

持続可能な地域社会の物的構成 ーシンセシスを用いた解決策の提示ー

水谷 潤太郎

正会員 日本上下水道設計㈱ 技術本部 (〒162-0067 東京都新宿区富久町6-8)
E-mail: QZF02502@nifty.ne.jp

本文は、2003年に環境経済・政策学会で発表した論文「持続可能な地域社会のイメージ」に対し、多くの方々との討議を通じた修正を施した結果を示したものである。すなわち、人工物理学の言うところのシンセシスを用い、私と周囲の方々との共創を行った結果である。主要なポイントは以下のとおり。

1. 自然生態系保全を最優先の課題とし、エネルギー・食料・水環境保全などの課題はそれを前提として対応を考えるものとした。自然生態系は一度失われると回復が極めて困難であり、かつ長期間を要する。このため他の課題に優先する。
2. 植物工場は、農業公害が少なく、しかも面積当り生産性を高める優れた方法である。
3. 農地を減らして自然保護ゾーンとし、しかも収穫を増やして食料自給を図るためには、エネルギーの投入が不可避である。しかし農地を減らしたため、そこに降る太陽光（自然）エネルギーを失うことになり、自然エネルギーに頼ることはできない。化石燃料の使用を避けるとすれば、原子力が必須である。
4. 日本の食料輸入必要量を植物工場で作するためには、100万kW級原子力発電所20基が必要である。この低減策はあるが、上記3の理由から、無くすことはできない。
5. 中国など発展途上国の食料需要急増に起因する、アマゾンなど自然生態系の破壊を阻止し、あるいはその復活を図るためには、植物工場+原子力が不可欠である。

Key Words: plant factory, atomic energy, sustainability, regional society, synthesis

はじめに

筆者は環境経済・政策学会 2003 年大会に論文「持続可能な地域社会のイメージ¹⁾」を発表し、その後多くの方々との議論を積み重ねてきた。

もともとこの論文は、人工物理学の言うところのシンセシスの方法を前提として作成されたものであり、こうした討議の結果を柔軟に取り込んで、さらに優れた作業仮説を創り出すことを目指したものであった。

ここで言うシンセシスとは、「持続可能な地域社会」のような複雑かつ相互矛盾のある複合システムを提示する一つの方法であり、まず持続可能な地域社会の一つのヴィジョンを作業仮説として提示し、後段でその正当化を行い、併せて多くの方々との討議を踏まえた自己討議を付すというものである。

この作業仮説を叩き台として、さらに幾多の実践を踏まえた後、反省と総括により、さらに高レベルの作業仮説が生み出されることが期待される。

いわば自分と周囲の人との共創により、解を求めていくとするものである。

この間の多くの方々との討議を通じて、当初の仮説も

相当修正されてきたので、その物的構成について続報として提示し、今後のさらに優れた作業仮説の礎としたい。

以下の文章において、今回変更・追加した箇所は強調で示し、必要に応じ、その後に括弧書きで前回（文献1））の内容を示した。

1. 物的構成の仮説の提示

持続可能な地域社会の物的構成を図-1に示す。持続可能な地域社会では、以下の諸点について現況を改善する。

食・食料生産は植物工場で行う。植物工場は温度・湿度・照度を制御し、年間を通して農業生産できるので
(現況のダラダラと広がる田畑を整理して植物工場にまとめる)、面積当たり生産性が露地栽培の数倍~10倍はある。したがって食料自給を図ってもなお広大な土地が空く。植物工場の一部は公共事業で整備し、希望する住民が即座に就業できるようにする。現況の家畜飼育場も、臭気公害がないように、配置を変更する。漁業資源の増殖を図るため、深層水を活用して海洋肥沃化を行う。

あわせてその乱獲を防ぐ。また湾の水質を改善し、干潟や藻場を復活して、内湾漁業を振興する。

住…無計画に広がる市街地は (Decentralized concentration 型の²⁾コンパクトシティ(まとまりのある都市(密集都市))にまとめる。こうすれば福祉、上下水道あるいは交通などのサービス効率がよくなり、居住のエネルギー効率も向上する。またコンパクトシティは安全な土地を選んで立地できるので、防災(洪水、土砂災害、地震)の観点からも有利である。地域社会に誰でも低廉に居住できるようにするため、例えばスケルトンインフィル型のアパートを公営住宅などとして整備する。スケルトン(外枠)部分は長期の利用が可能であり、随時インフィル(内装)部分を変更して居住者のニーズに応える。

エネルギー…化石燃料発電所を廃止し、原子力コジェネレーション(＋水素)施設を設ける。将来はプルサーマル増殖炉→核融合をめざし、再生可能エネルギー源とする。原子力の利用に伴う核廃棄物は地域内で管理することをめざす。こうした廃棄物は自然保護区域の地下に保管して、自然保護区域「聖域化」の寄す処とすることが考えられる。また高レベル廃棄物から発生する熱は、熱エネルギー源として活用する。市街地では太陽光利用や燃料電池など活用する。山地から木質バイオマスを集め、エネルギー基地に運んでコジェネレーション(＋水素)を行う。海洋温度差発電や地熱の利用も考えられる。海岸部等に風車を設置する。

湾の水質保全…下水処理水や合流式下水道の越流水を湾外にバイパス放流し、湾への負荷を削減する³⁾。また植物工場を利用し、循環養液を適正に管理することも、湾への負荷削減につながる。一般に、露地栽培である田畑からの排水を管理するより、植物工場の循環養液を管理の方が容易である。さらに家畜糞尿をリサイクル基地へ回収して適正に処理すれば、こうしたものを農地などに放置するより、肥効分の流出が少なくなる。(また田畑を整理して植物工場にし、家畜糞尿をリサイクル基地へ回収するので、肥効分の流出が少なくなる。)こうして湾の水質が保全される。

