

地球温暖化対策のゲームチェンジャー； サツマイモ・メタン・水素の大量国産化技術開発の最前線

Game changers to combat global warming; At the forefront of developing technologies for mass production of sweet potatoes, methane and hydrogen in Japan

鈴木高広*

1. 加速する地球温暖化と多発化する地震

このところ気温の上昇速度を上回るペースで海水温が上昇している（図1）。海水温が高くなるとCO₂溶解度が低下する。2012年以降、海水よりも

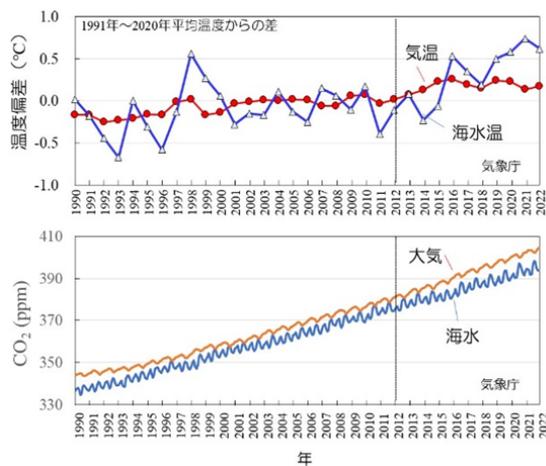


図1 大気と海水表層の平均温度とCO₂濃度の推移

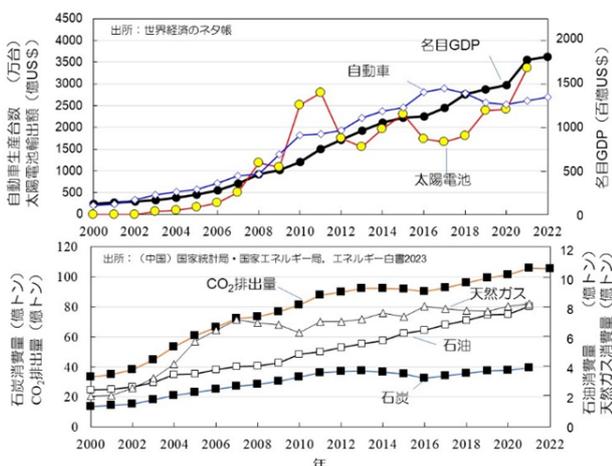


図2 中国の名目GDP、自動車生産台数、太陽電池輸出額、化石燃料消費量とCO₂排出量の推移

大気の方がCO₂濃度の上昇速度が高く、海のCO₂吸収率が低下していることが分かる。

2012年は、再生可能エネルギー特別措置法が施行され、日本でも太陽光発電が急速に普及し始めた年である。世界では2009年頃からメガソーラー発電所が増え始めた。安価な太陽電池が飛ぶように売れて巨額の富を得た中国は、産業・経済が急拡大し、化石燃料消費量も増大したのである（図2）。

世界の再エネ戦略が、太陽電池の7割を供給する中国を潤し¹⁾、自動車、家電、電機、建設、機械など、すべての鉱工業生産が急拡大した。その結果、世界が再エネで石炭消費を減らす量を大幅に上回るペースで、中国の化石燃料消費量が増大し、世界のCO₂排出量は増加しつづけている。

日本も太陽光発電で石炭消費量を少し減らしたが、それ以上に中国の化石燃料消費量を増大させた。大気CO₂は、世界全体の石油・石炭・天然ガス消費量に比例して増える。安価な設備輸入に依存する先進国の再エネ戦略が、新興国の経済発展を促しCO₂排出量を増大し続けているため、地球の気温が上昇し、熱波や干ばつ、暴風、土砂災害、洪水被害が急拡大しているのである。さらに日本では、海水温と水位の上昇が巨大地震を多発化している。1985年以降、地震件数（観測地；福島県）が海水位上昇に比例して指数関数的に増加しているのである（図3）²⁾。

冬季の海水温上昇が水蒸気発生量を増加し、積雪量が増大し、大地震の発生リスクが高まっている（図4、図5）。日本列島は、ウォーターベッドのような含水地層に横たわる構造をしている。小さな子供が

* 近畿大学生物理工学部教授

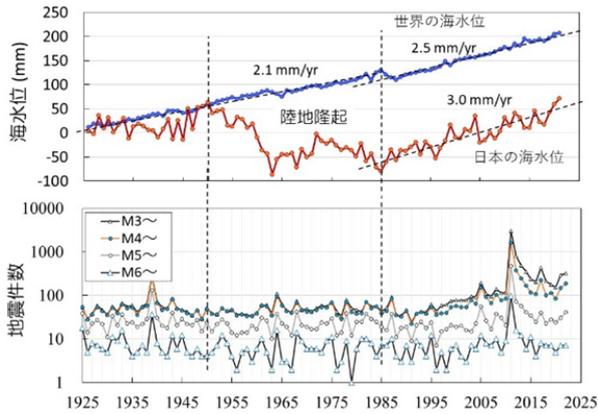


図3 海水位と地震件数（観測地：福島県，以下同）

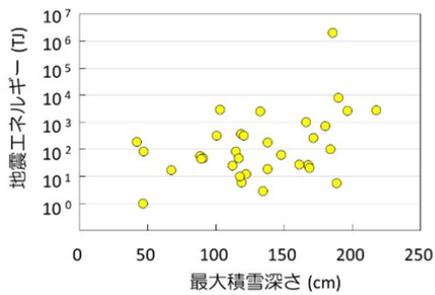


図4 新潟県の最大積雪深さ（6地点平均，以下同）と春季（3月～5月）の地震放出エネルギー

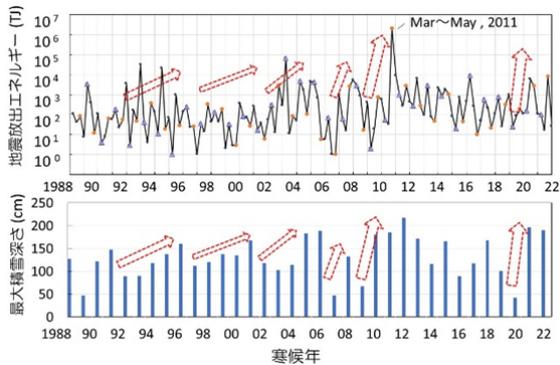


図5 最大積雪深さと地震放出エネルギーの推移

ベッドで寝起きしても振幅は小さいが、大人が寝起きすると揺れが拡大する。同様に、大量の積雪で加圧された含水層の弾性反発力が、春の融雪で軽くなった東北地方を突き上げ東方に押し出す（図6）。

