アフリカ地域での地方電化事業における配電設備形成手法について

非会員　小川　忠之*　　非会員　近藤　智則*　　非会員　阿部　真*

Plan and Design of Power Distribution System for Rural Electrification in Africa

Tadayuki Ogawa*, Non-member, Tomonori Kondo*, Non-member, Makoto Abe*, Non-member

The electrification rate in African region is the lowest in the world. In order to alleviate the desperate poverty in rural areas, electrification projects by international and bilateral donors are in progress. However, rural electrification projects should be adequately planned and designed in order to reduce the incremental cost of supply as well as keep the minimum quality and reliability of power supply.

キーワード：アフリカ、地方電化、電化率、配電

Keywords：Africa, Rural Electrification, Access to Electricity, Power Distribution

1.　アフリカ地域の電化率

電力供給は、開発途上国の産業・経済発展や、住民生活の向上に欠かせない基幹インフラである。特に、農業及び家内製手工業に依存する地方部においては、電力供給により生産的活動が促進され、雇用の創出、都市部との貧困格差是正等の効果が期待されている。しかしながら、世界全体では、未だ16億人が電力供給にアクセスできない状況であり、特にサブサハラ・アフリカ地域では電化率が低くなっている（図1参照）。また、東アジアやラテン・アメリカ地域では1970年代以降に急速に電化率が向上しているが、サブサハラ・アフリカ地域では電化事業の進展は遅れており、高い貧困発生率とも相関関係がある（図2参照）。

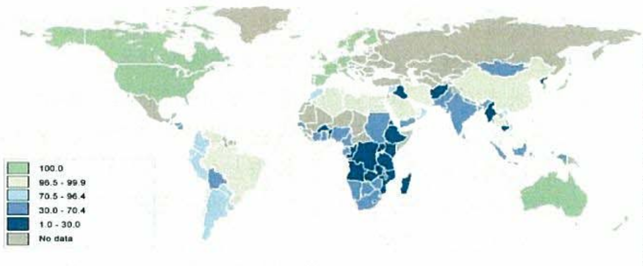

図1　世界の電化率（人口ベース、2004年）
Figure 1. World Electrification Rate (2004)
出所：Human Development Report (UNDP)

* 八千代エンジニヤリング株式会社
〒161-8575　東京都新宿区西落合 2-18-12
Yachiyo Engineering Co., Ltd.
2-18-12, Nishiochiai, Shinjuku-Ku, Tokyo 161-8575

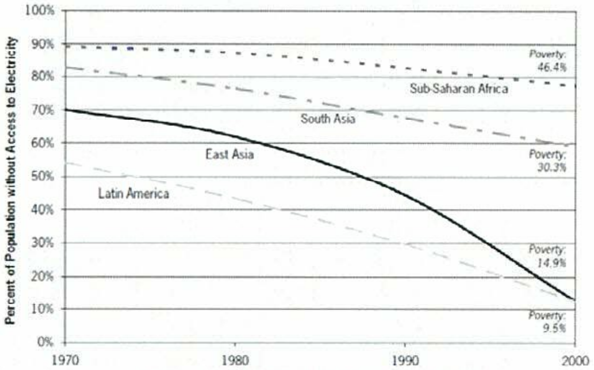

図2　地域毎の人口電化率の推移
Figure 2. Progress of Electrification Rate
出所：引用文献(1)

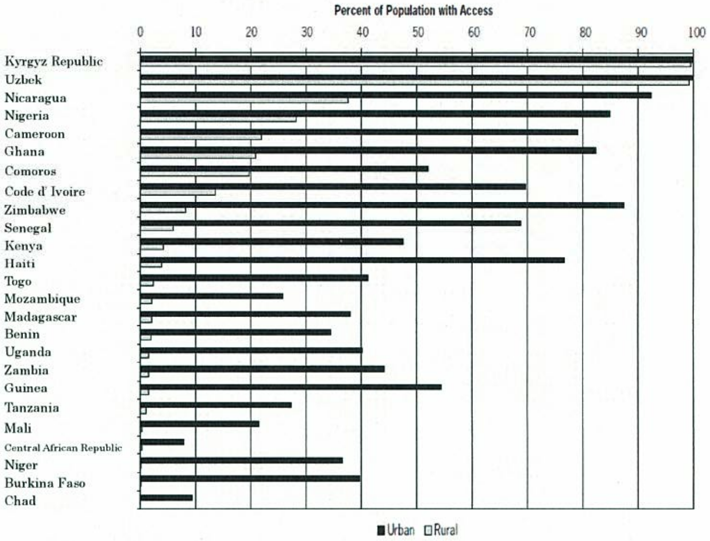

図3　都市部と地方部の人口電化率
Figure 3. Electrification Rate in Urban and Rural
出所：引用文献(1)