自然保護…市街地や田畑をコンパクトシティや植物工場にするので、広大な土地が空く。これを利用して、干潟や藻場を復活し、また押し縮められた自然保護ゾーンを拡張する。

肥効資源の循環…下水汚泥や畜産廃棄物から肥効資源を無機的に抽出して、植物工場の肥料分とする。こうして肥効資源のほぼ完全な循環が可能となる。

2. 持続可能主張の根拠

本文は、1章で提示した物的構成が持続可能なものであると主張している。その理由は、以下の事項が可能となるからである。

(1) 温暖化ガスや大気汚染物質の排出削減

エネルギー源が自然エネルギーや原子力になるので、炭酸ガスなどの温暖化ガスの排出が削減される。また原子力発電を用いるので、有害大気汚染物質や酸性物質の排出も減少する。

(2) 永続的なエネルギー源の確保

自然エネルギーは永続的なエネルギー源である。原子力も、プルサーマル増殖炉となれば千年は持続できる。さらに核融合が実現化すれば、ほぼ永続的なエネルギー源となる。

(3) 農業や畜産に起因する水質汚濁の防止

(田畑を整理して)植物工場で農業を行うので、循環養液を適正に管理すれば、土壌を通じた下流水域や地下水の汚濁を避けることができる。露地栽培ではこの効果を得るために多大の労力を必要としく例えば有機農業>、高齢化社会では実現困難であろう。また家畜糞尿もリサイクル工場で適正に処理されるので、こうしたものを農地などに放置する場合に比して、汚濁負荷が減少する。(汚濁源となることはない。)

(4) 肥効資源の循環の確保と、枯渇性資源であるリン鉱石の利用回避

肥効資源のほぼ完全な循環が確保されるので、枯渇性資源であるリン鉱石の利用が不要となる。

(5) 都市排水による汚濁の防止

下水処理水や合流式下水道の越流水を湾外にバイパス放流するので、閉鎖性水域である湾への負荷が削減され、湾の水質が保全される。

(6) 農薬使用の回避

閉鎖空間である植物工場で農業を行うので、害虫や雑草の種が入らず、農薬使用を最小限にすることができる。したがって、こうした化学物質による人体と生態系に対する影響を低減できる。

(7) 漁業資源の保全

湾の水質を保全し、魚類の産卵場所となる干潟や藻場などの復活を行うので、内湾漁業が振興される。ま

た深層水なども活用して海洋肥沃化を行うので、湾外の漁業資源も増殖される。

(8) コンパクトシティによる省エネルギー化

コンパクトシティでは福祉、上下水道あるいは交通などのサービス効率がよくなり、省エネルギーとなる。居住のエネルギー効率も向上する。

(9) 自然保護ゾーンと干潟・藻場の復活

結果として自然保護ゾーンが拡大し、湾では干潟・藻場が復活するので、自然保護が推進される。

(10) 聖域の確保とアンタッチャブル化

自然保護区域でも特に人の立ち入りが禁止される聖域ゾーンが確保されるので、遺伝子資源が保全される。聖域ゾーンの地下に核廃棄物貯留所を設けるので、このアンタッチャブル化が促進される。

(11) 核廃棄物貯留所の確保

核廃棄物貯留所が地域内に確保され、その適正な管理が可能となる。

3. 自己討議

本案には種々の批判があると思われる。それにつき以下のとおり自己討議する。

(1) なぜ植物工場を用いるのか。また公共事業で植物工場をする意義は何か

農業を植物工場で行うと、害虫や雑草の種が入らず、農業使用が削減されて下流の水環境が保全される。また循環養液を適正に管理すれば、肥効資源の流出が抑えられて地下水や内湾などの汚染や富栄養化が防止される。さらに、肥効資源のほぼ完全な循環が可能となり、枯渇性資源であるリン鉱石が不要となる。

さらに、植物工場の面積当たり生産性は露地栽培の数倍～10倍あり、たとえ人口が増大しても自給率の向上が図れる上、現状で農地となっている広大な土地を空けて、自然保護ゾーンに供することができる。

現在通常用いられている農業技術は、自給率の向上は可能であろうが、肥効資源の大量投入を必要とし、必然的に大量に下流に肥効分が流出してしまう。また、農業使用も不可避である。

一方この反省から提唱されている有機農法や既存の環境保全型農業では、面積当たりの生産量を増やすことは難しく、自給率の向上は期待できない。さらに農

地による自然保護ゾーンの侵食の緩和も期待できない。

したがって、上記のようにこうした弱点をすべてカバーしている植物工場が必要である。（こうした効果は、有機農法や既存の環境保全型農業でも得ることはできない。植物工場が必要である。）

植物工場は雇用対策の公共事業として最適である。植物工場は建設段階だけでなく、操業段階でも雇用の受け皿になるからである。また産出される食料は販売でき、経費を回収できる。最悪の場合でも、被雇用者に生活必需物資である食料を現物支給できる。さらに植物工場での作業は比較的楽であり、ほとんどの市民が対応できる。

(2) 大量の植物工場（温室）を作ることは、建設費が高くて問題ではないか。うまくいくのか。排液はどうするのか。また結果として、広大な農地が放置されるのは問題である

国土交通省の国土利用計画によれば、平成4年（1992年）の農地面積 516 万 ha、宅地面積 165 万 ha（住宅地 99、工業用地 17、その他の宅地 49 万 ha）である。植物工場の必要面積は、

農地 (516) × 生産性向上ファクター (1/7) × 自給率向上 (2倍) = 148 万 ha、と見積もられる。

植物工場の建設費は、住宅や工場などの建設費に比して相当廉価であると考えられ、ここでは 1/5 と推定する。したがって植物工場の建設費は、住宅・工場の建設費総額に対し、 $148 \times (1/5) \div 165 = 0.18 \rightarrow 18\%$ 、程度であると見積もられる。

相当な建設費ではあるが、たかだか住宅・工場の建設費の2割程度であり、けして無理なレベルではない。このさらなるコストダウンが求められる。

植物工場の製品の安全性や栄養価、高密度栽培による感染等のリスクについては、既に事業として軌道に乗っているものがあることから見ても、十分対応可能である。

植物工場では養液を循環するので、露地栽培に比して排水量が大幅に減少し、さらに雨水の浸入もないので、排液の処理は容易である。また、公的監視も露地栽培よりはるかに容易である。残存する排液は適正な処理処分が必要とされ、放流地点や処理処分サイトなど、慎重な対応が求められる。