積雪荷重に比例して地殻ポンピング運動エネルギーが増大し、地震が巨大化するのである（図7）。

このように含水地層が横たわる日本列島は、東北・北陸が雪で沈むと南西方面が浮き上がるシーソー現象を起こす。図8は、1989年から2022年の34年間に観測された桜島（鹿児島）の噴火回数の月別平均値を標準誤差と共に示す。東北・北陸地方に積雪荷重が増す12月から冬季にかけて桜島の噴火回数

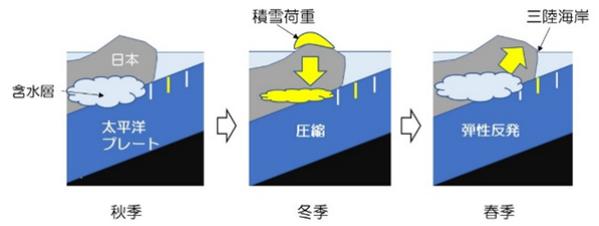


図6 積雪荷重と含水地層の弾性反発力が起こす地殻ポンピング運動により三陸沖を先頭に東に進む日本プレート

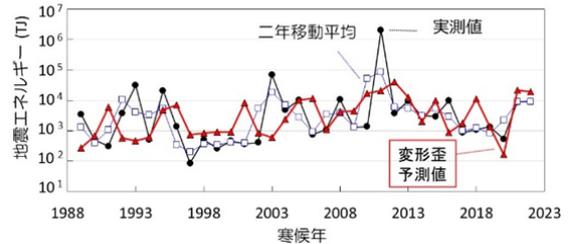


図7 積雪荷重と海水位から算出した地震エネルギーの予測値と実際の地震放出エネルギーの推移

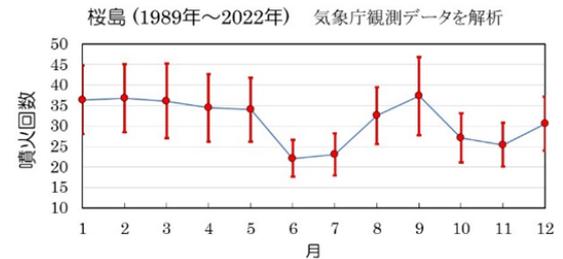


図8 桜島の月別平均噴火回数（34年間）と標準誤差

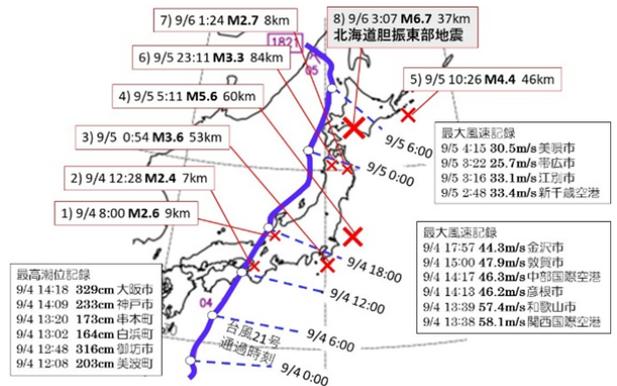


図9 2018年9月4日から6日に発生した地震と台風21号の通過時刻、観測史上最大風速・潮位を記録した地点

が増え、6月は有意に減少することが分かる。8月と9月は、海水温と海水位が上昇するため浮力と海水荷重が増し、台風等の影響もあり噴火が増える。10月から11月は、気温も海水温も海水位も低下するため、噴火回数が減少すると考察される。

大規模なシーソー現象が地殻ポンピング運動を加速し、巨大地震を誘発した事例を図9に示す。2018年9月4日に関西空港を水没させた台風21号は日

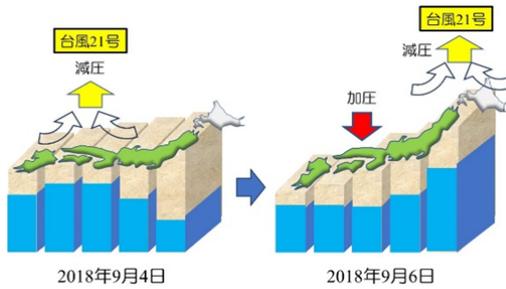


図10 地殻ポンピング運動を増幅したシーソー現象

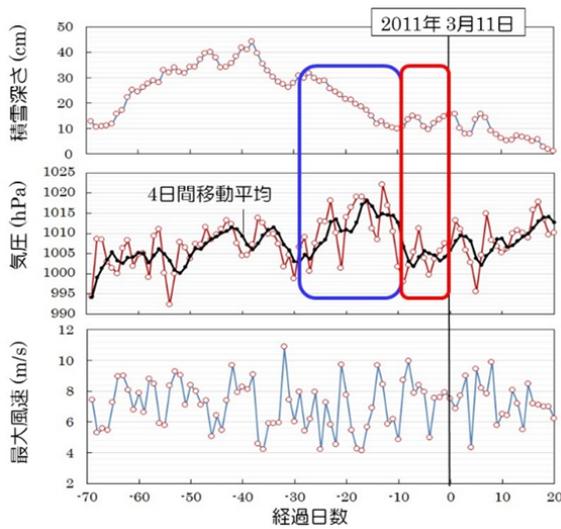


図11 東北太平洋沖超巨大地震 (M9.0) 前後の東北6県と新潟の県庁所在地の平均積雪深さ、気圧、最大風速

本海を北上し、2日後に北海道胆振東部地震を誘発した。観測史上最大規模で西日本の陸地と潮位を引っ張り上げた巨大台風が北海道に接近し、北海道南部を引っ張り上げると共に、西日本の高低差の大きな振幅がシーソー現象を起こした。2011年の超巨大地震以降、東北に連動して地盤が隆起し歪が蓄積していた胆振東部の地下含水層を、勢いを増した地殻ポンピング運動が加圧し、一気に突き上げたのである (図10)。

図11は、2011年3月11日のM9.0地震前後の積雪深さ、気圧、最大風速の推移を示す。2月中旬以降、融雪により荷重が減少したが、東北地方の浮上を強い高気圧が抑え込んだ。3月になると一転して強い低気圧が東北を襲い、海も陸地も激しく揺さぶりながら吸い上げたことが分かる。大潮 (3月6日) も重なり加速した地殻ポンピング運動が、浮上を妨げていた巨大岩盤を破壊し、三陸沖のプレート末端が大規模に跳ね上がり、大津波が発生したのである。このメカニズムに基づき、積雪深さと気圧の変化を指標としたトリガー指数を試案し計算した結果を図

