

水田農業の普及によるアフリカの緑の革命実現と 土壌物理学的問題点

若月利之¹

Soil physical constraints for materialization of the green revolution in Africa by dissemination of
Sawah based rice farming

Toshiyuki WAKATSUKI¹

1. はじめに

熱帯アジアで 1970 年代に実現した緑の革命は、40 年後の今日、サブサハラアフリカで実現していない。コメやトウモロコシの収量は過去 40 年間 1.5 t ha^{-1} 程度に留まっている。このため食糧危機と砂漠化・環境悪化が進行し、社会・政治不安の背景になっており、21 世紀の地球社会の大きな不安定要因になっている。

しかしこの停滞の背景には 1500 年代から始まる欧米のグローバリゼーション（奴隷貿易による新大陸開発と植民地化）の 500 年の長い前史があると考えられる（若月, 2003; Thomas, 1997; 藤永, 2006）。

アフリカの緑の革命実現は、国連の MDGs (Millennium Development Goals) の中心課題であり、アフリカ諸国の悲願である。ビル・メリンダゲイツ財団がサポートし、前国連事務総長アナン氏を議長とする Alliance for Green Revolution in Africa (アフリカ緑の革命連合 AGRA, 2009), FAO (国連食料農業機構), 世界銀行等、国際研究機関の悲願でもある。2008 年 5 月の第 4 回東京アフリカ開発会議 (TICAT-IV) でも、日本のアフリカの稲作支援が表明され、JICA (国際協力機構) は Coalition for African Rice Development (アフリカ稲作振興のための共同体 CARD, 2008) を結成して、アフリカの緑の革命実現に向け、支援を本格化した。

これらの世界の潮流は、品種改良が緑の革命の中心技術であることを前提としてきたし、している。熱帯アジアやラテンアメリカの麦・コメ・トウモロコシの緑の革命は、品種改良・バイオテクノロジーが牽引したからである。アフリカ稲センター (WARDA: West Africa Rice Development Association) でも 1990 年代初頭にアジア稲 (*Oryza Sativa*) とアフリカ稲 (*Oryza Glaberrima*) の雑種系統、ネリカ米 (NERICA: New Rice for Africa) の開発に成功し、アフリカの緑の革命実現への期待が高まったが、それから 10 年以上経過したが農民の圃場で

の収量の増加は明確でなく、現在、その限界も明らかになっていない (AGRA, 2009; CARD, 2008; Orr et al., 2008; Wopereis et al., 2008)。アジアにおける緑の革命を実現した高収量品種、施肥、灌漑の 3 要素技術、とりわけ、高収量品種開発と普及の努力は、ネリカ以外にもサブサハラアフリカでも行われてきた。このためサブサハラのアフリカでも過去数十年、農民が望めば各種の優良品種は入手可能であった。しかし、40 年後の 2008 年現在、緑の革命は実現していない。

本稿では、ガーナとナイジェリア等における筆者らの水田稲作研究に基づき、アフリカにおける緑の革命が実現されない要因について論述するとともに、緑の革命の実現を可能にするための 2 つの仮説 (水田仮説 I と II) について提案する。次いで、アフリカにおける水田稲作の現地実証研究の事例を紹介する。最後に、アフリカにおける水田適地選定に関わる、土壌物理学的な問題点について言及する。

2. サブサハラアフリカにおけるコメや その他の穀物生産性の動向及び生態環境と 土壌理化学性の特徴

Fig. 1 に熱帯アジアとサブサハラのアフリカにおける各種穀物収量の過去 40 年の動向を示した (FAOSTAT, 2006)。1960 年代には両者の差は殆どなかったが、2006 年時点ではアジアではコメやメイズを中心に 2 倍以上の生産性の向上が見られるのに対し、サブサハラのアフリカでは目立った生産性の向上は認められない。このことが人口増を凌駕した熱帯アジアの食料増産と人口増に打ち勝てないサブサハラのアフリカの食料生産の原因となっている。なお、Fig. 1 ではキャッサバとヤムの生産性の計算に FAO の全生産量の各々 8 分の 1 と 5 分の 1 のデータを使用して穀物当量として計算したのは、これらの根塊茎作物の水分含量はヤムが 60 % 程度、キャッサバが 70 % で、穀類の 15 % 前後に比べて 4 ~ 5 倍であること、又、タンパク質含量はヤムが 3 ~ 4 分の 1、キャッサバが 7 ~ 8 分の 1 程度 (Sanchez, 1976) に基づく。

¹School of Agriculture, Kinki University, 3327-204 Nakamachi, Nara 631-8505, Japan. Corresponding author: 若月利之, 近畿大学農学部
2009 年 1 月 13 日受稿 2009 年 5 月 29 日受理
土壌の物理性 112 号, 13-25 (2009)

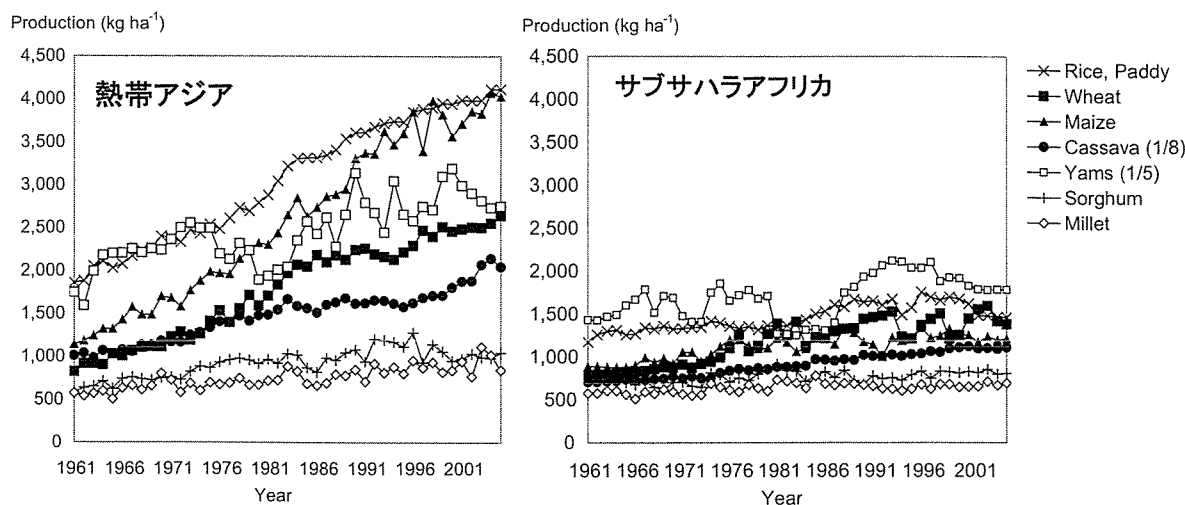


Fig. 1 熱帯アジアとサブサハラのアフリカにおける 1961–2005 年間の穀物収量の動向 (FAOSTAT, 2006).

Table 1 過去 20 年の西アフリカにおける生態環境別の稲作生産の動向* と今後 10 年の予想**.

	面積 (百万 ha)			生産量 (百万トン/年間)			収量 (t ha ⁻¹)		
	1984	1999/03	2018**	1984	1999/03	2018**	1984	1999/03	2018**
陸稲栽培	1.5	1.8	2.0	1.5	1.8	2.0	1.0	1.0	1.0
WARDA の予想		2.2			2.8			1.3	
内陸小低地天水	0.53	1.8	4.0	0.75	3.4	11.0	1.4	2.0	2.7
WARDA の予想		0.76			1.5			2.5	
灌漑水稲	0.23	0.56	1.2	0.64	1.9	5.0	2.8	3.4	4.2
WARDA の予想		0.34			1.2			3.5	
全体	2.6	4.7	7.0	3.4	7.7	18.0	1.3	1.6	2.6
WARDA の予想		3.6			6.5			1.8	

* 出典は以下による。WARDA(1988), ARI(2002), 櫻井 (2003), WARDA (2004), FAOSTAT (2006).

** 今後 10 年の予想は本著者による。

Table 2 西アフリカ内陸小低地および氾らん原土壌表土と熱帯アジアおよび日本の水田土壌表土の平均理化学性の比較.