また、アフリカ地域の電化率を詳細に見ると、都市部では 40～60%と比較的高いものの、地方部では 5%以下に留まっている国が多い（図 3 参照）。これは、途上国政府の自己資金や、我が国を含むドナーの資金援助による地方電化事業の実施を上回る速度で、地方部の住民人口が急速に増加しているのが最大の原因である。一般的に地方電化の手法としては、配電線（グリッド）延長、ディーゼル発電機や太陽光発電、マイクロ水力発電によるオフグリッド地方電化があるが、本稿では、今後も地方電化の主流となる配電線延長による配電設備計画・設計手法について考察する。

2. 地方電化事業における配電計画

〈2･1〉 配電系統計画

送変電設備が点と線で計画されるのに対し、地方電化事業における配電設備は面的に広がり、かつ個々の設備規模は小規模であるが（住宅で 100W 前後）、全体の設備量は膨大であり、事業実施後の運営維持管理には相応の体制（保守管理要員、予算、機材）を必要とする。また、設備が住民の生活空間と密着していることから、配電設備の運用は需要家の生活習慣、利用形態に密接に関係している事に留意して計画する必要がある。

アフリカ地域においても、配電計画は中長期的な電力需要想定を踏まえ、合理的かつ公平な基準で優先順位付けした地方電化マスタープランに従い、最小費用による電化手法に基づいて実施されるべきであるが、現実的には政治家の地元への利益還元等に利用されるケースもあり、対象地域の選定には十分留意する必要がある。

ガーナ、ナイジェリア、タンザニア、ザンビア等、英国を旧宗主国とする国では、英国標準（British Standard）を採用しており、中圧配電系統が 33kV 及び 11kV の三相三線式、低圧系統は 415/240V 三相四線式（街路灯専用線を設ける場合は五線式）で需要家へ配電し、配電用変電所（132/33kV）の 33kV 母線で接地変圧器により中性点接地している（図 4 参照）。11kV 中圧線は、都市部等需要密度の高い地域において、短距離配電線に適用されるが、地方電化においては長亘長による電圧降下が問題になることから、33kV 中圧線が利用されることが多い。特に、ナイジェリア等の広大な国土を抱えるアフリカ諸国では、基幹送電線（330kV、220kV 他）、変電所の整備が遅れていることから、少数の拠点となる変電所に負荷が集中し、一次母線の電圧が既に規定範囲外に変動している。このような変電所から、長亘長の配電線を需要家近傍まで延長しているため、線路末端の電圧降下が問題となり、需要家機器の動作不良、故障等の障害の原因となっている。

系統構成として、都市部ではオープンループ方式（2 回線の配電線を常時開放の開閉器で連系する）又はクローズドループ方式（常時投入の開閉器により連系）のいずれかが採用されるが、大部分の地方電化においては、他回線との連系点のない樹枝状配電線となる。なお、仏国を旧宗主国とするルワンダ等においては、中圧配電線は 30kV、15kV 及び 6.6kV にて構成されている。

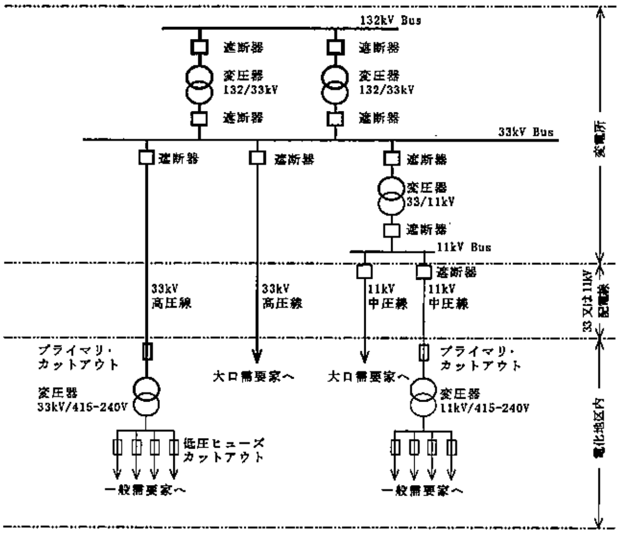

図 4 地方電化における配電系統構成
Figure 4. Distribution System for Rural Electrification
出所：引用文献[3]

