

地球温暖化と稲作

温暖化防止うらやす 「地球温暖化と稲作」グループ

江澤尚武、大西輝明

(2015年11月)

グローバルな気候変動は稲作にどのような影響を与えるのか、稲作は逆に、気候変動にどう影響するのか、喧伝されているある種の稲作技術は、地球の温暖化解消に寄与するのかもしれないのか、などの問題意識のもとに、当「地球温暖化と稲作」グループは本年(2015年)から活動を開始した。本年、当グループは以下の3項目を実施した。

1. 2015年春と秋における千葉市若葉区での田植え、および稲刈り実習
 2. 前項の体験を踏まえ、2015年5月～10月、浦安市海楽一丁目における、発泡ポリエチレン容器および硬質ビニール製プランター15個から成る模擬水田での、生育条件を変えたイネの育成栽培観測と収穫物の分析、および
 3. コメの有機栽培と地球温暖化との関わりに関する文献調査
- である。本報告では第1章で上記第2項(イネの栽培実験)を、第2章で上記第3項(地球温暖化と有機稲作)の文献調査結果を記述する。

1. イネの栽培実験

1.1 はじめに

地球温暖化に伴う危機が叫ばれて久しいが、それが栽培作物にどの程度影響をおよぼすのか、また作物変動が温暖化にいかに関与するののかについては現在、極めて不明確な状態にある。それゆえ、将来の気温の上昇がどれほどイネに生物気候学的影響を与えるのかについての定量的議論は困難である。イネの生育は（地形に依存した）局所的な気温の変化や降雨量の多寡に微妙に影響されるが、大域的な平均傾向を見る場合、そうした分散した気候変動効果は平均化され、表面に現れる影響程度は比較的小さなものにしかならないためである [1]。

温暖化条件下でのイネ栽培では、一般に冬季の気温上昇は春季の田植え時期を早め、夏季の高温化とも相まってイネの生育期間を短縮することになる。しかしこの場合、従来のコメ品種では死米や不稔米が増加し、低品位米が増大すると予想されている [2]。一方、高温化の要因となる CO₂ 濃度の増大はイネの炭酸同化を加速し、生育促進をもたらすので、この側面からはコメの収量の増大が期待されることになる。ここで注意すべきは、こうしたイネの生育挙動は現時点でのイネの特性を高温条件方向へ単に「外挿」したもので、すなわち、「現在のイネ」を高温条件にさらした場合の傾向を見たものであって、ただいに高温化する大気環境や、それに伴って変動する湿度や降雨条件などにも適応する、改良された品種米に対する議論ではないことである。このため、コメ作に限らず、気候変動の植物への影響の“現場”における、“現実的”な観測は極めて難しいものとなっている。実際、現在までも小麦、トウモロコシ、大豆などの畑作物や飼料作物などの気候変動影響程度の観察は極めて多数にのぼっているが、いずれの作物についても、どのようなメタ分析を行った場合であっても、気温上昇が正または負のいずれの効果となるかについてさえも確認されていない。

Rosenzweig ら [3] による農業の地球温暖化リスク評価では、7種類のグローバルな農業モデルで農作物の生育状況を予測し、比較している。それによれば一般に、中高緯度での米作については6℃までの気温上昇では顕著な影響は予想されてはいないが、低緯度地域ではCO₂濃度上昇に起源する窒素ストレス（土壌中の窒素成分が炭素濃度に比して相対的に低くなり、それによって生ずる肥料摂取上の障害）のため、ほぼ3℃を超える高温化ではイネ生育に対しては著しいマイナス効果となるとされている。一方、こうした窒素ストレスを

緩和し、その影響を除去する場合には、ほぼ 10%の収穫増となることも算出されている。しかしこうした予測も採用するモデルに大きく依存し、気温の上昇がコメに限らず、農作物の育成に正の効果を与えるか、負の効果を与えるかについてさえも、統一した結果を得るに至ってはいない。

Tao と Zhang [4] は、中国東部における気候変動がコメ生産や水利用へ与える影響程度を、複数のシミュレーションモデルを用いて予測している。それによれば当該地域では 1961～1990 年の平均と比較して、2020 年代、2050 年代、および 2080 年代では CO₂ 濃度増大による作物の肥沃効果も含めてそれぞれ、7.5～17.5%、0.0～25.0%、および-10.0～25.0% だけの生産高変動になるとしている。とくに今世紀後半では、コメ生産に対する諸々のストレスが顕著になるであろうと予想しているが、議論は定性的である。

当「温暖化防止うらやす」「地球温暖化と稲作」グループでは、こうした温暖化とイネの生育状態との関連性に着目し、自身で稲作を体験しつつ、イネを高温状態に置いて生育させる場合、通常状態でのそれとはどのような点がどれほど異なるのかを観察し、観測することとした。

以下、第 1.2 節でイネの栽培過程を、第 1.3 節で収穫物の分析を、第 1.4 節で今後の展望などを述べる。なお当グループ員は 2015 年 5 月 4 日（月、みどりの日）に千葉市若葉区谷当町谷津田において田植えを、さらに 9 月 22 日（火、国民の休日）には同所における稲刈りを実習し、こうした体験を活かして模擬水田での栽培実験を行った。

1.2 イネ栽培の試みとその過程

栽培品種は化学肥料を使用せず、無農薬で五年以上継続して育成してきたコシヒカリ、および古代米（青米）とする。コシヒカリ栽培の様相については本節で記述するが、古代米はコシヒカリの刈取り時（10 月下旬）においても十分に実熟することなく、このため以下の分析では除外した。

2015 年 4 月 10 日、上記コシヒカリの実籾を、苗代代わりの直径約 20cm の円筒形浅型容器に播種した。5 月 4 日には草丈 5～10cm 程度の稚苗に成長、5 月 22 日には草丈約 15cm の成苗となった。

5 月 22 日午前、成苗を浦安市海楽一丁目の通称江澤田圃に移植した（田植え）。ここで「江澤田圃」とは、その一区画が一辺 30～50cm の長方形の硬質ビニール製プランターおよび発泡ポリ容器の模擬水田 15 個のことであり、深さ数～10cm の土壤に表 1 に示す施肥処理を施し、約 5cm 程度の深さに湛水したものである。これらの水田あたり 5～6 株、1 株あたり 3～4 本の成苗を移植、このときの株間距離は 10～15cm であった。この後、稲刈り時に至る

まで、各水田を湛水した状態のままです。水田番号とそれらの配置状態を図1、および写真1に示す。

表1 模擬水田条件

水田タイプ	コメ品種	土壌条件	肥料条件
A (A1 ~ A3)	無農薬、無化学肥料で5年以上栽培したコシヒカリ	山砂と赤土からなる有機肥料畑の土壌（昨年度利用の土）	無肥料 ただし A3 のみ配合肥料を施肥
B (B1 ~ B10)	同上	同上	薫炭と油かす
C (C1 ~ C2)	無農薬、無化学肥料で10年以上栽培した古代青米	同上	同上

