

サンパウロ州森林・環境保全研究計画を終えて

阿 部 和 時

1. はじめに

ブラジルのサンパウロ州は大西洋岸に面し、その面積は約 26 万 km²で、日本の約 70% にも及ぶ。州都のサンパウロ市やサントス市など大西洋岸の主要都市を中心として工業の発展がめざましいが、内陸部では大規模な農業・畜産業が盛んである。

20 世紀初め頃からの急速な農業開発によりサンパウロ州全域で森林面積が急激に減少し、1885 年の 80% から 1990 年にはわずかに 6% にまで減少したと見積もられている。広大な農地・放牧草地では大型機械を使用した大規模で粗放な営農管理が行われ、土壤侵食が急増して地力の低下・土砂流出の増大、洪水の頻発、水資源の枯渇など、水土保全上の社会問題が顕在化してきた。

こうした状況のもと、サンパウロ州立森林院から森林消失に起因する土壤侵食の実態を明らかにし今後の侵食防止対策を開発するための研究技術協力要請があり、これを受けて JICA は「サンパウロ州森林・環境保全研究計画」を発足させるに至った。したがって、本プロジェクトでは、土壤侵食と森林回復に関する二つの分野についての基礎的研究と関連する日本の技術移転を目的として進められることになった。

この計画は平成 5 年 2 月から平成 10 年 1 月まで行われ、さらにアフターケアとして平成 14 年度から 15 年度までの 2 年間行われた。筆者は土壤侵食分野の担当として本プロジェクトに関わってきたので、サンパウロ州内陸部における土壤侵食の実態と本プロジェクトの活動内容を紹介する。

Kazutoki Abe : Review of Completed “San Paulo Forest and Environment Conservation Project”

(独)森林総合研究所 水土保全研究領域

2. サンパウロ州及び試験地の概況

サンパウロ州は南緯 $20^{\circ} \sim 25^{\circ}$ の間に位置し、亜熱帯気候で年平均気温は 20°C である。地形は大西洋岸沿の狭い平坦地に接して標高 $700\sim 1,200\text{ m}$ の海岸山脈が北東から南西に走り、海岸山脈から西側内陸部に向かい徐々に標高を下げ、東に接するマットグロッソ州との境を流れるパラナ川に至る。内陸部には丘陵性の地形を示すところが多く、森林が伐採されて農業が大規模に営まれている。原植生はセラドンと呼ばれる常緑・落葉広葉樹が混成した中・高木が優占する閉鎖林と、セラードと呼ばれる常緑・落葉広葉樹が混成した低木または灌木が優占する未閉鎖林、及びその中間型が存在していたと考えられている。本プロジェクトの試験地は図1に示すように州西部のアシス市、パラガスパウリスタ市に設けられた。

降雨量は、パラガスパウリスタ市で年平均 $1,400\text{ mm}$ 、11月～3月は雨期で月平均 $140\sim 210\text{ mm}$ 、7～8月は少なく月平均 $30\sim 40\text{ mm}$ である。雨期には積乱雲によって短時間に高強度の雨が降ることが多い。表層地質は1.5億年から5,500万年前に形成された堆積層で、砂・シルト・粘土で構成され、固結した岩が出現するところは極めてまれである。

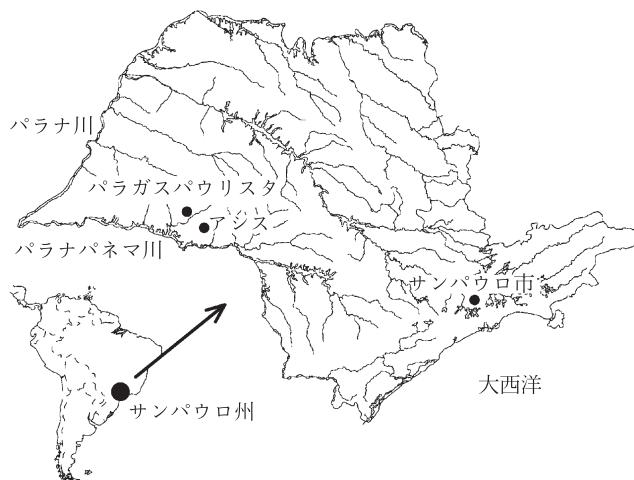


図1 サンパウロ州地図と試験地を設けたアシス、パラガスパウリスタ

3. 土壤侵食の実態と土地利用

サンパウロ州西部の農業地帯における土壤侵食形態は面状、リル、ガリーの3種の侵食である。土壤侵食の実態を本プロジェクトの試験流域であるパラガスパウリスタ市近郊のアグアダカショエイラ試験流域を例にとって紹介する。

