関 東 の 農 業 気 象

E-Journal

第 5 号

日本農業気象学会　関東支部会誌　電子媒体版

平成 20 年 10 月（２００８）

日本農業気象学会シンポジウム・
日本農業気象学会関東支部(2008 年度例会)

講演要旨集

2008 年 11 月 6-7 日　文部科学省研究交流センター

（茨城県つくば市竹園 2-20-5）

日本農業気象学会関東支部事務局
〒305-8604　茨城県つくば市観音台 3-1-3
農業環境技術研究所　大気環境研究領域

関東の農業気象　E-Journal　第５（2008）　目次

一般研究発表

館林アメダスと群馬農試との気温差(2)

高橋行継　1

無人ヘリコプターのダウンウォッシュとドリフトに関する風洞実験

井上君夫・永井秀幸・渡辺力・須山善美・佐藤富士男　2

ドップラーライダによる林冠上の鉛直風分布の観測

中屋耕・豊田康嗣・橋本 篤・草野洋平　3

ファイトメーターによる温暖化と都市化の影響評価手法の開発

本條均・金原啓一・大谷義夫・杉浦俊彦・青野靖之　4

サクラの満開日を広域で予測するモデルの開発-関東甲信地方への適用-

朝倉利員　5

ベイズ推定による一等米比率変動の気象要因の解析

岡田将誌・飯泉仁之直・林陽生・横沢正幸　6

青果物市町村別生産統計と青果物市況データを用いたキャベツ出荷予測の可能性検討

大原源二・中園江・大野宏之　7

クロロフィル蛍光の誘導期現象を用いた植物の環境ストレス評価-クロレラの塩ストレス-

湯沢友之・山元　明　8

クロロフィル蛍光の誘導期現象を用いた植物の環境ストレス評価-水耕栽培小松菜と土壌栽培ガーベラの塩ストレス-

小松尚子・湯沢友之・山元明　9

Remarkable Promotion of Lettuce Growth by Applying Micro-Bubbles to Hydroponics Solution

朴鍾石・蔵田憲次　10

超音波風速温度計と熱電対温度計により求めた潜熱フラックスの特徴

松岡諒・林陽生　11

ポット植えダイズによる群落スケールと蒸発散量の関係

今久・松岡延浩　12

モンゴル半乾燥草原における生態系呼吸速度の制限要因
中野智子・篠田雅人　13

炭素安定同位体比を用いた C3/C4 混生草原における呼吸成分の分離
濱田洋平・及川武久・村山昌平・宇佐美哲之　14

不均一植生を対象とした炭素安定同位体フラックス測定の問題点
下田星児・村山昌平・岸本（莫）文紅・及川武久　15

水田は大気中アンモニアの発生源か吸収源か：長期観測による実態解明の試み
林健太郎・間野正美・小野圭介・平田竜一・宮田　明　16

シンポジウム『農業気象研究の将来像を探る－研究現場からの問題提起－』

フラックス研究の現状と将来像
平野高司　17

気象予測データを農業に生かす－BLASTAM を例にして－
菅野洋光　18

環境計測制御と ICT を活用した持続的高度施設生産の達成
星岳彦　24

農業気象災害研究と学協会の役割
松岡延浩　30

館林アメダスと農試観測の気温差について

高橋行継（宇都宮大学農学部附属農場）

１．はじめに

アメダスは全国に1300か所余りに設置されており，国内の気象データを得るためには欠かせない存在である．設置場所の選定にあたっては明確な基準があるわけではなく，都市化が進んだ市街地に設置されたり，一方で農村地帯に設置されているなど，周辺環境は大きく異なっていることも多い．このため，目的を考えた上で利用には十分な注意が必要である．今回は前回報告した2002年までのデータにその後5年間を加え，群馬県館林市にあるアメダスと群馬県農業試験場との観測値を比較し，その推移について改めて検討したので報告する．

２．調査方法２．調査方法

調査地点は群馬県館林市にある館林アメダス（以下，アメダス）と群馬県農業試験場東部支場(以下，農試）である．アメダスは市街地南東部にある館林消防署の敷地内にあり，北緯36度14分，東経139度32分，標高は21ｍである．一方，農試は市街地の東端から3kmほど離れた水田地帯にあり，標高は17ｍである．アメダス，農試ともに周辺地域の土地利用状況は20年間ほとんど変化していない．アメダスが運用開始された1987年以降2007年までの21年間の日平均気温，日最高気温，日最低気温の各月の平均値を対象とした．なお，1989～1991年と2003年計4か年のデータは農試観測値に不備や長期期間の欠測がみられたため，検討から除外した．年次別比較と夏作物栽培期間（5～10月）および冬作物栽培期間（11月～翌年5月）に区分した比較も行った．

３．結果及び考察

前回報告と傾向は大きく変わっていない．水田地帯にある農試がアメダスの観測値よりも平均，最高，最低気温共に低い傾向にある．最低気温の差が最も大きいが，その差は徐々に縮小しつつある．また，両地点とも気温の上昇傾向が明らかである．なお，最高気温は1999年前後にその差が最小になった後，再び拡大基調を示す特異な変化を示している．栽培期間別にみると，夏作の最低気温と冬作の最高気温において，両地点の差が縮小しつつある傾向がより顕著である．特に後者ではわずかとはいえ，近年ではアメダスを上回る年次がみられるなど気温差の縮小傾向が目立っている．この事実は農試周辺が水田地帯であるとはいえ，東に数kmしか離れていない館林市街地で発生しているヒートアイランド現象の影響を受けているとも考えられる．特に西寄りの季節風が卓越する冬期に最高気温差が縮小していることは，麦作面積の減少とともに一要因であるかもしれない。

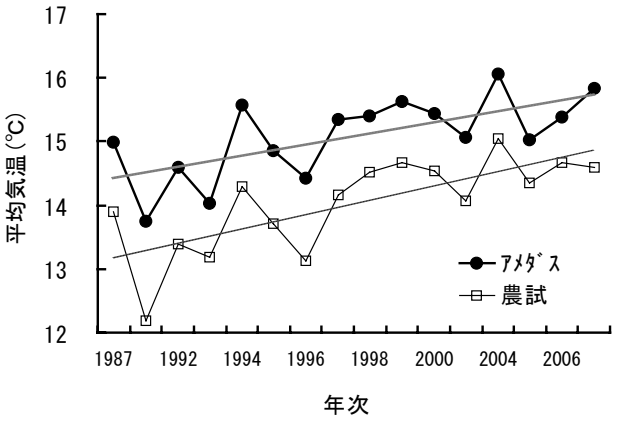


図1　館林アメダスと農試の
年次別平均気温の推移(1987－2007).

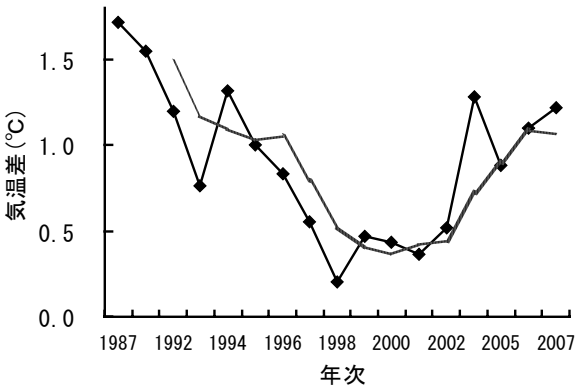


図2　館林アメダスと農試の年次別夏作期間
最高気温差（1987－2007）.

無人ヘリコプターのダウンウォッシュとドリフトに関する風洞実験

°井上君夫（中央農研）・永井秀幸（中央農研）・渡辺　力（北大・低温研）・須山善美（ハザマ技研）・佐藤富士男（ハザマ技研）

はじめに

無人ヘリコプターの主回転翼の直下に発生する下降気流（ダウンウォッシュ）にのせて、薬剤を作物まで運ぶのが航空散布の原理であるが、気流の乱れなどによって作物以外に飛散（ドリフト）する（2008 年度全国大会発表）。薬剤散布の効果や効率を維持しながら、格段のドリフト低減を図るには大気乱流の観点からダウンウォッシュの理論的・実験的研究を行うが必要である。

実験方法

実験は 2008 年の 1～2 月に行われた。本実験では境界層風洞（W2.4×H2×L21m）に並べたゴールドクレスト（300 本）の先端より噴霧器（GT-3）で霧を発生させ、その霧の飛散・付着・落下と風速等との関係が調査された（図 1）。また、森林内外における気流を可視化するために、スモークテストが行われた(図 2)。ゴールドクレストの樹高は約 35cm、LAI は約 4.53 であった。

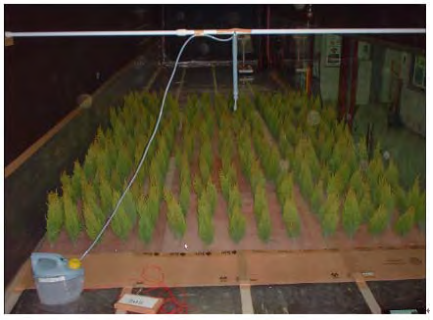


図 1. 森林にみたてたゴールドクレストが境界層風洞内に並べられた。手前に見えるのが噴霧器とノズルである。

図 2. 森林のスモークテスト。風洞の外から撮影された。

結果・考察

1) 森林上に形成される境界層の高さと風速分布、乱れ強さとの関係が詳細に調査された。風速分布は森林がある場合、森林上で 1/7 ベキ乗則、森林内で指数分布を呈する。境界層の高さは森林の高さの約 2 倍にあたる 70～80cm と推定された（図 3,参照）。

2) 森林の先端部から噴霧された霧が所定の位置に落下する割合は風速や噴霧高度･方法によって違ってくる。風速が約 1m/sec で散布高度の 4 倍の範囲に 80～90%が落下したのに対して、上向き噴射（自由落下）ではほとんど所定位置に落下しなかった。

3) 森林に付着する霧水量は葉面積に比例し、約 300 ㎠の葉面積で最大 19.2g が付着すると推定されたが、実際には最大水量に達する遥か以前から林床への落下が始まっていた。

4) 森林の前縁より発生させたスモークは森林表層を上下運動しながら流下するが、その挙動は LES のシミュレーション結果と似通っていた（図 2, 参照）。

5) 図 4 は飛行高度と地面（1m）で受けるダウンウォッシュとの関係で、約 4m が適切な散布高度と判断された。

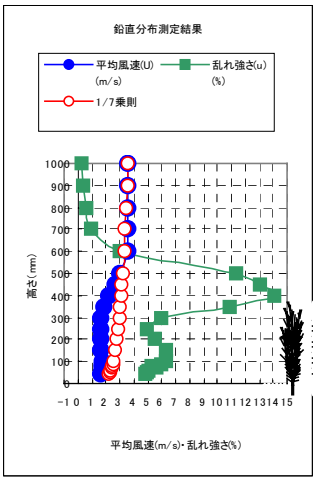


図 3. 風洞実験で示された森林内外の風速分布と乱れ強度の分布。

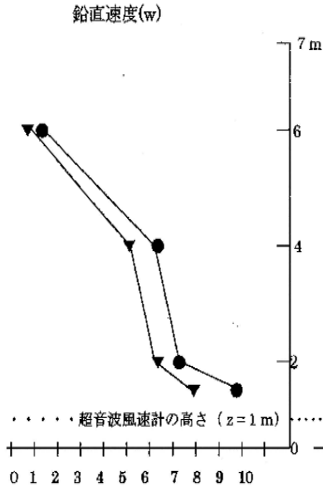


図 4. 無人ヘリコプターのダウンウォッシュ実験から得た鉛直速度分布。

ドップラーライダによる林冠上の鉛直風分布の観測

○中屋 耕、豊田 康嗣、橋本 篤（電中研）、草野 洋平（千葉大）

1. はじめに

光計測であるドップラーライダは、広域な風況を遠隔で観測できる上に、設置の自由度も高いため、新たな知見の獲得が期待できる。本研究では、可搬型のドップラーライダを用いた風観測技術の初期検討として、他の風速観測装置との比較および林冠上の風速鉛直成分の観測を実施した。

観測に用いたドップラーライダ（三菱電機製）は、近赤外のレーザパルスを大気へ送信し、大気中のエアロゾルによる散乱光を受信するコヒーレントドップラーライダ方式で、ドップラー効果によって偏移された受信光からドップラー速度成分を取り出す。最も詳細な距離分解能は 30m である。

2. ドップラーライダと超音波風速計の比較

ドップラーライダの特性を確認するために、従来用いられている風速計と比較検証した。2008 年 3 月 13 日に、標準風速計として、3 次元超音波風向風速計（SAT: DA-600, KAIJO）を、電力中央研究所我孫子地区構内で最も高い建物の屋上（36.7m a.g.l.）に設置し、SAT を挟んで 67 度の方位に、380m および 220m 離れた位置に小型ドップラーライダを配置した。SAT の位置で視線が交差するように設定したうえで、視線の交点に相当するデータと、ドップラーライダおよび SAT の位置から、2 秒平均の風速ベクトルを算出し、0.1 秒インターバルで計測した SAT データの 2 秒平均値と比較した。その結果、SAT およびライダによる風速は、変動の傾向についてはおおむね一致していた（図 1）。また、測定期間全体の平均風速は、ライダで 3.5 ms^{-1}、SAT では 3.4 ms^{-1} でほぼ一致し、ドップラーライダの定量的な信頼性が示されたと言える。

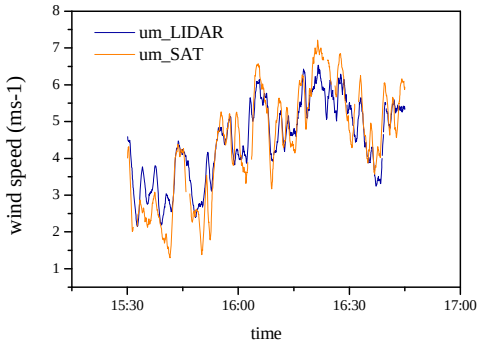


図 1 ドップラーライダおよび SAT の風速時系列（1 分移動平均を図示）

3. 林冠上の風速鉛直成分の連続観測

次に、長野県浅間山東麓の樹高約 17m の落葉広葉樹林において、林冠上の風速鉛直成分プロファイルの観測を試みた。当森林では 28 m のタワーを設置し、乱流フラックス測定を連続的に行っている。観測期間は、2007 年 9 月 27 日 11 時～28 日 9 時の間、上空が葉に覆われていない位置で、小型ドップラーライダの視線を林床から鉛直上向きに固定して風速鉛直成分の観測を行った。図 2 に昼間の典型的な鉛直成分プロファイルの時系列を示す。大気が加熱されて上昇成分が卓越するサーマルが規則的に発生しているのが分かる。また、下降成分が卓越すると、下向きの大気の流れが地表面付近で収束し、林冠上の風速は 5ms^{-1} 付近まで増加する。一方、上昇成分が卓越する状態では風速は 1ms^{-1} 付近まで減少する。ドップラーライダを用いることで、容易に林冠上の広範囲な大気の動的な情報が得られた。

