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

杉浦俊彦^{1*}・横沢正幸²

¹ 農業・生物系特定産業技術研究機構果樹研究所 305-8605 つくば市藤本

² 農業環境技術研究所 305-8604 つくば市観音台

Impact of Global Warming on Environments for Apple and Satsuma Mandarin Production Estimated from Changes of the Annual Mean Temperature

Toshihiko Sugiura^{1*} and Masayuki Yokozawa²

¹ National Institute of Fruit Tree Science, Tsukuba, Ibaraki 305-8605

² National Institute for Agro-Environmental Sciences, Tsukuba, Ibaraki 305-8604

Summary

This study was undertaken to assess the impact of global warming on the production in Japan of apple (*Malus domestica* Borkh.) and satsuma mandarin (*Citrus unshiu* Marc.). The annual mean temperature was used to simulate possible changes in favorable regions for the cultivation of apple and satsuma mandarin. The temperature ranges assumed to be appropriate for fruit production were 6–14 °C and 7–13 °C for apples and 15–18 °C for satsuma mandarins, respectively. The database of “Climate Change Mesh Data (Japan)” was used to calculate annual mean temperatures under the climate change scenario, derived from four Atmosphere–Ocean General Circulation Models (AOGCM) at all 10 × 10 km mesh. It was predicted that the favorable regions to cultivate apples and satsuma mandarins will gradually move northward. In 2060’s the plains of central Tohoku will be unfavorable for apple cultivation, while most of Hokkaido will be suitable. The plains of northern Tohoku are predicted to attain the annual mean temperatures higher than those of the current main producing districts. By 2060’s, the favorable areas for satsuma mandarin production will possibly move from the southern coastal sites to inland areas of western and southern Japan, the plains of Kanto and the littoral zones of the Japan Sea in the central and western Japan and in southern Tohoku. Therefore, global warming will greatly affect the cultivation environment of apples and satsuma mandarins in Japan by the middle of the 21st century.

Key Word: climate change, mesh climate data, producing district, suitable regions.

緒 言

二酸化炭素など大気中の温室効果ガス濃度上昇に起因する地球温暖化が懸念されている。1988年に国連内に設置された IPCC(気候変動に関する政府間パネル)は 2001 年に刊行した第 3 次評価報告書の中で、全球の年平均地上気温が 1990 年と比較して 2100 年には 1.4 °C ~5.8 °C 上昇すること、その上昇幅には地域差があることなどを予想している(野田ら, 2001)。IPCC などの報告を受けて、水稻をはじめとしたわが国における穀物生産については、

すでに温暖化の影響評価のため全球気候モデルによる気候変動予測値と、作物の生育過程と気象との関係を表した機構的作物モデルを組み合わせたシミュレーションが行なわれ、いくつかの予測結果が報告されている(林, 2001; Horie ら, 1995; 清野, 1995; 米村ら, 1998)。しかし、果樹など園芸作物ではこのような温暖化の影響を地域別、時系列的に推測した研究はほとんど行われていないのが現状である。

北日本のリンゴ、西南暖地のカンキツなど栽培地域が比較的明確に分化していることから推測できるように、果樹は気候への依存度が高い作物である。また一年生作物は作期を変更することにより気候変動から受ける影響はある程度、緩和できるが、永年作物である果樹は作期移動が困難である。これらのことから果樹は気候変動に対して最も脆弱な作物のひとつである可能性がある。さら

2002 年 12 月 19 日 受付。2003 年 7 月 11 日 受理。

本研究の概要は園芸学会平成 14 年度春季大会および平成 14 年度秋季大会で発表した。

農業技術研究機構 果樹研究所業績番号第 1311 号。

*Corresponding author.

に果樹は一度、栽培されると容易に植え替えができないことを考慮すると、今世紀に予測される温暖化の影響が現れる時期やその規模などを評価することは急務であると考えられる。

穀物への影響予測のシミュレーションで使用されているような作物の生育を生理的なプロセスの積み上げによって表現する機構的モデルは、果樹では自発休眠覚醒、開花の予測などで断片的に開発が試みられているが、果樹の生活環全体を統一的にシミュレートできるモデルは現時点では見あたらない。そこで本研究では、果樹の適地判定で用いられてきた年平均気温の変動をもとに、リンゴおよびウンシュウミカンの生産に及ぼす温暖化の影響を検討し、対策、予防策などを含めた今後の研究推進のための端緒とすることを目的とした。

