

第2章

西アフリカの生態環境

1. 気象環境の特性*

1-1 気象特性

(1) 気候帯

この地域は、気候型が緯度とともに比較的規則正しく変化するところにその特徴がある。気候帯については、低緯度から高緯度に向かって、①赤道森林気

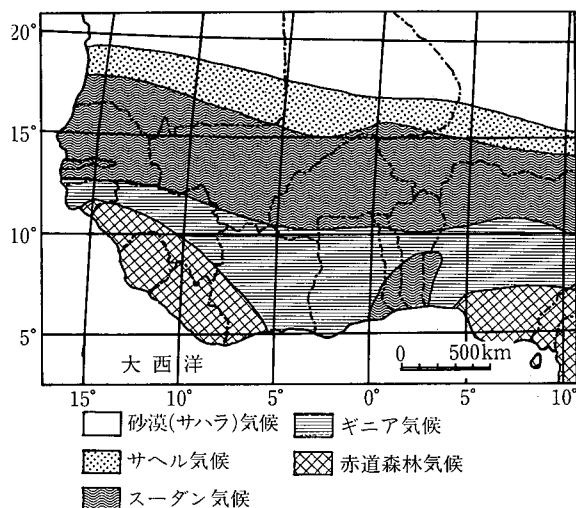


図 2-1 西アフリカの気候帯

* 1-5 節は全国農業改良普及協会編「新版稲作技術協力マニュアル（基本編）西アフリカ稲作」（北村，1994；若月，1994）に一部加筆したものである。

候帯, ②ギニアまたは湿潤熱帯気候帯, ③スーダン気候帯, ④サヘル気候帯, ⑤砂漠またはサハラ気候帯に分けることができる(図2-1)(Oosterbaan *et al.*, 1986)。これらに, ジョス(Jos)高原, フータジャロン(Futa-Jallon)高原などの⑥高地気候帯が加わり, 全部で6つの気候帯に分けられる。この地方の気候には2つの気団が深くかかわっている。すなわち, 湿気を帯びた南西モンスーンで代表される赤道海洋気団(equatorial maritime air mass)と, 乾いてほこりっぽい北東貿易風(northeast trades)あるいはハルマッタン(harmattan)で代表される熱帯大陸気団(tropical continental air mass)である。この2つの気団が合流するところは, 熱帯収束帯(ITCZ: intertropical convergence zone)と呼ばれ, どちらの気団が卓越するかによって南北に移動する。ITCZは海岸にまで及ぶことはめったにない。雨はITCZの南側の地域のみ以降るので, 海岸沿いのいくつかの地域ではほぼ年間を通して雨が降る。1月にITCZはおおよそ北緯9°あたりに横たわる。このため海岸部を除くすべての地域は暑くて乾燥した北東風の影響を受ける。8月には, ITCZは大体北緯20°の位置にあ

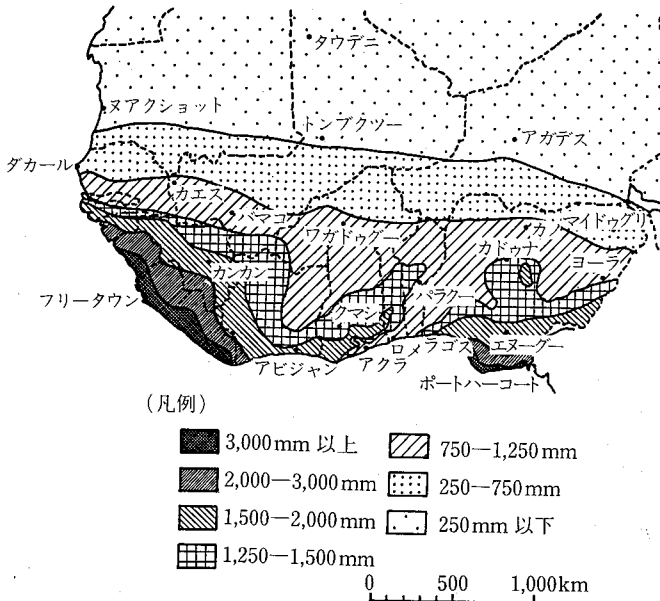
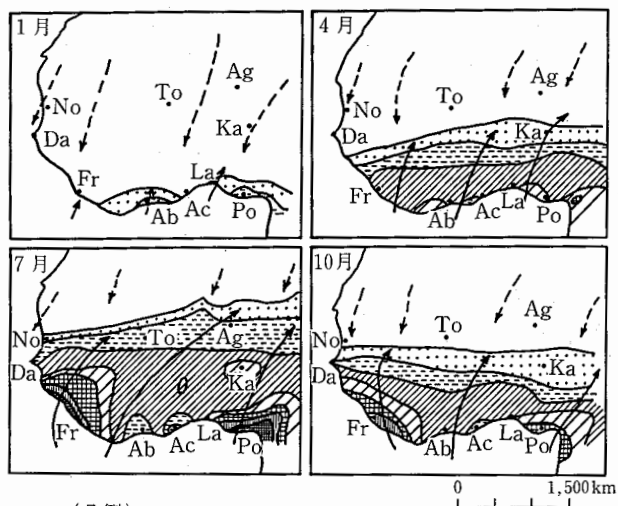


図2-2 年平均降雨量の分析



(凡例)

■ 500 mm 以上	▨ 100-200 mm
-------------	--------------

▤ 400-500 mm	▧ 50-100 mm
--------------	-------------

▥ 300-400 mm	▩ 25-50 mm
--------------	------------

▦ 200-300 mm (都市名)	
--------------------	--

Ab: アビジャン	Ka: カノ
Ac: アクラ	La: ラゴス
Ag: アガデス	No: ヌアクショット
Da: ダカル	Po: ポートハーコート
Fr: フリータウン	To: トンブクトー

図 2-3 各季節の降雨分布

り、この地域全域は湿った南西および西風の影響下に入る。

年平均降雨量の分布を図 2-2 に、各季節の降雨分布を図 2-3 に示す (Udo, 1978)。図 2-4 は降雨量、気温の緯度に伴う変化を示したものである (Grove, 1978)。また、表 2-1 にいくつかの地点の気温と降雨量を示す (Udo, 1978; 東京天文台, 1988)。

(2) 降雨特性

この地域の降雨特性を整理すれば、次のようになる (Udo, 1978)。

① アクラ乾燥帯 (Accra dry belt) を除く海岸地域は、降雨量が最も多い。シ

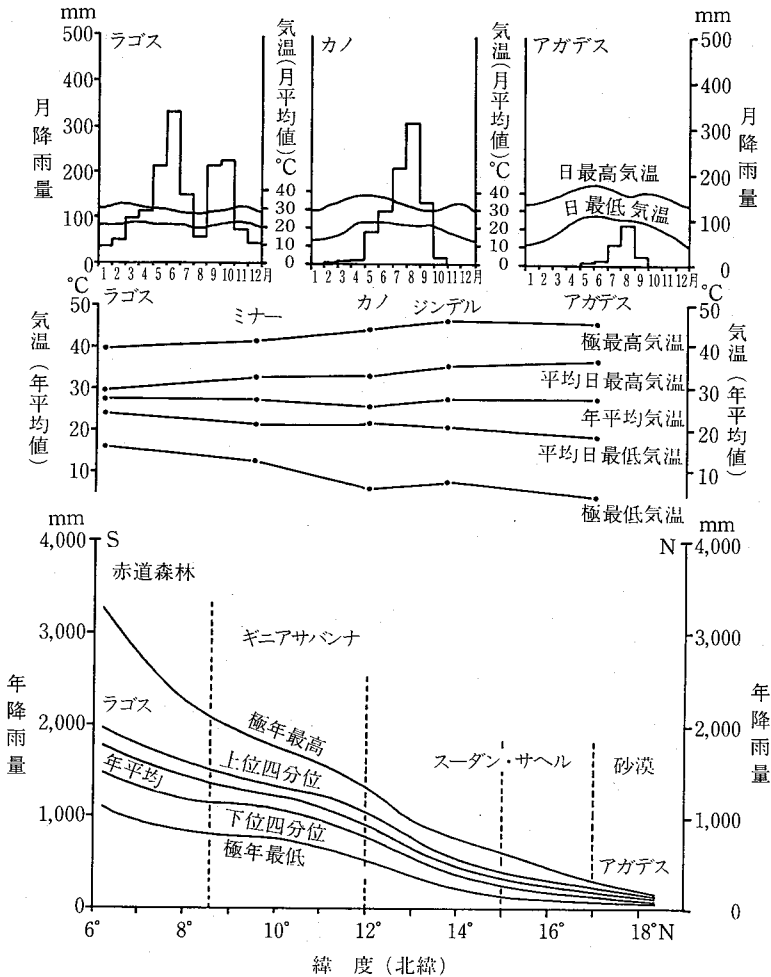


図2-4 降雨量と気温の緯度に伴う変化

エラレオネやリベリア、そしてニジェールデルタなど海岸沿いの地域では、年降雨量は3,000 mmを超えるが、北緯15°地域では約500 mmとなり、降雨量は一般に内陸に入るに従って減少する。緯度が1°(約110 km) 高くなるごとに年降雨量が約200 mm ずつ少なくなる。

②地形的降雨はジョス高原やトーゴ (Togo) 高原のような内陸地域でみられ

表2-1 西アフリカ各地の気温と降雨量

上段：日平均最高気温（℃）中段：日平均最低気温（℃）下段：降雨量（mm）

観測点	1月	2月	3月	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	11月	12月	年	気候型
コナクリ 標高4.9m 9°31'N 13°45'W	31 23 2.5	32 23 2.5	32 24 10	32 24 22.5	32 24 155	31 24 550	28 23 1,278	28 23 1,038	29 23 673	30 23 367	31 24 120	31 24 10	31 23.5 4,228.5	モンスーン
ウォリー 標高6m 5°31'N 5°44'E	31 22 32.5	33 22 52.5	33 23 132.5	33 23 225	31 23 270	30 22 372.5	28 22 385	28 23 295	29 22 427.5	30 22 317.5	32 22 110	32 22 35	31 23 2,655	赤道森林
ブワケ 標高338m 7°41'N 5°02'W	33 21 10	34 22 37.5	35 22 102.5	35 22 145	33 22 132.5	31 21 150	29 21 80	29 21 115	30 21 205	31 21 130	32 21 37.5	33 21 25	32 22 1,170	湿潤熱帯
タマレ 標高194m 9°42'N 0°59'W	36 18 2.5	38 21 7.5	38 23 55	37 23 80	34 23 117.5	32 22 137.5	31 22 137.5	30 21 202.5	31 21 222.5	33 22 92.5	35 21 17.5	34 21 5	34 22 1,077.5	ギニア サバンナ
ジョス 標高1,289m 9°52'N 8°54'E	28 14 2.5	30 15 2.5	31 18 27.5	32 19 85	29 18 200	27 17 222.5	24 17 325	24 17 287.5	26 17 210	28 17 40	28 21 2.5	28 14 2.5	28 17 1,407.5	高 原
ダカール 標高32m 14°39'N 17°25'W	28 18 0	28 18 0	28 18 0	27 18 0	28 20 0	31 23 30	31 25 87.5	31 24 260	31 25 142.5	31 24 42.5	31 23 5	28 20 0	29 22 567.5	セネガル 海岸
カノ 標高472m 12°02'N 8°32'E	30 13 0	32 16 0	36 19 2.5	38 22 7.5	37 24 67.5	35 23 112.5	31 22 200	29 21 310	31 21 127.5	34 20 12.5	34 17 0	31 14 0	33 19 840	スーダン サバンナ
カエス 標高56m 14°24'N 11°26'W	35 17 2.5	38 19 0	41 22 0	44 25 0	43 28 25	40 26 95	34 24 157.5	32 23 237.5	33 23 185	35 23 42.5	38 18 0	34 18 0	37 18 745	サヘル
ヌアクシヨット 標高20m 18°06'N 15°59'W	29 14 0	31 15 2.5	32 17 2.5	32 18 0	34 21 2.5	33 23 2.5	32 24 10	32 24 100	34 24 22.5	33 22 10	32 18 2.5	28 13 2.5	32 19 157.5	砂漠海岸
アガデス 標高520m 16°59'N 7°58'E	28 10 0	33 12 0	38 16 0	42 21 0	44 25 5	44 24 7.5	41 23 50	39 23 92.5	41 23 17.5	41 20 0	34 15 0	32 12 0	38 18 172.5	砂 漠

る。カメルーン山 (Mt. Cameroon) の麓のデブンチャ (Debunscha) では、年降雨量 10,000 mm という値が記録されている。

③アクラの周辺では、降雨量が少なく、この地域はアクラ乾燥帯と呼ばれる。アクラ乾燥帯のすぐ北では、降雨量が多い。この乾燥帯の存在理由として次の点があげられる。(ア)海岸線が水分を含んだ風の方向と平行している。(イ)この付近ではベングエラ (Benguella) 寒流とギニア (Guinea) 暖流が合流し、冷水が上方へもち上げられ、その上を通過する風を冷たくする。そのため、この地域の海岸沿いには降雨をもたらさないで、霧の発生を促す。

④雨季の期間は、海岸から内陸にいくにつれて短くなる。森林の多い南部の地域は、100 mm 以上の降雨のある月が約7ヵ月ある。これに対し、北方内陸地域では100 mm 以上の降雨のある月は3ヵ月未満である。南部では雨季の初まりは大体3月と早く、終わりは10月と遅い。一方北部では、雨季は5月に始まり、9月に終わる。

⑤南部では降雨のピークは6月と10月の2回みられる。これに対し西部および北部では、ピークは9月に1回みられるだけである。

⑥降雨の年変動はかなり大きい。特に北部地方では年変動が大きく、変動係数は50%に及ぶ。

気温については、次のような特徴がある (Udo, 1978)。

①気温は年間通して高く、各地点での期別変動はほとんどない。南部では日平均気温は、雨季に少し下がる以外は年間通して約27°Cである。

②モーリタニア、セネガル、ガンビアの海岸沿いは、乾季の日平均気温が雨季のそれより低くなる現象がみられる。この乾季における低温は、カナリア (Canary) 寒流とそれを横切る海風の冷却効果によるものである。

③ジョス高原などの高原部を除き、気温は内陸部ほど高くなる。また、気温の日較差も内陸部に入るに従って増加する。

④1月の日平均気温は、北部で低くなる。例えば、タマレ (Tamale) とトンブクツー (Tombouctou) の1月の日平均気温はそれぞれ27°Cと21°Cである。一方、7月には気温は北方にいくほど高くなり、タマレで26.5°C、トンブクツーで31°Cである。

1-2 気象と農業ポテンシャル

アフリカの気象環境を農業および自然植生に及ぼす資源として評価する方法として、国連食糧農業機関(FAO)の気候区分法がある。この方法は、アフリカを作物生育期間 (LGP : length of growing period) により、6 気候帯に区分するものであり、農業開発および緑化を考えるうえで有効である。ここで、LGP とは1年のうち作物の生育に適する気温と水分状態が続く日数で定義される (FAO, 1986)。

図2-5は、アフリカを6つの主要農業気候帯に区分したものである (FAO, 1986)。ただし、この境界は不安定で、早ばつの年には大幅に平行移動し、LGP の短い気候帯が優勢となる。特に北アフリカ乾燥地域とサヘル・スーダン地域では、この気候帯は崩れやすく、早ばつが起りやすい。一般に、年降水量が 600 mm 未満の地域では、降雨の年変動が極端に大きく、早ばつの発生率が高くなる。

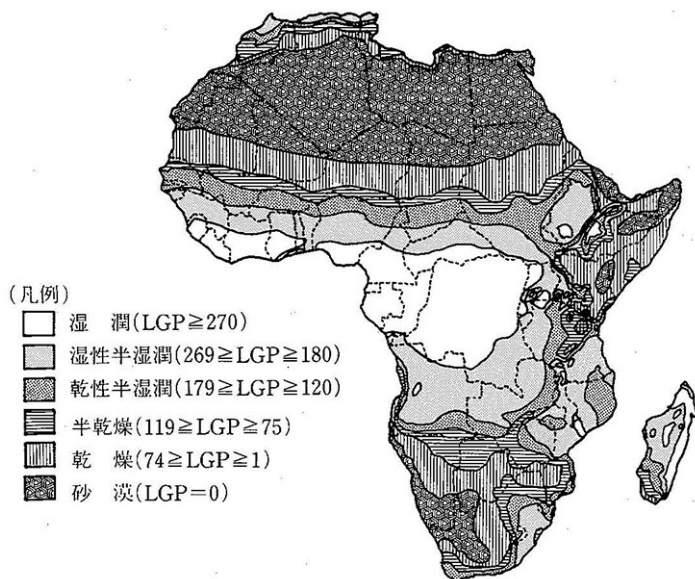


図 2-5 アフリカの農業気候帯 (FAO, 1986)

表2-2は、各農業気候帯の特質を一覧表にしたものである (FAO, 1986)。気候帯と降雨、植生、土地利用などの関係がよくわかる。

モーリタニア、チャドを含めた西アフリカ地域の気候特性と農業ポテンシャルを要約すれば、次のようになる。

① 52% (3億8,000万 ha) は、砂漠および乾燥気候 (LGP が74日以下) であり、天水に頼った作物生産には全く適さない。この気候のもとでは、灌漑なしに安全な農業はできない。この場合、広い範囲を対象とした放牧が唯一の安全な土地利用である。

② 9% (6,000万 ha) は水分状態が非常に低く変動しやすい半乾燥気候にある。この気候帯では、放牧とミレット、ソルガムを主体とした農耕が行われている。この地域は降雨変動が極端に大きく、また土壤が痩せているため、天水農業のポテンシャルは低い。

③ 30% (2億2,000万 ha) は、半湿潤気候下にあり、ミレット、ソルガム、トウモロコシなど主食作物の天水栽培によく適している。

④ 10% (7,000万 ha) は、水分過剰の湿潤気候下にある。 (北村 義信)

2. 西アフリカの地形、地質、植生および土壌

2-1 地形と地質

地形区分図 (図2-6) と地質概略図 (図2-7) からわかるように (Udo, 1978; Unesco, 1975)、サハラ以南の西アフリカでは標高600 m以下の準平原地形と10-35億年の年齢の基盤岩地帯 (Basement Complex, 西アフリカ剛塊) が卓越している。標高600 m以上の山地はナイジェリア東部のカメルーン国境地帯のマンビラ (Mambila) 山地、ナイジェリア中部のジョス高原、ニジェール川源流地帯のギニア高原だけである。サハラ砂漠も比較的標高が高く、300-600 mの台地状になっており、アドラ・デ・イフォラ (Adrar des Iforas), アガデ (Agadez) 山地もみられる。これらの山地では基盤岩や堆積岩を覆う酸性および玄武岩質の火山岩もみられる。しかし、マンビラ山地に連続するカメルーン

表2-2 アフリカの各農業気候帯の特

気候帯	作物生育期間長(LGP) (日数)	土壌水分の過不足	面積 ($\times 10^4$ ha) (%)	年降水量(mm/年) 気候概要	自然植生
砂漠気候	0日	不足	822 (29.1)	100mm未満	きわめてまれに矮性の有刺低木といくつかの多年草。
乾燥気候	1～74日	不足	488 (17.1)	100～400mm 雨季は短く、変動大きい。乾季は長い。 (乾季：10ヵ月間)	疎らな低木と数種の多年草。土壌水分の多いところでは、一年草多くなる。東アフリカでは、Acacia-Commiphoraの林地。
半乾燥気候	75～119日	不足	233 (8.1)	400～600mm 雨季は3～4ヵ月。乾季の夜間気温は低い。降雨直前には、気温が 45°C まで上がり、湿度が高くなる。	Combretaceae林、低木混じり草地。多年草もみられるが、支配的ではない。東アフリカでは、Acacia-Commiphoraの林地。
乾性 半湿潤気候	120～179日	適当	314 (11.0)	600～1,200mm 雨季は5～6ヵ月。	西アフリカ： Parkia-Butyrospermum-Khayaの林地、樹木・低木混じりの草原。 中・南アフリカ： BrachystegiaとJulbernardiaの林地、樹木・低木混じりの草原。多年草。 東アフリカ： Combretum-Acaciaの林地。
湿性 半湿潤気候	180～269日	適当	584 (20.4)	1,200～1,500mm 雨季は7～8ヵ月。北アフリカの冬雨は夏雨より2倍有効。	森林、南コンゴの常緑林。サバンナ。
湿潤気候	270日以上	過剰	409 (14.3)	1,500mm以上 年間通して湿潤。	熱帯降雨林。

資料：FAO, Atlas of African agriculture, 1986

質と植生、土地利用

土地利用	問題点
・狩猟採集 ・サハラ砂漠南縁, およびカラハリ砂漠の掘抜き井戸周辺での遊牧(ラクダ, 山羊)・オアシス周辺での定着灌漑農業	
・羊, 山羊, ラクダの遊牧。ゼブ(こぶ牛)も含まれる。 ・この気候帯で比較的雨の多いところの窪地では, ミレットやソルガムが栽培されることもある。	・過放牧, 木本性植生の伐採, ・早ばつ等に伴う土地の劣化と砂漠化。
・遊牧民と農民との混在地域。 ・天水農業の限界地域。 ・主な作物はミレット, ソルガム, ササゲ, モスビーン, 落花生。 ・東・南アフリカの冷涼な地域では, トウモロコシの栽培が試みられている。	・窒素・リンの欠乏と年降雨の極端な変動により, 天水農業のポテンシャルは低い。 ・多雨年に耕作は広がるが, 早ばつ年には不作, 劣化, 砂漠の拡大が起る。 ・乾季の夜間低温による冬作の制限。
・耕作に適した地域であるが, 乾季や早ばつ年には伝統的に遊牧(ゼブ, 山羊, 羊)に使用される。 ・多くの遊牧民が部分的に定住している(遊牧民の流入は主に雨季に起る。) ・ツエツエバエの存在は, 家畜の流入を拒んできたがハエが減少し, この問題は大きく解消された。 ・主な作物は, ミレット, ソルガム, トウモロコシ, 落花生, キャッサバ, ササゲ, 綿花, カンショ, タバコ, 天水稲作, 大豆, マンゴー, カシューナッツである。 ・ゼブ, 牛, 羊, 山羊の放牧。	・可耕地資源の逼迫と伝統的耕作形態の崩壊による減収と土地劣化。 ・広範囲に及ぶ薪炭材の不足。
・農業にとっての変換点。一般に季節作物にとっては過湿で, 樹木, 低木にとっては乾燥しすぎている。 ・熱帯地域では, トウモロコシ, キャッサバが広く栽培され, ヤムイモ, バナナ, パイナップル, サトウキビ, 米もみられる。 ・東アフリカ高原部および冬雨地帯では小麦, 大麦が栽培されている。	・ツエツエ汚染地域であり, 畜産ポテンシャルの開発は困難。
・樹木作物(オイルパーム, ゴム, ココア)。 ・ヤムイモ, キャッサバなど根菜類を基幹にした焼畑農業。 ・ソルガム, トウモロコシ, バナナ, パイナップル, サトウキビ, 米もみられる。 ・若干の畜産(主に牛, 羊, 山羊, 家禽)。 ・熱帯広葉樹林。	・穀類栽培は多雨のため, 問題多い。

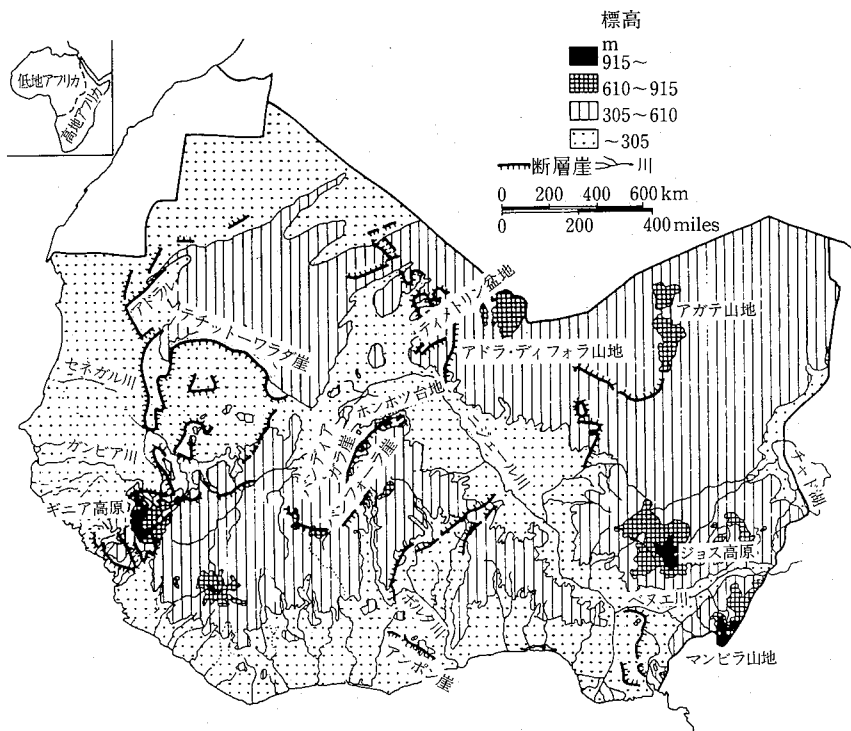


図 2-6 西アフリカの地形 (Udo, 1978)

側に、現在も活動を続けるカメルーン山 (4,100 m) がある以外は、活火山はみられない。

図 2-6 の地形図から沿海部は 300 m 以下の低地、中部ベルト地帯は 300—600 m で比較的高く、その北部は再び 300 m 以下の低地になっていることがわかる。これは気候帯の分布にもほぼ一致し、沿海部は赤道森林帯、中部の高原部はギニアサバンナ帯、北部の低地部はスーダンサバンナ帯と重なる。高原部に相当する中部ベルトのギニアサバンナ帯の土壤肥沃度が比較的低いのは、地質学的施肥作用の恩恵が少なく、地形的要因も関係している。

中部ベルト地帯とサハラ台地部に挟まれた低地部であるスーダンサバンナ帯ではその基盤岩を覆って、種々の堆積物や風成堆積物(レス)が広範に分布している。これらの堆積物は比較的肥沃な土壌を生成して西アフリカの諸古帝国の

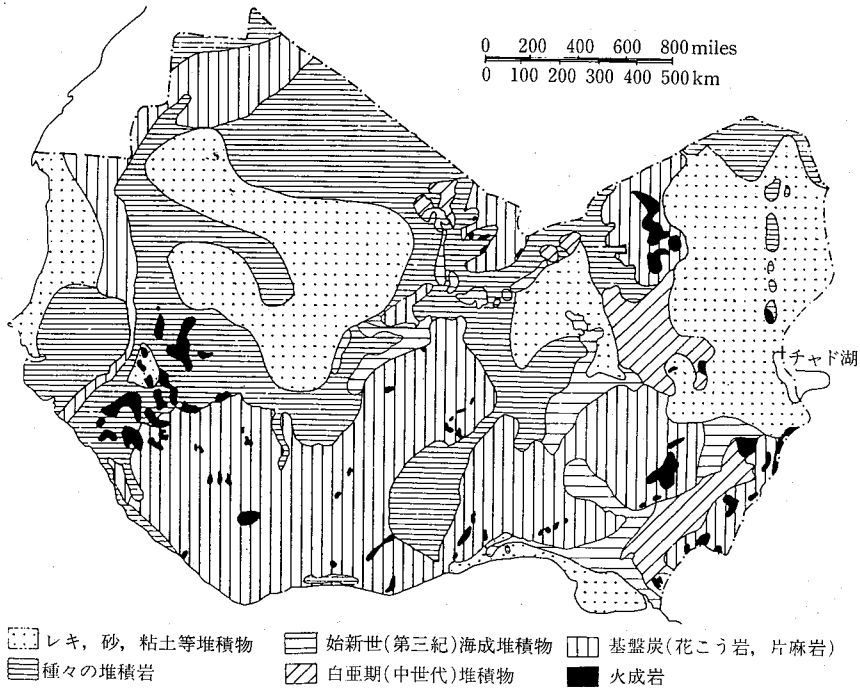


図 2-7 西アフリカの地質 (Udo, 1978)

