

第2章 食料分野

《目次》

2.1 影響のメカニズム	2
(1) 影響のメカニズムの構成要素	2
(2) 影響のメカニズム	3
2.2 現在把握されている影響	4
(1) 農業	4
(2) 畜産業.....	6
(3) 水産業.....	6
(4) 食料分野における現在把握されている影響の総括	9
2.3 将来予測される影響	10
(1) 農業	10
(2) 畜産業.....	14
(3) 水産業.....	15
(4) 食料分野における将来予測される影響の総括	17
2.4 脆弱性の評価	20
(1) 脆弱性の評価手法の例	20
(2) 脆弱性評価における課題	22
2.5 適応策	24
(1) 適応策メニューとその体系.....	24
(2) 適応策の選択・実施にあたっての考え方	26
(3) 適応策を実施する上でのバリア	27
(4) 適応策として参考にできる既存の事例・政策	28
(5) 適応策の評価手法に関する研究動向	30
2.6 今後の課題	31
(1) 影響	31
(2) 脆弱性.....	32
(3) 適応	33
引用文献	34

※図表・写真等の使用に際しては、出典を必ず明記いただけますようお願いいたします。

※ **要通知！** 印のある図表・写真は使用にあたり執筆者等への連絡が必要のため環境省に問合せ願います。

※ **要許諾！** 印のある図表・写真は使用にあたり学会等、引用元の使用許諾等が別途必要ですのでご注意ください。

2.1 影響のメカニズム

(1) 影響のメカニズムの構成要素

食料分野における温暖化影響のメカニズムを構成する要素を、表 2-1 に示す。

表 2-1 影響のメカニズムの構成要素

気象・海象	自然的要素	社会的要素	影響 [○は好適影響、△は場合による、×は負の影響]
- 平均気温・地温・海水温の上昇 - 海面の上昇 - 降水量の増加・日射量の減少 - 強い台風の増加 - 気象要素の変動幅の増大	- 従来の気候帯の北上 - 極値が発現する地点の偏在化 - 降水期間の移動 - 積雪期間の短縮 - 梅雨期間の長期化 - 潜在蒸発量の増加 - 高潮の発生 - 海域における低次生態系の変化	- 食料自給率の低下(海外への依存) - 農家の減少・高齢化 - 米価下落による生産意欲の低下 - 食味向上のための行き過ぎた肥料削減 - 動物性たんぱく質への志向(穀物生産への負荷) - 輸送コスト(化石燃料費)の上昇 - 飼料コストの増大 - 生産に適した農耕地の減少 - 農地の浸食・劣化 - バイオマスエネルギー生産との農地利用の競合 - 世界的な食料需要の増大	- CO₂濃度上昇による乾物量の増加(○) - 水利用効率の変化(△) - 高温による作物収量・品質の低下(×) - 生育・栽培可能期間の拡大(○) - CO₂濃度上昇と気温上昇の複合効果による稔実率の低下(×) - 栽培適地の変化(△) - 肥料効果の変化(△) - 微生物の活力増大(○) - 台風による倒伏・塩害の増加(×) - 農業・海洋生態系の攪乱(×) - 水資源・土壌水分不足の激化(×) - 土壌有機物の分解促進(×) - 土壌生物相の単純化(×) - 害虫・雑草・病原生物の活発化(×) - 魚種の変化(△) - 海岸低地・農地海岸の浸水・浸食(×)

(2) 影響のメカニズム

食料分野における温暖化影響のメカニズムの全体像を図 2-1 に示す。

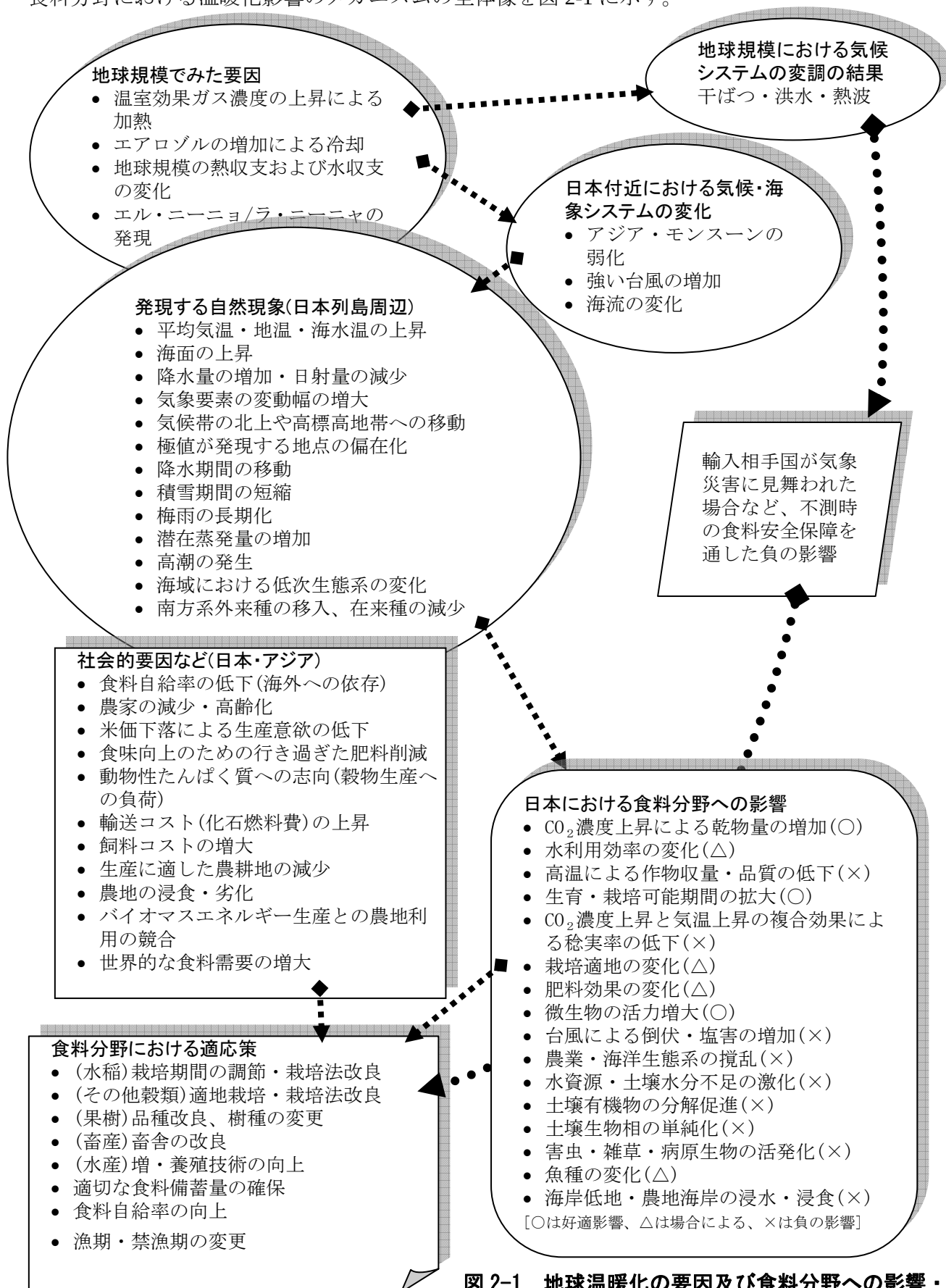


図 2-1 地球温暖化の要因及び食料分野への影響・適応策に関する全体像

2.2 現在把握されている影響

食料分野において現在把握されている影響の事例を以下に整理する。なお、ここでは、温暖化による影響であるかどうか現時点では判断し難いが、その可能性が高いと考えられる現象、温暖化が進行すればさらに増加すると考えられる現象も取り扱っている。

(1) 農業

1) コメ

コメでは、生育期間の気温の変化による、品質や収量への様々な影響が確認されている。

出穂後 20 日間の日平均気温が 22～23℃のときに登熟が最も良好となり、26～27℃を超えると急激に白未熟粒（白濁した玄米）（図 2-2）が増加して外観品質が低下する（図 2-3）（森田，2005）。粒重も 22～23℃を超えると徐々に減少して減収することがポット試験で指摘されている（Yoshida and Hara, 1977）。なお、粒重の低下は昼よりも夜の高温の影響力が大きいこと、高夜温ではデンプンを蓄積する胚乳細胞の成長が抑制されることで粒重が低下することが明らかにされた（Morita et al., 2005）。

白未熟粒は、東北以南の広い地域で発生している。また、一等米比率低下のもう一つの大きな要因である充実不足（粒張りの低下）は、西日本の特に九州で頻発している（森田，2005）。充実不足の発生には、粒重低下の要因である高夜温が密接に関連していると考えられる。

白未熟粒は、①高温で米粒が急激に発育する一方で茎葉からの同化産物の供給が間に合わずにデンプン粒の発達が不十分となること（小葉田ら，2004）、②米粒に同化産物を輸送する維管束組織が老化すること（中山，1969）、③高温で米粒内のデンプン合成酵素の活性が低下しデンプン分解酵素の活性が逆に増大すること（Yamakawa et al., 2007）などが原因となって発生することが推察されている。①に関しては、同化産物の供給不足を引き起こす日照不足が高温と重なりと登熟不良が甚大化することが古くから知られており（松島・真中，1957）、近年の九州産水稻の登熟不良にはこのことが大きく影響していることが指摘されている（森田，2008a）。

東北や北陸で発生頻度が高い胴割粒（米粒内の急激な水分変化により内部膨縮差が大きくなることで亀裂が生じる玄米）は、特に登熟初期（出穂後 10 日間）の昼の高温で発生しやすくなることがわかってきた（長田ら，2004）。

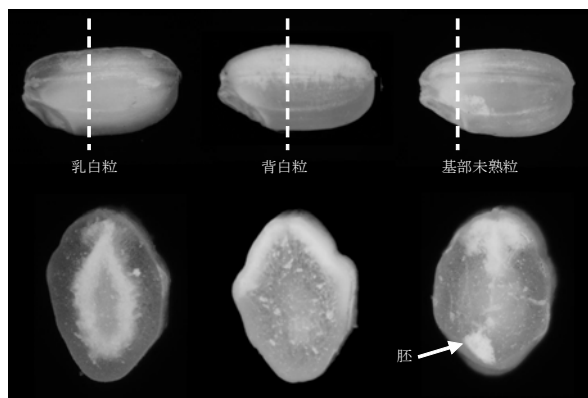


図 2-2 水稻の白未熟粒（森田，2005）

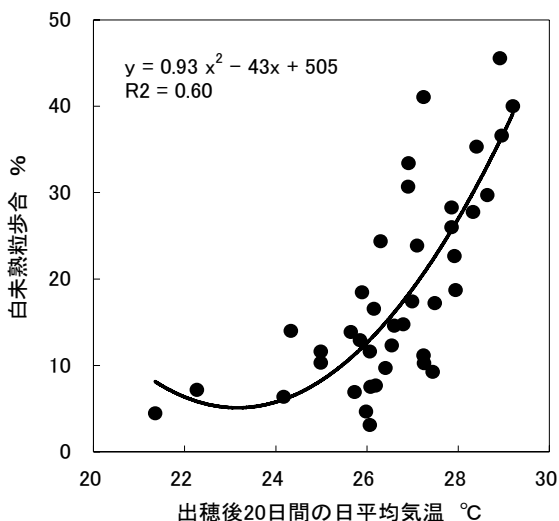


図 2-3 全国連絡試験（平成 16 年、15 地点）におけるコシヒカリの出穂後 20 日間の平均気温と白未熟粒歩合の関係（森田，2005）

注 1) 白未熟粒歩合は穀粒判別器（サタケ，RGQ1 10A）で判定した乳白粒（心白粒を含む）、腹白粒（背白粒を含む）、基部未熟粒の合計値とした。

食味も出穂後 20 日の気温で 25～26℃を超えると低下することが指摘されている（岡本，1994）。いずれの生育段階においても高温で生育期間が短縮する（農林水産省 農林水産技術会議，2007a）ため、栽培管理の適期作業（育苗、追肥、水管理、収穫など）に支障が出ている。

このほか、高温条件では紋枯病やトビイロウンカ、カメムシなど病虫害の発生が多くなり、収量・品質低下をもたらす。また、ミナミアオカメムシなど一部の害虫が北上していることが指摘されている（大野・中村，2007）。

高温化は緩効性肥料の肥料成分の溶出を早め、このことが生育後半の肥料不足を招いていることも指摘されている。

2007 年には出穂・開花期に 38℃を超す異常高温で、圃場で生育した水稻に受精障害が発生し不稔率が 10%を超える傾向を認めた（石丸ら，2008）。

2) コメ以外の穀類

麦では、冬季の高温化により幼穂形成や茎立ちが早まり、寒さに弱い幼穂が凍霜害を被るリスクが高まるという問題が発生している（藤田，1997；杉浦ら，2006）。また、赤かび病などの増加や登熟期間の短縮による減収・品質低下、稈長増大による倒伏増加が指摘されている。穂発芽については増加と減少の両者が観察されている（杉浦ら，2006）。これらの影響は九州や関東で顕在化し始めている。

大豆では、ハスモンヨトウの発生の増加・長期化が指摘されている（杉浦ら，2006）。また、農林水産省 農林水産技術会議（2007a）は、高温による乾燥が引き金になって青立ち（莢は熟しているが茎葉が青いままに収穫を迎える症状で、収穫時に青汁が出て大豆表面に付着して汚粒発生の原因となる）、生育抑制、収量・品質低下、病虫害の増加への影響が出ているとした。これらの影響は主に関東以南で顕在化し始めている。