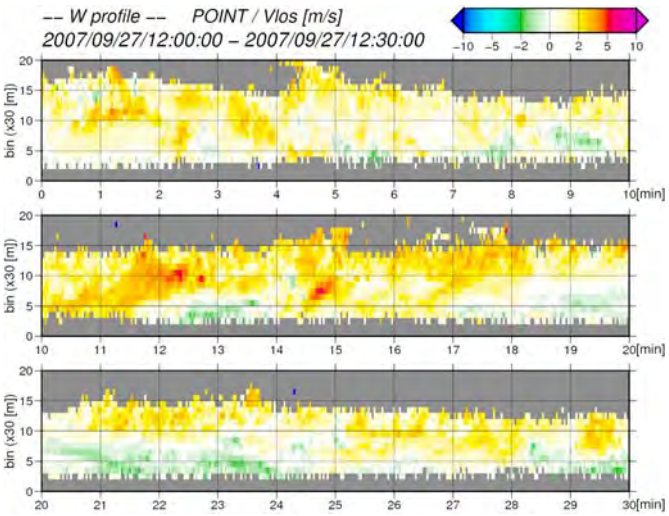


図 2 ドップラーライダによる鉛直風プロファイル（昼間）。鉛直風は、赤：上昇成分、青：下降成分（ms^{-1}）を表す。

ファイトメーターによる温暖化と都市化の影響評価手法の開発

○本條　均[†]・金原啓一[†2]・大谷義夫[†2]・杉浦俊彦[†3]・青野靖之[†4]
（[†]宇都宮大学農学部・[†2]栃木県農業試験場・[†3]独法・果樹研究所・
[†4]大阪府立大学生命環境科学研究科）

果樹生産に関わるものにとって、「開花」現象は一大関心事といえる。花の数が果実数を決め、開花日が収穫日に大きく関与する。落葉果樹には秋から冬にかけての一時的な高温では発芽しないような安全機構（自発休眠）があり、秋冬期の温暖化がおこると必要な低温に十分な時間遭遇しないので休眠が正常に終了せず、発芽や開花の不揃いや生育異常、開花期間の長期化などが起こる。このように温暖化に伴う将来の果樹栽培への影響を考える時、「開花」という現象は寒候期の温暖化の影響を解析するのに有益な情報となる。

本研究では、ニホンナシと桜の開花に関する生態調査資料と、近傍の気象観測所の資料を用いて、冬の寒さにある時間遭遇することが発芽・開花に必要な栄養繁殖クローンであるバラ科植物のニホンナシと桜を対象に、生物季節解析から樹園地を取り巻く温度環境の変動を評価する、植物を測器とする気候変化影響の解析手法の開発に取り組んだ。開花予測モデルと実開花日との推定誤差の変動解析から逆に環境変動を評価しようとするものである。

【資料と解析方法】

ニホンナシ「幸水」について、栃木県農業試験場（宇都宮市；調査期間 1970-2007 年）、栃木県下の４ヶ所の農業改良普及センター（大田原、小山、烏山、佐野；同 1993-2001 年）、下妻市ナシ農家（1972-2001 年）、宇都宮大学附属農場（真岡市；1993-2001 年）の開花調査資料を収集した。気象データと桜の開花情報は、気象庁資料等を用いた。開花予測モデルは、温度変換日数法（小元・青野，1989）と DVI モデル（Sugiura & Honjo, 1997）を使用した。

【結果および考察】

宇都宮市街地の桜「ソメイヨシノ」と郊外のニホンナシ「幸水」の満開日は 10 年で２日程度の前進が起こり、1990 年以降は桜の前進傾向が特に大きく、都市化の進行程度に差異があることが影響しているものと考えられた。

また、宇都宮市における開花日推定誤差の変動を調べると、他の６地点での推定誤差に比較して、1990ー2002 年の変動が異常に大きく、特にニホンナシ「幸水」は栽培環境の変化が殆ど無いにも関わらず、開花推定値が実測値よりも大きく変位したことから、予測に用いる宇都宮気象台の気温が郊外の圃場周辺に比べて、1990 年以降に急激に高温側へ変化したからではと推定された。ただ、2003 年以降の解析では 1990 年以前の状態に戻りつつある。このような変動には、農試圃場東側に 2003 年 3 月から供用開始された宇都宮北道路の堰堤の影響がでているのではないかと推定した。

このように地理的距離が変化しないにも関わらず、実開花日と推定開花日との推定誤差を求めることにより、気象観測点と生物気象観測点を取り巻く経年的な環境変動の影響評価に使用できることが明らかとなり、生物季節現象の長期連続観測の重要・有用性が再確認されたものである。さらにデータの収集・解析を進める予定である。

サクラの満開日を広域で予測するモデルの開発－関東甲信地方への適用－

朝倉利員（農研機構果樹研究所）

1．はじめに 落葉果樹では冬季・早春季の温暖化により、休眠・開花に関係した影響がすでに見られている。このような温暖化に伴う影響の評価や対策技術の適応性評価には、休眠・開花予測モデルが有効である。既存の休眠・開花予測モデルは地域限定でかつその地域の過去の温度幅にしか適用できない場合が多い。そこで、バラ科果樹と特性が同様であると考えられ、長年にわたって全国的に観測データがあるサクラ（ソメイヨシノ）について休眠・開花予測モデルの検討を進めてきた（2007 合同大会、ISAM2008）。しかし、単一モデルでの全国的な適用については不十分であった。ここでは、温度反応曲線や有効温度をさらに検討することにより改良した予測モデルの概要と関東甲信地方への適用結果について報告する。

2．解析データと方法 解析に用いたデータは、気象庁の生物季節観測によるソメイヨシノの満開日及び時別気温であり（満開日：1962～2006 年、気温：1961 年 9 月～2006 年 5 月）、観測点は宇都宮、前橋、水戸、銚子、熊谷、東京、大島（東京都）、横浜、甲府、長野、松本の 11 カ所とした。自発休眠期の温度反応を示すチルユニット曲線は、上に凸型の 2 次関数とし有効温度幅や高温域での打ち消し効果も考慮できるようにした。開花までの有効積算温度の計算式は、シグモイド曲線とし低温域での有効温度を可変できるようにした。有効積算温度の計算は自発休眠期の後期から始まり、他発休眠期の前半までは積算が少なめとなるように別のシグモイド曲線で重み付けした。これら各種の温度反応曲線と低温要求量、有効温度等の定数を組み合わせた多数のモデルを作り、開花までの有効積算温度を計算した。モデルから予測される満開日と実際の満開日との適合度を調べ、単一モデルでRMSEが最小となるような温度反応曲線や定数を探索した。

3．結果と考察 チルユニット曲線は有効温度幅-6 から 14℃で積算チルユニット（低温要求量）を 1450、自発休眠と他発休眠期の移行期間（低温要求量を 1 とすると、約 0.8～1.2 の期間）はシグモイド曲線、満開までの有効積算温度の計算には氷点下を含めた低温域も有効とするシグモイド型曲線とし有効積算温度 6000（GDH）とすると精度が高かった。予測結果の例として図 1 に熊谷の満開日の推移を示した。また、11 地点の全年データについて実測満開日と予測満開日の関係を見ると（図 2）、1：1 の直線に載ることが認められた。単一モデル（同一の計算式と定数）での適合度がRMSE(日)で、宇都宮 2.04、前橋 1.83、水戸 2.27、銚子 2.31、熊谷 2.37、東京 2.75、大島 3.31、横浜 2.20、甲府 2.22、長野 2.26、松本 2.42 となり、関東甲信地方の幅広い地域に 2～3 日程度の誤差で適用できることが認められた。

4．まとめ 関東甲信地方の比較的幅広い地域に適用できるサクラの開花予測モデルを作成した。今後、全国への適用や温暖化影響の評価について解析を進める必要がある。

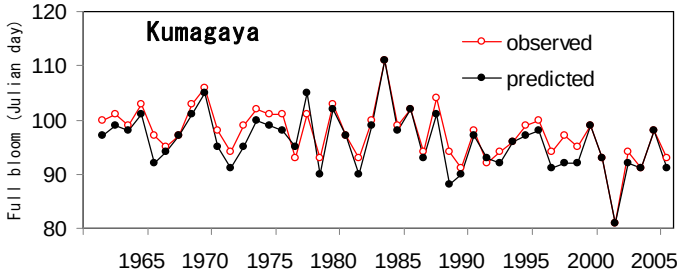


図 1 熊谷におけるサクラの実測・予測満開日の推移

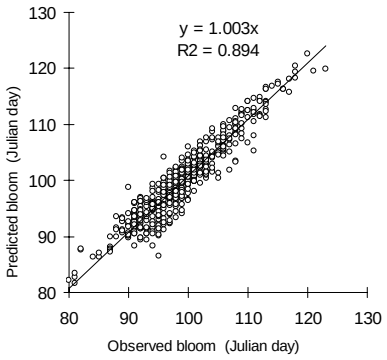


図 2 関東甲信地方 11 地点のサクラの実測満開日と予測満開日の関係

ベイズ推定による一等米比率変動の気象要因の解析

○岡田 将誌（筑波大学大学院）・飯泉 仁之直（農業環境技術研究所）
林 陽生（筑波大学）・横沢 正幸（農業環境技術研究所）

1. はじめに

近年、西日本を中心に登熟期の高温によりコメ品質の低下が問題になっている（森田,2008）。品質低下の要因には登熟期の高温に加え、寡照、品種特性、栽培管理などが指摘されているが、そのメカニズムには依然として不明な点も多い。本研究では、コメ品質の指標として県平均一等米比率を用い、コメ品質の年々変動及び近年の減少トレンドに対する気象要因（日最低気温と日射量）の影響を定量的に評価した。

2. 解析方法・データ

気象条件が一等米比率に及ぼす影響を評価するため、以下の統計モデルを構築し、その 5 つのパラメータをベイズ推定法によって決定した。本モデルでは県平均一等米比率 Q (%)は登熟期の日最低気温 T_i (℃)と日積算全天日射量 SR_i (MJ/m²/day)に依存すると仮定した。

$$Q = \alpha\delta + \beta SR + \gamma \text{ , (1)} \quad \delta = \sum_{i=1}^{M} f_i\left(T_i - T_b\right) \text{, (2)} \quad SR = \sum_{i=1}^{M} SR_i \text{ , (3)} \quad f_i = 1 - \frac{1}{1+\exp(b-i)} \text{ . (4)}$$

δ は高温登熟量指数(℃day)であり、中川ら(2008)を参照した。また、T_b:基準温度, f_i:出穂後 i 日目の高温の相対的効果, M :登熟日数, T_i (SR_i):出穂後 i 日目の日最低気温(日積算全天日射量), SR :登熟期間の積算日射量, α , β , γ , b , T_b:パラメータである。構築したモデルは、データが得られた 26 年間(1979-2004)から冷害・風水害が顕著な年を除いたうえで、ヒノヒカリの作付面積率が各府県の一位となった年及び府県に適用した。また、推定したパラメータ値に基づいて高温登熟量指数と登熟期間の積算日射量の一等米比率に対する弾力性解析を行った。一等米比率及び出穂・収穫最盛期、品種別作付面積率データは作物統計から得た。気象データはメッシュアメダス（清野, 1993）を用いた。

3. 結果と考察

図 1 は一等米比率のモデル再現値と観測値を比較した例である。一等米比率の年々変動及び 2001 年以降の低下トレンドをほぼ比較的良く再現できている。これは、品種を限定したうえで高温年を丁寧に抽出すれば、一等米比率の変動を登熟期の日最低気温と日射量によってある程度、説明できることを示唆する。熊本県における δ と SR の一等米比率に対する弾力性はそれぞれ、-0.54、+0.79 となった。弾力性は δ または SR の 1%の変化に相当する一等米比率の変化率(%)を示し、符号が正(負)であれば一等米比率の増加(低下)を意味する。推定されたパラメータの符号は河津ら(2007)の結果と整合的であるが、本研究では一等米比率の変動には日最低気温より積算日射量の寄与がより大きいことが示唆された。

実際、西日本では近年、日射量の減少傾向が観測データから見られる。本研究の解析をより詳細なデータに適用することで、日射と品質との関係を解明することができると思われる。また、気象要因に加え、品種特性や栽培管理などを考慮した統合的な品質低下メカニズムの解明が求められる。

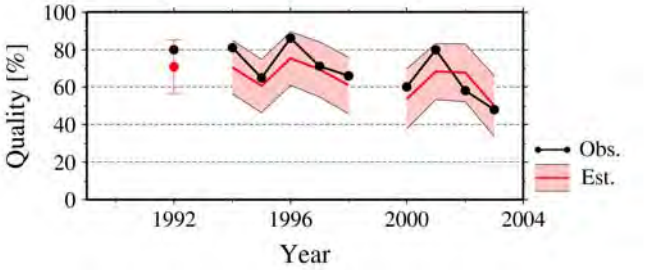


図 1 熊本県における一等米比率の観測値(黒線)とモデルによる再現値(赤線: アンサンブル平均, 赤領域: 平均±1σ)

謝辞

本研究は、環境省の地球環境総合推進費(S-4)の支援により実施された。

参考文献

・河津ら, 2007: *日作紀*, **76**, 423-432.
・清野, 1993: *農業気象*, **48**, 379-383.
・中川ら, 2008: *日作紀*, **77(別 1)**, 148-149.
・森田, 2008: *日作紀*, **77**, 1-12.