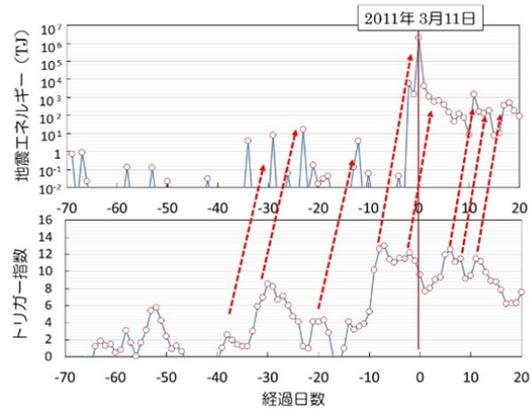


図12 地震トリガー指数と放出エネルギーの推移

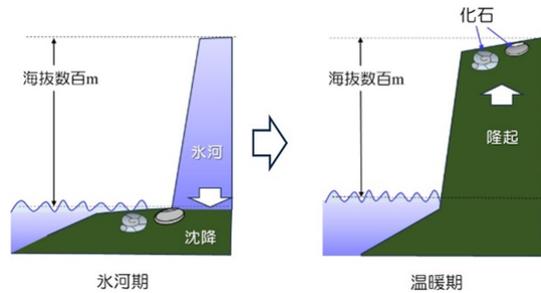


図13 水河の融解と流失により海岸が隆起した数百 m の断崖絶壁の最上層から貝殻の化石が出土する

12に示す。大地震が発生する1週間前に、トリガー指数が大きく上昇したことが分かる³⁾。

2. 気候変動と地殻変動のメカニズム

太平洋プレートが日本の下に自律的に潜り込むという通説は、推進力もメカニズムも未解明である。

世界各地のリアス式海岸や断崖絶壁では、数百 m の標高の最上層からアンモナイトや貝殻の化石が見つかることが珍しくない。かつて数百 m の厚さの水河の重みで海底に沈んでいた地盤が、水河が融けて流失し軽くなったため隆起し、数百 m の断崖絶壁を形成したと考えられている (図13)。同様に、世界有数の豪雪地帯である東北・北陸地方の積雪荷重による加圧と、融雪後の含水地層の弾性反発による地殻ポンピング運動が、年間数 cm のペースで三陸沖を先頭に東北プレートを東に移動させていることが理解できる。日本列島全体がこの推進力に引きずられて太平洋プレート上を東進すると、地下の太平洋プレートがブレーキパッドとなり、日本海側と太平洋側の移動速度に差が生じる。その結果、富士山から阿蘇山まで続く巨大な断層帯である中央構造線が形成され、各地の地震や火山噴火も、断層

歪応力の伝播期間を経て、時間遅れで誘発されていることが分かってきた(図14)²⁾。

関東平野や濃尾平野や十勝平野など、広大な平野地帯が太平洋側に分布しているのは、地下の太平洋プレートが、東進運動で引き延ばされた平野地帯の沈降を防いでいるからである。一方、日本海側の陸地は引き延ばされながら沈降するため、やがて水没し日本海が拡張する。豪雪地帯の越後平野は三陸沖に近いので、地下の太平洋プレートの影響で水没せずに平野のまま拡張しているのである。

この地殻ポンピング運動メカニズムは、6600万年前頃に恐竜を絶滅させた大氷河期と、同時期の大規模火山噴火の痕跡も、一般に唱えられている巨大隕石の衝突が原因ではないことを示唆する。恐竜の胃袋を満たし、強い日射紫外線を避けるために不可欠だった植物の大繁茂が(図15)、地球史上はじめて大気CO₂濃度を徹底的に低減し地球が寒冷化したため、大氷河期が訪れたのである。

大陸だった北極圏に最初に重厚な氷が堆積し、その重みで北極圏が沈降したため大陸が四方八方へと押し出され、大規模な火山噴火を伴う大陸移動が始まったのである。寒冷化が進むと、氷雪荷重は北極圏から徐々に南下し、地殻ポンピング運動による大陸移動が全球規模で活発化した。隕石衝突説の拠所とされる恐竜絶滅期と同時期の地球規模の噴火活動を示す地層の存在も、植物によるCO₂欠乏が起こした大氷河期の地殻ポンピング運動により、大陸移動が活発化したことを示しているのである。

巨大な隕石衝突による火山噴火の粉塵が氷河期を起こしたとする説にも錯誤がある。粉塵が一時的に日射を遮ったとしても、恐竜や植物が大繁殖するた

めの必須条件だった温暖気候と大量の可食植物の繁殖をもたらした高濃度の大気CO₂は、粉塵遮光では消滅しない。それどころか、氷雪に埋もれた恐竜や植物バイオマスは、やがて土壤微生物により分解され、CO₂とCH₄の大量排出源となる。植物が全滅した地球はCO₂吸収量が限られる。火山で噴出した粉塵が対流圏の上層で冷えて、雪や雹や雨と共に落下し、やがて青空が広がった地球の気候は、隕石衝突前よりも熱帯化したはずである。降雪のない日本列島は、アジア大陸の東岸の山岳地帯のまま、西向きに自律的に潜り込む太平洋プレートに押し続けられ、ロシアと北朝鮮と韓国と中国とも陸続きのままである。隕石説も、潜り込み説も、錯誤である。

一方、南極の氷の分析などから解析された、過去72万年間の南極周辺の海水温と気温と大気CO₂濃度は、人類増殖以前は、約10万年周期で氷河期と温暖期が繰り返されたことを示す⁴⁾。気温とCO₂濃度の上下動は同調しており、両者とも数万年かけて低下したのち、上昇に転じると2万年ほどの短期間で280 ppm前後のピークに達し、そして、再び下降期に転じるパターンを繰り返している。

このように氷河期と温暖期が交互に繰り返された理由として、地球物理学や気象学や宇宙学や諸分野の学者が、マントル対流や太陽活動や海流や地軸の影響とか、そもそも地球の平均気温は周期的に変動しており、やがて氷河期になるから温暖化は収束するなど諸説を唱えるが、どれも根拠がない。周期的な変動パターンは、明らかに植物光合成によるCO₂の吸収速度と、土壤微生物が植物バイオマスを分解するCO₂排出速度の差が原因である。つまり、氷河期を繰り返し起こしてきたのは植物光合成であり、恐竜絶滅期と日本列島が大陸から分裂し東方移動が始まった時期と、大規模噴火の地層の時期がほぼ一致することも、植物がCO₂を徹底的に枯渇させた氷河期が大規模な地殻変動を起こしたことを示