3) 果樹

（独）農業・食品産業技術総合研究所（農研機構）は 2003 年に果樹、2005 年に水稻、麦、大豆、野菜、畜産について、全国 47 都道府県の農業関係公立試験研究機関を対象として、近年の気候変化影響に関するアンケートを実施した。その結果、「果樹」は全都道府県、「野菜」では 9 割、「畜産」については 4 割の都道府県が、すでに気候変化による影響は現れていると回答している。必ずしもこれらはすべて温暖化による影響と断定できるものではないが、特に果樹について、影響が全都道府県で確認されていることが注目される。

近年の気候変化で見られる果樹生産への影響としては次の事例が挙げられている。ミカン^{うきかわしょう}は、成熟期の高温・多雨により果皮と果肉が分離する浮皮症が発生し、品質、貯蔵性が低下する（農林水産省 農林水産技術会議，2007b）。また、ミカンは夏季の水不足と強い日射により果実の日焼けが起きる（農林水産省 農林水産技術会議，2007b）。ブドウは、高温によるアントシアニンの合成が抑制され着色障害が起き、商品価値が低下する（農林水産省 農林水産技術会議，2007b）。

要通知！



要通知！

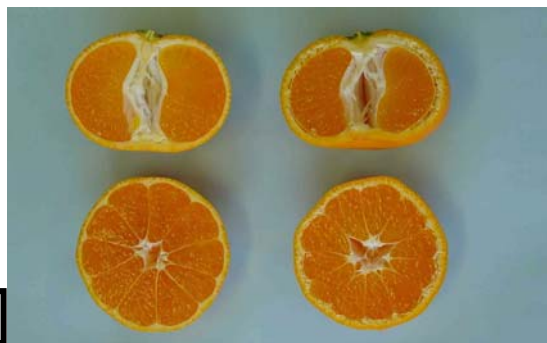


図 2-4 高温、水不足によるミカンの「日焼け果」 図 2-5 高温、多雨によるミカンの「浮皮症」

(写真提供：農業・食品産業技術総合研究機構
果樹研究所 カンキツ研究チーム)

(写真提供：広島県立総合技術研究所農業技術
センター果樹研究部)

4) 茶・野菜

茶については、温暖化により萌芽が早まり、現在の気象状況下では凍霜害を受ける確率が高くなっている（農林水産省 農林水産技術会議，2007b）。秋冬の気温が 2℃以上上がると休眠期が短くなり、一番茶の生育、収量、品質が悪化する。さらに一番茶の時期の気温が高いと、葉が早く硬くなり品質に影響する。この傾向は、特に関東以西で強い。また、関東以西では生育時期が変わり、以前は発生時期がずれていたために被害が少なかった病害虫の多発や発生パターンの変化が生じている（農林水産省 農林水産技術会議，2007b）。

野菜についても、温度上昇による生育時期の早期化に伴い、病害虫の発生時期の拡大と個体数の増加が観測されている。トマトは着花、着果、着色の不良が、また高温で実が腐りやすくなり、糖度が低下し、実が付きにくくなる等の例が報告されている。イチゴは春先の生育不良が東北以南で報告され、特に関東以西では花芽の分化が遅くなる傾向が現れている。また、特に冷涼な気候を好む野菜の多くは、生産性が低下する傾向がある。

花卉については、温度上昇のため開花期が植え付け時期によって早期化あるいは遅延化しているとともに、生育時期の移動により害虫の発生時期が変化している。

(2) 畜産業

畜産への影響として、暑熱による受胎率の低下、乳量低下や肥育での発育低下が全国で現れている（農林水産省 農林水産技術会議，2007b）。

飼料作物への影響として最も多いものは、気温上昇による牧草の夏枯れ発生であり、特に東北以南では、サイレージ¹調整後の牧草の品質低下が多く報告されている（農林水産省 農林水産技術会議，2007b）。

(3) 水産業

1) 回遊魚

近年、日本海でのサワラの漁獲量が増加している。1990 年代前半までは東シナ海系群のサワラは分布の中心が東シナ海であり、日本海で漁獲されるのはまれであったが、2000 年以降日本海で漁獲が増加している。近年の日本海の水温上昇により分布域が北部に拡大したと考えられるが、

¹ 飼料作物をサイロにつめて乳酸発酵させた家畜用のエサ。

この水温上昇が 10～20 年の周期的な変動か、温暖化によるものかの判断は難しい。また、舞鶴湾長浜での 2002～2006 年の詳細な調査によると 30 年前と比較すると南方系魚類の種類、数とも増加しているとの報告がある (Masuda, 2007)。

ここ数年、ゴマサバ漁獲量が増加している。ゴマサバとマサバの分布域はほぼ重複するが、マサバより高い水温を好むゴマサバの漁獲量は増加し、マサバの漁獲量は低迷している (注：漁獲量全体としてはマサバの方が多い)。しかし、2007 年は東シナ海におけるゴマサバの漁獲量は少ない。

九州周辺海域で南方系魚類の出現傾向が増加している。新聞情報、漁協等からの聞き取りであるが、沖縄県の県魚である、グルクンが 2006 年春に五島、壱岐沖で捕獲されている。南さつま市沖では 2006 年 10 月にミナミコノシロが定置網に混入し、国内では 2 個体目の確認となった。また、同年 9 月には内之浦湾 (鹿児島県) でカタグロアゴナシが定置網に混入し、国内では 4 個体目の確認となった。しかし、これらは海流の変化による可能性もあり、一概に温暖化による影響とは言い切れない。

2) 沿岸性魚介藻類

南方系海藻類が増加している (図 2-6)。南方系のホンダワラ類は今までも孢子等が日本周辺に流れ着き、維持的に生息、定着することはあった。しかし、近年、定着する海藻の量が増加傾向にある。冬季水温の上昇がその原因の一つと考えられている。

アイゴ、ブダイ等の南方系植食性魚類による海藻の食害が増加傾向にある。冬季水温の上昇傾向で摂餌行動等が活発化したと考えられ、食害によるクロメ等の藻場衰退の恐れがある (図 2-7)。

二枚貝の天敵、熱帯・亜熱帯性エイも増加している。近年、有明海、瀬戸内海でナルトビエイが増加している。アサリ等の二枚貝を捕食することが確認されており (Yamaguchi et al., 2005)、漁業被害も出ている。

3) 養殖

ノリ養殖への影響として、秋季の水温低下が遅れ、ノリ漁期の開始が遅れてきている。ノリ網への種付け (採描) は、水温 23℃以下で行わないと芽流れを起こし、養殖できなくなる。例えば、有明海では近年水温が上昇しており、ノリ漁期の開始が遅れる傾向にある。2007 年は顕著であり、残暑が続く海水温が下がらず、ノリ漁期が今まで一番遅かった期日より 2 週間前後遅れ 10 月下旬にようやく始まった。

九州周辺海域では養殖カキの不振が起こっている。2007 年夏、有明海では養殖カキのへい死が新聞等で報道された。しかし、水温上昇によるものかどうかの判断は難しい。

また、カンパチ養殖の適地が北上している。鹿児島県漁協等からの聞き取りによれば、冬季水温の上昇により、鹿児島県ではわずかだが適地が北上しているようである。

南方系二枚貝のミドリイガイが日本周辺海域 (特に太平洋側) での生息域を拡大しており、東京湾でも確認されているが、水産業に与える影響は未知数である。食用として利用は可能だが、海中の構造物に容易に付着することから養殖施設に付着すると施設の劣化につながるとともに、他の貝類養殖の生産力低下にも影響することが考えられる。

熱帯性有毒プランクトンが増加している。麻痺性貝毒の原因植物プランクトンであるアレキサンドリウム・タミヤバニッチ (*Alexandrium tamiyavanichii*) は水温 27.5～30℃でもっとも良く増殖し、15℃以下では死滅すると言われているが、瀬戸内海では 1999 年以降ほぼ毎年出現が確認されている (長井, 2007 ; Nagai et al., 2003)



在来種アントクメ(濃い茶色)の藻場の間隙に広がるツクシモク(薄い黄色、→で示す)などの南方系種



在来種アカモク(長いもの)などに混じるキレバモクなど(短いもの)の南方系種



葉が食いちぎられ、茎だけになったクロメ



摂食された歯形の残ったクロメ



ブダイ(大きい方の魚)、アイゴ(小さい方の魚)がクロメを摂食している様子

要通知！

図 2-7 海藻(クロメ)に対する魚の食害(長崎市野母崎町)

(写真提供：水産総合研究センター 西海区水産研究所)

図 2-6 南方系(暖海性)ホンダワラ類の分布拡大-長崎市地先での様子

(写真提供：水産総合研究センター 西海区水産研究所)

要通知！

コラム：水産業における買い負け現象

日本は世界の市場で魚介類を調達しているが、健康志向による魚食ブームの欧州は、ユーロ高にも恵まれ、日本より高い値段で購入し始めており、日本が購入競争で負ける「買い負け」現象が起きている。マグロ、カズノコ、イクラ等の高級食材だけでなく、練り製品に使われる魚の値段も高騰している。スケトウダラは練り製品の原料となるすり身が作られる魚の代表であるが、スケトウダラの切り身自体の需要も増え、すり身に回らなくなってきている。また、すり身には、東南アジアのイトヨリダイ、南米太平洋側ではチリマアジ、ミナミダラ等も使われているが、価格は高騰している。中国等新興国での水産物需要の増加等、世界的に魚介類の消費量が拡大しており、国際的な市場での魚介類の調達が難しくなっている。

今後温暖化が進むと、漁場の移動、魚種分布の変化などにより、国際市場での魚介類の調達は、ますます難しくなる可能性がある。

(4) 食料分野における現在把握されている影響の総括

食料分野において現在把握されている影響を、地域的な傾向も含め、表 2-2 に示す。

表 2-2 現在把握されている影響

農業	
コメ	白未熟粒（白濁した玄米）の発生（出穂後 20 日間、26～27℃以上：東北以南） 玄米充実不足（粒張りの低下）（出穂後 20 日間、特に高夜温：西日本） 玄米の粒重低下（出穂後 20 日間、特に高夜温：西日本） 胴割粒の発生（出穂後 10 日間など登熟初期、昼の高温：主に東北、北陸） 食味の低下（出穂後 20 日間の 25～26℃以上：西日本） 生育期間の短縮（播種～登熟期：全国） 病虫害の発生（播種～登熟期：全国） 受精障害（主に開花期、38℃以上：関東・東海）
コメ以外の穀類	麦の幼穂形成の早進による凍霜害、倒伏増大、粒重低下（冬～春：関東、九州） 干ばつを介した大豆の青立ち・生育抑制および収量・品質低下、病虫害の発生（夏：関東以南）
かんきつ	着色不良（7～11 月：四国及び九州） 浮皮症の発生（11～12 月：関東以西）
ブドウ	着色不良（6～11 月：北海道を除く全国） 施設栽培における休眠覚醒の遅延（12 から翌 2 月：関東、四国）
ナシ	萌芽の早期化による凍霜害の発生（12～翌 5 月：本州全域） みつ症などの果実の生理障害の発生（7～10 月：東海以西）
トマト	着花・着果不良（夏：全国） 着色不良（夏：東北以南）
イチゴ	花芽分化遅延（秋冬：関東以西） 生育不良（春：東北以南）
茶	茶の萌芽の早期化による凍霜害の発生（3～4 月：関東以西） 茶の病虫害の多発や発生パターンの変化（4～10 月：関東以西）
畜産業	
畜肉	暑熱による受胎率の低下（夏：全国） 暑熱による乳量低下や肥育での発育低下（夏：全国）
飼料	気温上昇に伴う牧草の夏枯れ発生（夏：全国） サイレージ調整後の品質低下（東北以南）
水産業	
回遊魚	サワラ漁獲量の増加（日本海北部）
沿岸性魚介藻類	二枚貝を捕食する熱帯・亜熱帯性エイの増加（西日本） 南方系海藻類の増加（九州） 南方系植食性魚類の増加による、藻場の衰退（西日本）
養殖	ノリ漁期の遅れ（九州） 熱帯性有毒プランクトンの増加（西日本）

2.3 将来予測される影響

食料分野において将来予測される影響について、最新の科学的知見をもとに、以下に整理する。

(1) 農業

1) コメ

今後、温暖化の進行に伴う登熟期の気温上昇により登熟不良（品質・粒重低下）が甚大化すると予測される。例えば、粒重低下については、出穂後 20 日間の日平均気温で 28℃を超すと減収し始めることが圃場試験で指摘されているが（Izumi et al., 2007）、今後も今と同じ時期に登熟するような作期が継続された場合、30 年後には多くの地域でこのような気温を超える可能性がある。

なお、温暖化で移植可能日が早まる効果や生育期間が短縮される効果を考慮しつつ収量を高位に保つ条件で最適出穂期を推定した結果、北海道と東北の一部で最適出穂期が早まり、関東以西で遅くなることが明らかとなった。また、最適出穂期を選択しても北海道以外では減収し、全国平均で約 10%減収することが示された（林ら，2001）。最近、横沢ら（2006）は日本のコメの生育および収量を広域で評価するために、生育や収量形成過程を取り入れた圃場スケールのプロセスモデルをベースとして、気象環境条件から県別の収量を推定するモデル（広域水稻収量予測モデル）を作成した。そのモデルに、疑似温暖化法による気候変化シナリオを入力して、将来の気候変化によるコメ収量の変化を推計した結果、北海道では増収、西日本で減収する傾向が示された（図 2-8；横沢，2006）。

このほか、高温で発生する病虫害の北上（大野・中村，2007）や、これまで日本で見られなかった病虫害の発生が予測され、このことも減収要因になりうる。

寒冷地では冷害発生頻度が減少することが予測される一方で、近年の気象傾向である「春昇温し夏は昇温しない」条件では、冷害発生頻度を増大させることも指摘されている（下野，2008）。

