

지구 온난화가 일본 농림수산업에 미치는 영향과 대책*

전익수 · 이정희

지금까지 실시된 지구온난화의 영향 평가와 온난화에 대한 적응책 및 방지책에 관한 주요 연구 성과를 소개하였다.

1. 서론

IPCC(Intergovernmental Panel on Climate Change)의 제4차 평가보고서 발표와 미국의 고어 전부통령의 영화 <불편한 진실>의 상영 등 지구온난화에 대한 사회적 관심이 높아지고 있다.

지금까지 일본 농림수산업에서는 온난화와 관련하여 농림수산업 분야에서 가능한 한 온실효과 가스를 배출하지 않기(혹은 가능한 한 흡수시키기) 위한 온난화 방지(완화)책에 중점을 두고 다뤄왔다. 그러나 2007년 발표된 IPCC의 제4차 평가보고서에 따르면, 온난화가 빠른 속도로 진행되고 있으며 여기에는 인간 활동이 원인이라는 점이 단정적으로 지적되었다. 이것은 앞으로 어느 정도의 온난화 진행은 피할 수 없다는 것으로 온난화에 대한 '적응책'에 본격적으로 몰두할 필요가 있다는 의미이다. 이에 일본 농림수산업은 온난화 적응책과 대응책 양방에 대해 전략을 세워 대응하기로 했다.

그리하여 본 원고에서는 지금까지 실시된 지구온난화의 영향 평가(미래 예측)와 온난화에 대한 적응책 및 방지(완화)책에 관한 주요 연구 성과를 소개하고자 한다.

* 본 내용은 일본 농림수산 기술회의 사무국이 2007년에 발표한 자료인 "Impact of Global Warming on Agriculture Forestry and Fisheries and Possible Countermeasures in Japan"을 참고하여 한국농촌경제연구원 전익수 부연구위원과 이정희 연구원이 작성하였다 (iksuinje@krei.re.kr, 02-3299-4349, ljh8507@krei.re.kr, 02-3299-4159).

지구온난화가 농림수산업에 미치는 영상의 미래 예측

- ① 2060년대에는 일본의 평균온도가 현재보다 전국적으로 균일하게 약 3℃ 상승하는 시나리오의 경우
 - 논벼 수확량이 홋카이도에서는 증가하고, 도후쿠 지방 이남에서는 감소한다.
 - 사과 재배적지는 서서히 북상해서 홋카이도는 거의 전역이 적지가 되지만, 관동 이남은 대부분 범위 밖이 된다.
 - 온주밀감의 재배적지는 현재의 서남의 따뜻한 지역 연안역(沿岸域)에서 남동북의 연안부(沿岸部)까지 확대된다.
 - 육용계(肉用鶏)의 산육량은 서일본에서 크게 저하되어 15%이상 저하되는 지역도 나오게 된다.
- ② 너도밤나무의 생육적지는 2081~2100년에 현재보다 평균 기온이 약 3℃ 높아지는 시나리오에서 약 40%로 감소하고, 약 5℃ 높아지는 시나리오에서는 약 10%로 감소한다.
- ③ 현재 쾅치 어장은 홋카이도 동부의 네무로만(根室沖) 어장이지만, 100년 후에는 수온 상승에 의해 일본 근해에서는 거의 사라지게 된다.

지구온난화에의 적응책

- ① 논벼:
 - 논벼의 성숙기간 동안 고온에 의해 발생하는 백화 현상이나 미숙립은 싹을 늦게 틈우거나 직파재배를 통해 감소시킬 수 있다.
 - 고온에도 백화 현상이나 미숙립의 피해가 적은 외관품질이 좋은 품종 ‘니코마루’ 등을 육성한다.
- ② 과수:
 - 고온에 의한 포도의 착색불량은 환상박피를 통해 개선한다.
 - 성숙기의 고온 영향으로 감귤의 과육과 껍질이 벌어지는 부피증에 대해서는 발생도가 낮은 품종 ‘이시지(石地)’, ‘다마미’ 등을 육성한다.

지구온난화 완화책

- ① 논에서 발생하는 온실효과 가스인 메탄은 중간낙수와 간단관개(間斷灌漑)를 통해 수확량의 감소 없이 큰 폭으로 줄일 수 있다.
- ② 복층림(複層林)을 포함한 삼림 관리 등을 통해 탄소의 축적을 유지·증대시킬 수 있다.

2. 지구 온난화 연상과 미래 예측

(1) IPCC의 제4차 평가보고서

IPCC의 제4차 평가 보고서 제1작업부회(자연과학적 근거), 제2작업부회(영향·적응·취약성), 제3작업부회(완화책)의 보고서가 발표되었다.

2007년 IPCC의 제4차 평가보고서가 발표되면서, 지구 온난화 현상과 미래 예측에 관한 최신 지견이 명확해졌다. IPCC는 인간의 행위에 의한 기후변화, 영향, 적응 및 완화방책에 관해 과학적, 기술적, 사회경제학적인 관점에서의 포괄적인 평가를 목적으로 1988년에 세계기상기구(WMO)와 국제연합환경계획(UNEP)에 의해 설립된 정부간 패널(위원회)이다. 지금까지 제1차(1990년), 제2차(1995년), 제3차(2001년) 평가보고서를 발표하였으며, 2007년 2, 4, 5월에 각각 제4차 평가보고서의 제1작업부회(자연과학적 근거), 제2작업부회(영향·적응·취약성), 제3작업부회(완화책)의 보고서가 발표되었다. 그리고 11월에는 3개의 작업부회의 보고서를 정리한 통합보고서가 발표되었다.

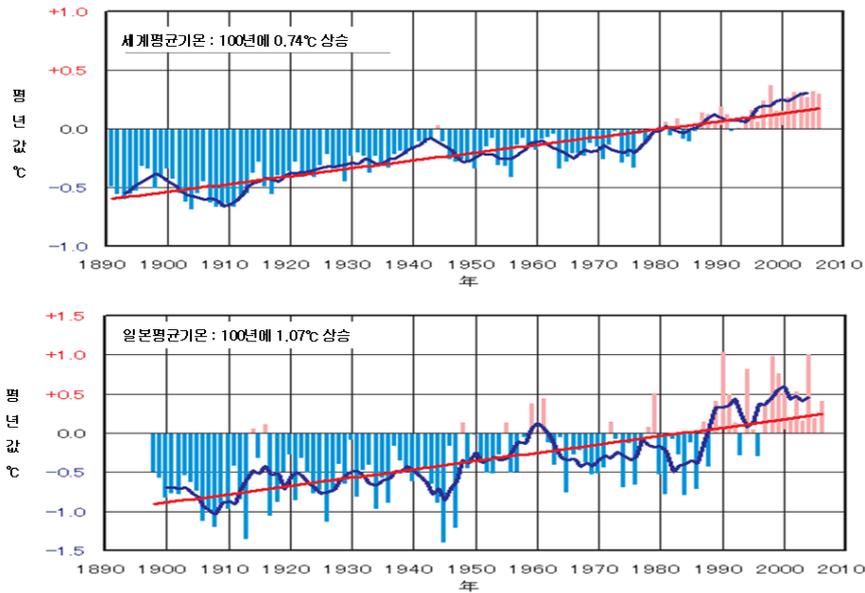
(2) 연세까지 관측된 세계와 일본의 기후변동

과거 100년 동안 이산화탄소 농도가 공업화 전의 약 1.4배로 증가, 지구의 평균기온이 0.74℃로 상승하였다. 반면 일본의 평균기온 상승폭은 과거 100년간 1.07℃로 나타났다.