〈2･2〉 配電方式（英国式、北米式）

左記の通り、大部分のアフリカ諸国では英国標準に基づく配電方式を採用している。この配電方式は、三相三線式中圧配電線により供給される、大容量（100kVA 以上）の三相変圧器を需要地中心に配置し、各需要家まで三相四線式の低圧配電線を延長する。これに対し、北米式の配電方式では、中圧配電線は三相四線式中性点多重接地式であり、中性点は配電線途中で複数箇所接地される。また、配電用変圧器には小容量（20kVA 以上）の単相変圧器を多数台、負荷に近接した場所に分散設置する（図 5 参照）。三相負荷への供給には、日本と同様に異容量 V 結線とする。

小規模の負荷が広範囲に分散した地方電化への適用としては、北米式は以下の点で英国式に比べて優れているが、アフリカ地域では過去の経緯から英国式が主流となっており、今後の活用が期待される。

(1) 需要家が広範囲に分散しているため、英国式では低圧配電線が長くなり、配電ロスの原因となる。
(2) 北米式では、単相負荷に対して単相変圧器で供給できるが、英国式では三相変圧器を設置するため、容量・供給相ともに過剰な設備投資となりやすい。また、電力会社による変圧器の接続相管理も徹底されていないことから、相間の不平衡をもたらす。
(3) 北米式では、中圧配電線は単相二線式（電圧線＋中性線）の構成となり、腕金・腕木が不要であり、碍子等の装柱金物のコストを大幅に削減できる。
(4) 地方電化の対象地域では、資機材輸送のための道路網が未整備の場合が多く、大容量の三相変圧器の輸送、並びに据付工事が困難となる場合が多い。
(5) 英国式では、変圧器 1 台の事故により供給エリアが全停電となるが、北米式では複数台の変圧器により供給

されるため、停電エリアを最小限に抑えることができる。また、変圧器の容量が小さいため、事故復旧工事に特殊車輌等を必要とせず、比較的容易である。

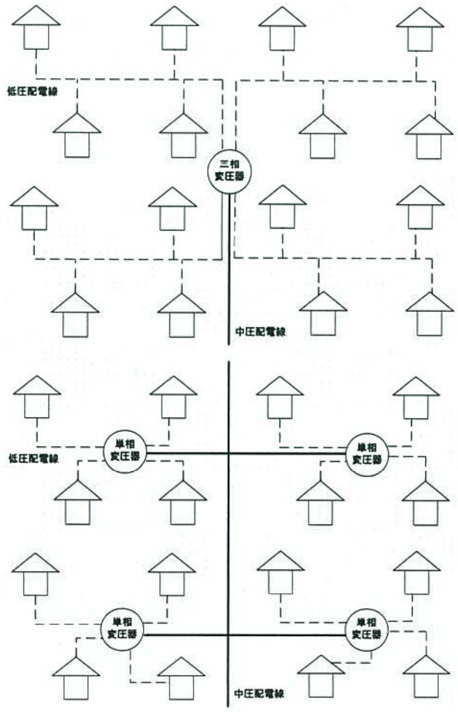

図5　配電方式の比較（上が英国式、下が北米式）
Figure 5. Comparison of Distribution System (British(above) and North America (below) style)

〈2·3〉　単相配電の採用について

日本の電力会社においても、住宅等需要密度の低い地域では高圧（6.6kV）単相二線式による配電を採用し、コスト削減を図っている。引用文献(2)によると、地方電化に単相配電を採用することで、30~40%のライフサイクル費用を削減することができるとしている（図6参照）が、アフリカ地域においては、国・地域によってはコーンミル等三相負荷への供給が発生する可能性があり、単相配電の採用には、村落社会経済調査を踏まえた供給計画について、コミュニティとの事前合意が重要である。