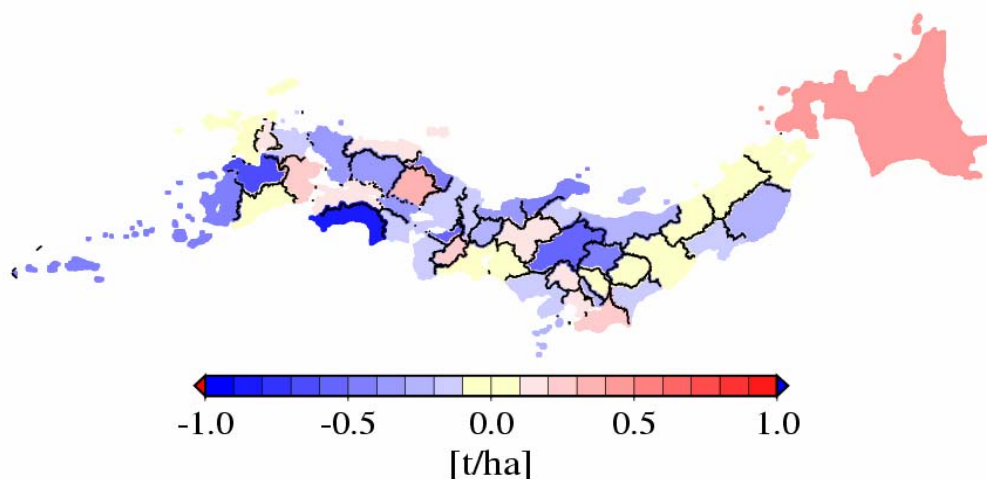


図 2-8 IPCC-SRES A2 シナリオに基づく 2070 年代の温暖化状況下でのコメ収量変化推定の一例（横沢，2006）

※現状のまま適応策を取らないケースを想定し、1990 年代の平均収量との差を示している。

※気象研究所大気海洋大循環モデルの出力結果と 1990 年代の気象状況から疑似温暖化法によって作成した気候シナリオを利用した。

将来も現在と同じ品種を栽培する条件では、一定の収量を確保するためには関東以西の西南暖地で栽培期間を後退させ、これ以外の東北と北海道では早めることが効果的と考えられる。さらに、積雪量の減少と融雪量の増大による田植期の水不足が考えられる。

また、平均気温の上昇は夜温（最低気温）の上昇の効果が大きいことが明らかになっている。夜温が相対的に高まると呼吸に必要なエネルギーが増加するため、乾物生産量が減少するほか、子実への炭水化物の輸送も抑制されることがわかってきた。

コラム 擬似温暖化法を用いた気候変化シナリオと影響評価

温暖化の影響評価では気候変化シナリオが不可欠である。一般に気候変化シナリオには、温室効果ガスの排出量に基づいて将来の気候状態を予測する大気海洋結合モデル（GCM）の出力値が用いられる。しかし、全球の気候状態を予測する GCM は、空間解像度が低い上に、計算量が大きく、様々な状況を想定したシミュレーションを容易に実行できない。

その代わりに、擬似温暖化法という手法が考案されている。擬似温暖化法は、GCM の現在気候と将来気候との差（温暖化差分と呼ぶ）を過去の特定年の気象データに重ね合わせ、領域気候モデル（RCM）を利用して空間解像度の高いデータを作成（＝ダウンスケール）する方法である。この方法の利点は、渇水年や豊水年、暑夏年や冷夏年等の過去の特定年が温暖化した場合にどのような気候になるのか？という問いに、高い空間解像度で比較的容易に答えられる点にある。

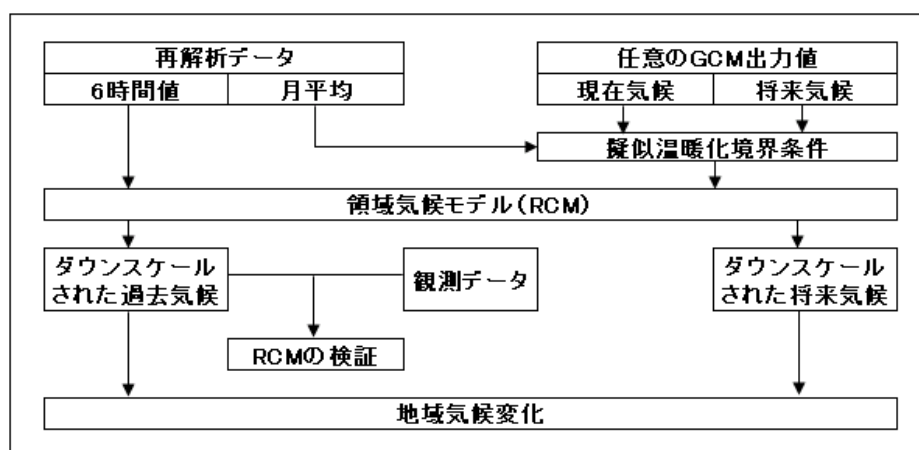


図 2-9 擬似温暖化法によるダウンスケーリングのフローチャート
(Kimura and Kitoh, 2007 より作成)

2) コメ以外の穀類

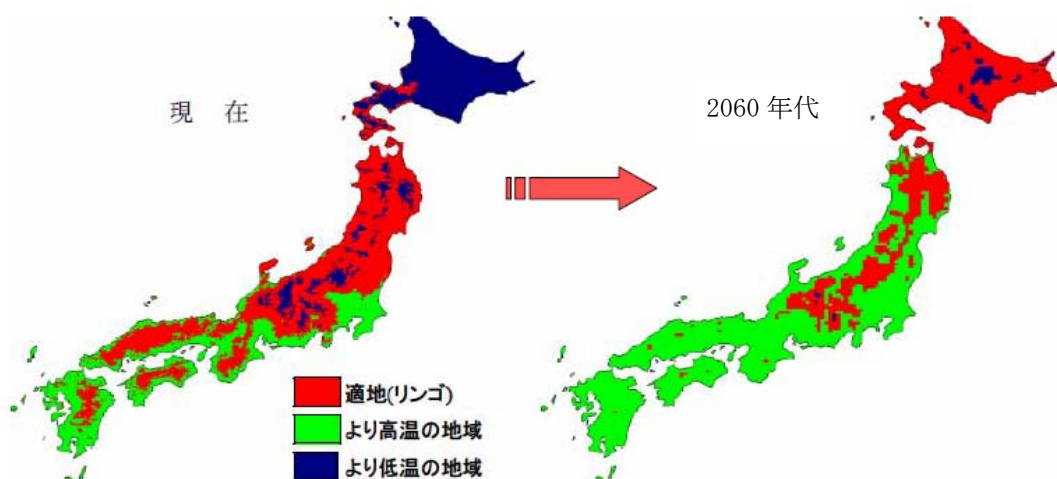
西日本の麦では、登熟期の高温による粒重減少を介した減収が顕在化する可能性がある。また、赤かび病や穂発芽が増加する可能性がある。

大豆では、関東以南では開花期の高温による花数、結莢率の低下により減収する可能性がある（大江ら，2007）。

3) 果樹

果樹は夏秋に発芽しない自発休眠という現象がある。休眠状態に入った後には、一定の低温に遭遇しないと自発休眠が解除されず発芽ができない（自発休眠覚醒）。リンゴ「ふじ」の自発休眠覚醒に必要な低温時間は6℃で約1,500時間と推定されている。また、覚醒効果は0～6℃で最も高く、6℃以上12℃までその効果は低下し、12℃以上になると効果はなくなる。この事実から現在、青森、長野、福島では1月中旬～下旬、富山、鳥取では2月上旬～中旬に自発休眠覚醒が起きると推定される。したがって、全国平均気温が3℃上昇したとすると、最も遅い鳥取では30日以上休眠覚醒が遅れることになる（農林水産省 農林水産技術会議，2008）。

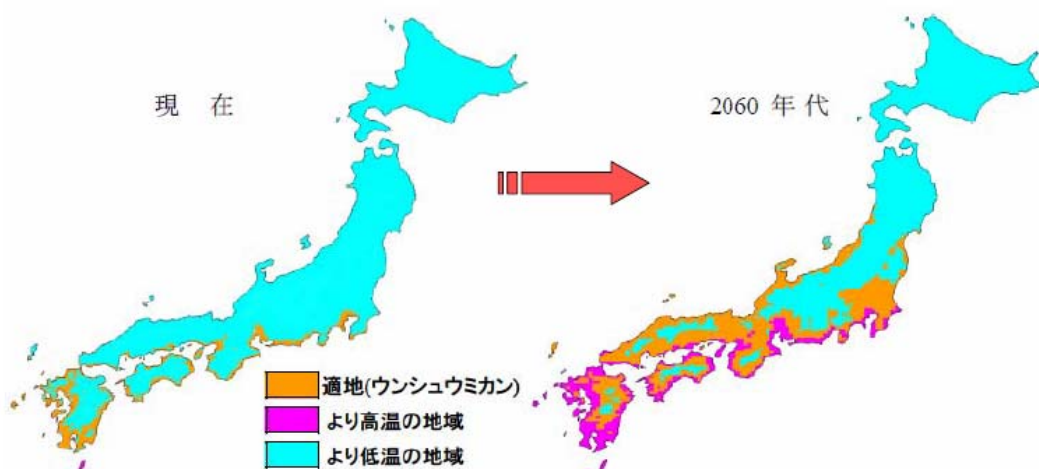
リンゴでは、栽培に適する年平均気温6～14℃の地域が温暖化に伴い北上し、2020年代には北海道の平野部全域が栽培適温域となる。その一方、2060年代には東北中部の平野部が栽培不適となる可能性が示されている（IS92a シナリオ）（杉浦・横沢，2004）。また、高温はリンゴ果実の生育初期の地色・果皮色の進行を促すが、中期は地色、後期は果皮色の進行を強く抑制する。生育初期の高温処理を施した実験結果から、高温環境下では果実の食味を左右するデンプンの消失も早まることが知られている（農林水産省 農林水産技術会議，2008）。



要許諾！

図 2-10 リンゴの生産適地分布の変化（杉浦・横沢，2004）

ウンシュウミカンについては、栽培適温域は15～18℃で、2060年代には南東北の沿岸部まで広がる一方、現在の主要産地の多くが高温により栽培に不適な地域となると予測されている。（杉浦・横沢，2004）



要許諾！

図 2-11 ウンシュウミカンの生産適地分布の変化（杉浦・横沢，2004）

4) 茶・野菜

水野（2002）は、緑茶品種の「やぶきた」を念頭にして、最寒月の日最低気温の月平均値に基づいて茶の栽培地帯区分を作成した。暖地は「南九州以南」、温暖地は「東海地方から四国、九州（南九州を除く）」、冷涼地は「関東地方以北及び各地の高冷地」に対応し、さらに、生存不能な枯死域、生存は可能であるが生産には向かない限界地、及び「やぶきた」などが十分に生産能力を発揮できない亜熱帯に分類されている。

図 2-12 には、現在の分布とともに、気温が 2℃ 上昇、4℃ 上昇した場合の分布図を示した。これらの結果より、温暖化により地域がシフトするが、不適な亜熱帯区分地域の著しい拡大は見られない。しかし、島嶼や臨海部ではかなり影響があると予想された。

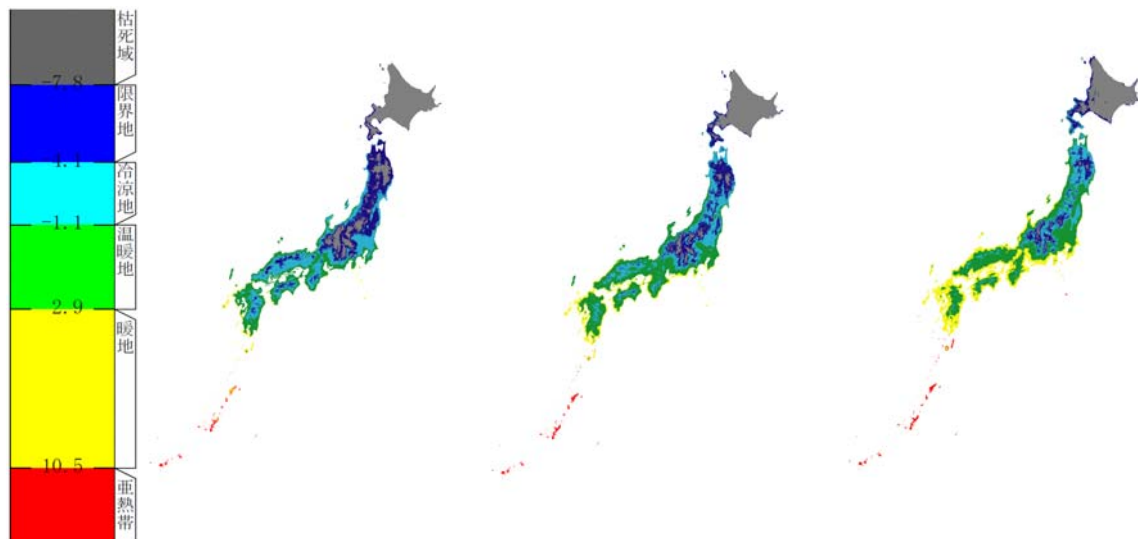


図 2-12 現在（左）、2℃上昇時（中央）、4℃上昇時（右）の栽培地帯区分の分布
（水野，2002： <http://cse.tea.affrc.go.jp/nmizuno/zoning/index.html>）