植物工場導入の結果余る農地については、適宜森林などに戻していき、自然の復活を図るべきである。けして、放置して荒地にしてはならない。

(3) 海外協力により食料安全保障を図っても良いのではないか。また、遺伝子工学を用いたらどうか 海外協力により、発展途上国の貧困な農民の生産性

を向上させ、その作物の一部を買取ることにより、貧困の解消と我が国の食料安全保障を同時に達成することが提唱されている。これは優れたアイデアであり、その推進に努めるべきである。

その際、発展途上国の環境保全も図る必要があり、本論を発展途上国にも適用する必要がある。

また世界人口は依然として増加傾向にあり、経済発展の結果、発展途上国も食料消費量が増えると考えられるので、将来的には発展途上国でも輸出余力がなくなることが懸念される。したがって我が国においても、本論を適用して食料増産に務め、食料の自給を図るべきであることは言うをまたない。

遺伝子工学を用いて、作物の寒冷対策を行ったり、除草剤耐性にしたりするのは、農作業の手間を省いたり、農業の冷害リスクを減らす効果はあるが、農薬使用の廃止や肥料流出の抑制に結びつくか疑問である。また面積あたり生産性の向上は望めず、食料安全保障対策にならない。

遺伝子工学は作物の品質向上に応用し、作物生産自体は閉鎖系である植物工場で行うのが良いと考える。

(4) なぜ原子力を用いるのか

本案ではエネルギー源として自然エネルギーと原子力を使うよう提案している。化石燃料による温暖化ガスの排出を抑制し、あるいは大気汚染物質の排出削減を図るためには、その代替エネルギーの確保が必要であるが、自然エネルギーだけでは不足すると考えられる。自然エネルギーは薄く分布しているエネルギー源であるため、その大規模な開発には広大な面積を必要とするが、これは農業や自然保護などの土地利用とバッティングするからである。そのため原子力（→プルサーマル→増殖炉→核融合）でこの不足を補う必要がある。

常識的に考えても、農地を減らして自然保護ゾーンとし、しかも収穫を増やして食料自給を図るためには、エネルギーの投入が不可避である。しかし農地を減らしたため、そこに降る太陽光（自然）エネルギーを失うこととなり、自然エネルギーに頼ることはできない。化石燃料の使用を避けるとすれば、原子力エネルギーで代替する以外に方法はない。

また、増殖炉が実用化すれば千年間のエネルギー源が入手でき、さらに核融合に至れば人類はほぼ永続的なエネルギー源を入手できるので、この面からも原子力を用いる必要がある。

永続的なエネルギー源の候補としては、他に宇宙太陽光発電やグローバル（砂漠）太陽光発電ネットなどの構想があるが、現在すでに動き出しているのは核融合だけであり、この推進に努めるのが妥当である。ま

た地域エネルギーという観点からも、地域内に設置でき、電力だけでなく熱源にもなるので、核融合がもっとも望ましい永続型エネルギー源である。

原子力発電の利益は現在世代にあり、（核廃棄物などの）不利益が将来世代に負わされるという、世代間不平等が指摘されている⁹。しかし原子力や核融合などは今後永続的に行われると前提すれば、各世代は受益者であると同時に被害者にもなるわけであり、こうした指摘はあたらない。核廃棄物の適正処分や放射能の消滅技術の確立など、原子力の負の側面を軽減する努力を継続する以外に途はない。

(5) そうは言うものの、これ程大量の植物工場に供給するエネルギーを原子力発電で賄うことは、すぐに行えることなのか。エネルギー面での負担を軽くする方法はないのか

a) 植物工場の必要エネルギー量原単位

表-1 は、植物工場における主要作物の必要エネルギー量原単位（kWh/kg-作物）をまとめたものである。野菜（2.6）に比して、米（水稻）の原単位（10.9）が大きく、大豆（27.8）はさらに大きいことが分かる。

この値を、表-2 の（主として露地栽培を対象とした）農業におけるエネルギー量原単位（実績）の値と比較すると、当然のことではあるが大きな値となっている。

なお、表-2の施設長期土耕栽培のトマトの値（2.73）は、表1の野菜の値（2.6）と概ね一致している。

b) 段階的な設置計画

表-3 は食料・農業・農村基本計画による平成22年度（2010年度）における望ましい食料消費と生産努力目標を一覧にしたものである。ただし、さとうきびの輸入必要量、飼料作物の輸入必要量、飼料の収量換算値については筆者の推計による。

この生産努力目標については、当面、合鴨や鯉を用いた水田農法やハウスをかぶせた農地（畑）（水田？）に、溶性リン肥などの遅効性肥料を施用し、農地排水や地下水を循環利用するなどの代替の方法で対処することを求めたい。こうすれば、農業公害やリン肥料の枯渇問題などに相当程度対応できる。

表-3 で求めた輸入必要量については、順次、植物工場に対応していく。3(3)節で述べたように、たとえ当面は発展途上国などに頼ったとしても、結局は日本も食料自給を図るよう、迫られることになるからである。例えば中山間地の振興策として、輸入代替の植物工場を公設し、地元民を雇用する企業に貸すなどの方策が考えられる。

そして植物工場の技術開発が進んで、エネルギーコ

表-1 植物工場における主要作物の収量と必要エネルギー量原単位

(1) 米(水稻)との対比による方法

品目	平成9年度 10a当り収量 実績(kg)	左記の 相対比 水稻=1	植物工場/ 露地栽培 の生産量比	左記の 相対比 水稻=1	植物工場の 10a当り収量 推定(kg)	必要エネルギー量 原単位 (kWh/kg)	LEDの場合の 必要エネルギー量 原単位(kWh/kg)
	A	B	C	D	E=A×C	F	G=F×0.59
米(水稻)	504	1.00	6	1.00	3,024	18.5	10.9
小麦	376	0.75	6	1.00	2,256	24.8	14.6
大麦・はだか麦	365	0.72	6	1.00	2,190	25.5	15.1
大豆	175	0.35	6	1.00	1,050	53.3	31.4
さとうきび	6,420	12.74	6	1.00	38,520	1.5	0.9
飼料作物	4,100	8.13	10	1.67	41,000	3.8	2.2