자연과학적 근거에 대해 정리한 제1작업부회 보고서에서는 우선 지구온난화의 현상에 대해 과거 100년 동안 이산화탄소 농도가 공업화 전(약280ppm)의 약 1.4배(2005년에 379ppm)로 증가, 지구의 평균기온이 0.74℃상승했다(그림1, 위)고 발표했다. 또한 이 보고서에서는 20세기 후반 북반구의 평균기온은 과거 1,300년 동안 가장 고온이었을 가능성이 높으며, 최근 50년간의 기온상승 경향은 과거 100년 동안의 거의 2배 수준으로 나타내고 있다. 그리고 ‘기후 시스템에 온난화가 일어나고 있는 것에는 ‘의심의 여지가 없다’고 설명하며, 인간의 활동으로 인한 온실효과 가스 증가가 그 원인이라고 거의 단정 지었다. 2001년 3차 평가보고서에서 100년 동안 0.6℃의 기온 상승을 보고하고, ‘인간의 활동으로 인한 온실효과 가스의 증가가 온난화의 원인일 ‘가능성이 있다’고 표현한 것과 비교해보면, 이번 4차 평가보고서에서는 보다 단정적인 표현으로 되어 있는 것이 특징이다.

세계의 온도 상승 정도는 지역적으로 차이가 있어서, 세계 평균보다 상승폭이 큰 지역과 작은 지역이 있다. 기상청이 발표한 일본의 평균기온 상승폭은 과거 100년간 1.07℃로 세계 평균의 0.74℃보다도 컸다. 특히 1990년대 이후, 고온이 되는 해가 자주 나타나는 것으로 드러났다.

그림 1 세계와 일본의 기온상승 변화



주: 각 해의 평균기온의 평균치와의 차이(평균치는 1971~2000년 30년간의 평균치).
 파란선: 평년치의 5년간 이동 평균.
 빨간선: 장기적인 변화 추세.

(3) 세계의 기후변동에 대한 미래 예측

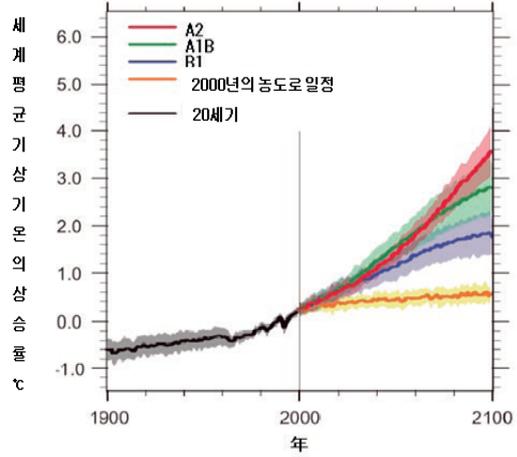
미래의 온도 상승은 세계 평균으로 보았을 때 1980년부터 1990년까지에 비해 21세기말(2090년부터 2099년)의 평균 기온 상승이 1.1°C~6.4°C로 예측되고 있다. 이것은 IPCC의 제3차 평가보고서의 1.4°C~5.8°C의 폭보다 약간 상향 수정된 것이다. 결국 우리는 앞으로 과거 100년간에 경험한 상승폭보다도 꽤 큰 기온상승을 경험하게 될 것 같다.

미래 예측치의 폭이 큰 이유는 예측에 사용한 기후 모델의 차이나 앞으로 인류가 어떤 사회를 건설해 나갈지를 나타내는 시나리오(온실효과 가스 배출 시나리오: 그림3)의 차이에 의한 것이다. 예를 들어 환경 보전과 경제 발전을 전 세계 규모로 양립시켜 나가는 '지속적 개발형 사회 시나리오(B1)'에서는 약 1.8°C(1.1°C~2.9°C), 화석 에너지를 중시하는 '고성장형 사회 시나리오(A1)'에서는 약 4.0°C(2.4°C~6.4°C)로 나왔다. 또한 2030년까지는 사회 시나리오와 상관없이 10년마다 0.2°C의 기온 상승이 예측되고 있다.

미래의 온도상승은 제3차 평가보고서의 1.4°C~5.8°C의 폭보다 약간 상향 수정된 1.1°C~6.4°C로 예측되고 있다.

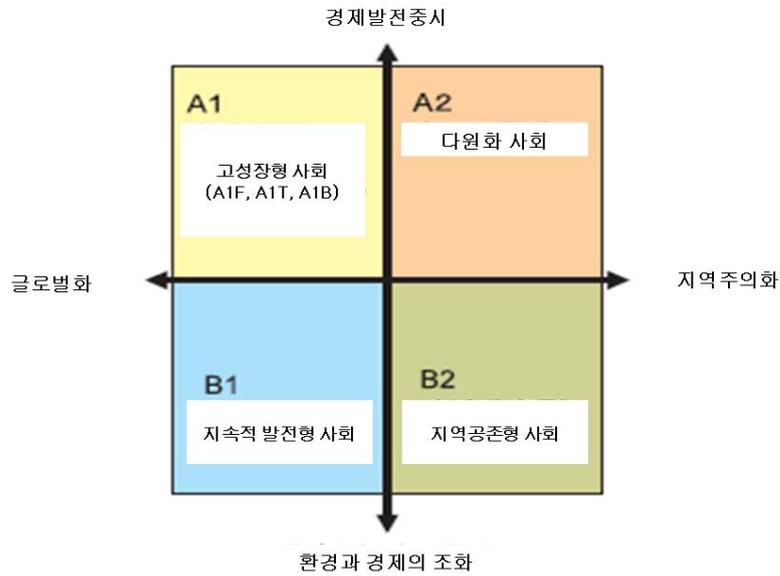
그림 2 미래의 기온상승 예측

각종 배출 시나리오에 의한 2100년의 기온상승예측		
배출 시나리오	평균	범위
A1F1	4.0	2.4~6.4
A1T	2.4	1.4~3.8
A1B	2.8	1.7~4.4
A2	3.4	2.0~5.4
B1	1.8	1.1~2.9
B2	2.4	1.4~3.8



주: A1T, A1B, A1F1, A2, B1, B2는 온실효과 가스의 각종 배출 시나리오(상세한 것은 그림3을 참조). 실선은 각각의 시나리오에 있어서 복수의 모델에 의한 예측치의 평균으로 음영부는 표준편차의 범위. 오렌지색은 2000년의 온실효과 가스 농도를 일정하게 유지한 경우. 2030년까지는 어떤 시나리오를 이용하든지 10년 당 0.2°C의 비율로 기온이 상승한다고 예측되는데, 그 후는 시나리오에 따라 다르다.

