

< 研究ノート >

持続可能な社会条件での食料増産方策

亀田 泰武

クボタ 技術開発推進部

< 要旨 >

世界人口の増加速度は20世紀後半よりも落ちてきたものの依然として年間1%以上で増加している。世界人口増を66億人の1%とすると1年間に66百万人にもものぼる。人口増に対してこれまで農作物の収量も増加してきたが、今後は農業開発が難しくなり、また穀類のバイオエネルギー利用も増え、食糧需給の逼迫が予想される。すでに、とうもろこし、小麦等の値段が相当上昇している。原生林などの伐採を行わない環境破壊の少ない農業開発手段として、乾燥地、貧栄養海洋での食料増産の可能性がある。乾燥地へは長距離送水、海水淡水化による乾燥地への水補給、貧栄養の外洋においては海洋深層水の表層への送水による、生産増である。これらの方法を持続的成長の観点から評価するため、固定化されるCO₂量に対して、方策の実施によりどれくらいのCO₂が使用されるのかという、CO₂投入係数を計算した。どの手法も、事業に必要となるエネルギーが大きいため、効率的なエネルギー生産手段が不可欠で、またコストも大幅に増加することとなるので、穀物需給がもっと逼迫した場合の価格上昇は非常に大きいものと考えられる。深層海洋水活用は我が国に非常に適した重要な方策であり、その推進が求められる。

< キーワード >

世界人口、持続可能、食糧増産、乾燥地、長距離送水、CO₂、海洋、海水淡水化、深層海洋水

Evaluation of Alternative Plans of Innovative Food Production through the View of Sustainable Growth

Yasutake KAMEDA

KUBOTA Corporation

< Abstract >

World population growth rate is not as high as was in the latter half of 20th century, but still remains 1% or more. That means annual population increase by 66 million. Food supply will be very tight, as the agricultural development will be more and more difficult, under rapid increase in the amount of cereals to be used for bio-energy.

Agricultural development using innovative water supply with seawater desalination and long-distance water transportation by pipelines or ships into dry areas and plankton production in artificially fertilized open sea by deep-sea water was studied. This kind of alternatives avoids destruction of nature as far as possible.

A CO₂ input coefficient was used to evaluate various alternatives. This coefficient is defined by dividing stabilized CO₂ by CO₂ production of the input energy. As for water supply in dry areas, stabilized CO₂ is calculated from the wheat production. Stabilized CO₂ from plankton production by seawater fertilization is estimated using nutritious dissolved in deep-sea water. As every alternative needs a lot of energy, CO₂-efficient energy sources are essential and production costs will be extremely high. It means food price would rise dramatically high, if the food supply got tighter. The development of ocean fertilization by deep-sea water is suitable for natural conditions of our country. Its promotion is important.

< Key Words >

World Population , Sustainable Growth , Food Production , Dry Area , Long-distance Water Transportation, Seawater Desalination, CO₂, Ocean, Deep Ocean Water

1. はじめに

バイオマスエネルギーへの資料穀物の流れに端を発した、とうもろこし、小麦など基礎食料品の高騰がおこっている。情勢は不確定であるが今後を考えると発展途上国を中心とした人口増もあり、食料を低価格で輸入することは今後難しくなるのではないかと想定される。

農作物の生産増、品種改良、農業開発可能地域での開発など、これまで大規模に行われてきた結果、今後において飛躍的な生産力進歩は少ないように思われる。

大きく食糧増産を見込める可能性があるとして残された空間は砂漠などの乾燥地および外洋である。

乾燥地での食物生産には水が不可欠である。すでに乾燥地域の水に余裕は少ない。可能性ある手法として船舶や極端に長い水路での水輸送か、海水を直接食料生産に使える方法が考えられる。

一方、陸地から離れた外洋は栄養塩類の補給がなく、プランクトン生産量が見込めない。しかし数百メートル下の海洋深層水には比較的高濃度の栄養塩類が含まれている。これを表層まで持ってきて植物プランクトンの生産増に結びつけられると食料生産とCO₂削減の効果を持つ。

これらの方策は、実現可能性とともに自然環境に与える影響の大きさから、様々な検討が行われなければならない。ただ、人のぎりぎりの生存からの圧力は非常に強くなると思われ、今回その可能性についてマクロ的な検討を行った。

各種の手段による食料生産の際のCO₂固定化とCO₂消費との関係を調べた。固定化されるCO₂の1トンあたり、投入されるエネルギーの消費するCO₂のトン数をCO₂投入係数として計算した。固定化されたCO₂の多くは消費されて元に戻ってしまうこともあり、CO₂消費で最小のものが望ましいことになる。