注1:平成9年度の10a当り収量実績は食料・農業・農村基本計画による。

注2:植物工場/露地栽培の生産量比は、水稻については文献5)による。

他の場合は、飼料作物を除いて水稻と同じとした。飼料作物は文献5)のレタスの例による。

注3:米の場合、高辻⁶⁾は太陽光利用型で年4作、3t/10aの収穫を見込んでおり、それに要する光熱費(高圧ナトリウムランプ使用)は333円/kg(=2000÷2÷3)であるとしている。
(米の生産費2000円/kg、その内償却費が半分で、光熱費が(人件費や材料費と同額で)残りの1/3である。)
電気代を18円/kWhとすると、必要エネルギー量原単位(F)は18.5(=333÷18)kWh/kgとなる。

注4:他の作物の必要エネルギー量原単位(F)は、米の場合の値(18.5kWh/kg)÷B×Dによる。

注5:渡辺・遠藤⁷⁾によれば、リーフレタス栽培に必要な照明・空調の電力は、赤色・青色LEDで1.3kWh/株、高圧ナトリウムランプで2.2kWh/株である。LED/高圧ナトリウムランプ比は0.59(=1.3÷2.2)となる。
この比の値を用いて、G=F×0.59により、LEDの場合の必要エネルギー量原単位の値を求めた。

(2) 野菜との対比による方法

品目	平成9年度 10a当り収量 実績(kg)	左記の 相対比 野菜=1	植物工場/ 露地栽培 の生産量比	左記の 相対比 野菜=1	植物工場の 10a当り収量 推定(kg)	必要エネルギー量 原単位 (kWh/kg)	LEDの場合の 必要エネルギー量 原単位(kWh/kg)
	A	B	C	D	E=A×C	F	G=F×0.59
野菜	2,710	1.00	10	1.00	27,100	4.4	2.6
小麦	376	0.14	6	0.60	2,256	19.0	11.2
大麦・はだか麦	365	0.13	6	0.60	2,190	19.6	11.6
大豆	175	0.06	6	0.60	1,050	40.9	24.1
さとうきび	6,420	2.37	6	0.60	38,520	1.1	0.7
飼料作物	4,100	1.51	10	1.00	41,000	2.9	1.7

注1:平成9年度の10a当り収量実績は食料・農業・農村基本計画による。

注2:植物工場/露地栽培の生産量比は、野菜と飼料作物については文献5)のレタスの例による。

他の場合は、水稻と同じとした。

注3:高辻⁶⁾は、出光興産の例から、太陽光利用型で、野菜(サラダナ)を育てた場合、それに要する光熱費(高圧ナトリウムランプ使用)は80円/kg(=8円/100g)であるとしている。
電気代を18円/kWhとすると、必要エネルギー量原単位(F)は4.4(=80÷18)kWh/kgとなる。

注4:他の作物の必要エネルギー量原単位(F)は、野菜の場合の値(4.4kWh/kg)÷B×Dによる。

注5:渡辺・遠藤⁷⁾によれば、リーフレタス栽培に必要な照明・空調の電力は、赤色・青色LEDで1.3kWh/株、高圧ナトリウムランプで2.2kWh/株である。LED/高圧ナトリウムランプ比は0.59(=1.3÷2.2)となる。
この比の値を用いて、G=F×0.59により、LEDの場合の必要エネルギー量原単位の値を求めた。

(3):(1)のケースと(2)のケースの平均

品目	LEDの場合の必要エネルギー量 原単位(kWh/kg)		
	(1)のケース	(2)のケース	平均
米(水稻)	10.9		10.9
小麦	14.6	11.2	12.9
大麦・はだか麦	15.1	11.6	13.3
大豆	31.4	24.1	27.8
野菜		2.6	2.6
さとうきび	0.9	0.7	0.8
飼料作物	2.2	1.7	2.0

表-2 農業におけるエネルギー量原単位(実績)

栽培体系	対象品種	収量 (出荷量) kg/10a	投入エネルギー量		必要エネルギー量原単位 kWh/kg	備考
			種別	kWh/10a		
水稲直播栽培(早期) 関東標準	キヌヒカリ	450	電力	2.95	0.01	その他, 乾燥に 123.60kWh, 0.3kWh/kg必要。
			燃料	124.35	0.28	
			合計	127.30	0.28	
水稲移植栽培(早期) 関東標準	コシヒカリ	480	電力	10.00	0.02	その他, 乾燥に 189.53kWh, 0.4kWh/kg必要。
			燃料	143.12	0.30	
			合計	153.12	0.32	
施設長期土耕栽培 愛知県	トマト	20,000	電力	4992.30	0.25	
			燃料	49552.45	2.48	
			合計	54544.75	2.73	
夏秋とり雨よけ栽培 岐阜県高山市近郊	トマト	6,500	電力	1074.93	0.17	
			燃料	728.00	0.11	
			合計	1802.93	0.28	
慣行栽培体系 地床育苗・手取り収穫	キャベツ	5,700	電力	0.00	0.00	
			燃料	619.17	0.11	
			合計	619.17	0.11	
慣行耕起体系	秋まき コムギ	500	電力	22.20	0.04	その他, 乾燥に 151.93kWh, 0.3kWh/kg必要。
			燃料	149.51	0.30	
			合計	171.71	0.34	
慣行耕起体系	テンサイ	6,000	電力	49.50	0.01	
			燃料	238.00	0.04	
			合計	287.50	0.05	
慣行耕起体系	アズキ	250	電力	0.00	0.00	
			燃料	171.19	0.68	
			合計	171.19	0.68	
慣行耕起体系	バレイショ	4,000	電力	0.28	0.00	
			燃料	298.32	0.07	
			合計	298.60	0.07	
緑茶栽培	緑茶	1,580	電力	250.00	0.16	
			燃料	229.43	0.15	
			合計	479.43	0.30	
ロールベール・ラップサイ レージ体系	イタリアン ライグラス	6,000	電力	0.00	0.00	
			燃料	190.14	0.03	
			合計	190.14	0.03	
澱粉・焼酎原料用 マルチ栽培	カンショ	4,500	電力	0.00	0.00	
			燃料	311.66	0.07	
			合計	311.66	0.07	
露地無マルチ	加工 ダイコン	4,500	電力	0.00	0.00	
			燃料	382.88	0.09	
			合計	382.88	0.09	
バンカーサイロによる サイレージ体系	青刈リトウ モロコシ	7,000	電力	0.00	0.00	
			燃料	140.17	0.02	
			合計	140.17	0.02	
周年露地栽培	普通温州 ミカン	3,500	電力	0.00	0.00	
			燃料	178.19	0.05	
			合計	178.19	0.05	
露地栽培(ヤマナシ台、 改良折衷式棚仕立て)	ナシ	3,000	電力	6.00	0.00	
			燃料	554.99	0.18	
			合計	560.99	0.19	