그림 3 온실효과 가스 배출 시나리오



주: 크게 4개의 줄거리를 상정해두고 이 중 A1시나리오는 화석에너지에의 의존도에 의해 더욱, 화석 에너지원 중시(A1F1), 비화석 에너지원 중시(A1T), 각 에너지원의 밸런스를 중시(A1B)의 3개의 그룹으로 나뉜다.

3. 지구 온난화가 일본의 농림수산업에 미치는 영향

IPCC 제4차 평가보고서의 제2작업부회 보고서(영향·적응·취약성)에 의하면 지구 온난화로 인해 빙하나 영구동토(永久凍土)의 용해, 동식물의 조기 춘계현상이나 서식지 이동 등 이미 전 세계적으로 자연 및 사회에 확실한 영향이 나타나고 있다. 또한 앞으로 수자원, 생태계, 농업생산 등에도 심각한 영향을 줄 것으로 예측된다.

농업생산에 있어서는 열대(熱帶) 등의 저위도 지역이 고위도 지역보다 악영향을 받을 것으로 예상된다. 이번 제4차 보고서에서는 2~3℃의 기온상승은 저위도 지역의 곡물생산성이 저하되지만, 중고위도 지역에서는 생산성이 향상된다고 예측되고 있다. 즉 온난화의 피해는 일본과 같은 국가보다는 아시아나 아프리카의 저위도 지역에 널리 분포한 개발도상국에서 먼저 시작된다는 견해가 나오고 있다. 그러나 기온 상승이 2~3℃ 이상이면 저위도 지역이나 고위도 지역 양쪽 모두 곡물의 생산성이 감소될 것으로 예측되었다. 어느 정도 이상의 고온화가 진행되면 모든 지역에서 온난화에 의한 좋은 영향보다 악영향 쪽이 커질 것이라고 예상된다.

IPCC의 보고서에서는 아시아, 아프리카 등의 지역에 대한 예측이 기록되어 있지만, 일본 등 특정 국가에 대한 예측은 설명되어 있지 않다. 다음은 일본 국내 농업에 대한 영향에 대해 살펴보았다.

(1) 현재 이미 농림수산업에 나타나고 있는 고온의 영향

2007년 2월 농림수산업에서는 고온장해 등에 의한 농업생산에 미치는 영향을 파악하기 위해 전국 조사를 실시했다. 그 결과 논벼의 고온장해, 과실의 착색불량, 병충해의 다발 등이 확인되었다. 예를 들어 벼의 백화 현상은 현미 전체 혹은 일부가 하얗게 변하는 현상으로 성숙기(출수·개화로부터 수확까지의 기간)의 일평균기온이 27℃를 넘으면 많이 발생한다. 특히 성숙기의 평균기온이 상승하는 경향이 있는 규슈 지방 등에서 심각하게 나타나고 있다. 같은 논벼의 고온장해인 동할미(胴割米, acked rice)는 완숙한 미립내의 급격한 수분 변화에 의해 내부 수축차가 커져서 미립에 균열을 만드는 현상으로, 성숙 초기의 기온이 높을수록 발생하기 쉽고 알려져 있다.

고온에 의한 감귤의 부피현상은 성숙이 진행된 후 고온·다우에 의해 과피와 과육이 분리되는 것으로(껍질과 속이 뜨는 현상) 품질·저장성 저하로 연결된다. 특히 귤에서는 여름철의 고온에 의한 수분 부족과 강한 일광에 과실이 타는(일광화상) 증상도 증가하고 있다. 또한 포도의 착색장애는 고온에 의한 안토시아닌의 합성 억제에 의해 일어나는데 이는 결국 상품 가치의 저하로 연결된다.

이번 제4차 보고서에서는 2~3℃의 기온상승은 저위도 지역의 곡물생산성이 저하되지만, 중고위도 지역에서는 생산성이 향상된다고 예측되고 있다.

농림수산업은 고온장해 등에 의한 농업생산에 미치는 영향을 조사한 결과 논벼의 고온장해, 과실의 착색불량, 병충해의 다발 등이 확인되었다.

그림 4 고온장애로 인한 농업생산의 피해

<논벼의 고온장애인 동할미(洞割米)>



<고온, 폭우에 의한 귤의 '부피(浮皮)증(좌)>



<고온, 수분 부족에 의한 귤의 '일광화상'>



<고온에 의한 포도의 착색장애>



독립행정법인 농업·식품산업기술종합연구기구(NARO)는 2003년에 과수, 2005년
에 논벼, 보리, 대두, 야채, 화훼, 축산에 대해 47도도부현(都道府縣)의 농업관계 공

립시험연구기관을 대상으로 농업에 대한 지구온난화의 영향에 대한 앙케트 조사를 실시했다. 그 결과 ‘과수’에서는 모든 현이 ‘야채·화훼’에서는 90%, 논벼는 70% 이상, ‘보리, 대두, 축산(가축, 사료작물)’에 대해서는 40% 정도의 도도부현에서 지구온난화가 원인으로 추정되는 영향이 나타나고 있다고 대답했다.

최근 고온의 영향으로 보이는 현상의 발생 빈도가 높아지고 있는 반면 이와 같은 현상이 온난화에 의한 것인지, 혹은 단기간의 단발적인 고온의 영향인지를 단정할 수는 없다. 예를 들어 과거 100년 동안 약 1°C 온도 상승이라고 하지만, 일본 전국의 평균기온 측면에서 볼 때 지난해와 올해의 차가 1°C 정도 있는 것은 놀랄 정도는 아니다. 이와 같은 해마다 바뀌는 것을 ‘자연변동’이라고 하는데, 이런 변동의 폭이 크다보니 자연변동과 장기적으로 진행된 온난화의 영향을 구분 짓는 것은 쉽지 않다. 현시점에서는 상기의 조사에 의해 확인된 현상의 대부분은 단기적인 기상변동(자연변동)에 의한 고온 영향이 직접적인 원인이라고 생각되지만, 그 배경에는 장기적인 기후변동(지구온난화)이 영향을 끼쳤을 가능성이 높다.