材料および方法

1. 対象温度域

本研究では、栽培に有利な年平均気温の温度域として、リンゴにおいては6~14℃、ウンシュウミカンにおいては15~18℃を仮定した。これは「果樹農業振興基本方針」(農林水産省, 2000)において、高品質な果実生産を確実に図る観点から、果樹の栽培に適する地域に係る年平均気温として示されている温度域である。またリンゴについては、これよりやや狭い7~13℃の温度域も解析対象に含めた。

2. 気候データおよび解析手順

将来の気候の予測データとして「気候変化メッシュデータ(日本)」(Yokozawaら, 2003)を解析に用いた。これは気候シナリオとして東京大学気候システム研究センター(CCSR)と国立環境研究所(NIES)のCCSR/NIESモデル、カナダ気候モデル・解析センター(CCCma)のCGCM1モデル、オーストラリアCSIROのCSIRO-Mk2モデルおよびドイツ気象センターのECHAM4/OPYC3モデルの4つの大気・海洋循環結合モデル(AOGCM)を採用し、それらの予測結果を約10×10 km単位のメッシュ(2次メッシュ)化したものである。このデータベース内の2020~2060年代における平均気温の予測値から各メッシュ、年代ごとに4つの気候シナリオによる予測値を平均し、かつ12か月の値を平均して年平均気温を求め、さらにこの計算値から所定の温度域に該当するメッシュを抽出し、地図上に図示するプログラムを作成し、解析した。なお気温の予測値の上昇速度は地域間や年代間、気候シナリオ間にばらつきがあるが、すべてを平均すると2000年代から2060年代までの平均上昇速度は0.37℃/10年である。

現在の気候については「メッシュ気候値2000」(気象庁, 2002)における年平均気温を用いた。これは1971年~2000年における気象庁の観測値をもとに、わが国の気候を約1×1 km単位のメッシュ(3次メッシュ)ごとに推定

したものである。

結 果

1. リンゴ

現在の年平均気温が6~14℃に相当する地域は北海道の北部と東部および西南暖地の平野部を除く広い地域に広がっている(第1図a)。4つの気候シナリオの平均値から推定すると、2020年代になると北海道の道北、道東を含めて平野部全域が6℃以上となり、2040年代には東北南部の平野部が14℃以上となる。2060年代には東北中部の平野部まで14℃以上の地域となる一方、北海道は内陸部の一部を除いてほとんどの地域で6~14℃となり、リンゴが栽培しやすくなると予想された(第1図b, c, d)。現在の年平均気温が6~14℃に相当する地域は第1図aのように現在のリンゴの主な生産地よりもかなり広いと考えられたため、それよりも狭い温度域である7~13℃についても検討した。現在の年平均気温が7~13℃に相当する地域は、道南、東北のほぼ全域、長野、北関東など現在のリンゴの主産地と概ね一致している(第2図a)。2020年代には沿岸部は東北中部まで13℃以上となり、2040年代には東北中部の盆地でも13℃以上となる。2060年代には東北地方の平野部のほぼ全域が13℃以上の地域になって、わが国の現在のリンゴ主力産地の多くが、暖地リンゴの産地と同程度の気温になる可能性が示された(第2図b, c, d)。

2. ウンシュウミカン

現在の年平均気温が15~18℃となる地域は南関東以南の太平洋・瀬戸内海の沿岸部および九州の沿岸部が主に該当し、ウンシュウミカンの主産地とおおむね一致している(第3図a)。4つの気候シナリオの平均値から推定すると、年平均気温15℃以上となる地域は2020年代には山陰地方を中心とした本州の日本海側にも出現し、2040年代には関東および北陸の平野部全域が15℃以上となり、2060年代には南東北の沿岸部まで広がる(第3図b, c, d)。

一方、南西諸島など島嶼部を除くと現在、18℃以上の地域は九州の南端部のみであるが、この地域は徐々に北上し、2060年代には現在のウンシュウミカン主産地のほとんどが18℃以上の温度域に含まれ、現在のタンカン等中晩柑の産地の気温と同等かより高温となる可能性が示された。

考 察

果樹の適地判定に関する研究は、1960年代を中心としたわが国の果樹生産が急速に拡大していく過程で進められてきた。本研究は年平均気温を取り上げたが、その他にもいくつかの指標が適地判定に利用されている。この中で生育期(4月から10月)の平均気温(小林, 1978)、温度指数(高谷, 1965)、積算気温(中川, 1968)などは、果

Fig. 1. Spatial distribution of favorable regions for apple production, assuming that the annual mean temperature appropriate for apples ranges 6–14 °C, under (a) current climate (1971–2000), (b) climate in 2020's, (c) climate in 2040's, (d) climate in 2060's, (e) 1 °C increase from (d), and (f) 1 °C decrease from (d).