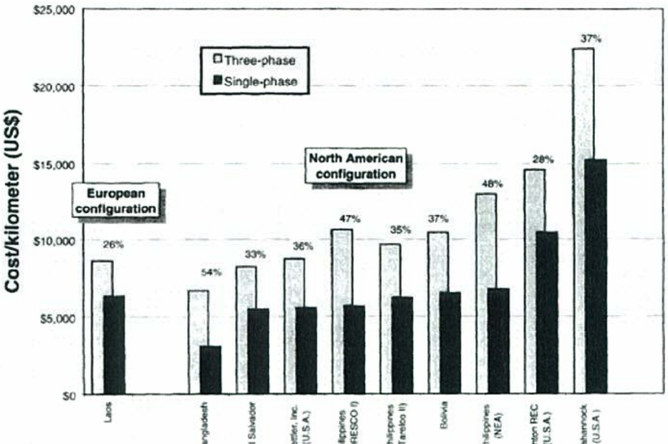

図6　単相・三相配電方式のコスト比較
Figure 6. Cost Comparison of Single/Three Phase Distribution System
出所：引用文献(2)

単相配電の究極的な方式として、単相配電方式の中性線を大地にて共用する、一線大地帰路方式（Single Wire Earth Return: SWER）も、ウガンダ、ガーナ等一部のアフリカ諸国で導入されている（図7参照）。本方式は、オーストラリア、カナダ、ニュージーランドの地方部等、需要密度の低い地域に長距離単相配電線を布設する場合に積極的に導入されている。本方式では、変圧器他の接地箇所での接地抵抗地を 2～3Ωまで低減する必要があり、コスト増の要因となるが、以下の長所により、今後アフリカの地方電化で導入が進むと想定される。

(1) 電線総延長が短くなる。
(2) 風等による電線の相間短絡事故がなく、このため電柱径間を 200～300m 程度まで延ばし、電柱総本数を少なくすることができる。
(3) 腕金、碍子など装柱金物を節減できる。

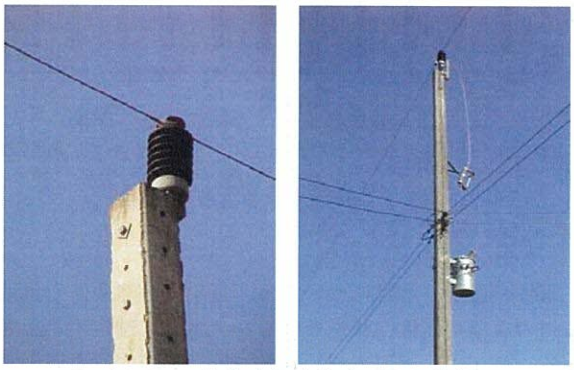

図7　一線大地帰路方式による装柱
Figure 7. Pole Dressing by Single Wire Earth Return

3.　配電設備設計

〈3·1〉　装柱形態

電柱装柱形態として、電線の水平配列、垂直配列、三角配列（ウィッシュボーン装柱と呼ばれる）により大別されるが、三角配列は新規で地方電化に採用されることは少ない。水平配列では、短い電柱状尺で電線の最低地上高を確保できるため、機材費、輸送費、工事費等を節減できる。他方、垂直配列は風による電線の横ぶれに強く、また配電線の占有用地（Right of Way）を小さくすることができるため、樹木の多い山間部等での適用に向いている。アフリカ地域の地方電化では、各国電力会社の配電規程に基づき、全国で一律の装柱形態となっていることが多いが、統一的な設計思想に基づき、地域の自然条件や負荷密度・重要度等の条件に合わせて、装柱形態を柔軟に選択する必要がある。

村落内部では、低圧配電線により各需要家へ配電されるが、低圧配電のための電柱のすぐ傍らに、33kV 配電線用の電柱が建てられている状況を散見する。これは配電計画の不整合による問題であり、一本の電柱で 33kV 配電線と低圧配電線を共用（併架）すれば、電柱資機材及び建柱コストを削減できる。

〈3･2〉　電柱径間

アフリカの地方電化では、一般的に電柱径間は11kV、33kV中圧配電線で70～120m、400V低圧配電線で50m程度である。平坦かつ直線的な道路沿いに、長距離配電線を布設する場合、径間を長くすれば、電柱総本数を少なくすることができるが、電線の最低地上高を確保するため、長状尺の電柱を採用し、更にACSR(Aluminum Conductor Steel Reinforced)等、機械的強度の高い電線を採用する必要がある。一般的に、径間を長くすれば配電線コストを節減することができるが（図8参照）、径間が約200mを超えるとコスト削減効果は小さくなることに留意する。