(2) 농림수산업에 미치는 온난화의 영향 예측

앞으로 지구 온난화가 진행된다면 일본의 농림수산업에 미치는 영향은 일부 지역에서의 논벼의 잠재적 수확량 감소, 과수의 재배적지 이동, 너도밤나무 분포면적 축소, 수산자원의 분포·생산량의 변동 등이 예상된다. 즉 이대로 계속 지구온난화가 진행된다면 일본의 농림수산업에 심각한 영향을 미칠 것으로 우려된다.

그러나 미래 예측 결과를 볼 때에 주의해야 할 점이 있다. 미래의 일을 예측할 때에는 반드시 전제조건이 있다는 것이다. 그것을 이해하지 못한다면 공연한 불안을 야기하거나 반대로 지나치게 안심하게 해서 대책 수단을 완화시킬 우려가 있다. 그럼 미래예측의 연구가 어떠한 방법으로 이루어지는지 간단히 소개하도록 하자. 지구온난화의 영향에 관한 미래 예측은 모델을 이용한 시뮬레이션으로 이뤄진다. 인공기상실 등을 이용해 고온이나 높은 CO₂ 농도 등 미래의 온난화를 상정해서 환경조건을 조절하고, 그 조건하에서 작물을 재배하거나 동물을 사육을 한다. 즉 온도상승에 대한 작물이나 가축의 반응에 관한 데이터를 수집하고 그들을 수식화한 ‘작물(혹은 가축)생육 모델’을 만든다. 이 작물생육 모델에 미래의 기상조건을 입력하면, 미래의 기상조건에 맞춰 작물이 어떻게 자라는지 모델이 재현해준다. 미래의 기상조건은 ‘기후모델’과 ‘온실효과가스 배출 시나리오’를 이용해 슈퍼컴퓨터로 계산된다. 작물생육 모델이나 기후모델은 복잡한 자연현상을 단순화해서 만들어진 것으로 모델은 어디까지나 모델일 뿐 현실 그 자체는 아니다. 그러므로 당연한 얘기지만 예측 결과에는 불확실성이 있다는 점에 주의해야 한다. 다음은 농림수산업에 미치는 지구 온난화의 영향에 대한 대표적인 연구사례를 소개하였다.

지구 온난화로 일본 농림수산업에 미치는 영향은 논벼의 수확량 감소, 과수의 재배적지 이동, 너도밤나무 분포면적 감소 등이 예상된다.

지구 온난화가 논벼에 미치는 영향은 홋카이도 등 북쪽지역에서는 수확량이 증가하며, 규슈 등 남쪽 지역에서는 수확량이 감소할 것이다.

1) 농업에 미치는 영향 예측

① 논벼: 각 지역의 수확량 변동을 예측

지구 온난화가 일본 농작물에 미치는 영향을 예측한 연구는 역시 논벼에 관한 것이 많다. 이들 연구 결과를 한 마디로 정리하자면 홋카이도 등 북쪽 지역에서는 수확량이 증가하고, 규슈 등 남쪽 지역에서는 수확량이 감소할 것이라고 예측되고 있다. 현재 이 작물의 생육에 있어서 최적의 기후조건보다 추운 지역에서는 온난화가 유리하게 작용하고, 더운 지역에서는 온난화가 불리하게 작용하기 때문이다. 이것은 세계 규모의 온난화 영향 예측에서도 고위도 지대는 저위도 지대보다 좋은 영향이 예측되고 있는 것과 일치하는 결과다.

기상조건과 수확량의 관계에서 통계적으로 해석한 잠재적 수확량 변동 예측에서는 2060년대에 전국 평균 약 3℃기온이 상승할 경우, 잠재적인 수확량은 홋카이도에서 13% 증가한 반면 도후쿠 이남에서는 8~15% 감소한다는 예측 결과가 나왔다. 잠재적인 수확량을 보여주는 지표로서 기온과 일사량만으로 구할 수 있는 ‘기후 등숙량 지수’를 이용해서 미래의 잠재적인 수확량을 측정하였다. 미래 기온의 예측치는 현재의 대기중 CO₂농도(약350ppm)가 매년 1%씩 상승하는 것을 전제로 하여 대표적인 4종류의 기후모델을 이용해서 산출된 미래의 기후 데이터의 평균으로 산출하였다. 최대의 수확량을 얻을 수 있도록 이식일을 최적화했지만, 고온불임에 의한 감소나 토양조건, 병충해의 발생 영향은 고려되지 않았다.

또한 통계적인 방법이 아니라 논벼의 생육 프로세스를 나타내는 논벼 생육모델에 의한 고시히카리 수확량의 예측에서는 현재의 이식일로는 도후쿠 남부 이남의 지역에서 50년 후에 최대 10%정도의 감소가 예측되었다. 단, 이 연구에서는 이식일을 최적일로 조금 옮기는 것으로 수확량 감소는 피할 수 있으며, 오히려 50년 후에는 5~20% 증가 된다고 예측되었다.

다른 연구에서는 논벼의 개화기때 고온으로 인해 수정이 잘 안 되지 않아 열매를 맺지 못하는 고온불임 현상에 대해 조사한 결과, 고시히카리의 경우 2030년대에는 모든 지역에서 5%이하로 예측되었지만, 2090년대에는 쓰쿠시평야(筑紫平野), 사가평야(佐賀平野), 와카야마 평야(和歌山平野), 노비평야(濃尾平野)의 일부에서 5%가 넘는다고 예측되었다.

이러한 연구 결과는 모두 고온의 영향에 대한 것이다. 그러나 온난화일 경우에는 대기 중의 CO₂농도가 상승하기 때문에 그 영향에 대해서도 고려할 필요가 있다. 예를 들어 실제 논에서 CO₂가스를 항상 인공적으로 분출시켜 식물주변의 CO₂ 농도를 높게 유지하는 것으로 앞으로 CO₂증가의 영향을 확인할 수 있는 개방계(開放系) 대기CO₂ 증가(Free Air CO₂ Enrichment: FACE) 실험(그림6) 결과에서, CO₂농도가 현재보다 200ppm 상승할 경우 증수 효과는 15% 정도라는 결과가 나왔다. 또한 기공(氣孔)이 닫힐 우려가 있기 때문에 벼의 온도상승으로 불임의 리스크가 높

아질 가능성도 보이고 있다. 이들의 영향을 정밀하게 예측하기 위해서는 더욱 상세한 연구가 필요할 것이다.