青果物市町村別生産統計と青果物市況データを用いたキャベツ出荷予測の可能性

○大原源二・中園　江・大野宏之（中央農研センター）

はじめに

気象の年々変動の激化や温暖化等の影響を受けて露地野菜の供給が不安定化して、生産予測や適応技術の開発が大きな課題となっているが、その生産実態は意外に知られず、予測が困難なのが現実である。こうしたことから、キャベツを例にして、既存の資料からその実態を解明し、出荷予測が可能か検討した。

方法及び結果と考察

従来の統計モデルでは産地作型が特定できず､生育予測モデルは実験結果をうまく説明できても、現実の生産統計を説明することは困難である。そこで、青果物市町村別生産統計（年度毎に、市町村別季節別の作付面積、収穫量、収穫量を調査・記載）と青果物市況データ（地方を含めた中央卸売市場への入荷量、販売単価等を日毎に県別に集計・記載）を用いて生産の実態を調査した。その結果、季節毎に産地は県の特定の地域に固まっていることが明らかになった。また、同一県内に多数の産地があると産地毎の出荷量を復元することは困難になるが、市況データの県合計のほとんどを特定の地域が占めるために、生産統計と市況データから週毎の出荷量と産地を特定可能であることが明らかになった。そして、生育経過の観察の結果、結球肥大期に入ると群落の受光体勢がほぼ変わらないことが確認された。そこで、平成元年から平成 18 年産の各産地の出荷ピークを中心とする 4 週間分の収穫に対して、年度毎の結球肥大期の気象をリアルタイムメッシュから推定し、それと季節別 10a 当たり収量との関係について調査した。結球開始期は、キャベツ 43 品種の発育速度の平均値を用いて、DVI が 0.6 となる時期を収穫期から逆算して推定し、産地の位置として市町村役場周辺 11km 四方の領域を設定した。この期間は、一般に収量に対して気象環境が大きく影響するといわれている。単純に気温や日射と収量との関係を調査すると相関は低かった（図１）。しかし、日射変換モデルの簡略解に基づき、収量を結経肥大期の積算日射量で除して、気温や積算日射との相関を調査すると高い相関が得られた（図２）。収穫期に比べて定植期の年次変動は小さいと期待されるので、発育段階予測モデルを併用して、市況データから定植パターンを推定することで、収穫期・出荷量をある程度予測できると期待される。

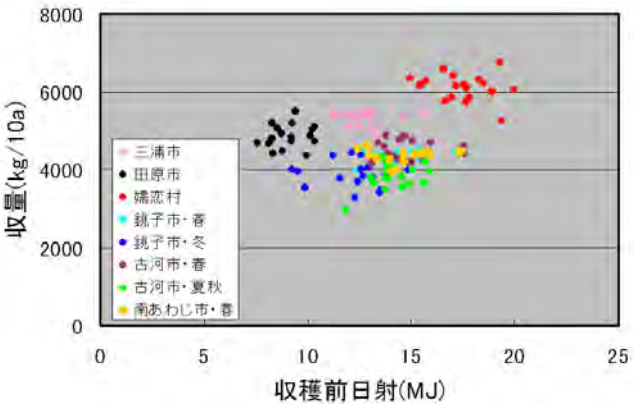


図１　結球肥大期積算日射量と反当収量

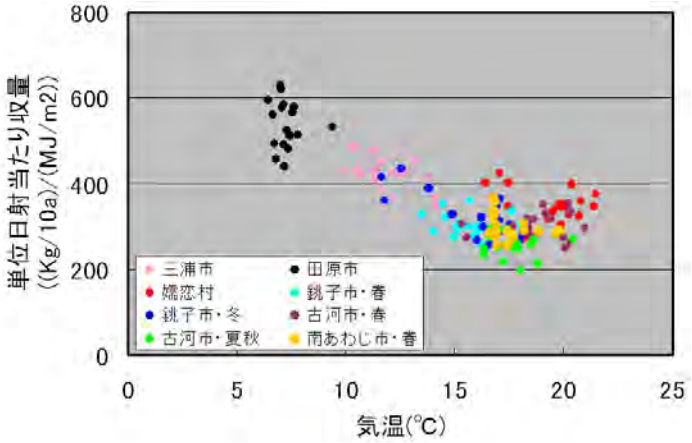


図２　結球肥大期単位日射当たり収量と期間平均気温

クロロフィル蛍光の誘導期現象を用いた植物の環境ストレス評価
-クロレラの塩ストレス-

○湯沢　友之　山元　明（東京工科大学）

【はじめに】

植物障害診断の方法として、非破壊で簡便に測定できる蛍光測定法が優れている。しかし実際に野外で蛍光測定を行うには未検討の要因が多い。本研究では安価で扱いやすい LED を励起源とした誘導期現象方式を軸に、障害診断の基礎技術を確立する事を目指した。試料として高等植物と対比させて単細胞生物の藻類を対象として、淡水生クロレラと海水で生育するナンノクロロプシス（以下、海水クロレラ）に塩ストレスを与えて測定を行い、蛍光とストレスの相関を明瞭に見出す事を目的とした。

【方法】

試料として淡水生クロレラは 24 時間培養したものを、海水クロレラは市販品（㈱日海センター製）を使用した。20 分間の暗処理を行った試料 10ml に食塩水 10ml を加え、懸濁液の NaCl 濃度が 0M（海水クロレラは 0M の代わりに 0.25M ）,0.5M,1M になるように与えた。長期的反応を見るため蛍光強度を 1 分間隔 60 分測定する実験（以下、Long 実験）および、短期間の反応を細かく見るため 1 秒間隔 5 分測定する実験（以下、Short 実験）を別々に行った。紫色 LED（λ = 410 nm）×5 個を励起光源とし、分光器（PMA-11,浜松ホトニクス)を使用して、蛍光スペクトルの経時変化を測定した。なお蛍光の評価方法として、波長 745nm における蛍光強度、波長 685nm との蛍光強度比(F685/F745)を用いた。また光合成機能の低下を蛍光以外のパラメータでも見るため、long 実験時に CO_2/H_2O アナライザー(LI-840,LI-COR,Inc)を用いて、CO_2濃度の変化を測定した。

【結果と考察】

図 1 に淡水クロレラ、海水クロレラの蛍光強度の経時変化を示す。両クロレラ共に NaCl 濃度が上昇すると、淡水クロレラでは 5 秒付近、海水クロレラでは 180 秒間までに、蛍光強度の初期の減衰が抑えられた。ストレスにより誘導期現象の初期の酸化還元反応に異常が生じ、蛍光強度の減衰が抑えられたものと考えられる。また蛍光強度比はストレスにより低下した。この理由はストレスによりクロロフィル濃度が低下した事によるものと推察される。CO_2 濃度の変化からも、ストレスにより光合成機能の低下が示された。また Short 実験でストレスの影響が短時間に見られる事から、蛍光パラメータの測定が早期診断に有効である事が示された。

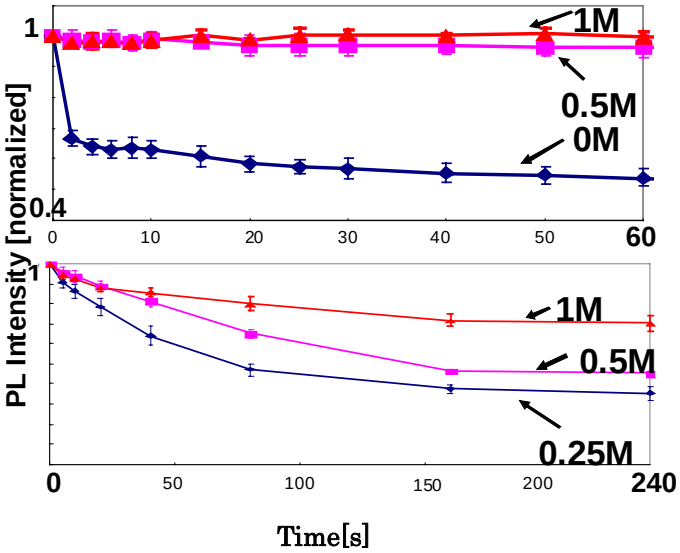


図 1　Short 実験、波長 745nm の発光強度の経時変化。初期値で規格化。上図は淡水クロレラ、下図は海水クロレラ

【まとめ】

(1)　蛍光特性と塩ストレスの間に明瞭な相関が見出された。

(2)　淡水生クロレラは、NaCl 濃度 0.5, 1 M で強いストレスを受けている。

(3)　海水クロレラは生育濃度の 0.5M を好んでいるわけではなく、適応しているに過ぎない。

クロロフィル蛍光の誘導期現象を用いた植物の環境ストレス評価
-水耕栽培小松菜と土壌栽培ガーベラの塩ストレス-

○小松　尚子　湯沢　友之　山元　明（東京工科大学）

【はじめに】

クロロフィル蛍光測定による植物の光合成システムの効率を検出する方法は、PAM などを除いて、ほとんどが実用化されていない。また、PAM の装置は高価であるため、より安価なセンシング技術の開発が望ましいと考えた。試料の個体差、測定する時間帯の影響など、モニタリングする上でデータのバラツキの要因は大変多い。そこで、これらの試料について紫色 LED による定常励起下の蛍光誘導期現象方式の測定条件を確立し、NaCl ストレスとの相関を明確に求めることを目的とした。

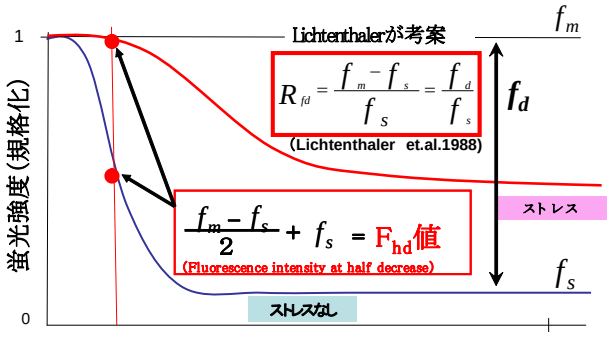


図 1　　F_{hd}値R_{fd}値の定義

【方法】

実験試料には水耕栽培で育成管理した小松菜と、育成管理が不明な市販のガーベラを使用した。それぞれの試料に対し環境ストレスとして、NaCl濃度 0.5 Mの水溶液を与え測定を行った。励起光源には、光合成有効光量子束密度(190 μ molm^{-2}s^{-1}) の紫色LED(λ=410 nm)を用いた。蛍光の検出には分光器(PMA-11,浜松ホトニクス)を用い、1 秒間隔で 5 分間測定を行った。これを 1 時間間隔で 8 時間続けさらに次の日 1 回行った。定常状態における波長 745 nmの蛍光強度から算出するR_{fd}値を用いて比較評価を行った。ストレスにより誘導期現象の初期の酸化還元反応に変化が生じるため、初期の蛍光強度の変動に注目した蛍光維持率(F_{hd}) を定義してストレスの指標として用いた。(図 1)また誘導期現象方式と比較するため、PAM を同時に使用し、実効量子収率を計測した。ストレスの影響を別パラメータからも見るため、光合成蒸散測定装置(以下Li-6400 とする)を使用し光合成速度を計測した。

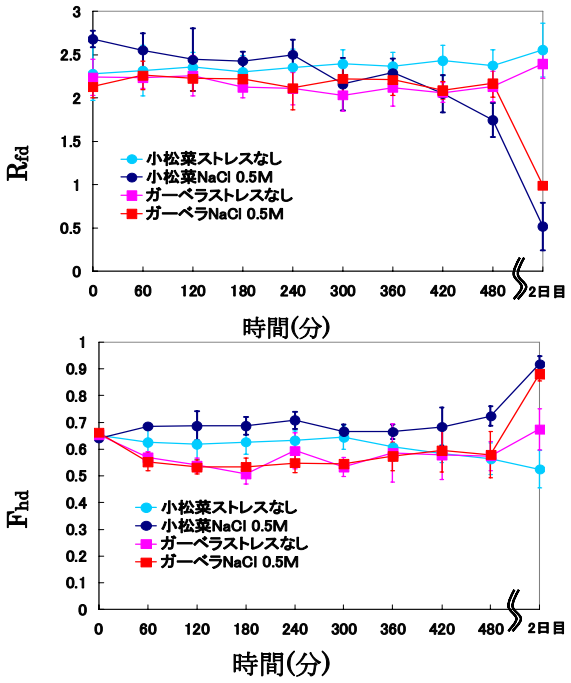


図 2　　(a)上図　Rfd値の経時変化
(b)下図　Fhd値の経時変化
(測定開始後 5 分後の値をプロット)

【結果と考察】

R_{fd}値の経時変化からでは、ストレスの影響が小松菜では 7 時間後に、ガーベラでは 2 日後に検出された。(図 2a) しかし、F_{hd} 値の経時変化からは、ストレスの影響が小松菜では 1 時間後とR_{fd}値より早期に検出されたが、ガーベラでは、R_{fd}値と同様に 2 日後から影響が検出された。(図 2b)小松菜ではストレスによる光合成機能の低下が初期の蛍光強度の変動に顕著に表れたため、R_{fd}値よりもF_{hd}値のほうが早期に検出できたと考えられる。育成管理不明なガーベラでは、個体差の影響が大きく、土壌のためストレスの影響が早期には検出できなかったと考えられる。

Remarkable Promotion of Lettuce Growth by Application of Micro-Bubbles to Hydroponics Culture System

OJong-Seok Park and Kenji Kurata (Graduate School of Agricultural and life sciences, The University of Tokyo)

We investigated the effects of micro-bubbles, generated by a swivelling micro-bubble generator in hydroponics nutrient solution on growth of leaf lettuce. Twenty four lettuce seedlings (*Lactuca sativa* 'Coslettuce') at four to five leaves stage each were transplanted into two culture containers at 21 ± 1 °C (day) and 18 ± 1 °C (night) under fluorescent lamps that provided a photosynthetic photon flux (*PPF*) of 173 ± 18 and 171 ± 16 μmol·m^{-2}·s^{-1} averaged at 8 points at the canopy level for micro- and macro-bubbles conditions, respectively, during a photoperiod of 16 h/day. Seedlings were cultivated for 2 weeks in two deep flow technique (DFT) hydroponics culture systems, in which micro-bubbles or macro-bubbles were produced, respectively, by a micro-bubble aerator and aquarium aeration stones. The nutrient solution was maintained at a temperature of 22 ± 1 °C during the experiment. Fresh and dry weights of the micro-bubble-treated lettuce were 2.1 and 1.7 times larger, respectively, than those of the macro-bubble-treated lettuce. Although the reasons for growth promotion by micro-bubbles are still under investigation, we speculate that the larger specific surface area of the micro-bubbles and negative electronic charges on the micro-bubbles' surfaces may promote growth because micro-bubbles can attract positively charged ions that are dissolved in the nutrient solution. These results indicate that micro-bubbles generated in a DFT hydroponics culture system can remarkably promote plant growth.

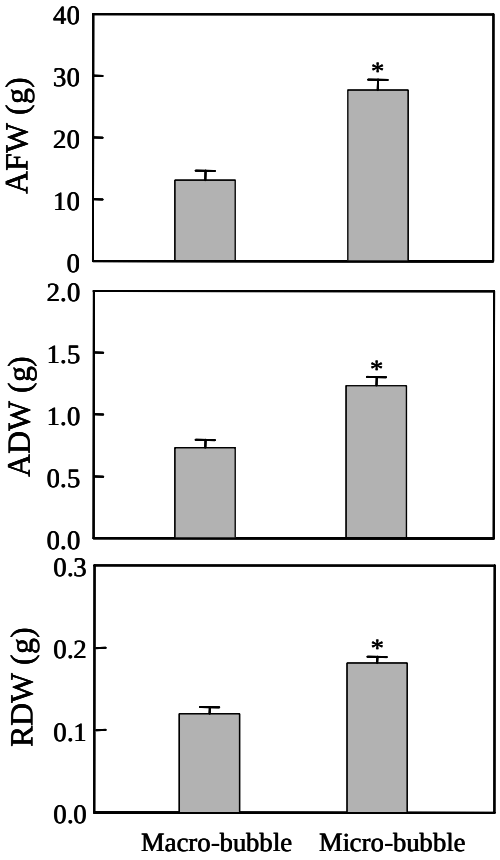


Fig. 1) Aerial fresh weight (AFW), aerial dry weight (ADW), and root dry weight (RDW) per plant of leaf lettuce grown for 2 weeks in deep flow technique hydroponics culture system in which macro- and micro-bubbles were generated. Data represent means ± se. Means with an asterisk (*) are significantly different by *t* test at $P \leq 0.01$ (n=36).

