

熱帯せき悪化土壌の地力回復

脇 孝 介

1. 熱帯林土壌のせき悪化の実態

FAO の推定によると、1989 年世界の森林面積 4,049 百万 ha のうち、約 18% に相当する 719 百万 ha の森林土壌はせき悪化の傾向にある。アジア地域では、総森林面積の 27% に相当する 344 百万 ha が人為によりせき悪化しており、森林の伐採や各種開発による植物の収奪が主な原因である。

土壌のせき悪化は水や風により土壌物質が系外に移動・流失する侵蝕過程と物質の系外への流出を伴わない in site での理学的・化学的・生物的諸性質の劣化過程とがある。

森林土壌の備える諸機能は立地固有の環境条件下でバランスのとれた物質循環に依存しており、生態系のバランスが破壊されると森林土壌の諸機能の劣化が起こる。土壌のせき悪化はバイオマスの生産量低下として現れる。勿論、石礫地、急峻地、泥炭地、塩類土、酸性硫酸塩土など、本来の性質の劣悪な問題土壌もせき悪土壌に含まれる。従って、土壌のせき悪化の程度は外的インパクトの強度だけではなく、土壌固有の潜在力にも左右される。

2. せき悪化土壌の地力改善調査

東南アジアに分布するせき悪化土壌の生産力回復と緑地環境改善を図るため、国際緑化推進センターでは、林野庁の海外林業協力推進事業の一つである“せき悪化土壌に森林を再生し、生産力を回復する技術開発を目指した基礎調査”を実施してきた。調査内容は、

1. せき悪化土壌の実態と生産性の解明

Kosuke Waki: Improving of Soil Fertility at the Degraded Land by Reforestation in Tropical Area
(財)国際緑化推進センター

2. せき悪化土壌の改良技術の開発のための試験地の造成

3. 生産力回復のための技術指針の作成

を主とし、これらの項目を補足するために、

1. 実証林と類似の立地条件下で保存されている成熟林下の土壌諸性質の調査

2. 実証試験地での幼齢林における環境改善要因の計測などの調査を合わせて実施した。

3. 調査計画

計画の概要は次の通りである。1. 調査の対象国はマレーシア、インドネシア、タイの3ヶ国、2. 事業期間は平成7年度より12年度までの6年間で、各国での試験の実施期間はそれぞれ3ヶ年、3. 試験実施機関はそれぞれの国の林業研究機関とした。

1) せき悪化土壌改良試験対象地の選択

せき悪化土壌の実情は国により異なる。試験対象となるせき悪林は生産力の回復だけでなく、緑地環境造成をも目指すこととした。実証試験地の選択には、

1. 各国の造林事情、例えば、当該国の希望樹種、種子や苗木の入手の難易など、2. 試験地への調査や資材運搬のアクセスの良さ、3. 試験地の管理のし易さ（機材の保安、森林火災、放牧家畜の被害）などの観点から次の箇所を選んだ。

マレーシア：国土面積約33百万haの57%は潜在的な土壌劣悪化の可能性を持っているとされているが、マレー半島の東海岸沿いに集中分布するBRIS土壌（砂丘未熟土）に地力回復・環境緑化を目指した実証試験地を設定した。BRIS土壌は間氷期の海進、海退にともなって、海岸線に沿って形成された浜堤で、内陸に向かって100m～10kmの幅で分布する。浜堤は形成時期に新旧があり、古い浜堤は若いものに比べて粘土がやや多いが、BRIS土壌は通常砂分が90%以上を占め、養分や水分の保持力が著しく低いため、農用地としての開発も遅れ、粗放な管理で放置された荒廃地が多い。

インドネシア：インドネシアではせき悪化土壌をdegraded soilでなく、critical soilと称している。総森林面積190百万haのうち、38百万haは生産性の低い劣悪な灌木林やアランアラン草地からなり、そのうちのかんりの部分は裸地状で、critical landに分類されている。critical landの多いのは、移動耕作地帯で、年々増加している。スマトラ島の東部には海拔15～70mのほとんど平坦な台地に分布している。ここには粗粒珪長岩質堆積岩の風化物が堆積し