Location	Total C (%)	Total N (%)	Available** P (ppm)	Exchangeable Cation (cmol kg ⁻¹)				Sand (%)	Clay (%)	CEC /Clay
				Ca	K	Mg	eCEC			
西アフリカ内陸小低地	1.3	0.11	9	1.9	0.3	0.9	4.2	60	17	25
西アフリカ氾らん原	1.1	0.10	7	5.6	0.5	2.7	10.3	48	29	36
熱帯アジア水田*	1.4	0.13	18	10.4	0.4	5.5	17.8	34	38	47
日本の水田*	3.3	0.29	57	9.3	0.4	2.8	12.9	49	21	61

* Kawaguchi and Kyuma (1977). ** プレイ 2 法.

Table 1 に西アフリカにおけるコメ生産の動向を示す。西アフリカはサブサハラアフリカの稲作ポテンシャルの 8 割を占める中核地域である。Table 1 には陸稲ネリカのブレイクスルーの原動力となった 1988 年の WARDA の陸稲に特化した研究戦略設定時 (WARDA, 1988) の高位予想 (収量も面積も高水準で増加) と 1999/2003 年時点の実際の結果も示した。明らかなことは WARDA の予想以上にコメ生産は増加したこと、予想とは全く異なり陸稲生産の割合は 44% から 20% 程度まで顕著に減少したこと、天水湿地 (内陸小低地) 稲作が顕著に増加したことである。表から分かるように、過去 15 年の西アフリカの陸稲研究は実際の稲生産へのインパクトはほとんどなかったことになる。

筆者は 1986 ~ 1988 年の 2 年間 IITA (国際熱帯農業研究所) の JICA 派遣稲作専門家として、引き続き 1989 年には短期派遣調査により、セネガルからコンゴまで、

西と中央アフリカ 16 ヶ国の主な稲作地を現地踏査した。又、10 年後の 1998 年にも同様の広域調査を実施した。調査の一環として、水田開発ポテンシャルの高い内陸小低地 185 地点と氾濫原 62 地点より土壌を採取し、Kawaguchi and Kyuma (1977) による熱帯アジアや日本の水田土壌の肥沃度と比較した結果を Table 2 に示す (廣瀬・若月, 1997; Kawaguchi and Kyuma, 1977; Kyuma, 2004)。表より、西アフリカでは古い地質と長期にわたる風化作用によって、リン酸や各種塩基の含有量が低く、砂質でかつ粘土の活性も低い、極めて劣悪な土壌が分布しており、イオウや亜鉛等、必須微量元素の欠乏土壌も広範に見られることが明らかになった。西アフリカにおける伝統的稲作は焼畑での陸稲栽培を中心としており、これら陸稲栽培や低地での非水田の稲作は、アジアにおける水田稲作と異なり、土壌の劣化・沙漠化を促進してきたと考えられた。

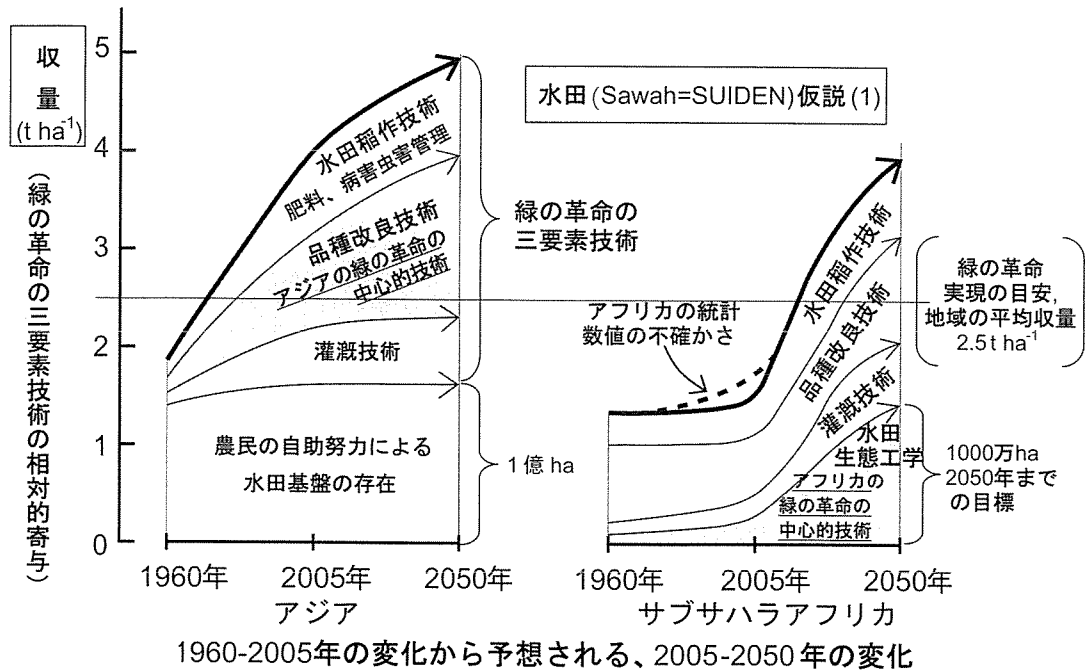


Fig. 2 アジアにおける 1960–2005 年の収量向上に貢献した技術の相対的寄与の推定と今後 50 年の予測をサブサハラのアフリカと比較。

Table 3 水田 (Suiden) 概念を適切に表す言葉が、アフリカの現地語はもとより英語や仏語に存在しない。

水田 (Suiden) =Sawah (インドネシア語)			
	English/French	Indonesian	Chinese (漢字)
Plant	Rice	Nasi	米, 飯, 稲
	Paddy	Padi	稲, 粳
Environment	? (Paddy/Paddi)	Sawah	水田
Paddy soil science = 稲土壌学 ≠ 水田土壌学			
Paddy yield: 粳収量			

3. アフリカにおいて緑の革命の実現を可能にするための仮説

本章では、アフリカにおいて緑の革命の実現を可能にするため 2 つの仮説 (水田 (Sawah, サワ) 仮説) について説明する。説明に先立ち、アフリカにおける「水田」を表す用語の問題について述べる。

3.1 アフリカ地域における水田概念と言葉の不在という問題

Table 3 に示すように、英語や仏語ではインドネシア語由来の Paddy や Paddi で粳や稲という意味に使われたり、Paddy field で水田を示すように使われており、粳や稲植物そのものと、人為的に改良された稲の生産基盤である水田が一つの言葉、Paddy、で済まされている。英、仏語には稲作と水田文化が存在しないからである。これまでの ODA 等による大小規模の灌漑水田稲作の持続性が低いのも、水田コンセプトの不在が関わっている。農民に水田概念と言葉と技術がなければ、灌漑水田システムの持続可能な管理はできないからである。

アジアの稲作国ではそれぞれ固有の水田を示す言葉と概念が存在するので、実際上の問題はない。しかし、サ

ブサハラのアフリカでは Paddy fields で陸稲畑も灌漑水田も意味するので、Paddy という言葉を使う限り、稲作における水田の重要性を理解してもらうことは不可能となる。

Tsunami (津波) のように日本語の Suiden (水田) でも良いが、Table 3 に示すように英語や仏語にはすでにインドネシア語由来の Paddy (粳) が使われているので、同じく水田を意味する Sawah (サワ) という言葉を使うことを提案したい。ガーナやナイジェリアの稲作関係者の中では普及し始めている。最近では WARDA, IITA, IRRI でも一部で使われ始めた (IITA, 2008)。

3.2 水田 (Sawah, サワ) 仮説 (I)

Fig. 2 にサブサハラアフリカの稲作における緑の革命についての水田仮説 (I) を示した。図に示すように、水田 (Sawah, サワ) 仮説 (I) は、「アフリカに緑の革命をもたらす技術は、バイオテクノロジーのような品種改良だけでは不十分であり、農民の穀物栽培生態環境の改良を行う「水田作り」のようなエコテクノロジー (生態工学技術) が必要」というものである (Wakatsuki et al., 1998; Wakatsuki and Masunaga, 2005)。

アジアの緑の革命は主として品種改良技術が牽引し、土壌肥料や病害虫管理や灌漑技術という緑の革命の 3 要素技術が組み合わさって成功した。アジアの稲作農民の圃場には水田基盤が長年の努力により存在していたからである。一方、アフリカにはこのような水田基盤 (Sawah) は存在していない。CG センターの品種改良を中心とする緑の革命戦略は、40 年前のアジアと同じく品種改良 = 育種 = バイオテクノロジーがアフリカにおいても「緑の革命の中心技術であるとの仮定」に立っている。しかし、この仮定が正しくないことは、過去 40 年の活動経験で明らかではなからうか。水田仮説 (I) は、この歴史の反省点に立って提案するものである。