実が正常に生育，成熟するためにはどのくらいの期間および気温が最低必要であるかを示す指標であり，主に北限の推定に有効なものである．また果樹は永年作物であるので，生育期の温度のみならず，厳冬の低温の極温が北限の推定には必要な指標である．樹種・品種にはそれぞれ固有の耐凍性があり（黒田，1988），また冬季に果実があるカンキツでは果実の低温限界も適地判定の指標と

して必要である（中川ら，1965）．一方，南限については，樹種・品種に固有の低温要求性を満足させる低温が必要条件のひとつとなっている．またリンゴ（Albrigo・Childers, 1970; Creasy, 1968; 苦名・山田, 1988; 山田ら, 1988）やウンシュウミカン（井上・銭, 1988; 栗原, 1973; 宇都宮ら, 1982）は高温によって果皮の着色が抑制されることから，着色期の気温が南限を決める重要な要因のひ

Fig. 2. Spatial distribution of favorable regions for apple production, assuming that the annual mean temperature appropriate for apples ranges 7–13 °C, under (a) current climate (1971–2000), (b) climate in 2020's, (c) climate in 2040's, (d) climate in 2060's, (e) 1 °C increase from (d), and (f) 1 °C decrease from (d).

とつである。またリンゴの場合、暖地で発生する花芽不足、新梢の徒長および病虫害の多発といった問題(水谷ら, 1984)も南限を決める要素として考えられる。

本研究では、北限および南限双方の推定が同時にできる比較的簡便な指標として年平均気温を用いたが、今後、より詳細な予測を行っていく上で、上記にあげた果実生育期間の温量、着色期の低温、厳冬期の低温の極温、芽

の低温要求性等の果樹栽培に必要な条件を網羅的にかつ慎重に検討していくことが肝要である。さらに温度だけでなく、降水量、日射量、二酸化炭素濃度など、果樹の生育に深く関わる気象要素も温暖化に伴い変動していくことが推測されており、これらの変動も加味した予測が必要である。

また将来の栽培適地判定を行おうとする場合、これら

Fig. 3. Spatial distribution of favorable regions for satsuma mandarin production, assuming that the annual mean temperature appropriate for satsuma mandarins ranges 15–18 °C, under (a) current climate (1971–2000), (b) climate in 2020's, (c) climate in 2040's, (d) climate in 2060's, (e) 1 °C increase from (d), and (f) 1 °C decrease from (d).

の北限、南限に関わる要素をそれぞれ独立に検討するだけでは不十分である。例えば、温暖化によって開花期が前進すれば、果実の着色期、成熟期、休眠導入期、耐凍性の獲得時期なども変化する可能性があり、その相互の関係も検討する必要がある。水稻など穀物の予測では機構的生育モデルを活用してシミュレーションを行っている

る。このため、温暖化に伴い、播種期が前進した場合の予測なども行われている。果樹では自発休眠覚醒(杉浦・本條, 1997; Tamura ら, 1997), 開花(小野ら, 1988; Sugiura・Honjo, 1997), 果実肥大(杉浦・本條, 1996)などの機構的生育モデルは断片的に開発されているが、まだ果樹の生活環全体を統合的にシミュレーションするに

は不十分であり、今後、開発が必要な分野である。

果樹の将来の生産予測の精度を考えた場合、適地判定方法の精度と並んで重要なのは気候変化の予測誤差の問題である。IPCCが第3次評価報告書の中で予測した2100年までの地上気温の全球平均値の上昇は1.4℃から5.8℃であり、その予測にはかなりの幅がある。この推定幅は多数の大気・海洋循環結合モデルによって予測した結果のばらつきである。IPCCでは全球平均の他に、地域別の年平均気温の上昇速度およびその予測の幅を標準偏差として公表している。これによるとわが国周辺の今後の年平均気温の上昇速度は4~5℃/100年であり、その標準偏差は約2℃である(野田ら, 2001)。このうち、年平均気温の上昇速度は本研究で使用した4シナリオの平均値と同程度である。本研究で示した2060年代の値は今から60年後の予測であるので、IPCC発表の標準偏差から推定すると、その予測値のモデル間の幅は±1.2℃程度がみこまれる。そこでこの予測の幅がどの程度のものであるかを把握するために、2060年代の温度分布予測値に単純に±1℃を加算した場合の適地の分布を示した(第1, 2, 3図e, f)。温度上昇が大きい場合と小さい場合ではかなりの差があるが、後者の場合でも現在の温度環境とは大きな差が認められた。また2060年代における標準の予測値(第1, 2, 3図d)と同程度の温度分布になる時期を予測の幅から推察すると、早いシナリオでは2030年代、遅いシナリオでは2090年代ということになる。