注1: 数値の出典は文献8)による。

注2: 燃料の発熱量はガソリン9.7kWh/l, 灯油10.3, 軽油10.7, A重油10.8とし, 文献8)の値に乗じて投入エネルギー量を求めた。

表-3 平成22年度(2010年度)における望ましい食料消費と生産努力目標

望ましい食糧消費		生産努力目標		輸入必要量	単位: 万トン
品目	数量: A	品目	数量: B	C=A-B	
米	1,008		969	39	
うち、主食用	906		906	0	
小麦	652		80	572	
大麦・はだか麦	258		35	223	
甘しょ	120		116	4	
馬鈴しょ	416		350	66	
大豆	511		25	486	
うち、食用	119		24	95	
野菜	1,725		1,498	227	
果実	842		431	411	
みかん	124		125	-1	
りんご	145		94	51	
その他の果実	572		212	360	
牛乳・乳製品	1,318	生乳	993	(325)	
肉類	534		324	210	
牛肉	166		63	103	
豚肉	186		135	51	
鶏肉	172		125	47	
鶏卵	252		247	5	
砂糖(精糖)	255	砂糖(精糖)	87	168	
		てん菜	375	0	
		さとうきび	162	1,296	
油脂	281	—	—	—	
茶	10		9	1	
		飼料作物*	508	329	
		その収量換算	4,900	3,170	
魚介類	1,104		699	405	
うち、食用	814		539	275	
海藻類	20		14	6	
きのこ類	53		41	12	

注1: 数値は食料・農業・農村基本計画による。

注2: 砂糖の輸入必要量は、すべてさとうきびによるものとした。さとうきびの生産努力目標／精糖換算は $162/21=7.714$ とされており、この数量を砂糖の輸入必要量168に乘じて、さとうきびの輸入必要量 $1296(=168 \times 7.714)$ を求めた。

注3: 飼料作物*(上段)は可消化養分総量である。

注4: 飼料作物*の輸入必要量(329)は、飼料作物*(508)／肉類の生産努力目標(324)=1.568を肉類輸入必要量(210)に乘じて $(210 \times 1.568=329)$ 求めた。

注5: 生産努力目標の飼料作物の収量換算(4900)は、作付面積(110万ha)にha当りの収量 $44.61(t/ha)$ を乘じて $(110 \times 44.61=4900万t)$ 求めた。作付面積、収量の数値は食料・農業・農村基本計画による。

注6: 輸入必要量の飼料作物の収量換算(3170)は、生産努力目標における比 $(=4900/508=9.646)$ を輸入必要量の数値(329)に乘じて $(329 \times 9.646=3170)$ 求めた。

表-4 植物工場の必要エネルギー量

品目	輸入必要量	LEDの場合の必要エネルギー量原単位	必要エネルギー量	100万kWの原子力発電所の必要設置基
	A	B	$C=A \times B \times 10^{-3}$	$D=C \div 1.75$
	万トン	kWh/kg	10^{10} kWh	基
米	39	10.9	0.4	0.2
小麦	572	12.9	7.4	4.2
大麦・はだか麦	223	13.3	3.0	1.7
甘しょ	4	少量故無視する。	—	—
馬鈴しょ	66	少量故無視する。	—	—
大豆	486	27.8	13.5	7.7
野菜	227	2.6	0.6	0.3
果実	411	対象としない。	—	—
さとうきび	1,296	0.8	1.0	0.6
茶	1	少量故無視する。	—	—
飼料作物-収量換算	3,170	2.0	6.3	3.6
合計	6,495		32.2	18.4

注1: 発電効率は40%以下であるが、安全をみて、発電量の2倍のエネルギーを発生すると仮定する。したがって、光と熱で合計200万kWのエネルギーを出すこととなる。年間 1.75×10^{10} kWh $(=200 \times 104 \times 24 \times 365)$ のエネルギーを供給することになる。この数値で必要エネルギー量を除せば、必要設置基数が求まる。