그림 5 지구 온난화가 논벼의 수확량에 끼치는 영향

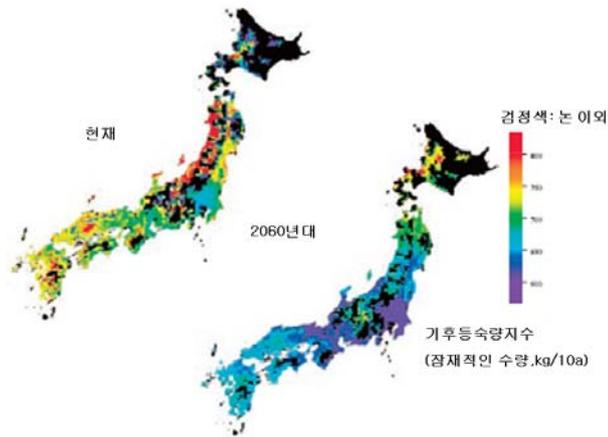


그림 6 미래의 CO2 증가의 영향을 연구하는 이와테현 시즈쿠이시 밭의 벼 FACE실험



주: 정8각형(직경12m)으로 설치된 튜브에서 바람 방향에 맞춰 CO2를 방출, 정8각형내의 CO2 농도를 바깥 공기보다 약 200ppm 높이는 장치.

연평균 기온 예측 데이터에서 재배적지를 판정해보면, 사과 및 온주밀감의 재배적지는 서서히 북상해간다.

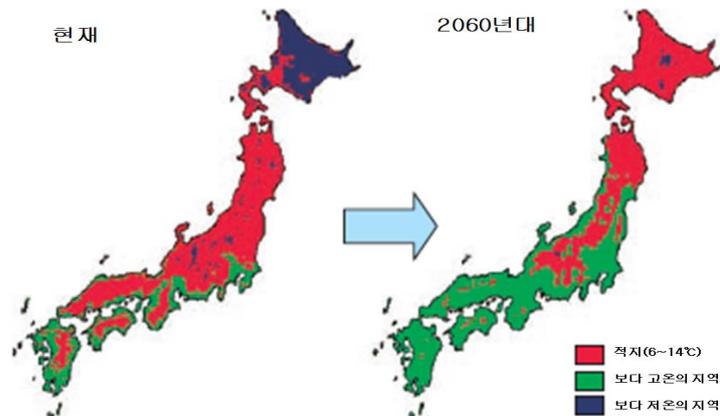
② 과수: 재배 적지의 변화를 예측

논벼에 이어서 연구 사례가 많은 분야는 과수에 대한 것이다. 과수는 한번 심으면 간단히 옮길 수 없으며, 같은 나무에서 수십 년 동안 생산을 지속해야 하고, 다른 작물과 같이 파종시기를 옮기는 것도 불가능하기 때문에 특히 온난화에 대한 준비가 필요하다.

연평균 기온 예측 데이터에서 재배적지를 판정해보면, 사과 및 온주밀감의 재배적지는 서서히 북상해간다. 사과 재배의 적지 온도범위는 7~13℃로, 현재의 재배지는 홋카이도의 삿포로를 중심으로 도북(道北), 도동(道東) 및 서남의 따뜻한 지역의 평야지역을 제외한 넓은 지역에 분포하고 있다. 그러나 2060년대에 현재보다 기온이 약 3℃ 상승할 경우, 홋카이도의 전역이 적지가 되는 한편, 관동 이남은 범위 밖이 될 것으로 예측된다. 마찬가지로 온주밀감의 재배 적지 온도범위는 15~18℃로, 현재의 재배지는 서남 난지의 연안역이지만, 2060년대에는 남동북의 연안부까지 적지가 될 것으로 예측된다.

이상의 연구에서 앞으로 기후 예측치는 앞서 나온 논벼의 예측연구와 같은 방법으로 산출된 것을 이용했다. 이들 예측은 연평균기온만을 고려해서 재배 적지의 이동을 계산하는 매우 대담한 전제조건에 의한 것으로 반드시 이대로 되는 것은 아니다. 그러나 그 전제조건을 불확실성을 이해한 후에 이와 같은 가능성이 있다는 것을 나타낸 연구 사례라고 할 수 있다.

그림 7 지구 온난화가 사과의 재배적지에 끼치는 영향



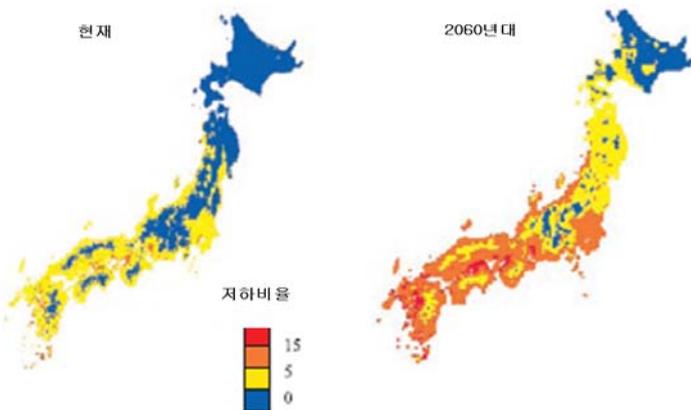
③ 축산: 가축과 목장의 생산변화 예측

고온의 영향은 식물뿐만 아니라 가축이나 가금류에도 나타날 가능성이 있기 때문에 소, 돼지, 육용계의 생산성에 대한 영향을 예측한 사례도 있다. 닭고기의 경우 여름철 고온에 의한 생산량의 저하가 특히 서일본에서 두드러지고 있으며, 2060년대에는 8월의 생산량이 15% 이상 감소하는 지역이 약 1% 나타날 것으로 예상된다. <그림 8>은 기온과 생산량의 관계를 나타낸 것으로 온도환경을 제어한 실험실에서 육용계를 사육하여 현재 및 미래의 기온에서 여름철(8월)의 생산량 저하율을 계산해 지도상에 나타낸 것이다. 미래 기후 예측치는 앞서 설명한 논벼의 예측연구와 같은 방법으로 산출된 것을 이용했다.

목장의 생산량은 100년 후 연평균 기온이 4℃ 상승할 경우, 한지형 목장의 적지가 축소되고 난지형 목장의 적지가 확대되어 일본 전체 목장의 생산량은 약 1.5배 증가할 것으로 전망된다. 그러나 난지형 목장의 영양가는 저하되고 그 외 사료 작물의 품질도 저하되기 때문에 품질이나 영양가를 가미한 연구가 필요하다.

닭고기의 경우 여름철 고온에 의한 생산량의 저하가 특히 서일본에서 두드러지고 있으며, 2060년대에는 8월의 생산량이 15% 이상 감소할 것으로 예상된다.