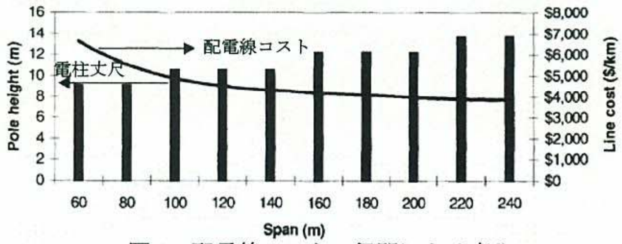

図8　配電線コストの径間による変化
Figure 8. Cost of Distribution System with different pole spans
出所：引用文献(2)

〈3･3〉　電柱

電柱の種別、状尺については、気象・自然条件や現地産資材の調達可能性、輸送条件等を考慮して選定する必要がある。例えば、高温多湿の日本では、地際で腐食倒壊するため採用されなくなった木柱も、乾燥した気候下では50年以上の耐久性を保つことができる。アフリカの地方電化では、主に以下の電柱が利用されている。

(1) 木柱

木柱は以下の点で他の電柱よりも優れていることから、アフリカの地方電化では最もポピュラーな支持物となっている。

- 多くの国で現地メーカーにより製造されており、輸入の必要がない。
- 他の材料に比べ軽量のため、輸送、建柱工事が容易。
- 腕金、腕木を固定するためのステンレス・バンド等が不要。
- 現地でボルト穴を空けることができ、柔軟な装柱形態が可能である。

しかしながら、木柱の原材料として代表的なマツ、杉、ユーカリ等の樹木伐採は環境破壊に繋がる他、防腐剤並びにシロアリ駆除剤として使用されているクレオソート、砒素（Chromated Copper Arsenate:CCA）の人体への長期的影響が懸念される。木柱が広く採用されているアフリカ諸国（ガーナ、ウガンダ、マラウイ等）では、製造業者の保護の観点から国内木柱業者の寡占状態となり、コンクリート柱の導入が進んでいない国も多いが、製造業者間の適正な競争環境を確保するためにも、多様な支持物を採用することが望ましい。

(2) コンクリート柱

アフリカでは、品質の低いコンクリート柱の採用により、5年も経たないうちに折損、倒壊する事故が頻繁に発生している。直方体の型枠にコンクリートを流し込み製作されるCast Reinforced Concreteではなく、30分以上遠心分離装置により加工され、1ヶ月以上の養生期間を経て完成する中空鉄筋コンクリート柱を採用することが望ましい（図9参照）。

図9　遠心分離装置を利用したコンクリート柱の製造工程
Figure 9. Manufacturing Process of Centrifuging Mold Concrete Poles in Nigeria

(3) 鋼管柱

アフリカ諸国での採用は稀であるが、ナイジェリアでは角度引留柱等、機械的応力の加わる電柱に採用される。なお、重量の大きい電柱の輸送が困難な山岳地域では、組立鋼管柱が採用される。

〈3･4〉　電線

裸電線の材料としては、銅、アルミニウム、スチールが採用されるが、同じ重量のアルミニウムは銅よりも機械的強度が約30%上回り、また軽量となることから（単位体積当りの導電率は約60%となる）、コスト的にも優れたアルミニウム電線が最も一般的である。アルミニウム電線の中でも、以下の3種類が多く使用されるが、アフリカの地方電化ではACSRが最もポピュラーである。

(1) ACSR (Aluminum Conductor Steel Reinforced)
(2) AAAC (All Aluminum Alloy Conductor)
(3) AAC (All Aluminum Conductor)

ACSRは亜鉛メッキ鋼線の単線又はより線を中心とし、その周囲に硬アルミ線を同心円状に撚り合わせ、機械的強度を大きくしたものである。AAACはACSRと同じ機械的強度、送電容量を保ちつつ、より軽量かつ耐汚損特性に優れている（ACSRの亜鉛メッキ鋼線は、アルミ線との接触箇所から腐食する可能性がある）。AACは最も安価であるが、機械的強度の面で劣る。なお、1km当たりの概算単価を比較すると、AACを100とした場合、ACSRは160、AAACは170となり（100mm^2の場合）、ACSRやAAACは長径間の中圧配電線に適用し、短