農民圃場の所有権は重層的で多様な人々とコミュニティによる共有型である。農民の圃場は極めて不均質で多様な生態環境が混在し、区画がない。圃場環境の改良は困難である。

水田生態工学: 個々の水田は多様であるが、似た地形面の環境毎に区画されている。地形面に応じて区画された圃場面は、比較的均質で、水管理が可能である。このように環境が区画されれば、各圃場は毎年の努力の継続で改良が可能となり、持続可能な管理ができる。区画されることにより、土地の測量と登記も可能になり、私的な所有権と管理権が促進される。

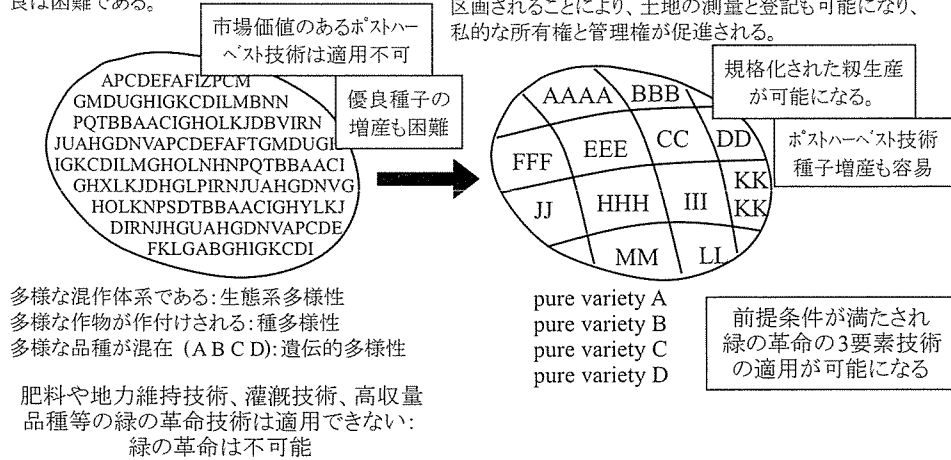


Fig. 3 拡張水田仮説 (I) : 緑の革命の 3 要素技術を適用するための前提条件は、生態環境が区画され分類され、品種改良のように、生態環境も改良できる水田的な圃場が存在することである。

Table 4 集約的持続生産性に関する水田仮説 (II) : 低地水田稲作地と焼畑の陸稲栽培地との持続的生産性の比較。

1 ha の水田 (Sawah) = 10 - 15 ha の陸稲 (upland) 栽培地		
	焼畑の陸稲	水稲 (Sawah)
アップランドと低地の面積比の概略の範囲 (%)	80 - 99	20 - 1
収量 (t ha ⁻¹)	1 - 3 (1 以下) *	3 - 6 (2 程度) *
生産の持続性**	1	5
持続的生産性の比較***	1	10 以上

* 括弧内の数値は無肥料の場合。 ** 生産の持続性は、水稲は連作可能であるが、焼畑の陸稲栽培は 2 年の稲作後 8 年の休閑が必要であると仮定して計算した。 *** 収量と生産の持続性を総合すると低地水田は畑作地の 10 倍以上の持続的生産性がある。これにより 1 ha の水田開発により 10 ha の森林地を確保できる。

水田仮説 (I) は稲作のみではなくて、Fig. 3 のように拡張し、小麦やトウモロコシにも適応可能である。即ち、アジアやラテンアメリカの農民圃場と異なり、アフリカ農民の大部分の圃場には、緑の革命の 3 要素技術である、灌漑、肥料、高収量品種を受け入れる前提となる、区画化された農地基盤が存在しない。このため圃場面の水や土壌条件が多様すぎて、標準化された施肥や灌漑水の管理が不可能で、土と水の保全もできないため高収量品種の特性を生かすことができない。道路やダムや灌漑水路等、線としてのインフラ整備以前に、農民圃場の整備が必要。国作りの基盤は農民の圃場作りにある。農民圃場の基本的な整備ができず、土地区画のない農業システムが、現在まで残された理由は、過去 500 年にわたる欧米による奴隷貿易と植民地支配の傷跡の深さであろう。

このような水田 (Sawah) 仮説 (I) そして次に述べるサワ仮説 (II) の検証のためには、極度に専門分化した現代の農業研究とは性格が異なる、新しいスタイルの総合的な研究が必要である。例えば、1000 ~ 10000 ha 規模の集水域全体を農民の経済社会生活と生態環境の両面から生産性と持続可能性あるいは環境保全性等の視点でより高機能なモデルとして作り、それを性能評価して、常にバージョンアップし続けるような研究である (例えば Fig. 4 に示すような集水域アグロフォレストリー研究)。筆者らが現在実施しているアクションリサーチはそのような研究を目指している (Wakatsuki, 2009)。比喩的に

言えば、新車づくりとその商品化による実際の使用によりさらにバージョンアップした新型車を作り続けるような物づくりにも比較できるような研究スタイルを目指している。新車モデルの 1 台が 1 集水域に対応することになる。水田も畑も森林も全部含むものになり、必然的に大型研究になる。林学、水文、農学、育種、土壌肥料、機械、土木、社会経済、全部含むものになり文理融合型の学際研究でもある。又、長期の生態学的なモニタリングも必要になり、かつ、大規模な生態操作研究になる。

3.3 水田 (Sawah, サワ) 仮説 (II)

水田 (Sawah, サワ) 仮説 (II) は、「水および物質の循環量の少ないアフリカにおいては水田の開発適地の選別が重要であること、適地に開発された水田は適切に管理されれば、畑作の 10 倍以上の持続可能な生産性をもたらすこと」である。

Table 4 は経験的な事実として知られている低地水田システムの集約的持続性の高さを示している。低地水田システムは化学肥料なしで約 2 t ha⁻¹ の収量を持続できることが知られている。日本では明治期に化学肥料技術が欧米から導入される以前の過去 1000 年間、全国平均の収量は約 2 t ha⁻¹ を持続した。又、低地水田稲作は休閑なしで連作が可能であり、水田地帯は数百年あるいは千年のオーダーで稲作を続けても土壌劣化は起こらず収量も低下しない (若月, 2008a, b)。