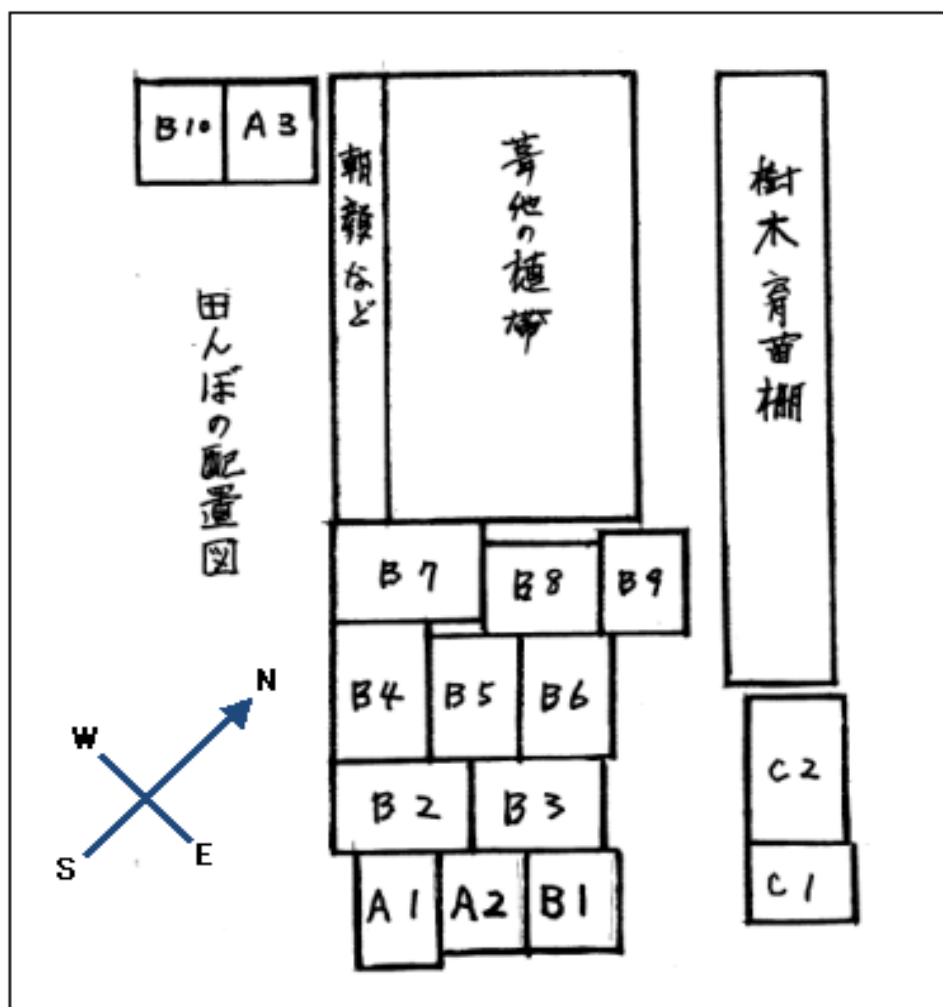


図1 模擬水田の配置 A3 および B10 は温室条件の水田

6月16日以降刈り取り時まで、水田A3およびB10には透明のビニール製フードを被せて温室（ビニールハウス）状態とし、これにて「温室効果」を模擬することとした（写真2）。当該温室は天井も含めて四方向をビニールで覆い、一方向のみを開放状態としたものである。6月16日ではBタイプ水田の草丈は平均50cm程度であったが、Aタイプ水田では25cm程度と明らかに低く、遅い成長状態にあった。

7月11日午後、温室外での直射日光下では気温35℃であり、温室内では42℃であった。ちなみに当7月11日、江戸川臨海におけるアメダス気象観測データによれば天候は晴れ、最高気温は午後1時13分の28.9℃であった（気象庁データによる）。他日、他時刻での温室内外気温の比較調査は行ってはいないが、温室内は一般に、温室外よりも常に数度程度高い状態にあったことが予想される。

7月11日、温室外のBタイプ稲の草丈は70～90cmであるが、水田ごとの成長速度、すなわち草丈は、水田ごとに異なるさまざまな条件に依存していると思われ、水田ごとに大きいばらつきを示すものであった。AおよびCタイプ稲はともに50cm程度に成長。温室内の稲は勢い強く、温室外のBタイプに比して草丈は同程度か、やや高い状態であった。8月1日における生育状況を写真3に示す。

8月6日、温室内の稲と温室外のBタイプの稲の一部に出穂。9月7日、温室内での稲葉は黄変し、登熟に近づいた。

10月3日に温室内水田の稲刈り。刈り取った稲は稲架にて乾燥させた（写真4）。同9日、温室外の実熟した水田の約半数分を刈り取り、さらに21日、AおよびBタイプの残り全てを刈り取り、草丈、一株あたりの茎本数（分げつ数）などを計測後、稲架にかけて自然乾燥させた。この後、10月末から11月初旬にかけて乾燥稲の脱穀を行い、籾粒数、重量などの計測を行った。

脱穀は（江戸時代の農民が利用した）「扱き箸（こきばし）」に似た脱穀道具を作成し、これを用いて行った（写真5、6）。扱き箸とは竹または木製の二本の棒であるが、これで稲穂をはさんで引き、籾をしごき取るのである。得られた籾粒には白くみえる不稔米や死米などが多く、次節で述べる籾粒数や重量はこれらの不完全米を除去したものの値である。



写真1 田植え直後の水田



写真2 ビニール製模擬温室



写真3 8月1日での生育状況
(中央の傘長は80cm)



写真4 稲架



写真5 稲穂(上:正常、下:未熟穂)



写真6 脱穀道具と脱穀後の籾

表 2 各水田からの稲籾等の計数量

水田	移植苗数	稲茎本数	茎数/苗数	稲丈(cm)	稲籾数	稲籾重量(g)	籾数/茎数	籾重量(g)/茎数	籾重量(g)/粒	備考
A1	18	41	2.3	78	990	24	24	0.59	0.024	無肥料
A2	15	25	1.7	80	1120	28	45	1.12	0.025	"
B1	15	115	7.7	90	4090	86	36	0.75	0.021	薫炭 + 油粕
B2	18	131	7.3	100	8970	210	68	1.6	0.023	"
B3	18	41	2.3	100	4560	103	111	2.15	0.023	"
B4	18	115	6.4	100	9490	220	83	1.91	0.023	"
B5	18	41	2.3	115	5480	127	134	3.1	0.023	"
(B6-1)	12	64	5.3	100	3720	81	58	1.27	0.022	"
(B6-2)	6	51	8.5	80	3280	70	64	1.37	0.021	"
B6	18	115	6.4	NA	7000	151	61	1.31	0.022	"
B7	12	61	5.1	100	4790	111	79	1.82	0.023	"
B8	18	52	2.9	90	2390	58	46	1.12	0.024	"
B9	NA	NA	NA	100	2490	57	NA	NA	0.023	"
A3	15	86	5.7	110	6290	141	73	1.64	0.022	配合肥料 温室
B10	15	62	4.1	110	4560	108	74	1.74	0.024	薫炭 + 油粕 温室

NA: データなし B6 水田は7月初旬一部損壊のため、B6-1 と B6-2 の2個に分割

1.3 収穫結果とその分析

表 2 に刈取り時における各水田での稲茎本数および草丈、および、乾燥後の稲穂の数量および質量の計測値を示す。さらに同表には、稲茎一本あたりの籾粒数、および籾一粒あたりの重量も示した。ここで籾とは、乾燥後の籾殻とその内部にある玄米とを含めたものをさすものとする。表 2 に示した数値は、例えば稲茎一本あたりに収穫された籾粒数は最小の 36 粒 (B1 水田) から最大の 134 粒 (B5 水田) のように、同一条件を設定した B1 ~ B9 についてさえも広い分布範囲にわたっている。こうした違いが、考慮しなかった様々な予想外の条件、たとえば日当たり程度の違いのような外部条件に左右されて生じたとすれば、個々の水田の結果を逐一比較することは (そうした外部条件の違いを特定することは不可能なので) 意味のあることではなからう。そこでここでは施肥条件と温室条件の有無とに関して大まかな分離をし、その分類内での平均値を比較することとする。すなわち、A タイプの 2 水田の平均値を <A>, B タイプの 9 水田の平均値を , 温室 (Green House; GH) 内の 2 水田の平均値を <GH> とし、これら 3 値を比較する。

図 2 は田植えから刈取りまでの「生育期間」を示す。刈り取りは稲穂と稲葉が十分に登熟した時点で実施したものであるが、<GH> は常に <A> および よりも高い気温条件に保たれていたために実熟も早く、生育期間も最短である。