注2: 輸入必要量は表-3、LEDの場合の必要エネルギー量原単位は表-1による。

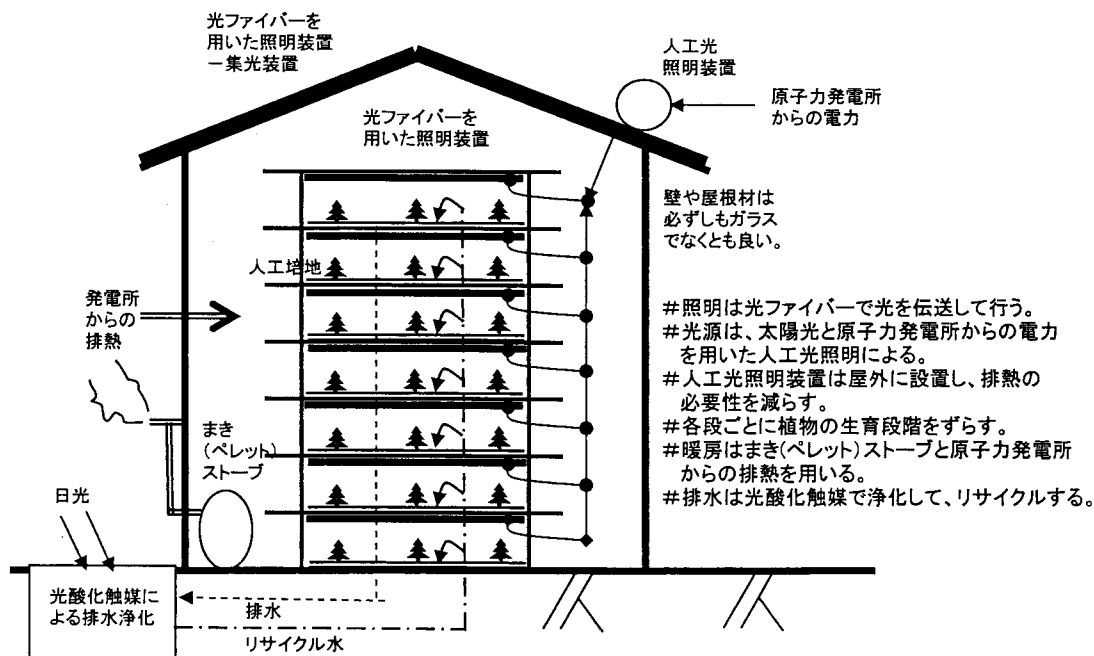


図-2 多段型の植物工場

ストが十分に下がった後、現在の水田や農地（畑）についても、順次、植物工場にしていき、オープンエリアを空けて、自然保護ゾーンや干潟・湿地に戻していくこととなる。

c) 植物工場の必要エネルギー量

表-4 は、表-1 の必要エネルギー量原単位（LID の場合）と表-3 の輸入必要量に基づいて、植物工場の必要エネルギー量について求めたものである。

このように、100 万 kW 級の原子力発電所 20 基程度の設置が必要になると試算される。その最大シェアは大豆であり、約 8 基の原子力発電所を必要としている。続いて、小麦の 4～5 基、飼料作物 3～4 基となっている。

例えば大豆の輸入必要量は 486 万トン、小麦は 572 万トン、飼料作物は 3,170 万トンであり（表 3）、その 10 a 当たり収量はそれぞれ 175kg, 376kg, 4,100kg（表-1）であるから、

大豆： $2.8 \times 10^4 \text{ km}^2$ ($=486 \times 10^3 \text{ kg} \div 175 \text{ kg} / 10 \text{ a} \div 10^3 \text{ km}^2 / 10 \text{ a}$),

小麦： $1.5 \times 10^4 \text{ km}^2$ ($=572 \times 10^3 \text{ kg} \div 376 \text{ kg} / 10 \text{ a} \div 10^3 \text{ km}^2 / 10 \text{ a}$),

飼料作物： $0.8 \times 10^4 \text{ km}^2$ ($=3170 \times 10^3 \text{ kg} \div 4100 \text{ kg} / 10 \text{ a} \div 10^3 \text{ km}^2 / 10 \text{ a}$),

合計： $5.1 \times 10^4 \text{ km}^2$ の農地を必要としていることになる。これは日本の総面積 $38 \times 10^4 \text{ km}^2$ の 13.4% に相当し、日本

の全農地面積（平成 4 年度 $5.16 \times 10^4 \text{ km}^2$ ）に匹敵する。

またこの土地に降る太陽光エネルギー量は、単位面積当たりエネルギー量を $1 \text{ kW} / \text{m}^2$ ($=100 \text{ 万 kW} / \text{km}^2$) とし、 5.1×10^4 (100 万 kW) に相当する。つまり、100 万 kW 級原子力発電所 26,000 基 ($=5.1 \times 10^4 \div 2$ (表-4 注 1 参照)) に相当する。

先に述べた原子力発電所の箇所数 (20 基) はたしかに相当な規模であるが、これだけの農地を代替する植物工場のエネルギー源であることを考えれば、必要な規模であると思われる。

d) 植物工場のエネルギーコストの低減策

表-1 の必要エネルギー量原単位は、1996 年当時の知見に基づいてまとめたものであるが、照明器具の発熱の排除にエネルギーを要するなど、無駄な部分も多い。ただし当時、照明は高圧ナトリウムランプで行っていたが、表-1 の値は発光ダイオード (LED) 使用のケースに切り換えた。

近年、冷房については細霧冷房の普及がなされており、暖房についてはまき（ペレット）など木質バイオマスの利用が進められている。特に表-2 の施設栽培のトマトの例から見ても、必要なエネルギーの 91% ($=2.48 \div 2.73$) は燃料関連のエネルギーであり、こうした木質バイオマスの利用あるいは発電所や都市の排熱を活用する意義は極めて大きい。

植物工場の必要エネルギー量が大きくなる主要な要因の一つは、大豆や小麦などの必要エネルギー量原単位 (kWh/kg) が極めて大きいことがあげられる。大豆や小麦は輸入必要量も大きく (表-3)、これが必要エネルギー量 (表-4) を押し上げていることは明らかである。しかし大豆や小麦は、中国を始めとする発展途上国がこれから益々需要を増大させるものであり、結果としてアマゾンなどの自然生態系の大量破壊に結びついていくものなので、日本がこれを自給し、世界の模範となることが求められる。

大豆や小麦などの必要エネルギー量原単位が大きい原因はその面積当り収量の低さにある。生長期間が長く、植物体のうち可食部分が少ないことに起因する。

植物体のうち可食部分が少ないことの解決は、品種改良によるしかない。特に植物工場では、植物は必ずしも自立する必要はなく、もたれ掛するような形態でもよく、根もしっかり張る必要性は薄いので、露地栽培とは違った基準で、可食部分の多い品種の選択を行うことが求められる。

植物の生長期間が長いことは、生長段階ごとの光の照度必要量には差があり、パターンをなしていることを意味すると考えられる。したがって図-2 のように、光ファイバーと多段階地を用いて、段ごとに植物の生長段階をずらし、各々に必要な最適照度の光を与えるようにすれば、同一の太陽光と人工照明量でも多くの植物体を養うことができると考えられる。

