

バイオガス・太陽・水処理複合化による インド乾燥農地修復と植林

Arid rural area rehabilitation and afforestation by hybrid development of biogas, solar and water treatment in India

研究代表者	成蹊大学工学部応用化学科 教授 小島紀徳 Toshinori Kojima, Professor, Department of Applied Chemistry, Seikei University
共同研究者	筑波大学農林工学系 教授 安部征雄 Yukuo Abe 前橋工科大学 教授 尾崎益雄 Masuo Ozaki 成蹊大学工学部 助手 加藤 茂 Shigeru Kato
海外共同研究者	Dr. Sanjay Kumar, University Department of Physics, Dr. Sangeeta Sinha, University Department of Physics, Dr. Shilpa Chaudhury, Department of Zoology, L.S.College, (以上 BRA Bihar University, Muzaffarpur, Bihar, India) Dr. Seemin Rubab, Department of Physics, National Institute of Technology, Hazratbal, Srinagar, Jammu Kashmir, India

和文要旨

インドの10億以上の人口の70%が田園部に暮らしているが、問題が大きい。開発の恩恵を得る前に、持続可能とはいえ開発により引き起こされる地球規模ともいえる気候変動とその影響が、開発の芽を摘んでしまう可能性もある。このような背景の下、土地を持たない田舎の労働者の大都市への移住が、増加しつつある。本研究では、北ビハールの代表的な農村の持続可能な発展のための統合モデルを、環境ストレス、エネルギー・ニーズ、健康ニーズおよび経済状態といった様々な現状を考慮した上で提示する。

インド農村ではそのエネルギー消費のほぼ75%が家庭用である。その9割は調理用であり、動物の糞や木製品、農業残さが用いられる。確かに化石燃料の供給量は近年増加しつつあるものの、その対象は、灌漑とか耕作のように、上記のバイオマス・エネルギーが使用できない対象に限られていた。一方、燃料としての木の消費は2004年までに1億8500万トンを超すと予想され、これによる森林伐採は地球規模の気候変化をもたらすこととなる。そして、今までに例がないほどの天災の増加、農産物生産量減少、栄養失調による健康被害をもたらす。これまでに政府レベルで行われてきた、補助金ベースの中央主権的、目標指向型、技術主導のプログラムに代えて、再生可能エネルギー技術を多機能的に利用することで、前出の問題を解決せんと考えた。太陽電池を照明に、バイオガスをエネルギーニーズに対応させ、これにより、癌、気管支炎といった健康被害影響縮小をめざした。エネルギー、ビタミン補給用果実、さらには牛飼料、手工芸品、土地開拓といった多目的植林と、バイオガスプラントからの排出汚泥の肥料として利用の組み合わせが試行された。これらの立案および実行の中で、社会経済的影響の重要性も指摘された。この過程では確かに、無学、疑問、土地確保、環境といった難問が多く立ち上がったが、農民は、あるときは伝統を打ち壊しながらも自発的に本試行プロセスを模倣し、予想以上の成果が上げられたものと考えられる。

Abstract - Rural India shelters 70% of the India's over one billion population. Rural population of India is a distress lot. Even before fruits of development could reach them in real sense, global climate change induced environmental stress due to increased unsustainable economic activity has started eating upon options of development, threatening their very survival. Consequently, pace of rural migration towards big cities as landless labourers has been continuously increasing over the years. Present work is an attempt to present an integrated model for sustainable rural development in a representative north Bihar village, taking into account the stark realities of environmental stress, energy needs, health needs and economic situation.