2. 食糧増産の飛躍的な拡大方策の必然性

今から350年ほど前の1650年に約5億人であった世界の人口は、19世紀前半に10億人を超え、1960年に30億人、1975年に40億人と、これまでは次第に増加のテンポを速めてきて、現在は66億人にもなっている。

年平均増加率も、19世紀まで0.4~0.5%程度であったが、20世紀に入り急激に上昇し、1960年から70年までは2%台を記録した。その後、人口増加率は次第に低下しているが当面は1%台にあると思われる。1)

つまりしばらくは1年に66百万人が増加していくことになる。この増加人口が必要とする食料をまかなうための水の量を計算する。一日最低1600キロカロリー必要として、それに必要な小麦は400g。小麦の生産には2千倍の水を必要とするので、800リットル。これから生存のため少なくとも一人一日1m³の水が必要と考える。これから人口増66百万人に対応して新たに66百万立方メートル/日の水資源が必要となる。この量は東京都水道局の一日配水量の15倍にもなる。

世界の穀物生産量は1990年頃に17億トンで、1970年の11億トンから、年間平均0.3億トン増加していた。それ以降は増加傾向が減り年間0.2億トン程度になり、2005年では20億トン程

度である。これを世界人口で割ると、一人当たり穀物生産量は 0.3 トンである。この世界人口一人当たり穀物生産量は 1970 頃からほぼ同じ値で推移している。しかしトウモロコシからのエタノール製造が大幅に増えると食料へ行く比率が変わり、穀物不足が起こることになる。

地球表面の 7 割は海洋で占められ、その総面積は 3.6 億平方キロ、陸地面積は 1.5 億平方キロと少ない。陸地のうち乾燥地帯は約 4 割と言われその面積は 0.6 億平方キロになる。そのうち砂漠地帯は 0.36 億平方キロとされる。砂漠化の進行により毎年 6 万平方キロの面積が砂漠になっていくとされ、20 年では 0.012 億平方キロになる。2) 一方世界の耕地面積は 0.14 億平方キロ、9) このうち穀物収穫面積は 0.07 億平方キロ、10) と言われている。

世界の灌漑農業は今世紀になって急増し、FAOによれば灌漑面積が 0.025 億平方キロに達する。耕地(草地を除いた農地)面積に対する灌漑率は 17% (農地面積の 5%) に過ぎないが、作物総生産量の 1/3 を担っている。2)

3. 乾燥地などへの水補給

熱帯雨林や森林帯などでの農業開発は自然環境の保全からすると好ましくない。また、地下水の利用や乾燥地へ近くの水資源から水を送ることは開発の余地が少ないと考えられ、今後これまでのような食糧生産増加ペースを保持していくのは難しいと考えられる。

これから、これまでと違う大規模な方法の可能性を検討する。方策として、多雨地帯からの長距離送水、乾燥地近くの水の淡水化、がある。

小麦の生産を考える。でんぷんの化学式 ($C_6H_{10}O_5$)_n から、おおまかに小麦 1 トンの生産で 1.6 トンの CO_2 が固定化されるとする。このほかに藁、殻などに一桁程度多い多くの CO_2 が固定化されていると考えられる。また、小麦 1 トンの生産に 2 km³ の水が必要とされている。

輸送方策による CO_2 発生であるが、1 kwh のエネルギー生産のため、石油で 0.74 kg、原子力で 0.022 kg の CO_2 が発生すると考えた。3)

長距離送水は巨大水タンクを船で牽引する方法が実施段階に入っている。原油をタンカーで運搬する場合、トンキロ当たり 0.0045kg の CO_2 を発生させる。4) この値を用いて水を 3 千キロ運搬することを考えると 1 トンの小麦を生産するのに必要な 2 km³ の水のため 27 トンもの CO_2 を発生することになる。

工業原料輸送の帰りの空船を利用する方法もある。以前オーストラリアから日本への鉄鉱石運搬船で水を輸送する検討をしたことがあった。鉄鉱石はオーストラリア西の広大な乾燥地域の中で採掘されている。どっちみち船は往復航海するのであるから帰りの空の状態に水を積み込んで運搬すれば付加的なエネルギー消費ですむ。日本からの距離は 5800 km あるが、インドネシアからであれば 1600 km くらいと短い。この場合付加的なエネルギー消費を 1 / 3 とすると、2 km³ の水輸送のための CO_2 発生量は 4.8 t と少なくなる。