また、こうした多段階の施設は、表面積/容積比を小さくすることができ、保温の上からも有利である。

こうした各方面から、技術開発を進めていく必要がある。

(6) 人口を抑制し、欲望を抑え、あるいは食物残渣を減らせば、食料の量的問題は回避できるのではないか

先進国では食物残渣が大量発生しており、これを減らし当量を発展途上国にまわせば、食料の量的問題は緩和されよう。また人口を抑制し欲望を抑えることも、需要を減らして同様の効果がある。しかし下記理由から、これだけでは抜本的な解決策とはならない。

- ・人口動態や欲望水準あるいは食品残渣の発生は社会の構造的問題であり、号令をかけるだけで解決するものではない。その間にも発展途上国の需要は増加し、農地は広げられ、自然生態系は破壊されていく。環境教育を充実してこうしたモラル面からの改善を図る努力を続けながら、発展途上国の需要増大には別途対応する必要がある。

- ・大量の食品残渣が発生する「豊かな社会」は世界人口の小部分であり、この部分の残渣をもって大多数

の貧しい人々の需要増大に対処できるか疑問である。

(7) なぜ下水処理水や合流式下水道の越流水をバイパス放流するのか

必要な水準まで、下水 (あるいは放流先の海水や河川水) の高度処理や越流水の貯留後処理などを都市域で実施することは、物理的にも経済的にも困難である。一方、これら排水のバイパス放流ははるかに経済的であり、かつ確実な浄化効果を得られる。特に微生物汚染に対する効果が大きい⁹⁾。

高度処理や越流水の貯留後処理は、ミスが発生すると効果がなくなるので高度な維持管理を必要とするが、排水バイパスは管理がはるかに容易でありかつ確実である。

なお下水処理水のバイパス放流については、河川水を枯渇させる恐れがあるという指摘があった¹⁰⁾。現象的には、実際そうした事例もあったが¹¹⁾、これは河川上流部の水質向上効果と対比して考察すべきである。むしろ水路の形状を変えて、例えば「池の連続形態」や「落差工を用いた階段河川」にし、流量は少なくとも十分な水面があるようにすることも積極的に採用すべきである¹²⁾。この場合、水路の形状を変える前提として、洪水流量を排除する地下河川や下水道の雨水管渠の設置が必要となることもある (二重河川)。

実は、都市内水辺の水環境保全上の最重要課題は、水路が地下に埋設されて見えなくなっており¹³⁾、また残された水辺も水路幅が狭すぎてまともな河川にならないことである¹⁴⁾。水辺は住まいの近傍 300m 以内¹⁵⁾にあることが望ましく、また水路幅は最低 7m¹⁶⁾ 必要である。十分な水辺の存在量と水路幅を確保するためには、先に述べたように市街地を (Decentralized concentration 型の) コンパクトシティにし、オープンスペースを生み出すことが必要である。これが都市域における水環境保全上の最大課題である。

(8) 本案で環境問題はどの程度緩和されるのか

スウェーデンが 1999 年 1 月から施行した環境政策目標法¹⁰⁾では 15 項目の政策目標が提示されている。このうち、きれいな空気、質の高い地下水、生きた湖と川、生物が豊かな湿地、バランスの取れた海と生き生きとした海岸や群島、富栄養化をなくする、大地や水源の酸性化は自然の範囲以内、生きた森、豊かな農耕地風景、雄大な山岳環境、建物や都市計画による住み良い環境、毒物のない環境、放射線などの安全な被曝環境、気候変動の幅を限定された範囲内にとどめるの 14 項目については、2 章に示すように本案は大きな効果がある。

地球を守っているオゾン層の保護については、本案では関連施策はない。

このように、本案によれば15項目中14項目で効果があり、環境は大幅に改善される。

4. 本論の発展途上国への適用性

本論は、日本を対象として考察されたものであるが、その多くの部分は発展途上国にも適用できると考える。

・ハウスを用いて作物生産を行い、また農業使用の低減化、肥効資源と水の循環利用、面積当たり生産性の向上を図ることは、日本の経験が役立つと思われる。

・中程度以上の発展途上国には、原子力発電所の設置を援助していくべきである。必要なエネルギーの確保と炭酸ガスの排出削減が可能となる。低レベルの発展途上国には、石油などの化石燃料の使用増大を認めざるをえない。その分、先進国が原子力発電所増設でカバーする必要がある。

・都市形態を（Decentralized concentration 型の）コンパクトシティにした方がよいことは、既に発展途上国の人も認めている²⁾。

・スケルトンインフィル型のアパートについては、発展途上国に技術援助する必要がある。

・下水処理水や合流式下水道の越流水の湾外へのパイパス放流については、日本よりも発展途上国の方が進んで導入している³⁾。

・自然保護の必要性については、今後とも発展途上国でも環境教育を進める必要がある。

・肥効資源の循環を発展途上国に求めるのは、現状ではまだ無理である。日本などが率先して行い、リン資源の枯渇に対処していく必要がある。

中国などの成長の結果、食料の需要が増大しており、今後は多くの発展途上国もこの例にならうと思われる。既にアマゾンは大豆などの生産のため侵食されつつあり、あるいはその救済は間に合わないのかもしれない。さらにアフリカなどこれからも自然破壊が推し進められる地域があり、このままでは平地はすべて農地と都市と砂漠になるような世界もありうると考えられる。

発展途上国の自制を促して需要を抑えることは、彼らの現状の生活水準が劣悪であることからして、現実的に取りうる方策ではない。したがって自然破壊を阻止し、あるいは破壊されたアマゾンなどの復活を図るためには、植物工場+原子力で土地節約型の食料生産を進める以外に方法はない。しかし未だコストとエネルギー使用量が大きい欠点がある。したがって、植物工場と原子力や核融合などの技術開発を進め、そのコストとエネルギー使用量の節減を図ることが強く求められている。こうした技術開発後は速やかに発展途

上国に援助し、食料生産と自然保護の両立を図る必要がある。

5. 本論文の方法の環境(システム)学上の意義(付章)

本論文は環境(システム)学の学術的性質に十分かなうアプローチ方法を提供するものである。環境学の学術的性質については、西川¹⁰⁾が以下のようにまとめている。(a)環境学の「目的」は、環境問題を解決することや環境問題を未然に防止することを含めて、「よりよい環境を実現する理論を提示すること」にある。