次に、本研究では、リンゴの主産地の年平均気温に近い7~13℃を解析対象としたが、リンゴの2大生産県である青森あるいは長野などくに競争力の高い地域の温度域がどこまで北上するかを検討した。理科年表(国立天文台, 2001)によるとこれらの地域における年平均気温は10.1℃(青森市)あるいは11.7℃(長野市)であり、いずれも12℃以下である。そこで、とくに競争力の高い地域は年平均気温12℃以下である考えることができる。一方、第2図eにおいて赤で図示した地域は、2060年代の温度分布予測値に単純に1℃を加算した場合の7~13℃の分布であるが、これは2060年代の温度分布予測値における6~12℃の分布と同値である。したがって第2図eで読み取れるリンゴ適地の南限は2060年代におけるとくに競争力の高い地域の南限と考えることができる。すなわち2060年代の本州ではとくに競争力の高い地域と等しい温度となる地域は本州北部でも高冷地を除いて皆無となることが予想される。

同様に、本研究では、ウンシュウミカンの主産地の年平均気温に近い15~18℃を解析対象としたが、ウンシュウミカンの3大生産県である静岡、和歌山、愛媛地域における年平均気温は16.3℃(静岡市)、16.4℃(和歌山市)あるいは16.1℃(松山市)である。このことから競争力の高い地域の年平均気温は17℃以下であると考えることができる。第3図eにおいて赤で図示した地域は、2060年

代の温度分布予測値に単純に1℃を加算した場合の15~18℃の分布であるが、これは2060年代の温度分布予測値における14~17℃の分布と同値であり、とくに競争力の高い地域の南限が2060年代までに北上する様子を示している。

本研究は、あくまで年平均気温をベースとした簡易な予想である点、および気象の予測の幅が大きい点などから、まだ精度的に十分なものではないが、現段階では比較的妥当な予測値であると考えられる。これらの値から推定すると、予想されている地球温暖化は今世紀半ばまでにわが国の果樹生産環境を大きく変化させる規模のものであり、各地域において生産を持続してゆくための早急な対策が必要であると考えられる。

摘 要

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を年平均気温の変動から推定した。果樹栽培に有利な年平均気温として解析対象とした温度域はリンゴでは6~14℃およびこれよりやや狭い7~13℃、ウンシュウミカンでは15~18℃である。将来の気候の予測データとしては「気候変化メッシュデータ(日本)」を用い、約10×10 km単位のメッシュで解析を行った。その結果、リンゴ、ウンシュウミカンとも栽培に有利な温度帯は年次を追うごとに北上することが予想された。リンゴでは、2060年代には東北中部の平野部までが現在よりも栽培しにくい気候となる可能性が示唆され、東北北部の平野部など現在のリンゴ主力産地の多くが、暖地リンゴの産地と同等の気温になる、一方、北海道はほとんどの地域で栽培しやすくなる可能性が示唆された。ウンシュウミカンでも2060年代には現在の主力産地の多くが現在よりも栽培しにくい気候となる可能性が示唆されるとともに西南暖地の内陸部、日本海および南東北の沿岸部など現在、栽培に不向きな地域で栽培が可能になることが予想された。以上のように地球温暖化は今世紀半ばまでにわが国のリンゴおよびウンシュウミカンの栽培環境を大きく変化させる規模のものである可能性が示された。

謝 辞 本研究のとりまとめにあたりご校閲いただいた農業・生物系特定産業技術研究機構果樹研究所の福元將志企画調整部長に謝意を表します。

引用文献

- Albrigo, L. G. and N. F. Childers. 1970. Effect of succinamic acid, 2-2-dimethyl hydrazide and late-season night temperature on the maturity indices of 'Stayman' apples. J. Amer. Soc. Hort. Sci. 95: 482-484.
- Creasy, L. L. 1968. The role of low temperature in anthocyanin synthesis in 'McIntosh' apples. Proc. Amer. Soc. Hort. Sci. 93: 716-724.
- 林 陽生. 2001. 温暖化が日本の水稻栽培に及ぼす影響. 研