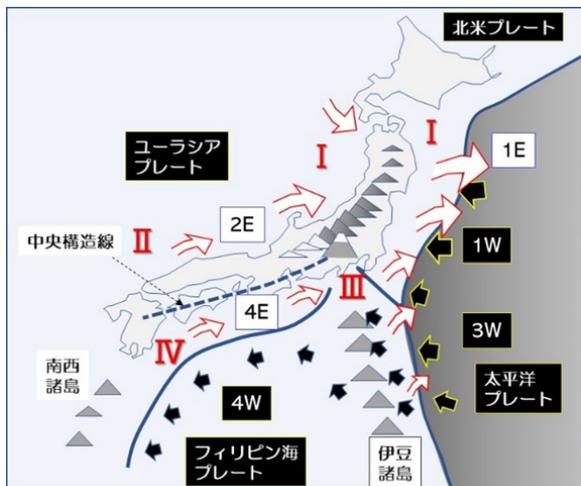


図14 地殻ポンピング運動により三陸沖を先頭に太平洋プレート上を東進する日本列島



図15 植物がCO₂を欠乏させ大氷河期を起こし恐竜が絶滅し、氷河の荷重が大陸移動と大噴火を誘発した

す。

図 16 は、過去 20 万年間の海水温と CO₂ 濃度の推移の概要⁴⁾と、植物と土壤微生物による大気 CO₂ 濃度の増減メカニズムを示す。氷河期 I において地上の生物がすべて凍結しても、海が CO₂ を吸収し生物が繁殖し、海洋生物の呼吸により排出される CO₂ が大気を徐々に温める。こうして長い冬が収束し、氷河が融け始めた泥濘期 II になると、土壤微生物による植物バイオマス分解が加速し CO₂ とメタン CH₄ が大量発生する。CH₄ は、地球温暖化係数 (GWP) が CO₂ の 21 ~ 25 倍もある温室効果ガスである。氷河が融解し酸欠状態の泥濘中では、嫌気性菌が植物バイオマスを消化し、CH₄ と CO₂ が大量発生するのである。

この現象は、温暖化により永久凍土が融けたシベリア大陸の泥濘地帯において、突然巨大なクレーターが出現する事例により理解できる。凍土に貯留された植物バイオマスが泥濘中で土壤微生物に消化され発生した CH₄ と CO₂ が高压になり、暴発するのである。また、田植えの季節の水田でポコポコと気泡が発生する現象も、秋の収穫後に土壤に鋤きこんだ稲藁や雑草のバイオマスが、初夏の泥濘中で嫌気分解され CH₄ と CO₂ が発生するのである。

氷河期から温暖期へ移行が比較的短期間で進んだ理由は、氷河期に植物が激減したため、泥濘から発生した CO₂ が植物に吸収されずに大気に蓄積したからである。同様に、土壤から掘り出したバイオマス (化石燃料) を地上の好気性巨大生物 (人類) が大量に酸化分解する一方で、地上の植物が不足しているため、CO₂ 濃度が急上昇しているのが現代である。

約 2 万年を経て CO₂ 濃度も気温も植物に好適環境が整うと、植物の生長期 III が始まり、やがて繁茂

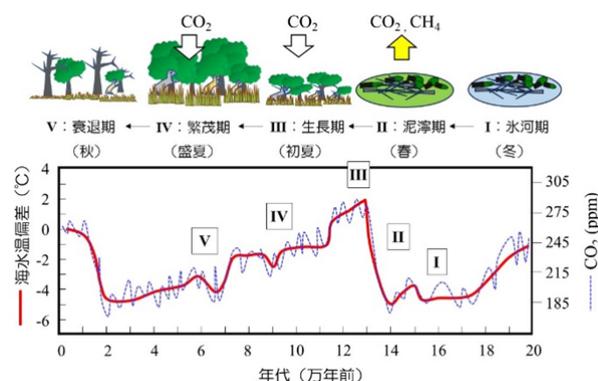


図 16 過去 20 万年間の海水温と CO₂ 濃度の変動と、植物と土壤微生物による大気 CO₂ 濃度の増減メカニズム

期 IV へと移行する。繁茂期 IV は、土壤バイオマス分解も継続して行われているが、植物の CO₂ 吸収速度の方が上回る結果、大気の CO₂ 濃度が徐々に低下する。

こうして植物が繁茂すると、今度は CO₂ 濃度が低下し気温も下降するため、再び寒冷期へと向かう衰退期 V が訪れる。CO₂ 濃度が 200 ppm 以下に低下すると、寒冷化により地上の植物が枯れるが、海が CO₂ を吸収するため、大気の CO₂ 濃度はさらに低下する。こうして再び氷河期 I が訪れるのである。

土壤微生物は、大気の CO₂ 濃度を 175 ppm から 275 ppm に高めるために約 2 万年要したが、このところの人類は CO₂ 濃度を 2.5 ppm/年のペースで上昇させており、500 倍の高速ペースである。恐竜時代の植物生態系でも、CO₂ 回収速度が不足する。現代科学の粋を結集したサツマイモの超大量格安生産技術の普及が、人類存続に不可欠になることは明白である。

一方、伝承的バイオマス教育は、温暖化対策と称して石炭を木質バイオマスに変える方法を主導した。その結果、石炭火力 (発電効率 40% ~ 45%) よりも低い発電効率 (25% ~ 30%) の木質バイオマス発電が、発電量 1 kWh ごとに CO₂ 発生量を石炭発電よりも 1.5 倍に増大したが、木が生長するときに吸収するカーボンニュートラル資源だから CO₂ は増えないと主張している。ところが、石炭を木質燃料に代替しても、日本の森林増殖量は変化せず、世界の森林体積は減り続けている。つまり、石炭発電よりも 1.5 倍量に増えた CO₂ を森林がまったく回収できず、大気の濃度を一段と高めているのである。

このように、気候変動と地殻変動と恐竜絶滅のメカニズムも無理解なまま、人類は温暖化対策と称する新技術を導入し、CO₂ 排出量を一段と増やしてきた。そして、さらに重大欠陥が潜む新技術を推進しようとしているのである。膨大な CO₂ を貯留している海を酸性化し、海から大気に CO₂ を逆流させ、無限温暖化ループを主導する新技術が、CCS とアンモニア燃料である。

3. CCS とアンモニア燃料が温暖化を加速する

CO₂ の回収・有効利用・貯留 (Carbon dioxide Capture, Utilization or Storage) の略語を CCUS と称し、火力発電所や工場などの排出ガスに含まれる CO₂ を分離・回収し、地下の安定した地層の中に貯留する技術が CCS である (図 17)。また、資源として作物生産や化学製品の製造に有効利用する試み

がCCUSであり、太陽光発電や風力発電などの余剰電力で水を電気分解し製造した水素H₂でCO₂を還元し、メタンCH₄やアルコールなどに変換し、燃料や合成原料として利用するための研究が進められている。

人為的CO₂の主な排出源として、自動車と火力発電がある。自動車は、ガソリン車などを廃止し、走行時にCO₂を排出しない電気自動車や燃料電池車への移行が世界的な潮流となっているため、CO₂排出量は減少すると見込まれる。一方、中国やロシアがアフリカ諸国への経済支援と新市場開拓に積極的に取り組んでいるように、世界各地の新興国の産業発展が今後も石炭需要を増加すると予測され、地球温暖化を加速すると見込まれる。CCSはこの問題を解決する切り札として期待を集めている。

図18は、圧力と温度によるCO₂の状態変化を示す。CO₂は、低温で加圧すると気体から液体へと変化する。水深500mでは水温が約14℃に低下し、5MPaの水圧がかかるため、液化し体積を大幅に縮小することができる。水深500mよりも深い海底