그림 8 지구 온난화가 닭고기 생산량에 미치는 영향



2) 임업: 너도밤나무의 분포적지 변화를 예측

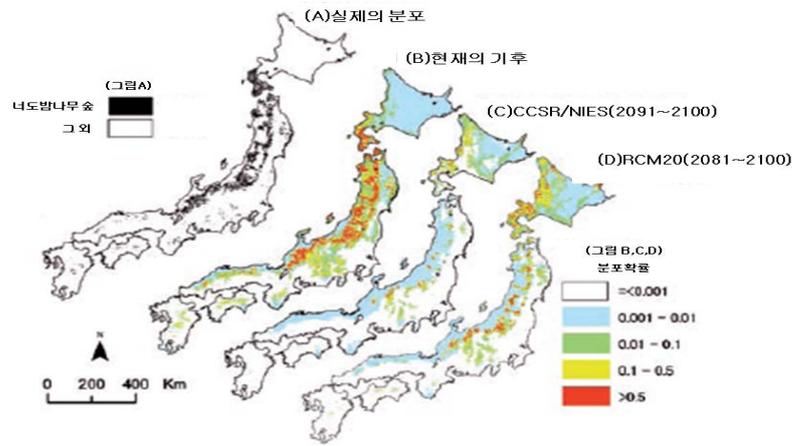
삼림에 대한 미래 예측 연구도 있다. <그림 9>는 현재의 너도밤나무 분포 상황과 기후, 지형, 토양 등의 조건의 관계에서 너도밤나무의 분포에 적합한 조건을 찾아 미래의 기후 조건에서는 그것이 어떻게 변화되는지를 예측한 것이다. 2081~2100년에 현재보다 평균 기온이 4.9℃ 상승한 기후변화 시나리오에서는 전국의 너도밤나무 분포 적지의 면적이 9% 감소되고, 현재보다 평균기온이 2.9℃ 상승한 기후변화 시나리오에서는 37%로 감소하는 것으로 예측되었다. 또한 고온과

2081~2100년에 현재보다 평균 기온이 4.9℃ 상승할 경우 전국의 너도밤나무 분포 적지의 면적이 9% 감소되고, 평균기온이 2.9℃ 상승할 경우 37%로 감소하는 것으로 예측되었다.

건조에 의한 피해가 우려되고 있는 삼나무의 경우, 현재와 미래의 기후 요인과 삼나무림의 분포지역의 관계를 분석한 결과, 미래에는 삼나무 생육 부적지가 증가할 것이라는 예측 사례도 있다.

삼림 분야에서는 상기와 같은 특정 수종의 미래 예측과 더불어 국토 전체의 삼림흡수원 건적산출에 도움이 되는 모니터링이나 모델화 등의 연구가 많이 실시되고 있다.

그림 9 지구 온난화가 너도밤나무 숲의 분포 영역에 미치는 영향

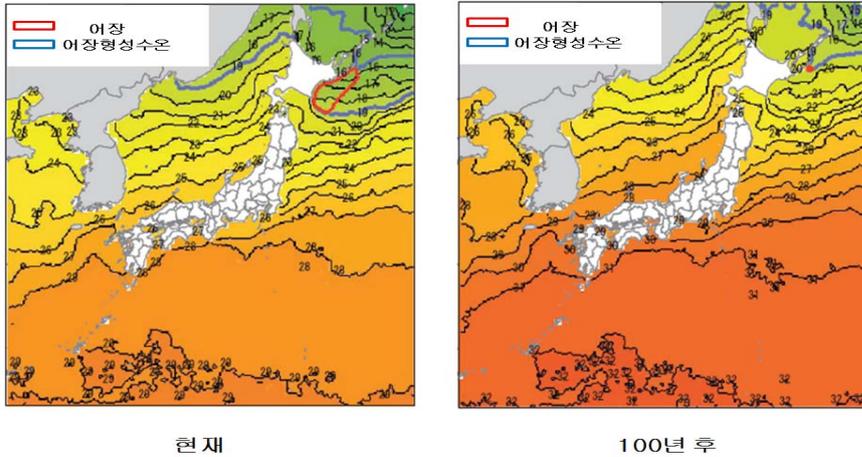


3) 수산업: 일본 근해의 꽁치 어장의 변화 예측

해수온이 상승하면 수산생물의 생식역에도 큰 영향이 예측된다. 꽁치의 경우 생식적온에서 예상되는 9월의 어장의 변화를 예측할 수 있다. 현재는 홋카이도 동부의 네무로반도(根室半島沖) 어장(북계 둘러싸인 영역)이 형성되어 있는데, 100년 후에는 일본 근해에 꽁치 어장이 거의 형성되지 않는다는 예측 결과가 나왔다. 이 외에도 유사 방법을 이용해 다른 품목의 어장의 변화를 예측한 연구 사례가 있지만, 실제로는 수온이 변화하면 해류·먹이 환경 등의 변화에 수반되는 해양생태계도 크게 변화되기 때문에 어장 및 어기(漁期)의 변화를 정확하게 예측하는 것은 불가능하다. 이들의 연구는 어떤 가정을 두고 예측한 결과라는 것에 주의하면서 예측 결과를 활용해야 한다.

꽁치의 경우 현재는 홋카이도 동부의 네무로반도어장이 형성되어 있지만 100년 후에는 일본 근해에 어장이 거의 형성되지 않는다는 예측 결과가 나왔다.

그림 10 지구온난화가 콩치 어장의 변화에 미치는 영향



4. 지구 온난화에 대한 일본의 적응책

지구 온난화로 인한 농작물에 대한 ‘적응대책’은 크게 품종 개발과 재배 기술의 개발로 나눌 수 있다. 임업이나 수산업의 경우 온난화의 영향 예측이나 메커니즘의 해명에 중점이 놓여있기 때문에 여기서는 임업, 수산업을 제외한 농업 분야의 적응책에 대해 품목별로 설명하였다.

(1) 논벼 : 백화현상과 동할미(胴割米) 등에 대한 대책

성숙기간 동안 고온(평균기온이 27℃이상)에 의한 백화현상의 발생은 현미품질을 저하시킨다는 점에서 큰 문제가 된다. 성숙기간 동안 고온을 피하는 방법으로는 싹을 늦게 틔우거나, 직파재배에 의해 성숙기간을 늦추는 것이 효과적이다. 이삭수의 과잉이나 성숙기간의 영양 상태의 악화 등도 백화현상의 발생에 영향을 미치므로 밀거름, 이삭 밀도의 조절, 충분한 웃거름, 조기 낙수의 방지 등도 온난화에 대한 적응책으로서 중요하다. 또한 고온에도 백화현상이 적은 품질이 뛰어난 논벼 품종인 ‘니코마루’ 등도 육성되고 있다. 니코마루는 긴키~규슈 지역에서 실시된 4년여의 시험을 통하여 대부분의 지역에서 대조품종인 히노히카리 이상의 높은 현미 품질을 보였으며, 기상, 재배 조건의 변동에도 품질이 안정되어 있는 것이 밝혀졌다.