農業基盤を支えたと考えられる。現在のナイジェリア北部のソコト、カノ、ザリアなどのハウサ圏の集約的農業地帯と人口集中地はこのレスの分布に一致している。ザリア、カノは標高 300—600 m 域に入っているが、レスの堆積にはジョス高原が^{ついたて}衝立となり、しかもチャド湖周辺から塩基に富む肥沃な土壤が風により運ばれ堆積する位置に当たっている。

デルタはニジェール川とセネガル川の河口にみられる。ニジェール川では中流部のマリのセグーからガオにかけて約 300 万 ha の巨大な内陸デルタを形成している。

2-2 植生分布

西アフリカの植生分布を図 2-8 に示した。表 1-5 に示すように西アフリカ

全体の森林面積は約7,900万ha(チャドを除く)である。しかし、そのうち、樹冠の閉じた熱帯雨林の面積は1985年末の推定で、1,400万haしかない。最大の面積はナイジェリアで約445万haである。したがって、図2-8で示されている熱帯雨林の大部分は、現在では存在せず農地あるいはいわゆる人為サバンナ(derived savanna)となっている。ナイジェリアに次ぐのがコートジボアールで、300万haある。図ではコートジボアールの南半分はほぼ熱帯雨林で覆われているとしている。これからすると、コートジボアールの全面積約3,200万haの半分、1,600万haはあったと推定される熱帯雨林は5分の1以下に減少したことがわかる。次はギニアで約190万ha、リベリア180万ha、ガーナ160万ha、シエラレオネ70万ha、トーゴ29万haが主な熱帯林の分布である。したがって、図の熱帯林の分布はいまでは消え、ほとんどが人為サバンナと化している。

沿海のマングローブ林と湿地林は西アフリカ全体で約300万ha、そのうちの半分はナイジェリアのニジェールデルタに、その他はセネガルからシエラレ

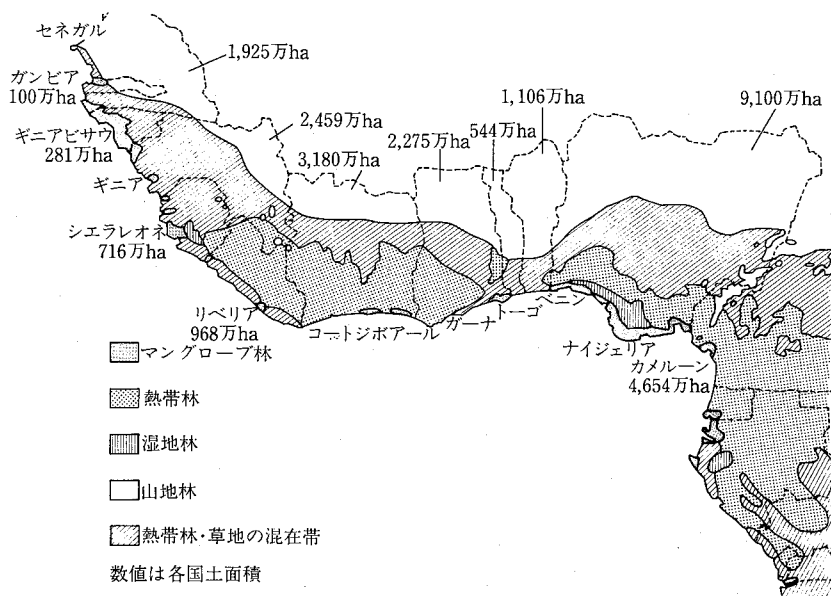


図2-8 西アフリカの植生分布 (White, 1983; Martin, 1991)

オネにかけてが主な分布域である。マングローブ帯は漁業にとって重要である。西アフリカでは特異なマングローブ稲作地が約 20 万 ha あり、満潮時の潮汐が雨季の淡水を押しあげることを利用した自然灌漑稲作である。数百年以上前に、西アフリカに欧米人によりアジア稲が導入されて以来このような稲作が行われるようになったといわれている。シエラレオネのロクプール (Rokupr) には WARDA 試験地がある。

山地林はギニア高地とカメルーン高地につながるマンビラ高原に分布するが 10 万 ha 以下である。ナイジェリアのマンビラ高原では森林を伐採して、茶が栽培され、フルベの過放牧が山地林を根絶やしにし、草地化しており (図 2-9 参照) 土壌侵食が深刻である。

西アフリカの植生の大部分 (80 % 以上) は現在ではサバンナの疎林か草原となってしまうている。

熱帯林等の樹冠の閉じた一次林の消滅の状況は、図 2-9 に示した、ナイジェリアの植生図でより明瞭になる (Barbourn, 1982)。まとまった森林は沿海のマングローブ林とデルタの湿地林を残すのみとなっている。しかし、石油生産地がこのマングローブ林や湿地林にあるため、ここでも森林破壊が進んでいる。石油資本と軍事政権の利権を守るため、漁民の生業を奪い、原住民の強制的立ち退き措置等の強権の発動も森林破壊を加速している。

かつて、イバダン-ベニン-エヌーグーカラバルまで、広い範囲を覆っていた熱帯林はほとんど残っていない。保護地にわずかに残されているだけである。これらも、マングローブやデルタの湿地林とともに、急速に不法 (銃器で武装している) な伐採により失われつつある。図の最下端の実線より南部の地域は降雨量 1,500-2,000 mm 以上で、生育可能日数も 270 日以上ある赤道森林帯である。植生帯としては、図 2-9 の二次林とサバンナの混在帯 (いわゆる人為サバンナ帯) にほぼ一致する。この赤道森林帯の中に熱帯林が残っている。しかし、1990 年時点での筆者らの現地観察では、ベニン (Benin)-オニチャ (Onitsha) 線より北部には樹冠の閉じた熱帯林は残存していない。現在では図 2-9 の熱帯林の半分以上は消滅したものと考えられる。このようにナイジェリア南部では、かつての森林が失われ、農地化したりサバンナ化した。一方、

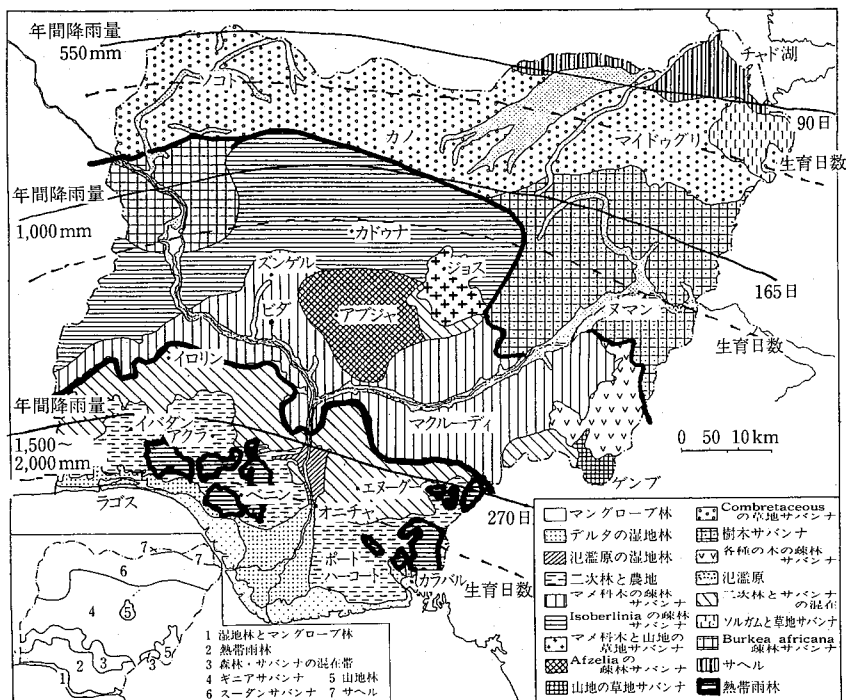


図 2-9 ナイジェリアの植生図 (Barbourn, 1982)

注：森林はマングローブ林，デルタの湿地林，熱帯雨林および二次林の一部に残っている。サバンナは植生の構造によって4つに分けられる：樹木サバンナでは樹木とブッシュが多いので，樹冠はかなり閉じている，疎林サバンナでは樹木とブッシュは散在している，ブッシュサバンナでは樹木はなくブッシュのみ，草地サバンナでは樹木はほとんどなく草地のみ。

北部のサヘル帯も同様に南下している（第1章，4-4-（2）参照）。森林のサバンナ化，サバンナの草地化，草原の砂漠化が並行して起きている。

赤道森林帯より北がサバンナ帯である。ナイジェリアや西アフリカでの分布面積が最も広いサバンナ植生は4つのタイプに分けられる。樹木サバンナ (Savanna woodland) は樹木とブッシュが多く，樹冠とブッシュが連続し，ほぼ自然植生のサバンナである。疎林サバンナ (Tree savanna) では樹木とブッシュが散布している。ブッシュサバンナ (Shrub savanna) では，背の高い樹木はみられずブッシュと草地のみである。草地サバンナ (Grass savanna) では背の

低いブッシュ性樹木も非常に少ない。以上の4つのタイプのサバンナは樹木種や草種によってさらに細分される。

草地サバンナの分布はジョス高原やゲンブ(マンビラ)高原でみられる人為的草地サバンナを除けば図2-9の等雨量線1,000 mm, 生育日数165日のギニアサバンナ帯(湿性サバンナ)と北部のスーダンサバンナ帯(乾性サバンナ)の境界にほぼ一致する。降雨量が550 mm以下, 生育日数が90日以下はサヘル帯と呼ばれ, 砂漠化の最前線である。

2-3 土壌の分布と種類

図2-10は西アフリカの主要な土壌の分布を示したものである(FAO/Unesco, 1974, 1990)。西アフリカの土壌分布には以下の3つの特徴がみられる。第1は成帯的な土壌分布の特徴が明瞭であること。すなわち, ギニア湾岸からサハラ砂漠までの降水量の漸減に伴って, 主要な土壌が帯状に分布し, 植生帯の分布とよく対応している。第2の特徴は同一の成帯区分内でも, 母材の影響が強く認められることである。第3の特徴は同一の成帯区分, 母材区分内であっても, 地形の影響によって水分環境や堆積, 侵食条件が変化するため, 異なる土壌が現れることである。すなわち, カテナ(あるいは, トボシーケンス)が明瞭に観察されることである。以下, 降雨量の少ないサヘル帯から, 多い赤道森林帯まで, 西アフリカの主な気候帯ごとに土壌分布の特徴を述べる。

①サヘル帯: 降雨量が500 mm以下のサヘル帯では Arenosol (Psamment, Udipsamment, Quarzipsamment カッコ内は米国の Soil Taxonomy (Soil Survey Staff, 1975, 1994) による。以下同様) と Regosol (Orthent, Psamment) の分布が広い。アップランドにおけるこれらの土壌は, 砂質あるいはレキ質で有機物や有機窒素, あるいはリン酸含量がきわめて少ない, 貧栄養土壌である。遊牧以外の農業的利用の可能性はほとんどない。

セネガル川, ニジェール川とチャド湖沿岸の氾濫原や内陸デルタ等の河川沿いの低地部には Fluvisol や Gleysol (Fluvent, Aquent, あるいは Aquept) が分布し, チャド湖周辺の低地には一部で Vertisol もみられる。マリの内陸デル

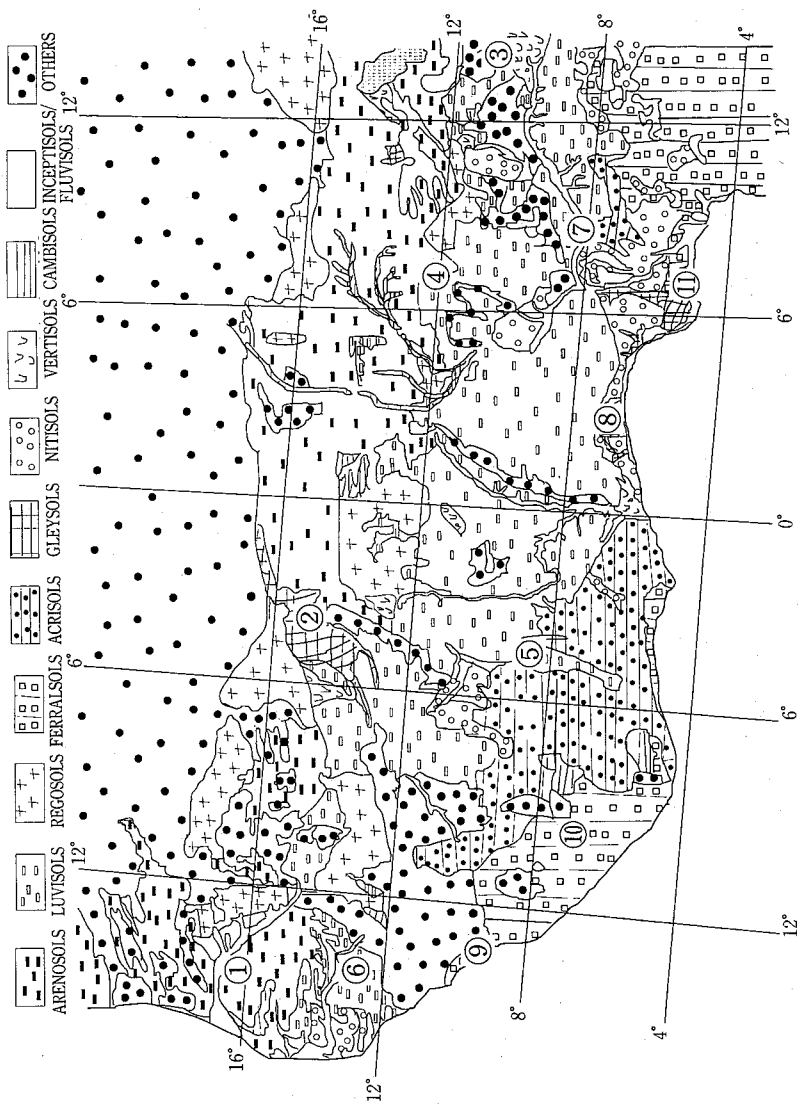


図 2-10 西アフリカの主要な土壌の分布図 (FAO Soil Map of West Africa, FAO/Unesco, 1974, 1990)

タやニジェール川やセネガル川の氾濫原においても数 m 以内の微少な高低差があり、その低地部には Vertisol が局地的に、しかし広範囲に分布し重要な農業基盤となっている。これらの土壌ではミレットやソルガムが栽培される。水が自然湛水する部分ではアフリカ稲の栽培も行われている。セネガル川沿いでは小型のフローティングポンプによって 10—20 ha 規模の灌漑農地が村落レベルの管理によって維持されており、稲や野菜その他の農作物が集約的に栽培されている。このような小規模灌漑システムは比較的持続性が高いと考えられている。一方、ニジェール川やセネガル川では大型ダムが作られ、またチャド湖でも巨大なポンプを使った大規模な灌漑プロジェクトが行われたり、進行中である。大規模灌漑によって稲、麦、綿花、サトウキビなどの増産を目的としている。しかし、このような大規模灌漑プロジェクトは持続可能性という点で大きな疑問符が投げかけられている。特にチャド湖の場合は、ナイジェリア側で 5 万 ha という大規模灌漑開発南チャド灌漑プロジェクトが行われた。しかし、近年のチャド湖の水位低下で中心取水口からポンプアップできず、5 万 ha の農地開発が無に帰して、1,000 億円以上の開発資金が無駄になってしまった。

表 2—3 に、代表的な土壌である Arenosol と Gleysol の一般理化学性を示した。サンプリング地点は図 2—10 に同じく示した。Arenosol の砂含量は 90% 以上で、陽イオン交換容量 (CEC) は 2 前後できわめて小さい。一方、Gleysol の粘土含量は高く、CEC、交換性陽イオンも比較的高いレベルにあり、比較的肥沃な土壌であることがわかる。

②スーダンサバンナ帯：Arenosol (Luvic, Cambic) と Regosol の分布がサヘル帯よりの連続として、北半分の面積のほとんどを占めている。しかし、これらの砂質土壌を削ってセネガル川、ニジェール川およびその支流、チャド湖へ注ぐ諸河川が肥沃な低地土壌を堆積させている (Fluvisol, Gleysol)。Vertisol の分布もサヘル帯に比べかなり広い。Vertisol の分布はブルキナファソ、チャド湖周辺が分布の中心である。ブルキナファソでは Planosols も Vertisol に付随して分布している。

スーダンサバンナ帯の南部は Luvisol (= Alfisol) が主要な土壌となっている。

表2-3 各気候帯に分布する代表的な土壌の一般理化学性 (土壌のサンプリング地点は図2-10に示した)

気候帯	深度 (cm)	pH (H ₂ O)	有機炭素 (%)	全窒素 (%)	有効リン Brayl (mg/kg)	交換性イオン (cmol (+)/kg)						シルト (%)	粘土 (%)	レキ (%)
						Ca	Mg	K	Na	交換 酸度	CEC			
サヘル帯 No.1 Cambic Arenosol (セネガル) No.2 Futric Gleysol (マリ)	0-25	7.4	0.18	0.023	—	1.52	0.50	0.06	0.09	tr	2.16	94	1	0
	50-70	7.2	0.08	0.011	—	1.21	0.40	0.04	0.10	tr	1.75	94	2	0
	100	7.5	—	0.011	—	1.28	0.50	0.04	0.27	tr	2.09	93	3	0
	175	—	—	0.007	—	0.78	0.74	0.06	0.25	—	1.83	93	3	0
	0-10	5.0	1.07	0.110	0.9	5.43	3.46	0.85	0.48	1.87	12.42	9	18	0
	10-25	4.1	0.51	0.052	2.1	5.73	3.80	0.42	0.50	2.23	13.05	5	8	0
	40-55	4.8	0.86	0.094	0.9	8.35	3.09	0.65	0.53	1.48	14.50	9	14	0
スーダンサバンナ帯 No.3 Futric Vertisol (カメルーン) No.4 Haplic Luvisol (ナイジェリア)	55-70	4.2	0.20	0.050	0.7	5.48	3.46	0.38	0.48	2.60	12.81	0	9	0
	0-10	7.7	0.94	—	4.6	31.1	10.9	1.1	—	tr	43.56	15	26	0
	10-35	7.9	0.69	—	1.8	30.8	19.8	0.75	—	tr	43.14	19	24	0
	35-100	8.5	0.67	—	1.8	27.2	12.1	1.2	—	tr	43.25	19	27	0
	100-140	8.5	0.74	—	2.1	27.2	14.0	1.6	—	tr	48.07	13	26	0
	0-22	6.8	1.92	—	7.4	9.2	1.4	0.51	—	0.2	11.3	56	27	—
	22-55	6.5	0.44	—	0.9	4.6	1.8	0.40	—	0.1	6.9	13	35	—
ギニアサバンナ帯 No.5 Plinthic Luvisol (コートジボワール) No.6	55-105	6.5	0.29	—	0.9	4.0	1.5	0.34	—	0.1	5.9	39	24	—
	110-160	6.4	0.20	—	0.4	3.1	1.4	0.19	—	0.1	4.6	46	31	—
	0-20	6.5	1.19	0.79	—	3.3	1.1	0.22	0.03	—	4.7	79	8	5
	20-45	6.1	—	—	—	3.0	0.7	0.30	0.06	—	4.1	51	10	7
	45-90	5.1	—	—	—	3.1	0.6	0.25	0.06	—	4.0	43	11	39
	>90	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	0-6	6.5	1.05	0.07	—	2.25	1.05	0.15	0.05	—	3.5	85	5	14

Ferric	6-13	5.6	0.68	0.05	—	1.70	0.65	0.10	0.05	—	2.5	85	5	10	12
Luvisol	15-25	5.6	0.38	0.03	—	1.70	1.05	0.05	tr	—	2.8	70	6	24	11
(セネガル)	40-60	6.2	0.33	0.03	—	2.10	1.50	0.05	tr	—	3.7	55	6	39	11
	90-110	6.3	0.29	0.03	—	1.30	2.30	0.05	0.05	—	3.7	45	6	49	11
	130-150	6.3	0.20	0.03	—	1.70	1.85	0.05	tr	—	3.6	48	7	45	12
No.7	0-20	6.4	2.06	0.124	22.2	3.52	2.48	0.35	0.23	0.31	6.90	40	46	14	—
Eutric	20-40	5.7	1.10	0.067	2.0	2.02	1.55	0.20	0.23	0.41	4.42	4	44	52	—
Fluvisol	40-60	5.5	0.94	0.037	1.5	9.55	1.83	0.76	0.23	0.56	12.99	16	48	36	—
(ナイジェリア)	60-80	5.6	0.91	0.033	1.2	4.03	2.25	0.39	0.21	0.47	7.36	16	48	36	—
	80-100	5.7	0.83	0.021	1.8	3.80	1.56	0.40	0.21	0.36	6.34	30	30	20	—
赤道森林帯															
No.8	0-20	6.4	2.06	—	3.0	7.4	1.6	1.21	—	0.2	9.5	18	24	58	—
Futric	30-55	6.3	1.05	—	1.2	4.6	1.0	0.05	—	0.1	5.8	13	16	71	—
Nitisol	55-95	6.4	0.44	—	2.5	3.2	0.73	0.03	—	0.1	4.0	14	21	65	—
(ナイジェリア)	95-130	6.3	0.32	—	3.0	3.0	0.59	0.03	—	0.2	3.7	10	22	67	—
	0-10	6.2	0.33	—	3.0	2.3	0.94	0.03	—	0.1	3.3	8	20	72	—
No.9	20-80	4.7	1.24	—	3	3.2	6.2	0.7	24.7	40.8	17.5	62	26	12	—
Futric	80-120	3.2	1.94	—	2	4.0	6.3	0.5	21.7	20.9	27.1	17	32	51	—
Fluvisol	0-40	2.8	1.94	—	5	2.7	2.3	0.4	37.6	23.2	33.7	16	25	59	—
(ギニア)	40-100	2.7	2.06	—	4	3.7	9.0	0.1	33.4	28.1	33.7	8	40	52	—
No.10	100-180	4.5	1.74	0.138	1.2	0.50	0.08	0.11	0.05	2.82	3.56	65	13	22	—
Xanthic	180-300	4.5	0.81	0.100	1.5	0.40	0.07	0.17	0.05	3.34	4.04	49	13	38	—
Ferralsol	0-13	4.1	0.45	0.063	2.0	0.20	0.07	0.10	0.04	2.54	2.95	39	17	44	—
(リベリア)	13-35	4.1	0.32	0.050	4.5	0.10	0.05	0.09	0.04	2.98	3.26	43	17	40	—
No.11	35-65	4.6	4.56	—	2.2	23.10	4.42	0.41	0.11	0.55	28.59	18	33	49	—
Eutric	65-100	5.5	2.13	—	1.2	26.30	4.82	0.33	0.10	0.14	31.69	14	35	51	—
Nitisol		5.7	0.58	—	0.9	24.40	4.50	0.31	0.09	2.15	31.45	14	35	51	—
(ナイジェリア)		5.4	0.36	—		24.60	4.67	0.33	0.10	1.16	30.86	14	35	51	—

資料: No.1,5,6,9: FAO/Unesco(1974), No.2,7: 若月未発表データ, No.3,4,8: Moberg *et al.*(1991), No.10: 小崎未発表データ, No.11: Kosaki and Juo(1984)

マリではスーダンサバンナ帯の全域にわたって、主要土壌は Luvisol である。基盤岩が土壌母材となっている地域では Luvisol のうち Chronic, Orthic, Ferric, Plinthic な性質をもつ土壌が生成するようになり、風化強度が強くなっていることを示す。Ferric および Plinthic Luvisol の分布面積が一番広い。これらの土壌は基盤岩が湿潤な気候下で長期にわたる風化を受けて生成したと考えられる。このため粘土はカオリナイト質で土壌の CEC は小さく活性が低いため土壌侵食を受けやすい。この地域の Luvisol は図 2-10 に示したように年間降雨量 1,250 mm 以下の半乾燥地に分布するため、塩基飽和度は高く、米国の Soil Taxonomy (Soil Survey Staff, 1994) 方式では Alfisol に分類される。

スーダンサバンナ帯の土壌の肥沃度が、サヘル帯やギニアサバンナ帯に比べ比較的高いのは、比較的地質年代の若い各種の堆積物を母材としている(図 2-7) ことに加え、サヘル帯は乾季のハルマッタンによる風侵食を受ける上流側に位置するのに対し、スーダンサバンナ帯は風成塵(ハルマッタンダスト)がレスとして堆積する下流側に位置するからであると思われる。養分に富むレスが厚く堆積しているナイジェリア北部のハウサ圏では、このレスの恵みにより重要な農業地帯となっている。乾季のハルマッタン風とともに毎年供給されるダストは、地質学的施肥としてこの地域の土壌の肥沃度維持に大きな役割を果たしている。しかし、土壌侵食により風成堆積物に由来する肥沃な土壌が失われると、ラテライト質か、石英砂質の極貧栄養の土壌母材が地表面に現れるようになる。

セネガル南部の沿海部とナイジェリア東部、ベヌエ川北には堆積物由来の比較的肥沃な Nitisol も一部みられ、重要な農業資源となっている。

スーダンサバンナ帯からサヘル帯にかけては落花生や綿花などの換金作物の栽培が植民地時代から広範に栽培され、外貨獲得源となっている。しかし、西アフリカに分布する土壌の中では比較的肥沃な土壌で、植民地政府が強制的にこのような換金作物を広範に栽培させたことは、この地域の基礎的食料生産の停滞を招き、土壌をはじめとする農業資源や環境破壊の大きな原因となった。食料作物が、よりマージナルな地域で収奪的に栽培されることになったからで

ある。現在問題になっているこの地域の人為的砂漠化の遠因となっている。

③ギニアサバンナ帯：ギニアサバンナ地帯は中部ベルト地帯を構成する。人口密度も低く(図1-3)、農業的な重要性は一部を除き、これまであまり高いものではなかった。スーダンサバンナ帯よりは降雨に恵まれているが、ハルマッタンは相対的に弱く、レスによる地質学的施肥量はあまり多くない。基盤岩が強度に風化して生成した土壌の分布が広い。このため、ギニアサバンナ帯の土壌の肥沃度は、一部を除き、あまり高くない。表2-3に示した、各農業生態区分ごとの代表的土壌の一般理化学性のデータからわかるように、ギニアサバンナ帯の土壌肥沃度は、スーダンサバンナ、赤道森林帯に比べて低い。

最も分布の広い土壌はFerricとPlinthic Luvisolでセネガル南部、マリ、ブルキナファソ南部、ガーナ、トーゴ、ベニン、ナイジェリア、それにカメルーン北部に分布し、分布南限は、1,250 mmの年間等雨量線に一致している。

より降雨量の多い、南部ギニアサバンナ帯では、酸性のFerric Acrisolの分布がみられる。ギニア、コートジボアールが分布の中心である。森林が失われ、土壌侵食が激しいため粗粒で土壌層の薄い生産力の低い土壌となっていることが多い。

カメルーンや中央アフリカのギニアサバンナ帯の南部の一部では赤道森林帯から広がっているFerralsolの分布がみられる。

ニジェール川、ボルタ川、ベヌエ川の氾濫原には肥沃なFluvisolが分布しているが、水制御の困難性ゆえに、十分農業利用されているとはいえない。しかし、ギニアやナイジェリア域内のニジェール川の氾濫原では自然湛水方式で、また、一部では中一大型ポンプによる灌漑で、稲作が行われている。ガーナのボルガ川上流、ナイジェリアとカメルーンのベヌエ川上流部付近にはVertisolの分布もみられる。ガーナの沿海東部、トーゴ、ベニン沿海部は雨量が1,250 mm以下のサバンナ気候になっておりVertisolが一部、分布している。

④赤道森林帯：特筆すべきことは人口密度の高いナイジェリア南部では降雨量が2,000 mmと多いにもかかわらず、シエラレオネ、リベリアのようなFerralsol (Orthic, Xanthic) の分布はみられず比較的土壌肥沃度の高い、Nitisol, Acrisol, Luvisolになっていることである。特に、ニジェールデル