径間の低圧配電線では AAC を採用することが望ましい。

〈3･5〉 配電用変圧器

変圧器の設置方法として、柱上設置、プラットフォーム設置、地上設置の 3 種類に大別される（図 10 参照)。アフリカでは、英国式の配電方式に従い大容量の三相変圧器を採用している国が多いが、一般的には、75kVA までの小容量変圧器については、資材費、建設工事費を削減する観点から、柱上設置によることが望ましい。

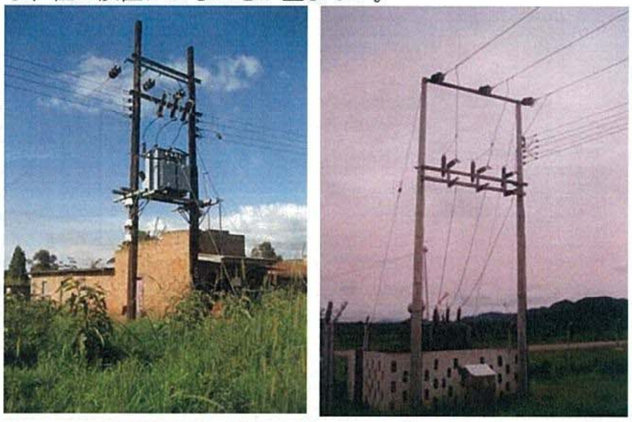

図 10 配電用変圧器の設置方法（左：プラットフォーム設置（ウガンダ)、右：地上設置（ナイジェリア))
Figure 10. Mounting Methods of Distribution Transformers (left: platform-mounted (Uganda), right: pad-mounted (Nigeria))

変圧器の容量選定に際しては、コア巻線の熱容量限界 (Thermal Loading)ではなく、鉄損、銅損の経済的評価に基づく基準負荷容量（Economic Loading）を採用する必要がある。図 11 に単相変圧器（25kVA～75kVA）の均等年経費換算された Economic Loading 曲線の一例を示す。同曲線に示すとおり、熱容量限界のみで判断すると供給可能となる負荷容量であっても、必ずしも経済的に最適負荷条件とならないケースがあり、供給地域の電力需要増加を踏まえて、適切に判断する必要がある。本件は、日本の電力関係者には当然の事ではあるが、アフリカの電力会社では必ずしも遵守されておらず、欧米諸国の基準をそのまま導入している国も多いため、留意する必要がある。

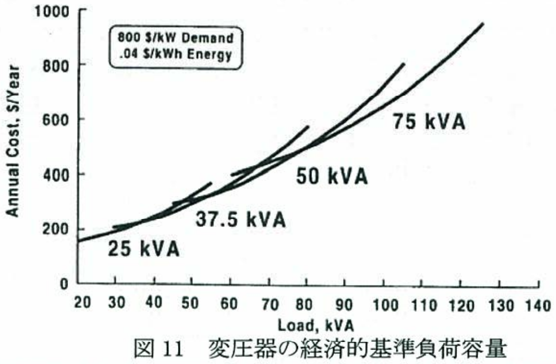

図 11 変圧器の経済的基準負荷容量
Figure 11. Economic Loading of Distribution Transformers

〈3･6〉 碍子

配電用碍子の絶縁材料としては、近年ポリマーの導入が徐々に進められているものの、磁器とガラスが主流である。図 12 に示すとおり、海外では磁器とガラスを併用している国が多く、アフリカでは西部の仏語圏でガラスのみ利用している国が多い。一般的に、磁器碍子は温度変化によりひび割れしにくく、輸送や据付工事の衝撃にも強い。また、ガラス碍子はバンダリズムの標的とされることがあり、地方電化では磁器碍子を用いる利点の方が大きいと言える。