ている。砂壤土で漂白化作用を受けた赤黄色ポドゾル土壤の地域である。試験地は粗放な農業経営により草地化した場所に設定した。

タイ：1980年の推定によると、国土面積の25%以上が土壤浸食の影響を受けており、森林の伐採・木材の搬出が土壤の劣化や土壤浸食の主要な要因とされている。この外に、理化学性の不良な問題土壤として、塩類化土壤、酸性硫酸塩土壤、砂質土、岩礫地など耕作に不適な土壤がある。

塩類化土壤は可溶性塩含量が多く、植物の生長は阻害される。塩類化土壤には海岸性と内陸性がある。また、塩類化は自然の過程でできるものと人的要因、いわゆる2次的集積過程でできるものがある。塩類化土壤の主要部分は肥沃な地域に発生しているので、その被害は大きい。

塩類化はいろいろな要因で拡大するが、森林伐採はその要因の一つである。根で吸収されていた水分が、伐採によって地表から発散するようになるために、地表に塩類が集積しやすくなる。東北タイには地下3~5mの深さに、塩分を含んだ頁岩、砂岩の互層からなるマハサラカン層が介在し、乾季には地表にスポット状の塩類殻を生ずる。このような地域を試験地とした。

4. 試験林の造成

1) 植栽樹種

マレーシア：*Acacia auriculiformis*, *A. mangium*, *Hopea odorata*, *Casuarina equisetifolia*, *Cinnamomum iners*, *Melaleuca cajuputi* の6樹種を選んだ。通常の単純植栽の外に、地被植物の導入(*C. iners*を除く5樹種)及び*Acacia* 2樹種について、他の4樹種との混合植栽の3種類の試験を実施した。

インドネシア：フェーズ1に*Paraserianthes falcataria*, *Acacia mangium*, *Peronema canescense*を、フェーズ2に*Swietenia macrophylla*, *Gmelina arborea*, *Eucalyptus deglupta*を選び、いずれも単純植栽試験をした。

タイ：*Eucalyptus camaldulensis*, *Albizia lebbbeck*の2樹種について、単純植栽と2樹種列状混植試験をした。

2) 植栽方法と植栽時期

マレーシア：植穴の大きさを30 cm×30 cm×30 cm、単純及び地被植物導入区の植栽間隔は2.0 m×4.0 m、列状混植区では2.0 m×2.0 mとした。施肥処理は、単純植栽区ではi) 無施肥, ii) 有機資材(ココナッツハスク), iii) 有機資材+緩効性肥料 50 g/本, iv) 有機資材+緩効性肥料 100 g/本, v) 有機資材+化成肥料(N:P:K=15:15:15) 5 g/本+CIRP(リン鉱石)、混植区では

化成肥料 5 gN/ 本, 地被植物導入区では CIRP を表面散布し, 1 ヶ月後に尿素 100 kgN/ha を与えた。植栽時期は 1997 年 1 月~2 月である。

インドネシア: 植穴は 20 cm×20 cm×20 cm, 植栽間隔は 2.0 m×3.0 m とした。施肥処理は i) 有機資材 (牛糞) 200 g/ 本, ii) 有機資材+NPK100 g/ 本, 有機資材+NPK 100 g/ 本+CaCO₃ 45 g/ 本, iv) NPK100 g/ 本+CaCO₃ 45 g/ 本, v) 無施肥とした。植栽時期はフェーズ 1 が 1997 年 2 月, フェーズ 2 が 1997 年 11 月, *E. deglupta* のみは 1998 年 1 月である。

タイ: 植穴は 30 cm×30 cm×30 cm, 植栽間隔は植栽方法の区別なく 2.0 m×3.0 m とした。施肥処理は i) 無施肥, ii) ドロマイト (苦土石灰 1,250 g/ha), iii) ドロマイト+堆肥 1 kg, iv) ドロマイト+化成肥料 (N:P:K=15:15:15) 100 g/ 本とし, 全ての処理区で粃殻 1kg/ 本でマルチをした。植栽は 1997 年 8 月である。

各国とも処理区間には 3~5 m 間隔の緩衝帯を設けた。

5. 各試験地での結果

1) 生存率 ('99 年)