House holds sector constitutes nearly 75% of the total energy consumption in rural India. Out of which 90% is for cooking. Animal wastes, wood products and agricultural residues are the only source of energy to meet these demands. Though commercial fossil fuel based energy supply has increased in recent years, statistics show that they are mostly limited to areas where other biomass energy cannot be used such as irrigation and tillage. Fuel wood consumption is expected to exceed 185 million tons by 2004. Deforestation has only added to the global climate change induced environmental stress at local levels. It has caused unprecedented increase in natural calamities, reduction in agricultural produce and severe health related problems due to malnutrition. Instead of centralised, target-oriented and technology-driven programs with a subsidy component, present work has utilized renewable energy technology multifunctionally to tackle the above-mentioned problems. Photovoltaic installation is used for lighting, while biogas plants are used to tackle the energy requirements and to reduce health related problems such as cancer, bronchitis etc. Energy and health plantation is used to meet biomass requirement in the short run and vitamin requirements. Multiobjective plantation also meet other objectives such as fodder for cattle, wood for handicrafts, land reclamation, while extracts of biogas plants is used as fertilizer. In the whole planning and execution, socio-economic reflections of the society is sensitively dealt with. Though there has been numerous problems due to illiteracy, suspicion, land unavailability, unexpected environmental problems, the results are more than expected as farmers and villagers are more than willing to imitate the process and/or break their traditionality.

1. 研究目的

インドの人口は10億人を超え、第二の人口大国でいるが、その70%は農村地域で暮らしている。彼らのエネルギー源の60%は、未だ森林生産物、森林副産物あるいは動物の糞などである。人口の爆発的増大に伴うエネルギー源の確保のため、これらの地域の植生は、驚異的なスピードで破壊されつつあり、砂漠化やその他の環境問題が深刻化している。そのため、これらの地域の開発は遅れ、都市への大量な移住の原因となり、都市部の非人間的な生活すなわちスラム化の原因ともなっている。

農村地域でのエネルギー源の確保あるいはその効率化の重要性は政府によっても認識され、この20年くらいの間いくつかの実行計画が立案され実施されている。しかし、これらのプログラムではその地域固有の地域環境や社会的地理学的条件を配慮していないことが多く、実効が上がっていない。砂漠化が進む乾燥地での新たな水・エネルギー源について提案し、植生を増加させると共に、森林伐採・砂漠化を防止し、農村地域の活性化と都市への人口流入防止策を策定する必要がある。

本研究の目的は、再生可能エネルギーを多機能的に利用し、環境ストレスを縮小することにより、地方の統合的かつ持続可能な開発を可能にすることである。このことにより都市のスラム街への大量移住を止めることが可能となる。

2. 研究経過

2.1 対象地区の特徴調査

インドのビハール州 Muzaffarpur 地区 Bochahan ブロックの Punarbara 村を対象とした。インドの人口10億は29州に分割統治されている。ビハールは人口密度の高い州のうちの1つであり、37の地区に分割される。Muzaffarpur 地区(約500万人)は、16のブロックに分割される。Bochahan ブロックは中でも6番めに大きなブロックであり、ここにプロジェクトサイトを定めた。

対象とした村の経済成長率は1%未満であり、インド全体6-8%という数字に比して小さい。識字率も全国平均52.1%に比して38.5%と小さい。Punarbara 村は、およそ300組の家族よりなり、90%は貧困線未満である。特にめだつ産業はなく、読み書き可能な人は10%に満たない。生産農地を有しないものの多くは、都市へ移住する。燃料源は隣接町に至る20kmの間の森林より得ているが、その植生は失われつつある。

2.2. 計画と実行手法

図1に、本研究で試みた立案プロセスのスケッチを示す。目標は(1)多機能再生可能エネルギー技術開発(エネルギー利用による防止、燃料新利用による健康影響被害の縮小、夜間の効率的照影、ビタミンなどの健康促進を含む、エネルギー、農業、飼料等のニーズに対応する植林)、(2)農業・天然資源開発による環境劣化地域の修復、(3)よりよい衛生環境の樹立と農牧畜行の自立、収入増加である。