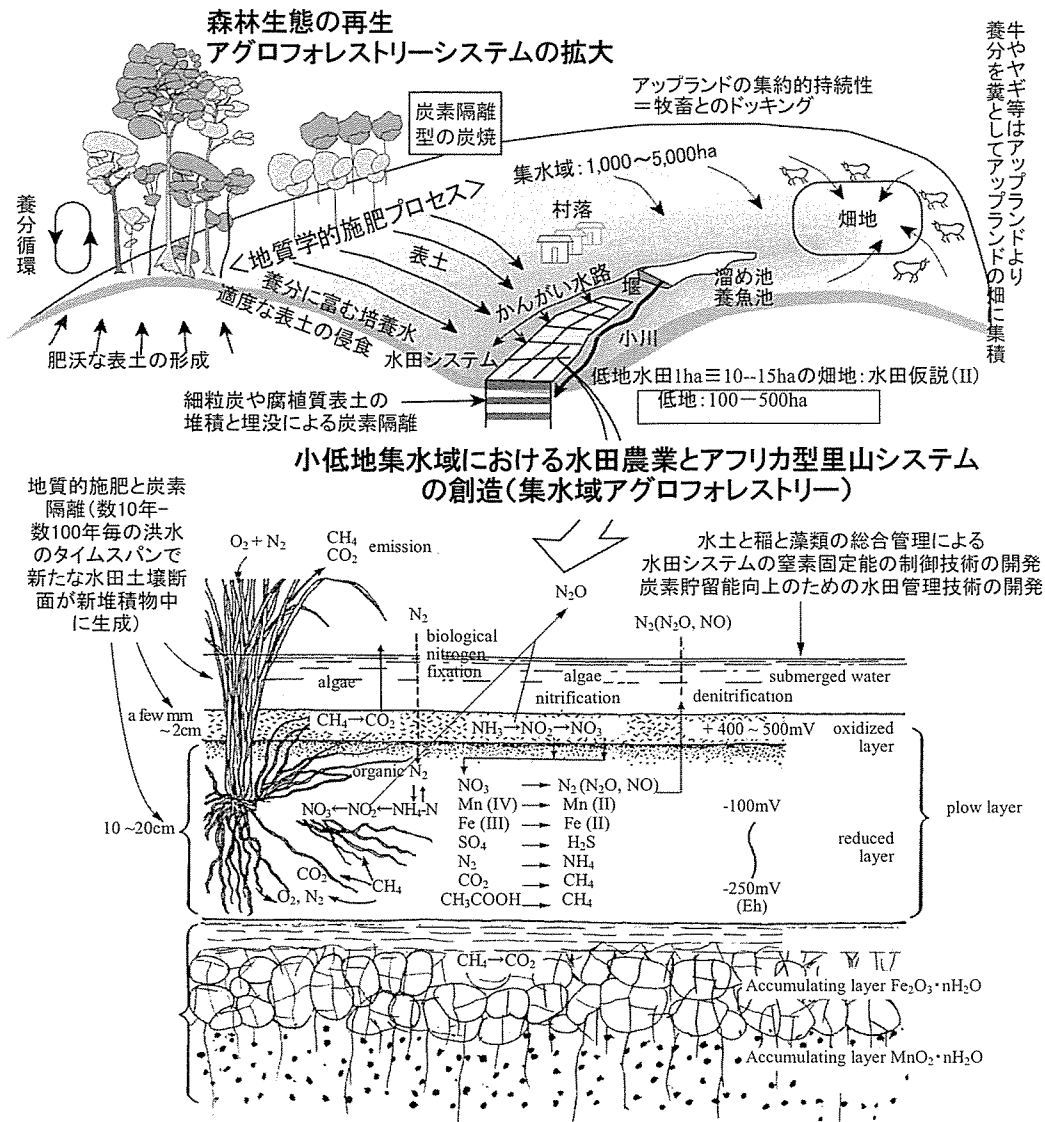


Fig. 4 アフリカの内陸小低地集水域生態系における水田システムの機能. 上図は水田仮説 (II) を定性的に説明する地質学的施肥等のマクロの機構を, 下図は低地水田システムの集約的な生産性を持続可能にするミクロの機構を示す.

低地水田稲作における持続的な農業生産は, 集水域を含めた物質循環によって支えられている. また, この物質循環はアフリカにおいては水田の開発適地の選別と深い関係がある. 以下, このことについてやや詳しく述べる.

Fig. 4 上図に集水域における地質学的施肥の模式図を示す. このプロセスは定性的には自明のものであるが, 定量的なデータを得ることは簡単ではない. 水循環は集水域の母岩を風化して土壌を生成して, 無機養分を溶かし出し森をはぐくむ. 無機養分に富むこの水は低地に集まる. 森で生成した肥沃な表土は低地に流れ落ちて肥沃な低地水田土壌の母材となる. 集水域における土壌生成や土壌侵食と崩積や堆積, 水の表面流去や地下浸透等のプロセスが低地における地質学的施肥をもたらす. 適切な灌漑システムや土地利用パターンと管理法はケイ素やカルシウムやマグネシウムあるいはカリウム等の無機養分の供給性を向上させる. これらの地質学的施肥プロセスが集水域の低地における水田システムの長期的な持続性を支える生態工学的基盤プロセスになる.

地球平均の土壌生成速度は 1 t ha^{-1} 程度と推定される

(Wakatsuki et al., 1993). 雨が多く, 気温が高く, 火山活動が活発で, 火山灰のような新鮮な土壌母材の供給力の高いインドネシアのジャワ島のような地域では, 土壌生成速度が大きく 10 t ha^{-1} 以上に達する. 一般に, アジアでは侵食速度も大きく, 低地土壌生成作用も大きい. 一方, 4 で述べるように, 西アフリカでは土壌生成速度も侵食速度も, 又, 堆積速度もアジアの $5 \sim 10$ 分の 1 程度と推定される. しかし前述したように集水域の低地には水が集まる. Fig. 4 に例示するように, 5000 ha の集水域の平均的な降雨を 1000 mm , 降雨の流出率を 20% , 土壌生成速度を 0.2 t ha^{-1} , 低地の面積を 100 ha (集水域の 2%), 年間の土壌侵食速度を 0.2 t ha^{-1} と仮定すると, 低地に到達する水は $1000 \times 0.2 / 0.02 = 10000 \text{ mm}$ 相当量になる. 又, 侵食流下したアップランドの肥沃な表土も 2% の低地に集まる. 集水域への堆積率を 30% 程度と仮定すると, 低地土壌の生成速度は $0.2 \times 0.3 / 0.02 = 3 \text{ t ha}^{-1}$ となる. 低地に水田のように均平化して畦で囲んだ水田システムが存在すれば, このような侵食土壌を捕集できるので, 地球平均の 3 倍程度の土壌生成速度をベースにした生物生産性を持続することが可能になる.

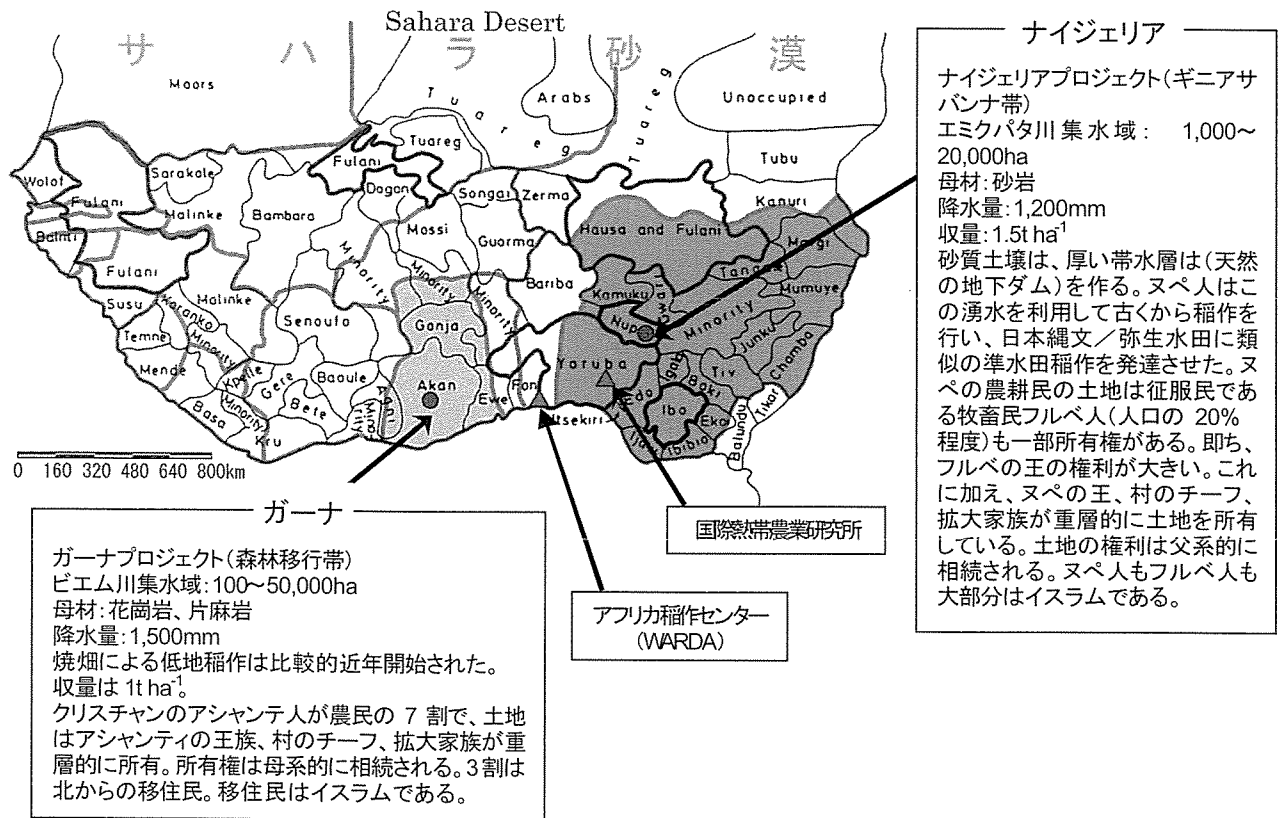


Fig. 5 ナイジェリアとガーナのサワプロジェクトサイト。農民の自力を中心とする低コストの谷地水田開発アクションリサーチサイト (西アフリカの国々の国境線と民族分布は一致しないこと注意)。