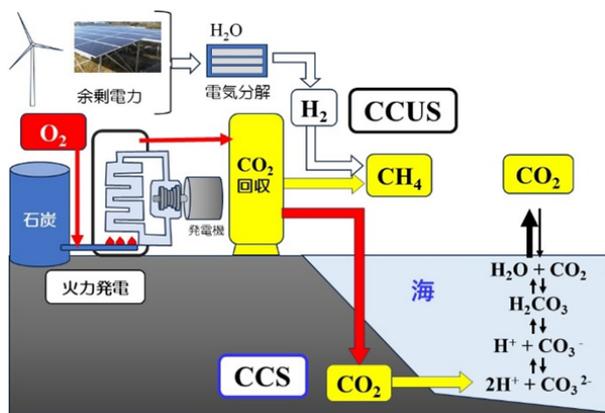


図17 火力発電の排出CO₂を回収し海底に貯留するCCSと余剰電力を利用しCO₂を還元し再利用するCCUS

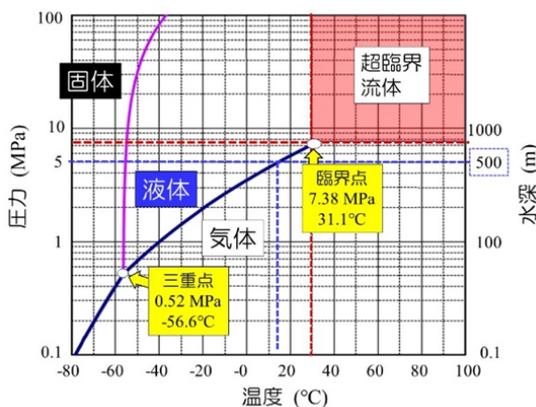


図18 圧力と温度によるCO₂の状態変化

をさらに掘り進み、1000mの深部に液化したCO₂を貯留する方法が一般的である。だが、上述したように日本の地下は高压水を多量に含む地層が横たわり、高压海水と隔離した空間はどこにもない。しかも、高压低温水ほどCO₂の溶解度が増す。

したがって、地下に貯留したCO₂は高压地層水に溶解し、やがて深海に拡散する。その結果、海水の酸性化を深海から加速するのである。

図19は、海水表層pHが年々酸性化していることを示す。東経137°北緯30°の海水はpH 8.07、北緯3°はpH 8.03と低緯度海域の方が、表層pHが低い。だが、高緯度海域は水温が低いためCO₂の溶解度が高く、pHの低下速度が高いことが分かる。

図20は、pH変化に対するCO₂分子とイオンの存在率を示す。海水に吸収されたCO₂は、pHに依存して水素イオンH⁺を解離した炭酸水素イオンHCO₃⁻や炭酸イオンCO₃²⁻になる。HCO₃⁻の存在率は、pH 7.4付近がピークで、それよりも低いpHでは分子状CO₂の割合が増える。海水の温度が上昇すると分子状CO₂の溶解度が低下するため、酸性化した海水中で生成したCO₂分子は海水中にとどまる

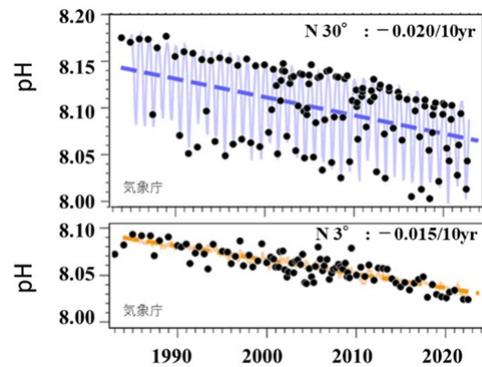


図19 東経137°北緯30°と3°の海水表層pHの推移

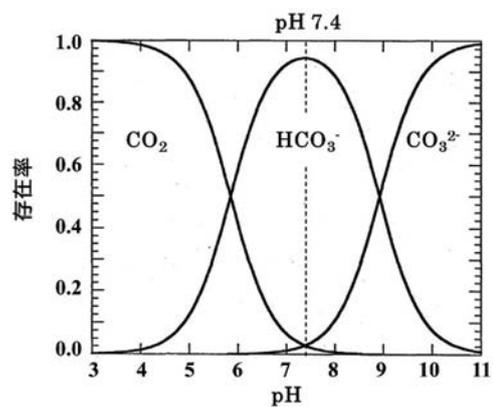


図20 海水pHに対するCO₂分子状態の変化

ことができなくなり、大気に沸き出すのである。

深海は、すでにこの深刻な状況が起きている。図 21 は、海水中の溶存酸素 O_2 と CO_2 の動態を示す。海水表層は、海面から溶解する酸素 O_2 と、植物性プランクトンや藻類やサンゴの褐虫藻による光合成で生成する O_2 が、魚類などの海洋生物に必要な O_2 を供給する。したがって、海洋生物が豊かな海域は、水中の O_2 が消費され深海の溶存酸素濃度 (DO : Dissolved Oxygen) が低下する。また、日光が届かない深海は、光合成による O_2 補給効果が乏しいため、海水表層よりも DO が低下するのである。

深海の DO 低下は、バイオマスが海洋生物により酸化分解されていることを示す。上層の生物の死骸や残渣を含むバイオマスは深海に沈降し深海生物の餌となり、 O_2 が消費され CO_2 が生成する。このため、バイオマス量が多い深海ほど CO_2 濃度も増大する。

図 22 は、水深と DO の概要を示す。水深 1000 m 付近までは海洋生物により DO が低下する。さらに深海は、生物量が減少し酸素消費量が低下するため、DO が上昇する。日本海は、深海に至るまで DO が高めに維持されており、上層と深海の循環流が DO を深海に供給しているが、酸素供給量に比べ海洋生物量が少ないことを示唆する。

図 23 は、水深と pH の関係を示す。バイオマスが豊富な海域は水深 1000 m 付近まで DO が低下し、

深海の CO_2 濃度が増加するため、上層よりも pH が低下する。海水表層が pH 8.1 の海域でも、水深 1000 m の海域では pH が 7.4 付近まで低下している。このように深海は、バイオマス分解により発生した CO_2 が海水を酸性化するとともに、温水化により CO_2 溶解度が低下した海水中で過剰となり、海面から CO_2 が沸き出す事態が現実に取り始めている。CCS は、バイオマス分解により上層水よりも酸性化した水深 1000 m の海域に、さらに大量の高圧 CO_2 を供給し、一段と酸性化を加速しようとしているのである。