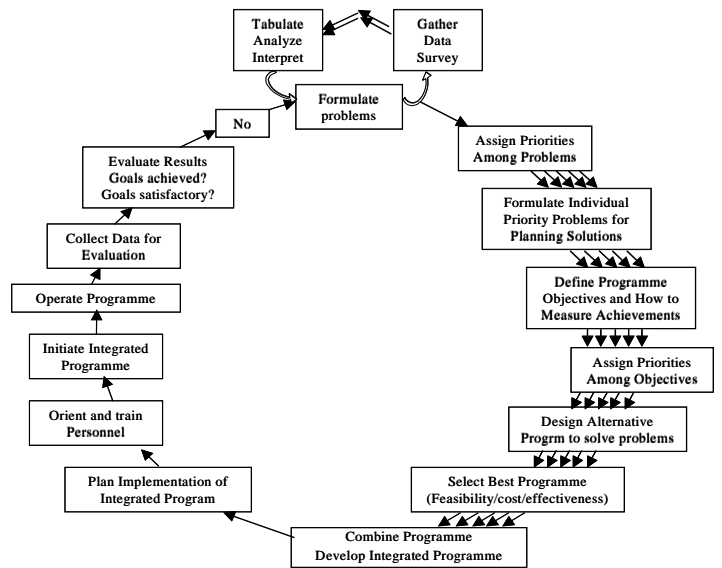


Figure 1. Flow diagram for integrated developmental planning of villages using renewable energy sources

2.3 実施内容

a) サイト調査:

研究と開発を組み合わせた図1に示したスキームに基づき、まず、本稿の当初に掲げた調査を行った。

b) 薪使用およびバイオガス使用に伴う健康影響:

料理・暖房での薪使用による健康問題特に発ガン性について調査した。屋内環境に与える結果表1に示す。

Table 1: Concentration of indoor air contaminants due to wood burning stoves for cooking and heating.

	improve d cook-stoves	traditional cook-stoves	Airtight wood burning for heating	Non-airtight wood burning for heating
Carbon monoxide (ppm)	06	16	04	08
Formadehyde (ppb)	30	60	00	49
Nitric Oxide (ppb)	50	90	<20	70
Nitrogen dioxide (ppb)	<20	<20	<20	<20
Benzo[a]pyrene (ng/m ³)	300	600	0.8	490
Benzo[k]fluoranthene (ng/m ³)	275	550	0.73	420
Benzo[k]fluoranthene(ng/m ³)	150	250	0.31	200
Benzo[ghi]perylene(ng/m ³)	300	560	1.3	450
Indeno[1,2,3-cd]pyrene(ng/m ³)	450	900	1.8	740
Suspended particulates (ug/m ³)	500	1000	71	650

Accuracy is in 10% limit

Table 2: Mean Concentration levels of Cd, Ni, and Cr in India

States	Mean Concentration (ug/m ³)		
	(Cd)	(Ni)	(Cr)
Andhra Pradesh	14	68	32
Bihar	21	222	71
Chandigarh	05	257	207
Gujarat	16	45	51
Haryana	08	134	90
Himachal Pradesh	08	66	64
Karnataka	01	43	17
Kerala	06	23	18
Orissa	08	78	144
Punjab	04	107	82
Rajasthan	20	63	16
Tamil Nadu	06	28	17
Uttar Pradesh	11	208	133
West Bengal	20	60	67

表 2 にはインドの様々な状況下における Cd、Ni および Cr の濃度を示す。

表 3 には、同 3 元素およびホルムアルデヒド、ベンツピレンの摂取リスク評価の結果を示す。

発ガンリスクについては、Integrated Risk Information System のデータベースと Health Effects Assessment Summary tables (United States Environmental Protection Agency)から次式を用いて推定した。

$$\text{Risk} = \text{Intake (mg/Kg.day)} \times \text{slope factor (mg/Kg.day)}^{-1}$$