アグアダカショエイラ試験流域は南北約9km、東西約4km、面積約3,500ha、勾配の緩い丘陵地形で流域内の標高の最高地点は609m、最低地点は440m、流域の中央部を南下する主流の平均勾配は約1度である。この流域では1962、1972、1984、1993年に空中写真が撮影されているので土地利用形態と侵食状況を判読し、その結果を表1に示した。

土地利用形態は1962年から1993年にかけて、放牧草地からサトウキビ畑への転換が進み、放牧草地が79%から32%に減少し、その分農地が増えることになった。ブラジルではサトウキビからアルコールを精製し、工業原料や自動車燃料として利用しており、その需要の伸びに応じてサトウキビ畑が増加した。残されている森林はユーカリやマツなどの経済林と侵食防止のために法律で伐採禁止になっている河道沿いの森林で、1984年に4%まで減少したが、その後は横ばい状態である。

侵食形態は面状侵食とリル侵食が顕著であり、両侵食形態ともに放牧草地でもサトウキビ畑でも発生する。放牧草地では造成時点からの時間が経過とともに、表層土壤が家畜の踏圧によって徐々に圧密されて浸透性が低下し、地表流が発生して面状侵食とリル侵食が起きやすくなる。サトウキビ畑はアルコール精製会社が農家から土地を借り上げ、大型農業機械を使って大規模な経営を行っている。数百ヘクタールに及ぶ流域全体がサトウキビ畑として使われることも珍しくない。このサトウキビ畑では収穫後と植え替えの時期に写真1に示すように畑全面を裸地状態にしてしまうため、この時期に豪雨があると激

表1 空中写真判読によるアグアダカショエライ試験流域の土地利用形態と侵食タイプの変遷（面積割合%）

年度	土地利用形態			侵食タイプ		
	放牧草地	農地	森林	面状侵食	リル	ガリー
1962	79	13	8	4	15	微少
1972	77	16	7	9	9	増加
1984	55	41	4	9	17	増加
1993	32	63	5	5	3	増加



写真 1 根株の植え替え直後のため裸地状態になっているサトウキビ畑



写真 2 アグアダカショエイラ試験流域内のガリー侵食（ガリー密度は $70 \text{ m}/\text{km}^2$ ）



写真 3 比較的急峻な放牧草地に発達したリル侵食

しい面状侵食とル侵食が生じ、凹地形を呈する部分では写真 2 に示すようなガリー侵食が発達することもある。写真 3 は放牧草地に発達したリル侵食である。放牧草地や農地で面状侵食やリル侵食が生じても大型機械で整地するとその痕跡は消されてしまうので、空中写真からは撮影時点の侵食発生面積しか判読することができないが、比較的広大な面積で侵食が発生していることが推察できる。ガリーは豪雨時に地表流が集中する流路の最上流端の凹地形部分で発達・形成されることが多く、当試験流域では一度の降雨でガリーが数十メートル発達した。1993 年時点での試験流域内にはガリーは約 2.5 km 、密度にすると $70 \text{ m}/\text{km}^2$ 発達していた。ガリーは地形や地質によって発達状況が明確に異なる傾向があり、写真 4 に示す近隣の流域ではガリー密度が $1,395 \text{ m}/\text{km}^2$ に及ぶ流域も存在する。

このように土壤侵食が非常に発生しやすい条件下にはあるが、崩壊、土石流、地すべりのように多量の土砂が一度に流出する現象が起きないため、人災になることはほとんどな

い。土壤侵食が引き起こす問題は農地の破壊、土壤生産力の低下、水質汚染、ダムの埋没、河床の上昇による洪水の発生などであり、深刻な社会問題となっている。

4. 現地斜面における現場水路侵食実験

面状侵食やリル及びガリー侵食の発達状況は土地利用形態によって異なる。そこで、図2に示す現場水路侵食実験で求

めることができる粗度係数(n)、浸透強度(s)、侵食土砂量(E)の各因子によって、各種土地利用の斜面の表面侵食に対する特性を検討した。

この装置は、高さ20cm、長さ100cmの側面鉄板2枚を20cmの間隔をあけて斜面傾斜方向に深さ10cm打ち込み、簡易な水路を作り、この水路の上部から一定量の水を給水し、流路の下端で地表面を流出してくる流水を採取するものである。水路を流下する流水が定常状態のときに、水路上端に黒インキを滴下して、これが水路下端に到達する時間を計測し、流速を求めた。実験結果を表2に示した。