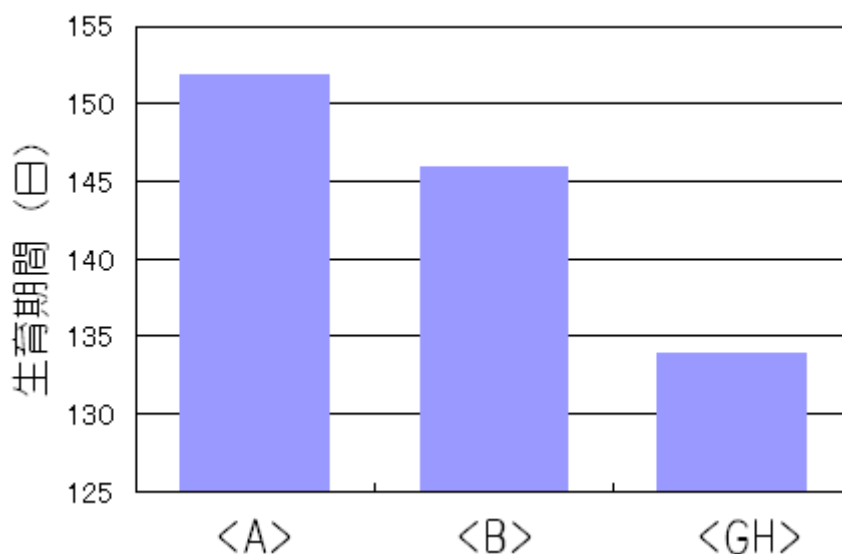


図 2 生育期間の比較

図3は刈取り時の茎丈を示す。ここで茎丈とは根元から穂先までの丈をさすものとする。当該図以下の図中に示す(工のマークの)データの信頼範囲は、同一グループ内での最大、最小値の範囲、または計数・測定誤差を5%とみなして算出した誤差の範囲である。茎丈は高温条件 <GH> が最も高く、無肥料条件 <A> が最低となる。信頼範囲の重なり状況の目視から、<GH> と <A> との差は有意である。なお、東北地方のモデルでは、稲の丈が最大となる時点での草丈(根元から葉先まで)はほぼ150cmである [2]。

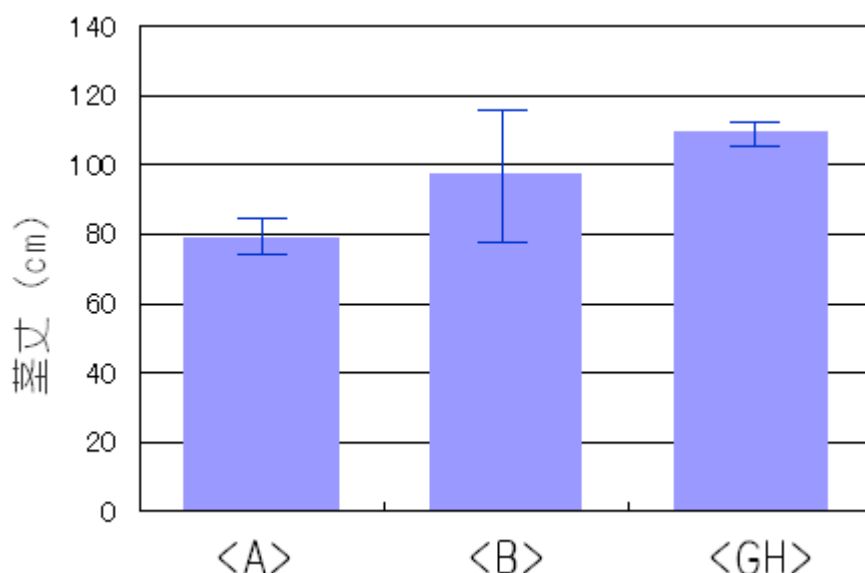


図3 茎丈の比較

図4は分けつ数(成苗一本当たりに対する刈取り時の稲茎本数)を示す。<A> は約2本、 と <GH> はともに約5本に分けつしたことがわかる。<A> と および <GH> との差は有意であり、施肥条件の違いが分けつに及ぼす効果は明らかである。一般に分けつは施肥の他に湛水状況や(密植か疎植かなどの)成苗移植の疎密程度、一株あたりに移植する成苗の本数などにも複雑に依存し、定量化は困難である。参考文献 [5] によれば、3.3m² 当たり30株を植える場合、一株当たりの分けつ数は約40本、60株植えだと20本、いわゆる密植栽培の場合の分けつ数は2~3本、ときには一本もでない場合もあるとされる。東北地方のモデルでは12本程度である。今回の当グループの試みでは一株当たり3~4本の成苗を植栽したので、図4中の および <GH> の結果は平均的かやや低い程度で、妥当であるといえよう。

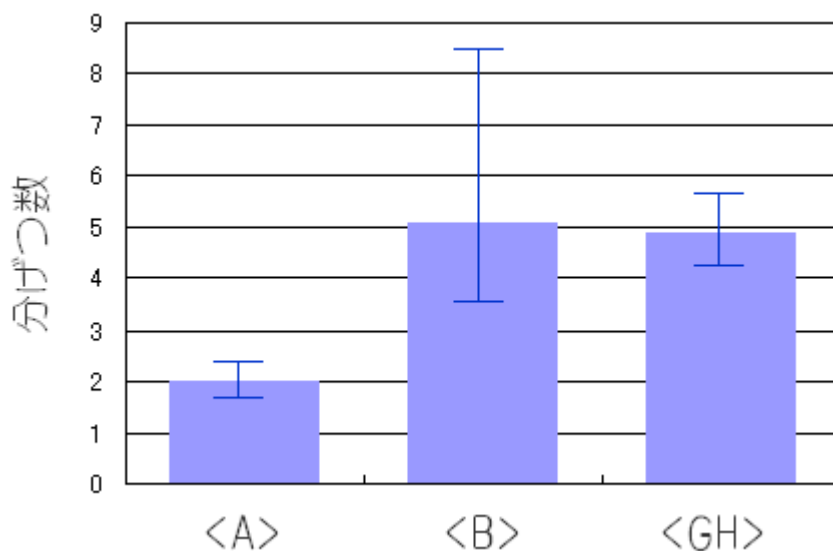


図4 分けつ数の比較

図5に刈取り時の稲茎一本当たりの籾粒数を示す。 および <GH> は基本的には同値であると言えるが、施肥の有無は <A> と に明らかな差異をもたらしている。しかし信頼範囲で議論すれば、<A> と との間で有意な差は生じていないことになる。

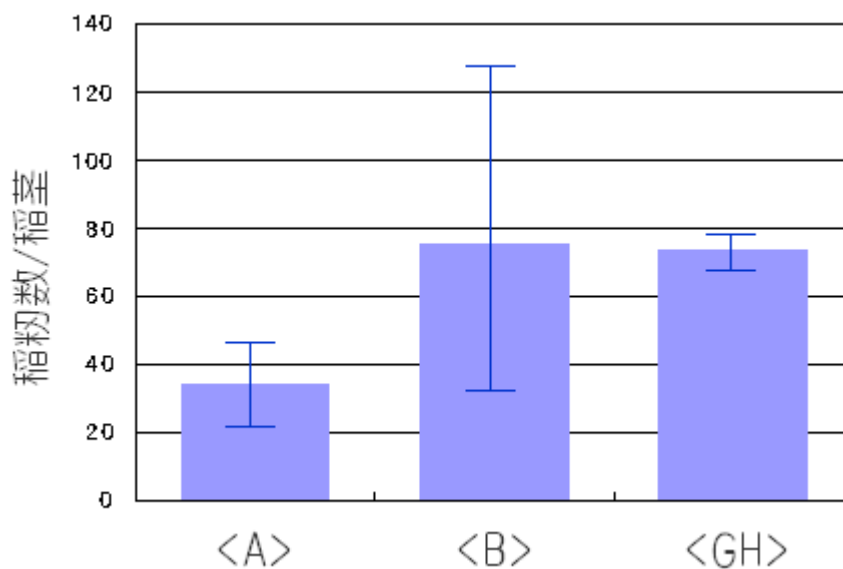


図5 稲茎一本当たりの籾数比較

図6は各水田ごとに収穫された籾粒数とその重量との関係をプロットしたものである。A、B、および GH を総合した回帰直線の勾配は 0.023 ± 0.002 g/粒 となる。ここで籾の重量は乾燥籾に対するものであり、一般に乾燥玄米

一粒はほぼ 20mg とされている [6]。品種にもよるが玄米は籾重量の 7 ~ 8 割に相当する [2] ので、図 6 の結果は我が国の平均的な値に秘してやや低い値であるともいえよう。