不完全燃焼により生成する一酸化炭素はヘモグロビンの酸素との結合を阻害する。10ppm 程度では問題は少ないが、室内暖房により多大な健康被害をもたらす。ホルムアルデヒドは、呼吸器官粘膜への悪影響、頭痛、疲労、腹・胸痛、下痢などが指摘されている。また USEP の報告書によれば、発ガン性の危険性も指摘されており、実際動物についてはその確証も得られているといわれているが、突然変異については十分な確証が得られているとは言えない。表 3 のリスク評価では、発ガン性増加は、0-1.5%とされている。NO_x (NO, NO₂) や亜酸化窒素、五酸化窒素などの肺への影響が報告されている。特に二酸化窒素は比較的良好より有毒とされるが、検知範囲外であった。

いくつかの多環炭化水素、すなわち Benzo[a]pyrene, Benzo[k]fluoranthene, Benzp [b] fluoranthene, Benzo[ghi]perylene, indeno[1,2,3-cd]pyrene 等が、薪燃焼時の煙中に検出されているが、人体影響としては未確定とされる。10,000 の人口に対して、0-1.2 の発ガン性増大をもたらすとされる。フェノール類は、ベンゼン環に 1 つ以上の水酸基がついた化学物質群をさすが、その吸入は呼吸器官に悪影響をもたらす、気管支炎を引き起こす可能性がある。煤塵(0.02-10 μm)中浮遊粒子は肺中の蓄積し、様々な病理的影響を引き起こす。特に重金属発癌物質カドミウム、ニッケルおよびクロムと結合することで、人口 10000 人当たり発ガン性は 0-3 増大する。

薪燃焼時に発生するすすは、木の種類や燃焼状態に大きく依存するが、現在農村部で多用されている樹種条件に沿う形で解析したものである。現在料理には薪が使用されており、そのため、バイオガスのような新たな再生可能エネルギーシステムに置き換えてゆく必要がある。バイオガスシステムについては、これまでも幾多の長所があることが示されており、実績がある方法である。バイオガスの利用によりエネルギー効率が向上するばかりではなく、プラントからの副産物スラリーは、優れた肥料となる。また糞尿中に含まれる有害細菌の 95%が除去され、衛生的である。

本研究で新たに設置したバイオガスプラントは、規模は 5ft x 5ft x 5ft の大きさであり、実験目的に使用した。原料としては、動物廃棄物に加えて、樹木から得られたバイオマスも用いた。バイオガス発生量はほぼ 3 家族が調理用に使用する量に相当した。現在、さら

にガス発生量を向上させるための試行を続けている。この設置により、これまで行われてきた過伐採を防止できるものと期待され、ひいては土壌侵食防止、さらには天然肥料源としても期待される。

(c) 健康向上とエネルギー生産を目的とした植林 :

Table 3: Estimation of Intake and Risk for Formadehyde, Benzo[a]pyrene and three heavy metals, Cd, Ni & Cr. (standard weight: 70 Kg, intake rate: 0.6 m³/h, AT: 60x365 d, Slope factor: 6.1 Kg/mg)

S.No.	CA mg/m ³	ET h/d	EF d/y	ED y	I* mg/Kg	Risk
Traditional Cooking Stove						
a) Formadehyde	740x10 ⁻⁴	8	350	30	2.43x10 ⁻³	1.5x10 ⁻²
b) Benzo[a]pyrene	600x10 ⁻⁶	8	350	30	1.97x10 ⁻⁵	1.2x10 ⁻⁴
Improved Cooking Stove						
a)Formadehyde	370x10 ⁻⁴	8	350	30	1.22x10 ⁻³	7.4x10 ⁻³
b)Benzo[a]pyrene	300x10 ⁻⁶	8	350	30	9.86x10 ⁻⁶	6.0x10 ⁻⁵
Non-airtightburning of wood for heating						
a) Formadehyde	602x10 ⁻⁴	12	120	30	1.02x10 ⁻³	6.2x10 ⁻³
b)Benzo[a]pyrene	490x10 ⁻⁶	12	120	30	8.3x10 ⁻⁶	5.05x10 ⁻⁵
Airtight burning of wood for heating						
a) Formadehyde	-	12	120	30	-	--
b)Benzo[a]pyrene	0.88x10 ⁻⁶	12	120	30	1.5x10 ⁻⁸	9.1x10 ⁻⁷
Outdoor air contaminant affecting Indoor air in Bihar						
a)Cd	21x10 ⁻⁶	24	350	60	4.1x10 ⁻⁶	2.5x10 ⁻⁵
b)Ni	222x10 ⁻⁶	24	350	60	4.4x10 ⁻⁵	2.7x10 ⁻⁴
c)Cr	71x10 ⁻⁶	24	350	60	1.4x10 ⁻⁵	8.5x10 ⁻⁵