(b)環境学の「研究対象」は、「人間とその環境(相互関連性を含む)」である。

(c)環境学の「研究方法」は「環境や環境問題に関する要素を分析し、関連づけ・総合・評価する」ことである。

(d)その他の性質は、「要素還元主義の見直し」、「環境に関する知識、方法、学問の体系化」、「人文・社会・自然科学の融合」、「個人で学際研究をする」ことである。

本文は持続可能な地域社会の包括的なイメージを与えるものであり、まさに(a)の課題を取り扱うものである。また本文の研究対象が人間とその環境にあることは明らかであり、(b)の要請事項も満たすものである。

さらに(a)のように環境学をとらえると、あたかも各環境問題が予定調和的にうまく相互適合するかのように考えられやすいが、しかし実際には環境問題はねじれており、各環境問題の解の間でトレードオフもありうる。本文の方法は、こうした調整についても明瞭に示すことができる。例えば農地の不足をカバーするには、植物工場+原子力が必須であることを指摘している。

本文はシンセシスや共創学などの研究方法を用いており、(c)の事項に対処するアプローチとなるものである。またこうした研究方法を用いたことにより、(d)の「要素還元主義の見直し」や「人文・社会・自然科学の融合」につながるものである。

本文は種々の環境問題を並列して取り扱うことを可能ならしめるものであり、(d)の「環境に関する知識、方法、学問の体系化」を推し進めるものである。

本文の方法は個人で学際研究することを可能とするものである。さらに他の人々との共創を自己討議という形で取り込んでおり、個人の独善に陥ることを防いでいる。

このように本文の方法は、環境(システム)学の学術的性質に十分適うものである。

参考文献

- 1) 水谷潤太郎：持続可能な地域社会のイメージ，環境経済・政策学会 2003 年大会報告書，2003.
- 2) Malone-Lee Lai Choo: The twinning strategy: - new towns with familiar places as an alternative planning strategy for Asian cities, *Abstracts for international conference on science and technology for sustainability 2004 "Asian mega-cities and global sustainability"*, pp.134-136, Science council of Japan, 2004.
- 3) 水谷潤太郎：東京湾の水質保全. 下水道協会誌, Vol. 39, No. 475, 2002.
- 4) 加藤尚武：環境学の視点から，原子力はエネルギー逼迫・環境保全時代の主役になりうるか（第 43 回原子力総合シンポジウム講演論文集），P.109, 日本学術会議，2005.
- 5) 水谷潤太郎：長期に持続可能な肥効資源の循環. 環境科学会誌, 16(2), 87-96, 2003.
- 6) 高辻正基：植物工場の基礎と実際. 株式会社華房発行，1996.
- 7) 渡辺博之，遠藤正弘：植物工場ハンドブック（高辻正基編）・2 章基礎技術－LED 光源. 東海大学出版会，1997.
- 8) （独）農業環境技術研究所：環境影響評価のためのライフサイクルアセスメント手法の開発，及び，LCA 手法を用いた農作物栽培の環境影響評価実施マニュアル，2003.
- 9) Henry Salas, Jamie Bartram: WHO: Draft guideline for safe recreational water environments, Vol. 1: Coastal and fresh waters; Chapter 4: Faecal pollution and water quality. *Summary: 2nd International conference on marine waste water discharges, Istanbul, 2002.*
- 10) 中西準子：水の環境戦略, p. 74. 岩波書店，1994.
- 11) 水谷潤太郎：都市内中小河川における水量面からみた水環境改善方策について. 水環境学会誌, Vol. 18, No. 6, pp. 467-476, 1995.
- 12) 水谷潤太郎，中田徳積：水辺の存在感に及ぼす到達距離の影響. 下水道協会誌論文集, Vol. 30, No. 357, 1993.
- 13) 水谷潤太郎：都市内水路の拡幅. 環境システム研究, Vol. 26, pp. 673-684, 1998.
- 14) Lena Lindahl 発行／編集：スウェーデン環境ニュース. 平野真佐志編集協力，1995.
- 15) 西川祥子：環境学の性質の分析－環境学を「環境や環境問題に関する総合的・体系的な科学・学問・研究」とする文献を対象として－. 環境科学会誌, 18(1), 41-51, 2005.

BASIC INFRASTRUCTURES OF SUSTAINABLE REGIONAL SOCIETY - PRESENTATION OF A SOLUTION USING THE SYNTHESIS METHOD -

Juntaro MIZUTANI

This paper shows the amendments on the previous paper "Concept of sustainable regional society", which was submitted to the 2003 general assembly of Society for Environmental Economics and Policy Studies (Japan). These amendments are required through the vigorous discussions with those around. In other words, these amendments are the results of co-creation with them, which is an important synthesizing method of artifacts.

Main points are as follows:

- 1) Preservation/restoration of natural ecosystems is set to be the prime target in this paper. Other environmental problems, such as the energy problem, food problem and water environment preservation are responded not to contradict with this prime issue. It is quite difficult and time-consuming to recover the lost ecosystems; therefore, their preservation shall have priority over other tasks.
- 2) Plant factories are an excellent food producing method, which can simultaneously alleviate the agriculture-related environmental destruction and increase the per area productivity.
- 3) When some part of the agricultural land is altered to the nature preserve, and the crop yield is concurrently demanded to increase, energy input shall obviously be necessary. As sunlight (natural) energy was lost for the agricultural production on such altered land, input energy source cannot be the natural one, and the atomic energy should be employed for this purpose if fossil fuel is given up.
- 4) Twenty 100kW atomic generators are required to supply the energy for those plant factories that can produce the crops of amount equal to the annual import requirements of Japan. Reduction of the number of generators may be feasible, however, it is impossible to make it zero because of the reason presented in clause 3.
- 5) Plant factories and atomic generators are indispensable to stop or alleviate the massive destruction of natural reserves such as Amazon, which has been brought about by the rapid demand increase for crops in developing countries, especially in China. It may be too late to stop the destruction; however, these countermeasures are also indispensable to recover the lost natural reserves or eco-systems.