マレーシアでは, *A. auriculiformis* は 70~90%, *A. mangium* は約 50% と比較的高い活着率であったが, 他の 4 樹種の生存率は 30% 以下で著しく活着が悪かった。インドネシアでは, 植栽後 18 ヶ月目の生存率は *P. falcata* 29%, *A. mangium* 19%, *P. canescense* 6%, *S. macrophylla* 15%, *G. arborea* 83%, *E. deglupta* 21% であった。タイでは *E. camaldulensis* 82~97%, *A. lebeck* 51~89% であった。

植栽時期がエル・ニーニョによる異常乾燥が東南アジアで生じた時期と重なったこと, 及び乾燥のため植栽を遅らせた試験区で苗木入手スケジュールが混乱したことなどから, 耐乾性の強い樹種, *Acacia* や *Gmelina* を除いて, 総じて活着率は低かった。ことに砂質土壌では養分, 水分の保持力が低いので, 植栽直後の乾燥被害を防ぐために, 降雨パターンに十分考慮する必要がある。試験地付近の平均昼間気温は 25~40℃ の範囲であるが, 乾季には地表温度が 50℃ 近くまで達した例もある (図 1)。地温が上昇すると, 表層土壌が乾燥するので, 裸地への地被植物の導入は成功しなかった。一方, ココナッツハスクやモミガラなどによるマルチは, C/N 比が高い資材であるので, 肥料効果は低い, マルチによる土壌水分保持効果は大きかった。

2) 成長経過

表 1 マレーシアの混植及び単植試験でのアカシアの平均樹高成長 (cm)

		<i>A. mangium</i>		<i>A. auriculiformis</i>	
処理		7/ '97	1/ '99	7/ '97	1/ '99
無施肥区 混植	C.e.	58	261	99	298
	M.c.	67	292	89	297
	C.i.	50	260	103	328
	H.o.	50	235	90	342
施肥区 混植	C.e.	67	224	109	286
	M.c.	63	233	96	247
	C.i.	57	272	102	321
	H.o.	67	216	114	310
施肥区 単植	1	35	212	82	178
	2	33	97	未 測	定
	3	39	240	69	240
	4	35	261	78	294
	5	40	228	54	330

C.e. : *Casuarina equisetifolia* M.c. : *Melaleuca cajuputi*

C.i. : *Cinnamomum iners* H.o. : *Hopea odorata*

1 : 無施肥, 2 : ココナツハスク, 3 : 2+緩効肥料 50 g

4 : 2+緩効肥料 100 g, 5 : 2+CIRP200 g+NPK33 g

マレーシア : 18 ヶ月の成長量についてみると, 単純植栽では無施肥で *A. auriculiformis* が 96 cm, *A. mangium* の 177 cm に対して, 有機物+肥料の処理では, 前者が 221 cm, 後者が 205 cm となり, 施肥の効果が認められた。しかし, 混植区では無施肥区がそれぞれ 221 cm と 206 cm であったのに対し, 施肥区では 186 cm と 198 cm で, 肥効が認められなかった (表 1)。その他の 4 樹種については, 枯死率が高い上に, 梢端枯れ症状が顕著にみられ, 成長は比較できなかった。異常乾燥気象の影響はマレーシアで最も顕著であった。

インドネシア : フェーズ 1 では, 植栽直後に降雨がなく, 枯死率が高かった。*P. falcataria*, *A. mangium* 区に森林火災の発生, 野生動物による食害などがあって, 成長に大きく影響した。植栽後 18 ヶ月から 33 ヶ月までの 15 ヶ月間の樹高成長量は *A. mangium* 3.84 m~4.57 m > *P. falcataria* 1.81 m~2.45 m > *P. canescense* 1.11 m~1.64 m と樹種間に差があった (表 2)。ただ, 酸性矯正のために CaCO_3 を施用したが, 成長には何ら影響が認められなかった。

フェーズ 2 では, 成長初期に森林火災の被害を受けたので, 普通より生存率

表 2 インドネシアのフェーズ 1 研究における各処理区の成長経過

月数	平均樹高 (cm)				平均直径 (mm)	
	13	18	25	33	13	33
I-A	479	643	761	858	51	86
II-A	487	747	887	992	55	93
III-A	304	666	767	881	50	81
IV-A	365	470	557	651	43	66
I-B	573	850	1058	1307	63	128
II-B	563	833	997	1276	65	168
III-B	522	771	945	1155	65	184
IV-B	597	890	1074	1293	69	149
I-C	126	177	224	308	20	51
II-C	109	131	184	295	17	39
III-C	90	113	183	240	14	36
IV-C	107	165	209	276	20	43