超音波風速温度計と熱電対温度計により求めた潜熱フラックスの特徴

○松岡　諒（筑波大学大学院）・林　陽生（筑波大学）

1. はじめに

超音波風速温度計（SAT）で測定される顕熱フラックスは，湿度・横風の影響を受け実際の値とは異なる。そのためそれらの影響を補正する必要があり，Schotanus *et al*. (1983)はその補正式の導出を行った。さらにその補正式を用いることで潜熱フラックスを推定することが可能であると考えられ，花房ら(2005)は潜熱フラックスの推定手法を提案している。Schotanus *et al*. (1983)の式を，水蒸気フラックス項$\overline{w'q'}$に関してまとめると次式のようになる。

$$\overline{w'q'} = \frac{1}{0.51\overline{T}}\left(\overline{w'T_s'} - \overline{w'T'} + \frac{2\overline{u}}{403}\overline{u'w'}\right)$$

この式の右辺を SAT と熱電対温度計で測定することにより，潜熱フラックスを推定することが可能である。本研究では，この推定式により潜熱フラックスを導出し，熱収支残差で求めた潜熱フラックスと比較することで，推定手法の実用性を検証することを目的とした。

2. 研究方法

筑波大学陸域環境研究センター圃場を観測対象地域として，2008 年 7 月 26 日から 7 月 30 日まで熱収支観測を行った。SAT と細線熱電対温度計（アルメル・クロメル 50μm）を用いて式右辺の各項を測定し，潜熱フラックスを推定した。並行して正味放射，地中伝導熱，顕熱フラックスの観測を行い，熱収支式の残差として潜熱フラックスを求めた。そして全ての観測項目が利用可能であった 7 月 28 日から 30 日までを解析対象期間として潜熱フラックスの比較を行った。

3. 結果と考察

潜熱フラックスの時間変化を示した図 1 によると，二つの潜熱フラックスは日中に概ね一致した挙動を示した。それに対して，夜間には推定式の潜熱フラックスがより小さな値を示した。また二つの潜熱フラックスを安定度別に比較した図 2 によると，不安定状態では，1 対 1 の直線の近傍に位置し，両者の値は比較的一致しているが，安定から中立に近い状態では，不安定の時ほど 1 対 1 の直線に近づかなかった。

夜間及び安定から中立に近い状態で二つの潜熱フラックスが一致しなかった原因として，この期間に推定式の右辺カッコ内の第一項$\overline{w'T_s'}$が第二項$\overline{w'T'}$より小さくなり，推定手法の潜熱フラックスが負になり易かったのに対し，熱収支残差では，地中伝導熱が大きな負の値を取り，潜熱フラックスが正の値になったことが考えられる。

図 1　潜熱フラックスの時間変化

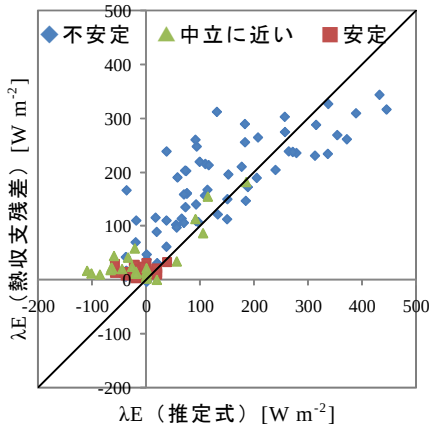


図 2　潜熱フラックスの比較

4. まとめ

超音波風速温度計と熱電対温度計により潜熱フラックスの推定値を導出した。これを熱収支残差から求めた潜熱フラックスと比較したところ，日中または不安定状態で同程度の挙動を示すことが確認された。

参考文献　花房龍男・青島武・渡来靖，2005：筑波大学陸域環境研究センター報告，**6**，11-15.

Schotanus, P., Nieuwstadt, F. T. M. and De Bruin, H. A. R., 1983: *Bound. Lay. Meteorol.*, **26**, 81-93.

ポット植えダイズによる群落スケールと蒸発散量の関係

○今　久，松岡延浩（千葉大園芸）

はじめに

小規模な植物群落では，移流や日射の影響を受けて，大きな群落より個体当たり，また面積当たり蒸発散量が多くなると考えられる．ここでは，ポットに植えたダイズを用いて，大きさの異なる群落を作り，個体蒸発散量が群落の大きさでどのように変わるか実験を行ったので結果を報告する．

方法

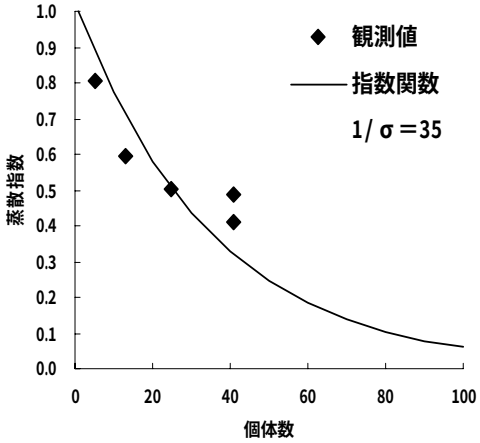
表に示すように,広い裸地に41個体から5個体を用いてダイズ群落を作った．いずれの場合も，35ｃｍ四方の正方形の中央にも一個体を置く，千鳥配置にした．1m^{2}当たり16.3個体になる．また，その群落から離れたところに孤立した状態で3個体を配置した．実験は，10時ころから始め,16時ころに再度各ポットの重量を測定して，その間の蒸発散量を1時間当たりの蒸発散量として求め，解析に使用した．表に示されている一層モデルによる蒸発散量は，近藤（1994）による群落一層モデルの近似式で，バルク係数C_H=0.01，蒸発効率β＝0.7として求めたものである．気温，湿度，日射，大気放射は1.5m，風速は2mの高さで1分ごとに測定した．表の蒸散指数は，群落，孤立,一層モデルによる1時間1個体当たりの蒸発散量をそれぞれEx, Em, E0として，F(x)=（Ex-E0）/(Em-E0)と表したときのF(x)の値である．また，この蒸散指数は，指数関数でF(x)=exp(-σ（x-1）)でも表せる．ここでｘは群落個体数である．σを減衰係数と呼ぶ．

結果

表の群落蒸発散量は，群落を作るのに使用した個体の平均値で，孤立蒸発散量は群落の外に置かれた個体の平均値である．一層モデルの蒸発散量は，観測期間の気象データを使って近藤のモデルにより求めた値である.これらの値を使い上式で求めたのが蒸散指数の観測値である．蒸散指数を縦軸に，横軸に群落の個体数をとって表したのが図である．図には指数関数で表した場合の曲線も示している.図に示した曲線は，減衰係数の逆数を35とした場合の結果である．図から群落が大きくなると，個体当たりの蒸発散量が減って，一層モデルの値に近づく様子が分かる．上に示した関係はおおむね成り立つように見える．従って，今回行った個体密度を16.3個/m^{2}としたダイズ群落について，指数関数から任意の大きさの群落からの蒸発散量を推定できると思われる．

表.使用した個体数，各実験結果，蒸散指数

実験日	個体数	1時間1個体当たり蒸発散量(g)			蒸散指数
		群落	孤立	一層モデル	
7月31日	41	53.0	80.9	26.3	0.49
8月1日	41	57.0	93.2	31.9	0.41
8月2日	25	67.9	97.2	38.5	0.50
8月4日	13	46.2	60.0	25.8	0.60
8月4日	5	53.4	60.0	25.8	0.81



図．群落の個体数と蒸散指数

モンゴル半乾燥草原における生態系呼吸速度の制御要因

○中野智子（首都大都市環境）・篠田雅人（鳥取大乾地研）

１．はじめに

モンゴル国の半乾燥地には、イネ科草本が優先する草原生態系が成立し、基幹産業である遊牧を支えている。草原生態系は光合成によって大気中のCO_2を吸収する一方、呼吸によってCO_2を大気へと放出している。大気－生態系間のCO_2交換は、温度や水分条件など環境変動の影響を大きく受けることが知られており、年々の降水量の変動が激しい半乾燥地では、大気－生態系間のCO_2収支も年々大きく変動していることが予想される。こうしたCO_2収支の年々変動を明らかにするため、本研究では、モンゴルの草原生態系による生態系呼吸（植物の呼吸＋土壌呼吸、Ecosystem respiration：R_{eco}）に着目し、環境要素との定量的な関係を明らかにすることを目的として現地観測を行った。

２．観測方法

観測は、モンゴル国ウランバートルの南西 130 kmに位置するバヤンウンジュル村近郊の草原 (lat 47°02.6’N、long 105°57.1’E、1200 m asl) において、2004 年 7 月下旬・2005 年 5 月中旬・7 月下旬・9 月中旬および 2006 年 6 月下旬の 5 期間にわたり実施した。遊牧家畜の採食を防ぐための柵（300m×300m）を設置し、その中において、密閉式チャンバー法を用いたR_{eco}の測定、ならびに地温（Ts）・土壌体積含水率（VWC）・地上部バイオマス（AGB）の測定を行った。

３．結果と考察

生態系呼吸速度と環境要素との関係を見るために、R_{eco}の全測定データをTs（5cm深）、AGB、VWC（3cm深及び 10cm深）に対してプロットしたところ、いずれにおいても、環境要因の値の増加にともなってR_{eco}が増加する傾向は見られるものの、ばらつきが大きく、R_{eco}の変動は単一の要素のみでは説明できないことが示された。各要素とR_{eco}とのスピアマン順位相関を計算したところ、Ts・AGB・3cm深VWC・10cm深VWCに対して、それぞれ 0.46、0.74、0.65、0.39 という値になり、AGB及び 3cm深VWCとの相関が比較的高いという結果が得られた。この結果はR_{eco}の制御要因として土壌水分を考える場合、ごく地表付近の変動が重要であることを示唆している。

R_{eco}の全測定データと地温との関係を見た場合、明瞭な相関は得られなかったが、測定値を土壌水分によってグループ化してプロットすると、一般的に知られているような地温の指数関数でR_{eco}を表すことができ、土壌水分が高いほどR_{eco}の値が大きく、温度感度（Q_{10}）も大きくなることが示された。また地温を 20℃に基準化したR_{eco}を算出し、AGBと 3cm深VWCとの関係を見たところ、二変数関数（R_{eco} = P1×VWC×AGB + P2×VWC^{P3}：P1、P2、P3 はフィッティングパラメータ）で非常に良く近似することができた（Fig. 1、R^2=0.88）。

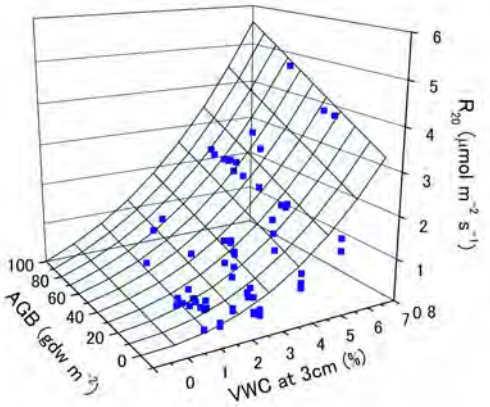


Fig. 1　20℃に基準化したR_{eco}とAGB及び 3cm深VWCとの関係。点は測定値を、曲面は二変数関数による近似面を表す。

炭素安定同位体比を用いた C3/C4 混生草原における呼吸成分の分離

○濱田洋平（筑波大学）・及川武久（元 筑波大学）・村山昌平・宇佐美哲之（産業技術総合研究所）

現在，陸域生態系の炭素収支に関する研究ではフラックス観測に基づく手法が主流となっているが，この手法は一般に生態系呼吸（R_e）を地上部呼吸（R_{ag}）・土壌呼吸（R_s）・根呼吸（R_r）・微生物呼吸（R_h）などに分離できない。呼吸成分の分離は，環境変化に対する生態系の応答を予測するモデルの精度向上にも重要である。本研究では，C3/C4 植物が混生する草原生態系において，炭素の安定同位体比（δ^{13}C）を用いてこれらの呼吸成分の分離を試みた。

野外観測は，筑波大学陸域環境研究センター熱収支・水収支観測圃場に成立している草原を対象とし，主要な種であるセイタカアワダチソウ（C3，チガヤと混生）・チガヤ（C4）・ススキ（C4，株の中心部と周縁部で観測）の各群落を代表する地点に調査区を設定し，2006 年 3～11 月にかけて行った。R_sのフラックスは土壌CO_2の濃度勾配と拡散係数の積から，そのδ^{13}CはCerling *et al.*（1991）の手法から推定した。観測期間終了後，R_{ag}・R_r・R_hのソースとなる地上部バイオマス・根系・土壌有機炭素を定量し，そのδ^{13}Cを分析した。

各群落における，R_sに占めるR_rとR_hの割合をFig. 1 に示す。R_rおよびR_hのδ^{13}Cは，表層 30cm におけるソースの加重平均値を適用した。チガヤではR_hが 80～90%を占め，ススキでは 3～7 月にかけてR_rの割合が増加し，7 月以降はほぼ半々となった。セイタカアワダチソウではR_r・R_hともにR_sよりδ^{13}Cが重く，δ^{13}Cによる成分分離ができなかった。これは，混生するチガヤの根系の影響によると考えられる。本草原では，種構成は不明であるがWang *et al.*（2005）によるR_rとR_hの分離が行われており，ほぼ半々という結果が得られている。

また，草原全体でのR_eに占めるR_sの割合を，各呼吸成分のδ^{13}Cと併せてFig. 2 に示す。2003 年に実施されたR_eのフラックスおよびδ^{13}Cと比較するため，2006 年に観測した各群落のR_sのQ_{10}を求め，2003 年の地温から同年のR_sを推定した。草原全体のR_sは，李ほか（2002）による空中写真に基づく各群落面積の算出結果から計算した。R_{ag}にはR_eとR_sの残差を適用した。R_sの割合は，10 月以降 30～40%とやや増加するものの，全般的に 20%前後と低い値を示した。本草原では冬季に草刈が行われるが，刈られた草は搬出されずその場に放置されるため，R_{ag}にはリターからの呼吸が相当程度含まれている可能性がある。

引用文献：Cerling *et al.* (1991): *Geochim. Cosmochim. Acta*, **55**, 3403-3405. Wang *et al.* (2005): *J. Biosci.*, **30**, 507-514.
李ほか（2002）：陸域環境研究センター報告，**3**，27-33.