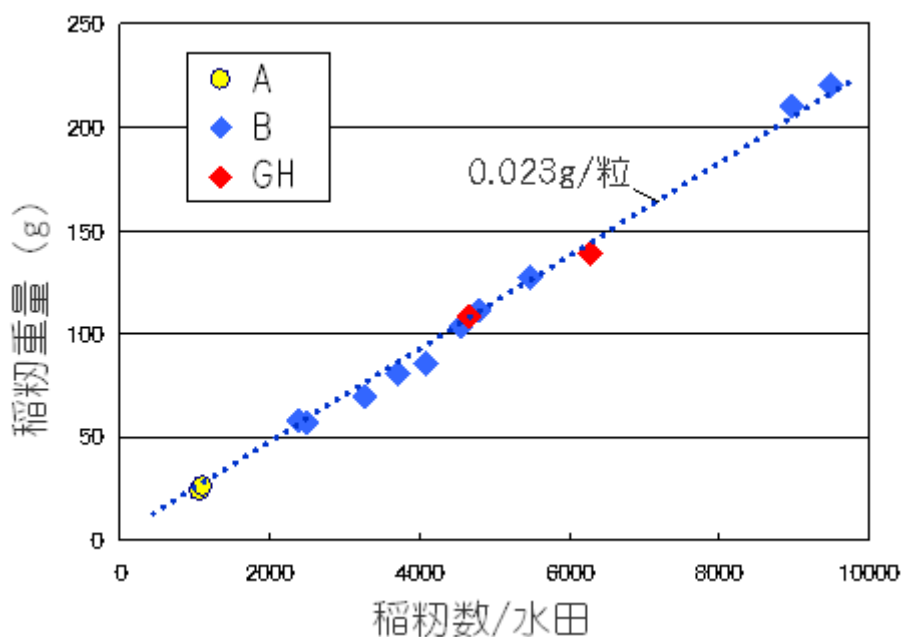


図 6 水田あたりの籾数とその重量

図 7 に籾粒当たりの重量を生育条件ごとに示した。籾粒重量は <A> が最も大きい。 と <GH> はこれに比して小さく、両者は信頼性の範囲内でほぼ同一値となる。<A> と <GH> との差は有意であり、<A> では 0.0245 ± 0.0005 g/粒、<GH> では 0.0230 ± 0.0010 g/粒となる。高温条件で生育した稲の籾粒重量は、やや低温な条件下でのそれに比して一般に小さいものとなる [6]。<A> と <GH> との差がこうした傾向を体現するとしても、 と <GH> とでは差が見られないことを説明することはできない。温度の差異だけで図 7 を説明することは困難である。

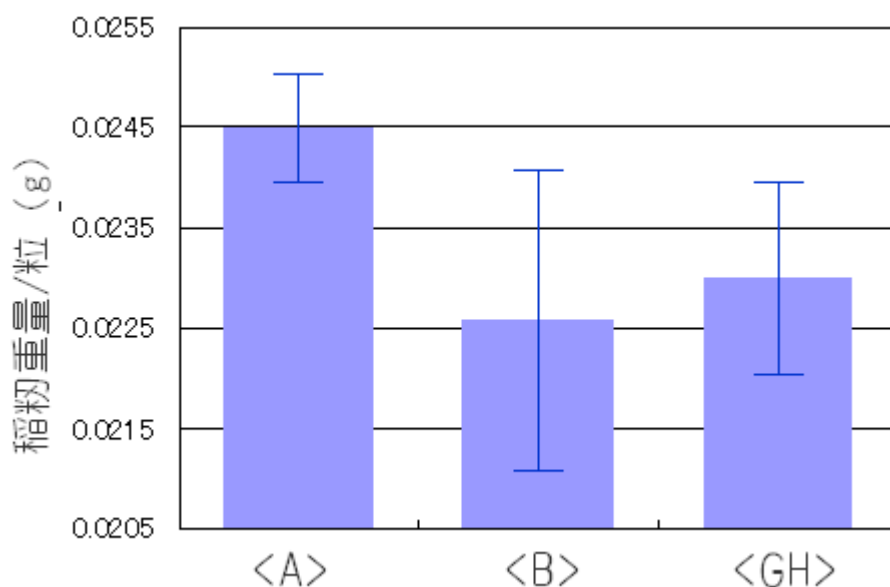


図7 籾粒あたりの重量の比較

1.4 おわりに

本年の稲作は地球温暖化との関連を意識して試行した第一年目である。当グループの一員は過去数年に亘って“江澤田圃”での稲作を趣味的に試みてきたが、他のグループ員は農事には素人で、そうした意味では「地球温暖化と稲作」への準備不足を反省する点が多い。さらに、当グループ程度の無力な市民集団が稲作への温暖化影響にアプローチしようとする無謀さと大胆さ、くわえて定見の無さについても反省点は多く、科学的検証実験からはほど遠いものとなった。しかし、こうした試みの公表が人々の注目や関心を喚起し、地球温暖化の深刻性と対策の必要性への認識が高まることにつながれば、極めて有意義なこととなる。

今回の試みで明確となった事実は、稲の生育にかかる気温の影響と施肥の有無である。すなわち、高温度条件は葉丈の速やかな成長と稲穂の速やかな登熟をもたらすこと、同一品種の場合、稲籾の収穫量は温度条件にはほとんど依存しないように見えること、無施肥条件は稲の生育や収穫量には明らかなマイナス効果をもたらすことなどである。しかし、こうした定性的な事実はすでに自明のことであり、当グループではそれらを確認したにすぎない。

こうした市井の試みを少しでも「科学」に近づけるためには、以下の事柄の実行が有効となろう。

1) 水田の均質化

- ・ 土壌（質、および量、すなわち土壌の深さ）の全水田にわたる均質・均一化
- ・ 土壌に施肥する（薫炭や油かすなどの）土壌改良材の均質・均一な混合
- ・ 全水田での（酸性度などの）水質の均一化

2) 定量化の推進

- ・ 土壌改良材の定量的な施肥
- ・ 温室内外での気温と湿度の継続観測
- ・ 籾摺りの実施と玄米の質および量の計測

3) 栽培技術の改善

- ・ 成苗移植（田植え）における移植間隔の統一
- ・ 水田相互の間隔の十分な保持
- ・（湛水、土用干しなどの）水管理の工夫

このような配慮とともに、その外形や規模を変え、異なる室内気温が実現され得るような複数個の温室が準備できれば、気温の上昇程度をパラメーターとする稲の育成観測が可能となり、興味深い。

参考文献

- [1] Porter, J.R., et al. (2014) “Food security and food production systems” in “Climate change 2014; Impact, adaptation and vulnerability. Part A; Global and sectorial aspects” (Cambridge Univ. Press), 485-533.
- [2] 「日本大百科全書」(1985) “イネ (小学館) .
- [3] Rosenzweig C. et al. (2014) “Assessing agricultural risks of climate change in the 21st century in a global gridded crop model intercomparison” Proc.Nat.Acad.Sci., Vol. 111(9), 3268-3273.
- [4] Tao, Z., and Zhang, Z. (2013) “Climate change, high-temperature stress, rice productivity, and water use in eastern china; a new superensemble-based probabilistic projection” J. Appl. Meteor. Climatol, Vol.52, 531-551.
- [5] 「稲作大百科第2版(1)」(2004) (社団法人農山漁村文化協会) .
- [6] 星川清親(1975) 「解剖図説イネの成長」(社団法人農山漁村文化協会) .

2 . 地球温暖化と有機稲作

稲作は紀元前何世紀もの古代から始まったので、その栽培は地球の大気成分と相互作用してゆっくりと、平衡して進化してきたはずである。このため、従来どおりの稲作が近年の急速な地球温暖化に多少なりとも影響を与えてきたとは考え難い。それならばなぜ今、地球温暖化に係って稲作が問題となるのか。大気中の温室効果ガス濃度と稲作、とくに有機稲作との関連性（有機稲作は地球温暖化にどのような影響を与えるのか、地球温暖化は稲作にどのような影響を与えるのか）について文献調査し、その功罪を検討した。

2.1 はじめに

現在の地球の総人口は70億人を超え、2100年には110億人を超えて増大し続けるとも予想されている [1]。急増する人口の食糧確保問題は、増大する人口による環境へのストレス緩和とともに現代のわれわれが解決すべき喫緊の課題のひとつである。当「温暖化防止うらやす」では食糧源の具体例として水田米をとりあげ、食糧確保のための稲作（の増強化）がいかに地球環境問題に影響を及ぼすのか、地球環境の変化や温暖化がいかに稲作にフィードバックするのかについて検討した。