貧栄養で水循環の少ない西アフリカでは低地の持続可能な利用が如何に重要か理解できる。

教科書的な事項であるが、Fig. 4 下図に低地水田システムの集約的な生産性を持続可能にするミクロの機構を示す。サブサハラのアフリカにおける水田システム開発は多機能性の湿地創造による集水域の管理システムの構築と捉えることも可能である。湛水下では3価鉄が2価鉄に還元される。このため、酸化鉄による強い固定のため植物が吸収できないリン酸の可給性が顕著に増大する。リン酸肥沃度の低さは西アフリカの低い土壌肥沃度の第一の原因であるので、これは大きな利点となる。さらに、鉄の還元とともに酸性土壌は中性に、又、アルカリ土壌は湛水による炭酸ガスの溶け込みによりやはり中和される。かくして水田システムでは、西アフリカで問題になる微量元素の欠乏もかなり緩和される。

良く知られているように、水田システムは窒素を固定する生態系としても機能する。リン酸の可給性の増大はチッソ固定量も増加させる。水田システムにおける窒素固定量は、日本では20~100 kg ha⁻¹年⁻¹、熱帯圏では20~200 kg ha⁻¹年⁻¹程度と推定される。水田システムにおける窒素固定量は気温に加え、水田の水と土、とりわけ施肥管理が大きく影響することが知られている(De Datta and Buresh, 1986; Kyuma, 2004; Greenland, 1997)。西アフリカの土壌肥沃度は一般に極めて低いので、このようなミクロの肥沃度強化及び持続機構が存在することは水田システムの大きな利点となる。土壌の物

理性の管理による水管理と養分管理が、藻類や微生物の活性を制御し、窒素固定能も制御できる。アフリカに新規開田した水田土壌の物理性と化学性の制御による生物性の制御技術の開発は、将来、重要な研究テーマとなる。

アフリカは乾季が厳しく、その間に低地の表土は硬化し容積重は1.3~1.5 Mg m⁻³以上になることは普通である(Annan-Afful et al., 2004)。水田を造成して植え付け前に代掻きを行うことにより、表土の硬度和容積重を顕著に下げることが重要である。これが分げつを促進し、収量が増加する要因の一つと思われる。アフリカ低地の適地に造成した水田の高収性はこのような表土の物理性の改善による部分も大きいと考えられる。この点は今後の研究課題となる。

4. アフリカ農民による自力開田と水田稲作の実施に関する長期実証研究の紹介

Fig. 5に、これまで中心的に実施してきたナイジェリアとガーナのプロジェクトサイトを、西アフリカ諸国と主要な民族分布とともに示す。民族と国家の分布がほとんど一致しておらず、欧米による植民地支配の悪影響を見る事ができる。

4.1 ナイジェリアサイト

ナイジェリアでは首都のアブジャから西約200 km、車で約3時間のビダ市近郊のエミクパタ川集水域をベンチ

Quick Bird画像写真:ナイジェリア中部Bida市付近のEjiti水田村
2本の矢印の範囲,約10haの水田を農民が開発,2008年1月撮影



Photo. 1 ナイジェリア実証サイト. Bida 市付近の Ejiti 水田の Quick Bird 衛星画像写真.

マークサイトとして選び、1986年以來の長期アクションリサーチを継続しており、2001年までの結果は2冊のモノグラフとして公表した（廣瀬・若月, 1997; Hirose and Wakatsuki, 2002）。

ナイジェリアサイトはギニアサバンナ帯に位置し、年間降水量は1000–1300 mmの範囲にあるが変動は大きい。地質はヌベ砂岩であり、土壌は極めて貧栄養であるが、砂質土壌は厚い帯水層を作る。雨季は6～10月であるが、地下水が上昇する雨季の中期から後半8月ころより湧水が流れはじめ、雨季の終わった10月以降も流出は止まらず1月ころまで村の周辺に流れ続ける。周年流出の続く湧水もまれではない。ヌベ人はこの湧水を利用して古くから準水田稲作（廣瀬・若月, 1997）を行ってきた。日本の縄文期から弥生期初期の水田や、スマトラの焼畑民が作る小区画水田の形態に類似している点もある。一方、水不足時の水争いを避けるために、堰を作らず本流からある割合で取水できるように、分水路を引く方式もあり、バリ島のスパック（Seuwak）システムほど洗練されていないが、スパックと同様なるべく水争いを避けるような灌漑分水システムも作っている。しかし、ヌベ人は遊牧民のフルベの人々と「共存」しているにも関わらず、牛耕農業システムを作ることができず、伝統的なアフリカ鍬のみによる低地稲作であるため、本格的なアジア型の水田まで進化することはできなかったものと思われる。遊牧民であるフルベがこの地域の征服民であることも、ヌベの稲作に牛耕が取り入れられなかった

理由の一つかもしれない（廣瀬・若月, 1997）。

ナイジェリアのビダ付近のアクションリサーチは1986年に開始したが、当初10年間は失敗の連続であった（廣瀬・若月, 1997）。ようやくナイジェリア人のみで自力開田と自力の水田稲作が軌道に乗ったのは2001年以降であった。以下に述べるガーナサイトでの成果を取り入れたからである。現在ではアクションリサーチとは言え15ヶ村以上で水田農民グループが組織化され、農民の自力による開田面積も50 ha規模になった（2008年末）。Photo. 1は高解像度衛星画像であるQuick Birdイメージである。我々のアクションリサーチが行われている村の一つであるEjiti水田村周辺の内陸小低地（エミクバタ川が写真の右上から左下に流れている）に農民が自力で開田した約10 haの水田が見える。矢印の範囲に水田区画が見えている。Ejiti村は人口約300人でビダ市近郊の村で最初にサワ方式の水田開発を受容した村で、サワ（水田）による増収により村人は家の改築やバイク等も購入できるようになっており、<サワ>が村人の標語になっている。

ヌベの伝統的な首長（王様）であるEmirも2006年以降、我々の開田方式を取り入れている。又、2008年からは北のカドナ州にある国連のMillennium Villageとの連携、南のオンド州政府との協力も始まった。今後はこれまでのアクションリサーチの成果を踏まえた、本格的な普及に向けての活動が必要な時期に入っている。

Table 5 西アフリカにおける大規模、小規模、在来の焼畑稲作技術及びエコテクノロジー型水田開発（谷地田農法）に関わる造成費、経済性、維持管理、農民の参加意欲、持続性等の比較（Wakatsuki et al., 2001）.

	大規模灌漑方式	小規模灌漑方式	エコテクノロジー型 サワ開発方式	従来の 焼畑稲作技術
ヘクタール当たりの 開発費	20,000–30,000 US\$ ha ⁻¹	20,000–30,000 US\$ ha ⁻¹	1,000–4,000 US\$ ha ⁻¹	20–30 US\$ ha ⁻¹
ヘクタール当たりの 売上と収量 (t ha ⁻¹)	1,000–2,000 US\$ ha ⁻¹ (4 t ha ⁻¹)	1,000–2,000 US\$ ha ⁻¹ (4 t ha ⁻¹)	1,000–2,000 US\$ ha ⁻¹ (4 t ha ⁻¹)	100–300 US\$ ha ⁻¹ (4 t ha ⁻¹)
運営費 (含む機械)	中～高 (300–600 US\$ ha ⁻¹)	中～高 (300–600 US\$ ha ⁻¹)	中 (200–300 US\$ ha ⁻¹)	低 (10–20 US\$ ha ⁻¹)
農民参加度	低	中～高	高	高
開田のオーナーシップ	政府	政府	農民	農民
技術の適応性の 難易度	長期間を要す、 定着困難	短～中期間で定着し 比較的困難	短～中期間で可能、 デモンストレーション と OJT (実地訓練) による技術移転	若干の 技術移転のみ
技術の持続性	低	低～中	高	中
環境への影響	高	中	低	中

Table 6 ビエムソ村 O, B, Z とアドギャマ村の水田農民グループの水田稲作と周辺の伝統的非水田低地稲作地の経済収支の比較 (2006 年度の結果).