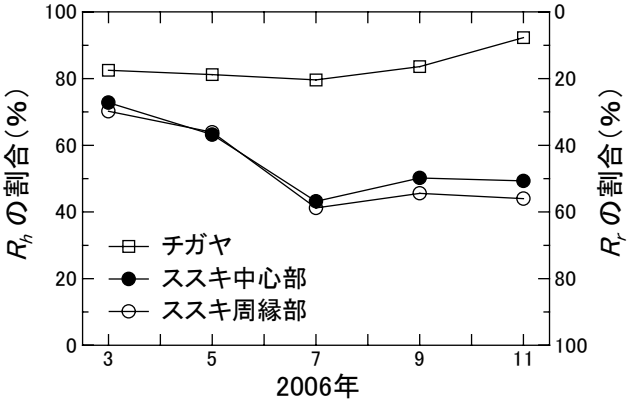


Fig. 1　R_sに占めるR_rおよびR_hの割合

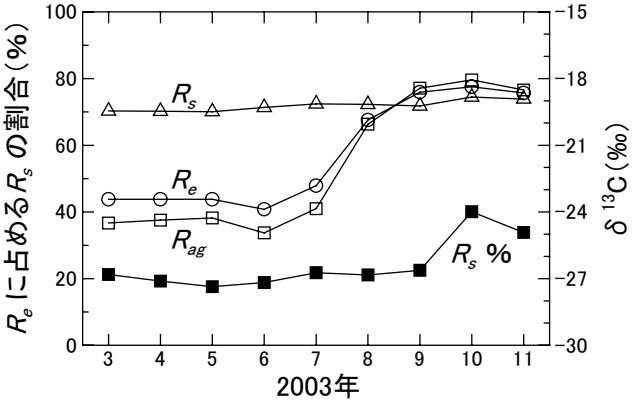
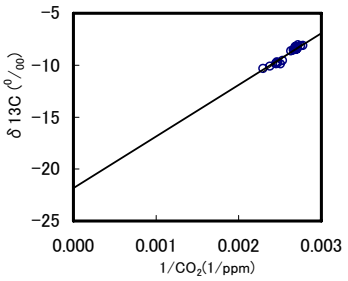


Fig. 2　R_eに占めるR_sの割合と各成分のδ^{13}C

不均一植生を対象とした炭素安定同位体フラックス測定の問題点

○下田 星児（近畿中国四国農業研究センター）村山　昌平（産業技術総合研究所）
岸本(莫)文紅（農業環境技術研究所）及川 武久（筑波大学）

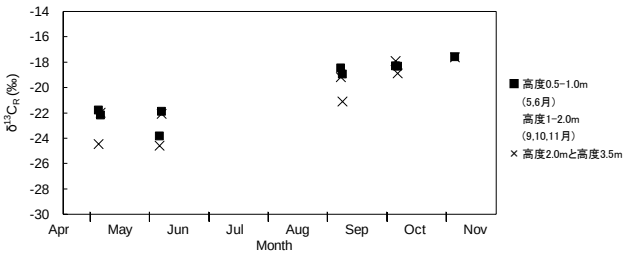
本研究では、渦相関法だけでは不可能なCO_2交換に対するC3/C4 植物の寄与率に関して定量的データを得るため、大気炭素安定同位体比(δ^{13}C)を用いてフラックスの分離推定を行った。炭素同位体分別は、植物には^{13}Cよりもより軽い^{12}Cが取り込まれる光合成時に起こる。光合成による大気CO_2交換により、C3とC4 植物による同位体分別の結果は、大気のδ^{13}Cへ反映されるため、C3 とC4 種の割合について特有の情報を得ることができる。群落内と境界層の大気CO_2濃度は、あるバックグラウンドの大気濃度と、生態系からのソースを加えた大気を反映した値であると仮定している。Keelingプロットにより、大気CO_2濃度増加に対するソースの貢献を、CO_2濃度の逆数に対するδ^{13}Cの値の回帰直線から推定し、炭素同位体比の生態系呼吸項(δ$^{13}C_R$)を決定する（第１図）。



第１図　Keelingプロットによる炭素同位体比の生態系呼吸

望ましいサンプリング条件について、Pataki et al. (2003)は、回帰式の信頼性を高めるためには、サンプル間のCO_2濃度差が一定以上(200ppm)必要であることを述べ、生態系起源のCO_2寄与率が高まり高CO_2濃度となる、大気安定条件としている。しかし、大気が安定した条件下は、一般に、吹走距離が長く、フットプリントエリアが広い。このため、対象生態系以外の大気のδ^{13}C値を反映してしまう可能性が高まる。Griffis et al. (2007)は、濃度フットプリント解析を行うことが重要であると述べている。

本研究は、(1)C3/C4 の構成の変化に伴い大気の同位体シグナルがどのように変化するかを調べる(2)日本の湿潤温帯草原の光合成と呼吸へのC3 とC4 の相対的寄与を定量化することが本来の目的であるが、今回はその前提として、濃度フットプリント解析(Schmid, 1997)を行い、圃場（草原）由来・圃場外（森林）由来と判定されるデータの比較を行う。90%寄与率となる濃度フットプリント長は、高度2.0m以下の採取位置ではほとんどの場合150m以内となり圃場内に収まるが、高度3.5m地点では350m以上と圃場外へ範囲が広がる。このため、濃度フットプリントを考慮すると、3.5m地点のサンプルを使うことはできなくなる。群落上から近い2地点のフットプリントが圃場内に収まる日のδ$^{13}C_R$値を示すと、2.0 と 3.5mの上位２高度から求めたδ$^{13}C_R$値は、群落上から近い 2 地点から求めたδ$^{13}C_R$値に比べ最大で2.2$^0/_{00}$小さい値をしめしている（第２図）。高度3.5m のサンプリングデータは、対象圃場よりC3 植物割合の大きな森林が多く含まれているため、δ$^{13}C_R$値が下がった可能性がある。



第２図　群落上から近い２地点(5･6 月:0.5-1.0m; 9-11 月 : 1.0-2.0m）と高度 2.0-3.5mの高度から採取したサンプルより推定されたδ$^{13}C_R$

指摘される炭素安定同位体フラックス測定の問題点について考慮した結果、使用可能なデータは非常に少ないが、C3/C4 草原のCO_2交換の季節動態についても述べる。

水田は大気中アンモニアの発生源か吸収源か：長期観測による実態解明の試み

○林健太郎[1]・間野正美[1]・小野圭介[1･2]・平田竜一[1]・宮田明[1]
（1 農環研，2 日本学術振興会）

１．はじめに

大気－水田間では，様々な気体や粒子状物質の交換（発生および沈着）が起きている．しかし，窒素酸化物と同様に大気経由の窒素負荷に大きく寄与するアンモニア（NH_3）については，これまで大気－水田間の交換の定量的な情報が得られていない．水田はわが国を含むモンスーンアジア地域の代表的な農耕地であり，そのNH_3交換を通じて広域的な窒素収支に関与していると考えられる．そこで，水田におけるNH_3交換の実態解明を目的として本研究を開始した．

２．方法

観測地は茨城県つくば市真瀬の営農水田である．NH_3交換の観測は 2007 年 5 月中旬より開始した（継続中）．水田のおよその管理条件は，4 月下旬に基肥（化学肥料を全層施肥：約 60 kg N ha^{-1}）して湛水，5 月上旬に田植，6 月中～下旬に中干し，生育状況に応じて追肥（化学肥料を表面施肥：約 10 kg N ha^{-1}），8 月中旬に最終落水，9 月中旬に収穫であり，以降，翌年の田植まで裸地である．2008 年 2 月に近隣の水田に鶏ふん堆肥を施用した．パッシブサンプラー（小川商会）を用いて地上 1.5 mおよび 4.0 mのNH_3濃度を観測した（週平均，各高度 4 連）．超音波風速温度計の出力値を用いて算出した 30 分平均の拡散速度を週平均に換算した上で，週平均の交換フラックスを求めた．

３．結果

鶏ふん堆肥施用の影響を受けた 2008 年 2 月を除き，NH_3濃度は 0.8～4 ppbの範囲を示し，地上 4.0 mの濃度が地上 1.5 mの濃度をほぼ常に上回った（図１）．2008 年 2 月には特に地上 1.5 mのNH_3濃度が大きく上昇し，最大値は 15 ppbに達した．2008 年 2 月の顕著な発生および 2008 年 5～6 月の弱い発生（おそらく追肥由来）を除き，観測地のNH_3交換は沈着であった（図２）．2007 年 5 月～2008 年 3 月の積算フラックスは，沈着が 4.7 kg N ha^{-1}，発生が 5.7 kg N ha^{-1}であった．観測地の水田は通常はNH_3の吸収源であるものの，堆肥や化学肥料を施用した直後にはNH_3の発生源になりうると考えられる．なお，拡散速度は昼夜で大きく異なるため（2007 年 5 月～2008 年 3 月平均で昼間：11.6 cm s^{-1}，夜間：4.0 cm s^{-1}），週平均の交換フラックスは，昼夜のNH_3濃度変動および拡散速度変動の相関に由来する誤差を含む可能性がある．

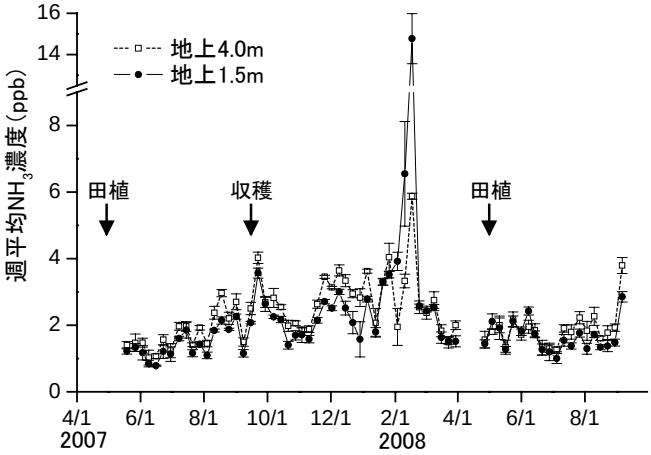


図１　NH_3濃度（週平均）

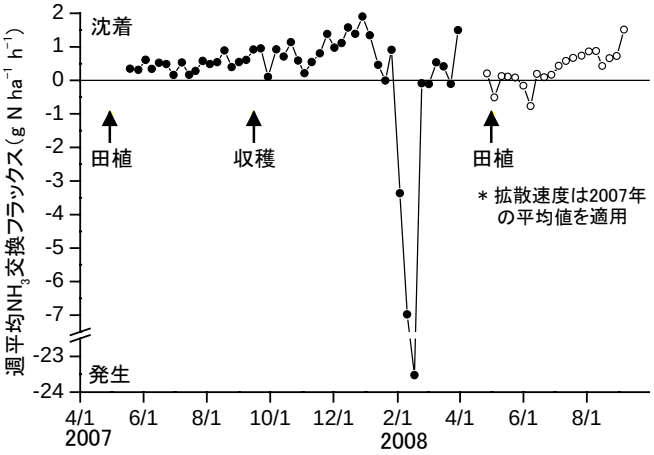


図２　NH_3交換フラックス（週平均）

フラックス観測の現状と将来像

平野高司（北海道大学大学院農学研究院）

陸域生態系と大気との間の運動量，エネルギー，物質の交換速度（フラックス）に関する研究の歴史は長いが，1990 年代以降，地球規模での炭素循環に及ぼす陸域生態系の役割などの観点から，CO_2 フラックスに重点を置いた長期にわたる観測研究が様々な生態系において実施されるようになった。西欧では 1996 年に EUROFLUX プロジェクトが，また米国では 1997 年に AmeriFlux がスタートし，これらが母体となって世界規模のフラックス観測ネットワーク（FLUXNET）が設立された。アジア地域においても，日本の研究者が中心となり，1999 年に FLUXNET のリージョナルネットワークとして AsiaFlux が組織され，ワークショップ，トレーニングコースの開催やニュースレターの発行などの活動を続けている。さらに 2006 年には，日本の国内ネットワークとして JapanFlux（http://www.japanflux.org/）が発足した。JapanFlux はフラックスに関係した日本の研究者のネットワークであり，フラックス観測を行っている研究者（データ提供者）だけでなく，モデラーなどのデータ利用者にも広く門戸を開いている。また，中国（ChinaFlux），韓国（KoFlux）との国際共同研究を実施するともに，日本長期生態学研究ネットワーク（JaLTER），JAXA および JAMSTEC との研究連携を進めつつある。

自然生態系における CO_2 フラックスの観測は 1950 年代に始まり，日本の井上栄一博士（旧農業技術研究所）は先駆者の一人である。また，1999 年～2007 年にかけて，日本農業気象学会の研究部会としてフラックス観測・評価研究部会，フラックス観測研究部会が活動し，オーガナイズドセッションの企画，報告書（フラックス観測の最近のシンポ，2002）や「農業気象」に総説（地球環境研究におけるフラックス長期観測の役割と最近の動向，原薗ら，2003）を発表した。さらに，上記の JapanFlux の運営委員の多くは，本学会の会員である。このように，本学会はフラックス観測・研究と深くかかわっており，日本の研究をリードしてきたといえる。

過去 10 年間で，渦相関法によるフラックス観測には多くの技術的発展があったが，同時に新たな課題も明らかになってきた。渦相関法が普及し，様々な生態系でのモニタリングが始まった数年前には，多くの研究者は「フラックス観測も数年たてば，通常の気象観測と同じようにルーティン業務的に行えるようになるだろう」と考えていたのではないだろうか。私もそう思っていた。しかし，フラックス観測の場合，測定したデータがそのまま情報として価値を持つわけではなく，様々な補正も含めた計算（加工）や品質管理，欠測補間などの作業を経て，意味のあるデータとなる。したがって，敷居は低くなったとは思うが，まだしばらくの間は，それなりの知識を有する者でなければ扱いづらい手法であるだろう。渦相関法は，当初考えられていたほどには“万能”ではないが，生態系の重要な環境機能であるガス交換の動態を実測することができる非常に有効なツールであることは間違いない。異分野の研究者との連携により，得られる情報の学術的価値を高めることがさらに重要となるだろう。日本におけるフラックス観測に関連した研究者は様々な学会で活動しているが，この研究分野に歴史と伝統を有する本学会がフラックス観測研究を今後もリードしていくことを期待したい。

気象予測データを農業へ生かす－BLASTAM を例にして－

菅野洋光
（（独）農業・食品産業技術研究機構東北農業研究センター）

１．はじめに

東北地方の夏は、前線帯の変動による影響を大きく受ける。すなわち、東北地方は、前線帯が停滞しやすい緯度に位置しており、前線が夏季に北海道以北まで北上すれば、太平洋高気圧の勢力圏に入り暑い夏になるが、前線が関東や東北付近に停滞すると、しばしばやませが吹走して冷夏となる。北の寒帯気団の影響が大きい北海道や、南の熱帯気団の影響が大きい関東と比較して、夏季天候の年々変動が大きく、むしろ農業にとって難しい環境にあると言える。そのような気候下で安定した農業を営むために、気象予測データを有効に使って、低温や高温のダメージを防ぐことが方策の一つとして考えられる。東北農研センターでは、東北大学との共同研究で、ダウンスケールデータの農業へのアウトプットを研究中である。今回の講演では、はじめにダウンスケールデータの応用可能性を考え、その後、病害の予測情報としての、BLASTAM への適用例をご紹介したい。