現在の農法はいずれの作物種についても、従来どおりの農薬と化学肥料とを利用する慣行農法と、こうした化学物質を散布・施肥しない有機農法とに大別される。環境へのストレス削減という観点からは有機農法が推奨される場所であり、稲作についても大別してこれら二種の農法が採用されている。しかし主として低い収量のゆえに、有機農法の採用率は極めて低いのが現状である。われわれは有機稲作、あるいは一般に有機農法と地球環境との関わり合いについて文献調査し、その問題点などを整理することとした。

2.2 有機稲作は地球温暖化にどのような影響を与えるのか

2.2.1 有機農法と慣行農法 - その光と影

ライフサイクル・アセスメント(商品生産から廃棄までの全過程をとおして、それが環境に与える影響を評価しようとする一手法)のような包括的観点からすれば、従来の慣行農法ではそこで使用する農薬や化学肥料を工業的に製造することに起源するエネルギーや資源の消費と、それに基づく温室効果ガス放出

とが問題点として指摘されている。さらにそれらを散布、施肥することによる環境へのストレス付加も、「生態系におよぼす悪影響」として指摘される場所である。以下で有機農法とは簡単に、「農薬や化学肥料の散布・施肥はおこなわず、代わって、天然の有機物や無機物肥料などを用いて行う、自然のしくみに沿った農法」と定義することにする。何らの肥料を施すことなく、また耕作もしない、いわゆる自然農法は有機農法に含めないものとする。

こうした有機農法では、慣行農法におけるほどの顕著な「環境へのインパクト」は存在しないとされている。また、家畜糞などの有機肥料や休耕中に播種したマメ科植物などを鋤き込めば土壌中の有機炭素量を増大させるので、これが大気中のCO₂濃度削減に貢献するものであるとも言われている [2]。有機農法はこうした温室効果ガス放出の緩和策としての他、気候変動に対する適応策として、生物多様性や土壌保全の実現策として、また（リクリエーションや文化の創造などの）農村や田園での新たな生活スタイルを構築する手段としても重要視されている。しかし平成 21 年度でのわが国でのコメの生産量の99.7%、農産物全体としても99.6%までは慣行農法によるものであり、有機農法による生産量割合は無視できるほどの少量でしかない [3]。一般に有機農法はエネルギー消費量が低いが、同時に生産性も低く、それゆえ利用土地面積も大きくならざるを得ず、生産量あたりの土壌の富栄養化や酸性化度も高いものとなる。すなわち、有機農法では養分をうまく管理し処理することと、生産量を高めることが重要な課題となるのである。

近年、生物多様性の重要さが注目されている。化学物質利用の慣行農業による自然への介入が天然の生態系に変化をもたらし、それが生物種の消滅を誘起し、また人々が生態系から得る利益を喪失しているのではないかとする指摘がある [4]。生命形態の豊富さや異質性の存在、生命形態間での共存性などを生物多様性と呼べば、有機農法は慣行農法に比して生物多様性の維持に関しては明らかに優れているとされている。

慣行、有機、いずれの農法についても、環境インパクトを減少させつつ収量を高める技術的努力や方針の設定が必要となることになる。以下で、こうした個々の側面についての文献をいくつか紹介する。

2.2.2 土壌中の炭素貯留量 - 有機農法はCO₂削減に寄与するのか

有機農法では土壌中への有機炭素蓄積効果が大きく、この点に関しては慣行農法より優れていると言われている。こうした事柄では単一の作物や特定の有機物施用条件、さらに特定地域や特定の気候条件の下でのみの比較では一般的な結論を得ることはできない。そこで、多数のデータを収集して分析し、統計

的な傾向を抽出するという手法（メタ分析）が有効となる。しかしこのような方法論を採用しても、有機農法が土壌中の炭素含有量を高め得るのかどうか、すなわち、地球温暖化の緩和策として有効なものかどうかについては確かな結論は得られていない。

はじめに、有機農法は土壌中の炭素蓄積に関して有効であるとする分析である。

文献 [5] では 74 件の有機農法と慣行農法とを比較した文献データをもとに、土壌中の有機炭素量の相違についてメタ分析を行っている。この結果、慣行農法と比較して有機農法での土壌有機炭素量は $0.18 \pm 0.06\%$ 、絶対量は $3.50 \pm 1.08 \text{ MgC/ha}$ 、炭素貯留増加量 (sequestration rate) は $0.45 \pm 0.21 \text{ MgC/ha/年}$ だけ高い値を持つことがわかったとしている。こうした差は外部からの炭素の供給（家畜による糞やスラリー、コンポストなど）と転作物（家畜飼料として育成するマメ科植物）の違い、および家畜とこれら飼料とからなるリサイクリングの有無などに基づくが、これらのいずれが主要因であるかは回帰分析からは明らかにできなかった。有機農法ではこうした要因によって平均 1.20 MgC/ha/年 だけの炭素量が投入されたのに対し、従来型では 0.29 MgC/ha/年 の投入量でしかなかった。有機物質の（差し引きの、ネットの）投入量がゼロとなるような条件での、（土壌密度や窒素肥料の投入量も計測された）質の良いデータだけを選んだ場合でも、両農法の炭素濃度差は有意の $1.98 \pm 1.50 \text{ MgC/ha}$ であり、有機農法が高い値を示した。しかしこの場合、炭素貯留増加量の差は $0.07 \pm 0.08 \text{ MgC/ha/年}$ となり、有意とはならなかった。データの質を考慮せず、有機物質の（差し引きの）投入量がゼロとなる全データを用いる場合には、炭素量は $0.13 \pm 0.09 \%$ 、絶対量は $2.16 \pm 1.65 \text{ MgC/ha}$ 、炭素貯留増加量は有意ではない $0.27 \pm 0.37 \text{ MgC/ha/年}$ となった。用いたデータは温帯地方の表層土であり、熱帯地域や深層土のものはほとんどない。こうしたことから著者らは、有機農法は土壌炭素蓄積に関して有効であると結論している。

しかし、文献 [5] では分析に係るバイアス（データの取捨選択にかかる任意性）が大きく、文献 [6] の著者らの見解では同一結論とはならず、有機農法が気候変動に寄与することはないと反論している。

Leifeld 等 [6] によると、このバイアスは慣行農法サンプルに関しては代表的ではないものを採用したことに起因するものであり、Gattinger 等 [5] は高い炭素貯蔵量密度と大きい炭素供給量のサンプル（これを有機農法として Gattinger 等は分類）を、低い炭素貯蔵量密度と高い炭素循環量のもの（これを従来農法として分類）と比較したことによるためであるとしている。これは（有機農法と従来農法の）混合農法サンプルと、ほとんど炭素を保持していな

いようなサンプルとを比較したに過ぎず、意味のある比較ではないとしている。

一方、文献[7] も有機農法が土壌中の炭素濃度を高めることはないとする説である。

Leifeld と Fuhrer [7] は実験の基準や炭素含有量計測の正しさ、慣行農法と有機農法との区分の妥当性などを考慮して 68 件の資料を収集し、これらのデータをメタ分析している。これらの資料によれば有機農法では平均 2.2%/年の率で土中炭素濃度が增大するのに対し、慣行農法ではほとんど変化はなかった。しかし、報告書の多くは土壌密度の変動を考慮に入れてはならず、また、68 件の資料中 34 件は実験の初期条件が不明であること、50 件中 37 件は有機農法で用いる有機肥料が慣行型でのそれよりも多いこと、約半数の資料では転作物の種類が有機農法と慣行型とでは異なることなど、厳密な比較を困難にする要因が多く存在することが判明した。そこで、転作物の種類も有機肥料量も同一条件である数ケースについてのみ比較したところ、これらでは有機と慣行の両農法での土中炭素濃度に差はみられなかった。こうしたことから、有機農法が土中炭素濃度を増加させるとする説は正しくはなく、その増加は有機農法における有機肥料の多用に起因するところが大きいのではないかと結論している。また Gattinger 等 [5] は家畜糞による土壌中炭素量増大を大気中の炭素の移行ととらえているが、これは単に地上の炭素が他の場所から別の場所に移ったに過ぎないものであること、さらに有機農法では収量が少ないのでより大きい耕地面積を必要とするが、これは大きい炭素含有量を持つ土地を耕地に変える必要があるということであり、こうした耕地化によって逆に大気中への炭素の放出量が増すことになるとも指摘している。