タ左岸、ナイジェリア東南部のイボ地域（図1-2と図1-3参照）はきわめて高い人口密度地域であるのだが、この地域の土壌は肥沃な Eutric Nitisol となっている。表2-3のNo.11の土壌は、この地域の内陸小低地のものであるが、赤道森林帯としては異常なほど肥沃度が高い。この土壌の粘土鉱物はモンモリロナイトを主成分としている。カメルーンとの国境付近には火山が分布している。この塩基性火山噴出物を母材とする風化物が、海底で堆積固結した頁岩を母材としている。

ニジェールデルタはいまのところ農業利用の対象としてはあまり重要ではない。このデルタ部はナイジェリアの石油産地でもあり、農業開発はほとんど顧られていない。このような巨大デルタの水管理システムを整備するのは簡単ではないからでもある。デルタの主要土壌は Gleysol で、マングローブ帯には Thionic Fluvisol も分布している。この種の土壌はセネガルからシエラレオネの沿海部にも分布している。

赤道森林帯の土壌のうち、シエラレオネやリベリアでの分布の広い Ferralsol は主としてゴムやオイルパームのプランテーション地帯となっている。コートジボアール、ギニア、ガーナの赤道森林帯に広く分布している Acrisol、ベニン、ナイジェリアの沿海部に分布する Nitisol は酸性だが比較的肥沃である。これらの土壌ではココア、コーヒー、コーラナッツ、オイルパーム等の換金作物の栽培地帯となっている。

3. 西アフリカにおける低地土壌の分布と種類

3-1 熱帯アフリカにおける低地の分布と種類

図2-11 にアフリカの主な大低地を示した (van Dam and van Diepen, 1982)。大低地の多くは内陸盆地である。ナイルデルタを除けば、アフリカの大低地は集約的な農業利用の場とはなっていない。ナイル川上流部のスーダンのハルツーム周辺、サッド低地、チャド湖低地、マリの内陸デルタには化学的には肥沃な Vertisol や沖積土壌が広範に分布しているが、ナイル川に分布するスーダ

ンの低地を除けば水分に恵まれない半乾燥地にあるため、大規模灌漑が成功しない限り、農地利用には限界がある。近年のサヘル地帯の乾燥化は西アフリカの内陸大盆地の灌漑農業開発を困難にしている。一方、コンゴ低湿地は水に恵まれているが石英砂を主とするきわめて貧栄養の沖積土壌のゆえ農業利用はほとんど行われていない。むしろ、熱帯アフリカに残された貴重な熱帯雨林として保護すべき場所であろう。オカバンゴ低湿地に関する情報はあまりないが、砂質の Regosol の分布が広く、ここも農業利用の対象ではなく野生動物や自然保護の対象である。

図2-11ではナイル川やニジェール川等に沿う細長い線として氾濫原が一部示されている。しかし、河川の源流部に無数に存在する内陸小低地は図には表れていない。Hekstra & Andriessse (1983)によると熱帯アフリカの低地は内陸盆地が約1億1,000万 ha、内陸小低地が約8,500万 haで、両者で低地全体の面積の約80%を占めると考えられる(表2-4)。以下、表2-4に示した低地の分類に従って、主な土壌の特性を概観する。

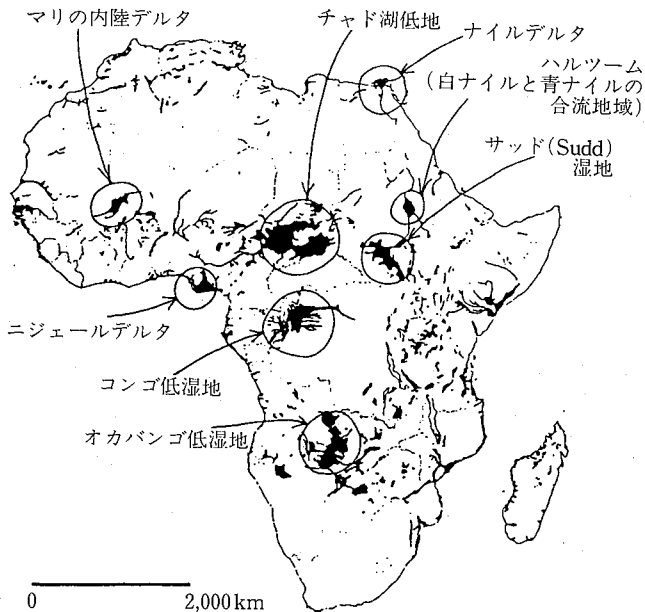


図2-11 アフリカの主な大低地の分布 (Van Dam & von Diepen, 1982)

表2-4 熱帯アフリカにおける低湿地
の分布 (Hekstra & Andriess, 1983)

分類	面積(万ha)	割合 (%)
海岸湿地	1,650	7
内陸盆地	10,750	45
氾濫原	3,000	12
内陸小低地	8,500	36

表2-5 Vertisolの一般理化学性

	深度 (cm)	pH (H ₂ O)	有機 炭素 %	全窒素 (%)	交換性陽イオン (cmol (+)/kg)						砂 (%)	シルト (%)	粘土 (%)	eCEC/粘土 (Cmol (+)/kg)
					Ca	Mg	K	Na	酸度	eCEC				
チャド湖畔* 周辺	0-18	6.1	0.43	0.050	17.92	8.30	0.91	0.95	0.32	28.40	27	12	61	47
	38-57	7.1	0.43	0.030	19.76	7.61	0.96	1.79	0.68	30.80	18	16	67	46
スーダン**	0-18	7.5	0.68	0.034	26.4	19.2	0.7	tr	tr	46.3	39	7	54	86
	18-60	7.5	0.48	0.022	23.7	18.1	0.7	0.1	tr	42.6	36	10	54	79
マリの内陸 デルタ***	0-10	5.0	1.07	0.11	5.43	3.46	0.33	0.85	3.54	13.61	9	18	73	19
	25-55	4.8	0.86	0.094	8.35	3.09	0.40	0.65	2.87	15.36	9	14	77	20

資料：*Oyediran (1990), **Sudan Soil Survey Administration/FAO (1985) and Abdulla (1985),

***Eutri Gleysol

3-2 内陸盆地の Vertisol

①物理化学的特徴：表2-3のNo.3の土壌と表2-5に示したように Vertisol は重粘で塩基に富み CEC も大きく、化学的肥沃度は大きい (表2-5に示したマリの内陸デルタ, モプチ=Mopti 付近の土壌は Vertisol ではなくて Eutri Gleysol である。比較のために示した)。しかし乾燥すると粘土鉱物の主成分であるモンモリロナイトが収縮し、大きな亀裂が生じる。このため貯水池、灌漑水路の堤防や水田の畔の漏水が大きくなる。また、乾燥するときわめて硬くなり、ツルハシでなければ耕することができなくなるほどの硬さになる。一方、湿潤条件下では地耐力が低下し、トラクター等の大型耕作機械類は使用困難になるなど、物理的性質は悪い。易耕性の土壌水分範囲が狭い問題土壌の一つである。

② Vertisol の灌漑：西アフリカにおける Vertisol の主な分布域は年間降雨量が 1,000 mm 以下の半乾燥地にあるので、耐干性のミレット等一部の作物

を除けば灌漑が必要な場合が多い。しかし、肥沃度が高いので一旦灌漑さえ可能になれば水稻では5—8t/haという高収を得ることもできる。小麦、トウモロコシ、ソルガム、綿花等の収量も、持続的な灌漑さえ可能になれば、非常に高い収量を達成することができる。しかし、灌漑に当たっては以下のような注意が必要である。

③化学性の問題：CECは高く、黒色だが表2—5に示すように有機物含量は少ない。したがって、窒素を中心とした施肥の必要がある。水稻ではなくて畑作物を灌漑によって栽培する場合には、土壤の塩類化に注意する必要がある。図2—12と表2—6は西アフリカの例ではないがタンザニア国、キリマンジャロ州の日本援助によるプロジェクト地（KADC、キリマンジャロ農業開発センター）の例である。灌漑トウモロコシ栽培を約4年継続した土壤のうち、生育障害が激しかった排水不良地と、問題のなかった排水良好地の土壤分析の結果を示したものである（1985年8月に調査、Wakatsuki and Mizota, 1992）。Vertisol地帯は平坦である。しかし、実際には数十cm～数m程度の微小な高低差がある。透水性が小さいので微小な低地部でも排水不良になる。このようなところでは表に示したように10年以内にナトリウムやマグネシウム等の塩類が集積する。

一方、水田では表のように塩類化しにくい。湛水時に塩類を洗い流すことができるからである。持続的な灌漑農業という点では、半乾燥地でも水田農業が有効である。稲作時に、乾燥地の大きな蒸発散量以上に十分量の灌漑水を供給し、排水すれば表土に塩類が集積するのを防ぐことができる。十分量の灌漑水が得られない場合は、数年に一度水田作を入れるローテーションシステムにする。上記のKADCの塩害地はその後、水田開発の進行に伴い、水田化されひとまず塩害問題は回避された。この地域の灌漑水田が持続可能であるためには、塩類を洗い流すに十分な水資源を得られることが前提になる。しかし通常この地域の水資源は限られているので、灌漑水田開発のポテンシャルはあまり大きくない。Vertisolの易耕性に関連する物理性の管理は以下のように行う。すなわち、落水収穫後、乾燥して大きな亀裂が入るようになる前に、表層土を薄く耕作し、下層土との毛管水分連絡を断ち切ることは、過度の乾燥による固結

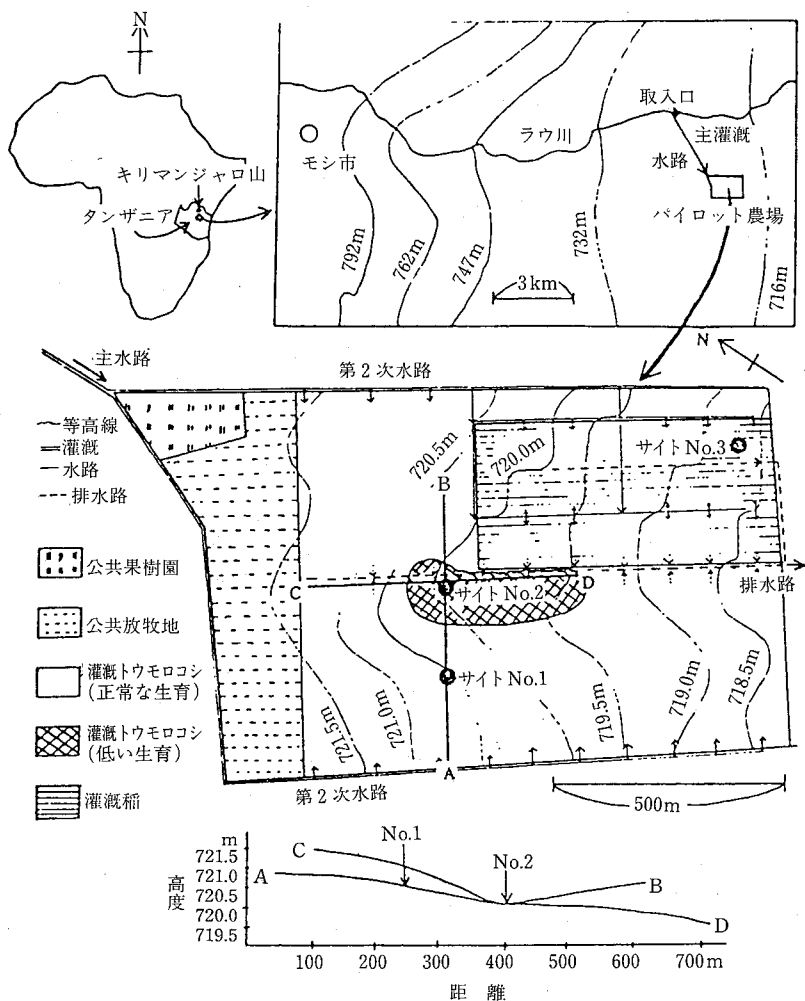


図2-12 キリマンジャロ農業開発センター (KADC) パイロット農場
化を防ぐのに有効である。

④水稲の低温障害：熱帯アフリカで灌漑によって Vertisol 地帯で稲作を行うことができる地域は標高 500 m 以下のサヘル帯でも、高原の東部アフリカでも、稲作時期によっては低温障害が問題になることがある。サヘル帯のニアメー、ヌジャメナ、トンブクツ等ではサハラのだストを混じえたハルマッタン風のため 12 月、1 月の平均気温は 21.8—24.8°C である。しかし、ときには

表2-6 KADCパイロット農場サイトNo.1, 2, 3, の土壌の一般理化学性

農場 サイト	深度 (cm)	土性	Color moist	合計 (g/kg)		pH (H ₂ O)	pH (KCl)	1 M ammonium acetate extractable cations (cmol(t)/kg)					有効態 リン (g/kg)
				C	N			Ca	Mg	K	Na	Sum	
No.1	0-1	SiC	5YR2/4	35	3	7.0	6.1	12.5	6.6	3.3	0.2	22.6	1.13
	1-10	SiC	5YR2/4	10	1	6.5	6.0	11.2	5.6	3.5	0.1	20.4	1.22
	10-20	SiC	5YR3/3	9	1	6.8	5.9	10.8	6.2	2.0	0.2	19.2	0.98
	40-50	SiC	5YR3/3	5	0.5	6.5	5.3	9.7	4.7	2.3	0.3	17.0	1.16
	90-100	SiC	5YR3/3	5	0.5	6.5	5.5	10.5	4.6	1.9	0.4	17.4	1.41
No.2	0-1	SiC	5YR2/4	-	-	6.1	6.1	78.8	61.8	7.8	205.8	354.2	0.97
	1-10	SiC	5YR2/4	-	-	6.4	6.3	29.9	26.5	6.8	6.5	69.7	1.41
	10-20	SiC	5YR3/3	-	-	6.1	5.1	8.6	6.0	2.5	4.7	21.8	0.86
	40-50	SiC	5YR3/3	-	-	6.8	5.4	6.6	6.0	2.0	4.1	18.7	0.61
	90-100	SiC	5YR3/3	-	-	8.5	7.0	9.2	8.2	2.2	6.9	26.5	1.05
No.3	0-1	SiC	5YR3/3	-	-	6.6	6.6	14.6	8.0	2.0	0.6	25.2	0.21
	1-10	SiC	5YR2/3	-	-	7.3	6.8	14.2	6.0	3.2	0.4	23.8	1.19
	10-20	SiC	5YR2/4	-	-	7.6	6.9	14.7	5.1	4.1	0.3	24.2	1.43
	40-50	SiC	5YR2/4	-	-	7.5	6.8	15.8	2.8	3.1	0.3	22.0	0.94
	70-80	SiC	5YR2/4	-	-	7.6	6.6	15.9	2.6	4.0	0.3	22.8	1.15

資料：Wakatsuki & Mizota (1992)

最高気温 25°C以下、夜間の気温は 10°C以下に下がることもある。このような低温が稲の穂ばらみ期や出穂期に当たると、稲が不稔になる。耐寒性の弱いインディカ品種では被害を受けやすい。耐寒性品種および作期や苗代等に工夫が必要になる。アフリカ稲 (*O. glaberrima*) の高温耐性は知られているが耐寒性についての研究例は知られていない。栽培化された地域がサヘル気候帯であるので、高温耐性と耐寒性の両遺伝子的特性を有する可能性はあるかも知れない。

3-3 内陸小低地の貧栄養土壌と肥沃度の比較的高い氾濫原土壌

(1) 内陸小低地とは

高原の東アフリカを除けば、西アフリカでは準平原地形が卓越する。内陸小

低地は緩やかに起伏する準平原の低地部分に当たる。標高は数十～数百 m にすぎないが、河川の源流部分に当たる。図 2-13 には内陸小低地と氾濫原の模式的配置を示した (Savvides, 1981)。内陸小低地の主な水源は雨、集水域からの表面流出水と湧き水である。最源流部では流路がはっきりしない。しかし、下流にいくにつれてはっきりした流路をもつようになり、氾濫原的要素をもつ小低地となる。

内陸小低地の呼び名は地域により異なる。フランス語圏では Basfond, Marigot, 北ナイジェリアやチャド等のハウサ圏では Fadama, 英語圏では Inland val-

ley swamp, 東南アフリカのバンツ語圏では Dambo あるいは mbuga 等と呼ばれている。内陸小低地の熱帯アフリカでの総計面積は約 8,500 万 ha (表 2-4), 大部分は西と中央アフリカにある (約 6,500 万 ha)。東南アフリカには約 2,000 万 ha の分布があると推定される。したがって、以下では西と中央アフリカを中心に述べる。東南アフリカの Dambo の低湿地生態と開発に関しては滝島の総説があり (1992), 土地利用, 農村集落の社会経済に関する調査が島田・児玉谷・半澤ら (1993) によって行われている。

(2) 西アフリカの内陸小低地と氾濫原土壌の肥沃度

1982-1995 年にかけて、図 2-14 と図 2-15 に示すように、セネガル、ギニア、シエラレオネ、リベリア、コートジボアール、マリ、ブルキナファソ、

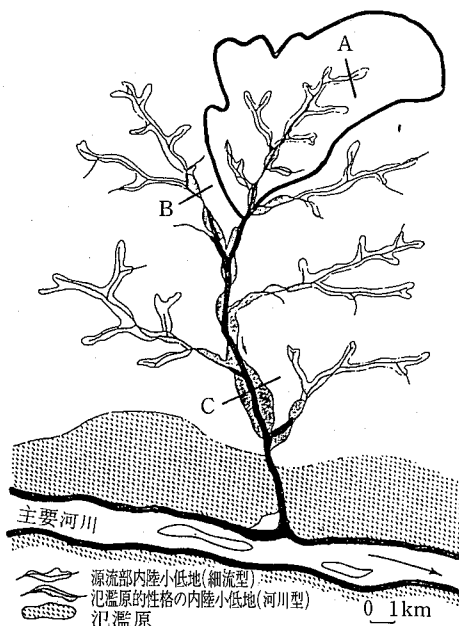


図 2-13 内陸小低地と氾濫原の模式的配置 (Savvides, 1981)

注：A, B, C 地点の模式的地形断面図については図 6-1 参照。）

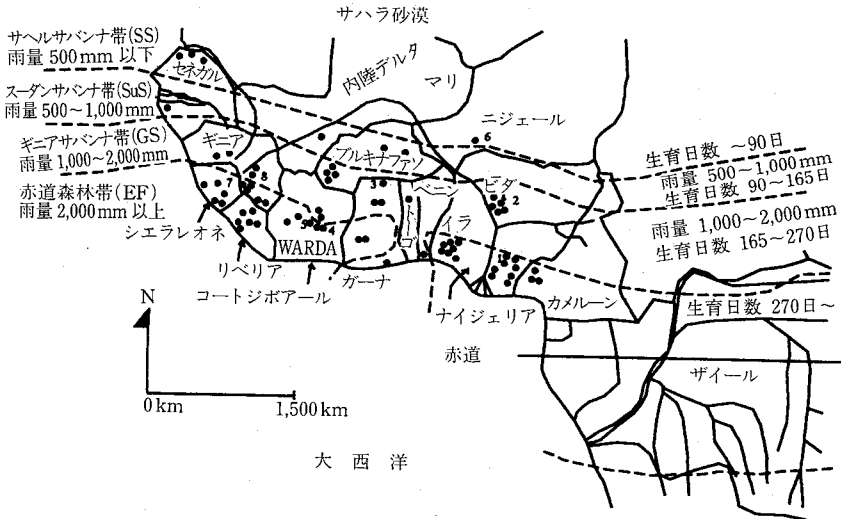


図 2-14 内陸小低地の稲作栽培土壌の主なサンプリング地点 (合計 185 地点より採取)

図中の番号の地点の生態環境の特徴は以下のものであった。

1. アバカリキ (Abakaliki), 伝統的な小低地稲作地, 2. ヒダ (Bida), 伝統的な小低地と氾濫原稲作地, 3. トノ灌漑プロジェクト (Tono ICOUR) イギリス, 韓国が協力,
4. ボワケ (Bouake), ムベ (Mbe) 小低地に WARDA (西アフリカ稲作開発協力) の本部と田圃がある, 5. ダロア (Daloa) とカチョラ (katiola), 世銀や中国等の協力でコートジボワール稲作開発公社 (SODERIZ) が水田開発を行った, 6. ビリニンコニ (Birinin Konni), 小さな凹地にアフリカ稲が半栽培, 7. マケニ (Makeni), 伝統的な内陸小低地稲, 8. ゲックドゥ (Gueckedou) 伝統的な小低地稲作地

ガーナ, トーゴ, ベニン, ニジェール, ナイジェリア, カメルーン, ザイール等の西アフリカ諸国の氾濫原や内陸小低地の稲作地を調査し, 低地稲作農業の現状を調査するとともに, 土壌を採取してその肥沃度を熱帯アジアや日本のそれと比較した (若月, 1988; Wakatsuki *et al.*, 1988, 1989; Issaka, 1994; Issaka *et al.*, 1996 a, b, c; Buri *et al.*, 1996 a, b)。表 2-7 に各農業生態区分ごとに, 氾濫原と内陸小低地の表層土壌の一般理化学性を, 東南アジアや日本の水田の表層土壌のデータ (Kawaguchi & Kyuma, 1977) と比較しながら示した。

サンプリング数は分布面積に応じて設定したわけではないが, 西アフリカ全体の低地の推定分布面積, 3,860-8,400 万 ha (Windmeijer and Andriesse, 1993) の内訳にほぼ沿っている。すなわち, 内陸小低地の分布面積, 2,100-

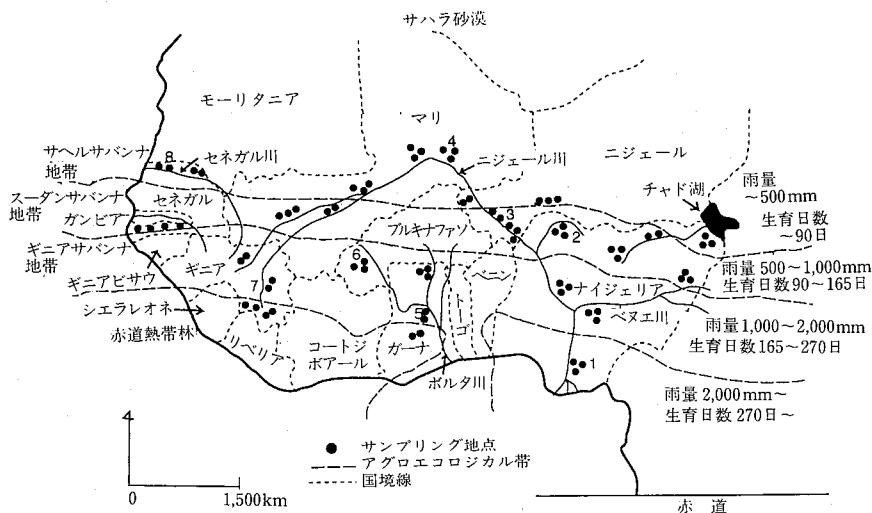


図 2-15 氾濫原土壌のサンプリング地点 (合計 62 地点より採取)

1. 日本の技術協力による大規模灌漑水田 (約 4,000 ha), 2. ソコト (Sokoto), 伝統的な氾濫原農法によるアフリカ稲の栽培地, 3. ニアメイ (Niamey) 付近, ポンプアップによる灌漑水田, 4. ガオ (Gao) 付近, アジア稲とアフリカ稲の深水稲がみられる, 5. アフラムソ (Aframso), 小型の氾濫原の小規模開田, 6. クー低地 (Vallee du Kou) の台湾とオランダの協力による灌漑水田, 7. バロ (Baro) 氾濫原におけるフランスの協力による陸稲的な非水田機械化稲作, 8. サンルイ (St. Louis), 小型フローティングポンプによる小規模灌漑水田, 野菜畑

5,100 万 ha (中央値, 3,600 万 ha) に対して 185 点, 氾濫原の推定分布面積, 1,230—2,480 万 ha (中央値, 1,900 万 ha) に対して 62 点をサンプリングしたことになる。沿海低地・デルタの分布面積, 470—820 万 ha (中央値, 600 万 ha) に対してはほとんどサンプリングしていない。これは, すでに述べたように低地利用のための開発優先度が, ①内陸小低地, ②氾濫原, ③沿海低地・デルタのような順になるからである。本研究では内陸小低地に焦点を当てているので, 西アフリカの低地土壌全体の完全な肥沃度評価を行うためには, 沿海低地と氾濫原土壌の調査点数を増やす必要がある。それは今後の課題である。しかし, 本研究の意図する内陸小低地土壌に肥沃度評価に関する限りサンプリング点数は十分と考えている。

表 2—7 に示した, 各気候帯別のサンプリング点数から, 西アフリカにおける低地の分布の特徴がわかる。内陸小低地はギニアサバンナ帯と, 赤道森林帯

表2-7 内陸小低地および氾濫原土壌表土 (0-15cm) の理化学性

気候帯	pH	有機炭素 (%)	全窒素 (%)	C/N 比	有効態 リン (ブレイ No.1法) (ppm)	交換性塩基 (cmol (+)/kg)						砂 (%)	シルト (%)	粘土 (%)
						Ca	Mg	K	Na	酸度	eCEC	eCEC/粘土		
氾濫原	赤道森林帯 (n=7)	1.44	0.086	16.7	4.2	4.11	1.47	0.17	0.35	0.93	7.03	21	30	33
	ギニアサバンナ帯 (n=19)	1.63	0.133	12.3	4.1	3.92	1.93	0.47	0.75	0.73	7.80	31	47	25
	スーダン・サヘル帯 (n=36)	0.76	0.082	9.3	2.5	6.79	3.32	0.57	0.86	0.76	12.30	41	52	30
	全西アフリカ帯 (n=62)	1.10	0.098	11.2	3.2	5.61	2.69	0.49	0.77	0.75	10.31	36	48	29
内陸小低地	赤道森林帯 (n=79)	2.04	0.166	12.3	5.3	2.28	1.24	0.27	0.26	1.57	5.72	29	60	20
	ギニアサバンナ帯 (n=98)	0.73	0.070	10.4	2.9	1.33	0.51	0.20	0.11	0.51	2.66	18	61	15
	スーダン・サヘル帯 (n=8)	0.59	0.066	8.9	2.7	4.80	1.86	0.60	0.47	0.20	8.00	53	56	15
	全西アフリカ帯 (n=185)	1.28	0.111	11.5	3.9 (8.7*)	1.89	0.88	0.25	0.19	1.00	4.20	25	60	17
熱帯アジア水田 (n=410)	6.0	1.41	0.130	10.8	17.6*	10.4	5.5	0.40	1.50	-	17.8	47	34	38
日本水田 (n=155)	5.4	3.33	0.290	11.5	57.3*	9.3	2.8	0.40	0.40	-	12.9	61	49	21

注：*ブレイ No.2法

に分布の中心がある。一方氾濫原はスーダンサバンナやサヘル帯に分布の中心がある。本研究ではサンプリングができなかった、沿海低地・デルタは赤道森林帯に、内陸盆地はサヘル帯にその分布の中心がある。

化学的肥沃度は、降雨の少ない、したがって、溶脱の少ないスーダンサバンナやサヘル帯の土壌が高いことがわかる。氾濫原の土壌は、ナイジェリア南部のイボ、ヨルバ地域等、土壌母材が塩基に富む一部の内陸小低地を除けば、一般に内陸小低地より肥沃である。内陸小低地は降雨の多い、沿海の赤道森林帯、半湿潤のギニアサバンナ、内陸半乾燥地のスーダンサバンナ、さらにはサヘル帯の一部と、広範に分布する。最上流部とはいえ、内陸小低地は地形的には集水域の低地部でしかも谷底部分の傾斜は1%程度が多いので、アップランドから侵食によって流れ落ちてくる土壌物質が直接集まり堆積するところにあるので、集水域の土壌肥沃度の全体像が反映していると考えてもよい。