次に長距離パイプラインによる輸送を考える。送水管の導水勾配を 0.05% とすると摩擦損失は 1 km で 0.5m。1 m ポンプアップするため必要な動力を 0.003 kwh / m³ とすると、3000 km で 1 m³ 当たり 4.5 kwh、2000m³ で 9000 kwh となる。この電力を得るため石油発電では CO_2 発生量 6.7 トン (トンキロ当たり 0.0011 kg) で、原子力発電では CO_2 発生が 0.2 トン (トンキロ当たり 0.033 g) となる。パイプライン輸送は、エネルギー消費は少ないが、建設費が非常に高いものとなる。

海水淡水化を考える。海水淡水化の消費エネルギーは現在 3 kwh / m³ くらいであるが、技術

革新により半分になるとすると 2000m^3 の淡水生産のため 3000kwh 必要となる。5)

これから小麦 1 t 分の水生産で使われる電力生産 CO_2 発生量は石油発電で 2.2 トン、原子力発電で 0.066 トン。これらを考えると原子力発電と淡水化の組み合わせが効率的であるが、プロジェクトのコストを考えると実現は相当難しいものと考えられる。

4. 海洋深層水を利用した外洋でのプランクトンの増殖

対象は珪藻プランクトンの増産であり、これを捕食する魚類の漁獲である。余ったプランクトン、魚類の排泄物は、より深い層で分解され溶解状態の CO_2 になる。

地球表面の 7 割を占める海洋の中で、外洋は陸上からの栄養塩類の補給が少なく、植物プランクトンの増殖が少ない。しかし外洋の数百メートル下のところでは栄養塩類濃度が高く、海底地形により湧昇流が発生する場所では植物プランクトンの増殖が盛んになり、いい漁場を形成する。海域のうち一次生産量が最も多いのは珊瑚礁地域で乾燥重量 $4\text{kg}/\text{m}^2 \cdot \text{年}$ の生産がある一方、湧昇流区域は 0.5kg 程度、大陸棚区域で 0.36kg 、遠洋では 0.125kg と少ない。8)

栄養塩が豊富な水深 200m 以深の海洋深層水を有光層まで汲み上げ、海洋の一次生産力を増大して新たな漁場を造成することが考えられ、実証実験が(社)マリノフォーラム 21 によって相模湾にて行われている。「拓海」と命名された実海域実験装置の設計・製作・設置が行われた。拓海は 2003 年 7 月 18 日より相模湾中央部にて水深 205m から約 $10\text{万m}^3/\text{日}$ の深層水の連続的な汲み上げを開始している。無線で送信し、1 ヶ月に 1 回の通船によるディーゼルエンジン等の点検、3 ヶ月に 1 回の燃料油(A 重油)の補給を受けながら、陸上でのデータ監視のもとで無人で運転されている。マリノフォーラム 21 では平成 17 年から 3 年間引き続き拓海の連続運転を行い実海域肥沃化実験を継続し、定量的な一次生産及び魚類生産増加に関する調査研究を行う予定。6)

運転データが発表されると具体の検討ができるが、現段階で仮定の検討を行った。半径 1 km の海域に深層水を散布するモデルを考える。深層水による一次生産増が年 1 平方メートル当たり 0.5kg として約 1570 トンの一次生産となる。一次生産のプランクトンが、いわしなどになる二次生産になると一桁下がる。

一次生産プランクトンの化学式は $(\text{CH}_2\text{O})_{106}(\text{NH}_3)_{16}\text{O}_6\text{H}_3\text{PO}_4$ である。7) これによって固定化される CO_2 は 2 千 t。一日当たり 5.5 t になる。8)

一次生産の化学式から必要な窒素は 6% として、90 t。この 2 倍量を供給すると $0.5\text{t}/\text{日}$ 。深層水の窒素濃度を $0.4\text{g}/\text{m}^3$ とすると供給する深層水量は $125\text{万m}^3/\text{日}$ になる。必要なエネルギーは汲み上げの流送による摩擦損失と深層水の方が低温で重いので揚水エネルギーがその分加算される。比重差を計算すると 0.14m の水頭が必要で、流送の摩擦損失はパイプ長 400m、導水勾配 0.06% として 0.24m。これらに攪拌も加えて水頭 0.5m のエネルギーが必要と仮定し、 $0.0015\text{kwh}/\text{m}^3$ と計算できる。その総量は $1900\text{kwh}/\text{日}$ 。燃料によるポンプ運転を発電所並とした場合、固定化 CO_2 の 1 t につき 0.25 t の CO_2 が発生することになる。ただこの値は一次生産に対するもので、食料にできる二次生産、三次生産となると CO_2 係数は一桁、二桁増えてしまう。一方、食物連鎖の中で深海中に沈んで行くものも多い。