2.2.3 環境インパクト - 有機農法は環境にやさしいのか

有機農法は環境インパクト（環境へのストレス）を減少させるとして推奨されている。ここでの環境インパクトとは、耕地からの窒素の浸出、酸化窒素やアンモニアなどの放出、それらに起因する周辺環境の富栄養化や酸性化、総体的なエネルギー利用の増大とそれによる影響などを言う。農場でのエネルギーは直接的には電気や燃料、間接的には肥料や農薬、飼料などの運搬や生産、農機具の生産などのために消費される。農業では投入エネルギーの 37% が肥料関係、5% が農薬製造のために使用されているとする報告[8]もある。

文献 [9] は欧州での有機農法と慣行農法との環境インパクトを比較したメタ分析であり、単位面積当たりの有機物質、窒素浸出量、酸化窒素放出量、エネルギー利用量および土地利用量に関する比較である。これによれば、有機農法は単位面積当たりで比較すれば慣行農法に比して環境インパクトが小さい

が、生産量単位についてみれば必ずしもそうではない。有機農法は単位面積当たりの土壌中の有機物質量を高め、窒素分の放出による養分損失を減少させるが、生産量当たりの養分損失は大きい。有機農法はエネルギー消費量が低いが利用土地面積が大きく、生産量あたりの富栄養化や酸性化度も高い。有限の土地面積にもかかわらず人口増加が予想される将来を考慮すれば、生産性の悪い有機農場面積を増大させることよりも、一定面積の農地でより多くの収量を上げることが重要にもなる。こうした意味合いにおいて、単位面積ではなく単位収量あたりの環境インパクトを推算するのが妥当であろう。そうした場合、有機農法による環境へのインパクトは、慣行農法に比してより大きくなることになると指摘している。

2.2.4 . 有機農法と生物多様性 - それはどれほど価値があるものか

上記のとおり有機農法の実産性は低く、同一生産量の達成には慣行農法に比してより広い耕地面積を必要とする。このため、有機農法を広めるには森林伐採や開墾が必要となり、森林保全や生物多様性の側面からはその利点が疑問視もされている [10]。しかし一般に、鳥類、両性類、蝶類、クモ、昆虫、植物、土中の微生物などの生存に関しては有機農法の採用はプラスの効果を有しており、この点に関する生物多様性保全効果は抗えない。だが、こうした場合であっても、他の手段を援用せず有機農法の採用だけである種の鳥類の存続を保全させ得るとか、ある種の蝶類を存続させ得るということではない [11]。すなわち、有機農法への移行によって生物多様性が全て、完全に保証されるということでは決してなく、その農法は生物多様性（の部分的な）保全の一つの手段となるにすぎないのである。

有機農法や他の手段の採用によって生物の多様性が保全される場合、それがわれわれにどう影響するのかに関する議論は多い。また、そうした多様性の金銭的価値（多様性を保全するための費用がすなわち、多様性の金銭的価値であるとして、それ）に関する議論もおこなわれている。こうした議論のいくつかを付録に示した（推算された生物多様性の価値は、有機農法に基づいた多様性保全だけに起因するものではないことに注意）。

2.2.5 農産物の収量 - 有機農法では多いのか少ないのか

有機農法が将来、人々に十分な食料を供給することが可能かどうかは重要な問題であり、いくつかのメタ分析が行われている。

文献 [10] では有機と慣行農法とのグローバルなメタ分析を行い、有機農

法の生産性は慣行農法に比して全般的に低くなることを結論している。しかし生産性の違いは地域や作物種の違い、生育条件への依存性などが大きく（果物や脂肪種子作物では差は小さく、穀類や野菜類では差が大きい。316件のデータ比較の平均では、有機農法による収量は慣行農法に比して25%だけ低い）、5%だけ低いもの（弱酸性、弱アルカリ性土壌で、雨水のみで生育するマメ科多年生植物）から、13%だけ低いもの（有機農法で最適の対応を施した場合）、34%低いもの（有機と慣行農法とが耕地の転作と窒素肥料の供給に関しては同一である場合）までの範囲にある。作物種や生育条件に関して十分に管理すれば、有機農法は慣行型とほとんど変わらない収量を得るが、そうではない場合には一般に収量は低い。有機農法を重要な一手法となすにはその限界を制している要因を解明するとともに、その環境に対するメリットや社会的な側面での有用性も明らかにする必要があるとしている。

さらに欧州のデータを用いたメタ分析 [9] によれば、冬小麦、大麦など13種の農作物に関する単位面積あたりの有機農法の慣行農法に対する生産量比は0.17~1.81の範囲にあり、平均 0.75 ± 0.17 である。この比が1より大きくなる唯一の作物はメロンである。

文献 [23] では362件の有機-慣行農法による生産量比較をメタ分析している。これによれば有機農法生産量は各生産品について平均して、慣行農法生産量のちょうど80%である（全体は20~177%の間に分散している）が、この標準偏差は21%と大きい。これは生産物の違いや地域間でのばらつきが大きいことによる。また、慣行農法での収量が大きくなるほど、有機農法との収量差が微妙に大きくなる傾向もある。この理由は、慣行農法収量が高く、その極限值に近いような場合には、一般には水分量は十分で養分ストレスは低く、また病原菌や害虫に対しても十分に管理されている状態にあるのに対し、有機農法ではそうではない（十分な管理が行われていない）ためであるとしている。なお、7件の米の収量の有機農法の慣行農法に対する比は86~105%、平均94%である。

一方、報告書 [3] によれば、農家によるバラつきが大きいのが、わが国の（有機JAS認定農家を除く）有機農家における米（うるち）の平均的な収量は慣行農法に比べて10a当たり約120kg（2俵）だけ低い。減収率 = $(\text{慣行農法における平年収量} - \text{有機農法における平均的な収量}) \div \text{慣行農法における平年収量} \times 100$ で定義される減収率の平均値は25%（有機JAS格付農産物以外）および22%（有機JAS格付農産物）である。当報告書 [3] では、作物によって異なるが、全体として、有機農法では慣行農法に比べて収量が1~5割低くなる（が、有機農産物の販売価格は慣行農法農産物の販売価格に比べて1.2~2倍ほど高い）としている。

2.2.6 温室効果ガス - 有機農法からはどれほど発生するのか

農業はCO₂に関して、農業機械の燃料消費や肥料農薬などの生産、森林の伐採や耕地化などによる発生源であり、かつ、有機肥料の利用は大気中炭素を肥料のかたちで耕地へ移行することに相当するので、吸収源でもある。温室効果ガスであるメタンと一酸化二窒素(CH₄とN₂O)は現在、地球温暖化分に約20%だけの寄与をしているが、それらの増大分の大部分は農業起源である。1990年代にはCH₄、N₂O、およびCO₂の増大分の15%が農業起源であった。農業に起源するメタン発生は反芻動物の胃腸内発酵(55%)、貯蔵した家畜糞(13%)、稲作水田(19%)、バイオマスや焼き畑農地の開墾(13%)などによるものである[22]。CH₄とN₂Oは有機農業によって大気中への放出量がより増大するとする指摘がある[17]。

文献[17]では、中国東南部において通常の田と有機農法による田とからのCH₄とN₂Oの発生量を実測比較している。水田は種々の水供給条件(連続した水供給(これをFと略記)、水供給 供給停止 再度の水供給(FDF)、水供給 停止 水供給だが水没するほどには水供給を行わない(FDFM)の3条件)で管理した。慣行農法では窒素分を尿素またはペレットとして100kgN/haの割で、有機農法では乾燥糞のかたちで、それぞれ水田に施肥した。有機農法からのCH₄放出は条件F、FDF、FDFMで各々4.44、2.14、1.75 mg/m²/ha/年であった。慣行農法と比較して有機農法はCH₄放出に関して、各水供給条件に対し20、23、35%だけ大きいことも判明した。一方、有機農法によるN₂Oおよび窒素の放出量はFDF、FDFM条件で10.85、13.66 μg/m²/haであり、これらは慣行型に比してかなり小さい。しかし、CH₄とN₂Oとを合わせたネットの地球温暖化ポテンシャルについて言えば、(水供給条件にも依存するが)有機農法は慣行農法に比して同程度かまたはかなり大きい状態となり、有機稲作に利点はない。従って、有機農法による収量が大きくはないことを考慮すれば、有機稲作は温室効果ガスに起源する気候変動を緩和する有効な手段とはならないとしている。