本研究で提案した植林は、当初、現地の農民には受け入れられなかった。それは、耕作に適している土地の縮小をもたらす、収入の減少になるからである。さらに農民の大多数は読み書きができず、そのため、植林の重要性を納得させることは非常に困難であった。そこで、はじめは果樹を植樹し、その生長に合わせて環境問題について教育するとの戦略を取った。さらに、もう一つの目的は、果実から栄養の摂取を行うという、健康面でのものであった。現地農民の活動様式から、また今後の生活の変化をも考慮し、以下の必要カロリーを割り出した。

子供 1700kcal/日 青年 2400kcal/日
 男性 2800kcal/日 女性 2200kcal/日

300 家族から構成される村全体でのビタミンおよびミネラルの必要摂取量を以下のように推定した。一家族は夫婦と子供として成年 1 および未成年 2 の計 5 人とした。結果は以下の通りである。

Thiamin 591 gm Riboflovin 710 gm
 Niacin 7805 gm Retinol 312 gm
 Vitamin C 22.2 kg Calcium 286 kg
 Phosphorus 482 kg Iron 13.5 kg

1/4 のビタミンについては、在来種、外来種またハイブリッド種のいずれかから取ることを想定した。植樹樹種選択に関して考慮した点は、以下の通りである。

a)材木用高成長樹木、b)エネルギー消費パターンに基づく燃料用樹木、c)バイオガス製造用樹木、d)家畜

飼料、e)健康改良のための果物、f)薬用効果のある果物、g)長期的視点に基づく産業用高付加価値樹木、h)伝統工芸用樹木、i)環境改善効果を期待しての植樹(天然殺虫剤としての利用を含む)。

上記の要求を満たすべく、樹種の選択を、コンピューター・シミュレーション(Simplex 法、植樹本数一定の下で、解を方程式を解くことにより得る)を用いて行った。果樹については、そのビタミン他の含有量等や、標準的植栽間隔などを調査し、これを計算に用いた。計算結果からは、10ヘクタールの果樹の植樹で、村全体の栄養上の要求を完全に満たすであろうことが示された。しかしながら、今回の試行で用いたサイトは2.1ヘクタールであり、すなわち、必要栄養量の20-22%を満足することになる。ただし、推定にあたっては、表中の低めの値を用いているため、もう少し数字は大きい可能性が高い。この計算結果に基づき、約1000本の植樹を行った。

(d) 農村での太陽電池照明の試行実験：エネルギーブランテーションによる発電システムと併せて、太陽電池を用いた照明と揚水の可能性について検討した。 バイオマスを用いた発電が現実のものになるには当然木の生長が必要であり、長期間を有する。また、必要エネルギーは今後も増大することが予想される。そのため、導入の際には太陽電池の利用が不可欠である。

このようなシステムの導入については、既に、日産科学財団報告書 Vol.23,45-48(2000)にて報告したが、報告書にあるネパールのケースが、インドに於いても成功裏に適用された。