自然エネルギーの活用の実用化ができれば、海洋深層水利用方策の実現可能性がでてくる。汲み上げ装置は海中に長大な導水管を持ち、海上構造物を安定的に保持できるので、風力発電は身近な存在である。このほか深層水と表層水の温度差を利用した発電があり、 CO_2 投入係数の大幅な改善の可能性がある。事業が効率的になれば、森林のように温暖化ガス総量削減策として有

望になる可能性がある。今のところ研究開発が進んでいる話が聞こえてこない。深層海水の活用は太平洋がすぐそばにある日本が率先して取り組むべき課題であり、調査研究の充実拡大が重要であると考えられる。

5. 固定化にともなって発生するCO₂

上記食料増産手段実施に伴うCO₂投入係数を表—1に示す。

表—1 CO₂投入係数：投入CO₂/固定化CO₂

区分		燃料	原子力発電	備考	
乾燥地水供給	送水	海上	17	-	3千km
		帰り船	3	-	1.6千km
		送水管	4.2	0.2	3千km
	海水淡水化	2.2	0.066		
深層水利用	外洋での一次生産	0.25	-		

乾燥地と外洋では基準となる固定化CO₂の性格が違うことがあるし、施設建設の投入エネルギーを考慮に入れていないが、原子力など低CO₂発生手法は可能性があると思われる。ただし、効率的に思われる淡水化でも、水製造コストは数十円かかりそうで、m³当たり30円としても、水代だけで小麦の国際価格トン3万円の2倍のコストとなる。こういうことから、相当上昇しているが、今のような価格水準で大幅な食品生産増は難しく、国際的に食料が足りなくなってきたときの価格上昇は、いままって新しい油田が探せば見つかる石油どころでないと考えられる。

ただ、トン3万円は100g当たり3円であり、現在の経済的感覚からすると相当安い感じがする。5倍になっても100g当たり15円。我が国の場合、ほかのコストが変わらなければパンの値段は1割上がる程度であろう。また農作物の価格が上昇すれば、国内の農業も力を取り戻す可能性も増える。

我が国が今の経済力を保持できれば、基礎食品価格の高騰にも対応は可能と思われる。しかし、輸出禁止など政治的な意志が働くようになってくると事態は急変する。一大食糧輸入国である我が国は、様々な事態に待たなしで対応できる方策を確立しておかなければならない。

6. まとめ

世界の人口増に対応して現在まで穀物生産は増加しており、世界人口一人当たりほぼ0.3トン/年で推移してきた。これが穀類の燃料化などによって変わってくると不足が生ずる。

食料増産の残された可能性について、地球上に残された乾燥地と外洋での生産増の可能性について検討した。乾燥地へは長距離送水、淡水化による乾燥地への水補給、貧栄養の外洋における海洋深層水の表層への送水による、生産増である。これらの方法は持続的成長の観点から評価する必要があるため、固定化されるCO₂量に対して、方策の実施によりどれくらいのCO₂が使用されるのかという、CO₂投入係数を計算した。どの手法も、膨大な量の水が消費され、事業に必要なエネルギーが大きいため、効率的なエネルギー生産手段が不可欠となる。またコストも大幅に増加することとなるので、穀物需給がもっと逼迫した場合の価格上昇は非常に大きいものと考えられる。深層海洋水活用は我が国に非常に適した重要な方策であり、その推進が求められる。

- 1) 国勢調査トピックス H14. 7
- 2) 乾燥地の灌漑農業における持続的発展 - 砂漠化と灌漑計画 -
鳥取大学乾燥地研究センター 山本 太平
- 3) 原子力発電のライフサイクルCO₂総排出量(速報値)について 電力中央研究所 2001.7.10
- 4) 研究ノート 6 輸送エネルギー消費原単位の検討 ウッドマイルズ研究会
- 5) 東レ株式会社 HP
- 6) 海洋肥沃化装置「拓海」の設計思想と実海域実験 大内他 日本造船学会講演会論文集第4号 H16年
- 7) <http://www.iis.u-tokyo.ac.jp/~dkita/lecture/me7.pdf>
- 8) Ocean fertilization using deep ocean water, Masayuki Mac Takahashi 他 海洋深層水研究 4(2)、73-87、2003
- 9) 関東農政局 HP
- 10) 農林水産省 HP