※左端は茶の栽培地帯区分を示す。

ハウレンソウについては、高温の影響は物質生産に直接関係し、気温が 3℃ 上昇すると生長量は 12～18% 程度減少するとシミュレーションモデルによって予測されている（農林水産省 農林水産技術会議，2008）。また、レタスについては、物質生産に対しては高温の影響はあまり見られない。しかし、商品価値に関係する茎（抽台茎：とう）の伸長は気温上昇の影響を受ける。気温が 3℃ 上昇すると、抽台茎の長さが 5cm に達する日数が 5～8 日早まることにより収量減となることが予測されている（農林水産省 農林水産技術会議，2008）。

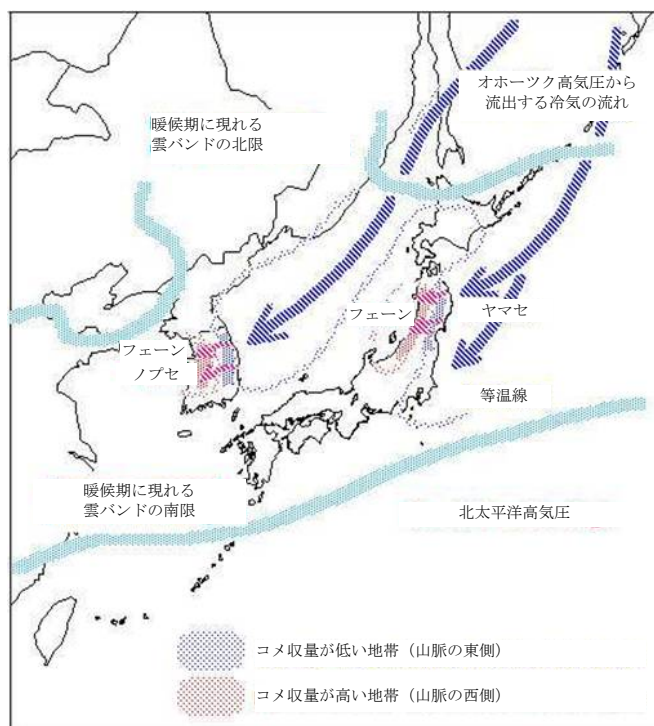
コラム：水稻冷害の可能性

IPCC（2007）によると、最近 100 年で 0.74℃ 気温が上昇した。特にこの 30 年間の昇温傾向が顕著で、今後 100 年間でさらに 1.1～6.4℃ 上昇することが予測されている。地球温暖化は平均気温の上昇として捉えられているが、日平均気温が漸次上昇するわけではなく、一定の地域に高温をもたらす気象システムの発現頻度が卓越するようになると考えるのが一般的である。

農業、中でも水稻栽培は年々の夏の気象が重要であり、季節予報などの確度に限界がある中で、毎年リスクを抱えて営まれている。長期間の日本の水稻収量と年平均気温の時系列変化をみると収量、気温とも上昇傾向を示している（林，2005）。この関係は気温上昇が収量増加の要因であるかのように思える。しかし、それは見かけ上の相関関係にすぎない。

地球温暖化が進行すると冷害はなくなるだろうか。過去の冷害年について整理すると、最近でも、1993 年や 2003 年に冷害が発生した。年々の平均気温の振幅は温暖化による気温上昇の幅を超えるため、冷害は今後も発生すると考えられる。

これまでの東北地方で大規模な冷害が発現し、その要因はヤマセであることが知られている。林ほか（1999）、Hayashi（2000）及び Hayashi et al.（2000）によると、東北地方でヤマセが起こる気圧配置のもとでは同時に韓半島の日本海側でも同様の寒冷な北東気流が襲来し、両地域で同時に水稻冷害が発生することが示されている（図 2-13）。こうした気象システムの発現が温暖化の過程でどのように変化するかが北東アジアの水稻栽培に重要な問題である。



要許諾！

図 2-13 日本と韓半島における寒冷気流の同時流入（Hayashi, 2000 ; Hayashi et al., 2000）

(2) 畜産業

1) 畜肉

ブロイラーの産肉量については、環境制御室での実験結果から気温との関係が求められている。それによると、特に九州、四国、中国、近畿などの西日本において産肉量が大幅に減少すると予測された。2060 年代には東北地方でも産肉量の低下する地域が拡大すると予測されている（山崎ら、2006）。

肥育豚については、環境制御室による温度と飼育成績との関係が求められている。それによると、温暖化が進むにつれて日増体量の低下する地域が広がり、2060 年代では北海道の一部及び標高の高い山間部を除く大半の地域で日増体量の低下が予測され、特に関東以西では 15～30%の低下が予測されている（高田ら、2008）。

肉用牛については、気温が 33℃以上で飼料摂取量及び増体日量の低下が顕著になる（農林水産省農林水産技術会議、2008）。

2) 乳製品（飼料作物）

牧草の生産量については、100 年後に年平均気温が約 4℃上昇とした場合、寒地型牧草の適

地が縮小、暖地型牧草の適地が拡大することにより、日本全体の牧草の生産量は約 1.5 倍増加すると予測されている。しかし、暖地型牧草の栄養価は低く、そのほか飼料作物も品質が低下することが懸念されている（農林水産省 農林水産技術会議，2008）。

(3) 水産業

1) 回遊魚

生息域の減少が懸念されている魚種がある。サケ類では日本周辺での生息域が減少し、オホーツク海でも 2050 年頃には適水温海域が無くなるのではないかと懸念されている（帰山・工藤，2007）。スケトウダラでは日本海での資源の減少が懸念されるが、太平洋側では東北海域までの分布は制限されるものの、資源は現状維持と予測されている（桜井ら，2007）。

生息域の拡大が予測されている魚種もある。ニシンについては生息域が北に拡大すると予測されている。水温と餌状況を考慮すると高緯度側では水温上昇による大型化、中緯度側では餌不足のため小型化することが予測されている（伊藤，2007a）。カツオでは太平洋の熱帯・亜熱帯域での生息域が拡大すると予測されている（Loukos, et al., 2003）。

回遊経路の変化に伴ない漁場が変化すると予測されている魚種もある。スルメイカは広範囲を回遊する魚種であるとともに短命な魚種の代表である。水温上昇に伴い産卵場は現在とほぼ同様であるが、産卵盛期が秋～冬から冬～春にシフトし、索餌²回遊も現在より北上しオホーツク海にまで至ると予測され（桜井ら，2007）、それに伴い漁場も変化することが予想される。サンマも広範囲を回遊する魚種であり、回遊中に様々な環境変化を受ける。モデル計算の結果からは索餌期の餌料環境（プランク

トンの増殖）の悪化から成長が鈍化するが、産卵期の餌料環境の好転により産卵量が増加すると予測されている（伊藤，2007a）。

2) 沿岸性魚介藻類

ヒラメでは、西日本沿岸では夏季に生息上限水温を越えることが予測され、長期的には西日本沿岸での漁場が縮小すると予測されている（桑原ら，2006）。

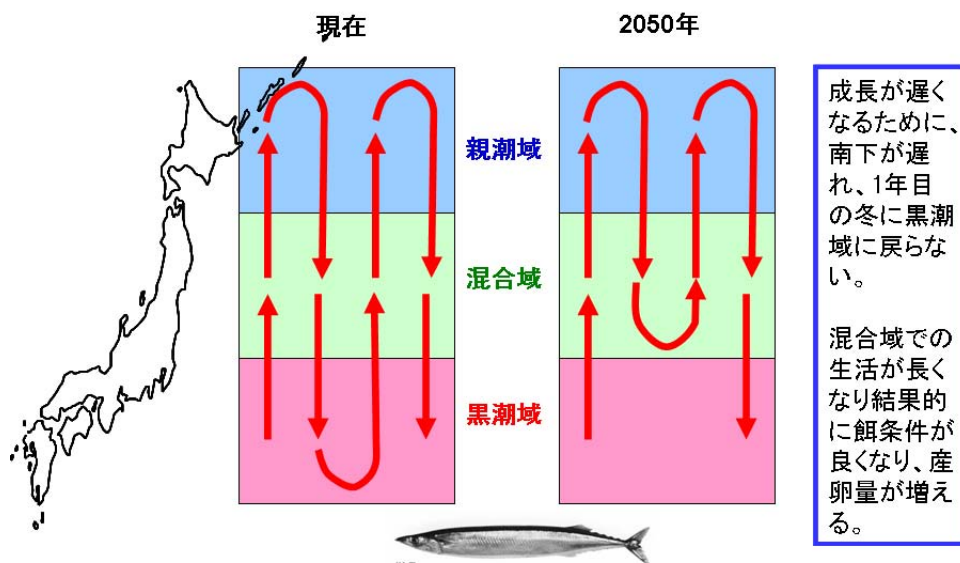


図 2-14 数値モデルで計算したサンマの回遊経路（伊藤，2007a, b より作成）

沿岸性魚介類のゆりかごとと言われている藻場への影響も懸念されている。内湾等濁りの多い水域では、高水温化が進むと特に低光量下で生産力が低下し、分布水深下限の後退により分布域が縮小し、現存量が低下することが懸念されている（寺脇ら，2007）。また、藻場の衰退、藻場構成種の変化によるアワビ、サザエ、ウニ等の磯根生物への影響も懸念される。

沿岸性魚介類の資源維持・増殖のために、現在国内では多様な魚介類を放流しているが、既存の放流技術（放流サイズ、時期、場所等の選択）では適正な効果が得られなくなる可能性がある。

² 餌を探し求めること。

3) 養殖

養殖の適地が移動することが予測される。トラフグでは養殖適地が北上し、北陸、東北地方でも養殖が可能となることが予測される（桑原ら，2006）。

また、養殖魚の感染症増加が懸念される。昨年夏、エドワジエラ・イクタルリ (*Edwardsiella ictaluri*) によるアユの感染症が我が国では始めて数河川で確認されたが（農林水産省プレスリリース、2008年2月15日）、この細菌による感染症は夏季の高水温期に発生しやすいことから、高水温期が長期化すれば感染症が増加する可能性がある。

熱帯性有毒プランクトンの増加も懸念される。麻痺性貝毒の原因植物プランクトンであるアレキサンドリウム・タミヤバニッチ (*Alexandrium tamiyavanichii*) の大規模な増殖の可能性がある。

(4) 食料分野における将来予測される影響の総括

食料分野における将来予測される影響を、地域的な傾向を含め、表 2-3 に示す。

表 2-3 将来予測される影響

農業	
コメ	登熟不良の甚大化（東北以南） 最適出穂期の変化（北海道と東北の一部で早まり、関東以西で遅くなる） 病虫害の北上、新たな発生（全国） 冷害発生頻度の減少、ただし「春昇温し夏昇温しない」条件では冷害発生頻度は高まる（北日本）
コメ以外の穀類	麦では粒重減少による減収の顕在化と赤かび病や穂発芽の増加（登熟期の高温、主に西日本） 大豆では花数、結莢率の低下により減収の可能性（開花期の高温、関東以南）
ウンシュウミカン	適地移動（2060 年代（約 3℃気温上昇）には、西南暖地の沿岸域（適地温度域：年平均気温 15～18℃）から、南東北の沿岸域までが適地となる）
リンゴ	適地移動（2060 年代（約 3℃気温上昇）には、道北、道東および西南暖地の平野部を除く広い地域（適地温度域：年平均気温 7～13℃）から、北海道全域が適地となるが、関東以南は適地でなくなる）
ハウレンソウ	気温が 3℃上昇すると生長量が 12～18%低下する（全国）
畜産業	
肉用鶏	産肉量の大幅な減少（西日本） 2060 年代には産肉量の低下する地域が拡大（東北地方にまで及ぶ）
肥育豚	2060 年代では豚の日増体量の低下が顕著（北海道の一部及び標高の高い山間部を除く大半の地域） 15～30%の体重低下（関東以西）
水産業	
回遊魚	サケの生息域の減少（北海道） スケトウダラの日本海側での生息域の減少（日本海北部） ニシン生息域の北上、餌環境により、高緯度では大型化、中緯度では小型化（東北・北海道） サンマの成長が僅かに鈍化、しかし当歳魚 ³ の産卵量は増加（東日本太平洋側） カツオの生息域の拡大（太平洋） スルメイカの生息域の拡大（日本海）
沿岸性魚介藻類	漁場の移動、縮小 藻場の衰退、藻場構成種の変化等による磯根生物への影響
養殖	養殖適地の北上 熱帯性有毒プランクトン増加の可能性（西日本）

³ その年に生まれた（1 歳未満）の魚。

コラム：食料安全保障

農産物貿易の自由化が進行し世界の農産物貿易が拡大している。こうした状況のもとで、地球温暖化による栽培環境の変化や頻発する傾向にある異常気象が輸出国の生産量を著しく減少させるような事態になれば、必要とする食料を確保できる強固な仕組みが無い日本では、食料の安定的供給が脅かされることが考えられる。実際に、世界の全灌漑農業の70%を占めるアジアで、資源の枯渇が深刻である。中でも広大な穀倉地帯を有する中国とインドの状況は危機的である。中国では、穀物生産量の約40%を占める北部平原での水不足が顕著である。インドではさらに深刻で、全土で帯水層の水位が毎年2～3mも低下している。灌漑農業が減ると、インドの穀物収穫量は25%減少する可能性が指摘されている。

近年、アジア・モンスーンの異常やエル・ニーニョ現象等の異常気象により周期的に農業生産の豊凶が繰り返され、このため農産物価格が変動している。図2-15に世界の農産物価格の動向を示す。これによると、価格は非常に大きな変動幅をもって変化しており、干ばつや洪水による被害が影響することがわかる。基本的には日本における食料危機は、国際紛争などによるリスクではなく、こうした自然環境変動によるリスクとして捉えられている。