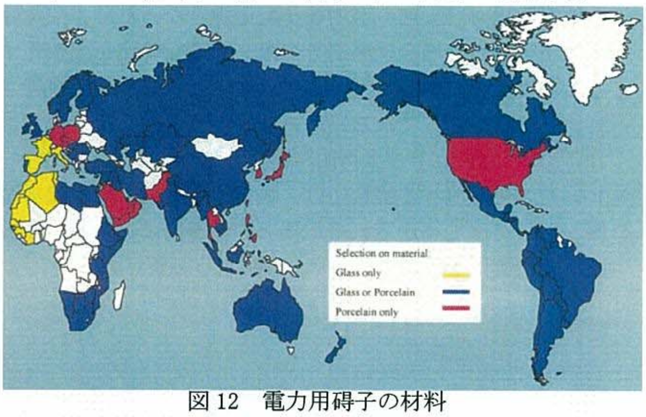

図 12 電力用碍子の材料
Figure 12. Selection of Material for Insulators

また、配電用碍子の種類としては、ピン碍子、ポスト碍子、懸垂碍子(連)が適用される。引通し箇所では、最も安価なピン碍子を適用するのが望ましいが、アフリカ諸国では懸垂碍子(連)を垂直にぶら下げ、電線地上高を確保するため、長丈尺の電柱を用いた装柱を未だ見かけることから、合理的な配電設備設計基準の整備が必要である。

〈3･7〉 避雷設備

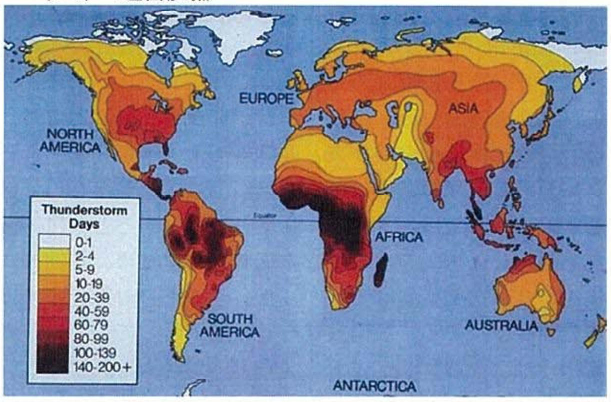

図 13 世界の年間雷発生日数（IKL)
Figure 13. Isokeraunic Level Map in the World

図 13 に示すとおり、世界的に見てもサブサハラ・アフリカでは年間雷発生件数が多く、配電線事故の原因も雷害と樹木接触が多い。避雷対策として、避雷器に加えて、一部の中圧配電線については架空地線が設置されている。ただし、これら架空地線は、電柱丈尺を通常より長めに設計して最上部に設置されており、架空地線用裸電線のコストに加え、電柱のコストアップも考慮すると配電線 1km 当たりの追加コストは無視できないものである。地方部の配電線

については、供給信頼度をある程度犠牲にしても、まず供給エリアを増やすためにコストダウンを追及すべきであり、架空地線の設置も激雷地域に限定するなど、思い切った対策を考えてよい。

〈3·8〉 再閉路装置、気中開閉器、カットアウト・ヒューズ

地方電化では大部分が樹枝状配電線となるため、配電線事故が発生した場合に区間を分離し、事故範囲を局所化するために気中開閉器、カットアウト・ヒューズ等が設置され、長距離配電線では線路途中に柱上再閉路装置も設置される（図 14 参照）。柱上再閉路装置もしくはカットアウト・ヒューズを設置する場合には、配電用変電所の過電流継電器、もしくは地絡過電流継電器との保護協調により、事故区間を局所化する必要があり、留意する必要がある。

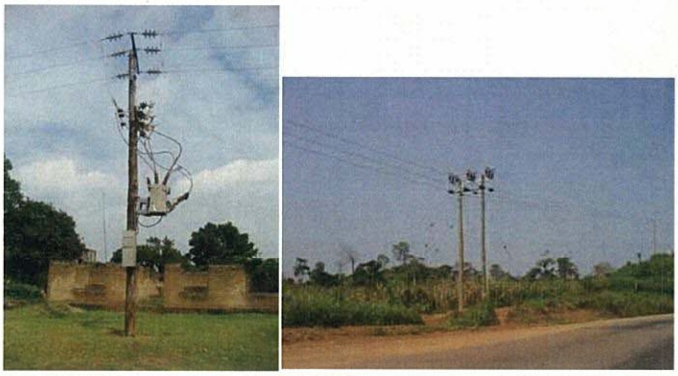

図 14 左：再閉路装置（ウガンダ）、右：気中開閉器（ガーナ）
Figure 14. left: Pole-mounted Recloser (Uganda), right: Load Break Switch (Ghana)