１）水稲生育予測モデル

水稲生育予測モデルに関しては，これまで多くの研究例があり(例えば，杉原・羽生 1980；堀江，1981；堀江・桜谷，1985；神田ほか，2002，2005；川方，2005 など)，水稲の生育と気象要素との関係が定式化されてきている。現在一般的に運用されている DVI (DeVelopmental Index)モデルの場合は，発育の始まりを 0，出穂期などの生育ステージ到達日を 1 とし，毎日の変化率である DVR(DeVelopmental Rate)を積算して生育ステージを求めているが，日射量部分は日長時間で代表させ，気温のみで計算できる。低温に弱い時期(穂ばらみ期など)が予測でき，深水灌漑などの対策を効果的にとることができる。
ただし，水稲の生育は短期間の気象変化にはそれほど敏感ではなく，高精度ダウンスケールモデルの予測データを使うメリットはそれほど高くないと思われる。

２）警戒情報等への利用

水稲は，穂が形成される過程が特に低温に弱く，そのような時期にやませにあたると，低温のため容易に不稔を生じることになる。しかしながら，やませが吹走している時は概して水温の方が高く，幼穂を水中に沈めて保護する深水灌漑が対策として有効である。また一方では，高温によっても米の品質低下が生じる。最高気温の高い日が持続すると胴割れ米が,最低気温が高い日が持続すると乳白米等が発生しやすい。その際の対策としても，低温時と同様，水の掛け流しが有効であると言われている。従って，気象予測データによる低温・高温予測を元に，予防的な水管理を行うのは有効であると考えられる。
ただし，この場合も，それほど高精度の予測データは必要なく，高精度ダウンスケールモデルデータを使うメリットはそれほど高くはない。

３）虫害

虫による農作物被害も気象による影響が大きい。ウンカの被害は昔から甚大で，徳川時代の 1732 年の飢饉では，ウンカの大発生により，餓死者は九州から東北南部まで 96 万人に達した(桐谷，2001)。その後もウンカの大発生は何回も記録されており，最近では 1966

年に広範囲の被害が確認されている。当初はウンカが日本で越冬していると思われ，冬の高温が原因として着目されていたが，今では梅雨期の下層ジェット気流に乗って中国大陸から飛来するものと考えられている(岸本，1975)。
また，アブラナ科野菜の大害虫であるコナガは，地中海起源であるが故に，積雪期間が 60 日を超える北日本では越冬できないとされ，被害の発生は南からの成虫の大量飛来によって始まるとされてきた。ところが近年，北日本でも越冬して春早くから出現する例が出てきた。すなわち，コナガの場合は，地球温暖化による暖冬で被害地域の北上が危惧されることになる。このほか気象的に興味深い例として，稲の害虫ドロオイムシがフェーン現象下の低湿で幼虫が死滅するケースなどもある。

このように，虫害の発生には，気象が密接に関係しており，今後の気象予測データを用いた応用的な研究が期待されるところである。特に近年の地球温暖化では，昆虫の北上速度が植物のそれよりずっと速いことが予測されており，問題はより深刻である。

４）病害

農作物の病気も多種多様だが，カビによって発生するイネいもち病やイネ紋枯病，小麦の赤カビ病などについてみると，作物体の濡れが持続間続くことで，カビの萌芽や伝播が行われて被害が拡大する。すなわち，その発生には気象的な要因が大きい。特にイネいもち病は冷害時に多発し,生物学的な要因として稲作の安定生産を脅かす最大の驚異である。近年，農作物の自然志向の高まりとともに，農薬の使用回数も制限されることが多く，集中的かつ効果的な薬剤散布が必要となっている。そのためには,病気の発生予測とともに，散布時の天気も重要である（雨だと薬剤が流れてしまう)。ここで気象予測データを用いることにより，数日先までの病気の発生予察が出来，天気予報と合わせて効果的な薬剤散布計画を立てることが可能となる。

さらに，いもち病の発生を葉の濡れから推定するためには，時別気象データが必要であり，非常に気象に敏感である。その点で，高精度ダウンスケール気象予測データを用いるメリットが大きいといえる。そこで，本発表では，いもち病の発生予察に焦点を当てて，ダウンスケール気象予測データを用いることの利点を考えていきたい。

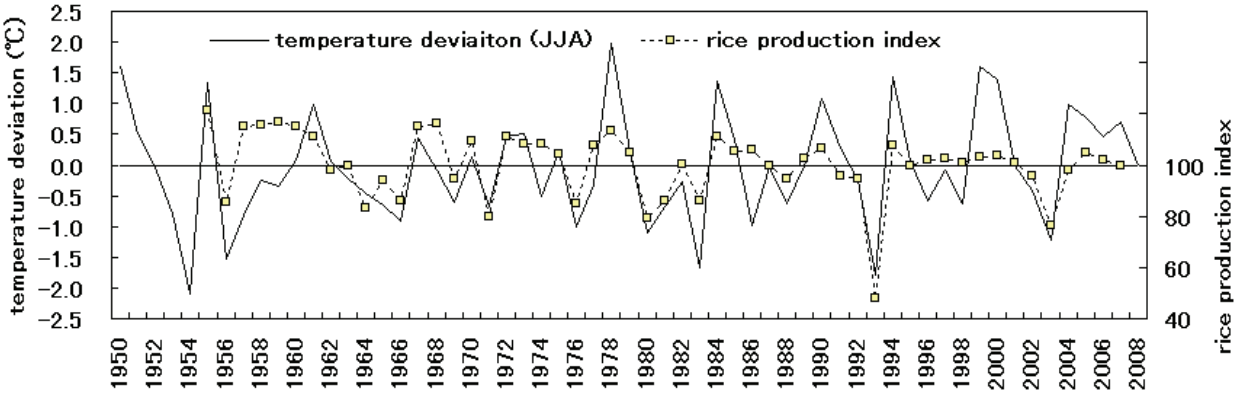


図 1　北日本における夏季気温平年偏差(JJA)と作況指数の時間変化(1950-2008 年)．気温は北海道と東北における気象台・測候所の平均値，作況指数は東北 6 県と北海道の平均．

２．東北地方の気候とイネいもち病

近年，東北地方では夏季天候の年次変動が大きくなっている。図 1 には東北地方における夏季気温と稲作況指数の年々変動を示す。気温は，1970 年代後半の regime shift 以降，年々の変動が大きくなっており，冷夏・冷害も頻発している。冷夏でイネの冷害が発生する場合は，低温による不稔とともに，いもち病による被害も多く発生する。2003 年冷害の場合は，作況指数 80，被害率 29.4 ポイントのうち，いもち病による被害は 5.3 ポイントであった。従って，稲の安定生産のためには，効果的ないもち病の防除が必要である。

イネいもち病は，稲体が長時間濡れることで，病菌の萌芽や伝播が行われる(渡部，1997)。おおざっぱに言えば，持続的かつ少ない降雨（雨が降らないと発生しない一方，大雨だと菌が流れてしまう），弱い風（風が強いと乾いてしまう），および低日照の組み合わせがいもち病の発生に好適となる。気温は高すぎても低すぎても良くない。すなわち，梅雨期頃にやませが持続的に吹走している時が，まさに感染好適条件であるといえる。

イネいもち病の蔓延を防ぐには，発生前または発生初期の農薬散布による防除が効果的で，そのために各県から発生予察情報が出されている。いもち病の発生を予察するためには，現在はアメダスデータを用いた葉いもち発生予察システム BLASTAM(越水,1988；林・越水，1988)が使われている。BLASTAM の名の由来は，いもち病の BLAST にアメダスの AM をかけあわせたものである。この計算では，アメダスデータを用いて葉の濡れ持続時間を予測し，いもち病菌がイネに感染するような気象条件かどうかを推定する。以下では，気象庁作成の GSM データを用いた数日先までのいもち病発生予察をご紹介したい。

３．BLASTAM 計算方法

過去の気象観測値については，アメダス観測データを東北地方 1km メッシュに展開したもの（菅野，1997）を用いた。気象予測データについては，気象庁 GSM データを気象協会 ANEMOS で 1km メッシュに展開したものを用いた。

図 2 には，BLASTAM に用いる気象要素の概略を示す。BLASTAM では，過去 2 日間の気温，日照時間，風速，降水量の各時別値と，それより前 5 日間の日平均気温を用いて，葉の濡れ持続時間および病菌が活動するに必要な気温を推定する。従来の BLASTAM では全て過去の気象観測値を用いているが，図 2 に示すとおり，順に気象予測データを用いることで，数日先までの予察が可能になる。そこで，すでに公開

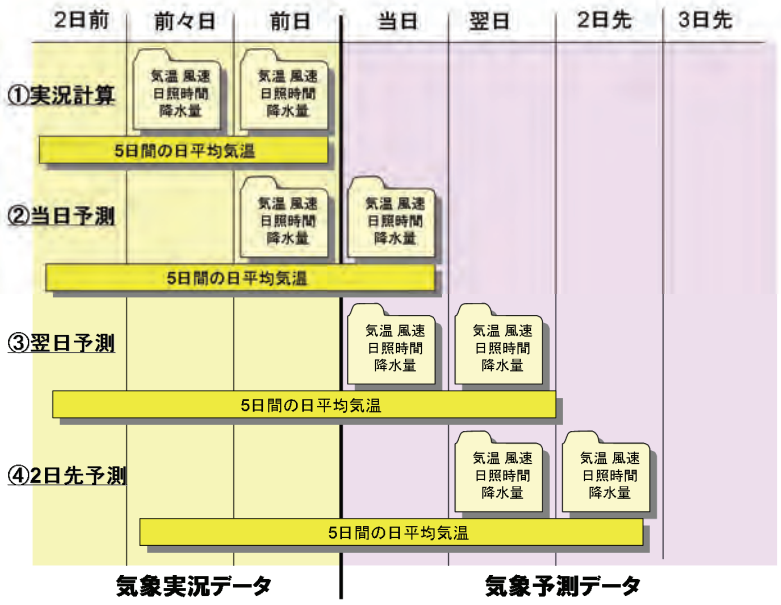


図 2　BLASTAM で使用する気象要素. ①が従来の計算方法，②～④は気象予測データを用いる場合.

されている BLASTAM プログラムに，アメダスデータと気象予測データを入れて，当日～7 日先までの計算を行った。なお，気象予測データを用いた場合は，実測値データを用いた場合と比較して，発生可能性がやや低くなる傾向があったので，予察が十分行えるよう，若干のパラメータの変更を行っている。

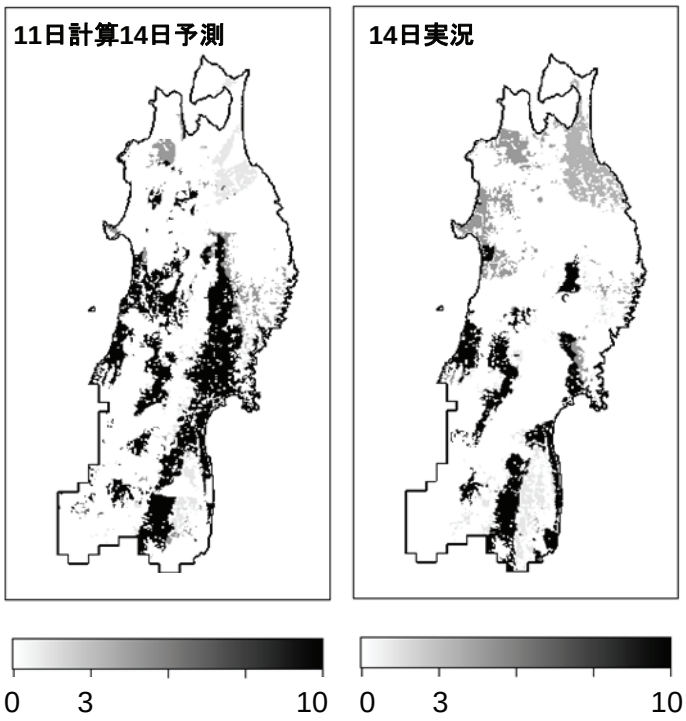


図 3　2007 年 7 月 11 日に計算された 14 日の感染好適条件予測(左)と 14 日の実況感染好適条件(右)．値は 0，1，2，3，10 の 5 段階で表示され，0 が感染好適条件無し，10 が感染好適条件最大である．

４．予察結果

2007 年 7 月に毎日計算を行い，過去データに基づく現況の予察情報と気象予測データを用いた予察情報との比較検討を行った。図 3 には，7 月 11 日に計算した 14 日の予測マップと，14 日に計算された実況データに基づく判定結果を示す。7 月 14 日(3 日後予察)には，東北全域に感染好適条件が，特に南部に最大 10 の値が広く計算されている。14 日の現況予察では，南部ではその範囲がやや縮小しているが，10 の値が計算され，また北部でも広範囲に感染好適条件が計算されている。従ってこの例では，3 日先で実用に耐えうる予察が

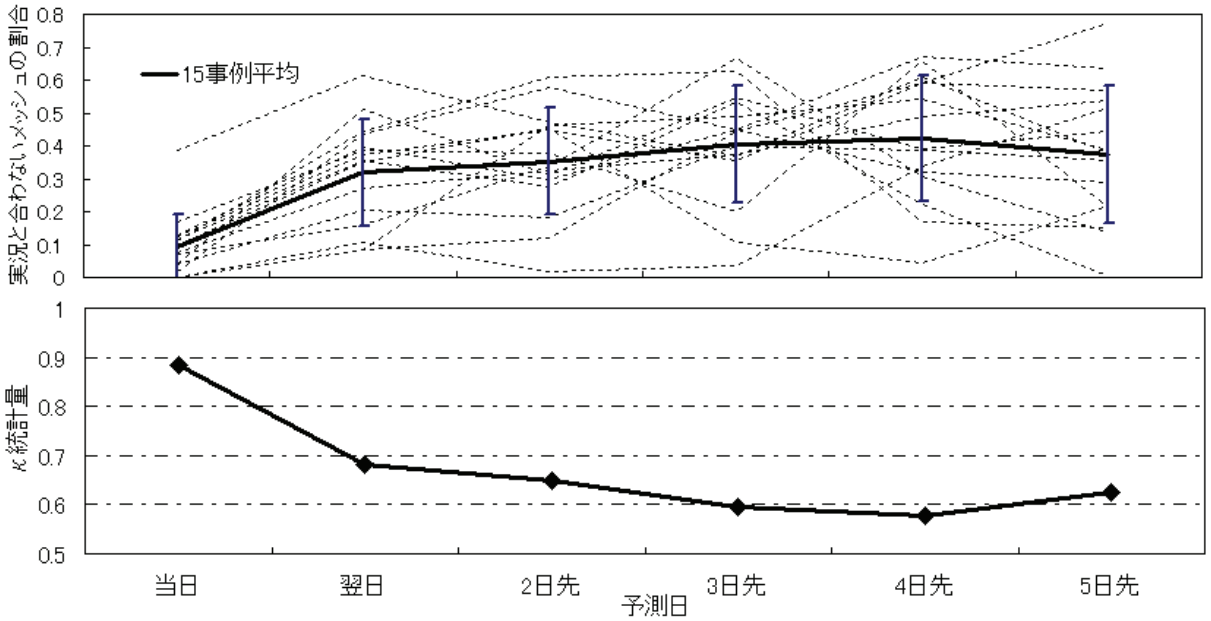


図 4　2007 年 7 月 7 日～21 日までの計算結果 15 事例の誤差(上段)および予測値の妥当性を検討するために求めたκ統計量(下段)．

可能であることが示唆される。

図 4 には，2007 年 7 月 7 日～21 日までの計算結果 15 事例の誤差、および予測値の妥当性を検討するために求めたκ統計量グラフを示す。κ統計量はカテゴリーなどの名義尺度での一致性の指標で，リモートセンシングデータの検証などに使われている。κ値が 0.41－0.60 の間ならば中等度の一致，0.61 －0.80 のあいだならばかなりの一致を示し，0.80 を超える値をとる場合はほぼ完璧に一致していると考えられる。