- 究の現状と展望. 農及園. 76: 539-544.
- Horie, T., H. Nakagawa, M. Ohnishi and J. Nakano, 1995. Rice production in Japan under current and future climates. p. 143-164. In: R. B. Matthews, M. J. Kropff, D. Bachelet and H. H. van Laar (eds.) Modelling the impact of climate change on rice in Asia. CAB International, Wallingford, UK.
- 井上 宏・銭 長発. 1988. 生理落果終了後のウンシュウミカン果実の肥大と品質に及ぼす温度の影響. 香川大農学報. 40: 31-36.
- 小林 章. 1978. 果樹園芸大要. 汎論. p. 27-40. 養賢堂. 東京.
- 国立天文台. 2001. 理科年表. 平成 14 年. p. 190-191. 丸善. 東京.
- 栗原昭夫. 1973. 制御環境下における温州ミカン果実の生長反応. Ⅲ. 秋季における昼夜温度日較差が果実の発育ならびに着色・品質に及ぼす影響. 園学雑. 42: 13-21.
- 黒田治之. 1988. 寒冷地果樹の寒害. 北海道農試研究資料. 37: 1-101.
- 水谷房雄・上甲勇仁・広田龍司・門屋一臣・苔名 孝. 1984. 暖地におけるリンゴの生育特性. (1)M7 台のゴールデンデリシャス, ふじ, 紅玉の生育. 愛媛大農場報. 5: 20-31.
- 中川行夫. 1968. 果樹の気象的適地条件に関する研究. (5)世界のブドウ, リンゴ産地の気象解析. 園試報. A7: 111-144.
- 中川行夫・小中原実・角田篤義. 1965. 果樹の気象的適地に関する研究. (2)ナツミカン果実の凍害温度. 農業気象 21: 47-52.
- 野田 彰・磯部英彦・鬼頭昭雄・佐藤康雄・杉 正人・西森基貴・松本 淳. 2001. 気候 (過去の気候変化の解析および気候変化の予測). p. 3-56. 環境省地球温暖化問題検討委員会編. 地球温暖化の日本への影響. 2001.
- 小野裕幸・金野隆光・奥野 隆・浅野聖子. 1988. 日本ナシの催芽・開花まで日数への温度の影響. 農業気象 44: 203-208.
- 清野 豁. 1995. 気候温暖化が我が国の穀物生産に及ぼす影響. 農業気象 51: 131-138.
- 杉浦俊彦・本條 均. 1996. ニホンナシ果実生長の日射および気温からの予測モデルによる実証的研究. 園学雑. 65: 505-512.
- 杉浦俊彦・本條 均. 1997. ニホンナシの自発休眠覚醒と温度の関係説明およびそのモデル化. 農業気象 53: 285-290.
- Sugiura, T. and H. Honjo. 1997. A dynamic model for predicting the flowering date developed using an endodormancy break model and a flower bud development model in Japanese pear. J. Agric. Meteorol. 52: 897-900.
- 高谷 悟. 1965. 果樹の適地適産に関する農業気候学的研究. 第 6 報. 果樹栽培のための日本の気候区分. 気象庁研究時報 17: 494-499.
- Tamura, F., K. Tanabe and A. Itai. 1997. A model for estimating rest completion for 'Nijisseiki' pear. Environ. Control in Biol. 35: 185-189.
- 苔名 孝・山田 寿. 1988. 栽培地を異にしたリンゴ果実の品質と気温との関係. 園学雑. 56: 391-397.
- 宇都宮直樹・山田 寿・片岡郁雄・苔名 孝. 1982. ウンシュウミカン果実の成熟に及ぼす果実温度の影響. 園学雑. 51: 135-141.
- 山田 寿・浜本 清・杉浦 明・苔名 孝. 1988. リンゴ果実の成熟に及ぼす果実温度の影響. 園学雑. 57: 173-177.
- Yokozawa, M., S. Goto, Y. Hayashi and H. Seino. 2003. Mesh climate change data for evaluating climate change impacts in Japan under gradually increasing atmospheric CO₂ concentration. J. Agric. Meteorol. 59: 117-130.
- 米村正一郎・矢島正晴・酒井英光・諸隅正裕. 1998. CO₂ 濃度および温度が変化した条件における日本の水稲収量のメッシュ気候値を用いた推定. 農業気象 54: 235-245.