粗度係数は、天然2次林、エリオッティマツ林地の値が大きく、林道やサトウキビ畠が小さく、ユーカリ林地が放牧草地や収穫直前のサトウキビ畠地と同等の値であった。粗度係数値が小さいことは、地表水の集中流下が起こり、リルやガリーが発生しやすくなることを示している。したがって、粗度の大きい天然2次林地やエリオッティマツ林地では表面侵食が発生する可能性は小さく、サトウキビ畠や放牧草地、ユーカリ林地は表面侵食が発生する可能性が高いという結果になった。

林道や放牧草地、サトウキビ畠、ユーカリ林地の浸透強度を降雨強度に換算すると50mm/hr以下であった。試験流域では雷雨性の豪雨が多いことから、頻繁な地表流の発生が予想される結果となった。しかし、エリオッティマツ林地や天然2次林地では、地表流発生の心配のない値が得られ、侵食防止に対する森林の有効性を裏づける結果が示された。

侵食土砂量は、林道、牛道、サトウキビ畠などでは高い侵食土砂量を示し、



写真4 近隣の流域内に発達したガリー侵食
(ガリー密度は $1,395\text{ m}/\text{km}^2$)

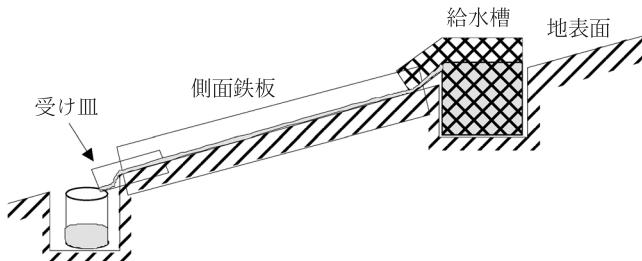


図 2 現地水路侵食実験装置

表 2 現地水路侵食実験で測定された土地利用形態別の粗度係数、浸透強度、侵食土砂量

土地利用形態	粗度係数	浸透強度 mm/h	侵食土砂量
			g/m ² /s
ユーカリ林地（強度放牧）	0.055	34.2	0.15
ユーカリ林地（弱度放牧）	0.132	45.6	0.001
エリオッティマツ林	0.233	115.4	0.001
天然林（セハード）	0.346	1,191.3	0.001
放牧草地	0.076	49.2	0.005
牛道（裸地）	0.019	—	1.501
サトウキビ（植栽直後）	0.015	17.8	1.239
サトウキビ（収穫直前）	0.084	—	—
林道（裸地）	0.007	22.9	1.245

注:「—」印は欠測を意味している。

ユーカリ林地では管理が不十分な場合は、裸地の 1/10 程度の侵食量が発生する可能性が推定された。

5. 土壤侵食対策

アグアダカショエイラ試験流域の土地利用状況では、農地・放牧草地が 90% 以上を占めているように、サンパウロ州内陸部においても、この土地利用割合は同じであるため、土砂問題の主要な原因是、農業用地における土壤侵食であると指摘できる。農地を所有する個々の農家にとっても、農地の侵食は土地生産力の低下や農地の分断など深刻な問題となる。このため、州政府による指導や財政援助によって、個々の農家が土壤侵食防止対策を実施したり、渓畔林の保全・造成が行われている。



写真 5 広大なサトウキビ畑に造成された表面侵食防止用の等高線土壠工法
(降雨直後なので土壠の背面に水が溜まっている)



写真 6 勾配のある道路の両側に延々と設けられた地表流貯留工

ビ畑を経営する製糖会社や大規模農家では実施している。土壠堤の放水路は煉瓦とモルタルで固められている。

3) 溪畔林保全

ブラジルでは溪畔域や水資源となる湖沼周辺の天然林の取り扱いが、1965年に制定された森林法で制限されている。例えば、幅 10 m 以下の川では岸から片側 30 m 以上の森林を保全することが義務づけられている。川幅 10 m～50 m では片側 50 m 以上、川幅 50 m～200 m では片側 100 m 以上、川幅 200 m～600

1) 等高線土壠工法

放牧草地やサトウキビ畑では豪雨時に発生する地表流によって、容易に土壤侵食が起こる。地表が牧草やサトウキビで被覆されている場合には面状侵食は起こりにくいが、地表流が集中してしまうとリル、ガリー侵食が発達する。このため、地表流の集中を避けて出水のピーク流量を減少させるために、写真 5 に示す等高線土壠工がほとんどの農地で設置されている。この工法は等高線上に高さ 1～2 m の土壠を、比高 3～5 m 間隔に設け、斜面を流下する地表流を土壠の背後に貯留するものである。