地球が誕生した 46 億年前の大気は数十気圧ほどあり、98% が CO_2 だったと考えられている。その CO_2 の大半が海に吸収され、大部分は $CaCO_3$ 鉱物や貝殻として貯蔵され、また、光合成生物によりバイオマスと O_2 に変換され、地球生態系を育んだのである。海洋酸性化が一段と進めば、貝殻やサンゴや $CaCO_3$ 鉱物など、海洋に貯蔵された膨大な CO_2 を溶かしだし、海面から沸き出す CO_2 が一段と温暖化を加速すると予測される。CCS で海底に輸送した CO_2 が深海の酸性化を加速し、地上の回収量を大幅に上回る膨大な量の CO_2 が海から沸き出すことで、地球温暖化がますます加速することになりかねないのである。

海外では、内陸部の地下に貯留する CCS の実用化が進められている。だが、大気中の CO_2 濃度が低下すると、減った分の CO_2 が酸性化と温水化が進む海から大気に逆流するため、結局、CCS によって大気中の CO_2 濃度が減ることはないと思込まれる。

一方、燃焼時に CO_2 を出さないアンモニア燃料 (NH_3) は、不完全燃焼すると GWP が 298 の N_2O を生成するため、燃焼温度を高めて NO_x に酸化し

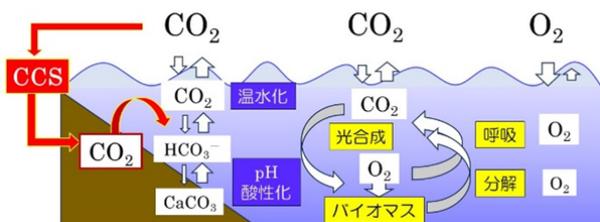


図 21 海水中の溶存酸素 O_2 と CO_2 の動態

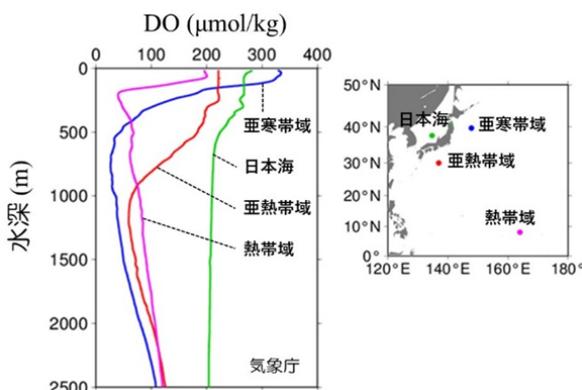


図 22 水深に対する溶存酸素濃度 (DO) の変化

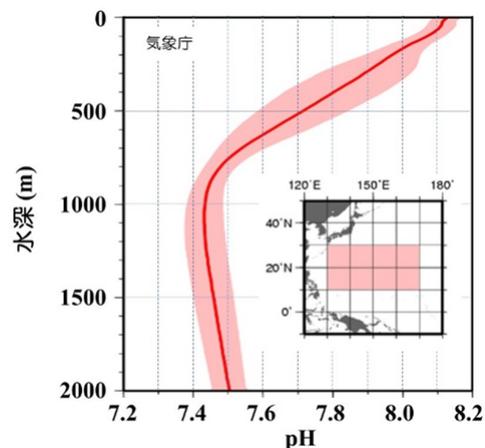


図 23 海洋水深に対する pH の変化

排出する。NO_x は、酸性雨の主要原因物質であり、現在も主要幹線道路周辺は NO_x 濃度が高い。石炭火力発電の排気にも NO_x が含まれるため、従来から NO_x を N₂ に無害化する還元技術が適用されている。ところが、中和還元剤として使用するのは NH₃ であり、NH₃ 燃料を燃やして、NH₃ で中和する無限ループ反応が起こる。このため NO_x 中和剤として、CaO や NaOH が検討されている。CaO は、貝殻などの CaCO₃ を高温で燃焼し製造するため、原料も燃料も CO₂ を大量に排出する。NaCl を電解してつくる NaOH も、強酸の HCl が生成するため、中和剤が海の酸性化を加速する。つまり、重大な欠陥が解決されないまま実用化が進められているのである。

アンモニア燃料は、化石燃料のような地下資源ではないため、工業生産するプロセスでもエネルギーを大量に消費する。化学の教科書にも記載されているハーバー・ボッシュ法が常用され、400～600℃、100～200気圧の高温高压で N₂ と H₂ を反応させ NH₃ を生成する。したがって、反応工程で大量のエネルギーを消費し CO₂ を排出するだけでなく、合成反応に使う H₂ を調達するために、別途、エネルギーを消費する。

一方、常温常圧で反応を行う窒素固定細菌のニトロゲナーゼを模倣したモリブデン触媒法が考案され、省エネ製法として研究が進められている。ところが、特殊な還元剤としてヨウ化サマリウムを大量に使用し、酸化されたヨウ化サマリウムを還元する方法の開発が研究課題となっている有様で、実用化は無理である。

このようにアンモニア燃料は、燃料製造工程も NO_x 処理工程も欠陥だらけであり、このアンモニ

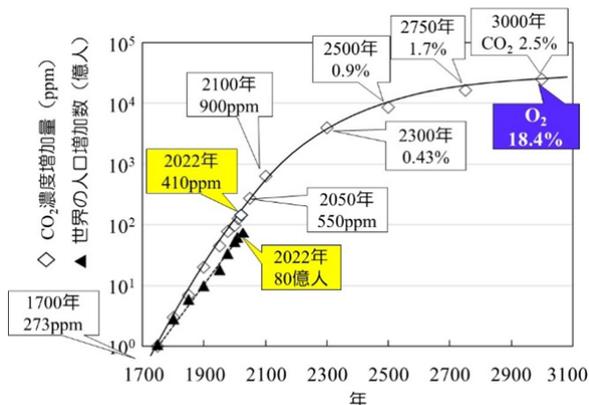


図24 西暦1700年と比較した世界の人口増加数と大気中のCO₂濃度増加量の推移と長期予測（筆者分析）

ア燃料を普及すると、海からも CO₂ が沸き出し、無限温暖化ループを劇的に加速する可能性がきわめて高い。

さらにこれらの新技術は、人類絶滅を加速する深刻な重大問題が無視されている。CCSは、大気中の O₂ を化石燃料の C と結合させ、不可逆的に地下に埋めるため、大気中の O₂ 濃度低下を加速する。これまで、大気 O₂ 濃度が労働安全衛生法で規定する酸欠濃度 18% に低下するまでの猶予期間を 1000 年と推定してきたが⁵⁾、O₂ を地下へと封じ込める CCS が普及すれば、人類が絶滅する酸欠までの猶予期間は、数百年へと短縮されると推定される（図24）。

一般に、化石燃料は枯渇する資源だと教育されているが、木質カーボンニュートラル説や、恐竜隕石滅亡説、太平洋プレート潜り込み説以上に、明らかな伝承的錯誤の弊害である。枯渇するのは化石燃料ではなく、大気 O₂ である。