Farmer-group	Paddy Grain yield (kg ha ⁻¹)	Gross Revenue (US\$ ha ⁻¹)	Production* Cost (US\$ ha ⁻¹)	Net Revenue (US\$ ha ⁻¹)
Adugyama	4334	1712	428	1284
Biemso – O	4675	1847	350	1497
Biemso – B	4736	1871	324	1547
Biemso – Z	4675	1847	349	1498
Traditional	900	355	150	205

* 新規開田のための土壌移動や均平化を行う耕運機費用 (1000 US\$ ha⁻¹) は除く。ただし、開田後の水田稲作のための耕耘機費用 (150 US\$ ha⁻¹) は含む。

4.2 ガーナサイト

ガーナでは Fig. 5 に示すように年間降雨量約 1500 mm の森林移行帯に分布する、各種サイズの内陸小低地集水域をベンチマークサイトとして、1994～96 年の基礎調査を受けて、1997–2001 まで JICA の研究協力プロジェクトにより、低地水田システムの持続可能な開発方式と管理方式を見出すための実証調査を行った。これまで台湾 (若月・謝, 2003) や日本の ODA 等による水田稲作技術協力は種々実施されてきたが、現在ではこれまでのような方式による水田開発は頓挫している。Table 5 に示すように、ODA ベースの過去の大規模灌漑水田開発はもちろんのこと、現在の主流である小規模灌漑方式でも、1 ha 当たりの開発費用は 2～3 万ドルに達しており、仮に 4～5 t ha⁻¹ の初収量を実現できても、米の販売価格は 1000～1500 ドル ha⁻¹ 程度にすぎないので、2～3 万ドルの開発費用を償還できず、持続可能な開発方式ではないからである。水田の開発コストを 5 分の 1～10 分の 1 まで削減してかつ 3～5 t ha⁻¹ の収量を実現する新しい開発方式と農法が必要になる。この研究協力により、Table 5 に示すように種々の試行錯誤の中から谷地田農法 (農民の自助努力を中心とするエコテクノロジー型の水田<サワ>開発方式) を生み出すことができた (Wakatsuki et al., 2001)。

10 人程度のメンバーからなる農民グループへの 6000 ドル程度のローンを基本とする方式は、全く新しい方式であり今後も試行錯誤のプロセスが必要と思われる。今

までのアクションリサーチにより、ベンチマークサイトでは、最も条件に恵まれてかつ技術レベルと意欲の高い 2 つの農民グループがこの 6000 ドルのローンを受けて、水田開発を実施して稲作を行い 4 t ha⁻¹ 以上の収量を持続的に実現できるレベルに達している (Table 6)。Table 6 に示すように 5 ha 以上の水田が自力で開発されれば、耕耘機費用 (約 5000 ドル) のローンの償還は可能になるからである。

4.3 最新の取り組み

2008 年に日本で開催された第 4 回東京アフリカ開発会議を受けて JICA や AGRA による CARD (2008) の枠組みの中で、アフリカの稲作振興に農民の自助努力をサポートして、低コストで持続性の高い、サワ方式のような水田稲作の振興が試みられられ始めている。草の根レベルでは 10 年以上前から始まったサブサハラのアフリカにおける低地水田稲作への展開をサポートするものであり、ようやく水田稲作の振興によるアフリカの緑の革命への道筋が見えてきたといえる。2008 年度より開始された JIRCAS—農村開発部チームによる、ガーナとエチオピアにおける水田稲作基盤の整備事業、2009 年度より本格的に始まろうとしている JICA のガーナにおける稲作振興プロジェクト、WARDA と農水省による SMART-IVs (Sawah, Market Access and Rice Technologies for Inland Valleys) の成果が期待される (Warda, 2009)。

サブサハラのアフリカの水田は持続可能か？アジアモンスーンがアジアにおける活
 発な土壌生成と侵食と低地へ堆積をもたらし1.3億ヘクタールの
 水田を支えているがサブサハラのアフリカではそのような低地土壌生成作用はアジ
 アの5分の1から10分の1程度である。一方、サブサハラのアフリカには数億 ha
 の低地が分布している。水田適地の低地の見極めが重要。

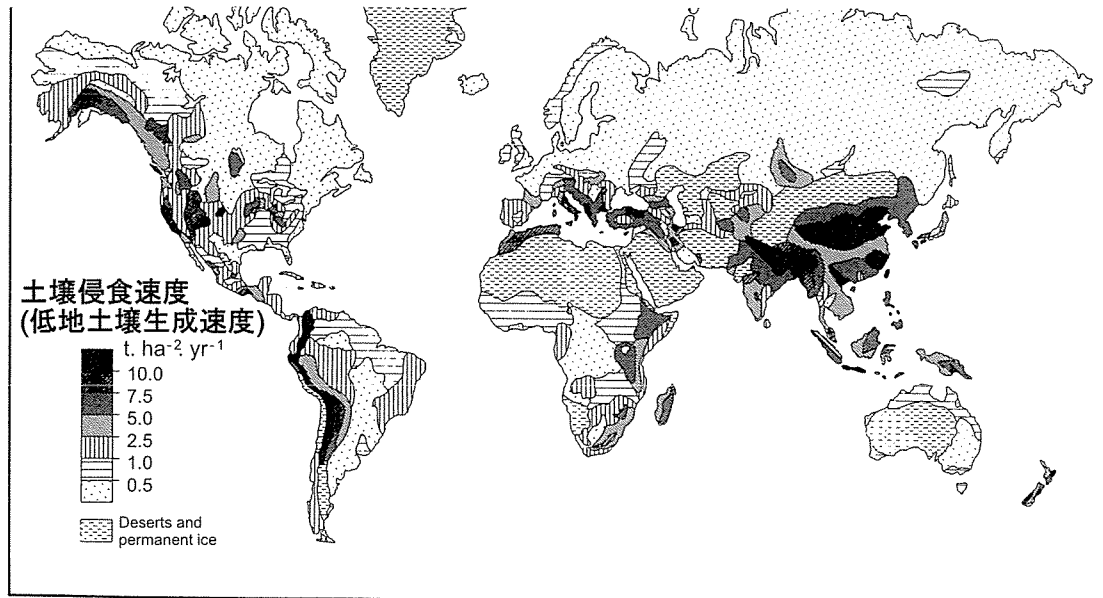


Fig. 6 世界における土壌侵食速度の分布 (Walling, 1983).

5. サブサハラのアフリカにおける水田農業の ポテンシャルと水田適地選定に関わる 土壌物理学的問題点

Table 7 に示すようにサブサハラのアフリカに分布する低地面積は極めて大きく約 2.4 億 ha もある (Windmajier and Andriesse, 1993). しかしながら太平洋とユーラシアとりわけヒマラヤ山脈のもたらすアジアモンスーンに比べ、アフリカのモンスーンのスケールは約 5 分の 1 程度しかない (Trenberth et al., 2000; Qian et al., 2002; Levinson, 2005). すなわち、降雨が少なく、安定地塊であるため、アフリカ集水域の土壌生成速度や養分供給速度は日本やアジアに比べて 5 分の 1~10 分の 1 程度である。そのため、数億ヘクタールと推定されるアフリカの低地のうち、水田開発適地は限られる (Table 7).

筆者らのこれまでのこの地域の内陸小低地における水田開発の経験によると、降雨が 2000 mm 以上のシエラレオーネ等では低地の約半分が水田化可能、1500 mm のクマシ周辺では低地の 10~20%、1200 mm のギニアサバンナ帯では低地の 5~10%、それ以北のスーダンサバンナやサヘル帯では低地の 5% 以下しか灌漑水田は持続可能ではないと推定される。アジアの降雨量との単純な比較で推定すると 1.3 億 ha の 5 分の 1 の 2000~3000 万 ha が灌漑水田ポテンシャル面積になる。アフリカの主な低地のタイプ毎の推定値の合計は 1800~3400 万 ha である (Table 7: 若月, 1995; 廣瀬・若月, 1997; Hirose and Wakatsuki, 2002). およそ 2000 万 ha の灌漑水田ポテンシャルと考えて大きな間違いはないと思われる。

Table 7 サブサハラアフリカにおける各種低地の分布面積 (Windmeijer and Andriesse, 1993).