表2-7からわかるように、西アフリカの内陸小低地土壌は一般にきわめて貧栄養である。平均的な数値で東南アジアや日本のそれと比較してみると、交換性Ca, Mg, K, CEC（陽イオン交換容量）、粘土含量、いずれも小さい。内陸小低地土壌の肥沃度は世界的にみても最低の部類に入る。この地域の土壌がきわめて粗粒で肥沃度が低いのは Gondwana 大陸以来の古い岩石が、熱帯下で長期にわたって風化作用を受けたという、自然環境的要因が主因であろう。しかし、森林破壊とそれに引き続くアップランドにおける土壌収奪型農耕の継続、さらに、低地における、水田農業のような、土壌保全型農業システムの展開がなかったことも、一因であろう。

日本や東南アジアの稲作地と比較した結果も表2-7に示してある。西アフリカの内陸小低地にはナイジェリア東南部のイボ地帯(表2-3, No.11の土壌も参照)のように赤道森林帯でも一部に肥沃な土壌が存在するけれども、一般に内陸小低地が多数分布するギニアサバンナ、赤道森林帯の土壌は、酸性で有機物含量が小さいだけでなく粘土含量も少なく粗粒である。また粘土鉱物もカオリン系が多い。したがって、CEC はきわめて小さく、交換性塩基、特にカルシウムやカリウム含量もきわめて少ない。スーダンサバンナ以北では内陸小低地の土壌は比較的肥沃であるが分布割合は少なく、また有効水分が十分でない

場合が多い。

氾濫原土壌の肥沃度は内陸小低地よりかなり高い。粘土含量は東南アジアのそれとあまり変わらない。しかし、eCEC (有効陽イオン交換容量) や交換性塩基含量は小さい。粘土の活性度 (eCEC/粘土) は東南アジアや日本と比べて小さい。赤道森林帯とギニアサバンナ帯で特に小さく降雨による風化の進行程度の差を示しており、また日本の土壌の粘土鉱物の活性度は特に大きいことがわかる。塩基組成という点では赤道森林帯にある氾濫原土壌、赤道森林帯やギニアサバンナ帯の内陸小低地土壌の有効態カリウム含量が小さい。西アフリカで問題になる鉄過剰症が硫酸カリウム施肥により回復する例が報告 (Yamauchi, 1989) されており、カリウム欠乏が引き金になっている場合もあると考えられる。また赤道森林帯の氾濫原土壌の有機炭素濃度は高いが窒素は低く、C/N比は16.7とかなり高くなっており、有機物の分解が抑制されていることを示している。

スーダンサバンナ・サヘル帯土壌の肥沃度は東南アジアや日本と同程度である。しかし、有機物と窒素含量は少なく、乾燥地土壌の特徴が読み取れる。すでに述べたようにこの地域の土壌の農業利用は、土壌の化学的肥沃度ではなく、利用可能な水資源の量が制限因子である。

化学的肥沃度という点で強調しておかねばならないのは、リン酸肥沃度の一般的な低さである。表2-7に示すように有効態リンは東南アジアの半分以下、日本の5-7分の1以下である。リン酸肥沃度は水田生態系における窒素固定能も左右するのできわめて重要である。

表2-8には内陸小低地の表層土壌の全分析の結果を熱帯アジア、アメリカ、日本の水田土壌のそれと比較したものである。塩基含量とリン酸がきわめて低いという特徴がさらにはっきり現れている。熱帯アメリカのOxisol (熱帯の強風化老朽化土壌) やUltisol (塩基溶脱強風化土壌) に近いことがわかる。ただし全リンのレベルは熱帯アフリカのOxisolやUltisolよりはやや高い。このことは水田化し湛水すれば、リン酸の有効化が期待できるものであることを示している。この点からも、今後この地域における水田拡大の利点が理解される。

以下、図2-14のサンプルの分析データを各気候帯ごとに土壌の理化学性の

表2-8 西アフリカの内陸小低地と熱帯アジア, 日本, 熱帯アメリカの化学的組成の比較

地域	SiO ₂	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	CaO	MgO	K ₂ O	P ₂ O ₅	MnO ₂	TiO ₂	Na ₂ O
赤道森林帯	79	4.5	14.9	0.29	0.37	0.29	0.088	0.052	0.63	0.25
ギニアサバンナ帯	86	3.3	8.2	0.47	0.39	0.43	0.079	0.063	0.55	0.35
全西アフリカ	81	3.9	12.0	0.36	0.38	0.38	0.083	0.057	0.59	0.30
日本*	72	6.0	16.3	1.86	0.75	2.14	0.22	0.13	0.88	-
熱帯アジア*	72	5.9	16.3	1.42	0.92	1.83	0.13	0.12	1.14	-
熱帯アメリカ**	77	5.2	14.9	0.27	0.37	0.43	0.053	0.027	1.40	-

注：-測定せず。

* Kawaguchi and Kyuma (1977)

**Tanaka *et al.* (1984, 1986)

深度分布をやや詳しくみている (Issaka, 1994)。

①酸性度：各気候帯および深度別の pH (H₂O) と交換酸度の平均値を図 2-16 と図 2-17 に示した (Issaka, 1994)。赤道森林帯の土壌の表層 60 cm までの pH が低く、交換酸度も高い。多量の降雨による溶脱を示している。ギニアサバンナ帯以北の土壌では深度変化は明瞭ではない。

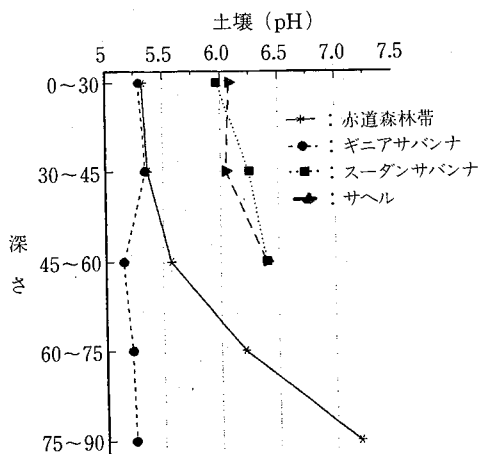


図 2-16 四気候帯における pH の深さ別分布

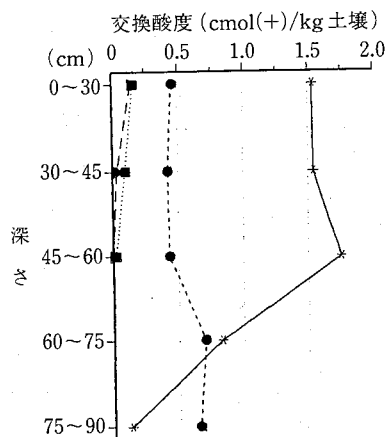


図 2-17 四気候帯における全酸度の深さ別分布

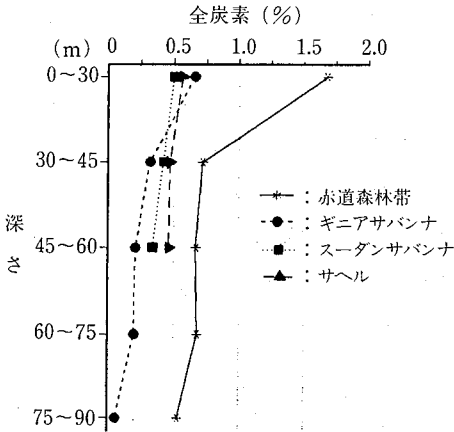


図2-18 四気候帯における全炭素の深さ別分布

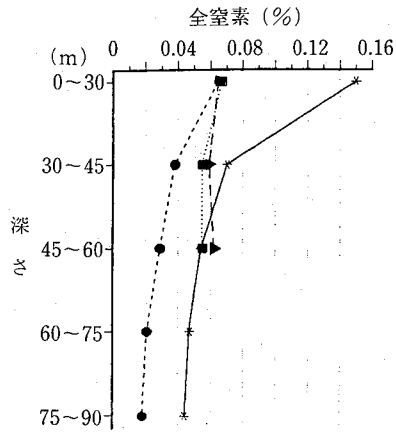


図2-19 四気候帯における全窒素の深さ別分布

②炭素および窒素：全炭素と窒素の分析結果を図2-18と図2-19に示した。赤道森林帯の平均全炭素は1.7%，平均全窒素は0.15%でC/N比は11であった。炭素、窒素とも30 cm以下の層では半減した。ギニアサバンナ帯では表層の平均炭素濃度は0.66%，窒素は0.065%でC/N比は10であった。下層の炭素、窒素ともに漸減した。この結果、下層土の炭素、窒素含量はギニアサバンナ帯の土壌が、四気候帯の中では最低であった。

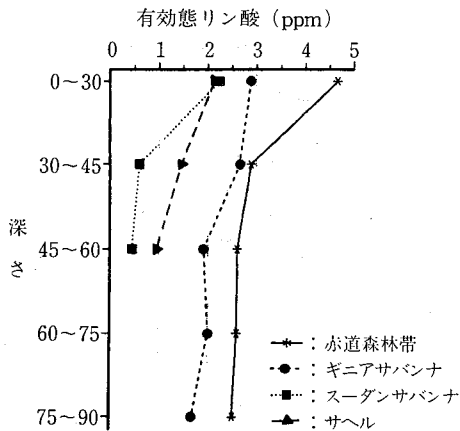


図2-20 四気候帯における有効態リン酸の深さ別分布

③有効態リン：図2-20に示したように、Bray No.1法による有効態リンの濃度は全気候帯を通じて低い。特に半乾燥地のサヘル、スーダンサバンナ帯、ギニアサバンナ帯では全層とも低い。赤道森林帯の表層の有効リンが5

ppm でやや高い値を示しているが、これはナイジェリア東南部のイボ地域の土壌 (Nitisol) が頁岩等の堆積岩由来の土壌に特異的にリン酸を高濃度を含むものがあり、全体としての水準を高くしているからである。このような土壌を除けば、赤道森林帯の土壌の有効リン濃度は低く、西アフリカの内陸小低地土壌のリン肥沃度は低く、農業生産の大きな制限因子になっている。

④粘土含量：土壌肥沃度の大きな部分を占める陽イオン交換容量 (CEC) を決

表2-9 四気候帯における粘土含量平均の比較(%)

気候帯	深さ (cm)			
	0～30	30～45	45～60	60～75
赤道森林帯	19	19	21	25
ギニアサバンナ	11	14	10	15
スーダンサバンナ	19	21	19	
サヘル	20	32	40	

表2-10 四気候帯における交換性陽イオンの平均値

深さ (cm)	気候帯	陽イオン (cmol(+)/kg)					
		Ca	Mg	K	Na	Mn	全酸度
0～30	E. F.	2.51	1.15	0.245	0.293	0.079	1.533
	G. S.	1.31	0.49	0.186	0.108	0.065	0.458
	Su. S.	4.99	1.98	0.494	0.444	0.030	0.163
	S. S.	5.29	1.98	0.584	0.428	0.072	0.146
30～45	E. F.	1.89	1.00	0.187	0.300	0.060	1.541
	G. S.	1.27	0.56	0.130	0.116	0.048	0.426
	Su. S.	7.96	2.74	0.346	0.366	0.035	0.100
	S. S.	7.72	4.05	0.461	0.381	0.066	0.035
45～60	E. F.	2.04	1.22	0.212	0.461	0.042	1.753
	G. S.	0.99	0.54	0.151	0.109	0.063	0.433
	Su. S.	6.70	2.12	0.246	0.551	0.035	0.023
	S. S.	9.20	4.71	0.536	0.348	0.051	0.000
60～75	E. F.	3.31	1.94	0.207	1.326	0.082	0.832
	G. S.	1.34	1.03	0.154	0.170	0.053	0.703
75～90	E. F.	3.08	2.78	0.124	2.384	0.016	0.133
	G. S.	0.96	0.57	0.145	0.050	0.021	0.658

注：E. F.…赤道森林帯；G. S.…ギニアサバンナ；Su. S.…スーダンサバンナ；S. S.…サヘル。

定する要因となる粘土含量を表2—9にまとめた。全般に粘土含量は低い、特に中部ベルト地帯のギニアサバンナ帯の粘土含量が、表層から下層まで、他の気候帯の半分とわけて低いことが特筆される。この地域の土壌の肥沃度が低い理由である。スーダンサバンナ帯、赤道森林帯の土壌の粘土含量は全層を通じて20%前後となっている。サヘル帯の低地土壌は表層は20%程度だが、下層の粘土含

量はかなり高い。表土の粘土含量が低いのは乾季に風食によって、粘土成分が失われたためかも知れない。

⑤交換性陽イオンとCEC：表2—10には交換性陽イオンの平均値を、表2—11にはCECと塩基飽和度の平均値を示した。交換性陽イオン、特にカルシウム、カリウムの含量は赤道森林帯、ギニアサバンナ帯ともに、全層にわたってきわめて低い。しかし、CECも低いため、塩基飽和度(B.S.P.: base saturation percentage)は50%以上である。

⑥四気候帯の肥沃度のまとめ：赤道森林帯では塩基含量が低いことが最大の問題であろう。窒素およびリン肥沃度もあまり高くない。稲作という点では、水には最も恵まれており、また土壌肥沃度もギニアサバンナ帯よりは高いので、今後重点的に水田開発を行うべき気候帯であろう。ギニアサバンナ帯はすべての土壌肥沃度項目とも最低である。適度の水があり、地形的にも赤道森林帯に比べて稲作地として開発しやすいことから、西アフリカの内陸小低地稲作の中心的気候帯になっているが、土壌侵食防止、肥沃度の増進のためにも、水田システムを伴った稲作を早急に展開する必要がある。スーダンサバンナお

表2-11 四気候帯における全塩基、eCECおよび塩基飽和度

	気候帯	深さ (cm)				
		0~30	30~45	45~60	60~75	75~90
全塩基 (cmol(+) /kg)	E. F.	4.28	3.44	3.98	6.87	8.38
	G. S.	2.16	2.13	1.85	2.75	1.75
	Su. S.	7.94	11.45	9.65		
	S. S.	8.51	12.67	14.85		
eCEC (cmol(+) /kg)	E. F.	5.81	4.98	5.73	7.70	8.52
	G. S.	2.62	2.56	2.28	3.45	2.40
	Su. S.	8.10	11.55	9.67		
	S. S.	8.67	12.71	14.85		
塩基 飽和度 (%)	E. F.	74.0	69.0	70.0	89.0	98.0
	G. S.	82.0	83.0	81.0	80.0	73.0
	Su. S.	98.0	99.1	99.8		
	S. S.	98.2	99.7	100		

注：表2-10に同じ

よびサヘル帯の土壌の塩基状態は高いレベルにある。リン酸肥沃度と窒素肥沃度の維持管理が重要である。

(3) 内陸小低地と氾濫原の土壌肥沃度の地理的分布

(Issaka *et al.*, 1996 a, b, c)

①内陸小低地の表層(0-15 cm)の土壌肥沃度の地理的分布：図2-21は有効陽イオン交換容量(eCEC)の分布を示す。ギニアサバンナの中部ベルト地帯は全般的に極小の値を示す。シエラレオネやリベリアの最多雨地帯も強風化土壌を反映してeCECは小さい。ナイジェリア、ガーナ、コートジボアール、ギニア等の赤道森林帯北部、ギニアサバンナ帯にかけての森林・サバンナ遷移帯と、ギニアサバンナ帯を越えたスーダンサバンナおよびサヘル帯の土壌は比較的eCECが高くなっている。図2-22の交換性カルシウムと、図2-23の交換性カリウムの分布パターンはかなり似ている。溶脱が少なくレス由来の堆積物の多いスーダン・サヘル帯と、適度の降雨が適度の土壌生成と侵食をもたらす、地質学的施肥作用の④土壌の新陳代謝(19~20頁参照)が行われていると考

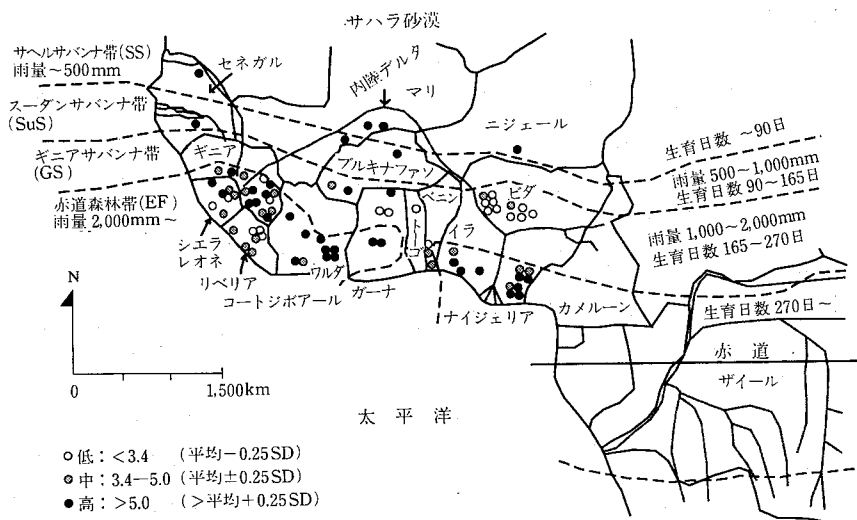
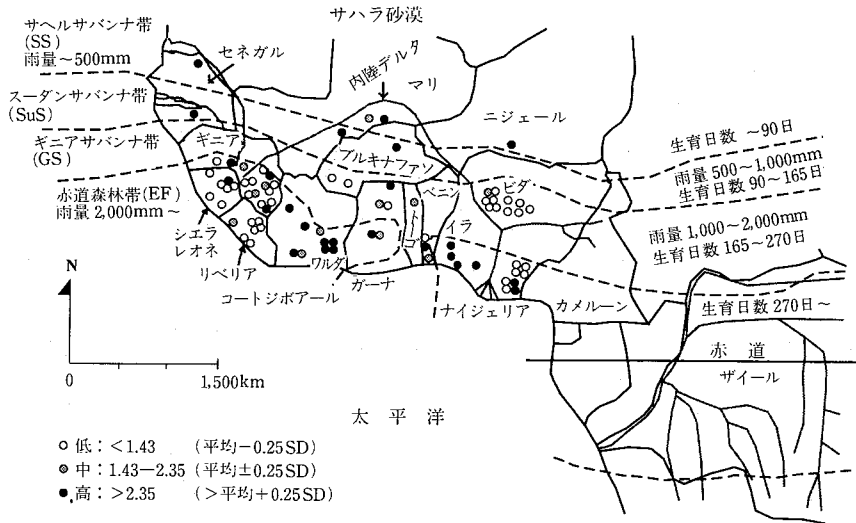
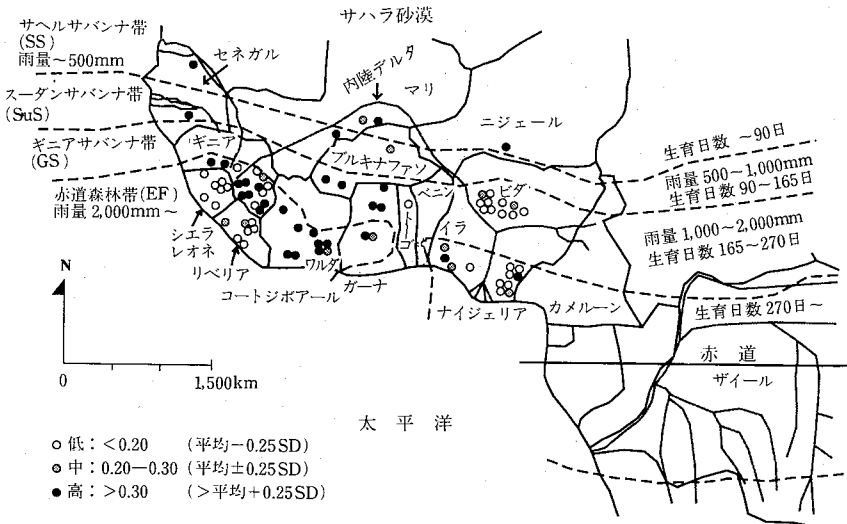


図2-21 内陸低地の表層(0-15 cm)土壌肥沃度の地理的分布：有効陽イオン交換容量(eCEC, cmol(+)/kg)

図 2-22 交換性カルシウムの地理的分布 (単位は $\text{cmol}(+)/\text{kg}$), 内陸小低地表土 (0-15 cm)図 2-23 交換性カリウムの地理的分布 ($\text{cmol}(+)/\text{kg}$), 内陸小低地表土 (0-15 cm)

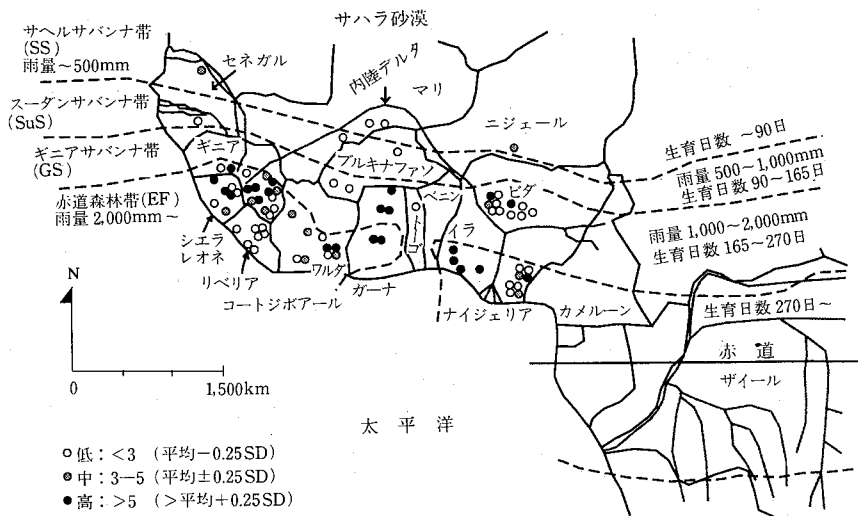


図 2-24 有効態リン (Bray No. 1) の地理的分布 (mg/kg), 内陸小低地表土 (0-15 cm)

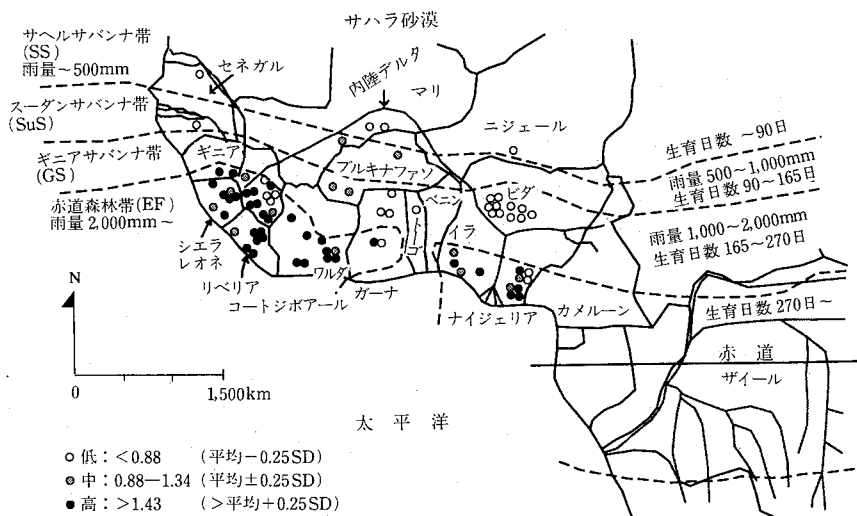


図 2-25 全窒素の地理的分布 (mg/kg), 内陸小低地表土 (0-15 cm)

えられる遷移帯は比較的肥沃である。しかし、土壤の塩基状態には気候以外に、母材の影響も重要で斑点状の分布がみられる。酸性の基盤岩を貫入する塩基性や中性の火成岩母材の影響が推定される。全般的に交換性カリウムのレベルは低いのであるが、図2-23に示すようにブルキナファソ、ギニア、コートジボアール、ガーナにかけて、交換性カリウムのレベルの低さがそれほど問題にならないと考えられるまとまった地域が存在する。

有効態リン酸も全般的にきわめて低いことは既述したが、図2-24に示すようにばらついた分布である。最多雨地域と最乾燥地帯の両者で少なく、シエラレオネ、ギニア、コートジボアール、ガーナ、ナイジェリアの一部で比較的高くなっているのは、母材の影響と考えられる。

全窒素の地理的分布は、図2-25に示すように気候と一致している。有機炭素の分布も全窒素の分布とよく似ている。赤道森林帯で高く、ギニアサバンナ、スーダンサバンナ・サヘル帯では低くなっている。

②氾濫原の表層土壌(0-15 cm)の肥沃度の地理的分布：表2-4に示したように熱帯アフリカにおける氾濫原の面積は約3,000万haあると推定されている。大中小の河川に沿って、幅の大は十数km、小は1km以下の広がりをもつ氾濫原が無数に存在する。氾濫原の土壌分布は温帯地方におけると同様、自然堤防、後背湿地、段丘への移行帯という地形によって異なる。一般に、自然堤防では砂質の、後背湿地では細粒の堆積物が土壌の母材となる。

氾濫原の沖積土壌の性質は乾燥地の土壌を別にすれば、本邦でみられる沖積土壌と基本的には変わらない。日本の分類でいえば、褐色低地土、灰色低地土、グライ低地土が分布する。FAO/Unesco(1990)による分類方式ではGleysol, Fluvisol, 米国のSoil TaxonomyではFluvent, Tropaquent, Tropaquept, Tropaquilt等である。半乾燥地のスーダンやサヘル帯ではVertisolがみられる。

表2-7に内陸小低地の土壌とともに湿潤な赤道森林帯、半湿潤なギニアサバンナ帯、半乾燥地のスーダンサバンナ・サヘル帯ごとの氾濫原土壌の肥沃度を示した。CECや塩基飽和度は乾燥地ほど高くなる。一方、交換酸度や有機物含量は湿潤な赤道森林帯で高くなる。表から理解されるように、熱帯アフリ

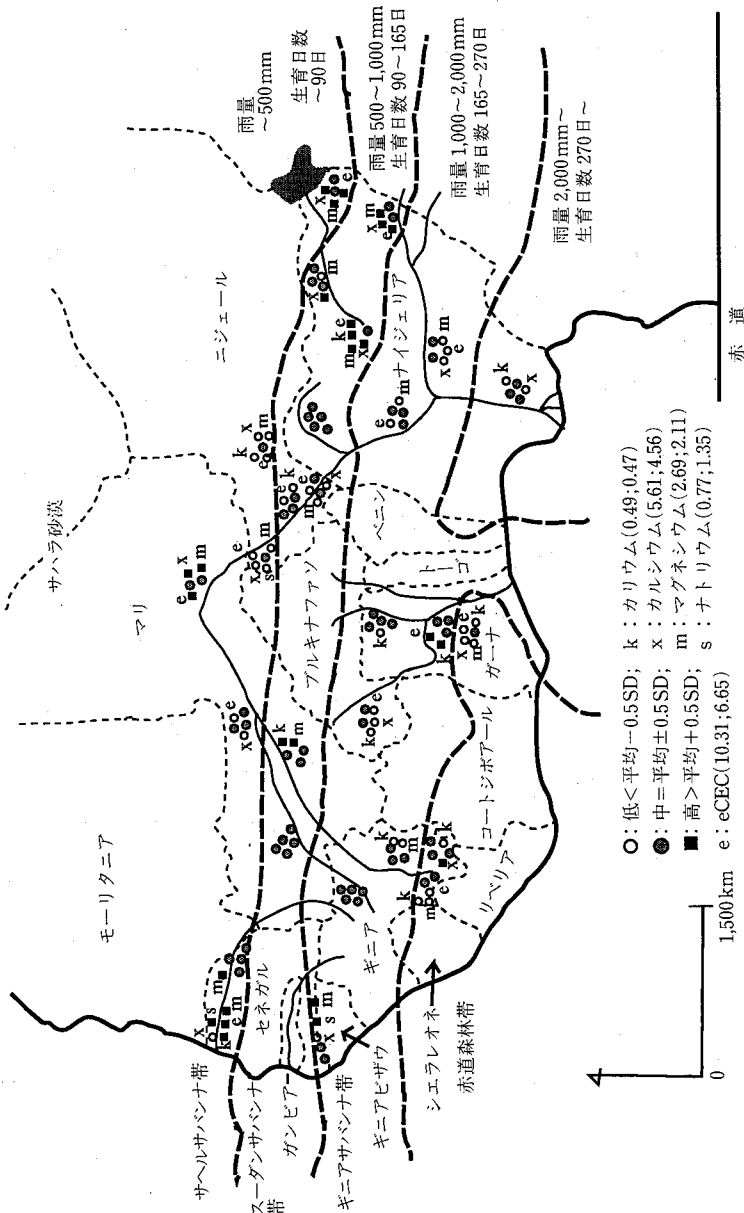


図 2-27 氾濫原土壌表土 (0-15 cm) の交換性 Ca, 有効陽イオン交換容量 (eCEC), 交換性 K, 交換性 Mg, 交換性 Na の地理的分布(それぞれの平均値と標準偏差は以下のとおり。eCEC 10.31, 6.65, 交換性 Ca 5.61, 4.56, 交換性 K 0.49, 0.47, 交換性 Mg 2.69, 2.11, 交換性 Na 0.77, 1.35) (cmol (+)/kg)