I : 有機肥料, II : I + NPK, III : II + CaCO₃, IV : NPK + CaCO₃

A : *Paraserianthes falcataria*, B : *Acacia mangium*, C : *Pero-nema canescens*

は低かった。植栽後 11 ヶ月から 24 ヶ月までの 13 ヶ月の樹高成長量は *E. deglupta* 2.85 m~3.59 m > *G. aborea* 2.01 m~2.49 m > *S. macrophylla* 0.76 m~1.2 m であった。なお、*G. aborea* は火災被害を蒙っても萌芽再生が著しく多かった。試験期間は平成 11 年度で終了したが、その後の成長は必ずしも順調でなく、*G. aborea* に先枯れが発生していた (写真 1)。今後の成長衰退の恐れがあり、その原因究明と対策が望まれる。

タイ : 植栽後 7 ヶ月より、34 ヶ月までの 27 ヶ月間の樹高成長は、単純植栽で、*E. camaldulensis* 6.7 m~8.4 m と *A. lebbec* 0.53 m~1.95 m、混植区で、それぞれ 8.77 m~9.41 m と 1.02 m~2.27 m で、両樹種間で大きな差があった。とくに混植区では前者の成長が良好であった。また、施肥効果も明らかで、堆肥施用より即効性の化成肥料の効果が顕著であった。

3) 幼齡木の地上部バイオマスの推定

E. camaldulensis と *A. lebbeck* の幼齡木について直径 (d) 又は地際径 (d₀) と地上部バイオマスの各構成成分、幹、枝、葉との間に相対成長式

$$Y = aX^b$$

が成り立つか調べた (表 5)。その結果、地上部バイオマスの各構成成分の乾燥

表 3 インドネシアのフェーズ 2 研究における各処理区の成長経過

月数	平均樹高 (cm)			平均直径 (mm)	
	11	18	24	11	24
I -D	41	86	161	4	22
II -D	49	92	161	5	20
III -D	62	99	138	5	20
IV -D	49	87	142	5	20
V -D	49	83	125	4	18
I -E	159	264	347	26	42
II -E	196	297	393	25	48
III -E	178	274	372	21	48
IV -E	169	267	355	18	46
V -E	136	229	339	12	40
I -F	130	282	458	11	52
II -F	181	328	503	16	55
III -F	201	374	560	19	60
IV -F	154	322	494	13	54
V -F	124	236	409	9	45

I : 有機肥料, II : I + NPK, III : II + CaCO₃, IV : NPK + CaCO₃, V : 無処理

D : *Swietenia macrophylla*, E : *Gmelina arborea*, F : *Eucalyptus deglupta*



写真 1

表 4 タイの単植及び混植試験でのユーカリ及びレベックの平均樹高成長

処理		<i>E. camaldulensis</i>				<i>A. lebbbeck</i>			
		4/ '98	9/ '98	7/ '99	7/ '00	4/ '98	9/ '98	7/ '99	7/ '00
単植	1	1.25	2.38	5.43	8.7	0.18	0.19	0.55	0.71
	2	1.32	2.03	5.73	8.02	0.15	0.43	0.94	1.71
	3	1.46	2.10	6.16	9.02	0.15	0.25	1.04	1.84
	4	1.33	2.75	6.91	9.69	0.16	0.30	0.64	2.11
混植	2	1.31	2.00	5.83	10.08	0.14	0.21	0.69	1.16
	3	1.26	2.23	6.79	10.67	0.15	0.23	0.83	1.33
	4	1.36	2.33	6.77	10.52	0.14	0.28	1.10	2.41