自然現象以外に農産物価格を押し上げる要因として、最近では燃料の生産が大きく関係している。主にヨーロッパでバイオディーゼルが生産される一方、ブラジルや米国でバイオエタノールが生産されているが、サトウキビ、トウモロコシ、テンサイを原材料とする後者の生産が穀物市場価格の高騰に及ぼす影響が大きい。それでも農産物価格の内外較差が大きい段階では輸入は有効であるが、世界の農産物市場は残余の市場という性格をもっているため、国内市場と異なり不安定である。また、農産物貿易では少数の国が主要農産物の輸出に関して大きなシェアを持つ寡占状態にある。寡占度が強まれば農産物の国際市場における特定国の影響が強まる。輸入は、食料安全保障政策の手段としては、備蓄や国内生産と比較して信頼性が劣ると考えられる。

食料備蓄に関する具体的な考えとして、(1) 輸入先国の大幅な生産減少といった量的な不安定要因に加えて、安全などの面による不安定要因が増していること、(2) 不測の事態が生じた際には、国内向けに振り向けることができる輸出やバイオ燃料用原料向けの生産の取り組みが進められていること、(3) 不測の事態も視野に入れた国内生産力の確保の観点から、農地などに加えて種子や肥料などの生産資材を確保していくことなども重要な課題と踏まえ、備蓄の品目や水準について対策を考える必要がある。

食料安全保障に関する今後の研究の視点として以下が考えられる。最も基盤的なエネルギーに関しては、日本のエネルギー自給率は極端に低いので、食料安全保障のための安定的な確保が不可欠である。緊急時に、最低限必要な農業生産量と食料供給を行うのに必要なエネルギーの確保に関する研究が必要である。次に、食料備蓄には金利、保管費用、保険料を含む流通諸経費などのコストがかかると同時に、保管中に食料の品質が低下した場合には資本ロスが生じる。このため、食料備蓄量の適正水準と備蓄に必要な経費のバランスは重要な課題である。さらに、農産物貿易では少数の国が主要農産物の輸出に関して大きなシェアを持つ寡占状態にある。Andersen et al. (1997)によると、WTO体制の下で農産物貿易の寡占化は今後一層強まることが予想される。寡占度が強まれば農産物の国際市場における特定国の影響が強まる。こうした状況をふまえ、農産物輸入の安定化のための研究が必要である。

前段において、基本的には日本における食料危機は自然環境変動に対するリスクであると述べた。しかし特に最近ではもう一つの懸念材料が影響を及ぼし始めた。すなわち、金融のグローバリゼーションが膨張することにより、投機的な資金が食料分野へ流れ込む現象である。バイオ燃料の原料生産地の争奪だけでなく、食品そのものの買占めが顕在化しつつある。こうした争乱が、地球温暖化の対策を呑み込んでしまわないよう、充分監視することが求められる。

- 小麦、とうもろこし、大豆の国際価格は、在庫率の低下や穀物全体の需要増等の影響により、2006年秋頃から上昇基調で推移している。現在も高水準にあり、当面、この水準が続くものと見込まれている。
- その背景には、① 中国やインド等の人口超大国の経済発展による食料需要の増大、② 世界的なバイオ燃料の原料としての穀物等の需要増大、③ 地球規模の気候変動の影響 といった中長期的に継続する構造的な要因があるものと考えられる。このため、世界は穀物の争奪戦のような状態となっている。
- また、穀物市場への投機資金の流入が、最近の価格急騰の一因になっているとの見方もある。

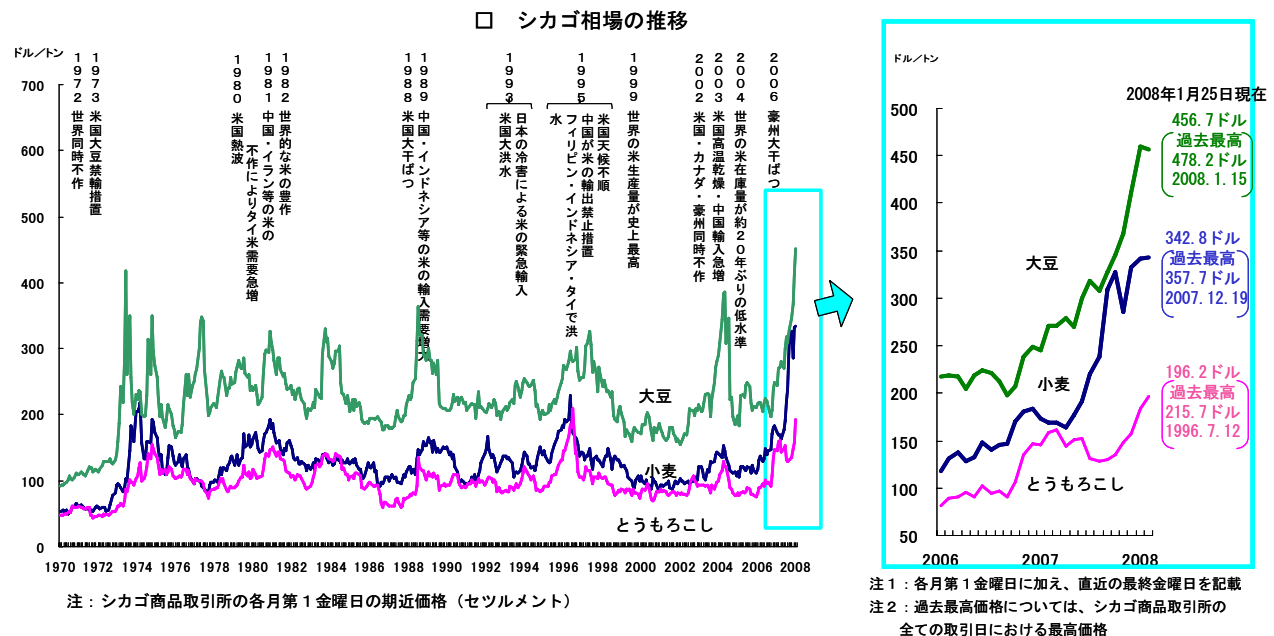


図 2-15 世界の農産物価格の動向（資料提供：農林水産省）

2.4 脆弱性の評価

食料分野における脆弱性の評価手法について、最新の科学的知見をもとに以下に整理する。

なお、IPCC の第 4 次評価報告書では、脆弱性を以下のように説明している。

「脆弱性とは、気候変動性や極端な現象を含む気候変動の悪影響によるシステムの影響の受けやすさ、または対処できない度合いのこと。脆弱性はシステムが曝される気候変化及び変動の特徴・大きさ・速度と、システムの感度、適応能力の関数である。」

(1) 脆弱性の評価手法の例

日本の食料分野の脆弱性評価が他の分野と異なるのは、カロリーベースでみた食料自給率が 40% に満たない点にある。したがって、温暖化による環境変化の影響予測の立場だけでなく、食料自給率を高めることが脆弱性を緩和することにつながるという考えに立ち、総合的に食料分野の脆弱性を評価することによって実効性のある対策が導かれると考えられる。こうした考え方は、既存の政策を実施する際に温暖化対策として効果的な処置に重点を置いて実行するという考え方であり、非常に重要と考えられる。こうした温暖化対策の方策の様式を主流化（メインストリーミング）と呼んでいる（第一部参照）。

1) 農業

既に影響が顕在化して適応策がとられているような事象は、おのずと脆弱性が高いことを意味していると思われる。なお、脆弱性の評価を行うことは、まだ顕在化しておらず将来影響が出ることが予測される現象を洗い出すことにつながり、それに対する適応策を準備できるという意味で大きな意義を持つだろう。

なお、気温上昇と二酸化炭素濃度上昇が同時に効果をもたらす場合、より低い気温条件で不稔が発生することが指摘されている。このような複合効果について解明することが重要である。

① コメ（水稻）

生育前半よりも後半、すなわち出穂、開花、登熟の時期に高温に弱い。特に玄米外観品質が登熟期の高温による影響を受けやすい。これら出穂、開花、登熟は、高温のみならず様々な環境ストレスに対して脆弱で、中でもこの時期の台風の影響は甚大となる。具体的には、倒伏による生育抑制、風による物理的損傷や水ストレスによる収量・品質の低下（坪井，1961）である。

ポット試験結果では、開花期に 36～39℃以上の高温が発生すると受精率が急激に低下し（Matsui, 2001）、粒重低下によるダメージを凌駕する影響力で収量低下をもたらす。なお、圃場における気温と受精率との関係については、長谷川ら（2008）が、開花期前後の 5 日間における 34℃以上の積算気温（℃・日）と不稔率の間に密接な関係を見出した。

このような生育時期別の脆弱性の評価については、TGC（傾斜温度温室）実験（Horie et al., 1995）や FACE（開放系大気 CO₂ 増加）実験（小林，2001）を用いて、高温化や二酸化炭素濃度増加がどの生育ステージにどのような影響をもたらすのかが明らかになってきている（コラム参照）。これは脆弱性の評価手法として有効なツールと言える。

コラム：TGC（傾斜温度温室） と FACE（開放系大気 CO₂ 増加）

TGC は Temperate gradient chamber の略で、戸外に設置された約 3m 程度、延長 30m 程度のビニールハウスの片方を解放し、片方は閉じてファンで排気する装置である（図 2-16）。ハウスの入口付近では屋外の気温と変わらず排気側に近くなるほど気温が高くなるため、植物に及ぼす高温の影響を複数の温度レベルで解析できる。夏の晴天時には 5～6℃の温度勾配が可能である。人工気象室より建設・運転費ははるかに安く、圃場内の群落を対象とした試験にも使える。



排気側のファン

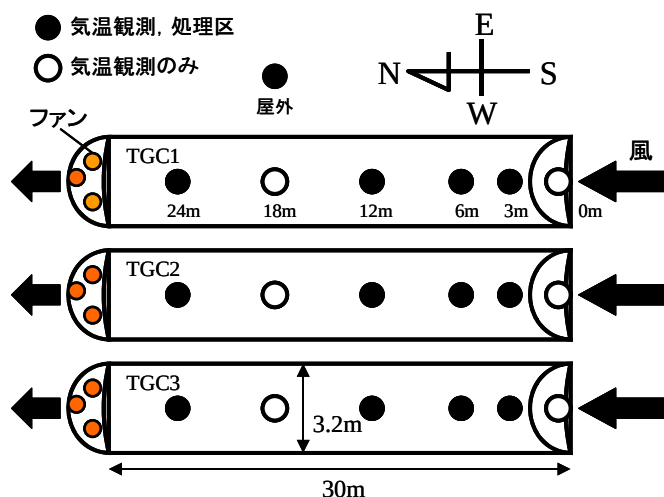


図 2-16 TGC の仕組み

（写真・図表提供：九州沖縄農業研究センター 丸山篤志氏）

FACE は Free Air CO₂ Enrichment の略で、図 2-17 のようなリング状のチューブから圃場の空気中に CO₂ を放出し群落の CO₂ 濃度を高める実験手法である。人工気象室実験とは異なり、囲いのない条件で圃場で生育する植物に及ぼす大気 CO₂ 濃度の上昇を解析することができる。1987 年にアメリカのワタ畑で世界最初の FACE 装置が設置された。日本では岩手県雫石町の農家水田に設置され 1998 年から実験が行われている（小林, 2001 ; 長谷川, 2008）。



要通知！

図 2-17 日本における水稻 FACE 実験

② コメ以外の穀類

麦では、生育ステージの早進化が起こりやすい。これにより凍霜害が発生しやすくなる。また、病害が発生しやすい。

大豆では、花芽分化期～開花期は、高温をはじめ水ストレスなど各種環境ストレスに対して脆弱である。また、特に水ストレスに弱い作物のため、温暖化で干ばつになる地域では影響を受けやすい。

③ 果樹

果樹は、気候に対する適応範囲が狭く、また生育には長期間を要するために、果樹生産は特に脆弱である。(農林水産省 農林水産技術会議, 2007b)

④ 茶・野菜

南九州以南の暖地島嶼地域では、緑茶の栽培が近年増加しているが、さらに温暖化すれば、従来の技術では対応が困難になると考えられる。一方、低温のため現在、茶栽培が行われていない場所では、茶栽培可能地域が拡大する。しかし、茶生産は他の作物と共通でない栽培技術や機械を要求し、製造技術や工場も必要なため、新たな茶産地が出現する可能性は大きくないと思われる。

なお、野菜については、脆弱性評価の事例は確認されていない。

2) 畜産業

畜産分野では、脆弱性評価の事例は確認されていない。

3) 水産業

① 回遊魚

回遊魚は適地を求めて移動することができ、また環境への順応能力もあると考えられるが、温暖化が回遊魚の適応能力を上回る速度で進行した場合は、その影響は大きい。

② 養殖

餌の改善、魚病の予防、飼育施設の改善等で技術的には対応可能となっても、養殖経営体の規模が小さく、十分な設備投資ができない恐れがある。また、養殖魚の餌の主体は魚粉であり、漁獲量全体が減少すれば魚粉に回る量も減少し、餌不足になる恐れもある。回遊魚を中心とした沖合域での漁獲量の減少を養殖魚の生産で補うことには限界がある。

(2) 脆弱性評価における課題

脆弱性評価のための手法・ツール等に関する現状の課題について、以下に整理する。

1) 農業

従来の地球温暖化の影響解明に関する研究では、主として単一の気象要素の変動が及ぼす影響について解析が行われている。しかし、実際の農業生態系は、多様な環境条件に応答している。例えば水稻栽培に関してみると、高温条件と寡照条件が重なると負の影響が拡大することが明らかになっている。また、高温条件と高二酸化炭素条件が重なると稔実率が低下し始める限界気温が低温側へ移動することが示されている。これらの複合影響について研究を進める必要がある。