図25は、化石燃料の起源を示す。すべての地球上の生物は UV を防御する必要があり、植物はポリフェノール類を蓄積し、UV による酸化分解を防いでいる。樹木の主成分のリグニンもポリフェノール類である。ポリフェノール類は、UV を吸収減衰するため難分解性化合物であり、土壌微生物でも完全分解されずに化石になる。リグニンが、石炭の原料である。一方、セルロースやデンプンは、酸化分解されると CO₂ になり、嫌気分解されると CH₄ が生成する。

一方、最初の光合成生物である原始藍藻（シアノバクテリア）は、UV を減衰する難分解性油を生合成する機能を獲得し、海面に浮かんだ油膜で UV をカットしながら光合成を行い大繁殖したのである。この難分解性油が大量に砂浜に打ちあがり、砂礫層に浸透し原油となったのである。一方、岩場に堆積した藍藻はストロマトライトと呼ばれる岩石群にな

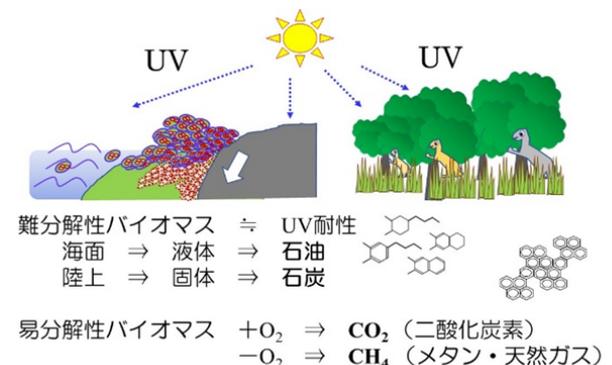


図25 化石燃料の生成メカニズム

り、北極海の氷の下など、各地に30億年前の化石群が残っている。

このように、光合成反応で生成したバイオマス量に比例して O_2 も生成し、海水に溶けて酸化鉄などの鉱物や海洋生物に利用され、余剰分の O_2 が海面から沸き出し大気に蓄積した。大気に O_2 が増えるとUVの作用でオゾン O_3 が形成され、上空でUVが減衰し、地上で生物が生きられるようになったのである。

したがって、大気 O_2 濃度が0%に達しても、生物がつくった O_2 は、鉱物や海中に残っているため、バイオマス資源（化石燃料）も残っていないと、CとOの収支が合わない。つまり、化石燃料を使い続けると、大気 O_2 濃度が18%に達し、人類は酸欠で全滅するが、化石燃料は膨大に残っているのである（図26）。

酸欠や海水酸性化を加速するCCSやアンモニア燃料による無限温暖化ループが動きだす前に、新たな対策が求められている。

4. $200 \text{ MJ m}^{-2} \text{ y}^{-1}$ を達成した甘藷メタン生産

以上のように、太陽光発電も木質バイオマス発電もCCSもアンモニア燃料も、温暖化を加速する。一方、可食性資源作物を大量生産するための技術開発の研究は、これまで未開拓であった。

資源作物の大量生産研究を妨げてきた一因が、“食料自給率”である。カロリーベースの食料自給率は38%前後で推移しており、国際情勢により国民の食と生命が脅かされるリスクを抱えている。このため、FIT制度のバイオマス発電は、食料生産と競合する資源作物は対象とせず、廃棄物バイオマスのみを対象としている。バイオマス資源は、“食料生産と競合しない”ことが条件となっているのである。

単藻類の油生産は、“日本の海は世界で6番目に広く、食料生産と競合せず、日本が産油国になれる”

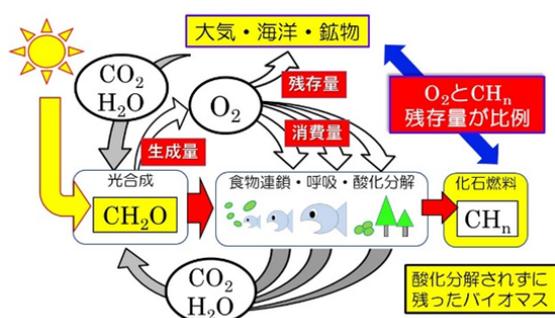


図26 地球の O_2 とバイオマス・化石燃料の収支

という説を唱え、巨額の国費が投入され研究が進められた。ところが、海面の研究事例はまったく見当たらず、食料生産に適した日照の良い陸上に大きな水槽を建造し、微細藻類を通気攪拌培養した研究や、人工光源で通気攪拌培養する研究ばかりだった。

筆者は、1980年代に微生物による生分解性プラスチックPHB（ポリ- β -ヒドロキシ酪酸）の大量生産法を確立し、日本で初となる工業生産も実現したが、高コストのため普及しなかった。その後、PHBに代わってポリ乳酸が主流となった。PHBは、好気性細菌の通気攪拌培養で生産した⁶⁾。ポリ乳酸は、通気攪拌が不要な嫌気発酵で乳酸原料を製造したのである⁷⁾。

通気攪拌培養はコストも消費電力も嵩む。藻類学者にはこの知識も経験も無く、関連報告会等で忠言した筆者の意見を無視した結果、必然的に藻油で石油を代替する国家プロジェクトは大失敗に終わった。単藻類の通気攪拌光合成培養で生産した油で石油を代替すると CO_2 排出量が3倍以上に増えるのが実状であり、最近では食廃油（SAF；Sustainable Aviation Fuel）をジェット燃料にする計画にすり替わっている。

年間日射量が日本の1.6倍もあるブラジルでは、サトウキビの糖液でアルコールを嫌気発酵生産し、搾った茎葉を天日乾燥したバガス蒸留用燃料としてアルコールを製造し、ガソリンに混合している。日射エネルギー（年 8000 MJ/m^2 ）に対し、アルコールの収率は約1%と見積もられ、農地のエネルギー生産性は年 80 MJ/m^2 と概算される。

日本は、蒸留に必要な非化石燃料を安価に調達することが困難である。このため、資源作物をエネルギー変換する方法は、天日乾燥した固形燃料と、嫌気消化法によりメタンに変換する方法が主流である。

樹木の幹や難分解性の高丈草本はメタン生産に適さず、乾燥して燃やす火力発電効率は30%弱である。高丈草本を年 100 MJ/m^2 生産し火力発電に用いると、エネルギー生産性は 30 MJ/m^2 、年間日射量 5000 MJ/m^2 に対する総合収率は0.6%にとどまる。

一方、森林統計に基づく国内山林2500万haの年増殖量は0.75兆MJ（7500万t \times 50% \times 20MJ/kg）と概算され、山林の日射量1250兆MJに対する光合成収率は0.06%、乾燥し木質バイオマス発電に利用すると総合エネルギー効率は0.018%と、さらに極貧である。