カの氾濫原土壌は比較的肥沃である。したがって、ダムによる洪水調節、ポンプ等による灌漑が持続可能なところでは、生産性の高い農地とすることができる。

図2-26にはpH、有機炭素、全窒素、有効態リンの、図2-27には有効陽イオン交換容量、交換性カリウム、交換性マグネシウム、交換性ナトリウムの地理的分布を示した。基本的な分布パターンは内陸小低地のそれと似ている。しかし、河川による運搬・堆積・氾濫作用が広範に影響を及ぼすため、気候や地質母材の影響はかなり少なくなる。pHは降雨の多い赤道森林帯とニジェール川沿いで比較的低かった。サヘルやスーダンサバンナで高い土壌がみられるのは乾燥地の特徴として理解できるが、酸性土壌がみられるのは湛水と落水の繰り返しによる2価鉄と3価鉄の変化に伴う粘土のフェロリシス (Ferrolysis; Brinkman, 1979) のような現象が起こっているのかも知れない。有機炭素と窒素はナイジェリア、ギニア、セネガル南部で高い。全般的に低い有効態リンであるが、ブルキナファソ、ガーナ、南部ギニアで比較的高かった。有効態塩基のうち、交換性カリウムの極端に低い土壌がナイジェリア、ガーナ、ギニア南

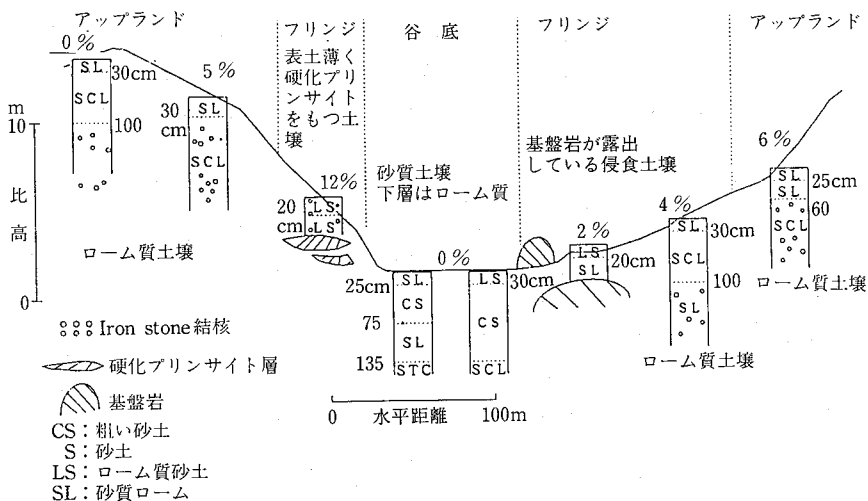


図2-28 シェラレオネ、マケニ付近の内陸小低地土壌のトポシーケンスの例 (Smaling 等, 1985 a, 一部変更)

部でみられた。その他の交換性塩基類は内陸小低地に比べ高い。特に交換性カルシウムとマグネシウムはナイジェリアのベヌエ川、チャド湖付近の Vertisol で高かった。セネガルではこれらの塩基以外に、交換性ナトリウム含量が高く塩害への対処も必要であろう。

(4) 内陸小低地土壤のトボシーケンス

図2-28 にはシエラレオネ中部マケニ市付近の赤道森林帯の内陸小低地の例

表2-12 シエラレオネ、赤道森林帯の酸性花崗岩質土壤のトボシーケンスによる化学的性質の違い (Smaling *et al.*, 1985a)

化学的性質	深度 (cm)	アップランド	フリンジ	谷底
pH H ₂ O	0~20	5.5	5.2	5.0
(1:2.5)	20~40	5.1	5.3	5.1
pH KCl	0~20	4.2	4.0	4.2
(1:2.5)	20~40	4.1	4.1	4.4
Org. C	0~20	1.5-4.0	1.0-2.5	1.5-9.0
(%)	20~40	0.5-2.0	0.5-1.5	<0.5
CEC pH=7	0~20	4-11	4-7	15-17
cmol(+)/kg	20~40	4-8	3-6	<13
eCEC	0~20	2.0-3.0	1.9-2.5	1.0-5.0
cmol(+)/kg	20~40	1.5-3.0	1.0-3.0	0.5-1.5
Base sat.	0~20	5-50	5-20	5-10
(%)	20~40	4-15	3-6	n. d.
Ex. Acid.	0~20	10-90	30-90	<65
(% of eCEC)	20~40	>60	>85	>65
全窒素	0~20	0.1-0.3	0.1	0.2-0.4
(%)	20~40	n. d.	n. d.	n. d.
P-Bray 1	0~20	1-4	2-4	3-4
(ppm P)	20~40	0-1	0.5-1	0-4
全リン	0~20	45-60	35-50	40-100
(ppm P)	20~40	35-50	35-45	10-50
S-available	0~20	8-35	9-15	3-8
(ppm SO ₄)	20~40	n. d.	n. d.	n. d.
全鉄	0~20	1-1.8	0.3-0.8	0.1-0.4
(%)	20~40	n. d.	n. d.	n. d.

注：n. d.測定せず。

を示した (Smaling *et al.*, 1985 a)。土壤は台地平坦部が Oxisol/Ultisol, 緩傾斜部が Ultisol, 谷底部が Inceptisol のトポシーケンスが代表的である。この地域は年間降雨量が 3,000 mm を超える。雨の降り方はスコール的で降雨強度は強く、侵食作用が強い。土壤保全的な水田農業のような持続的な低地利用のファームシステムが未成立であることも加わって、きわめて砂質の貧栄養の谷底土壤、特に表土をもたらししている。表 2-12 に示したように、谷底の表土の eCEC は 1-5 cmol(+)/kg であるがそのうちの 65% 以上は、交換性酸度で、塩基は 1 cmol(+)/kg 以下しかないことも多い。表 2-12 ではかつての標準法 (1 N 酢酸アンモニウム, pH=7) で測定した CEC も示されているが、eCEC の 2-3 倍の大きな値を示している。しかし、実際の現地土壤ではこのような高塩類濃度、高 pH の条件は存在しないので、肥沃度評価の基準としては eCEC や交換性塩基や酸度の測定値が望ましい。

降雨量の多いこの地域では、準平原地形としては勾配が 5-12% で傾斜がややきついフリンジや上部のアップランド土壤では侵食により表土が失われ、硬化したプリンサイト層や基盤岩さえ露出している。Iron stone の結核も地表近くに現われ激しい土壤侵食を物語っている。

図 2-29 はナイジェリア中部ビダ市付近の内陸小低地の例である (Smaling

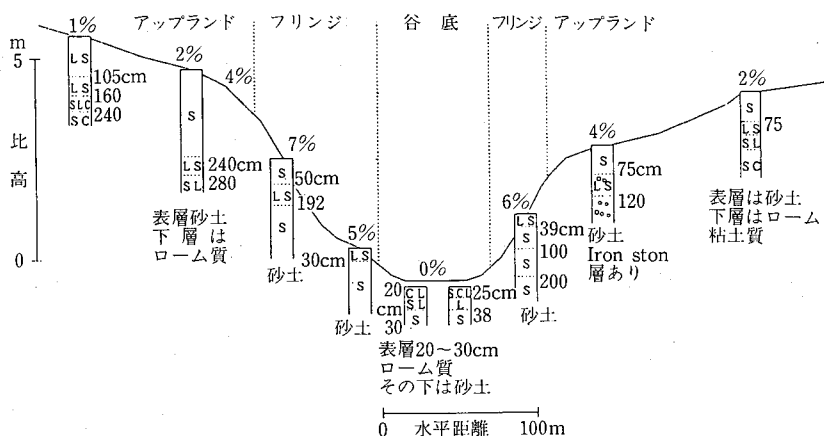


図 2-29 ナイジェリア中部、ヒダ市付近の内陸小渓谷土壤のトポシーケンスの例 (Smaling 等, 1985 b, 一部改変)

et al, 1985 b)。ギニアサバンナ地帯に属し、雨量は1,200 mmで、母材は中生代の砂岩であるため全般的にきわめて砂質である。表2-13には稲作が行われているフリンジと谷底土壌の理化学性を示した。傾斜のあるフリンジは砂質でCEC、交換性塩基とも少ない貧栄養の土壌となっており、強い侵食を裏づける。一方、谷底の表土20-30 cmの粘土含量は10%以上あり、比較的肥沃である。しかし、その下は砂土となっている。一般に土地利用が激しいところでは、谷底部分といえどもこの比較的肥沃な表層粘土層も失われていることが多い。表層の粘土層が失われたところはもはや農耕は続けられず、放棄され荒れ地と化している。

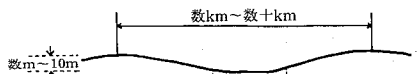
表2-13 ビダのトポシーケンスのフリンジと谷底土壌の深度別一般理化学性
(若月, 1988)

理化学性	深度 (cm)	フリンジ部分		谷底部分	
		1	2	1	2
粘土含量 (%)	0~5	6	8	20	21
	10~20	5	8	21	21
	20~30	6	9	24	10
	40~50	5	6	6	8
砂含量 (%)	0~5	87	77	73	55
	10~20	84	80	63	57
	20~30	88	78	63	81
	40~50	91	89	91	77
eCEC cmol(+)/kg	0~5	1.3	1.6	3.1	3.8
	10~20	0.9	1.3	3.5	3.8
	20~30	0.8	0.6	4.4	1.7
	40~50	0.6	0.9	0.8	0.8
交換性 Ca cmol(+)/kg	0~5	0.81	0.86	1.65	1.87
	10~20	0.37	0.64	1.11	1.50
	20~30	0.43	0.56	0.83	0.58
	40~50	0.36	0.48	0.33	0.36
交換性K cmol(+)/kg	0~5	0.10	0.07	0.11	0.11
	10~20	0.04	0.05	0.09	0.08
	20~30	0.04	0.03	0.07	0.04
	40~50	0.03	0.03	0.04	0.03
有機態C (%)	0~5	0.29	0.54	1.54	1.37
	10~20	0.11	0.41	1.17	1.00
	20~30	0.05	0.30	1.13	0.29
	40~50	0.06	0.08	0.23	0.25
全窒素N (%)	0~5	0.012	0.032	0.129	0.112
	10~20	0.011	0.027	0.087	0.087
	20~30	0.023	0.022	0.087	0.023
	40~50	0.037	0.029	0.017	0.011

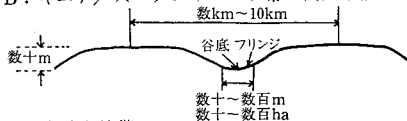
(5) 内陸小低地の形状、地質、気候と土壤肥沃度の関係

内陸小低地の形状は地質とともに降雨量に大きく影響される。図2-30に示したように内陸小低地の断面は波の波長と振幅で表すことができる。雨量の多

C: スーダンサバンナ／サヘル帯の内陸小溪谷



B: ギニア／スーダンサバンナ帯の内陸小溪谷



A: 赤道森林帯の内陸小溪谷

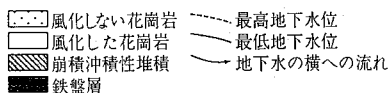
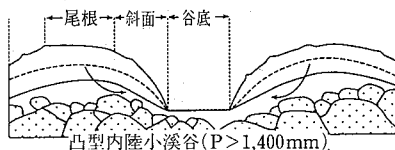
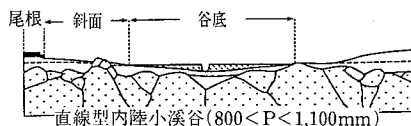
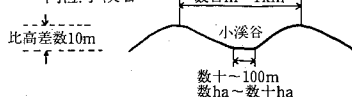


図 2-30 内陸小低地の形状と気候の関係

(右の図は Raunet, 1985 による)

い沿海の赤道森林帯では数百 m の単位 (波長) をもち、その高低差 (振幅) は数十 m である。赤道森林帯の内陸小低地の面積は、河川沿いの延長に取り方によって異なるが、ひとまとまりの面積は通常数 ha から数十 ha 程度しかない。雨量のより少ないギニアサバンナ、スーダンサバンナ帯では小低地の分布面積はアップランドに比べさらに少なくなり、波長は数 km になり、台地状の幅広い尾根部分が集水域の大部分を占める。谷の幅はやや大きくなり、数十から数百 m である。さらに乾燥地のスーダンサバンナやサヘル帯ではさらに大きくなり、内陸盆地と区別できない地形となる。

3—4 海岸低湿地帯の酸性硫酸塩土壌

熱帯アフリカにおける海岸低湿地の合計面積は表 2—4 によれば、約 1,650 万 ha と推定される。農業的な利用は限られている。しかし、エビ、カニを中心として、魚類の宝庫であり、漁業の重要性が高い。

海岸湿地は潮汐によって形成される砂丘帯、汽水性のマングローブおよび塩

性湿地帯、淡水性湿地帯に3分割される。

海岸湿地の主な土壌は汽水性湿地であるマングローブ林下の酸性硫酸塩土壌 (Thionic Fluvisol)、淡水性湿地林下のグライ土 (Gleysol)、砂丘上の砂土 (Arenosol, Regosol) である。

いまのところ、農業的な利用が行われているのはマングローブ帯の稲作である。この稲作は比重の重い潮汐が淡水を稲作地に押し上げることを利用する。このマングローブ稲の栽培は100年以上前にこの地にアジア稲が導入されたときに始まる。マングローブ帯の分布面積は西アフリカだけで約100万ha、このうち約21万haが現在稲作に利用されている (WARDA, 1989)。ギニアビサウ、ギニア、シエラレオネ等に主な栽培地がある。 (若月 利之)

3-5 粘土鉱物の特性

Kawaguchi and Kyuma (1977) は熱帯アジアの水田土壌410点の粘土鉱物組成を図2-31で示すような3種類 (7Å, 10Å, 14Å) の鉱物の相対比率を用いて10タイプに分類した。ここでは西アフリカ4カ国 (ナイジェリア、カメルーン、リベリア、シエラレオネ) から、各農業気候帯ごとに採取した87点の低地土壌試料の粘土鉱物組成を熱帯アジアと比較して図2-32に示した。三角図内の数値は百分率である。図からわかるように、熱帯アジアでは14-7型と7-14型を中心としているが、7型、7-10-14型、14型、7-10型、14-10型、10-7型など、ほとんどのタイプがみられる。一方、西アフリカでは全体の半分以上が7型、さらに残りの6割以上が7-14型であり、10Å 鉱物、

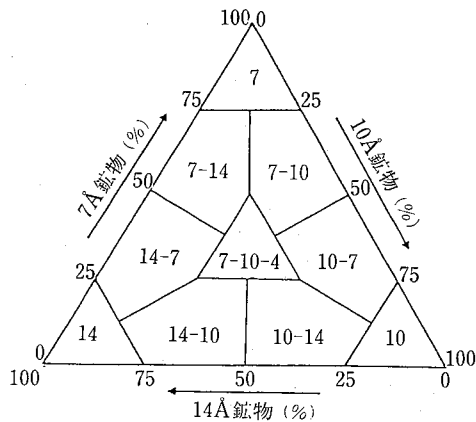


図2-31 粘土鉱物による土壌の分類
(kawaguchi and Kyuma, 1977)

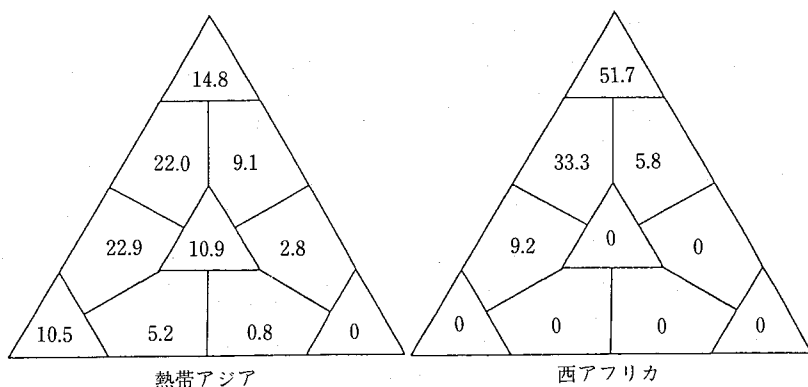


図 2-32 粘土鉱物による熱帯アジア水田土壌と西アフリカ低地土壌の比較 (Kawaguchi and Kyuma, 1977) (数値は存在パーセントを示す)

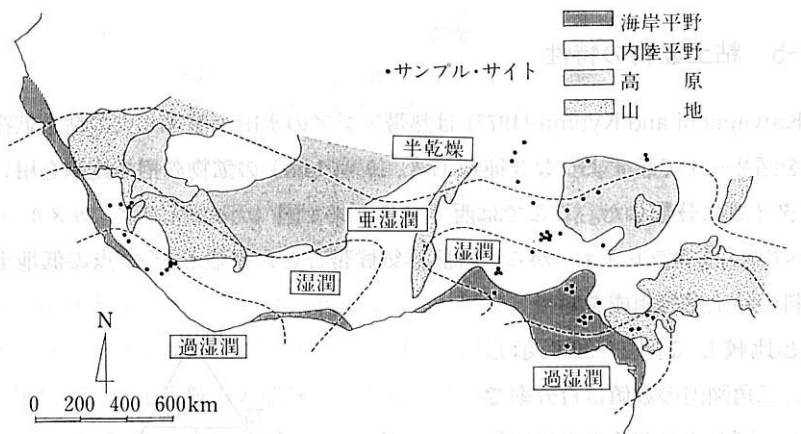


図 2-33 気候と地形による農業生態区分

14Å 鉱物を主体とする土壌はきわめてまれである。これまで述べてきたように西アフリカには養分保持能・供給能の低い、風化の進んだ、肥沃度の低い土壌が分布することを示している。

図 2-33 は気候と地形による西アフリカの農業生態区分図上に 87 点の粘土鉱物の分析地点をプロットしたものである。そして気候帯と粘土鉱物についての関係をみたのが図 2-34 である。赤道森林帯のうち明瞭な乾季のない過湿潤帯の試料は 7 型に、スーダンサバンナ帯 (半乾燥帯) の試料は 7-14 型に分布し

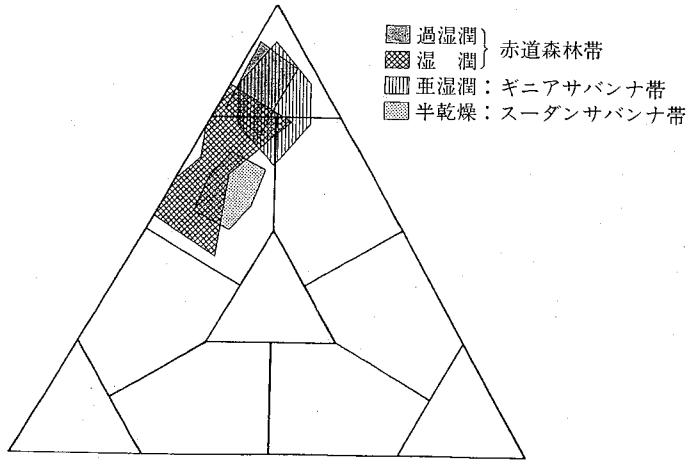


図 2-34 気候帯と土壌の粘土鉱物

ているのがわかる。しかし、その中間である赤道森林帯の湿潤帯、ギニアサバンナ帯の亜湿潤帯の試料はあまりまとまって分布しておらず、湿潤から乾燥にかけての粘土鉱物の一定の変化をみることはできない。気候以外に地質母材の影響も重複するからである。特に、すでに述べたように（表2-3, No.11の土壌）ナイジェリア東南部からカメルーンにかけては火山の影響による $14\text{\AA}$ 鉱物を含む頁岩を母材とする土壌が分布し、ここで供試した 87 試料にはこれらの試料が一部混ざっているからである。

粘土鉱物についての最終的な総括は上記の 87 点に加え、肥沃度分析の終了した、内陸小低地 185 点、氾濫原土壌 62 点の分析結果を待つ必要がある。

(小崎 隆)

4. 水文環境の特性 (北村, 1994)

4-1 水文地理

西アフリカは一つの広大な低い台地であり、アフリカ大陸の他の地域のように狭い海岸平野、狭い大陸棚、多くの台地および未発達河川で特徴づけられ

る地形とは様相を異にする。西アフリカ地域は、主に3つの地形に区分できる。すなわち、海拔1,000フィート(305 m)を超えない低地、海拔1,000フィート以上の内陸平野、高地である(図2-6参照)。

低地は海岸沿い、およびチャド低地、さらにニジェール川の内陸デルタに分布している。水稻作は主にこの地域に集中している。海岸沿いの低地は平坦な平野ではなく、どちらかといえば起伏に富んでおり、セネガル、ガンビア、コートジボアール、ナイジェリア東南部など内陸に160—240 km 広がるものを除き、一般にきわめて狭い。このうちマングローブなどの繁茂する湿地帯は一般にマングローブ沼沢地と呼ばれる。マングローブ沼沢地はセネガル、ガンビア、ギニアビサウ、ギニア、シエラレオネ、ナイジェリアなどの海岸沿いに分布し、西アフリカで100万 ha あるといわれている。このマングローブ沼沢地では、約1世紀ほど前から農民により開墾が進められ、水稻作が行われている。現在では21%に当たる21万4,000 haで水稻が作付けされているが、西アフリカ稲開発協会(WARDA)によればさらに21万 haの開田が環境を破壊することなく可能であるといわれている(WARDA 1986)。チャド湖流域とニジェール川内陸デルタの2つの主要な内陸低地は内陸排水流域を形成している。これらの流域では地形の均一性が顕著であり、雨季には広大な面積が湛水してしまう。

海岸平野から内陸のより高い平野への移行部は段差があり、河川はこの部分を急流あるいは滝の形で流下する。各平野の表面は侵食面であり、普通起伏があるが比較的開けていて単調な地形である。基盤岩の上に発達した平野は、堆積層の上に発達した新しい平野とは明らかに種類が異なり、水食だけでなく風食の影響を強く受けている。この平野には、インゼルベルグ(inselberg)という非常に急傾斜の側面をもつ孤立した丘があちこちに存在する。また、ガリ侵食もところどころでみかけられる。

西アフリカの主要な高地としては、標高1,200—1,300 mのジョス高原、アダマワ(Adamawa)高原、標高750—920 mのフータジャロン高原、ギニア高地、標高700 mのビウ(Biu)高原、標高450 mのシカソ(Sikasso)高原などがある。これらの高地は、多くの主要河川の源流を形成している。

西アフリカにおける河川の特徴の1つとして、その多くが過去に別の河川と

結合 (river captures) して流域を拡大してきた点をあげることができる (Udo, 1978)。すなわち、バンドマ (Bandama) 川, ボルタ (Volta) 川, オクパラ (Okpara) 川のようなまっすぐ海に向かって流れる河川は, 内陸部を緩やかに流れる河川と結合しながら, その源流を内陸に伸ばしてきた。この現象は, この地域の分水嶺の標高が高くないことによるもので, ニジェール (Niger) 川もその典型であろう。過去において, ニジェール川は内陸デルタ地域の内陸排水流域に流入していたが, ゴア (Goa) でロアーニジェール川とつながり海に流れるようになった。そのほかの例として, エンヨンクリーク (Enyong Creek) とイモ (Imo) 川の結合, 黒ボルタ (Black Volta) 川とボルタ川の結合, あるいはかつてチャド湖に流入していたアッパーゴンゴラ (Upper Gongola) 川とベヌエ (Benue) 川の結合などがあげられる。現在でもこの河川結合は地形形成過程の一環として進みつつあり, 地形改変等人為的な作用が加わればその過程はより加速される。チャド湖に流入するログヌ (Logone) 川とアッパーベヌエ (Upper Benue) 川の結合の可能性も否定できない。チャド湖はその水源の約 4 分の 3 をログヌ川とシャリ (Shari) 川から受けており, もしこの河川結合が起これば, その水量の大幅な減少は確実である。このように, 西アフリカの河川結合は地誌学的にみれば水資源の乏しい内陸乾燥地域からの水の収奪であり, 関係国の認識と慎重な対応が必要である。

4-2 水資源の概要

表 2-14 は, 世界の主要地域別の年平均水収支を示す (Biswas, 1978; Baumgartner, 1975; USSR National Committee for IHD, 1974; L'vovich, 1974)。この表において水収支を 3 つの見積もりの平均値でみれば, 南極を除く世界の全陸地における平均降水量は 825 mm であり, このうち 527 mm が蒸発散で消費され, 残り 298 mm が流出量となる。すなわち, 降水量の約 64% が蒸発散量, 36% が流出量となる。

これに対しアフリカ地域では, 降水量が 707 mm と少なく, しかもその 81% (572 mm) が蒸発散として失われてしまい, 流出量はわずか 19% (135 mm) にす

表2-14 世界の地域別年平均水収支

地域	水深換算 (大陸平均 (mm))											
	Baumgartner			ソ連IHD			L'vovich			3者の平均		
	P	E	R	P	E	R	P	E	R	P	E	R
アフリカ	696	582	114	740	587	153	686	547	139	707	572	135
アジア	696	420	276	740	416	324	726	433	293	721	423	298
ヨーロッパ	657	375	282	790	507	283	734	415	319	727	432	295
北アメリカ	645	403	242	756	418	338	670	383	287	690	401	289
南アメリカ	1,564	946	618	1,595	910	685	1,648	1,065	583	1,602	974	629
オーストラリア	803	534	269	791	511	280	736	510	226	776	518	258
6大陸平均	800	522	278	859	530	329	813	526	287	825	527	298
南極	169	28	141	165	0	165	?	?	?	167	14	153
7大陸平均	743	475	268	796	482	314	756	482	274	763	475	288
海洋	1,066	1,177	-111	1,269	1,399	-130	1,141	1,255	-114	1,158	1,277	-119
地域全体	973	973	0	1,130	1,130	0	1,030	1,030	0	1,044	1,044	0

注：? = 不明, P: 降水量, E: 蒸発量, R: 流出量

表2-15 アフリカ主要河川流域における水収支

河川	流域面積 (km ²)	降雨量 (mm)	流出量 (mm)	蒸発散量 (mm)	比流量 (ℓ/s/km ²)	流量 (m ³ /s)	流出率
コンゴ川	3,607,450	1,561	337	1,224	10.7	38,800	0.22
白ナイル川	1,435,000	710	16	694	0.5	793	0.02
青ナイル川	324,530	1,082	158	924	5.0	1,727	0.15
ナイル川	2,881,000	506	28	478	0.9	2,590	0.06
ニジェール川	1,091,000	1,250	202	1,048	6.4	7,000	0.16
ザンベジ川*	1,236,580	759	30	729	1.0	1,237	0.11

注：*ビクトリア滝地点

ぎない。アフリカの面積当たり流出量は南米大陸の約5分の1, その他の地域の2分の1である。さらにこの流出量の中で直接流出量の占める割合は65% (88 mm) であり, 地下水流出量は35% (47 mm) ときわめて少ない。したがって, アフリカ地域は他の地域に比べてかなり過酷な水利環境にあるといえよう。