有機農法では土壤に蓄積される有機炭素量が慣行農法に比して増大するとの主張がある(2.2節参照)。これが真である場合、こうした増大分は毎年、連続して施肥するたい肥や家畜糞の量に依存しており、土壤中への有機炭素の供給と無機炭素への分解とが平衡すれば、それ以上の蓄積が実現されることはない[2]。また、土壤への有機物供給を停止すれば、土壤中の有機炭素量は数年から数十年の時間スケールで減少して初期状態に戻ることになる[2]。したがって、緑肥作物や作物残渣、たい肥、家畜糞などの鍬込みにとまなう土壤への

炭素貯蔵は短期的な解決にしかならず、長期的には土壌から放出される二酸化炭素量を増やすことになりかねない。有機農法におけるこうした状況は荒蕪地に植林し、それをバイオ燃料として利用するのと類似の状況であり、炭素をある場所から他の場所へ移行させ、一時的に貯蔵するだけといった状態にもなりかねない [18]。

報告書 [2] によれば、有機物施用を行った場合、上記のとおり、水田土壌からのメタンや、水田及び畑土壌からの一酸化二窒素等の温室効果ガスの発生が増加する。当報告 [2] ではたい肥や家畜糞などの施用に伴う土壌中の炭素貯留増加量からこれらの温室効果ガス分を差し引いて、農地土壌全体としての温室効果ガス収支を試算している。これによれば、全国の水田にたい肥を 1.0t/10a 施用すれば、16.8～27.4 万 tC に相当するメタンが発生することになるが、この分を差し引くと、農地土壌全体の炭素収支（農地へ蓄積される炭素分）は年間約 193～203 万 tC となるとモデル計算されている。ただし、この数字は無機化して大気中へ解放される CO₂ 分は考慮されていないので、有機物施用の初期段階時での値であり、長期的には土壌への蓄積と放出とは平衡するので「一時的に貯蔵するだけといった状態」にかわりはない。

2.3 . 地球温暖化は稲作にどのような影響を与えるのか

グローバルな傾向をまとめた IPPC 報告書 [19] は、温帯地域と熱帯地域のそれぞれにおいて、地域の平均気温の上昇程度（1～5℃）の関数としてのコメの生産量の増減程度を整理している。それによれば、温帯地域で何らの適応策を講じない場合にはほぼ 3.5℃ の上昇までは数% だけ米生産量が減るが、それ以上の気温上昇ではしだいに生産量は減り、5℃ の上昇ではほぼ 15% 減となる。しかし、適当な適応策を講じる場合には高温化した場合であっても数% の生産量増大に導くことができる。一方、熱帯地域では無適応の場合、5℃ の気温上昇で数% 減、適応策を講じる場合にはほぼ 10% 増の収量とすることができる。これらは統計的な傾向であって、具体的な値は個々の地域での気象や品種、育成過程の諸条件に依存する。

稲の生産量は CO₂ 濃度にも依存し、CO₂ が 200ppm だけ増大する場合には 3～36% の収量増となる [20]。しかし同文献 [20] は、稲の収量のこうした増大 CO₂ 効果は温帯地域での値であり、低温地域や高温地域での CO₂ 効果はそれほど大きくはなく、より制限されるものとなっている。

過去 70 年間の日本の各地での気温傾向を調べた文献 [21] によれば、過去 70 年間で平均、年間 0.02℃ の気温上昇がみられるとしている。しかしこ

こうした昇温傾向は季節ごとに異なり、一般に夏の昇温傾向は他の季節に比して小さい。この傾向は特に北日本で著しく、北日本が冷夏に見舞われる可能性の大きいことを示唆している。北日本におけるササニシキの子実収量は1993年～2005年の平均で613g/m²、上記と同様な過去70年間でのその収量増加率は16g/m²/10年であった。これから、地球温暖化がどれほどの収量増加をもたらすかが推算できることになるが、稲がどれほどの子実をつけるかは幼穂形成までの気象条件や出穂日までの日数に依存し、これらは地球温暖化の様相に依存することになるので、収量増加の推算は必ずしも簡単ではない。過去の気温変化挙動から著者は(1)全季節にわたって従来と同様の気温上昇、(2)春のみ昇温、夏はそのまま推移とする2種のモデルを検討した。モデル(1)では上記のとおり収量増加だが、(2)では冷却量(幼穂形成から出穂期までの日平均気温Tが20以下では $a=(20-T)$ 、それ以上では $a=0$ として、これを日々積算したものを冷却量と定義)が平均気温1上昇ごとに16%上昇することになり、冷害被害が増加する、すなわち、地球温暖化によって冷害が増大することになると指摘した。このため(2)となる場合にそなえて、品種や作期の最適化が重要であると指摘している。

2.4. まとめ

稲作と地球環境、または有機農法と地球環境との係わりについては、介在する多くの関連因子がある。図8はこれらの因果関係を簡単に図示化したものである。有機農法か慣行農法かという二者択一ではなく、変動する地球環境条件下でこうした因子を総合的に考慮し、環境へのインパクトを最少にしつつ収量を最大化するとする、最適な組み合わせの解を得ることが求められるところであろう。われわれ「温暖化防止うらやす」はそのような認識を共有し、有機農法を冷静に理解することが重要となる。

付録 生物多様性の価値

ここでは多様な生態系が人々に利益をもたらす形態を「生態系サービス」と呼ぶこととする。生態系サービスの主なものは大気成分や気候のコントロール、水流や飲料水の供給、土壌の生成、養分の蓄積と循環、食物や原料物質の供給、遺伝的資源(医薬品、病原菌に強い遺伝子など)の提供、文化(非商業的利用、精神的、科学的価値)としての存在などである。

文献[4]では、生物多様性が増す場合の各生態系サービスの増減の方向を定性的に検証している。多様性が増す場合、食物などの物質の供給とバイオコントロール（生物による自動的制御、例えば外来生物の侵入に対する排除機能）に関してはマイナスの効果となる。すなわち、多様性が増せば食糧生産量は減り、外部からの種の混入が増えることになる。しかし、これらを除く他の制御機能は強化する方向に動くとしている。

生物の多様な状態ではなく、生物の多様化を図る行為そのものがどの程度、生態系サービスの上昇をもたらすのかについては依然としてはっきりしない状態にある。文献 [12] では、たとえば土地の開墾や耕作、富栄養化、草木の植栽などによって破壊された生態系を原状に回復する行為が、生物多様性や生態系サービスの向上に係ってどれほどの効果を持つかを検討している。様々な種類にわたる生態系の回復評価 89 件（これらは生物多様性、生産性、多機能に対する補助機能、諸々の環境変化に対する制御性などに関する計 526 件の定量値を含む）を世界的に集め、これらのメタ分析を行った結果、原状への回復作業によって生物多様性は 44%、生態系サービスは 25% だけ増加・回復したことがわかった。しかし、これらの値は手つかずの状態にある参照系と比較すればいずれも低いもの（86、および 80%）でしかなかった。すなわち、破壊された生態系を修復する場合でも、原状の多様性や生態系サービス状態にまで回復することは不可能であることになる。

しかし、生態系サービスの観点からのみ生態系の保全を提唱するのは限界があり、とくに生物多様性に関しては問題が多い。たとえば、外来種の、単一の植生から成る平原は水のろ過や有機炭素の保持と蓄積、洪水の防止などの機能に関して、種々の植生を持つ多様性の高い平原に比して、人々への利益に関してはより良質であるとする指摘もある [13]。こうした観点から、有機農法をも含むさまざまな手段で生態系保全を推進する場合、そうした生態系がどれほど貨幣的価値のあるものかについての議論も多い。

文献 [14] では、レッドリスト（生存が脅かされている生物種のリスト）中で、最も消滅の危険性の高い鳥類、約 1100 種の消滅を防ぐために、今後 10 年間で $0.875 \sim 1.23 \times 10^9$ \$/年の費用を要すると計算している。鳥類以外の危機的な生物をも考慮すればこの費用は $3.41 \sim 4.76 \times 10^9$ \$/年となる。さらに、鳥類の生育地域（11,731 か所）の保全という費用を考慮すれば 65.1×10^9 \$/年、他の生物の生息地域の保全も含めれば 76.1×10^9 \$/年となると推算している。