対照的に、サツマイモの根圏に下水処理水を供給した三層栽培法を用いて二期栽培したところ 223 MJ/m² の収量（芋 25.3 kg/m² と茎葉 39 kg/m²）が得られ、資源作物の生産効率世界一を達成した（図 27）⁸⁾。常法の全国平均収量 2.5 kg/m² の 10 倍であり、栽培技術を探求すれば、安価に超大量生産できることが明らかとなった⁹⁾。また、収穫した芋・茎葉を下水汚泥と混合し、ペットボトルを用いて連続消化反応を行ったところ、芋と茎葉のほぼ全熱量を、常温常圧反応で容易にメタンに変換できることも実証した（図 28）¹⁰⁾。

都市ガスのメタンから水素を取り出し燃料電池で発電と給湯を行うエネファームが広く普及しており、エネルギー効率が 90% に達する（商品カタログ値）。したがって、サツマイモ・メタン・水素を経るエネルギー生産性は 201 MJ/m²、日射エネル



図 27 サツマイモの根圏灌漑三層栽培



図 28 サツマイモの全熱量をメタンに変換する実験

ギー収率は 4.0% に達し、同じ面積で木質バイオマスを生産し火力発電を行うよりも、大気から 200 倍量の CO₂ を毎年回収できることを示す。また、サツマイモ・メタンが排出した CO₂ を 1 年で全量回収することができるカーボンニュートラル資源であることが理解できる（図 29）。

国民の年間食料消費カロリーは 106 兆 kcal と見積られる。上述の量産法を用いると 106 兆 kcal 分のサツマイモの生産面積は 32 万 ha で足りる。全国の耕作放棄地 42 万 ha（2020 年）で、食料生産と競合することなく、カロリーベースの食料自給率を 138% 以上に高めることが容易に実現可能であることを示す。

5. 資源作物農業の経済性と市場規模

現在、国内エネルギー総需要は 18.7 兆 MJ、化石燃料消費量は 15.5 兆 MJ である（2021 年）¹⁾。2040 年頃には火力発電の廃止による熱損失の大幅削減、電気自動車による省エネ効果などにより、全需要を 10 兆 MJ に縮小できると見込む。そのうち 6 兆 MJ をサツマイモで供給するために必要な栽培面積は 300 万 ha、国土面積の 7.8% で足りる（図 30）。耕作放棄地のほか、土砂災害の危険度が高い山間部などを整備すれば、従来の農業を維持したまま、自然エネルギー 100% 社会を構築できる。

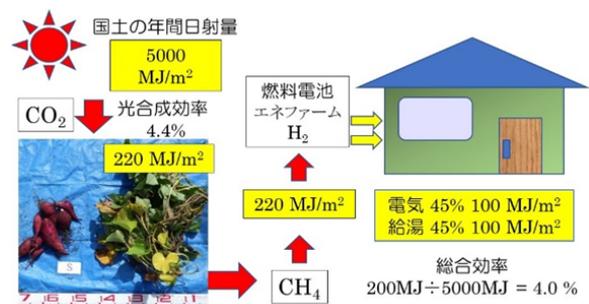


図 29 サツマイモ・メタンの日射エネルギー変換効率

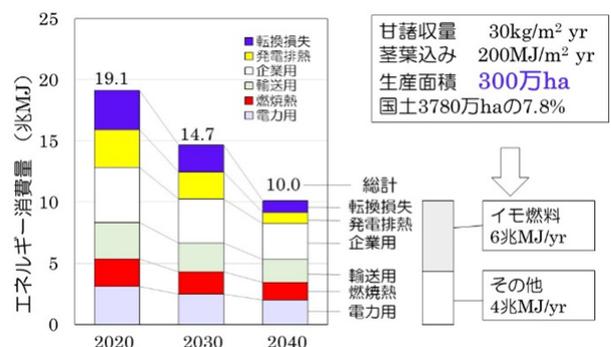


図 30 エネルギー削減目標とサツマイモ生産目標

表1 燃料用サツマイモの市場規模

	食用芋 (現在)	燃料用 単作	燃料用 二期作	(参考) 水稲米	燃料芋 食用芋	燃料芋 食用米	
年産量	kg/m ²	2.5	20	30	0.54	8~12倍	—
出荷単価	円/kg	160	40	40	250	0.25倍	—
農地生産額	円/m ²	400	800	1,200	135	2~3倍	6~9倍
市場規模	兆円	0.2	30	30	1.8	150倍	17倍

世界的な資源調達競争の激化と円安の影響で燃料価格が高騰しており、2022年には新電力会社系の火力発電コストが35円/kWhに達し、石炭コストが4円/MJと概算された。一方、サツマイモ・メタンはエネルギー効率（エネファーム；90%）が石炭の2倍に高まるため、サツマイモの目標単価を5円/MJに設定すると、6兆MJ分の新たな燃料作物市場は、30兆円を見込むことができる。

表1に燃料芋の市場規模を示した。焼き芋やスイーツ原料としても人気食品のサツマイモは、卸売市場で1kgあたり160円前後で取引されているが、市場規模は2000億円程である。一方、熱量が8MJ/kg（芋6MJ/kg、茎葉2MJ）のサツマイモの単価を40円/kg（芋32円、茎葉8円）に設定すると、燃料作物市場は30兆円、150倍に拡大する。大量生産技術を普及すれば、農業経営性は格段に向上することが分かる。

可食燃料作物の大量生産が、地方に豊かな暮らしをもたらし、少子高齢化、医療・介護・社会保障問題なども解決し、日本社会を救うことができるのである。

参考文献

- 1) エネルギー白書 2023, 資源エネルギー庁 HP
- 2) 鈴木高広, 坂本勝, 日本太陽エネルギー学会講演論文集, 107-110, 2022
- 3) 鈴木高広, 坂本勝, 同論文集, 222-225, 2019
- 4) R. Uemura, *et al.*, Nature Comm., 9, 961, 2018
- 5) 鈴木高広, イモが日本を救う, WAVE 出版, 2014
- 6) T. Suzuki, *et al.*, Appl Microbiol Biotechnol., 23 (5), 329, 1986
- 7) R. Ohashi, *et al.*, J Biosci Bioeng., 87 (5), 647, 1999
- 8) T. Suzuki, *et al.*, Horticulturae, 9 (3), 309, 2023
- 9) T. Suzuki, *et al.*, Plants, 12 (2), 287, 2023
- 10) 鈴木高広, 坂本勝, 同論文集, 209-211, 2021

著者略歴



鈴木高広（すずき たかひろ）

1988年名古屋大学農学博士，日本学術振興会特別研究員DC2，マサチューセッツ工科大学，通産省工業技術院，英国王立医科大学院，東京理科大学，企業3社を経て，2010年近畿大学生物理工学部教授（現職）に着任。化粧品会社で紫外線と光合成とバイオマスと化石燃料の關係に気づき，イモエネルギー研究を始めると，東日本大震災と福島原発事故が勃発。地球温暖化を止め人類を救う歴史的偉業が目標。