当日予測（当日の気象予測データを用いている）では，実測値のみの計算結果と外れたメッシュは平均 9%でよく一致している(図 4 上)。翌日以降は外れるメッシュが 30%以上になり，4 日先では 42%と最も大きくなる。各事例のばらつきに着目すると，4 日先以降はそれが大きくなり，あまり実用的でないことが示唆される。κ統計量では，3 日先まで 0.6 以上で，かなりの一致を示す(図 4 下)。4 日目は 0.6 を下回り，5 日目は 0.6 以上だがばらつきが大きく，それぞれ予測精度が落ちてくることがわかる。

以上より，3 日先までは気象予測データを利用した場合でも，実測値で計算した結果と概ね一致しており，十分実用的な予測が出来た。従って，より高精度なダウンスケールデータを BLASTAM に適用することで，いもち病発生予察がより詳細なスケールで，より高精度で行える可能性がある。

5．ウェブ情報の発信

現在までの研究成果は，ウェブ GIS をベースにしたウェブ情報として配信されている(菅野，2008)。図 5 には 2008 年 7 月に発信された葉いもち発生予察マップの一例を示す。毎日自動で計算されており，実測値に元づく現況予測から，気象予測データを用いた 5 日先までの発生予察情報を発信している。システムはウェブ GIS で作られており，図 5 右のように，任意の地域が選択・拡大出来る。ユーザーは 1km メッシュ単位での情報の閲覧・取得が可能であり，自分の圃場に関する状況を把握できる。このようなウェブ GIS システム

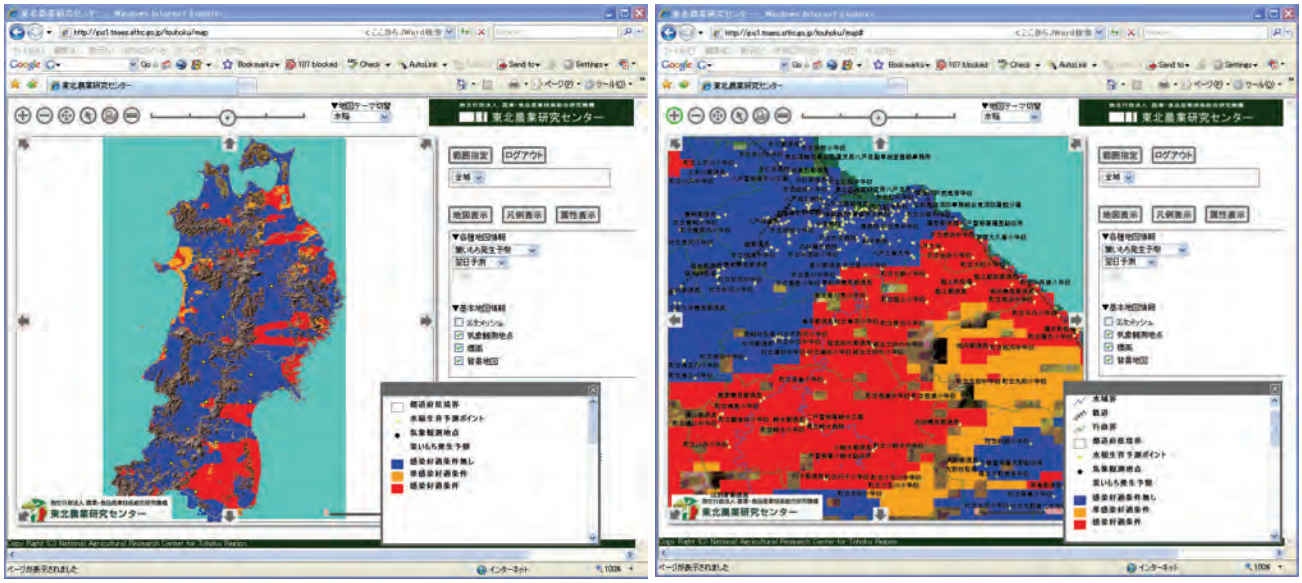


図 5　気象予測データを用いた BLASTAM の発生予察マップ(2008 年 7 月 18 日翌日予測)．左）全体表示，右）エリアの拡大例，URL:http://tohoku.dc.affrc.go.jp/yamase.html

とダウンスケールデータを組み合わせることによって，より効果的な情報発信が可能になると考えられる。

６．まとめ

イネいもち病は，稲作地帯であれば世界中どこでも発生する病気である。植物体の濡れを気象モデルで高精度に推定できれば，グローバルな発生予察情報も作成可能である。他の病気に関しての応用や，気候変動下での適作地選定などにも使え，世界の食料安定供給に向けての重要な技術の一つに成り得ると考えられる。

現在 65 億人の世界の人口は 2050 年には 100 億に達すると推定されており，今後の起こりうる気候変動下での食料安定供給は，人類にとって共通かつ重要な問題である。今こそ，気象分野と農業分野の連携を深めなければならないときであり，それには大規模場とミクロスケールの橋渡しとなりうるダウンスケールモデル研究が重要となってくるのではないだろうか。

７．参考文献

林　孝・越水幸男（1988）：葉いもち発生予察のコンピュータプログラム(BLASTAM)の開発．東北農試研究報告 78,123-138.

堀江　武，1981：気象と光合成，蒸散そして生長に関するシステム生態学的研究．農業技術研究所報告Ａ，28，1-181.

堀江　武・桜谷哲夫，1985：イネの生産の気象的評価・予測法に関する研究（1)個体群の吸収日射量と乾物生産の関係．農業気象，40，331-342.

神田英司・鳥越洋一・小林隆，2005：イネの形態形成の規則性に起因する発育ステージの変異を推定する方法，日作紀，74，276-284.

神田英司・鳥越洋一・小林隆，2002：有効積算温度を用いた簡易モデルの穂の発育ステージ予測への適用，日作紀，71，394-402.

菅野洋光, 1997：ヤマセ吹走時におけるメッシュ日平均気温の推定．農業気象， 53, 11-19.

菅野洋光，2008：「気象予測データを利用した農作物被害軽減情報サービス」の開設．農業および園芸，83(2)，241-249.

川方俊和，2005：水稲群落日射への 2 成分モデルの適用，農業気象，61，123-129.

岸本良一，1975：ウンカ　海を渡る．中央公論社，233pp.

桐谷圭治，2001：昆虫と気象．成山堂書店，177pp.

越水幸男（1988）：アメダス資料による葉いもち発生予察法．東北農試研究報告 78,67-121.

杉原保幸・羽生寿郎，1980：水稲の気候生産力の評価に関する研究　Ｉ．水稲の気候生産力評価の試み．農業気象，36，71-79.

渡部　茂，1997：いもちの素性を知る．オリゼメート普及会，243pp.

環境計測制御と ICT を活用した持続的高度施設生産の達成

星　岳彦(東海大学開発工学部)

はじめに　野菜の消費低迷、化石燃料と肥料原料の価格高騰、施設園芸の設置面積の減少など、我が国の施設園芸生産を取り巻く状況は一層厳しさを増している。農林水産分野における 2005 年度の燃料燃焼に起因する CO_2 排出量 1,364 万トンのうち、その 45%の 611 万トンを施設園芸が排出していると推計され、しかも 15 年前と比較して 2.19 倍に増加した(及川、2008)。化石燃料の高騰対策のために省エネを推進するという目先の問題だけでなく、CO_2 排出量の削減が喫緊の課題になっている今、持続的生産に結び付く研究開発と提言を積極的に行っていかなければ、オイルショックの時代に「油漬けのトマト」の烙印を押されて一方的な非難を受けたように、資源浪費・高環境負荷型農業の代表としてのスケープゴートにされ、施設園芸生産が日本の植物生産の選択肢から消滅してしまう可能性もゼロではない。養液栽培設備を備えた温室やハウスなどの園芸施設は、土壌と空間に境界を設けることができる。つまり、その境界を計測し、エネルギや物質の出入りを制御することが可能である。また、温室やハウスはソーラーコレクタとして機能する。この特徴を活かせば、その高い生産性と相まって、減少しつつある農地面積、農業従事者の高齢化、農業後継者の減少に直面している我が国において、植物生産の重要な一方式として今後も持続発展し得ると、私は確信している。そして、その特徴を活かしていくための基盤技術が ICT であると考える。本稿では、この点を念頭に置き、日本の施設園芸における園芸工学分野の問題点と今後の研究開発方向について述べてみたい。

研究が独歩し現場普及の進まない日本　日本の 2005 年のガラス室ハウスの設置面積は、52,209 ha で、面積的には世界でトップレベルである(日本施設園芸協会、2007)。しかし、そのうち高性能温室と考えられるガラス室はわずか 2,262 ha で、全体の 4.3%に過ぎない。施設園芸の先進国オランダの温室面積は 1 万 ha 程度であるが、そのほとんどがガラス室である。表 1 は、調査年が少々古いと考えられるが、世界の温室面積と養液栽培面積を示したものである。日本の設置面積は世界で 3 番目であるが、栽培の先端技術としての指標である養液栽培の導入率でみると、施設園芸先進国と呼ばれている国々と大きな差があるのが現実である。2005 年の養液栽培面積は 1,634 ha であるから養液栽培率は 3.13%になり、近年でも 1999 年頃のカナダ、ベルギー、オランダ、スペイン、アメリカなどに、はるかに及ば

表1　主要な国・地域の温室面積と養液栽培面積(Answers.comから抜粋・追記)

国・地域名	温室面積 [ha]	養液栽培面積 [ha]	養液栽培率 [%]
中国	360,000	140	0.04
スペイン	55,000	4000	7.27
日本	52,571	655	1.25
イタリア	26,000	400	1.54
韓国	21,061	-	-
モロッコ・アルジェリア・チュニジア	11,400	-	-
トルコ	10,800	-	-
オランダ	10,800	2895	26.81
フランス	9,100	-	-
アメリカ合衆国	5,000	300	6.00
ギリシャ	4,620	60	1.30
ヨルダン・レバノン・シリア	4,300	-	-
ドイツ	3,300	-	-
ベルギー	2,250	850	37.78
イギリス	1,600	-	-
カナダ	1,470	600	40.82

注)日本のデータから、1999年頃の集計値であると推測される。

ない。ある日本の研究者が欧米の研究者を招いた時に、「日本の施設園芸研究機関の研究水準は大変素晴らしいが、なぜ日本の施設園芸生産現場は発展途上国並みの小規模簡易施設が多いのか」と質問されて困ったと話していた。現在の日本において、5,000m² 以上の施設は、わずか 1,230 棟(0.11%)で、1 棟当たりの平均面積は 470m²、経営農家 1 軒当たりの平均施設面積は 1,915m² に過ぎない。エネルギや物質の出入りの管理がきちんとできる高性能で一定(5,000m²)以上の規模を持つ園芸施設の割合を増加させることが、CO_2 排出量の削減等に最も有効であると考える。これを達成するためには、外国と比較して高いと言われている施設・資材の一層の低コスト化が重要である。それには、性能的にさほど違いがないのに、他社にシェアを奪われない独占のためだけの非互換の独自規格部材の乱立を止め、プラットホーム化を進めて量産効果・分業効果が出るようにすることが第一と考える。つまり、施設・資材業界の利害関係から一線を画した公共機関・学会による規格化・標準化に関する研究開発をもっと支援・推進すべきであろう。

もうひとつ感じるのは、生産現場で研究開発成果を有効利用するためのソフトウェア(使い方)の研究が極めて少ないことである。研究者は素材や基盤技術を開発し、現場に導入して使い方を開発するのは企業の営業技術者という考え方がある。しかし、施設園芸関連業界には中小企業が多く、また、儲けも少ないので、自前で人材や資金を投入する余裕は無く、実際のところほとんど機能していない。加えて、装置・素材のように手にとって確かめることのできない、使い方研究のようなソフトウェア的なテーマでは、研究成果が見えにくく管理しにくいと考えられる傾向もあり、競争的研究資金を獲得が困難な実情も一因である。例えば、潜熱冷却技術である細霧冷房が開発されてかなりの年月が経過したが、生産現場で「ある作物に対して、どのようなノズルの設置密度で、いつどのくらいの頻度で噴霧すれば適切で、設置コストに見合う収益増などの効果が上がるか」という判定ができていないので、生産者の導入の決断は博打的でさえある。これでは生産現場への導入が進む可能性は低くなってしまう。導入された生産現場で、その使用状況や効果の有無を徹底的に議論し、その運転法を常に改善し、その事例を蓄積し、改善に活用していくことが大切であると考える。補助金をもらってしまうと評価との関係で、効果無しという結果が出しにくい雰囲気があることはとても残念である。開発にはリスクがあるので、失敗しても次の成功につながるフォローをきちんとすれば悪い評価にはならないという制度・考えができないものか。

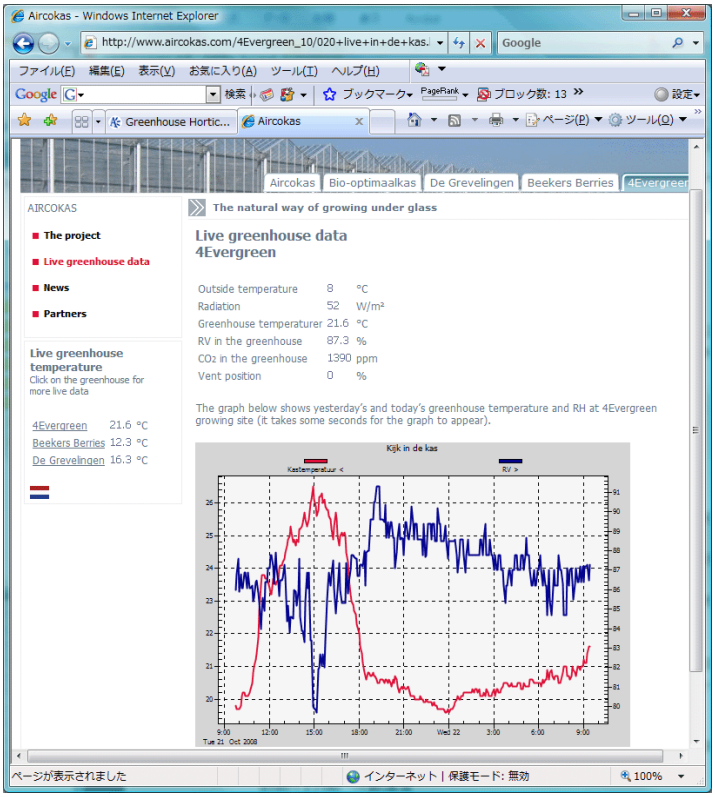


図 1　パプリカ温室環境制御データ(Aircokas)

