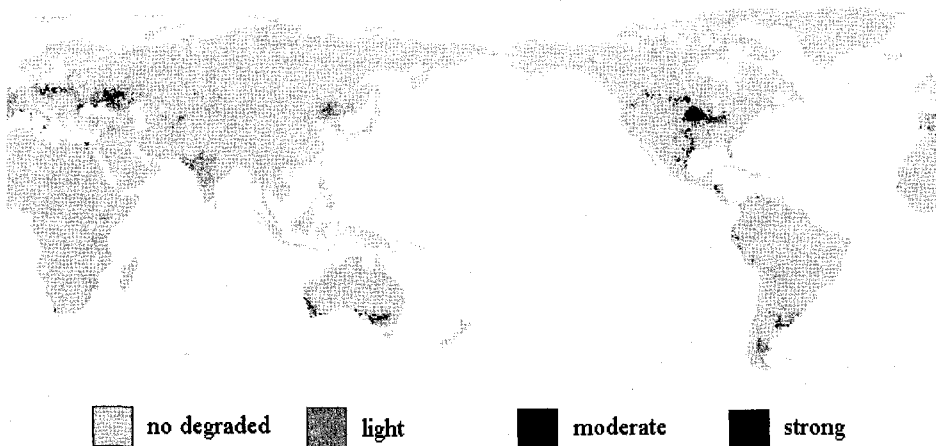


図-2 風食危険度地図



水食に関してはほぼ全世界に広がっていて中国、インドは危険度が高く広範囲に渡っている。GLASOD との比較に関してはおおよその一致をみせた。ただ放牧地の劣化面積は GLASOD より少なくなった。過放牧の影響を過小に評価しているためだと考えられる。風食に関しては GLASOD と比べて面積においてやはり小さいが、場所はだいたい一致している。しかしサハラ砂漠の南北とサウジアラビアで起こっている風食が地図には見られなかった。これも過放牧の影響の過小評価が原因だと考えられる。

4.2 費用便益分析

土地保全の費用便益分析として表 5 の結果を得た。中国において費用便益率が高く、また日本においても、保全の便益は中国に比べてはるかに小さいにもかかわらず、高い費用便益率を得た。他の文献の経済評価と比べてみると Pimentel etc. (1995)がアメリカにおける侵食の保全の便益として 443 億\$と試算している。これは本研究の結果、また他の文献の結果と比べて非常に大きい。G.J. von den Born etc. (2000)のヨーロッパの土壤劣化保全の便益が 10 億\$。Young(1994)が南アジアで侵食保全の便益が 70 億\$で本研究より、やや少なめの値を算出している。それぞれの研究に値の開きはあるものの保全が経済的に有効であるという結果は間違いなさそうである。

表-6 世界各国の便益と費用

国名	便益 [億\$]	費用 [億\$]	便益/費用
アルゼンチン	11.38	4.76	2.39
オーストラリア	15.38	6.47	2.38
中国	214.00	20.30	10.56
メキシコ	8.95	3.21	2.79
インド	100.01	12.87	7.77
アメリカ	54.28	19.21	2.83
日本	5.72	0.44	12.98
イギリス	2.27	0.94	2.41
ロシア	25.25	8.99	2.81
エジプト	1.03	0.43	2.38
世界	780.89	148.89	5.24

5 まとめと今後の研究

将来の食糧に対する土地劣化の影響を評価するモデルを構築した。そしてそのモデルを用いて侵食危険度の地図を作成した。GLASOD との比較は侵食危険度が高い場所に関してはだいたい一致しているが、劣化面積に関して、特に放牧地において、小さい値となっている。GLASOD との比較によりさらに精度を高めることが今後要求される。保全の費用便益は保全が有効であるとの結果を得た。今後モデルの中に off-site の損失を組み込むかが重要な課題である。

参考文献

- Batjes, N.H. (1996) Global assessment of land vulnerability to water erosion on a 1/2° by 1/2° grid. Land Degradation and Development 7, no. 4, p353-365
- Crosson, P., "Will erosion threaten agricultural productivity?", Environment 39, 8 (1997)
- Dregne, H. E., and N.T. Chow. 1992. Global desertifications dimensions and costs. In Degradation and restoration of arid lands, ed. H. E. Dregne. Lubbock, Tex. U.S.A.: Texas Tech University
- FAO/UNEP/UNESCO (1979) A provisional methodology for soil degradation assessment. FAO, Rome, Italy.
- G.J. van den Born, etc. (2000), Technical Report on Soil Degradation in Europe: an integrated economic and environmental assessment
- Hootsmans, R. M., etc. (2001) Modelling land degradation in IMAGE2, RIVM report 481508009
- Pimentel, D. etc. (1995) Environment outlook 2000. London, Earthscan Publications Ltd.
- Oldemann, L.R., etc. (2000) world map of the status of human-induced soil degradation - an explanatory note (GLASOD). Wageningen: ISRIC, Nairobi: UNEP
- Scherr, S. (1999). Soil degradation: a threat to developing country food security by 2015? Food, Agriculture and the Environment Discussion Paper No. 27. Washington, DC, IFPRI.
- Young, A. 1994. Land degradation in South Asia: its severity, causes and effect upon the people. FAO World Soil Resources Report 78, Rome