また、水稻の生育ステージごとに被害を及ぼす水稻害虫の影響評価を加える場合に、温暖化による害虫生育相の変化と水稻ステージの変化が調和して起こるか否が重要なポイントになる。雑草についても同様のことが考えられ、いくら繁茂しても水稻栽培期間と繁茂する期間が一致しなければ負の影響の要因にはならない。こうした、生態系内の多様な関連を考慮した研究が必要である。

逆の視点からみると、脆弱性評価として西南暖地で栽培期間を遅くする栽培法が評価の対象となっているが、栽培期間の移動が水田生態系にどのように影響するかの解明はほとんど進んでいない。すなわち、栽培期間の移動は人為的な行為であるため、一歩進めて、脆弱性評価の基準を現存の生

態系との調和にまで拡張して考察することが問題解決に有効なはずである。この問題はトレードオフの問題といえる。食料生産を維持しつつ生態系を保全する行為が、どの水準を境にして不可避的であるのか、といった問題が残されている。

また、これまでの研究では、単位面積あたりの収量への影響及び脆弱性評価が多いが、食料供給の視点からは、生産量の脆弱性を評価する必要がある、そのためには栽培面積あるいは収穫面積を評価する必要がある。栽培面積は、前期の作況、市場価格などによって決まるため、そのような経済的側面も含めた脆弱性評価が必要である。

農家は、常に考えうる技術を導入して栽培に取り組んでいる。生産性を向上させるため、過去の気温上昇に対しても最大可能な対策を施してきているのが農業である。したがって、将来の温暖化に対する豊富な実学的ノウハウを身につけているといえよう。こうしたノウハウを集積することも極めて重要である。

一方で、農家の現状を鑑みると、夏作物における農作業の多くは夏季の暑い時期に戸外で行うため、高温化は長時間あるいは精度の高い農作業を困難にし、農家の減少や高齢化がこれに拍車をかけると考えられる。しかし、これらの関係解析は十分に検証されていない。今後、労働科学的な手法も必要となるだろう。

2) 畜産業

気候変化と家畜の生理的応答についての影響評価結果をふまえて、畜舎環境の改善による影響緩和効果を経済的視点あるいは LCA の視点から捉え、脆弱性を評価する必要がある。

3) 水産業

日本全体として考えるか、それぞれ特産品のある地域として考えるかで評価が異なってくる。例えば、養殖、栽培・放流で適地が移動した場合、新たに適地になるところではプラスの影響、適地でなくなるところはマイナスの影響となるが、南北に長い日本全体として考えると現状維持となることも予想される。

2.5 適応策

(1) 適応策メニューとその体系

適応策の具体的なメニュー及びその体系を表 2-4 に示す。

表 2-4 適応策メニューとその体系

農業		
農業全般	普及指導員からの情報収集と整理、普及指導員への指導	
コメ	高温回避	移植時期の移動（主に遅植え）：移植を遅らせることにより出穂期を遅らせ、登熟期の高温を避けることができる（なお、遅植えはイネの体内窒素含有率の上昇を介して背白粒の発生を抑制すること、すなわち高温耐性を高める可能性があることも指摘された）。
		直播：直播を行うと一般的に出穂期が後進するため、遅植えと同様に高温回避効果が期待される。
		晩生品種の利用：晩生品種の利用で出穂期が遅くなり高温回避効果が期待される。
		登熟期のかけ流し灌漑：特に夜間のかけ流し灌漑は、イネの温度を下げる効果があることが示されている。
		作付け場所の選定：構造物の近くの栽培を避けたり、山の東側に作付する（朝日は浴びるが夕日は浴びない）ことは、高温（後者は特に高夜温）を回避する効果があると考えられる。
	高温耐性の向上	耐性品種の開発・導入
		栽植密度の最適化：栽植密度が高過ぎると白未熟粒のうち背白粒が、低過ぎると乳白粒がそれぞれ増えることが指摘されている。
		施肥法の最適化：高温条件では、穂肥の特に 1 回目（出穂前 20 日頃）が多いと籾数が増えて乳白粒が、穂肥の特に 2 回目（出穂前 10 日頃）が少ないと背白粒がそれぞれ増えることが指摘されている。
		地力の増強：作土深が深く堆肥投入が多い圃場で、玄米品質が高い事例が報告されている。
		適切な水管理：土壌の還元程度が著しい場合は特に、生育中期の中干しで根が健全化する。生育初～中期の深水管理による籾数制限と茎内炭水化物の増加も白未熟粒の発生抑制に効果的である。また、落水時期の延長で登熟向上が期待される。
		適期収穫（刈り遅れを避ける）
		適切な乾燥調製（過乾燥を避ける）
	経済的被害の軽減	共済システムの活用：収穫前の早期に被害を予測するとともに、被害発生状況の情報提供を迅速化し、被害申請に活かす。
	適応策の円滑な実施	作期変更や落水時期の延長に伴う水利慣行の見直し
		高齢農家に対する適応策の支援・指導の仕組み作り
		普及指導員・営農指導員への情報提供・人材育成：開発された適応策を迅速に現場の技術指導へ反映させるとともに、適応策実施の指導者を育成する。
コメ以外の穀類	麦の凍霜害回避	耐性品種の開発・導入：暖冬でも幼穂形成期が早くなりにくい品種や低温耐性品種の開発・導入。

	麦の赤かび病回避	耐性品種の開発・導入：最近、感染に関する耐性が閉花性品種で高いことがわかった。
	麦の穂発芽回避	耐性品種の開発・導入
	大豆の青立ち回避	耐性品種の開発・導入：無限伸育型品種が青立ちしにくいことがわかってきた。
	大豆のハスモンヨトウ害回避	耐性品種の開発・導入：九州で育成中。
	大豆の干ばつ回避	暗渠を使った地下水位調節システム（FOEAS；フォアス）：現在、効果の検証と導入の検討が進められている。
果樹	高温回避	栽培地域の移動
	適地移動	栽培樹種の変更
	着色不良改善	シートマルチ栽培技術の導入：マルチの活用で日射量及び水分量を調節する。
		適正着果量の厳守
	浮皮症回避	カルシウム剤の施用：果皮細胞の老化を抑制するとともに蒸散を促進する。
茶・野菜	着色不良改善	環状はく皮処理
	高温回避	冷却技術、細霧冷房：ノズルから霧状に水を噴射することで温度を低下させる。
		循環扇、換気の徹底：ハウス内の空気を攪拌して高温空気の滞留を防止する。
		遮光資材の利用：光の透過を押さえるフィルムで昇温を抑制する。
畜産業		
畜肉	高温回避	畜舎の環境制御
		循環扇、換気の徹底：ハウス内の空気を攪拌して高温空気の滞留を防止する。
乳製品（飼料作物）	高温回避	飼料作物栽培地域の移動
		畜舎の環境制御
	適地移動	飼料作物の品種改良
水産業		
回遊魚	生態系変化への適合	予測される回遊経路、漁場形成の変化に合わせた、漁期・禁漁期の設定等
沿岸性魚介藻類		海水温、放流海域の餌環境に合わせた、放流時期、放流サイズ、放流場所の変更
		磯根生物の生息海域である沿岸域の健全な藻場の維持管理
		適地移動
養殖	高水温回避	高温馴致、餌料の改良、飼育施設、飼育密度、飼育水深の調整等の飼育技術の開発
	適地移動	養殖適地の移動
		南方系魚介類等の新種の導入

(2) 適応策の選択・実施にあたっての考え方

適応策の選択・実施にあたっての考え方を以下に整理する。

1) 農業

適応策の優先度を考える際の視点としては、省力性（簡便性）、コスト、効果が重要である。技術の性格として、予防的か対症療法的かという視点も適応策を選択・実施する上で重要となる（図 2-18、森田，2008b）。予防的な適応策としては、作付前に決定する品種選択や移植時期、堆肥投入による地力向上などが考えられ、高温年か否かにかかわらず実施することになる。対症療法的な技術としては、穂肥の量・時期や水管理の方法を高温の発生に応じて決めることが挙げられる。これらの技術の効果は、高温予測（天気予報）の時期（3ヶ月前、3週間前、1週間前、前日など）や精度にも大きく影響を受けるだろう。

温暖化への影響のしかた（助長方向か抑制方向か）も適応策選択の重要な視点である。例えば、農家で慣行的に行われる出穂前 1 ヶ月頃の落水（中干し）とそれに続く約 1 ヶ月半の間断灌漑（3 日間水を張り、2 日間水を落とすサイクルを繰り返す）は、常時湛水に比べて、土壌中のメタン産生菌の活動低下を介してメタン発生を大幅に抑制する（Yan et al., 2005）。このような水管理は根の活性維持などを介した高温耐性強化技術の一つにもなると考えられるため、温暖化への適応と抑制を兼ね備えた技術と言える。

また、果樹では、生育期間が長いことから長期を見据えた適応策が必要である。

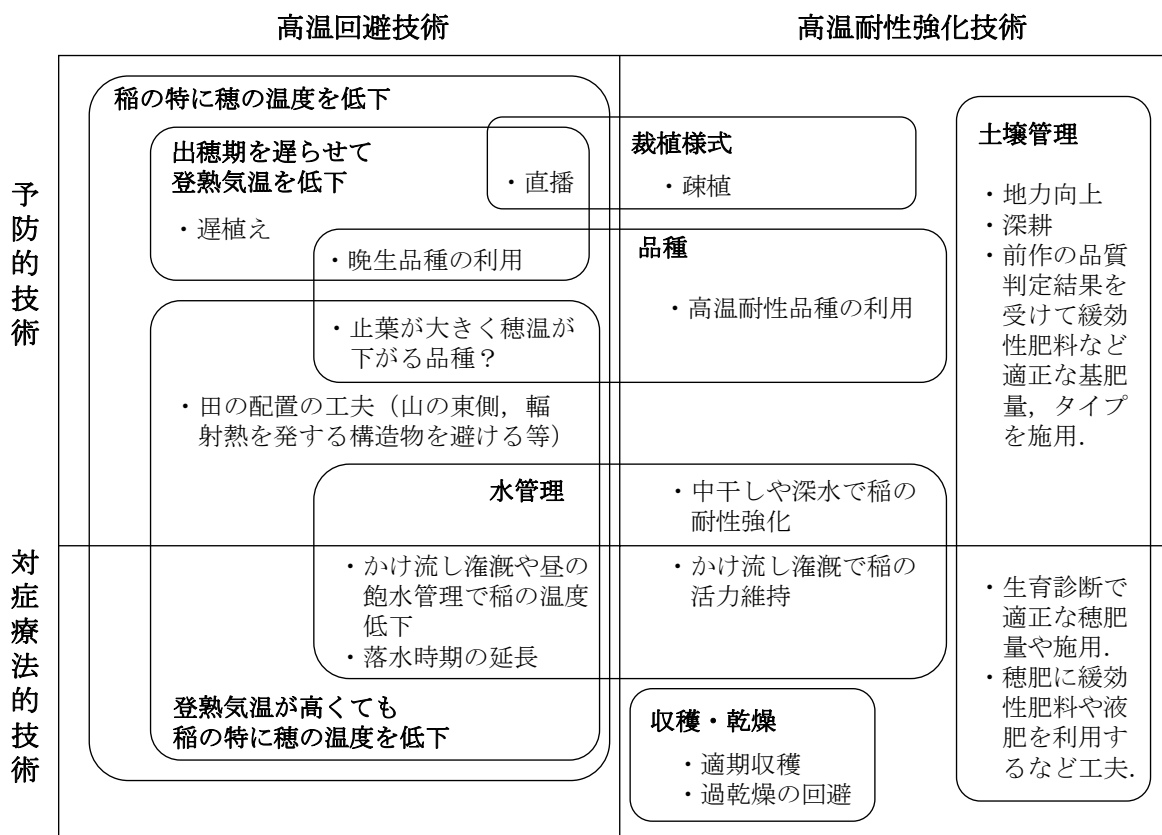


図 2-18 高温登熟障害を克服する技術の性格による分類

2) 畜産業

畜産業は、畜舎の改良が必要となることから、コスト及び作業効率に留意した適応策を策定する必要がある。

3) 水産業

今まで生息していなかった新しい場所に魚介藻類を放流する場合は、人工的に外来種を導入することになり、生態系の攪乱をどのように捉えるか合意が必要である。

養殖における飼育技術に関して、新しい技術は往々にしてエネルギー消費増大（二酸化炭素の排出）となることがあり、注意が必要である。

(3) 適応策を実施する上でのバリア

適応策を実施する上でのバリアを以下に整理する。

1) 農業

落水時期を延長したり作期を移動することは適応策として有効であるが、水利慣行による制約のため実施できない場合がある。

農家の減少、高齢化により、手のかかる適応策が実施しにくいという状況もバリアとして考えられる。

果樹については、樹種の変更などはリスクが大きい。

2) 畜産業

畜産業では、基本的に施設（畜舎）制御が必要になり、コストが問題となる。

3) 水産業

① 回遊魚

回遊魚の場合は、他国の経済水域内への回遊、漁場の形成もあることから、日本単独で適応策を実施しても効果が薄い。

② 沿岸性魚介藻類

栽培・放流魚に関しては放流時期、場所等の変更、新しい漁場の開発等により対応可能で、日本全体としての漁獲量は維持できる可能性がある。しかしながら、栽培・放流は地域の食文化に根ざした地場産業として発展してきた経緯があり、新たな放流場所、漁場が得られたとしても、新しい漁場周辺で地場産業として発展するかどうかは不透明である。

沿岸性魚介類、養殖魚介類は地産地消の傾向があり、漁場の移動、養殖適地の移動が生じた場合、生産地域で対象魚介類を食する習慣が無い場合、消費地へ輸送する必要があるが生じ、コスト、鮮度の問題が生じる。