表2-15は, アフリカの主要河川流域における水収支を示す (Balek, 1983)。この中でザイル川流域が最も高い流出係数 (0.22) と比流量 (10.7 ℓ/s/km²) を示しているが, これは流域内に乾燥気候の影響が全くないためである。一

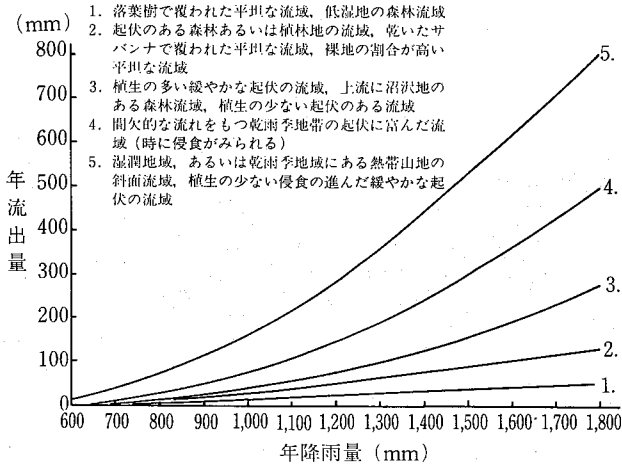


図2-35 アフリカ河川の生態系別降雨-流出関係

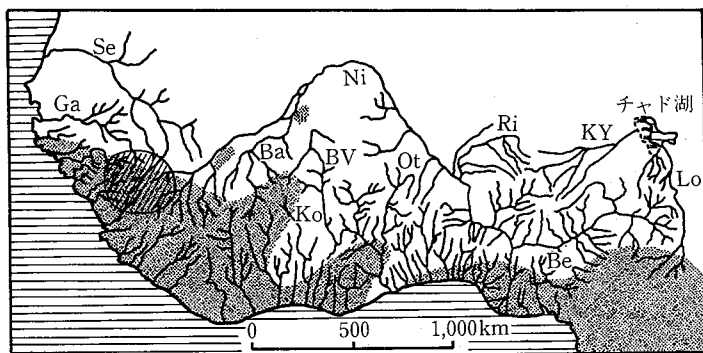
方、砂漠の影響を受けるナイル川やザンベジ川流域では、流出係数が0.06, 0.11, 比流量が 0.9 l/s/km^2 および 1.0 l/s/km^2 と低い値を示している。特に前者は、白ナイル流域に存在する広大なサッド (Sudd) 湿原での蒸発散・浸透損失による影響が大きい。ニジェール川もサハラ砂漠の南縁を部分的に流れるが、上流域の流出量が多いことと、下流域で水量豊富なベヌエ川が合流するため、比較的高い流出係数 (0.16) と比流量 (6.4 l/s/km^2) を示している。また図2-35は、アフリカの河川の降雨-流出の関係を生態系別に整理したものである (Balek, 1977)。

4-3 流出特性

西アフリカの河川は図2-36 (Ledger, 1969) に示すように、西アフリカ最大のニジェール川水系とセネガル川、ボルタ川など大西洋、ギニア湾に直接流出する大小数多くの河川群の2つの系統に大きく分けることができる。

(1) ニジェール川流域

ニジェール川は大西洋から250 km離れた標高800 mのギニアの山岳地帯



(凡例)

Ni : ニジェール川

Be : ベヌエ川

Ba : バニ川

Ri : リマ川

Se : セネガル川

Ga : ガンビア川

Ko : コモエ川

BV : 黒ボルタ川

Ot : オティ川

KY : コマドグヨベ川

Lo : ロゴヌ川

点を施している部分は、支川など
小河川流域の地下水流出が乾季を
通して起こる地域を示す。

 フータジャロン源流域

図 2-36 西アフリカの河川 (Ledger, 1969)

(フータジャロン) に源を発し、マリ、ニジェールを経てナイジェリアでギニア湾に注ぐ国際河川である。流路延長は 4,160 km, 流域面積は 109 万 1,000 km², 流出量は平均 2,200 億 m³/y (7,000 m³/s) である (Balek, 1983)。その特徴は、1 万分の 1 というきわめて緩やかな河川勾配と、内陸デルタ地域に 250 万 ha という広大な氾濫原を有することにある。すなわち、この両者の影響により下流域における流水の到達時間は大幅に遅れ、流出形態は非常に複雑なものとなっている。

ニジェール川の流況を上流域から下流域に向かってみていけば、次のように整理できよう。

①上流域～内陸デルタ地域：雨季に源流の山岳地帯を流下してきた洪水は、クーリコロ(Koulikoro)では 6 月～11 月に集中する(図 II 2-37) (Ledger, 1969; Balek, 1983)。9 月に最高となるが、ピーク流量は 8,000～10,000 m³/s に達することもある。セグー(Segou) から下流のトンプクツーまでは内陸デルタ地域

で、河川の通水能力も低いことから、河川水は氾濫原に溢れ出て貯留される。源流からの流下流量の減少とともに、氾濫原の貯留水が本流に還流し始めるため、トンプクツーでは流出のピークは12月～1月に現れる(図2-37)。この結果、トンプクツーでは9月に乾季が始まるが、その後4ヵ月間も河川流量は上昇し続け、渇水期は3～4ヵ月で

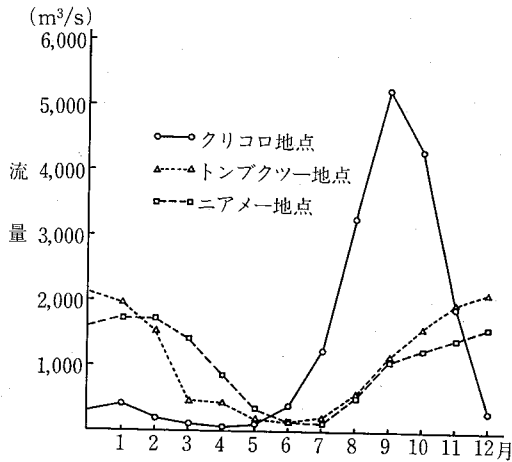


図2-37 ニジェール川上・中流域の流況
(Ledger, 1969; Balek, 1983)

終わってしまう。トンプクツーにおける全流出量の85%は乾季に流出することになり、乾季の貴重な水資源となる。この広大な氾濫原の貯留機能のメリットは大きいが、この間蒸発と浸透により莫大な水損失が生じていることも忘れてはならない。この内陸デルタ地域における損失水量は50%にもものぼるといわれている (Ledger, 1969)。

②中、下流域：トンプクツーからニアメー (Niamey) の区間では、涸川のみが合流する。このため、ニアメーの流況はピーク流量がさらに約1ヵ月遅く出現するほかは、トンプクツーのそれとほとんど変わらない(図2-37) (Ledger, 1969)。ニアメーからバーロ (Baro) の区間では、アリボリ (Alibori) 川のような支流が次々と流入し始める。これらの支流の出水期は6月～10月であるため、ニジェール川本川の流量ピークの時期もこれとほぼ一致するようになる(図2-38)。乾季における流出量がかなり高くなっているのは、この地方でブラックフラッド (Black Flood) として知られる上流域からの洪水が到達するためである(図2-38のハッチ部) (Ledger, 1969)。なお、ブラックフラッドに対して、ニアメーの下流域から流入するものはホワイトフラッドと呼ばれている (日本農業土木総合研究所, 1985)。この区間には巨大なカインジ (Kainji) ダム湖

があり、調整が行われているため、ダム下流域では流況が大きく変化している。その後、ベヌエ川が合流し、広大な三角州を形成してギニア湾へ至る。ベヌエ川合流点と三角州の間にあるオニチャ (Onitsha) における流況は図2-38に示す。

(2) セネガル川流域

セネガル川は、ギニアの比較的降雨量の多い標高 850 m 程度のフータジャロン高原から発するバフィン (Bafing) 川を源流としている。バフィン川は弧を描いて北流し、マリ東部でバコエ (Bakoye) 川と合流し、セネガル川となる。合流点付近から流れは緩やかとなり、セネガル・モーリタニア国境沿いを流れる下流域は平均河床勾配が 1 km につき数 cm ときわめて小さく、広大な氾濫原が形成されている。下流域では海水の逆流が顕著である。平水期に約 500 km もの海水溯上が認められ、河口から約 250 km にわたり季節的な汽水湿地が形成される。

セネガル川は、流路延長 1,630 km, 流域面積 44 万 1,000 km², 年間総流出量 232 億 m³ である。流出量は流域面積に比して少なく、比流量は 1.7 l/s/km² にすぎない。これは流域北部の降雨量が少なく、かつ年平均流出率も約 10% と低いためである。また、流出量の季節的変動も大きく、流量の最小月 (5 月) と最大月 (9 月) の比率は 1:310 ときわめて大きい。表 2-16 にバケル (Bakel) 地点の月別流量分布を示す (Ledger, 1969)。

(3) その他の水系

ニジェール川およびセネガル川を除く西アフリカの河川のほとんどは、海岸線に対しほぼ直角に流下し大西洋、ギニア湾に直接流出する。これらの流域は赤道森林、ギニア、スーダンの 3 つの気候帯にまたがり、雨季には比較的降雨

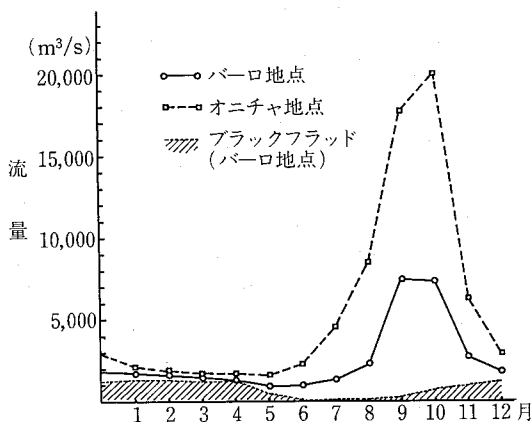


図 2-38 ニジェール川下流域の流況 (Ledger, 1969)

表2-16 セネガル川（バケル地点）月別流量分布 [流域面積：23万2,700km²]

月	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	年 平均	乾季流出量 の割合
流出量 (m ³ /s)	129	77	46	22	11	122	569	2,351	3,429	1,710	560	230	774	30%
比 率 (%)	1.4	0.8	0.5	0.2	0.1	1.3	6.1	25.4	37.0	18.5	6.1	2.5		

が多く流出量も多いが、乾季には降雨がなくなり流出量が大幅に減少する場合が多い。乾季における河川の流出は地下水流出にかかっているため、流域の大きさと地下水貯留能力、さらには雨季における降雨量の多寡によって決まる。

①小河川流域：本川に合流する前の支川など小河川流域においては、雨季が終了し乾季の始まりとともに流出は急激に減少してしまう。この理由は、この地域に分布する土壤の浸入能が低く、かつ乾季の蒸発損失が大きいからである。図2-36に支川などの小河川流域の地下水流出が乾季を通して起こる地域を示す (Ledger, 1969)。これによれば、シエラレオネ、ギニアの大部分、リベリア、コートジボアールの南部と西部、ガーナの南西部、ナイジェリアの南半分、カメルーンの中部および南部が含まれる。しかしながら、コートジボアールの中部、東部、ガーナの南東部、トーゴの南部、ベニンの南部などは、雨季が長いにもかかわらず、地下水涵養をするだけの十分な余剰水がないため、乾季の流出は起こらない。

②大河川流域：西アフリカ南部地域における大河川の乾季の流況は、それに流入する小河川の流量の挙動に非常によく似ている。しかしながら、大河川では小河川と異なり雨季の高水流出から乾季の低水流出への移行にかなりの時間遅れを生ずるため、低水流出の期間は小河川に比べ遅く始まり短く終わる。表2-17に西アフリカ南部地域の大河川の流況を示す (Ledger, 1969)。これらの河川では、乾季の流出量の年間流出量に占める割合は約15—20%である。黒ボルタ川などは比較的大きな氾濫原を有し、高水期間を1—2ヵ月長くし、ピーク流量の通過をほぼ同じ期間遅らせ、基底流量をかなり増加させる機能をもつ。黒ボルタ川では全流出量の50%は乾季に流出している。

図2-39は乾季に入って4ヵ月目(a)、6ヵ月目(b)、8ヵ月目(c)における西アフリカの河川の流況を示す (Ledger, 1969)。この図から、西アフリカに

表2-17 西アフリカ南部地

河川	観測点	流域面積 (km ²)	乾季の 最初の 月				
				1	2	3	4
黒ボルタ川	ユウリ	20,000	10月	23	12.9	9.6	8.9
黒ボルタ川	ボロモ	58,000	10月	40	24	13.2	10.1
バニ川	ドウナ	101,600	9月	177	105	69	43
バニ川	ソファアラ	129,400	9月	405	177	100	59
ニジェール川	モプティ	281,600	9月	1,031	416	190	109
ニジェール川	ディーレ	330,000	9月	2,057	1,556	979	450
ニジェール川	ニアメー	不明	9月	1,736	1,725	1,419	868
ニジェール川	バーロ	不明	11月	1,710	1,600	1,485	1,280
ニジェール川	オニチャ	不明	11月	2,140	1,850	1,715	1,650
ロゴヌ川	ライ	60,320	10月	120	87	65	63
ロゴヌ川	ボンゴル	73,700	10月	145	88	62	55
ロゴヌ川	ロゴヌビルニ	76,000	10月	217	127	85	69

において、ニジェール川が他の河川に比べいかに重要な位置を占めているかがわかる。(北村 義信)

5. 水利環境の特性 (北村, 1994)

5-1 国際水利協定

アフリカ大陸には 56 の国際河川がある。このうち流域が 4 カ国以上にまたがるものは 12 河川ある (Widstrand, 1980)。大陸全体の約 40% は国際河川流域である。特に西アフリカには、国際河川が多い。

アフリカの国際河川の初期の協定は航行と境界に関するものであったが、最近の協定は一般に経済開発が中心となっている。アフリカ大陸においては、河川流出量が他の大陸に比べ少ないこともあって、国際河川の水資源の配分の問題に対しては関係各国ともきわめて神経質になっている。協定を結ぶうえで関係国が最初に出くわす障害は、流量データの不足という問題である。そのため協定に先立って、水文気象データの収集・交換が重要な意味をもつ。表 2-18

域の大河川の流況 (Ledger, 1969)

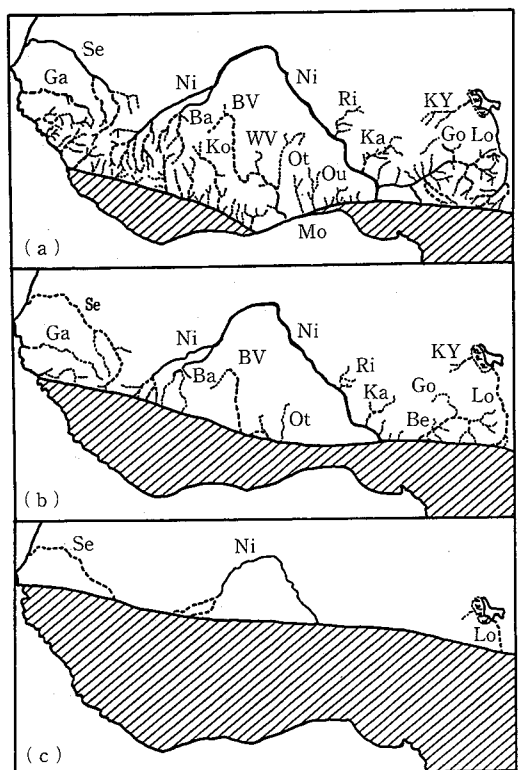
月別平均流量 (m ³ /s)								年平均 流量 (m ³ /s)	年間流出量 に占める乾 季流出量の 割合 (%)
5	6	7	8	9	10	11	12		
9.4	11.8	18.3	47	90	125	122	63	45	50
11.4	19.7	34	79	113	93	75	64	48	51
31	45	187	1,250	2,535	2,546	1,261	433	726	55
38	50	174	828	1,326	1,538	1,405	938	586	62
82	170	689	1,774	2,585	2,814	2,687	2,027	1,219	65
152	87	282	866	1,498	1,899	2,161	2,299	1,189	85
347	130	124	516	1,067	1,254	1,412	1,588	1,011	90
900	1,000	1,280	2,285	7,420	7,300	2,710	1,800	2,525	35
1,600	2,280	4,550	8,425	17,720	20,000	6,300	2,860	7,000	22
91	164	487	1,102	1,992	1,647	566	197	551	42
79	155	443	1,036	1,713	1,750	741	263	547	49
99	178	383	604	756	868	878	552	403	58

はアフリカの主な国際河川流域に関する情報を整理したものである (Balek, 1977)。

アフリカの河川に関する国際協定は1885年までさかのぼり、コンゴ(ザイール)川とニジェール川の船舶航行に関して、ベルリン委員会で声明を発表したことに始まる。

ナイル川の管理に関する協定は英国とエジプトの間で1929年に調印された。流域開発の技術協力に関する同様の協定は、スーダンとエジプトの間で1959年に調印されている。セネガル川流域開発計画は流域4カ国により1969年に公表され、設立された委員会は全流域の総合的開発方針を検討している。ニジェール川流域においては、まず1963年に協定が交わされたが、翌1964年の協定では前年の協定が廃止され、複合的水利用について宣言されている。チャド流域委員会は1964年の特別協定により設立された。

国際水利協定は、関係国の利益の相互理解に基づいて取り交わされるものである。このため、国際水利協定は水資源のより一層の開発を促進するとともに、そのための調査や事業のための資金確保あるいは水文情報の交換などの活動を積極化する。国際水利協定が調印された国際河川における計画は、多くの



(凡例)

河川流量：

— 1,000 m^3/s 以上
 — 100 m^3/s 以上
 - - - 10 m^3/s 以上
 1 m^3/s 以上

0 500 1,000km

 雨季の状態
にある地域

河川名：

Ni：ニジェール川 Se：セネガル川 Ga：ガンビア川
 Be：ベヌエ川 BV：黒ボルタ川 WV：白ボルタ川
 Ba：バニ川 Ri：リマ川 Ka：カドゥナ川
 Ko：コモエ川 Ot：オーティ川 Mo：モノ川
 Ou：ウェメー川 Go：ゴンゴラ川 Lo：ロゴヌ川
 KY：コマドグヨベ川

図2-39 乾季に入ってから (a) 4 カ月目. (b) 6 カ月目. (c) 8 カ月目における西
アフリカの河川の状態 (Ledger, 1969)

表2-18 アフリカの主な国際河川 (Balek, 1977)

河川(水系)名	関係国	流域面積 (km ²)
1 セネガル川	ギニア, マリ, モーリタニア, セネガル	441,000
2 ガンビア川	ガンビア, ギニア, セネガル	77,000
3 ケバ (別名カヤンガ)	ギニア, ギニアビサウ, セネガル	8,000
4 クルバル川	ギニアビサウ, ギニア	20,000
5 コレンテ(タスカーシズ)	ギニア, シエラレオネ	8,000
6 小スカーシズ	ギニア, シエラレオネ	15,300
7 モア川	ギニア, リベリア, シエラレオネ	17,900
8 マノ	リベリア, シエラレオネ	9,000
9 ローファ川	ギニア, リベリア	8,700
10 セントポール川	ギニア, リベリア	18,300
11 セントジョン川	ギニア, リベリア	15,000
12 セス川	コートジボアール, リベリア	10,300
13 カバリ川	ギニア, コートジボアール, リベリア	22,400
14 ビア川	ガーナ, コートジボアール	9,320
15 タノ川	コートジボアール, ガーナ	15,000
16 ボルタ川	コートジボアール, ガーナ, マリ, ブルキナファソ, ベニン	390,000
17 モノ川	ベニン, トーゴ	22,000
18 ウエメ川	ベニン, ナイジェリア	50,000
19 ニジェール川	カメルーン, チャド, ベニン, ギニア, コートジボアール, マリ, ニジェール, ナイジェリア, ブルキナファソ	1,100,000
20 クロス川	カメルーン, ナイジェリア	48,000
21 チャド湖	カメルーン, チャド, 中央アフリカ, ニジェール, ナイジェリア	不明
22 ステム川	カメルーン, ガボン, 赤道ギニア	31,000
23 ベニト川	ガボン, 赤道ギニア	14,000
24 ウタムボリ (リオテムボニ) 川	ガボン, 赤道ギニア	5,000
25 オゴウェ川	カメルーン, コンゴ, ガボン	205,000
26 ニヤンガ川	コンゴ, ガボン	18,000
27 チロアング川	カビンダ, コンゴ	13,000
28 コンゴ川	アンゴラ, ブルンジ, カメルーン, 中央アフリカ, コンゴ, ザイール, ザンビア, タンザニア, ルワンダ	3,820,000
29 クネネ川	アンゴラ, ナミビア	100,000
30 チュベライ・エトシャ川	アンゴラ, ナミビア	不明
31 オカバンゴ川	アンゴラ, ボツワナ, ナミビア	不明
32 オレンジ川	ボツワナ, 南アフリカ, レソト, ナミビア	640,000
33 マプト川	モザンビーク, 南アフリカ, スワジランド	35,000
34 イムブルジ川	モザンビーク, 南アフリカ, スワジランド	6,400
35 インコマティ川	モザンビーク, 南アフリカ, スワジランド	30,000
36 リンボポ川	ボツワナ, モザンビーク, ジンバブエ, 南アフリカ	358,000
37 サベ川	モザンビーク, ジンバブエ	101,000
38 ブジ川	モザンビーク, ジンバブエ	32,000
39 ザンベジ川	アンゴラ, ボツワナ, マラウイ, モザンビーク, ジンバブエ, ザンビア	1,250,000
40 ルブマ川	モザンビーク, タンザニア	140,000
41 ナトロン湖	ケニア, タンザニア	不明
42 ラガボル川	エチオピア, ケニア, ソマリア	不明
43 ルドルフ湖	エチオピア, ケニア, スーダン	不明
44 ジューバ川	エチオピア, ケニア, ソマリア	200,000
45 シュベリ川	エチオピア, ソマリア	260,000
46 ガッシユ川	エチオピア, スーダン	21,000
47 バラカ川	エチオピア, スーダン	不明
48 ナイル川	ザイール, エチオピア, ケニア, スーダン, タンザニア, エジプト, ウガンダ, ルワンダ, ブルンジ	2,800,000

場合準備期および初期の段階で国連機関の協力のもとに推進される。

5-2 主要河川の水利協定

(1) ニジェール川

ニジェール川は西アフリカの内陸乾燥地域にとって貴重な水の供給源である。流域内に約1億人もの人口を擁し、しかもその流域は9カ国にまたがるため、関係国の間で調和のとれた水源開発が重要である。このため、まず1963年10月に関係9カ国*により、ニジェール川の内陸航行と流域内での経済協力に関する国際法(通称ニアメー法)が制定された。翌1964年には、ニジェール川委員会(NRC: Niger River Commission)の設置に関する協定が結ばれている。また、1980年11月にNRCはニジェール川流域機構(NBA: Niger Basin Authority)へ改組された。

NBAの基本的なねらいは、ニジェール川流域の開発に関する調査と計画を促進し、かつ調整することである。最近の基本活動は、①関係国の開発計画および政策の調整、②河川流域計画の作成、③共通利益のあがる計画の推進、形成、実施、④Hydroniger計画の実施等に集中している。Hydroniger計画は、65の観測点からなる衛星通信システムを通じたデータ収集・加工の推進である。しかしながら、資金不足の問題や、メンバー国があまりに多く実際に効果のあがる目標を明確に特定せず、漠然とした目標を設定する場合が多かったことなどの理由により、これらの活動は必ずしもうまく進展していないのが実状である。現在、ドナー機関等からNBAの目的、構造、制度、プログラム等の見直しが求められている(World Bank, 1994)。

* 関係9カ国: ギニア、マリ、ニジェール、ナイジェリア、コートジボワール、ブルキナファソ、ベニン、カメルーン、チャド。

(2) セネガル川

セネガル川はギニア、マリ、モーリタニア、セネガルを流れる国際河川であ

る。特に国土の大部分が降雨の不十分な気候条件下にある後者3カ国にとって、河川沿いは貴重な農業生産地帯となっており、古くから水利開発が行われていた。セネガル川流域の総合開発計画は、1968年の「セネガル川沿岸諸国機構(OERS)」の設立に始まり、1972年の「セネガル川開発機構(OMVS: Organization Pour la Mise en Valeur du Fleuve Senegal)」設立により、計画推進の基盤を確立した(Framji *et al.*, 1983)。加盟国はマリ、モーリタニア、セネガルの3カ国である。

OMVSは、アフリカにあるいくつかの流域機構の中でも、「一つの流域共同体」としての関係国の認識が、おそらく最も強い機構であろうといわれている(World Bank, 1994)。特に2つの多目的大ダム計画、すなわちマナントリ(Manantali)ダムとディアマ(Diama)ダムを首尾よく実施し、完了させたことは、きわめて画期的なことである。前者は支流のパフィン川のマナントリに総貯水量111億 m^3 のコンクリートダムを建設し、発電、灌漑、洪水調節を行うものである。後者はサン・ルイの上流30kmのディアマ三角州に総貯水量10億 m^3 のフィルダムを建設し、灌漑と海水潮上の遮断を図るものである。この両計画の運動により、最終的には30万3,500haの灌漑が可能であるとされている。両計画のドナー機関・国は、欧州開発基金、アフリカ開発銀行、イスラム開発銀行、フランス、米国等である。しかしながら、この計画はダムの完成にもかかわらず関係国の灌漑開発が大幅に遅れるという問題に直面しており、ダムのもつ本来の便益が達成されていない。OMVSは現在その活動を建設から維持管理へと転換しつつある。

5-3 水利・灌漑開発の概要

アフリカ農業を改良していくうえで重要な因子として、灌漑の導入があげられる。これは新しい農業技術、および新しい組織形態の導入や、農民の再定住化とともに、今後ますます重要度を増していくものと考えられる。アフリカの多くの地域で直面している大きな問題の一つに降雨の不足と不安定性がある。この問題を解決する最も効果的な方法は河川水の利用である。しかしながら、

この方法は一般にコスト的に高くつき、投資効果の点からつねに成功するわけでもない。いうまでもなく、エジプトでは灌漑は数世紀にわたり活発に行われてきた。近年、それは上流のスーダンまで拡大している。特にゲジラ (Gezira) 地区は比較的うまくいった例といえよう。しかし、ニジェール川の内陸デルタにおける灌漑計画は1932年に始められ、戦後も引き続き進められたが、期待はずれの結果をもたらしている (O'Conner, 1981)。

アフリカにおいては、耕地面積は1億8,490万haであり (FAO, 1987)、全土地面積のわずか6%にすぎない。しかも天水農業がそのほとんどを占める。灌漑耕地面積は表2-19に示すように、1975年以来年率平均約2.6%ずつ増加しているものの、1985年で1,060万haであり、灌漑耕地率はわずか5.7%である (FAO, 1987)。このうち、約3分の2が近代的灌漑施設の整ったもので、残り3分の1は河川の氾濫原や沼沢地を利用した小規模な伝統的利水形態によるものである。この灌漑耕地1,060万haのうち、約61%が4ヵ国に集中している点は注目に値する。すなわち、この4ヵ国とはエジプト (23%)、スーダン (17%)、モロッコ (11%)、南アフリカ (10%) である (FAO, 1986)。

西アフリカ各国の水利開発の歴史は新しいが、水資源に恵まれており開発のポテンシャルは比較的高いと思われる。しかしながら、過去に行われた開発では、発電が主で灌漑は従であった。例えば、ボルタ川総合開発計画はアコソンボ (Akosombo) ダムの建設によりボルタ湖 (貯水量: 1,480億 m^3) を出現させたが、水力発電 (年54億kwh) が主で灌漑は従となっている。したがって、アクラ平野6万haの灌漑計画もボルタ湖からの直接取水による重力灌漑ではなく、アコソンボダムの放水を揚水灌漑する方向で計画されている。リベリアとシエラレオネ両国で計画されているマノ (Mano) 川総合開発計画は、ECの援助により1975年にスタートしているが、発電が主で灌漑は従となっている。コートジボアールでも、水資源の開発は発電を中心に進められてきている。