低地の種類	面積 (百万 ha)	Percentage (%)
沿岸低地	16.5 (3?)	7 (18%)
内陸大低地	107.5 (2?)	45 (2%)
氾濫原	30.0 (5?)	12 (17%)
小低地 (里山低地)	85.0 (10?)	36 (12%)

カッコ内の数値は若月による水田 (Sawah) 開発可能面積の推定値 (単位: 百万 ha)。世界のモンスーン降雨の 75% はアジアに分布し、1.3 億 ha の灌漑水田を支えている。アフリカのモンスーン降雨はアジアの約 5 分の 1、15% であるので最大 2000 万 ha の灌漑水田開発ポテンシャルが推定される。

Fig. 6 に示すように水循環量の少ないサブサハラのアフリカでは単位面積当たりの土壌侵食速度はアジアの 10 分の 1 程度に過ぎない。すでに述べてきたこれまでの我々の西アフリカにおける水田開発のアクションリサーチの経験とも整合するが、このことが、全低地面積約 2.5 億 ha の 10 分の 1 程度しか灌漑水田稲作ポテンシャルがないと推定される要因である。土壌侵食速度が小さいことは水田土壌のもととなる低地土壌生成や堆積速度が小さいことになり、低地土壌の新陳代謝が小さいことを意味する。Fig. 7 に示すようにサブサハラのアフリカの低地、とりわけ内陸小低地が極めて多様な地形と土壌と水文環境を有するのはこのためである。適地適田開発のための適地選定と適切な灌漑システムの選定が重要となる。Table 7 に示すように、サブサハラのアフリカの低地面積は約 2.5 億 ha と推定されるが、低地土壌生成作用がアジアの 5~10 分の 1 と小さいため、アジアの低地に比べてアップランド的な特性を持つ低地が多く、多様な生態環境となる。この結果、全低地面積の 10% 程度しか灌漑水田は開発可能でないと推定される。集水域低地

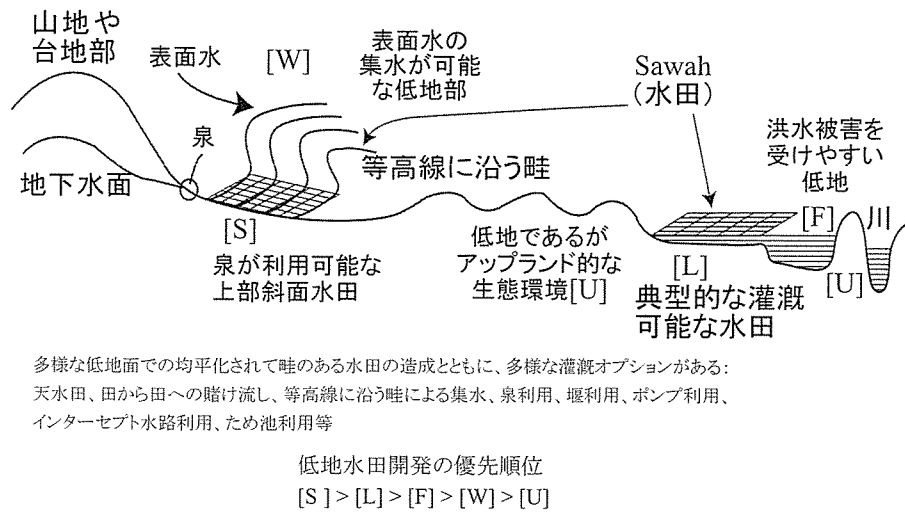


Fig. 7 サブサハラアフリカの内陸小低地の地形と水条件の多様性。

Table 8 アフリカで農民が自力で水田を開発し、水田農業を持続的に実施するために必要な技術の内容と農村社会の経済及び土地制度等の条件。

(1) 新規開田のためのコスト (\$ ha ⁻¹)	(3) 水田システムのデザインと質と量	(4) 水田稲作技術
耕運機費用	総合評価	水田の水管理技術 (総合)
同スペアパーツ代	取水源 (総合評価)	水源管理
燃料代	小河川の堰と水路	水の分配
ヤブの開墾	中河川の堰と水路	植え付け時の均平化
畦作り、水路切削、均平化	泉	畦の管理
雇用労働	湧き水とインターセプト水路	代掻き
農具と資材費	ため池養魚	雑草管理
研究者の謝金日当宿泊費	ポンプ	施肥 (N-P ₂ O ₅ -K ₂ O kg ha ⁻¹)
普及員の謝金日当宿泊費	氾濫取水	品種
訓練農民の日当宿泊費	洪水対策	推定収量 (t ha ⁻¹)
合計	干ばつ対策	(5) 土地制度
勾配 %	分水システムと方法	水田の持続性と土地制度 (総合)
表面の凸凹	水消費量 (t 作 ⁻¹)	所有者
平均の1筆水田面積 (ha)	減水深 (mm day ⁻¹)	借地条件
土壌移動量 (t ha ⁻¹)	水質と水量	1-2 年
(2) 農民グループの評価	土壌肥沃度	5-6 年
リーダーの資質	土性	10 年以上
グループの結束度	水田のレイアウト	99 年
耕運機の運転技能	水田の均平度	半所有
(耕作、代掻き、土壌移動、均平化)	畦の質	分益小作
耕運機の維持管理技能		開発面積の 33% の分益
水田システム開発の技能		開発面積の 50% の分益
水田稲作の技能		開発面積の 66% の分益
参加農民数		
民族・男女比		

の地形や土壌の微小な差と水がかりの差により、きめ細かな線引きが必要である。全低地の 10% 程度と推定される水田の適地判定が重要となる (藤井, 2009)。

Fig. 7 および Fig. 8 に示すように、多様な地形、土壌および水文環境を科学的に解明することにより、水田適地の選定・線引きを行う必要がある。このような作業には、水・物質循環を扱う水文学や土壌物理学などの分野の研究協力、例えば、基礎データの提供、モデルによる物質循環の試算、モニタリング手法に係る技術的支援が不可欠である。

水田適地の選定に関わる自然科学的な視点に加え、社

会科学的な視点もまた重要である。アフリカでは、土地所有や利用権が重層的かつ多様な共有型であり、個々の農民の圃場環境基盤を改良するためのインセンティブが乏しいので、水田の飛躍的な多収性を広範にデモンストレーションし、新しい土地管理・所有システムを可能にし、水田開発のモチベーションを高めることが重要である (Fig. 8)。加えて、Table 8 に示すような、総合的な水田開発技能の訓練も必要になる。即ち、新規開田のためのコスト。ここでは重機を使わず、小型耕耘機による開田技術の取得がカギとなる。幸い、アジアと異なり平均勾配が 1% 以下の、極めて平坦な低地が大部分である

ので、代掻きと同時に土を耕耘機により移動させることが可能になる。ただし、グループによる共同作業が重要であるので、水田農民グループの協力関係の質やグループの農民の資質や技能レベルが極めて重要になる。とりわけ耕耘機のハンドリングや維持管理は重要である。又、低地の土壌や地形水条件は多様であるので、適地に適切な水田システムをデザインして開発することがポイントとなる。このためには研究者や技術者が農民の水文条件に関する長期の経験を取り入れて低地生態環境の評価と適切なシステム的设计研究が必要になる。このようにして開田された水田における持続可能な水田稲作技術の農民への教育・訓練も重要である。

6. 終わりに

—アフリカ水田開発と日本の役割—

9. 11 同時多発テロ以降ますますはっきりしてきたことは、地球環境問題の解決と南北問題の解決は不可分であり、それが21世紀の最大の課題であることである。Fig. 9は過去500年の欧米によるグローバリゼーションを俯瞰したものである。この500年の欧米による世界制覇と新世界の開発は欧米への富の蓄積と、それをベースにした欧米科学技術の発展、そしてその恩恵による豊かな社会の実現をもたらした。日本は欧米科学技術の恩恵を最大限に受けて現在の豊かさを実現したが、現在の地球社会の中で日本の存在哲学（アイデンティティ）のなさ故の「精神文化的危機」も顕在化している。

欧米諸国の開発や発展のために、1500～1800年の間に奴隷として新大陸に移送され、奴隷狩り戦争で犠牲になったアフリカ人の数は2000万人程度と推定されている。数100年にわたって毎年全人口の1%程度の若者が失われた。このインパクトの大きさは第二次世界大戦における日本人の戦死者が毎年全人口の1%程度であった「に過ぎない」ことから想像される。その後さらに150年間、欧米諸国による植民地支配が続いた。サブサハラアフリカの環境と南北問題にはこのような背景があると思われる。明治維新期の脱亜入欧以来、欧米中心主義の虜になり、アフリカとは別の意味の危機の中にある日本こそ、このアフリカの危機を解決するための国際貢献が求められている。アフリカにおけるこのような実践的な水田研究は日本からのオリジナルな貢献が可能で、土壌物理学分野の貢献が期待される分野でもあり、世界をリードできる分野である。サブサハラアフリカの中核地域である西アフリカでは、人口増に追いつけない食料生産、砂漠化等の食料環境危機が深刻化し、慢性的な社会・政治不安の背景になっており、21世紀の地球社会の大きな不安定要因になりつつある。緑の革命の実現はアフリカの持続可能な開発の基盤を作るものになり、欧米による過去500年のグローバリゼーションを乗り越えて、新しい地球社会の建設に繋がる可能性があり、日本農業は中心的な貢献ができる。