文献 [13] では主として既存の文献をもとに、16 の生物種に対する 17 の生態系に対して経済的価値を推算し評価している。地球の生物圏全体としては $16 \sim 54 \times 10^{12}$ \$/年（これらのほとんどは市場経済範囲の外にある）平

均は 33×10^{12} \$/年となるとしている。ちなみに同年（1997年）の世界全体での GNP は 18×10^{12} \$/年であるので、生物多様性の価値は人々の経済活動と同程度の値であることになる。

参考文献

- [1] P.Gerland, et al.(2014), World population stabilization unlikely this century, *Science* 346(# 6206), 234-237.
- [2] 農林水産省生産局 (2008年3月), 「今後の環境保全型農業に関する検討会」報告書、別紙1 土地土壌の炭素貯留機能の評価.
- [3] NPO 法人 MOA 自然農法文化事業団 (平成 23 年 3 月) 有機農業基礎データ作成事業報告書、61p.
- [4] B.J.Cardinale et al.(2012), Biodiversity loss and its impact on humanity, *Nature* 486 (June 7), 59-67.
- [5] A.Gattinger et al.(2012), Enhanced top soil carbon stocks under organic farming, *Proc.Nat.Acad.Sci.* 109(44), 18226-18231.
- [6] J.Leifeld et al.(2013), Organic farming gives no climate change benefit through soil carbon sequestration, *Proc.Nat.Acad.Sci.* 110(11), E984.
- [7] J.Leifeld and J.Fuhrer (2010), Organic farming and soil carbon sequestration: what do we really know about the benefits? , *Ambio* 39(8), 585-599.
- [8] S.Deike, B.Pallutt, and O.Christen(2008), Investigation on the energy efficiency of organic and integrated farming with specific emphasis on pesticide use intensity, *European J. Agronomy* 28, 461-470.
- [9] H.L.Tuomisto, I.D.Hodge, P.Riordan, and D.W.Macdonald (2012), Does organic farming reduce environmental impacts? a meta-analysis of European research, *J.Envir.Manage.* 112, 309-320.
- [10] V.Seufert, N.Ramankutty, and J.A.Foley (2012), Comparing the yields of organic and conventional agriculture, *Nature* 485(may 10), 229-232.
- [11] J.Ekroos, M.Piha, and J.Tiainen (2008), Role of organic and conventional field boundaries on boreal bumblebees and butterflies,

- Agriculture, *Ecosystems & environment* 124, 155-159,
- [12] J.M.R.Benaya, A.C.Newton, A.Diaz, and J.M.Bullock (2009), Enhancement of biodiversity and ecosystem services by ecological restoration: a meta-analysis, *Science* 325(Aug.28), 1121-1124.
- [13] E.Marris (2009), Putting a price on nature, *Nature* 462 (Nov.19), 270-271.
- [14] D.P.MaCathy et al.(2012), Financial cost of meeting global biodiversity conservation targets: current spending and unmet needs, *Science* 338 (Nov.16), 946-949.
- [15] R.Costanza et al.(1997), The value of the world's ecosystem services and natural capital, *Nature* 387 (May 15), 253-260.
- [16] T.de Ponti, B.Rijk and M.K.van Ittersum (2012), The crop yield gap between organic and conventional agriculture, *Agricultural Systems* 108, 1-9.
- [17] Y.Qin, S.Liu, Y.Guo, Q.Liu and J.Zou (2010), Methane and nitrous oxide emission from organic and conventional rice cropping system in Southeast China, *Biol.Fertil Soils* 46, 825-834.
- [18] 西尾道徳, 有機農業による炭素の土壌蓄積増加は温暖化防止の解決策か, <http://lib.ruralnet.or.jp/nisio/?p=2679>
- [19] J.R.Porter et al. (2014), Food security and food production systems. In: *Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Part A; Global and Sectorial Aspects* (Cambridge Univ. Press), pp.485-533.
- [20] T.Hasegawa et al. (2013), Rice cultivated response to elevated CO₂ at two free-air CO₂ enrichment (FACE) sites in Japan, *Functional Plant Biology* 40,148-159.
- [21] 下野裕之(2008), 地球温暖化が北日本のイネの収量変動に及ぼす影響, *Jap.J.Crop Sci.* 77(4), 489-497.
- [22] United State Environmental Protection Agency (2006), *Global anthropogenic non-CO₂ greenhouse gas emission:1990-2020* (Washington), p.269.
- [23] T.de Pnti, B.Rijk, and M.K.van Ittersum (2012), The crop yield gap between organic and conventional agriculture, *Agricultural Systems* 108, 1-9.

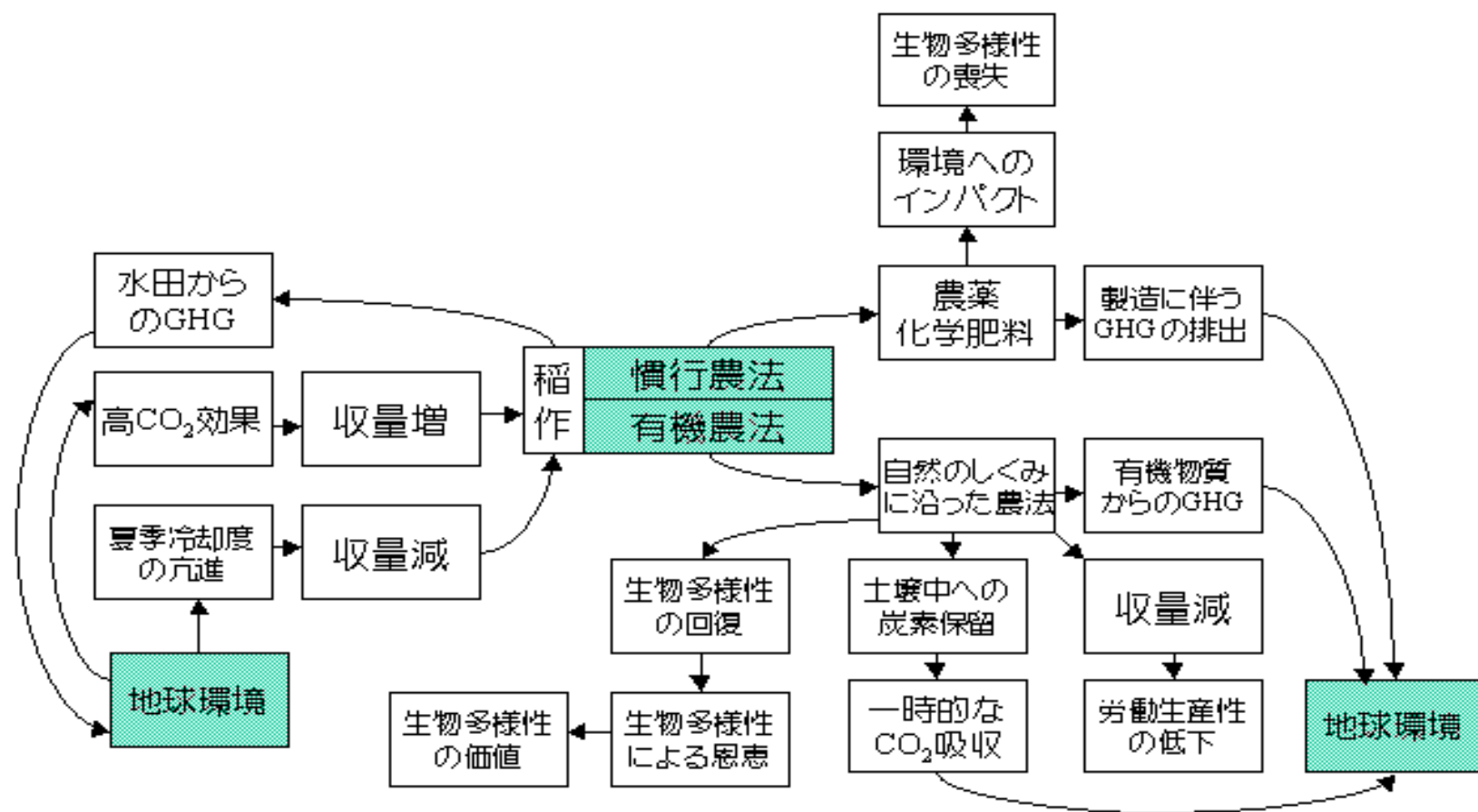


図8 地球環境と稲作の関連性