この地域における農地は天水に依存したものがほとんどであり、近代的な灌漑農地の占める割合はごくわずかである。灌漑形態としてはマングローブ沼沢地、デルタ地帯での潮汐灌漑、河川氾濫原での制御湛水灌漑、さらに窪地などでの残留氾濫水利用農法などがあげられよう。1985年の統計 (FAO, 1987) によ

表2-19 アフリカ各国の灌漑面積の推移 (FAO, 1987)

国名	灌漑耕地面積 (千ha)					灌漑耕地率 (%)			
	1970	1975	1980	1985		1970	1975	1980	1985
				面積	%				
アフリカ	7,620	8,169	9,340	10,626	100.0	4.5	4.6	5.2	5.7
(北アフリカ)	843	994	1,144	1,310	12.3	4.1	4.5	5.2	5.7
(ナイル川沿岸)	4,593	4,390	4,047	4,186	39.4	31.6	29.3	27.2	28.0
エジプト	2,843	2,825	2,447	2,486		100.0	100.0	100.0	100.0
スーダン	1,750	1,565	1,600	1,700		15.0	12.9	12.9	13.6
(西アフリカ)	404	696	1,433	2,064	19.4	0.7	1.2	2.3	3.3
ベニン	10	15	19	23		0.6	0.8	1.1	1.3
ブルキナファソ		6	7	8		0.0	0.2	0.3	0.3
チャド	7	7	7	7		0.2	0.2	0.2	0.2
コートジボアール	20	38	58	64		0.7	1.1	1.5	1.6
ガンビア	20	25	32	33		15.4	16.4	20.5	20.0
ガーナ	8	15	8	7		0.3	0.6	0.3	0.2
ギニア	50	64	68	70		3.2	4.1	4.3	4.4
リベリア	2	2	4	5		0.5	0.5	1.1	1.3
マリ	135	170	260	350		7.7	9.2	12.7	16.9
モーリタニア	4	7	8	8		1.4	3.6	4.1	4.1
ニジェール	4	6	12	14		0.1	0.3	0.3	0.4
ナイジェリア	22	160	760	1,280		0.1	0.5	2.5	4.1
セネガル	110	160	170	175		2.3	3.2	3.3	3.3
シエラレオネ	6	13	15	16		0.4	0.8	0.8	0.9
トーゴ	4	6	3	2		0.3	0.4	0.2	0.1
(東アフリカ)	277	338	428	490	4.6	1.0	1.1	1.4	1.6
ケニア	29	40	40	40		1.4	1.8	1.8	1.7
タンザニア	38	52	120	140		0.8	1.0	2.3	2.7
(マダガスカル等)	351	512	841	1,042	9.8	13.9	17.5	26.6	32.5
マダガスカル	330	490	820	1,020		13.9	17.8	27.3	33.6
(中央アフリカ)	8	10	20	21	0.2	0.1	0.1	0.1	0.1
(南アフリカ)	1,144	1,229	1,427	1,513	14.3	3.6	3.8	4.4	4.6

れば、この地域の国々の灌漑耕地率は、ガンビアの20%を除き、0.1—1.6%ときわめて低い。したがって、水資源に恵まれたこれらの地域においては、灌漑のための水利開発が強く推進されるべきであろう。しかしながら、費用便益あるいは管理・運営面等から大規模な灌漑計画よりも、比較的小規模なものを

今後重点的に推進していくことが望ましい。

図2-40に、アフリカにおける大規模水利開発を示す (UNEP, 1981)。

5-4 水田開発の概要

水田のみについてみれば、表2-20に示すように全稲作面積は約500万haであり、全耕地面積の2.7%に当たる。このうち灌漑水田は150万haであり、その灌漑率は30%となる (Dat, 1986)。すなわち、全灌漑耕地の14%強が灌漑水田ということになる。ただしアフリカの灌漑水田の大部分(約100万ha)はエ

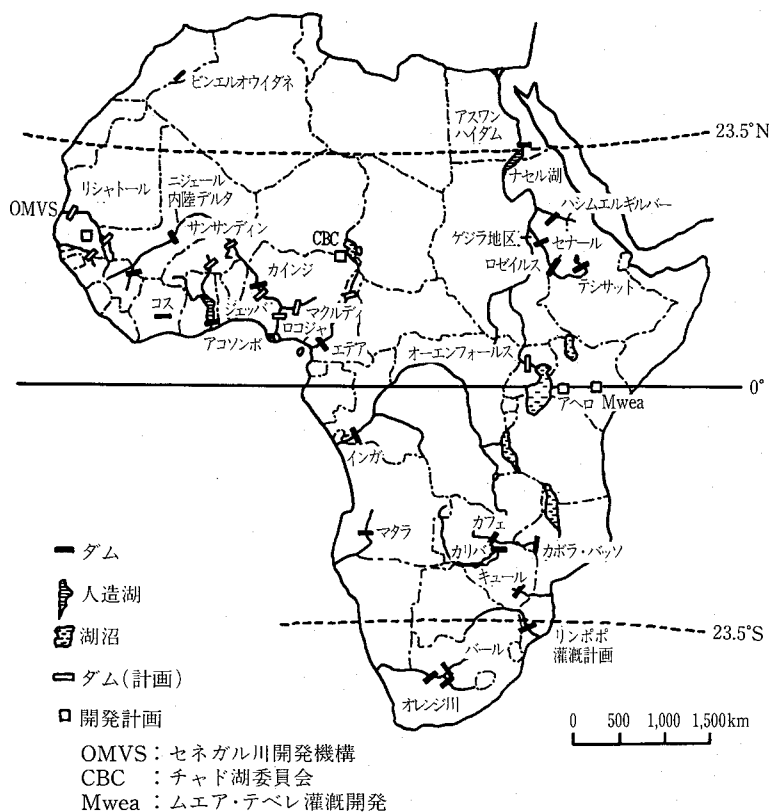


図2-40 アフリカの大規模水利開発 (UNEP, 1981)

ジプト、マダガスカル等であり、西アフリカの灌漑水田面積は小さい。また、表2-21は灌漑の水稲生産に及ぼす効果を示したものである(Dat, 1986)。これによれば、わずか30%の灌漑水田でアフリカの全生産量の58%を生産していることがわかる。収量は非灌漑水田では1.0 t/ha そこそこであるのに対し、灌漑水田では3.3 t/haと3倍以上多くなっている。水稲二期作については、その面積と生産量について正確な情報はないが、灌漑水田の大半で行われていると推定される。また二期作が行われていない灌漑水田では、トウモロコシ、トマト、食用マメ類などを水稲の裏作とする二毛作が営まれているものと思われる。

アフリカにおいて、米の重要度はここ10-20年間で急激に高まっている。アフリカの米の輸入量は1974年から1984年の間に4倍に増加しているのに対し、生産量はこの間わずか8%しか増加していない。これはアフリカの稲作は主に天水依存の状況下で行われていることと、消費者の嗜好が在来型の食物から米に移り、その消費量が着実に増加しているためである。米不足の発生により、アフリカ各国は水稲二期作あるいは三期作を可能ならしめる灌漑施設の整備にかなりの精力を集中している。しかしながら、この灌漑面積を拡大しようとする努力は、まだ生産量の増大という面ではさほど効果が出ていない。この理由は、灌漑稲作は多くの農民にとってまだ経験が浅く、水稲二期作は技術的・社会経済的・経営的な多くの問題に直面しているためである。

アフリカの水田開発には、次の3つの型があるといわれている(Budeenhagen and Persley, 1978; 矢野, 1986)。

(a)大規模灌漑計画：生産力の高い土地に農家を移住させて開発する形態のもので、スーダンのゲジラ計画にその範をとっている。マリのニジェール川沿岸、セネガル川沿岸の諸計画などがあげられる。

(b)天水田の稲作開発計画：西アフリカ諸国では、1950-1960年代に農民のために大規模な農業機械による請負耕起サービスを導入して、天水田を相次いで開発している。シエラレオネのボリ計画、ナイジェリア北部開発計画、ギニアのファラナ計画などがこれに該当する。

(c)小規模灌漑計画：地区面積10-20 ha程度の小規模な稲作灌漑計画で、

表2-20 アフリカの水田面積と収量 (1984) (Dat, 1986)

国名	面積 (ha)			生産量 ¹⁾ (t)	収量 ²⁾ (kg/ha)
	全水田面積 ¹⁾	うち灌漑水田面積 ²⁾	灌漑率%		
アルジェリア	600	600	100	2,000	3,333
アンゴラ	22,000	-	-	20,000	1,100
ベニン	6,000	2,400	40	8,000	1,204
ブルキナファソ	30,000	6,000	20	40,000	1,333
ブルンディ	2,000	2,000	100	9,000	4,476
カメルーン	23,000	5,300	23	40,000	1,739
中央アフリカ	15,000	-	-	13,000	880
チャド	51,000	3,300	6	29,000	569
コモロ	13,000	-	-	15,000	1,169
コンゴ	4,000	-	-	2,000	500
エジプト	420,000	420,000	100	2,230,000	5,310
ガボン	550	-	-	1,000	1,800
ガンビア	20,000	2,700	14	22,000	1,100
ガーナ	57,000	2,000	4	66,000	1,157
ギニア	400,000	9,100	2	400,000	1,000
ギニアビサウ	145,000	4,200	3	105,000	724
コートジボアール	400,000	30,000	8	490,000	1,225
ケニア	9,000	8,000	89	31,000	3,489
リベリア	210,000	4,000	2	230,000	1,095
マダガスカル	1,200,000	460,000	38	2,132,000	1,777
マラウイ	42,000	2,675	6	33,000	786
マリ	130,000	38,100	29	125,000	962
モーリタニア	5,000	2,700	54	14,000	2,800
モーリシャス	-	-	-	-	-
モロッコ	2,000	2,000	100	10,000	5,000
モザンビーク	70,000	16,000	23	55,000	786
ニジェール	23,000	4,700	20	51,000	2,217
ナイジェリア	600,000	265,000	44	1,100,000	1,833
ルワンダ	3,000	3,000	100	6,000	2,000
セネガル	66,000	10,900	17	136,000	2,055
シエラレオネ	400,000	100,000	25	450,000	1,125
ソマリア	1,000	1,000	100	3,000	3,000
南アフリカ	1,000	1,000	100	3,000	3,000
スーダン	4,000	4,000	100	7,000	1,750
スワジランド	-	-	-	3,000	-
タンザニア	270,000	75,600	28	400,000	1,481
トーゴ	13,000	1,500	12	10,000	790
ウガンダ	20,000	-	-	25,000	1,250
ザイール	325,000	7,000	2	260,000	800
ザンビア	8,000	-	-	5,000	585
ジンバブエ	1,000	-	-	500	500
計	5,008,000	1,494,775	30	8,582,000	1,713

資料: 1) FAO, 1984

2) 推定

表2-21 灌漑が³アフリカの水稻生産に及ぼす効果 (Dat, 1986)

地 域	総生産量 (千t)	灌漑 生産量 (千t)	総生産量 に占める 割合(%)
地中海沿岸および北アフリカ	2,406	2,406	100
スーダン気候-サヘル気候 ^{a)}	425	276	65
湿潤・半湿潤西アフリカ ^{b)}	2,749	263	10
湿潤中央アフリカ ^{c)}	320	35	11
半湿潤・高原部 東アフリカ ^{d)}	2,127	1,787	84
半湿潤・半乾燥 南アフリカ ^{e)}	538	159	30
計	8,565	4,926	58

資料：FAO, 1986

注：a) カーボベルデ、チャドを除く。

b) ギニアビサウを除く。

c) 赤道ギニア、サントメ・プリンシペを除く。

d) コモロ、セイシエルを除く。

e) ナミビアを除く。

多くの国で成功している。特に、コートジボアールでは顕著な成功を収めている。これは中国人専門家が農家と密接に接触しながら創案したもので、灌漑稲作を強化し、集約したものである。大規模灌漑計画では多くの場合、圃場レベルでの高収量を得るための諸問題を軽く取り扱う傾向がある。その結果、計画した収量を確保するためにより多くの費用と時間をかけてしまうこととなる。小規模灌漑計画は、このような大規模灌漑計画の欠点をかなり是正している。

ニジェール川沿岸における稲作は、従来の高水を利用した伝統的浮稲農法が基本であり、沿岸の高水敷において行われてきた。また、近代的灌漑施設が整った耕地は、本川沿岸の高水敷、あるいは支流におけるダムプロジェクトの下流においてのみ存在する。整備された灌漑施設をもつ地域では、普通政府により管理されている。

5—5 各国の水利開発および灌漑開発の現状

(1) ギニア

ギニアは豊富な降雨量と多くの河川(25 河川)に恵まれており、水資源開発のポテンシャルはきわめて高い。しかしながら、現在までの水資源の開発は水力発電が中心で、灌漑のための開発はまだ緒についたばかりといえる。灌漑耕地面積は約7万 ha と推定され、灌漑耕地率は4.4%にすぎない(FAO, 1987)。今後、ニジェール川水系を中心に豊富な水資源を生かした灌漑開発が期待される。

水稻の灌漑方式としては、大西洋岸のマングローブ沼沢地帯では潮の干満を利用した潮汐灌漑が行われている。内陸の沼沢地では、雨季の自然湛水を待つて作付けする利水形態が一般的である。

(2) マリ

マリにおける降雨量は、南部では1,400 mm であるが、北部にいくに従って少なくなり、200 mm 以下となっている。気候帯もこの降雨分布に応じて、ギニア、スーダン、サヘル、砂漠と南から北へ変化している。主要河川はニジェール川とセネガル川であり、この国の農業開発はこの両水系の開発いかにかかっている。

特に、ニジェール川沿岸にはセグーとトンブクツーの間に広大な内陸デルタがあり、1929 年以来綿花、水稻を対象とした約100 万 ha の灌漑計画が実施されてきた。これはニジェール計画と呼ばれ、現在マリで実施されている灌漑計画の中で最大のものである。主な施設としては、1929 年に完成したソツバ(Sotuba)ダム、1948 年完成のマルカラ(Markala)堰があるが、最近さらに上流の支流サンカラニ川に建設されたセレンゲダムにより、より安定した水資源の確保が可能となっている。このほかのポテンシャルの高い灌漑計画として、セグー米作開発計画(3万5,000 ha)、モプティ米作開発計画(1万8,000 ha)、バギンダ開発計画(3,300 ha)がある。いずれもセレンゲダムの完成に伴う渇水期

流量の増加の恩恵を受ける計画であり、灌漑面積の拡大と栽培作物の二期作化あるいは二毛作化が可能となる。

灌漑耕地面積は約 35 万 ha と推定され、灌漑耕地率は 17% となっている (FAO, 1987)。マリにおける灌漑形態として大規模灌漑、制御湛水灌漑 (controlled submersion)、小型ポンプ揚水灌漑、小ダムによる流出捕捉灌漑、残留氾濫水灌漑 (Recession irrigation) の 5 つがあげられる (Framji *et al.*, 1983)。

(3) ニジェール

ニジェールにおける降雨量は、南部で 850 mm、北部ではほぼ 0 に近い。気候帯は南からスーダン、サヘル、砂漠と変化し、砂漠気候帯が国土面積の 3 分の 2 を占める。ニジェール川はこの国の貴重な水資源であり、国の南西部を南東方向に流れる。ニジェール川沿岸には河岸段丘が発達しているため、水利用が行われるのは川沿いの狭い範囲に限られるが、そこでは河川水を利用した集約的な灌漑事業が進行中である。本流域では、灌漑農業開発公団 (ONAHA) を中心に、1983 年までに 24 地区 (計 5,035 ha) が整備され、ポンプ施設を有し水稻二期作の可能な圃場が造成されている。また、年 1,000 ha の造成が目標とされている。この国の灌漑耕地面積は約 1 万 4,000 ha と推定され、灌漑耕地率は 0.4% にすぎない (FAO, 1987)。

(4) ナイジェリア

ナイジェリアにおける降雨量は南部で約 1,500~3,000 mm、北部では 600 mm 程度となる。蒸発散量の等高線分布は降雨量のそれとほぼ同じ形状を呈するが、南縁部で 1,400 mm、北縁部で 635 mm となる。ナイジェリア全体の平均降雨量は 1,400 mm であるが、このうちの約 1,067 mm は蒸発散量として消費され、残りの 330 mm が表面および中間流出量となる。気候帯は南から赤道森林、ギニア、スーダンと変化する。主要河川はニジェール川とベヌエ川である。この国は降雨に比較的恵まれているが、雨季に偏るため乾季の水補給が課題である。そのため河川水をベースとした灌漑事業が進められてきたが、その数はまだ少なく、降雨量および河川流量からみれば、その開発ポテン

シャルはかなり大きい。灌漑耕地面積は1985年で128万haと推定され、灌漑耕地率は約4%となっている（FAO, 1987）。

（5） セネガル

セネガルにおいては、いくつかの灌漑プロジェクトが現在計画中であるが、そのほとんどはセネガル渓谷で進められている。この流域で実施済みの計画としては、稲作開発の成功例として有名なりシャートル（Richard Toll）灌漑計画がある。この計画はデルタ灌漑計画とも呼ばれ、防潮堰を建設して海水の溯上を防ぐとともに、洪水をギエール（Guier）湖に貯留して水源とし、沿岸の塩害地5,600 haを水田化したものである。セネガル川流域とともに灌漑計画上重要な流域は、ガンビア川流域である。ガンビア川は、ギニア、セネガル両国に源を発し、ガンビアの中央部を西流して大西洋に注ぐ国際河川である。流域面積は7万5,000 km²で、ゴウロンボ（Goulombo）地点における年平均流出量は95億m³（300 m³/s）である。ガンビア川流域においても「ガンビア川開発機構（OMVG : Organisation Pour la Mise en Valeur du Fleuve Gambia）」という関係諸国による総合開発計画がある。

セネガルにおいては、灌漑耕地面積は1985年で17万5,000 haと推定され、灌漑耕地率は約3.3%である（FAO, 1987）。稲とサトウキビが主要作物である。水稲作は、南部のカザマンス川およびセネガル川流域が中心となる。また、セネガル川沿いでは、残留氾濫水を利用した伝統的なソルガムの栽培が行われている。10月から1月にかけて河川沖積地数万haに氾濫した水がひくと同時に作付けが行われる。このシステムは上流のマナンタリダムの調整機能により、いずれはこの地域から消える運命にある（FAO, 1986）。セネガルで直面している灌漑上の主な問題点は、河川沿いの塩水溯上と土壌塩類の集積である。

（6） ガーナ

ガーナにおいては、将来の経済計画を十分に賄うだけの地表水資源に恵まれており、年平均の流出量は474億4,100万m³と見積もられる。最大の河川はボルタ川で、年平均流出量は370億m³（過去最大962億m³、最小123億m³）で

あり、平均流出率は8.7%である。特に支流のオーティ (Oti) 川流域は、ボルタ川全流域面積のわずか18%であるが、流出量は全体の30—40%をも占める。ガーナにおける灌漑目的の水使用は1970年で1億6,200万 m^3 であったが、1980年には3億4,900万 m^3 に増えている。西暦2000年までには約17億8,000万 m^3 が見込まれている (Framji *et al.*, 1983)。

ガーナにおける灌漑の歴史は新しく、近代的灌漑事業は1953年の北部サバンナ地域の小規模灌漑事業をもってスタートしたといえる。南部においては、ボルタ川から水を15mポンプ揚水し、1万6,190haを灌漑しているといわれる。北部においては、2つの形態がある。1つは、多数の小ダムによる重力灌漑であり、ベア (Vea) 計画、パサム (Pasam) 計画、トノ (Tono) 計画などがある。2つめの型は、ボルタ湖周辺地域における灌漑計画であり、ボルタ湖から揚水し、灌漑するものである。灌漑面積は1978年で2万2,000ha、灌漑耕地率は0.8%となっているが (Framji *et al.*, 1983)、1987年のFAOの推計によれば、1985年でそれぞれ7,000ha、0.2%とかなり低く見積もられている (FAO, 1987)。

灌漑開発上の主な課題は、ダム等の開発に伴う湛水域でのビルハルツ住血吸虫およびマラリアの防除対策と、農民の灌漑農業に対する基礎的知識の普及をいかに推進するかにある。

(7) コートジボアール

主要河川としては、最大の流域面積を有するバンドマ (Bandama) 川、コモエ (Comoe) 川、ササンドラ (Sassandra) 川、カバリール (Cavally) 川が各々北から国土を南下し、ギニア湾に注いでいる。各河川の中下流での高水期は夏の雨季が終わる9—10月であり、年平均流出量は各々129億6,000万 m^3 、77億3,000万 m^3 、95億6,000万 m^3 、25億2,000万 m^3 である (Unesco, 1969)。これら水資源の開発は水力発電を中心として進められており、今後灌漑のための水利開発が強く推進されるべきであろう。灌漑の導入は1970年代に始まったばかりで、現在の灌漑耕地面積はサトウキビ3万3,000ha、米2万ha、果樹5,000ha、野菜4,000haの計6万2,000haにすぎず、灌漑耕地率は1.0%に

も満たない状況である (Boka and Bakan, 1989)。

サトウキビの灌漑事業は、国家的規模の事業であり、地域間格差の是正を図る観点から国土の中央部と北部で行われており、国の公社によって実施、管理されている。灌漑方法は古典的散水灌漑とセンターピボット式散水灌漑が導入されている。農場での雇用は地元民にとって大きな収入源となっている。

稲作灌漑は、主に南部河川流域の谷底平野等の低地 (bas-fonds) において、小河川からの分水により行われている。この場合小ダムを有する場合もある。これらの開発は 10—15 ha 程度と小規模で、ダムを除けば比較的安価である。低地での用水制御による稲作開発の可能性は大きく、2000 年までに新規に 4 万 ha まで開発の可能性があるといわれている。現在灌漑水稻の平均収量は 3.5 t/ha で、灌漑の歴史が新しいわりには満足のいくものである。天水田稲作は生育期間の短い陸稲栽培が主で、西部から北西部地域にかけて普及している。目下、天水田への灌漑水の補給の研究が試みられており、比較的高い収量 (約 3 t/ha) が期待できそうである。稲収穫面積は、1970 年で 28 万 6,000 ha、1980 年で 46 万 1,000 ha と増大しており、1980 年代以降はバンドマ川上中流、ボウ川流域、ウィンツ溪谷などで稲作開発計画が進められている。

果樹灌漑は、民間ベースで主にパイナップルとバナナを対象に実施されており、国の補助は行われていない。果樹灌漑は一般に補助的にしか行われていないが、ある民間企業によるバナナの点滴灌漑では満足できる結果が得られている。

コートジボアールは野菜の純輸入国であるため、野菜栽培の促進に力を注いでいる。そのため灌漑を実施し、野菜の選択・栽培・販売において耕作者を援助する特別な組織が設立されている。最大の野菜栽培園は国の北部にあり、1,800 ha が整備されている。そこで栽培されたトマトは、濃縮トマトの加工工場に供給される。しかし工場の処理能力に対し供給量が満たないため、トマト栽培の拡大が必要であり、工場周辺の農地での小規模農民グループによる栽培、およびダム下流域でのトマトの灌漑開発が進められている。野菜の灌漑は、畝間灌漑と古典的散水灌漑が主である。他の地域では消費向け野菜生産のため、整備が進められている。灌漑網の維持管理は、農民指導組織によって行

われている。

(8) リベリア

この国における河川流量は豊富で、雨季と乾季ではその水量に大きな差があるものの、乾季でも河川水が涸れることはない。従来、大規模な構想による開発計画が主流をなしてきたが、財政事情等で必ずしも十分な成果をあげているとはいえない。近年は、中小規模の開発計画が見直されてきているが、政情不安のため思うような進展はみられない。

シエラレオネ国境を流れるマノ(Mano)川の総合開発は、ECの援助によって1975年に開始された。これは、発電に灌漑を含めた総合開発である。この総合開発のため、シエラレオネとの間にマノ川同盟が締結されている(日本農業土木総合研究所, 1985)。

リベリアの開発は、豊富な水資源ポテンシャルを十分に生かした水田開発にあるといえる。この国の灌漑耕地面積はわずか5,000 haで、灌漑耕地率は1.3%である(FAO, 1987)。

しかし、1989年12月から3年半続いた内戦により、全土の穀物の植付けができず、収穫が激減し、経済は壊滅状態である。

(9) シエラレオネ

シエラレオネには、数多くの河川が南西方向に平行して流れており、農業だけでなく、他目的の用水をも十分賄える豊富な水資源を有している。しかしながら、河川流量については、あまり調査されておらず、信頼できるデータは少ない。灌漑はごく限られた規模でしか行われておらず、今後の課題となっている。灌漑面積は1万6,000 haで、灌漑耕地率は0.9%にすぎない(FAO, 1987)。稲作は、河口付近のマングローブ沼沢地を中心に雨季作が行われている。海水の遡上による塩害対策が課題となっている。

なお、同国は慢性的に政情が不安定であり、イギリスは1993年に援助停止を発表している。

(10) ブルキナファソ

1970年代初頭および1980年代のサヘル旱ばつにより、上ボルタの農業生産が大きな被害を受けたことから、政府は灌漑開発の必要性を強く認識し、努力を注いでいる。政府の実施している灌漑プロジェクトは、比較的小規模なものが多い。河川沿いに小ダムを建設して雨水や流出水を捕捉し、低位部へ導いて作物栽培に当てる形態がよくみられる。また、沼沢地あるいは低地 (bas-fonds) では小さな畝を15 cmの標高差ごとに等高線沿いに築き、雨水を捕捉して高位部から取り入れ、低位部に向かって給水される。高位部の圃場が水で満たされた後、低位部の圃場に越流する。場合によっては洪水時に備え、事業地区の外側に高さ70 cmの堤防を築く。さらに、地区の中央部に水路を設け、異常出水に備える形式のものもある (FAO, 1986)。この方式の事業により、数百 ha までの開発が可能である。従来、耕地が洪水被害を受ければ耕作放棄する場合が多く、異常降雨に対する施設能力の検討は特に大切である。このため、ブルキナファソでは事業地区を取り巻く集水面積は最大30 km²までとされている (FAO, 1986)。

この国の灌漑面積は8,000 haと少なく、灌漑耕地率はわずかに0.3%である (FAO, 1987)。しかしながら、農民の灌漑農業に対する希望が強く、灌漑農業に対する適応力も高いことから、今後の進展が期待される。

5—6 灌漑開発上の留意事項

今後アフリカで灌漑開発を推進していくうえで、留意すべき事項を整理すれば次のようになる。

①過去の経済分析から、アフリカにおいては維持管理が容易で、安上がりな小規模の村落型灌漑計画が優先的に進められるべきであろう。FAOは小規模な計画に加えて、100—10,000 エーカー (40—4,000 ha) の中規模灌漑計画を推奨している (Balek, 1977)。

②費用便益の面から、極力低い投資で効果のあがるものから優先的に進める

べきであろう。例えば、大河川の氾濫原でみられる伝統的な半灌漑はかなり不安定なものであるが、若干の改良を加えるだけで効果のあがるものが多い。さらに、アフリカには簡単な灌漑あるいは水制御を行うことにより、少なくとも3,000万haの湿地において水稻や他の食用作物の生産が可能であるといわれている(Dat, 1986)。また、老朽化した既存の灌漑システムのリハビリテーションも、少ない投資額で高い効果が期待できる。

③水文気象データなど正確な基礎的資料の収集整備の拡充が必要である。特に、灌漑水の供給に都合のよい中小河川のデータは今後重要となろう。また、灌漑計画に当たっては長期的な気候変動にも十分注意を払う必要がある。リモートセンシング技術も今後大いに活用すべきである。

④灌漑開発に必要なコストをカバーするためには、作物生産収量を可能な限り高める努力をしなければならない。したがって、計画当初から工事と営農を一貫したものとしてとらえ、検討していくべきである。特に、農民の灌漑に対する十分な理解を得る必要がある。

⑤乾燥地域では、灌漑は塩類集積やウォーターロギング(waterlogging)の原因となりやすいので計画に当たっては十分な対策が必要である。特に、排水施設の適正な配置と水管理に留意すべきである。