〈3·9〉 計量装置（メーター）

アフリカ諸国では、組織的なシンジケートによる盗電、電力会社の検針員と需要家との癒着による不正計量、メーターのバイパス接続等の不正干渉による盗電が多発している。対策としては、メーターを屋外に設置すると共に、確実に封印し、検針員と需要家の癒着を防ぐため、定期的に検針エリアを交代させるといった、運用上の対策をまずは実施すべきである。設備投資を含む対策として、アフリカ諸国では、既にプリペイド・メーターが導入されており、地方電化でも適用されている（図 15 参照）。本方式は、電力会社の作業員による検針、請求書発行、未払い時の送電停止等の業務が簡素化されるメリットはあるが、事前に需要家が購入するカード、もしくはトークンを販売する代理店を開設し、また故障発生時に対応できる最低限のアフターサービス体制の整備が必要である。

電力会社の取組みとして、非技術的損失を低減するためには、上記の通り追加的な費用が必要となるが、損失低減のインセンティブを需要家に与える方法もある。フィリピンでは、バランガイと呼ばれる最小行政単位毎に BAPA (Barangay Power Association) という村落電化組合に検針、料金徴収業務を代行させ、電力会社は BAPA 全体の消費電力量を示す親メーターにより、一括して集金するシステムを一部地域で採用している。日本的な「五人組」システムが機能するか否か、アフリカ諸国でも検討の余地はあろう。

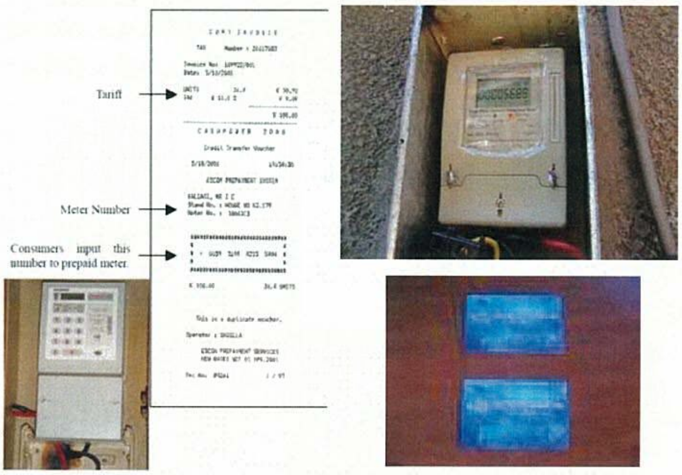

図 15 プリペイド・メーター（左：トークン式（マラウイ）、右：カード式（ウガンダ）
Figure 15. Prepaid Meter (left: Token Payment (Malawi), right: Card Payment (Uganda))

4. おわりに

米国では、地方部の電化率が 10%前後であった 1930 年代から、従前以上に遠隔地へ電化するためには配電計画・設計思想の抜本的な見直しが必要との観点に立ち、三相四線式多重接地方式、単相配電・小容量変圧器の導入等、配電設備計画・設計基準の見直しを進め、配電線延長による追加コストを最小化し、その後の電化率の飛躍的な向上を遂げることができた。

サブサハラ・アフリカ諸国でも、地方電化の進展と共に、これまで以上に都市部から遠隔地の、需要密度が小さい散村を電化する必要に迫られており、需要家１軒当りの配電コストは増加する傾向にある。このため、電力会社では従来の配電設備形成指針に囚われることなく、柔軟な発想で設備計画・設計を適宜修正する必要があるが、アフリカ諸国でこのような変化を内部から引き起こすには、相当の時間が必要であろう。今後とも、我が国を含む援助機関からの資金協力、並びに技術協力を通じた支援により、他の開発途上国や先進国での経験を通じた、キャパシティ・ディベロップメント活動を継続していきたい。

文　献

(1) Per Ljung : "Energy sector reform: strategies for growth, equity and sustainability", Sida studies (2007)
(2) "Reducing the Cost of Grid Extension for Rural Electrification", ESMAP Report 227/00 (2000)
(3) 「ナイジェリア連邦共和国ｸﾛｽ･ﾘﾊﾞｰ州及びｱｸﾜ･ｲﾎﾞﾑ州地方電化計画基本設計調査報告書」, 国際協力機構 (2006)
(4) 「マラウイ国地方電化マスタープラン調査ファイナルレポート」, 国際協力機構 (2003)