③ 養殖

脆弱性の評価の部分でも述べたように、餌の改善、餌の供給、魚病の予防、飼育施設の改善等で技術的には対応可能となっても、養殖経営体の規模が小さく、十分な設備投資ができない恐れがある。

また、市場での商品価格は需要と供給のバランスで決まり、豊作貧乏、大漁貧乏という言葉も

あるように、市場に商品があふれると値崩れを起こす。このようなことから、魚介藻類の養殖技術が進歩してもすぐに広く普及するかどうかは不透明である。

4) 適応策を講じることが難しい影響の例

温暖化に伴って規模の大きな台風の発生頻度が増大することが指摘されている。温暖化が水稻栽培に及ぼす影響への適応策を考えると、特に西南暖地一帯の場合には収穫時期に台風が上陸することに対する問題がある。実際に、1991年には2つの勢力の強い台風が九州地方に上陸して大きな農業被害をもたらした。被害の規模は温暖化による減収の規模に匹敵すると考えられる。こうしたことから、対策を講じるためには確度の高い台風進路予測が不可欠だが、現状では対策に結びつく技術として確立されていない状況にある。

地球規模の気温上昇は、様々な種類の気象の擾乱が重ね合わさった結果として現れる。一方、食料生産の環境は年々の気象や海象によって支配されている。したがって、確実な長期予測が確立されない限り、対策として完全なものはあり得ない。例えば、耐暑性に優れた品種の開発が温暖化対策として有効と考えられているが、開発した新品種を広い地域で一律に栽培した場合、ひとたび冷夏に見舞われると、この対策がかえって壊滅的な被害を誘導することが予想される。この例からわかるように、温暖化と異常気象の両方に同時に対策の対象として取り上げることが、現時点では難しい。

また、水産業では、特に北方系魚介藻類の分布域の減少に関して、人工的にコントロールすることができず、適応策を講じることが難しい。

(4) 適応策として参考にできる既存の事例・政策

食料分野における適応策として参考にできる既存の事例を以下に整理する。既に実施されている事例に加え、研究的要素の強い事例、試行段階・計画段階の事例等も含む。

1) 高温耐性品種「にこまる」の開発・普及

実施機関：(独) 農研機構九州沖縄農業研究センター

実施時期：1996年交配、2005年命名登録、同年長崎県で奨励品種、2008年大分県で認定品種採用

概要・特徴：西日本で普及している「ヒノヒカリ」と出穂期がほぼ同じ～2日程度遅く、食味も「ヒノヒカリ」並みに良い。登熟期が高温条件となっても「ヒノヒカリ」より登熟が良好で収量・品質が高い(図2-19)という特徴を持つ、いわゆる高温耐性品種(坂井ら, 2007)。九州北部を中心に作付けが伸び始めている(2008年に長崎県で約1,000haの見込み)。

今後の課題：「にこまる」の高温耐性の限界を明確にする必要がある。今後、さらに高度の高温耐性を持ち、耐病虫性にも優れた高温耐性品種の育成を進める必要がある。



図 2-19 同一出穂期の「にこまる」と「ヒノヒカリ」の品質比較

(写真提供：長崎県農林総合試験場，2005)

※数字は、左から 100 粒中の整粒、白未熟粒、その他の数。「にこまる」は整粒が多い。

2) 胴割れ抑制技術

実施機関：(独) 農研機構東北農業研究センター（一部は富山県農業技術センター）

実施時期：1997 年から 2007 年に研究を実施（富山県では 2000 年から実施）

概要・特徴：東北農業研究センターでは、登熟初期（出穂後 10 日間程度）の特に昼の高温が胴割れ粒の発生を助長することを明らかにし、この期間に昼夜のかけ流し灌漑を行うと胴割れ粒の発生が抑制されることを明らかにした（図 2-20；長田，2006）。富山県農業技術センターでは葉色や気象条件と胴割れ発生程度の間認められた負の相関関係に基づいて胴割れ発生予測法の開発を行った（高橋ら，2002）。現在、これらの技術普及に向けて情報発信中である。

今後の課題：技術の定着・拡大。

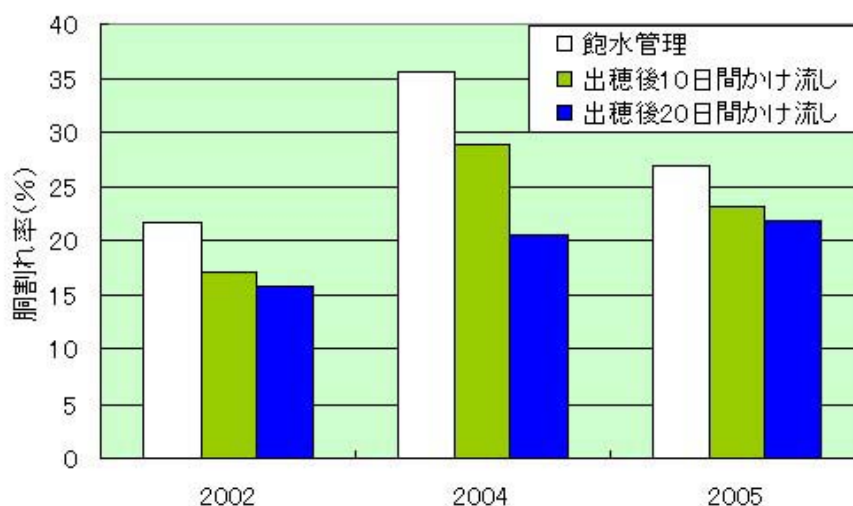


図 2-20 登熟初期の水管理条件が胴割れ発生程度に及ぼす影響

(品種：あきたこまち。飽水管理：地表面が湿潤でほ場の足跡に水がたまる状態に管理)

(図提供：近畿中国四国農業研究センター長田健二氏)

3) 富山県の遅植え、栽植密度・施肥法の適正化による品質向上

実施機関：富山県農業技術センター

実施時期：2000年から2005年に研究を実施、2005年に普及技術として県内外に発信。

概要・特徴：①移植期を従来の5月3日頃から5月10～15日頃に遅くして登熟気温を下げる、②栽植密度を従来よりもやや疎植の60～70株／坪程度にするとともに穂肥の調整で㎡あたりの粒数を28,000粒程度に制御する、③穂肥の調整で穂揃い期の葉色値（SPAD値）35程度に制御することがいずれも品質向上に効果的であることを明らかにし、普及技術として県内に発信した（高橋，2004）。その結果、最近の高温年でも一等米比率を80%以上に維持することに成功している。

今後の課題：技術の定着と拡大。県外での適用性の確認と技術の修正。

(5) 適応策の評価手法に関する研究動向

食料分野における適応策のコスト、効果（被害軽減効果）、効率（費用対効果）等进行评估する手法について、その研究動向を以下に整理する。

農業では、FAPS（ファップス）⁴（南石ら，2007）という技術評価手法が開発されている。温暖化適応策についての評価はほとんどない。

畜産業では、畜舎環境の制御によるコスト、動物種の変更による費用対効果などを経済的に評価する必要性が指摘されているが、実際の研究例はまだない。現在は影響の評価手法に関する研究が主流である。

水産業では、気候の変化に伴う急潮・波浪に対する養殖施設や定置網等の脆弱性の評価が行われている。

⁴ 農業技術体系データベースに登録された作目別の技術・経営指標データを用いて営農指標や営農計画の作成を支援するシステムのこと。

2.6 今後の課題

(1) 影響

1) 農業

- ・ 農業分野では、気温上昇等の平均的な変化による影響だけでなく、干ばつ、多雨、台風等、異常気象・自然災害による影響の研究が不足しており、これを推進する必要がある。
- ・ 気候変化に伴い病害虫が大量に発生するおそれがあり、それらによる被害の研究が不足しており、これを推進する必要がある。
- ・ 各地から被害の報告がなされているが、各種条件が異なるため、広域で影響評価を行ったり、モデルによる推定を行う際には、各種条件やモデルパラメータについて検討を加えるとともに、それらの不確実性評価を行うことが必要である。
- ・ 水稻については、登熟期の高温が玄米の生長や外観品質に影響を及ぼしたり、開花期の高温が受精に影響を及ぼすことが明らかとなってきたが、高温と日射、湿度等の気象条件、二酸化炭素濃度、窒素肥料や土壌水分等の土壌条件等との交互作用についてはまだ十分に明らかとはなっていないため、高温と他の環境条件とを組み合わせた複合的な影響について研究を進める必要がある。
- ・ 大豆については、青立ち、しわ粒、裂皮粒、小粒化等、水ストレスを介した影響が観察されているが、この観点での研究をさらに進める必要がある。
- ・ 麦については、温暖化による幼穂分化の早期化が生じており、これに伴い、凍霜害、赤かび病、穂発芽、粒重低下の影響等が報告されている。このような影響が日本の各地で面的にどの程度発生するかについて、シミュレーションモデルを用いた研究が推進される必要がある。

2) 畜産業

- ・ 気温だけでなく湿度環境なども考慮した「不快指数」に基づく産肉量の影響評価に関する研究が必要である。
- ・ 畜産業では、適応策として施設改良が考えられるため、長期の農家経済のコスト・ベネフィット分析が必要である。

3) 水産業

- ・ 温暖化による海洋構造の変化と、回遊魚の回遊経路の変化との関連が十分に理解されていないため、研究を推進する必要がある。
- ・ また、上記に関連して海洋構造の変化を検知するための、海洋環境モニタリング体制の構築が必要である。
- ・ 水産生物が、水温の上昇、海洋酸性化に対してどのような感受性があるかについて明らかとする必要がある。特に、仔稚魚や卵のふ化の際の感受性が重要である。将来予測をする上でもこれらの情報は必要である。
- ・ 水産生物の環境変化への適応能力を評価する手法開発を進める必要がある。生物の遺伝的な変化には長い年月が必要と一般的には考えられるが、寿命の短い魚介藻類では世代交代が早く、比較的短期間で環境変化に適応可能となることも考えられる。

(2) 脆弱性

自然現象は極めて複雑であるが、生態系に変調が現れると、身近な影響として強く認識される。複雑な連関を説明するために、害虫や雑草を含めた農業生態系の変化を予測する研究が求められる。

例えば、日本全体（海域も含め）など広域における影響を解明する場合に、圃場レベルの影響を単純に積み上げて議論すればよいのかという問題がある。こうした異なるスケールによる影響の地域性は、多くの場合に相反する特性を持っている。例えば、リンゴとミカンの果樹栽培において、ある地域でリンゴ栽培が不可能になると同時にミカン栽培が可能になる場合等がある。このような地域特性を、広域における影響として集約するためには多様な分野を総合した評価手法の開発が必要である。

1) 農業

登熟期の高温を避けるために行われる栽培時期の移動（多くは後進）に伴うイネの生理的变化・病虫害発生の変化の評価は、この技術の対応力すなわち脆弱性の評価に貢献すると考えられ、今後の研究課題である。

適応策がスムーズに実施されるか否かには、例えば農家の減少・高齢化など社会的な要因や資材コストや農産物価格など経済的な要因が大きく影響すると考えられる。したがって、対応力としての脆弱性については、社会・経済学と自然科学の両分野が連携して研究を進める必要がある。これまでもこのような連携研究は少なからずあったが、温暖化対応での研究はほとんどなかったと考えられる。

環境変動で引き起こされる生産量の変動を確率的に評価するために、気候変化シナリオ、生産量推定手法を複数用いて、ある一定の確率で起こりうる将来の損失の最大値を指標として、適応による効果も含めたリスク評価を行う必要がある。

2) 畜産業

家畜の生理、生態の特徴を考慮した影響評価と耐性の評価を行う必要がある。

3) 水産業

気象変化（低気圧・台風、それに伴う急潮等）に対する、海上の養殖施設・定置網等の脆弱性、海面上昇に対する漁港、漁村の脆弱性の評価手法の開発が必要である。

病原生物、有害・有毒プランクトン等の新奇有害生物の侵入への養殖魚介藻類、沿岸性魚介藻類の脆弱性を評価する手法の開発が必要である。

マクロに見れば、冷水系の魚介藻類が減少し、暖水系の魚介藻類が増加することになり、なじみの薄い食料品が市場にあふれ、食文化への影響が出る。このような食文化への影響という観点からの研究も必要である。

(3) 適応

1) 農業

水稻については、高温耐性の生理的メカニズムの解明とそれに注目した育種素材や選抜方法の開発、DNA マーカーの利用、高温耐性遺伝子の特定などによる品種開発を行う必要がある。また、地力、施肥、水等の適切な土壌条件を明確化し、省力・低コストも兼ね備えた栽培技術を提示する必要がある。

また、稲作農家の減少・高齢化や米価の下落、石油価格の上昇が進んでいることから、適応策の省力性や費用対効果の評価が重要な課題となる。適応策の一つに水管理法の変更があるが、水利用の自由度の向上や農業以外の水利用との調整など、行政機能に関わる部分も今後の重要な課題となる。

麦については、凍霜害回避型、赤かび抵抗性、穂発芽耐性等の品種の開発をさらに進める必要があるとともに、これらの耐性を高める栽培技術の開発にも着手する必要がある。

大豆については、無限伸育型で青立ちしにくい品種や、高温不稔耐性の品種を開発するとともに、青立ち、しわ粒、裂皮粒、小粒化を防ぐ水管理技術について開発する必要がある。

作物共通の課題として、実施する適応策が温暖化に及ぼす影響（助長するのか、抑制するのか）を検討することが今後の課題として残されている。すなわち、炭酸ガス、メタン、一酸化二窒素の収支に注目した検討が必要である。