注) 1: 無施肥, 2: ドロマイト, 3: ドロマイト+堆肥, 4: ドロマイト+化成肥料

表 5 樹体各部の相対成長式 ($Y=aX^b$) の係数と重相関係数

	<i>Eucalyptus camaldulensis</i>			<i>Albizia lebbbeck</i>		
	X=胸高直径 (dbh)(cm)			X=地際直径 (d_0)(cm)		
	a	b	R ²	a	b	R ²
幹	0.1276	2.1476	0.9737	0.0065	2.9433	0.9787
枝	0.0166	2.1179	0.9884	0.0008	3.1786	0.9342
葉	0.0369	1.7136	0.9709	0.0039	2.2976	0.9643
	X= (dbh) ² ・樹高 (cm ² ・m)			X=d ₀ ² ・樹高 (cm ² ・m)		
	a	b	R ²	a	b	R ²
幹	0.0593	0.8185	0.9805	0.0202	0.9067	0.9928
枝	0.008	0.8035	0.9863	0.0026	0.9793	0.9479
葉	0.0204	0.6496	0.9673	0.0098	0.6994	0.9552

重量 (Y, kg) と直径 (X, cm) との間に, $X=d^2h$ の時と遜色ない高い相関関係が認められた。

ユーカリで最も成長の良かったドロマイト+化成肥料処理区 (立木本数 1,585 本/ha, 平均樹高 9.7 m, 平均胸高直径 7.2 cm) の地上部バイオマス量を推定すると, 幹, 枝, 葉の乾燥重量は, それぞれ 15.3, 1.9, 1.8 t/ha であった。一方レベックの同処理区 (立木本数 1,470 本/ha, 平均樹高 2.1 m, 平均地際径 2.4 cm) では, 幹, 枝, 葉の乾燥重量は, それぞれ 285, 44, 88 kg/ha と推定された。

4) 除草について

林床に優占するチガヤ、シダ類は森林火災の原因となるので、除去することが望ましい。火入れした後に除草剤処理（ラウンドアップ）すると、チガヤ類は完全に消失したが、薬剤処理による環境汚染の恐れや林床植物の完全除去は地表の裸地化をもたらし、地表浸食の促進及び地表温度の上昇をもたらすなどのマイナス効果が予想される。

除草の頻度や時期は雑草の種類、繁茂状態に左右される。一般には刈り払いは、初年度は3回、2年度以降は2回行くとよい。刈り払いは植栽木の樹高が平均3mに達するまで続ける。植栽木の樹高以下の草丈の雑草に囲まれている植栽木は、乾季の強い日射、高温、乾燥に曝されないで、生存率が高まるとされている。

5) リターホール

インドネシアでフェーズ1の *P. falcataria*, *A. mangium* 及びフェーズ2の *G. aborea*, *E. deglupta* の林床で99年7月から10月までの4ヶ月間リターフォールを集めた。各樹種の1年間のリターホール量はおおよそ4.5, 5.6, 2.8及び1.4t/haと推定された。タイでは2樹種の単純植栽区でリターホールを毎月測定した。リターホールの落下パターンは、*E. camaldulensis* では雨季の6月に最も多く、1, 4, 5月が最少であった。ユーカリのリターホール量は年間3.6~4.3t/haの範囲で、施肥処理区で多かった。レベックは林冠の閉鎖が遅れており、0.3~1.4t/haと少なかった。

6) 葉に含まれる養分量

生葉の養分含有率は樹種によって特徴があり、10月に採取した *E. camaldulensis* の生葉には、N:1.60~1.94%, P:0.11~0.14%, Na:573~1,616ppm 含まれていた。*A. lebbbeck* の生葉では、N:4.13~5.06%, P:0.19~0.27%, Na:434~726ppm で、NとPの濃度はユーカリより高かった。一方、Na濃度はユーカリがレベックより1.3~2.2倍高く、耐塩性が高いことを示していた。また、施肥処理は養分含有率に影響した。

ユーカリとレベックの葉に含まれる養分量を、これら含有率と上記の葉量から推定した。ユーカリでは、N:34, P:2.5, K:21.8, Na:1.2kg/ha, レベックでは、N:3.6, P:0.2, K:0.99, Na:0.04kg/ha とはなった。

リターとして地上に落下したものには、ユーカリでN:0.93~1.28%, Na:228~418ppm に対して、レベックでは、N:2.20~2.78%, Na:208~566ppm であった。リターのNaは雨水によって流出しやすいので、生葉よりかなり濃度が低かった。