2) 土壠堤

本来は灌漑用水貯留のために設置するが、ガリーが発達した渓流に土壠堤を設置することによりガリーの発達を抑制することができる。土壠堤建設には費用がかかるため、一般的な農家では実施できないが、サトウキ

m では片側 200 m 以上, 川幅 600 m 以上では片側 500 m 以上の森林の保全が義務づけられている。この法律を遵守させるため森林警察も組織されている。

4) 道路沿いの地表流貯留工

舗装された一般道あるいは未舗装の農道においても傾斜のある道路では、豪雨時に路面で生じる地表流によって表面侵食が生じないように、写真 6 に示すような道路脇に連続した凹地状の地表流貯留工を設けることが多い。傾斜が急な道路では路面上で発生した地表流は路面の脇を集中して流れガリーに発達することがあるので、この工法によって防止している。

6. プロジェクトにおける侵食防止研究の取り組み

本プロジェクトではサンパウロ州森林院の研究者とともに、サンパウロ州の内陸部でみられる荒廃地の土壤侵食防止及び森林回復に関する研究を実施した。

侵食防止分野では、①試験流域及びその周辺流域における侵食形態、規模、分布、さらに土質、地形、地被、降雨等の因子との関連性についての研究、②侵食プロット試験によるマツ林、広葉樹林、サトウキビ、牧草、植栽地等の植生が持つ侵食防止効果の研究、③ガリーが発達した荒廃河川に適用できる現地入手資材を活用した渓間工、山腹工の開発、が主な課題であった。



写真 7 USLE（汎用侵食量計算式）で使われる斜面長 22.1 m の侵食プロット試験地（手前が農耕裸地プロット、奥が広葉樹植栽プロット）



写真 8 侵食プロット斜面の下端に設けられた集水用トレンチ

①の研究ではこの地域における侵食の実態が示され、その一部は3、4章で紹介した。

②の研究では森林、牧草、サトウキビ等の農作物などの植生の侵食防止効果をUSLEの作物管理係数として定量的に求めることを考え、斜面長22.1mの侵食プロット試験地を当初6基設置した。各プロットの植生はマツ林、広葉樹林、耕作裸地、牧草、リルが発生した荒廃草地、広葉樹を植栽した草地とした。写真7、8にプロット試験地を示した。各プロットは平成7年から10年にかけて順次完成し、流出水量、流出土砂量、土壤水分を計測している。その後、落雷による機材の破損で一部のプロットでのデータ観測が中断している。USLEの作物管理係数を求めるには長期間の連続したデータが必要であり、現時点では結果を示すことはできないが、担当研究者の努力によって近い将来その成果が表れるものと期待している。

③の研究ではアグアダカショエイラ試験流域内の最上流部のガリーが発達した流域を対象に、渓間工事と山腹工事が実施された。この計画はサンパウロ森林院のプロジェクト担当者達と協力して立案され、渓間工事ではフトン籠とユーカリ丸太を使用した床固工と護岸工が多数施工され、山腹工にはフトン籠による水路工、丸太筋工、張り芝工、植栽工等が施工され、平成10年に完成了。写真9は工事前のガリーが発達している状況を、写真10は工事後の平成



写真9 ガリー侵食防止工事（現場資材を活用して床固工と護岸工を実施）



写真10 ガリー侵食防止工事から3年が経過して植生が回復した状況

14年11月の状況で、ガリーだった部分は植生によって安定した状態になったことが示されている。この他、試験流域の溪岸には侵食防止用の溪岸保全林が多数造成された。

7. おわりに

サンパウロ州では森林が面積で6%にまで伐採され、その跡地では大規模で粗放な農業経営が行われているが、勾配が緩やかな丘陵地形のため、崩壊や土石流などによる災害が発生することはない。しかし、年間2億トンに及ぶ土壤侵食は深刻な問題を各方面で引き起こしており、土壤侵食防止はこの地域の最も重要な解決しなければならない課題になっている。

広大な地域で生じている土壤侵食に対応するには、農地開発以前に存在した森林生態系が本来持っていた地表面を安定させる働きを生かした対策が最も有効ではないだろうか。このため、「サンパウロ州森林・環境保全研究計画」では、森林をはじめとする種々の地被植生の土壤侵食防止効果を明らかにするとともに、森林植生の回復技術の開発を当面の目標としている。その達成には現在実施している研究の継続によるさらなるデータ収集が必要であるが、この研究計画によって得られた成果は、この地域一帯の土壤侵食問題を解決する方法を提示する貴重な成果になると州政府、地元自治体、住民から広く期待されている。日本からの援助は平成15年度をもって終了したが、これまで研究を担当してきたサンパウロ州立森林院の研究者の奮闘を今後とも祈りたい。