2) 畜産業

施設の改良方針とその LCA に基づいた評価が必要である。

3) 水産業

水産業においては、水温の維持、餌の改善等を図る養殖技術の開発、放流場所や時期を工夫した種苗放流の手法等が進むと期待されている。しかしながら、その新しい技術を生かす場である沿岸海域は温暖化による影響を受けやすいと考えられ、沿岸海域の環境保全が養殖・種苗放流技術を有効に活用するためには必要である。特に魚介藻類の生育場所として重要な、藻場や干潟の保全を図る手法について研究を進める必要がある。

また、沖合域で回遊魚を対象とする漁船漁業では、漁場形成の時期、場所が変化することにより、隣接国との漁期、漁獲量の調整が重要な課題となってくる。科学的に精度の高いデータ、解析結果を持って交渉に当たることが重要である。

引用文献

- Andersen, P.P., R. Pandya-Lough and M.W. Rosegrant, 1997: World food situation: Recent developments, emerging issues, and long-term prospects, IFPRI (<http://library.wur.nl/isric/index2.html?url=http://library.wur.nl/WebQuery/isric/14684>).
- 藤田雅也, 1997: 凍霜害回避型早生コムギに関する育種学的研究, 九州農業試験場報告, 32, 1-50.
- 長谷川利弘, 石丸努, 近藤始彦, 2008: 2007 年夏季高温条件における水稻稔実歩合の変動要因の解析, 日作紀, 77 (別 1), 368-369.
- 長谷川利弘, 2008: 大気 CO₂ 増加、温暖化で水稻の生育・収量はどうなる, 農業技術, 63 (1) 14-18.
- 林陽生, 鳥谷均, 後藤慎吉, 菅野洋光, 鄭英祥, 黄水鎮, 金海東, 1999: 予想される気候のゆらぎのもとでの日本・韓国地域的水稻生産量変動の予測, 農業気象, 55, 117-125.
- Hayashi Y. (ed.), 2000: Climate variability and its impacts on paddy rice production in Japan and South Korea. Global Agro-Environmental Research Team, NIAES, MAFF, Japan, 56.
- Hayashi, Y. and Jung, Y.S., 2000: Paddy rice production under possible temperature fluctuation in East Asia, Global Environmental Research, AIRIES, 3 (2), 129-137. (<http://cse.tea.affrc.go.jp/nmizuno/zoning/index.html>)
- 林陽生, 石郷岡康史, 横沢正幸, 鳥谷均, 後藤慎吉, 2001: 温暖化が日本の水稻栽培の潜在的特性に及ぼすインパクト, 地球環境, 6, 141-148.
- 林陽生, 2005: 地球温暖化時代の農業影響研究の視点, 農林水産技術研究ジャーナル, 農林水産技術情報協会, 28, 51-56.
- Horie, T., H. Nakagawa, J. Nakano, K. Hamotani and H. Y. Kim, 1995: Temperature gradient chamber for research on global environment change. III. A system designed for rice in Kyoto, Japan. Plant Cell Environ, 18, 1064-1069.
- IPCC, 2007: Climate change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Cambridge Univ. Press, 996.
- 石丸努, 長谷川利弘, 近藤始彦, 2008: 2007 年におけるイネの不稔発生の実態調査, 日作紀, 77 (別 1), 366-367.
- Izumi Oh-e, Kuniyuki Saitoh and Toshiro Kuroda, 2007: Effects of High Temperature on Growth, Yield and Dry-Matter Production of Rice Grown in the Paddy Field, Plant Prot.Sci. 10(4), 412-422.
- 伊藤進一, 2007a: 温暖化シナリオにおいて推定されるサンマおよびニシンの応答, 月刊海洋, 39, 303-308.
- 伊藤進一, 2007b, 地球温暖化とサンマの予測モデル, FRANEWS, 10, 16-17.
- 梶山雅秀, 工藤秀明, 2007: 温暖化を軸とするサケ属魚類バイオマス変動シナリオの試み, 月刊海洋, 39, 314-316.
- 加古敏之, 2000: 食料自給と食料安全保障, 農林業問題研究, 137, 171-176.
- 嘉田良平, 2002: 食料安全保障の新たな課題と論点, 農業および園芸, 養賢堂, 77 (1), 96-104.
- Kimura F. and Kitoh A., 2007: Downscaling by pseudo global warming method, The Final Report of ICCAP, 43-46.
- 小葉田亨, 植向直哉, 稲村達也, 加賀田恒, 2004: 子実への同化産物供給不足による高温下の乳白米発生, 日作紀, 73, 315-322.
- 小林和彦, 2001: FACE (開放系大気 CO₂ 増加) 実験, 日作紀, 70, 1-16.
- 桑原久実, 明田定満, 小林聡, 竹下彰, 山下洋, 城戸勝利, 2006: 温暖化による我が国水産生物の分布域の変化予測, 地球環境, 11, 49-57.
- Loukos H., Monfray P., Bopp L. and Lehodey P., 2003: Potential changes in skipjack tuna (*Katsuwonus pelamis*) habitat from a global warming scenario: modelling approach and preliminary results. Fish. Oceanogr., 12, 474-482.
- Matsui T., Omasa K. and Horie T., 2001: The Difference in Sterility due to High Temperatures during the Flowering Period among Japonica-Rice Varieties, PPS, 4, 90-93.
- 松島省三, 真中多喜夫, 1957: 水稻収量の成立と予察に関する作物学的研究. XXXIX. 水稻の登熟機構の研究 (5). 生育各期の気温の高低・日射の強弱並びにその複合条件が水稻の登熟に及ぼす影響. 日作紀 25:203-204.
- Masuda, R., 2007. Seasonal and interannual variation of subtidal fish assemblages in Wakasa Bay with reference to the warming trend in the sea of Japan, Environmental Biology of Fishes, DOI 10.1007/s10641-007-9300-z.
- 陽捷行, 2002: 食料安全保障に影響する世界の環境資源と環境問題. 農業および園芸, 養賢堂, 77 (1), 85-90.
- 水野直美, 2002: 茶の精密栽培地帯区分図の作成と温暖化シミュレーション, 茶業研究報告, 93, 62-69: (<http://cse.tea.affrc.go.jp/nmizuno/zoning/index.html>)
- 森田敏, 2005: 水稻の登熟期の高温によって発生する白未熟粒, 充実不足および粒重低下, 農業技術, 60, 442-446.
- Morita S., Yonemaru J. and Takanashi J., 2005: Grain growth and endosperm cell size under high night temperatures in rice (*Oryza sativa* L.), Ann. of Bot., 95, 695-701.
- 森田敏, 2008a: 2007 年を含む最近の九州産水稻の作柄・品質低下の実態と要因, 日作紀, 77 (別 1), 376-377.
- 森田敏, 2008b: イネの高温登熟障害の克服技術, 農業技術体系作物編追録, 26 (技 522 の 29 の 51 の 37), 2-10.
- Nagai S., Itakura S., Matsuyama Y. and Kotani Y., 2003: Encystment under laboratory conditions of the toxic dinoflagellate *Alexandrium tamiyavanichii* (Dinophyceae) isolated from the Seto Inland Sea, Japan, Phycologia, 42, 646-653.
- 長井敏, 2007: 熱帯性の有毒プランクトンの新たな出現と問題, 瀬戸内通信, 6, 4-5.
- 長田健二, 滝田正, 吉永悟志, 寺島一男, 福田あかり, 2004: 登熟初期の気温が米粒の胴割れ発生に及ぼす影響, 日作紀, 73, 336-342.
- 長田健二, 2006: 高温登熟と米の胴割れ, 農業および園芸, 81, 798-801.
- 中山治彦, 1969: 水稻における穂の老化現象, 第 1 報 籾の老化と脱水素酵素作用の減退, 日作紀, 38, 338-341.
- 南石晃明, 前山薫, 本田茂広: 農業技術体系データベース FAPS-DB, 2007.03 (<http://fsdb.dc.affrc.go.jp/>)

- 西尾道徳, 2002: 技術進歩と世界の食料安全保障, 農業および園芸, 養賢堂, 77 (1), 91-95.
- 農林水産省, 2006: 水稻の高温障害の克服に向けて (高温障害対策レポート)
(<http://www.kanbou.maff.go.jp/www/gichou/kouon/index.htm>).
- 農林水産省 国際食料問題研究会, 2007: 食料をめぐる国政情勢とその将来に関する分析 - 国産食料問題研究会報告書, 農林水産省, 113. (http://www.maff.go.jp/www/council/council_cont/kanbou/syokuryo_mondai/)
- 農林水産省 農林水産技術会議, 2007a: 品目別地球温暖化適応策レポート, 1-52
(http://www.maff.go.jp/kankyo/honbu/04/ref_data03-2.pdf)
- 農林水産省 農林水産技術会議, 2007b: 地球温暖化が農林水産業に与える影響と対策, 農林水産研究開発レポート, 23, 17.
- 農林水産省 農林水産技術会議, 2008: 地球温暖化が農林水産業に与える影響の評価及び対策技術の開発, 442, 119.
(<http://www.maff.go.jp/kankyo/2006report/main/shisaku3/s26-6.pdf>)
- Oh-e I., Saitoh K. and Kuroda T., 2007: Effects of High Temperature on Growth, Yield and Dry-Matter Production of Rice Grown in the Paddy Field, Plant Prod. Sci., 10, 412-422.
- 大江和泉, 上郷玲子, 城さやか, 倉橋崇之, 齊藤邦行, 黒田俊郎, 2007: 気温上昇がダイズの開花結莢, 乾物生産と子実収量におよぼす影響, 日作紀, 76, 433-444
- 岡本正弘, 1994: 炊飯米の粘りに関する化学成分の育種学的研究, 中国農試研報, 14, 1-68.
- 大賀圭治, 2002: 食料安全保障, 農業および園芸, 養賢堂, 77 (1), 78-84.
- 大野裕史, 中村圭司, 2007: ミナミアオカメムシ (*Nezara viridula*) とアオクサカメムシ (*N. antennata*) の岡山県及び四国における分布, Naturalistae, 11, 1-8.
- 坂井真, 岡本正弘, 田村克徳, 梶亮太, 溝淵律子, 平林秀介, 深浦壮一, 西村実, 八木忠之, 2007: 玄米品質に優れる暖地向き良食味水稻品種「にこまる」の育成について, 育種学研究, 9, 67-73.
- 桜井泰憲, 岸道郎, 中島一步, 2007: スケトウダラ、スルメイカ, 月刊海洋, 39, 323-330.
- 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, 日作紀, 77 (別 1), 238-239.
- 杉浦俊彦, 横沢正幸, 2004: 年平均気温の変動から推定したリンゴおよびウンシュウミカンの栽培環境に対する地球温暖化の影響, 園芸学会雑誌, 73, 72-78.
- 杉浦俊彦, 住田弘一, 横山繁樹, 小野洋, 2006: 農業に対する温暖化の影響の現状に関する調査, 研究調査室小論集, 7, 1-66.
- 高田良三, 山崎信, 杉浦俊彦, 横沢正幸, 大塚誠, 村上斉, 2008: 地球温暖化が肥育豚の飼養成績に及ぼす影響-「地球温暖化メッシュデータ (日本)」によるその将来予測-, 日本畜産学会報, 79, 59-65.
- 高橋渉, 尾島輝佳, 野村幹雄, 鍋島学, 2002: コシヒカリにおける胴割米発生予測法の開発, 北陸作物学会報, 37, 48-51.
- 高橋渉, 2004: 気候温暖化条件下におけるコシヒカリの白未熟粒発生軽減技術, 農及園, 81, 1012-1018.
- 寺脇利信, 吉村拓, 桑原久実, 2007: 温暖化による藻場環境の変化, 月刊海洋号外, 46, 46-54.
- 坪井八十二, 1961: 水稻の暴風被害に関する生態学的研究-作物の風害に関する研究 1 -, 農技研報, A8, 1-156.
- 梅本雅, 2002: 食料安全保障の新たな課題と論点, 農業および園芸, 養賢堂, 77 (1), 204-211.
- Yamaguchi A., Kawahara I., Ito S., 2005: Occurrence, Growth and Food of Longheaded Eagle Ray, *Aetobatus flagellum*, in Ariake Sound, Kyushu, Japan, Environmental Biology of Fishes, 74, 229-238.
- Yamakawa H., Hirose T., Kuroda M. and Yamaguchi T., 2007: Comprehensive expression profiling of rice grain filling-related genes under high temperature using DNA microarray, Plant Physiol, 144, 258-277.
- 山崎信, 村上斉, 中島一喜, 阿部啓之, 杉浦俊彦, 横沢正幸, 栗原光規, 2006: 平均気温の変動から推定したわが国の鶏肉生産に対する地球温暖化の影響, 日本畜産学会報, 77, 231-235.
- Yan, X., Yagi, K., Akiyama, H. and Akimoto, H., 2005: Statistical analysis of the major variables controlling methane emission from rice fields, Global Change Biology 11, 1131-1141.
- 横沢正幸, 飯泉仁之直, 小寺昭彦, 坂本利弘, 2006: 県平均水稻収量の推定モデル, 農業環境工学関連学会 2006 年合同大会講演要旨, 1473.
- 横沢正幸, 2006: 気候変動は農業にどのような影響を及ぼすのか, 地球環境研究総合推進費ホームページ 平成 18 年度一般公開シンポジウム 講演発表資料. (<http://www.env.go.jp/earth/suishinhi/jpn/sympo/h18sympo/Yokozawa.pdf>)
- Yoshida, S. and T. Hara., 1977: Effects of air temperature and light on grain filling of an indica and japonica rice (*Oryza sativa* L.) under controlled environmental conditions, Japanese Journal of Crop Science, 46, 45-52.