동할미는 기존에는 수확 시기가 늦어지면서 벼가 지나치게 건조되는 것에 의해

임업, 수산업을 제외한 농업 분야의 지구 온난화에 대한 적응책에 대해 품목별로 설명하였다.

발생하였지만, 최근에는 성숙기간 초기에 고온이 되면 많이 발생한다고 밝혀졌다. 적응책으로는 싹 늦게 틔우기, 조기 낙수의 방지, 적기 수확을 들 수 있다. 또한 온난화와의 인과관계는 명확하지 않지만 논벼에서 딱정벌레류가 원인인 반점미가 증가하고 있어서, 신약제를 포함한 방제법의 재검토, 발수 전의 논두렁 베기, 페로몬트랩에 의한 발생 예찰 등의 적응책이 연구되었다.

(2) 과수: 과실의 착색 불량 등에 대한 대책

과수의 고온장해 중 가장 큰 문제 중 하나로 여름철 고온에 의해 발생하는 과실의 착색불량을 꼽을 수 있다. 적응책으로는 사과와 배의 경우 착색이 뛰어난 품종·계통의 이용, 반사 필름에 의한 수광 상황 개선 기술 등이 있다. 포도의 경우 환상박피에 의한 착색향상 기술이 개발되었다. 환상박피로 인하여 잎에서 광합성된 당류가 가지와 잎에 머물게 되면서, 수확시 껍질을 벗긴 줄기보다 끝부분의 당도가 높아지고 안토시아닌 합성이 촉진되어, 착색이 향상되고 붉은 기가 강해지는 것으로 밝혀졌다. 또한 환상박피와 무대(無袋)처리의 조합으로 착색이 더욱 향상된다는 연구 결과도 나왔다. 착색 향상 기술로서는 이 외에도 식물생장 조정제인 ABA(아브시스산) 처리나 철저한 적정 착과(과수 한 그루당의 과실 개수의 최적화) 등을 꼽을 수 있다.

성숙기의 고온에 의해 발생하는 감귤의 부피(浮皮)에 대한 적응책으로는 적과(과일숙기)법 개선, 식물생장 조정제에 의한 피해 경감기술 개발, ‘이시지(石地)’, ‘다마미’ 등 부피가 발생하기 어려운 품종의 육성 등이 실시되고 있다.

온난화의 영향은 여름뿐만 아니라 겨울철에도 고온 현상이 나타나고 있다. 예를 들어 하우스배의 수면병(sleeping disease)은 저온 부족에 의한 발아장해로 겨울 동안에 일정 이상의 저온에 접하지 않으면 봄이 된 후 꽃이 피지 않고 열매가 맺지 않는 현상이다. 현시점의 적응책으로는 저온 유지를 충분히 만족시킨 후에 가온하도록 하는 것과 시안아미드제의 살포를 꼽을 수 있다.

(3) 보리의 동상해(凍霜害), 대두의 가뭄해에 대한 대책

보리는 여름철의 고온기에 생육하는 것이 아니기 때문에 고온 장해의 걱정은 없다. 그러나 겨울철 온난화에 따른 어린 싹 형성·웃자람이 빠르고 동상해의 위험이 높다. 씨를 빨리 뿌려도 싹트는 시기의 변동이 적은 보리 품종 ‘이와이노다이치’는 온난화에 의해 생육이 빨라졌다고 해도 줄기 자람이 다른 품종과 같이 빨라지지 않고, 동상해에 당할 위험성이 거의 없다는 점에서 온난화 적응품종이라고 할 수 있다.

대두의 경우 가뭄해에 의한 수량(水量) 저하 문제로 논 전환 발용으로 지하수위를 조절하는 시스템(FOEAS)이 개발되었다. 이것이 보급되면 배수와 관개를 모두

할 수 있기 때문에 가뭄해뿐만 아니라 폭우 시의 배수 대책으로도 유용하게 사용할 수 있다.

(4) 야채 : 가지의 결실 불량 대책과 딸기의 효과적 냉각 기술

야채류의 경우 여름철 고온에 의한 결실불량이 문제이다. 예를 들어 가지는 고온에서 화분불임 등에 의한 결실불량이 발생하며, 고온에서도 높은 결실성을 나타내는 단위결과성(수분하지 않아도 과실이 자연스럽게 비대해지는 성질)의 가지는 계통이 육성되고 있다. 이는 앞으로 온난화에 적응할 품종으로 기대된다.

시설 야채의 경우 효과적인 냉각 기술이 요구된다. 미세한 안개 상태의 수분으로 시설내를 냉각하는 세무(細霧)냉방기술 등도 개발되었지만, 젖은 상태가 계속되기 때문에 발생하는 병해의 문제 등이 있다. 그리하여 딸기는 시설 전체의 냉방을 하는 것이 아니라 자주(子株)의 극히 일부(크라운 부분)를 냉각하는 고품질 재배기술이 개발되었다.

5. 지구온난화에 대한 일본의 완화책

온실효과 가스로는 CO₂ 외에도 메탄(CH₄), 아산화질소(N₂O) 등이 있으며, 교토의 정서에서 감소대상으로 명시된 것은 모두 6종이다. 가장 배출량이 많은 것은 CO₂로 화석 연료의 연소로 자동차나 공장 등에서 배출된다. 그러나 논이나 소 등의 반추동물로부터 발생된 메탄 등 농림수산업에서도 온실효과 가스는 배출되고 있다. 그 양은 메탄의 경우 논과 가축을 포함하면 인위발생원의 약 40%를 점유로 추정될 정도로 많기 때문에 배출량을 제어하는 기술이 개발되어야 할 것이다.

공업이나 상업 등 타 산업 부문에서는 이른바 ‘에너지 절약’이 온난화의 완화책이 되지만, 농림수산업의 경우 자연의 기능을 더 잘 이용해서 온실효과 가스 발생을 제어하거나 생태계에 흡수시킬 수 있다. ‘삼림흡수원’이라는 말이 있는 것처럼, 식물 스스로가 CO₂를 흡수하고, 농림수산업 생산의 장이라고 할 수 있는 토양도 관리 방법에 따라서는 흡수원이 된다. 앞으로는 농업의 생산성을 유지하면서 온난화 완화에도 도움이 되는 기술 개발이 요구되고 있다. 수산업의 완화책은 어선의 에너지 절약 기술 등이 추가 되기 때문에 여기서는 농업과 임업 분야의 생태계 관리에 의한 완화책에 대해 설명하였다.