⑥灌漑開発に伴い水が媒介する疾病、風土病の発生がありうるので、十分な防疫対策が必要である。ガーナのアコソンボダム(ボルタ湖)周辺では住血吸虫症がみられる。また、ボルタ川流域では、農民が土地を開拓するたびにブヨが媒介する川盲症(オンコセルカ症)の発生が古くからみられた。これは世界保健機構(WHO)の防疫プロジェクトにより、ようやく抑止されつつある。

(北村 義信)

6. 西アフリカ天然水の酸素同位体組成

6-1 はじめに

水分子 (H_2O) は、水素と酸素から構成される分子量の小さい化合物である。地殻中には常に水が存在し、種々の物質を溶かし込む。溶存する溶質の量は、水質として評価されている。一方、地球表面における水の地球化学的挙動を追跡するには、溶解成分の特性に加えて、水分子自身を構成する水素および酸素原子の質量数の違い（アイソトープ、同位体）に注目することが有効であることはすでによく知られているところである。これは、原子を構成する粒子のうち、原子核中の陽子と中性子は質量をもっているが、原子核の周りを回っている、負に帯電した電子は質量をもっていないことに基づく。地殻中における水素および酸素の平均的存在割合（同位体の自然存在比）は、表 2-22 のようである。

これら同位体は原子核における陽子の数は同じなので、それぞれ水素、酸素原子固有の化学的性質をもっている。しかし、原子核の質量数の違いに基づいて、わずかではあるが、物理化学的性質に違いがあり、同位体を含む分子間での挙動の差（例えば、蒸発、拡散および沈殿に際して異なる同位体を含む分子が等値には挙動しない現象）、すなわち、同位体分別が生ずる。これを同位体効果と呼ぶ。最近、センサーやエレクトロニクス技術の進展に伴って、天然の化学反応系において起こるわずかな同位体分別も、精度よく測定できるようになった。

地球表面における水の主な給源は、海洋、特に蒸発の著しい熱帯地域の海洋である。ここで太陽エネルギーを付与された水蒸気は、気温の低い高緯度に向かって移動して冷却、飽和され、降水として地表にもたらされ、河川を通じて最終的には再び海洋へと還元され

表2-22 地殻中における水素と酸素の平均存在割合

元素	同位体種	存在比 (%)
水素	H	99.9850
	D	0.0149
酸素	^{16}O	99.759
	^{17}O	0.0374
	^{18}O	0.2093

る。この過程が、地球表面における水の地球化学的循環系と呼ばれている。

従来の研究によれば、降水の水素—酸素同位体組成は、緯度、標高、地形、海岸からの距離、降雨強度などによって影響され、最終的には、地域の降水の加重平均が浅層地下水に反映され、年間を通してほぼ一定の定常的な値を示すことが、温帯地域の研究例から明らかにされている。

水稻の栽培には少なくとも3ヵ月間連続して灌漑水を供給することが不可欠である。西アフリカにおいては、一部の大河の周辺地域を除けば、水稻栽培のための灌漑水は、主として地下水によって供給されているものと推定されている。水素や酸素の安定同位体を用いた水循環のメカニズムの研究のためには、まず、天然水試料の分析データを収集することが重要であると考えられる。しかるに、西アフリカ地域の広い地域にわたる天然水（河川水、浅層地下水、泉の水、雨水など）の水素—酸素同位体に関する分析データは、筆者の知る限りほとんど公表されていない。

本研究においては、1993年7月から8月の雨季にかけての、西アフリカ地域水稻栽培環境の調査旅行中に採取した天然水の酸素同位体組成の地理的変動を、水供給源の違いと対応させて調べた結果について報告する。なお、一部の試料ではあるが、1995年12月下旬の乾季、ナイジェリア、ガザ地区において、廣瀬が採取した水試料についても同様の分析を行った。

6—2 試料の採取と酸素同位体組成の測定

試料水の採取は、当地域の雨季に当たる1993年7月下旬から同年8月下旬、および1995年12月下旬の乾季にかけて行った。二重栓つきガラス製バイアル瓶に試料水を採取、直ちに密栓した後、ビニール製テープで封入した。

水試料の酸素同位体組成の測定は、鳥取県東伯郡三朝町の岡山大学固体地球研究センターに設置されている連続—自動測定装置を使って行った。試水2 mlを二酸化炭素ガスとともにガラス製振とう容器に封入した後、25℃にて4時間振とう、同位体平衡に到達せしめた。その後、二酸化炭素相は精製したのち、質量分析計に導入し、 $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ 比を求めた。酸素同位体組成は、IAEA (国

際原子力機構) 発行の Vienna 標準海水 (V-SMOW) に対する千分率偏差として表示した。測定精度は、+0.1 (‰) である。

6-3 西アフリカ各地の天然水の酸素同位体組成

表 2-23 に、西アフリカ各地で採取した代表的な天然水の酸素同位体組成の分析結果を示した。表によれば、本地域天然水の酸素同位体組成は-5.5 から+3.6 (‰) まで著しく変動した。ここに得られた水試料の酸素同位体組成の一般的傾向は、例えばわが国のような温帯地域の天然水(-12 から-6 ‰) に比較して、重い酸素 (^{18}O) に富む特徴が注目される。これら試料水にみられる、酸素同位体組成の変動の要因を解析するために、表 2-24 に採取地域および水の給源ごとに結果を集約した。

浅層地下水 (井戸水) および河川水については、これら地域の降水の主な給源と考えられるギニア湾に近いナイジェリア中南部およびコートジボアール地域からの試料水の酸素同位体組成が、より内陸に位置するニジェール南部やブル

表2-23 西アフリカ各地の天然水の酸素同位体組成

試水 番号	採水地		国名	町村名	採水日	天水の 給源	酸素 同位体 組成	備考
	緯度	経度						
1	13°6'N	1°44'E	ナイジェリア	イバダン	7/24	ダム	-0.6	IITAダム
36			ニジェール	ドソ	8/2	井戸	-5.5	ボーリング
66			ナイジェリア	イバダン	8/20	井戸	-3.2	手掘り
69			ナイジェリア	イロリン	8/22	井戸	-3.7	手掘り
44			ニジェール	マゴウ	8/3	井戸	-4.6	ボーリング
47			ブルキナファソ	タンチャリ	8/5	ダム	-2.2	農業用ダム
48			ブルキナファソ	ファダゴラ	8/5	井戸	-3.3	手掘り
51			ブルキナファソ	ワイグヤ	8/6	ダム	-0.3	農業用ダム
52			ブルキナファソ	ボロモ	8/7	ダム	-0.9	農業用ダム
55			ブルキナファソ	ボボジウラツ	8/8	川	-4.4	流水
56			ブルキナファソ	ボボジウラツ	8/8	灌漑水路	-2.3	アジア水田
57			ブルキナファソ	ドンデ	8/8	井戸	-4.8	ボーリング
58			コートジボアール	フェルケセンドク	8/9	川	-3.0	水田水路
60			コートジボアール	ブアケ	8/10	ダム	+3.6	WARDA

表2-24 各採取地域の酸素同位体組成

地 域	酸素同位体組成 (%)	
	井戸および河川水	ダム、灌漑水路水
ナイジェリア中南部	-3.7~-3.2	-0.6
ニジェール南部	-5.5~-4.6	データ欠く
ブルキナファソ	-4.8~-3.3	-3.3~-0.3
コートジボアール	-3.0	+3.6

キナファソ地域に比べて明らかに重い。このことは、以下のように解釈される。ギニア湾起源の湿った海洋性の気団が、陸域に向かって侵入し、順次雲粒子を形成し、降水を伴って進行するにつれて、重い酸素同位体が、降水として

選択的に除かれる結果、内陸地域の降水が重酸素に欠乏するためと考えられる。なお、ブルキナファソから採取した河川水の値（試料番号 55, -4.4‰ ）は、同地域の深井戸（ボーリング井戸、試料番号 57, -4.8‰ ）に著しく近い。また、同一地域の手掘り井戸（深さ 10 m 以下）は、ボーリング井戸（通常 30 m 以上）に比べて重酸素に富む傾向がうかがわれる。

調査した地域の降水は主として、6 月から 8 月までの北半球の夏の時期に集中する。これらの雨季 3 ヶ月を除いた約 9 ヶ月が、いわゆる乾季であり、土壌表面からは盛んに蒸発散が起こるものと推定される。この推定は、ダムおよび灌漑用として水路を流れている水試料が、同地域の井戸（浅層地下水）水より重い酸素に富むことによっても裏づけられる。このことは、さらにはこれら地域の表面流去水の起源が、直接地下水によって涵養されているものか、あるいは一度地表に出て蒸発を受けたものなのかどうか、が酸素同位体組成の測定によって明らかにされうことを示唆する点で重要である。

6-4 ナイジェリア中部、ビダ市周辺の天然水の酸素同位体組成

(1) 調査地域の概要

ナイジェリア、ビダ市周辺地域は、白亜紀の砂一頁岩（ヌベ砂岩と呼ばれる）が侵食されて作られた準平原よりなる。平均標高は、およそ 150 m で、地域の南西方面には砂岩が侵食によって形成されて特有の地形（メサ）がみられる。

ビダ市を挟むように、北から南に向かって、カドゥナ川およびバコ川が流れている。地域内に分布する主要な土壌は、これらの堆積岩の影響を強く受け、台地では、砂質の赤色土、小溪谷周辺の低地では、ほとんど石英砂からなる湿性の未熟土である。

ビダ市周辺地域においては、自然条件下では生活用の良質の水に恵まれていないため、また、乾季には小さい河川は水が涸れるため、1989年頃からスイ

表2-25 ナイジェリア、ビダ市周辺から採取した天然水の酸素同位体組成

試水 番号	採水村名	採水日	天水の 給源	酸素同位 体組成	備考
2	ガザ	7月27日	井戸	-3.8	手掘り
3	ガザ	7月27日	小河川	-3.2	水田試験圃
4	ボク	7月27日	田面水	+1.1	水田
5	ドコ	7月27日	井戸	-3.9	手掘り
6	エミグブ	7月27日	井戸	-3.7	手掘り
8	エミナンバリ	7月28日	井戸	-3.6	手掘り
9	ソダンギ	7月28日	井戸	-3.9	ボーリング井
10	ソダンギ	7月28日	小河川	-3.3	流れている
11	ンダバ	7月29日	井戸	-3.9	ボーリング井
12	ツアドウ	7月29日	井戸	-3.8	ボーリング井
13	ダクパンタコ	7月29日	井戸	-4.6	ボーリング井
14	カゴラギ	7月29日	井戸	-4.3	ボーリング井
15	ザンタチ	7月29日	井戸	-4.0	ボーリング井
16	バングバ	7月29日	井戸	-3.7	ボーリング井
17	バングバ	7月29日	井戸	-4.0	ボーリング井
18	パテイタギ	7月29日	井戸	-3.9	ボーリング井
19	エラギ	7月29日	井戸	-3.7	ボーリング井
20	コソックパ	7月29日	井戸	-4.0	ボーリング井
21	ソンクパタ	7月29日	井戸	-3.9	ボーリング井
26	クソタチ	7月30日	井戸	-3.8	ボーリング井
27	ダイジンゴサン	7月30日	井戸	-4.0	ボーリング井
28	グサデイン	7月30日	井戸	-4.0	ボーリング井
29	ピチ	7月30日	小河川	-4.9	流れている
30	ジマ	7月30日	井戸	-3.6	手掘り
32	ビダ	7月31日	大河川	-4.8	カドゥナ河
33	ビダ	7月31日	小河川	-3.5	バコ川

ス政府およびわが国の技術援助によって、各地にかなり高密度で近代的なボーリング井戸が掘られている。これら井戸には、押し上げ式の手動ポンプが設置され、地下から透明で、良質な浅層地下水が汲み出され、住民の生活用水として利用されている。本研究においては、利根ボーリング社現地事務所よりこれら井戸の位置を示した5万分の1の地形図の提供を受けることができた。これら地形図は、張り合わせると、縦108 cm、横95 cmとなる。試水の採取位置を、この図上に示すことが、有効と考えられるが、諸般の事情から印刷することができない。また、採水地点を図示するために、25万分の1程度の縮尺の図を入手すべく現地およびわが国において努力したが、徒労であった。表2-25には、本研究において採取した試料水の村落名を記載しておいた（後日詳細な位置を知りたい読者は、著者へ連絡されれば、関連の地域の地形図を複写して提供する用意がある）。

(2) 分析結果および考察

表2-25にビダ市周辺地域の浅層地下水、河川水および水稻栽培下の田面水の酸素同位体組成が示されている。

手掘り井戸から得られる5点の浅層地下水の酸素同位体組成（1993年採取）は、 -3.9 から -3.6‰ の比較的狭い変動を示した ($n=5$, 平均: $-3.7 \pm 0.1\text{‰}$)。1995年採取の井戸水試料（表2-26）も類似の同位体組成を示す。これらの井戸は、農民によって掘られたもので、最も深いものでも10 m程度であり、地域によっては乾季に水が涸れることが知られている。一方、14点のボーリング井戸から得られた浅層地下水は、 -4.6 から -3.7‰ ($n=14$, 平均: $-4.0 \pm 0.2\text{‰}$) であり、手掘り井戸から得られる地下水の値に比べて、わずかに軽い。ボーリング井戸においては、地表に接する部分が、封入された形となる一方、手掘り井戸では解放されている。手掘り井戸からの地下水がわずかに重酸素に富むことは、井戸上端からの蒸発による軽い酸素原子を含む水が水蒸気となって、気散した結果によるものと解釈される。なお、ボーリング井戸試水のうち、試料番号13が最も軽い。地形、その他の自然立地条件を考察したが、特にこの特異性を説明できるような原因をみいだしえなかった。これ

ら地下水の酸素同位体組成は、本地域を東西から挟んだ形で南流するカドゥナ川（-4.8‰）およびこれよりはるかに流量の小さいバコ川の値のほぼ中間にあった（-3.5‰）。おそらく、これら両河川の水が地下の貯留層を移動、拡散混合しているものと推定される。ピチ村の小河川水（試料番号 29, -4.9‰）は、分析した試料水の中で最も軽い。本河川は、通常ほとんど水が流れていないことから、採取された水の大部分は、後述の前日の大雨に由来するものと推定される。

カドゥナ川沿いの沖積低地に展開する水稻栽培地の田面水（試料番号 4, +1.1‰）は、蒸発の影響を強く受け、付近の地下水や河川水に比較して、著しく重い酸素に富んでいる。なお、類似の傾向は、1995 年 12 月下旬に採取された、水稻に鉄過剰障害が著しい田面水試料についても認めることができる（表 2-26）。

1993 年夏の調査期間においては、本地域が雨季にあるため、いくつかの降

表2-26 ナイジェリア、ビダ市で1995年に採取された天然水試料の酸素同位体組成

採水日	天水の給源	酸素同位体組成	備考
12月下旬	井戸	-3.7	ガザ村の中心の井戸
"	"	-3.8	ガザ村の南端
"	"	-3.7	カドゥナ川の氾濫原
"	水田田面水	-0.8	水稻に鉄過剰害顕著
"	"	-1.0	"

表2-27 ビダ市で採取した降水試料の酸素同位体組成

採取日	時間	降水量	酸素同位体組成
7月29日	22:00	約1mm	-1.1(%)
	22:30まで	35mm	-6.0
	23:00まで	3mm	-6.3
	24:00まで	10mm	-6.1
8月4日	20時頃	データ欠	-4.3
8月20日	23~24時	約150mm	-2.6

水試料を予備的に採取することができた。当域の降水は、温帯域で観察される降水とは異なり、激しい雷と単位時間当たりの雨量強度が著しい熱帯特有の降水現象によって特徴づけられる。1993年ビダ市において採取された降水試料の酸素同位体組成の例を表2-27に示す。

これら降水の酸素同位体組成は、 -6.3 から -1.1 (‰) まで降水時の気象条件によって、かなり変動することが推察された。

6-5 ま と め

1993年7月から8月にかけて、西アフリカ（ナイジェリア、ニジェール、ブルキナファソおよびコートジボアール）における水稻栽培環境調査中に、各地で採取した天然水の酸素同位体組成を測定した。これら広大な地域から採取された浅層地下水および河川水の酸素同位体組成は、 -4.8 から -3.0 ‰ の比較的狭い範囲に集中した。この値は、温帯地域、例えばわが国の類似の試料について測定された値に比べて明らかに重く、熱帯地域固有の値を示す。

ナイジェリア、ビダ市周辺の浅層地下水は、 -4.6 から -3.6 ‰ の範囲にあり、地下に均一な貯留層の存在が示唆された。1995年の乾季にビダ市において採取した地下水試料の酸素同位体組成もほぼ雨季のものに等しく、年間を通して定常的な同位体組成をもつことが推定された。

ダム、灌漑水路および田面水は、熱帯気候条件下での強い蒸発の影響を受け、著しく重い酸素に富んでいる。蒸発作用を被った水は、その酸素同位体組成から新鮮な地下水とは、明らかに識別された。類似の研究手法が、アジア式水稻栽培環境下においても追試されることが望まれる。（溝田 智俊）

参考文献

- Abdulla, H. H. (1985) Vertisols in the Sudan: Their properties, management and classification. In FAO world soil resource reports No. 56, 5th Meeting of the Eastern African sub-committee for soil correlation and Land evaluation. 12-21
- Balek, J. (1977) Hydrology and water resources in tropical Africa. Elsevier, Amsterdam

- Balek, J. (1983) Hydrology and water resources in tropical regions. Elsevier, Amsterdam.
- Barbourn, K.M. (1982) Nigeria in maps, p 2-49, Hodder and Stoughton, London
- Baumgartner, A. and Reichel, E. (1975) The world water balance. Elsevier, Amsterdam
- Biswas, A.K. (Ed) (1978) Water development supply and management. United Nations Water Conference : Summary and Main Documents, Vol.2, Mar Del Plata, Argentina, Pergamon Press, Oxford
- Boka, E. and Bakan, K. (1989) Irrigated agriculture in Cote d'Ivoire. 7 th AFRO-ASIAN Regional Conference (Tokyo), Vol.I-E, ICID
- Brinkman, R. (1979) Ferrollysis, a soil forming process in hydromorphic conditions, PUDOC, Wageningen, 1-106
- Buri, Md. M., Ishida, F., Kubota, D. and T. Wakatsuki (1996 a) Soils of Flood Plains of West Africa : General Fertility Parameters. Soil Sci. Plant Nutr. Submitted
- Buri, Md. M. and T. Wakatsuki (1996 b) Soils of flood plains of West Africa : Geographical and regional distribution of some fertility parameters. Proceedings of the International Symposium on Maximizing Sustainable Rice Yields through Improved Soil and Environmental Management, Funny Pub. Ltd. Bangkok, Vol.I, 445-455
- Dat, V.T. (1986) Major constraints on rice double cropping in tropical Africa. Tropical Agriculture Research Series No. 20
- FAO/Unesco (1974) Soil map of the world, 1 : 5000000, Unesco, Paris
- FAO (1986) State of irrigation - Facts and figures. Consultation on irrigation in Africa
- FAO (1986) The land resource base, Annex 2, African agriculture
- FAO (1987) 1986 FAO production yearbook. Vol.40, FAO Statistics Series No.76
- FAO Investment Center (1986) Irrigation in Africa south of the Sahara. Technical paper 5
- FAO/Unesco (1990) Soil map of the world. Revised Legend. World Soil Resource Report 60, Rome, pp 1-119
- Framji, K.K., Garg, B.C. and Luthra, S.D.L. (1983) Ghana, Irrigation and drainage in the world. ICID
- Framji, K.K., Garg, B.C. and Luthra S.D.L. (1983) Mali, Irrigation and drainage in the world. ICID
- Framji, K.K., Garg, B.C. and Luthra, S.D.L (1983) Senegal, Irrigation and

- drainage in the world. ICID
- Grove, A.T. (1978) Africa. Oxford University Press, London
- Hekstra, P. and Andriessse, W. (1983) I : The physical aspect, In IITA/ILRI Wetland research Project, Phase I, 1 : 50-54, Wageningen
- Issaka, R. N. (1994) Characterization of inland valley soils of West Africa, MS thesis of Shimane University, pp 1-105
- Issaka, R.N., Masunaga, T., Kosaki, T. and T. Wakatsuki (1996 a) Soils of Inland Valleys of West Africa, General Fertility Parameters. Soil Sci. Plant Nutr., 42 (1), 71-80
- Issaka, R. N., Masunaga, T. and T. Wakatsuki (1996 b) Soils of Inland Valleys of West Africa, Geographical Distribution of Selected Soil Fertility Parameters. Soil Sci. Plant Nutr., 42 (1), 197-201
- Issaka, R.N. and T. Wakatsuki (1996 c) Soil fertility of inland valleys of West Africa : Nature and geographic distribution. Proceedings of the International Symposium on Maximizing Sustainable Rice Yields through Improved Soil and Environmental Management, Funny Pub. Ltd. Bangkok, Vol.I, 429-444
- Kawaguchi, K. and K. Kyuma (1977) Paddy Soils in Tropical Asia, Their material nature and fertility, Center for Southeast Asian Studies, Kyoto University, Kyoto
- 北村義信 (1994) 新版稲作技術協力マニュアル (基本編) 西アフリカ・稲作, 全国農業改良普及協会, 75-81 および 124-142
- Kosaki, T. and A.S.R.Juo (1984) Soil management and land development, Characterization and uses of wetlands, IITA Annual Report 1983 : 139-143
- Ledger, D.C. (1969) The dry season flow characteristics of West African rivers. Environment and land use in Africa. Thomas, M.F. and Whittington, G.W. (ed.), Methuen & Co Ltd, London
- Luiten, T. and R.T.A. Hakkeling (1990) Fertility Parameters of Soils in 86 Selected West African Toposequences. Internal Communication 135. Winand Staring Center, Wageningen
- L'vovich (1974) Global water resources and the future. Moscow
- Martin, C. (1991) The rainforests of West Africa, Ecology-threats-conservation, Birkhauser, pp 233, Germany
- Moberg, J.P. and Esu, I.E. (1991) Characteristics and composition of some savanna soils in Nigeria, Geoderma, 48 : 113-129
- 日本農業土木総合研究所 (1985) アフリカ農業・農村開発検討委員会中間報告書
- O'Conner, A.M. (1981) The geography of tropical African development : A study

- of spatial patterns of economic change since independence (second edition), Pergamon Press, Oxford.
- Oosterbaan, R. J., Gunneweg, H. A. and Huizing, A. (1987) Water control for rice cultivation in small valleys of West Africa. Annual Report 1986, ILRI, Wageningen
- Oyediran, G. O. (1990) Genesis, Classification and Potential Productivity Selected Wetlands Soils in the Savanna Ecosystem of Nigeria, Ph.D. Thesis of Obafemi Awolowo University
- Raunet M. (1985) Bas-fonds et riziculture en Afrique : approach structurale comparative. Agron. Trop. 40 (3) : 181-201
- Savvides, L. (1981) Swamp development, guidelines to improving valley swamps (fadama). A procedure and approach followed in the Bida Agricultural Development Project. pp 1-64
- 島田周平・児玉谷史郎・半澤和夫・境田清隆・松本秀明 (1993) ザンビア, チネナ村 ダンボ調査報告, 第 30 回日本アフリカ学会学術大会研究発表要旨, 3-5
- Smaling, E. M. A., T. Dyfan, and W. Andriesse (1985 a) Detailed Soil Survey and Qualitative Land Evaluation of the Rogbom-Mankene and Matam-Roman-goro Benchmark Sites, Sierra Leone. WURP, Phase II, ILRI, Wageningen, The Netherlands
- Smaling, E. M. A., E. Kiestra, and W. Andriesse (1985 b) Detailed Soil Survey and Quantitative Land Evaluation of the Echin-Woye and Kunko Benchmark Sites, Bida, Niger State, Nigeria. WURP Phase II. IRLI, Wageningen, The Netherlands.
- Soil Survey Staff (1975) Soil Taxonomy, A basic system of soil classification for making and interpreting soil survey, USDA, Washington
- Soil Survey Staff (1994) Keys to soil taxonomy, 6th edition, USDA, Soil Conservation Service
- Sudan-Soil Survey Administration/FAO (1985) Fifth meeting of the Eastern sub-committee for soil correlation and land evaluation. World Soil Resources Reports 56, FAO. pp 207
- 滝島康夫 (1992) アフリカ東南部諸国の低湿地利用, 国際農林業協力, 15 : 14-31
- Tanaka, A., Sakuma, T., Okagawa, N., Imai, H. and Ogata, S. (1984) Agroecological condition of the Oxisol-Ulitisol area of the Amazon river system. 101 pp, Hokkaido University, Sapporo
- Tanaka, A., Sakuma, T., Okagawa, N., Imai, H., Ogata, S., Ito, K. and Yamaguchi, J. (1986) Idem, 103 pp, Hokkaido University, Sapporo

- 東京天文台 (1988) 理科年表. 丸善, 東京
- Udo, R.K. (1978) A Comprehensive geography of West Africa, Heinemann Educational Books, Ibadan
- UNEP (1981) Environment and development in Africa. Pergamon Press, London
- Unesco (1969) Discharge of selected rivers of the world. Vol.1
- Unesco (1975) Geological World Atlas, Map Sheet 6, West Africa, Paris
- USSR, National Committee for IHD (1974) World water balance and water resources of the earth. Leningrad.
- van Dam, A. J. and van Diepen (1982) The soils of the flat wetlands of the world, their distribution and their agricultural potential. Wageningen, International Soil Museum (現在 ISRIC, International Soil Reference and Information Centre)
- 若月利之 (1988) 水田農業は西アフリカにおける土壌侵食, 農業環境破壊を防止する公害研究 18: 20-27
- 若月利之 (1990 a) 熱帯アフリカにおける低地土壌の分布と特性及び農業開発, 木内知美編 熱帯アフリカの土壌資源, 86-113, 国際農林業協力協会, 東京
- 若月利之 (1990 b) モンスーン西アフリカの内陸小溪谷湿地における非水田稲作と小區画水田稲作, 農耕の技術, 13: 31-63
- 若月利之 (1994) 新版稲作技術協力マニュアル (基本編) 西アフリカ稲作, 全国農業改良普及協会, 82-123
- Wakatsuki, T., Kosaki, T. and M.C. Palada (1988) Rice soil Fertility of Inland Valley Swamps in West Africa, First International Symposium on Paddy Soil Fertility, Chiangmai, Thailand, Part II: 695-715
- Wakatsuki, T., T. Kosaki and M.C. Palada (1989) Sawah for sustainable rice farming in inland valley swamps, IVSs, in West Africa, Paper presented at 2nd West African Farming Systems Research Symposium, Accra, Ghana, 28 August-1 September, 1989
- Wakatsuki, T. and C. Mizota (1992) Salt Accumulation in Topsoils of Irrigated Maize Fields in Comparison with Irrigated Rice Fields in Kilimanjaro Region, Semiarid Tanzania. Soil Sci. Pant Nutr. 38: 365-368
- WARDA (1989) A decade of mangrove swamp rice research
- White, F. (1983) The vegetation of Africa: A descriptive memoir to accompany the Unesco/AETFAT/UNESCO vegetation map of Africa, Paris
- Widstrand, C. (ed.) (1980) Water conflicts and research priorities, Water and society, conflicts in development. Water Development, Supply and Management. Vol.8, Pergamon Press, Oxford
- Windmeijer, P.N. and Andriessse, W., (1993) Inland Valleys in West Africa: An

- Agro-Ecological Characterization of Rice-Growing Environment, ILRI
- World Bank (1994) International river basin organizations in Sub-Saharan Africa, World Bank Technical Paper No.250, Washington, D.C.
- World Resources Institute (1994) World Resources 1994-95, A guide to the global environment, pp 400, World Resources Institute, UNEP, UNDP, Oxford Univ. Press
- Yamauchi, M. (1989) Rice bronzing in Nigeria caused by nutritional imbalances and its control by potassium sulfate application, *Plant and Soil*, 117 : 275-286
- 矢野信一 (1986) アフリカの水田農業—水田開発の事例—. *農業土木学会誌* Vol. 54, No.1, 41-46