謝辞

本研究の実施には科学研究費補助金（基盤研究S15101002：西アフリカの食料増産と劣化環境修復のための集水域生態工学、及び、特別推進研究19002001：水田エコテクノロジーによる西アフリカの緑の革命実現とアフリカ型里山集水域の創造）の支援を受けた。

引用文献

- AGRA (2009): <http://www.agra-alliance.org/>
- Annan-Afful, E., Iwashima, N., Otoo, E., Asubonteng, K.O., Kubota, D., Kamidouzono, A., Masunaga, T., and Wakatsuki, T. (2004): Nutrient and bulk density characteristics of soil profiles in six land use systems along topo-sequences in inland valleys Watersheds of Ahantei region, Ghana. *Soil Sci. Plant Nutr.*, 50(5): 649–664.
- ARI (2002): The African Rice Initiative (ARI): NERICA consortium Security in Sub Saharan Africa, pp.40, WARDA, Cotonou.
- CARD (2008): <http://www.jica.go.jp/activities/issues/agricul/pdf/card>, アフリカ稲作振興のための共同体—アフリカの玉米生産増進に向けたイニシアティブについて, JICA, 農村開発部, 20.
- De Datta, S.K. and Buresh, R. J. (1986): Integrated nitrogen management in irrigated rice. *Adv. Soil Sci.*, 10: 143–169.
- FAOSTAT (2006): <http://www.faostat.fao.org/>
- 藤永茂 (2006) : 「蘭の奥」の奥—コンラッド／植民地主義者／アフリカの重荷. pp.237, 三交出版, 東京.
- 藤井秀人 (2009) : 西アフリカ内陸小低地における水田適地の選定手法. http://www.jiid.or.jp/files/04public/02ardec/ardec40/key_note2.htm.
- Greenland, D.J. (1997): Sustainability of rice farming. pp.273, CAB Int'l, U.K. and IIRI, Los Banos.
- 廣瀬昌平・若月利之 (1997) : 西アフリカ・サバンナの生態環境の修復と農村の再生. pp.506, 農林統計協会, 東京.
- Hirose, S. and Wakatsuki, T. (2002): Restoration of inland valley ecosystems in West Africa, pp.600, Association of Agriculture & Forestry Statistics, Tokyo.
- IITA (2008): <http://www.iita.org/cms/details/news-details.aspx?articleid=1615&zoneid=81>
- Kawaguchi, K. and Kyuma, K (1977): Paddy soils in tropical Asia, their material nature and fertility. pp.258, University press of Hawaii, Honolulu.
- Kyuma, K. (2004): Paddy soil science, pp.280, Kyoto University Press.
- Levinson, D.H. (2005): State of the climate in 2004. BAMS, American Meteorological Society: 1–89.
- Orr, S., Sumberg, J., Ernstein, O. and Oswald, A. (2008): Funding international agricultural research and the need to be noticed. A case study of NERICs rice. *Outlook on AGRICULTURE*, 37(3): 159–168.
- Qian, W., Deb, Y., Zhu, Y. and Dong, W. (2002): Demarcating the worldwide monsoon. *Theor. Appl. Climatol.*, 71: 1–16.

- 櫻井武司 (2003): 西アフリカ稲作開発協会 (WARDA) の成果と今後の展開方向, ARDEC, 28: 5-10.
- Sanchez, P. (1976): Properties and management of soils in the tropics. p.45, John Wiley & Sons, New York.
- Thomas, H. (1997): The slave trade—The story of the Atlantic slave trade. pp.1440-1870, Simon & Schuster, New York.
- Trenberth, K.E., Stepaniak, D.P., Caron, J.M. (2000): The global monsoon as seen through the divergent atmospheric circulation. *Journal of Climate*, 13: 3969-3993.
- Wakatsuki, T., Rasyidin, A., and Naganawa, T. (1993): Multiple regression method for estimating rates of weathering and soil formation in watersheds. *Soil Sci. Plant Nutr.*, 39: 153-159.
- 若月利之 (1995): 水田開発ポテンシャル, 「新版稲作技術協力マニュアル (応用編) 西アフリカ稲作—コートジボアールの稲作」. pp.82-142, 全国農業改良普及協会, 東京.
- 若月利之 (2003): サブサハラアフリカの農業・農村開発と日本の役割. *沙漠研究*, 13(2): 83-100.
- 若月利之・謝順景 (2003): アフリカ稲作開発史. *国際農林業協力*, 26(3): 17-29.
- 若月利之 (2008a): 西アフリカにおける水田エコテクノロジーによる緑の革命実現を目指して—ナイジェリア・ヌベ, ガーナ・アシャンテにおける経験から, 松園万亀雄・縄田浩志・石田慎一郎編著「アフリカの人間開発, 実践と文化人類学」, みんぱく実践人類学シリーズ 2. 第 4 章, pp.173-219, 明石書店, 東京.
- 若月利之 (2008b): 炭素貯留能を強化する水田管理, 農業と経済 2008 年 7 月臨時増刊号: 低炭素社会と農林業. pp.131-137, 昭和堂, 京都.
- Wakatsuki, T., Shinmura, Y., Otoo, E., and Olaniyan, G.O. (1998): Sawah system for integrated watershed management of small inland valleys in West Africa. In FAO ed., *Water Report N0.17, Institutional and Technical Options in the Development and Management of Small Scale Irrigation*. pp.45-60, FAO, Rome
- Wakatsuki, T., Otoo, E., Andah, W.E.I., Cobbina, J., Buri, M.M., and Kubota, D. eds. (2001): Integrated watershed management of inland valley in Ghana and West Africa: Ecotechnology Approach, Final Report on JICA/CRI joint study project, CRI, Kumasi. pp.337, Ghana and JICA, Tokyo.
- Wakatsuki, T. and Masunaga, T. (2005): Ecological engineering for sustainable food production and the restoration of degraded watersheds in tropics of Low pH soils: Focus on West Africa. *Soil Sci. Plant Nutr.* 51(5): 629-636.
- Wakatsuki, T. (2009): <http://www.kinki-ecotech.jp/>
- Walling, D.H. (1983): The sediment delivery problem. *J. Hydrological Sci.* 65: 209-237.
- WARDA (1988): WARDA's strategic plan: 1990-2000. pp.66, WARDA, Bouake.
- WARDA (2004): Strategic Plan: 2003-2012, WARDA—The African Rice Center, pp.58, Bouake.
- WARDA (2009): <http://www.wards.org>
- Windmeijer, P.N. and Andriessse, W. (1993): Inland Valley in West Africa: An agroecological characterization of rice-growing environment, pp.160, ILRI, Wageningen.
- Wopereis, M.C.S., Diagne, A., Rodenberg, J., Sie, M. and Somado, E.A. (2008): Why NERICA is a successful innovation for African farmers. *Outlook on AGRICULTURE*, 37(3): 169-176.

要 旨

ガーナ, ナイジェリア等における筆者らの水田稲作研究に基づき, アフリカの水田農業において緑の革命が成功していない自然科学・社会科学的要因を述べ, 緑の革命の実現を可能にするための二つの仮説 (水田 (Sawah, サワ) 仮説) について解説した. 第一の仮説は, 「アフリカに緑の革命をもたらす技術は, バイオテクノロジーのような品種改良だけでは不十分であり, 農民の穀物栽培生態環境の改良を行うエコテクノロジー (生態工学技術) が必要」であり, 第二の仮説は, 「水および物質の循環量の少ないアフリカにおいては水田の開発適地の選別が重要であることを前提に, 適地に開発された水田は適切に管理されれば, 畑作の 10 倍以上の持続可能な生産性をもたらすこと」である. 後者において, 水田の開発適地の選別のためには, 集水域における物質循環の把握が重要であり, 土壌物理学分野の研究協力が不可欠であることを述べた.

キーワード: 水田 (サワ) 仮説 (I), 水田 (サワ) 仮説 (II), アフリカ緑の革命, 低地土壌生成速度, 集水域生態工学