まずはじめに、太陽の「ランタン」2セットを導入した。10Wの太陽電池パネルで、3-4時間(7Wで4時間、9Wで3時間)の照明が可能となる。このような試行の結果、今後は、全村民の照明・飲料水ニーズに対応するべく、5-6kWの太陽電池パネルの設置が計画された。運転様式については、以下の2モードの可能性を検討した。

太陽「ランタン」用パネルの中央設置：各家庭が、USD 60程度のコストをかけ、寿命3年の太陽「ランタン」を各戸に1台設置するとした。3年後には、バイオマスシステムからの電力供給も可能となるものと期待される。確かに現状では国からの太陽「ランタン」への補助金システムがあるが、実際はこのような補助金を得ながらも、実際にはその用途に使用しないケースも多く見られる。この点から、全村民がチャージをし、「太陽電池パネルが設置された中央広場」に集うという形が望ましいのではないかと考えた。この試行を実施すべく、現在、予算も含め計画を立案している。

LEDと蓄電池との組み合わせ：インドでは基本的に早起きかつ早寝であり、さほどの照明に対するニーズはない。しかし、夜中に一つは照明をつけばなしとする習慣があり、この用途に白色LEDを考えた。白色LEDは、77%との高い光変換効率と10,000時間以上の寿命を持つ。たとえば3つのLED(3.6V、20mA)で500LUX以上が、20cm以上の距離で得られる。確かにシステムコストはトーチ当たり110USDと高価であるが、ペイバックタイムは5年以下である。

しかし、この金額を負担する能力はないため、補助金の導入が必要である。この利用により、エネルギー使用パターン、そして煤塵などの環境汚染に影響を及ぼすことから、現在、このような用途に適したトーチの開発を進めている。

3. 研究成果

本研究により農村地域に以下の変化が見られた。

(1) 農民自身による通常とは異なる作業による好奇心の発生と科学的思考の芽生え：本研究で実施された植林法などは、伝統的な農業とは全く異なったため、彼らの好奇心を引き起こし、さらには日本からの訪問者などもこの重要性を認識させるに至った。その結果として、決して本質的とは言えないが、本研究手法を模倣した手法特に植林が、近郊随所で始まった。

(2) この研究が何のためであるのか、との理解が、特に作業に従事した農民に広がった。

(3) 確かに再生可能エネルギーは効果ではあるが、また政府補助金をあてにしたものではあるが、その導入機運は高まりつつある。

(4) バイオガスによる調理が農民に浸透し始めていることは大きな収穫である。

(5) 太陽電池の導入は現状では農民の好奇心程度に過ぎないが、可能性は大きい。

4. 今後の課題と発展

今回の研究において最も問題となった点は、これが全球規模の気候変動によるものであるかどうかは別問題としても、乾燥地における洪水であった。2002年夏、ネパールからの洪水が現地を襲い、樹木に相当な被害を与えた。このような点を鑑みるに、本研究に様な取り組みが、国境を越えたレベルで行われることが望ましい。また以下の点が問題点・課題、将来展望として指摘された。

- (a)文化宗教などの地域性に応じた発展モデル
- (b)ビタミン摂取用野菜栽培の組み合わせ
- (c)蛋白質摂取を目的とした0.2ha程度の池の造成
- (d)1kW規模の太陽電池の設置とその効果の観察

そして最後に、農民に新しい考え方、方法論、技術および発展に関する知識を移植するための方法論の確立が多分最も重要であろう。また、本研究では言及できなかったが、塩蓄積防止が可能となる水利用体系の確立も今後の課題である。

発表論文リスト

- (1) Integrated Resource Management and Renewable Energy Base Modeling to Reduce Environmental Stress, Promote Conservation and Stop Mass Migration to Urban Slums from a Semi-arid Village
accepted for publication in Journal of Arid Land Studies
- (2) Innovative Solar Fish Drying Technique and its experimental verification to supplement food deficit in rural areas
to be communicated to Energy Conversion and Management