농업과 임업 분야의 생태계 관리에 의한 완화책에 대해 설명하였다.

(1) 농업: 논이나 소에서의 온실효과 가스 발생 억제

농업분야에서는 농경지인 토양과 축산부문이 온실효과 가스의 배출원이 되는 성격을 갖고 있다. 논은 담수 상태에서는 메탄을 마른 상태에서는 아산화질소가 배출되어 이에 대한 대책이 연구되고 있다.

IPCC 가이드라인(2006)에서는 ① 메탄은 논에서는 발생하지만 밭에서는 발생하지 않는 것 ② 같은 논이라도 중간낙수를 하면 항상 물을 덮어놓은(상시 담수) 상태보다 배출량이 줄어드는 것 ③ 아산화질소는 논과 밭 양쪽에서 발생하며, 질소비료의 투입량이 많을수록 배출량이 증가하며, 논이 밭보다도 배출량이 적은 것으로 나타났다. 구체적으로는 논외의 중간낙수(10일간) 및 그에 계속해서 약 1개월 반의 간단관수(3일간 물을 가두고, 2일간 물을 빼는 사이클을 반복한다)와 9kg/10a 정도의 질소시비를 하면, 상시 담수에 비해 토양 속의 메탄 발생균의 활동이 저하되어 메탄 발생이 큰 폭으로 감소한다. 즉 논외의 물 관리를 위해 자주하는 방법인 중간낙수를 적절하게 사용하면 상시 담수에 비해 온실효과 가스 발생을 줄일 수 있다는 것을 알 수 있다.

소 등의 반추동물의 위에서 나오는 메탄은 사료 연구를 통해 배출을 억제하는 기술도 개발되었다. 예를 들어 지방을 많이 포함한 맥주 찌꺼기나 쌀겨를 배합 사료의 12% 정도 첨가하면 육용우의 경우 메탄 발생량을 약 10% 억제할 수 있다는 연구 사례가 있다.

(2) 임업·삼림·목재로써의 탄소축적을 높인다

삼림·목재에 의한 온난화의 완화책으로서 IPCC 제4차 평가보고서 제1작업부회 보고에서는 ① 삼림면적의 유지·증가 ② 삼림축적의 유지·증가 ③ 목재제품의 활용(탄소축적의 증가, 고에너지 재료나 화석연료의 대체)을 들고 있다. 이 중에서 ①에 해당하는 삼림면적의 확대를 기대할 수 없는 일본에서는 ②와 ③인 삼림이나 목재 제품인 주택에의 탄소축적의 유지·증가가 효과적인 완화책이라고 할 수 있다. 여기서 주택의 등장이 의외라고 생각하는 사람도 있겠지만 일본 전체의 주택에 잠재되어 있는 탄소의 양은 일본 전체 삼림이 저장하고 있는 탄소의 약 18%에 해당한다는 결과도 있는 것처럼 다량의 탄소가 주택에 저장되어 있다. 독립행정법인 삼림통합연구소에서는 일본의 국가삼림자원 데이터베이스와 함께 삼림부문과 주택부문에 맞춘 정책 시나리오에 기초하여 국가 수준의 탄소흡수량을 계산하는 모델을 개발했다. 여기에 기초해 흡수량을 유지 증가하기 위해서는 복층림을 포함한 삼림 관리와 주택의 내구(耐久)년수의 증가가 효과적이라는 것이 밝혀졌다.

또한 목재 제품의 활용으로는 공장 폐자재나 산림 잔재 등 이용하지 않은 목질 자원을 이용한 바이오에탄올화 등의 기술 개발이 추진되고 있다.

6. 결론

앞으로의 지구 온난화 대책은 지금까지 해온 ‘완화책’인 농림수산업 분야의 온실효과 가스 배출을 가능한 한 적게 하기 위한 연구 개발과 온난화의 진행은 어느

정도 피할 수 없다는 관점에서 '적응책'의 연구개발을 동시에 진행할 필요가 있다. 농림수산업에서는 이에 입각해서 2007년 6월 21일 '농림수산업 지구온난화 대책 통합 전략'을 발표했다. 그리고 그 안에서 '지구 온난화 대책 연구'의 추진에 있어서 완화책, 적응책, 환경평가 3가지에 대한 각각의 안건을 다음과 같은 사항에 중점을 두고 추진해갈 것을 설명하고 있다.

완화책으로는 CO₂ 등의 온실효과 가스의 발생·흡수 메커니즘의 해명, 모델화 등의 기초적인 연구와 이것들을 기초로 온실효과 가스 배출을 가능한 한 억제하고 삼림이나 토양에의 탄소 흡수를 확보하는 농림수산업생태계의 관리 기술을 개발해 가는 것이 중요하다. 이때에 LCA(Life Cycle Assessment)의 방법을 활용한 탄소수지 평가를 통해, 농법이나 생태계의 관리 수법 전체에서의 온실효과 가스 배출 삭감으로 연결되는 기술을 개발해야 한다. 또한 농림수산업의 생산성 측면에서도 고려할 필요가 있다.

적응책의 연구로는 우선 현재 발생하고 있는 고온장해 등의 농작물 피해에 대해 생산 현장에서 당면한 적응책을 평가한 후, 농업생산 현장의 니즈(needs)를 기반으로 고온내성 품종의 육성과 생산안정 기술 개선 등의 기술 개발을 추진해 가는 것이 필요하다.

그리고 앞으로의 지구온난화 진행이 농림수산업에 미치는 영향의 정도 및 내용, 그 시기 등에 대해 지금까지의 연구 성과를 발판으로 보다 정밀한 영향 평가(미래 예측)를 실시하고 이 평가에 기초해 지구 온난화 적응책의 연구를 계획적으로 추진해가야 할 것이다. 미래의 작물 전환 등 근본적인 적응책을 재고하는 기초적인 연구로서, 품질이나 수량의 저하 등 지구 온난화 영향에 관계된 생리적 메커니즘과 유전 원인의 해명을 비롯하여 앞으로의 새로운 품종이나 생산안정 기술 개발에 이바지하는 기술의 축적을 진행해 가는 것도 필요하다. 현재부터 먼 미래까지 각각의 단계에서 필요한 적응책을 계획적으로 개발할 때에는 그 기술이 온실효과 가스 배출 삭감에 도움이 되는지에 대한 관점에서도 평가해야 할 것이다. 즉 적응책과 완화책은 각각의 것이 아니라 양립하는 기술을 개발해야 하는 것이다.

지구 온난화에 대한 대책은 '완화책'과 '적응책'의 연구개발을 동시에 진행해야 한다.

참고문헌

일본 농림수산업 기술회의 사무국 "Impact of Global Warming on Agriculture Forestry and Fisheries and Possible Countermeasures in Japan"(2007).