7) 地温の変動

タイの塩類化土壤中、裸地の地温変化を測定した。測定は毎月1日、6:00 am から 5:00 pm までの11時間にわたり、1時間ごとに、地表、地中10 cm、20 cm の3個所で測定した(図1)。早朝は地表より地中温度が高く、日射とともに地表温度は急激に高まり、午後1時から2時に最高温度に達した。地中温度は徐々に高まり、午後4時頃に最も高くなった。午後5時頃には地中と地表の温度が逆転し、地表温度は低くなった。地表の大きな温度変化は、地被植生の存在で緩和される。

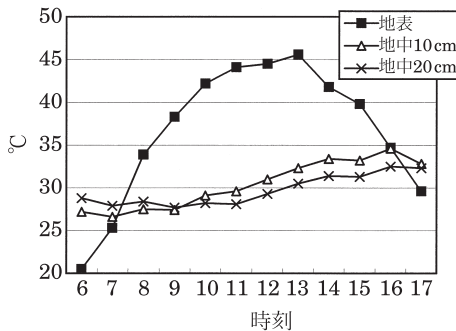


図1 地表及び地中温度の日変化

6. 今後検討が望まれる問題

6年間の調査を終了するにあたって、次のような問題が指摘される。

1) せき悪地の緑化のために早生樹を導入したが、早生樹林の保育と成林後にどのような林に誘導するか長期目標を検討しておく必要がある。

2) 早生樹を導入してせき悪地の改善を図るためには、リターを通じた養分循環系を明らかにし、再生林の保全的管理に役立てる必要がある。

3) せき悪地に耐性のある樹種を選択し、厳しい環境でも活着、生育可能な育苗法、たとえば苗木のハードニング法など、を確立すること、及び菌根菌の接種効果などを明らかにする必要がある。

4) 乾季の顕著な地域では、局地的な降水パターンを把握し、植栽時期の適正化を図ると共に、その時期に合わせた育苗計画が必要である。

5) 養水分の保持力の低い砂質土壌では、水分保持のために効果的な有機質マルチ資材の開発や地被植物の導入手法の開発などが必要である。

6) 森林火災を予防するために、できるだけ除草剤を使用しないでチガヤを除去することが望まれる。

最後に、この種の実証試験では、実証すべき項目をできるだけ絞り込み、試験設計を単純にすること、異常気象などで試験実行が困難なときには、臨機に計画変更が可能なような全体計画や実施期間の延長などが可能な予算的措置が望まれる。

図書紹介

◎熱帯樹木病害の診断マニュアル ―アグロフォレストリー作物の病害も含めて― 小林享夫著、(Takao Kobayashi: Diagnostic manual for tree diseases in the tropics—with some diseases of agroforestry crops—) 発行：(財)国際緑化推進センター，2001 年，178 p.

この英文マニュアルは、著者の小林享夫博士が、森林総合研究所およびその前身である林業試験場、さらに東京農業大学国際農業開発学科の教授として、自ら東南アジアや南米を中心とする熱帯林で調査した樹木病害について、わかりやすく集大成したものであり、すこぶる便利なマニュアルとなっている。

内容は、I. 森林樹木の病害、II. アグロフォレストリーで利用される工芸作物と熱帯果樹の病害、III. 緑化樹の病害に分かれており、それぞれ主な樹種別に、I では 55 病害、II では 58 病害、III では 100 以上の病害がとりあげられている。それぞれの病害の病徴と被害、それを起こす病原体、防除の要点が概説されているとともに、解説されたすべての病害のカラーの病徴写真が数点ずつ添えられているのが大きな特徴である。写真は、全体的な病徴と、細部の拡大写真からなっているため、病気の特徴がつかみやすい。さらに、主要な文献とともに、アペンディクスとして、英文による森林病理学の基本的用語の解説や病気の診断のためのガイド、農薬の分類と主な殺菌剤の解説が 11 ページにわたり記されているのも、このマニュアルを非常に使いやすいものにしている。また、この種の本では、往々にして学名などは古い学名などもかまわずに用いられることもあるが、著者の専門が菌類分類学であるため、用いられている学名はよく吟味されており、国際的に通用するマニュアルになっていると言える。

これらのことから、熱帯林業関係に携わる広い方々に、常時かたわらに携えておくとても非常に便利な本としてぜひおすすめしたい。 (金子 繁)