オランダでは、収益減のリスクの小さい研究は生産者の温室で実施し、リスクの大きな研究は、企業の付属研究所や研究室が共同出資したある程度の規模の共

同温室で実施しているそうである。しかも、その過程のデータはかなりオープンにされており、インターネットで閲覧できるものも多い(例えば図 1)。研究現場と生産現場が密接にかかわり、データが公開されていろいろな立場の人が議論に加われることが、研究成果の現場への早期普及の原動力になっていると考える。日本でのそこまでの実施は、すぐにはかなり難しいと考える。しかし、まず第一歩として、生産現場に ICT 機器を導入して、環境制御に関するリアルタイムの情報を、研究者・技術者・生産者が共有して、いろいろな方向から議論を進めていくためのプラットホームを構築することを提言したい。我々が研究開発している自律分散型のユビキタス環境制御システムにおいても、長野県小諸市の 6,500m^2 のイチゴ生産温室に設置したシステムの環境制御や生育画像のデータを、関係する研究者・技術者・生産者・行政担当者のパソコンや携帯電話にインターネットで配信し、さまざまな立場から検討する試みを開始している(星、2008)。具体的データに基づいて議論できるので、実際的で建設的な意見が出され、これをベースにしたイチゴ生産ソフトウェアの開発が進みつつある。大規模生産現場は、ノイズも多いが実用的なシステム開発のためのデータの宝庫であると考える。ICT を使用することによって、我々は旅費や栽培管理の手間というコストをあまりかけずに、研究室と生産温室が直結した研究が実現できた。この仕組みを活用し、新技術の生産現場への普及を図り、日本の施設生産の高度化を推進したい。

ポテンシャルからグロスベースへ　これまでの環境制御の考え方は、気温を何℃にするか、CO_2 濃度を何 ppm にするか、培養液の EC を何 dS m^{-1} にするか、などが中心であった。この考え方を総称して何と呼ぶのか良く解らないが、どれも電位などと同じポテンシャルに属する値なので、仮にポテンシャルベースの計測制御システムと呼ぶことにする。持続的施設生産で重要なエネルギや物質の出入りを考える場合、外界との差を議論しても、境界のコンダクタンスによって実際に出入りする量は異なるので、ポテンシャルベースの計測制御システムでは、それを計測したり制御したりすることは困難である。ではどうすれば良いかのかというと、一日に気温を維持するために投入されるエネルギを何 J にするか、CO_2 を何 mol 吸収させるか、NO_3-N や NH_4-N で何 mol 与えるか、など値が扱えるようにしなくてはならないと考える。これも何と呼んだらいいかわからないが、期間総体的な値の取り扱いを中心にする考え方なので、仮にグロスベースの計測制御システムと呼ぶことにする。ICT を利用することで環境制御システムのアーキテクチャをこのような枠組みで構築可能であろう。

現在の温室の気温制御を例にしてまず述べる。温室内は気温というポテンシャルベースの値で厳密に制御しているようで、実はそうではない。換気窓が開く設定気温と、暖房機が動作する設定気温の間で、気温は成り行きで遷移する。あたかも、最高と最低の限界温度のパンで、とても厚い具をサンドイッチしているような感じである。この具を薄くすれば、より正確に気温を制御できるが、消費エネルギが大きくなったり、制御機器の動作が頻繁になったりする割には、品質・収量向上による収益向上は見込めないと一般に思われている。実際に気温制御の動作隙間を大きくした方が良く育ったという報告もある。この仮定が正しければ、ICT を使い、厳密に気温を制御せず、昼夜、あるいは、一日単位などで、成育に支障の出ない最低限の範囲を逸脱しないように、かつ、日投入エネルギが最小になるように制御する方法論を確立できるはずである。いわば、積算気温や平均気温による制御の拡張版のようなものである。

養液栽培でこの考え方は既にあり、日本においても量的管理というキーワードで検討が進め

られている(丸尾、2007)。つまり、ある期間に植物が必要とする肥料の量を計算し、それをまず与え、後は水を与える方法である。つまり、動物の飼育で考えれば、栄養素と水分が一定に混ぜ合わされた流動食を常に与えるのではなく、食べきれる餌と水を別々に与える方法である。EC を培養液濃度の指標にする濃度制御法では、ある肥料成分を薄くしても植物が能動的に吸ってしまうので、濃度制御で成育を大きく制御することは困難である。さらに、肥料成分を不均一にしてしまうと pH が変動し、その再調整も必要になる。また、栽培終了後も培養液に肥料分が残存する。一方、量的制御法は、制限する肥料分は培養液に残らないので、植物の生育制御が容易にでき、肥料の使用量も節約できる。トマトの場合、この制御方法を利用すると同程度の収穫量で肥料の消費量を約 3 割削減できることが報告されている(中野、2008)。

グロスベースの計測制御システムを用いると、温室のエネルギ収支、炭素収支、水収支などを生産者がリアルタイムに把握できることになり、これらの結果のフィードバックによって、省エネルギ的、省資源的な生産が可能になる。つまり、園芸施設生産にカイゼン活動が機能するようになり、ボトムアップ的に生産効率向上が可能になると期待している(星、2008b)。

ソーラーコレクタとしての施設の再検討　温室は太陽の熱と光を捕捉して植物生産に利用する装置である。しかし、捕捉した熱の何%を使っているかというと、入射する日射エネルギの 20～30%を床面に蓄熱して利用しているに過ぎない。余剰熱は、換気して捨てている。さらに、換気することは、内部のガス環境(H_2O、CO_2)の制御を困難にし、病虫害の主因の侵入を許す結果をもたらしている。トマトでは黄化葉巻病対策で、施設園芸地帯の温室の窓という窓に 0.3～0.4mm 目のネットを張ることが進み、その通気抵抗によって、せっかく換気しようとしても、それが十分に機能しない状況が起こっている。一方、オランダでは閉鎖型温室が普及段階に達している。閉鎖型温室によって、エネルギが 19%節約でき、トマトの収量が 22%増加し、水使用量が 50%節約でき、化学農薬が 80%節約できると報告されている(東出、2008)。しかし、日本では、気象条件との関係から無理との認識が大勢を占めている。本当にそうであろうか。余剰熱の発生と、日・年単位でのエネルギの平準化が問題点なので、メロンなどの高温性作物での応用、土層や帯水層を蓄熱装置として機能させるための低コスト施工、低コスト高効率な熱交換器、専用のヒートポンプなどの研究を進めれば、日本でも可能性があると私は考える。1986 年ごろに電力中央研究所で太陽光併用型野菜工場の研究が実施されていた。冷凍機と氷蓄熱システムを利用した完全閉鎖温室でホウレンソウやサラダナの研究に私も参画した(図 2)。

図 2　1986 年頃の閉鎖型温室の実験設備

図 3　中国の日光温室の内部

温室を完全閉鎖して植物を生産することは、屋外型ファイトトロンなどの研究と共に、日本でもかなり古くから行われていた。また、床面に蓄熱される日射エネルギと保温を工夫することによってほぼ無暖房で作物の栽培が可能なパッシブ温室の例として、中国の日光温室(図 3)やペレットハウスなどがあり、これらをベースにした発展も考えられる。

光の利用効率についても、緯度が低いためか日本ではさほど議論されていない。オランダでは、日射光が 1%増えれば収量も 1%増えるという 1%ルールという経験則があり、トマトは葉面積指数を 3 にするように栽植密度と繁茂度合を制御することによって日射光の 90%が利用できる、というような生産者にも理解しやすい知識が啓蒙されている(東出、2008)。日本においては、トマトの低段密植連続栽培法が検討されているが、二次育苗の後、いきなり 6.5 本 m^{-2} で植えるのではなく、光利用効率を考えながら株間調節するようなことを考えてはどうだろうか。光利用効率の計測のために散乱光センサ(大石、2007)などの利用が有望であると考える。

ICT が仲介する栽培とのコラボレーション　施設生産では、収益に直結するのは収穫であり、それは作物成育の結果なので、それと明示的な関係がわかりにくい要因は、仮にその影響が無視できないほどに大きくても生産者の注意が払われにくいのが現実である。このため、園芸工学研究者の研究によって得られた温度や湿度などの物理的な状態量や無植栽温室で得られた基礎的データを、後は植物生産現場に使ってくださいとそのまま提供しても、ごく一部の慧眼生産者を除いて、利用してもらえない場合が多い。気象的・物理的・化学的な環境・現象を、ただ計測して可視化しただけではだめで、それが作物の生育や収穫量に生々しく結びつく加工まで行って初めて、研究開発成果を広く使ってもらえるようになる。具体的方法の提案として、収穫に次いで生産者に関心のあるランニングコストに換算して示す、作物成育モデルにそれらを与えてその結果を提示する VR 的方法、偏差値のような単一的尺度を示す評価関数(ポテンシャル関数)を導入することが挙げられる。これらは、ICT の最も適した利用事例になろう。

図 4 は、オハイオ州立大学の養液栽培作物プログラムの Web ページにある、対話的トマト成長モデルである。気温、相対湿度、培養液 pH、EC などの値そのものだけでは、自分の温室のトマトがどのような状態か分かりにくいが、これを使用すると交通信号機のランプによる成功可能性の点灯で作物成育との関係を明示的に理解できる。園芸工学分野の研究成果を施設園芸現場に導入し、施設園芸生産の高度化を推進するには、ICT の利用が大切であることを示す一例ではないか。

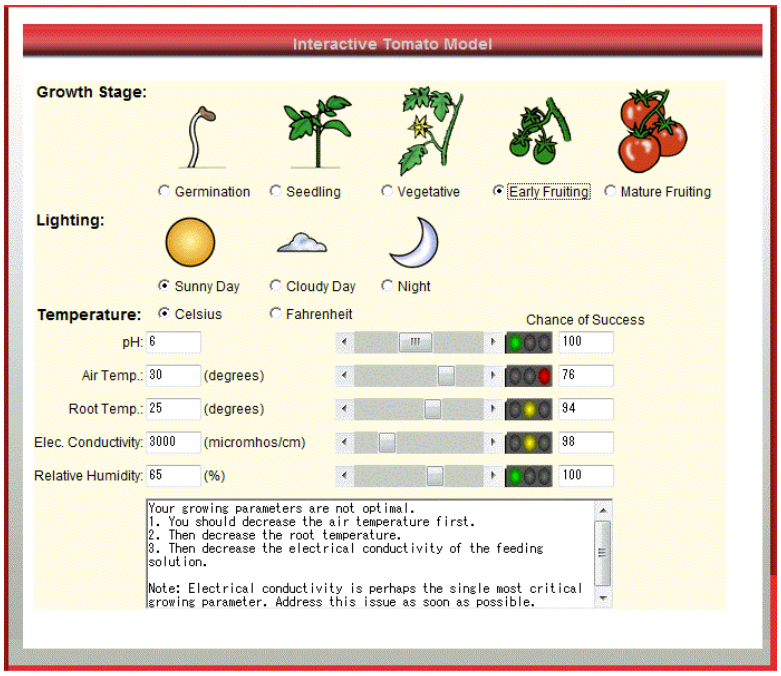


図 4　対話的トマト成長モデル(オハイオ州立大学)

もう一つの例を挙げる。湿度制御は重要であるといわれながら、制御のランニングコストが大きいことと、効果がよくわからないということで、日本の施設園芸生産現場にはあまり

導入されていない。作物成育を左右する蒸散速度を大きくするという観点からこれを考えると、それに大きな影響を及ぼす一因が気孔開度になる。気孔が開く飽差の範囲を求め、その範囲に入るように湿度制御すれば、水ストレスが軽減され蒸散速度も大きくなる(池田ら、2008)。温室で計測された気温と相対湿度から飽差を計算し、日中の何%の時間帯で好適な範囲に入っていたか 0～100%で表示すればどうであろう。また、病害の発生しやすい気温と相対湿度(葉面結露)の範囲がわれば、その条件が継続した時間を病害の主因の胞子の発芽侵入に要する時間で除してやれば、病害発生危険度を%表示することが可能だと考える。このようなシステムは ICT を利用すれば低コストで容易に開発できる。パソコン用のソフトとして開発し、温室内に置くだけで気温、相対湿度、PPF、CO_2 濃度を連続して測定できる低コスト気象ノードとセットにして普及を進めれば、施設園芸生産現場の生産技術レベルは大幅に上昇すると考える。

おわりに　被覆材で閉じられた環境とは言え、温室内環境は屋外の気象条件の影響を受け、自由に環境制御できるのとは程遠い条件である。しかし、その外気象を巧みに使って内部の環境をより良くする方向には、難しいが技術的には面白い要素を多数含んでおり、完全制御型植物工場と比べても、ICT を高度利用する価値がある分野であると考えている。日本型施設園芸生産のイノベーションにつながる研究開発を今後も模索し続けて行きたい。

Aircokas: Live greenhouse data 4Evergreen、http://www.aircokas.com/4Evergreen_10/020+live+in+de+kas.htm、2008 年 10 月 23 日に接続確認

Answers.com: Greenhouse Horticulture、http://www.answers.com/Greenhouse%20Horticulture、2008 年 10 月 23 日に接続確認

東出　忠桐、2008: オランダにおける施設園芸の現場に活かされる研究、施設と園芸、142、67-71

星　岳彦、2008: ユビキタス環境制御システムによる施設園芸生産の ICT 化、農業情報研究(冊子体)、17(1)、13-18

星　岳彦、2008b: 情報規格の共通化による基幹体系の標準化と応用ソフトウェア群の構築に向けて、第 29 回施設園芸総合セミナーテキスト、日本施設園芸協会、pp. 51-57

池田　英男・岩崎　泰永・安　東赫、2008: 施設野菜生産における環境制御、日本生物環境工学会 2008 年大会プレシンポジウム「園芸における生物環境調節」、pp. 23-31

丸尾　達、2007: 日射比例制御を用いた培養液の量的管理の概念、ハイドロポニックス、20(2)、68-70

中野　有加、2008: 量的管理による省肥料高品質トマト養液栽培、SHITA REPORT、25、39-46

日本施設園芸協会、2007: 園芸用ガラス室ハウス等の設置状況、pp. 19-25

オハイオ州立大学: Interactive Tomato Model、http://www.oardc.ohio-state.edu/hydroponics/drake/index.php?option=wrapper&Itemid=99、2008 年 10 月 23 日に接続確認

及川　仁、2008: 施設園芸における省エネルギー・省石油に向けた取組、SHITA REPORT、25、59-63

大石　直記、2007: トマト群落内の散乱光を指標とした繁茂程度の評価、日本生物環境工学会創立記念大会講演要旨、88-89

農業気象災害研究と学協会の役割　－　平成18年豪雪を調査して　－

松岡延浩（千葉大学大学院園芸学研究科）

1. 平成18年豪雪の調査を始めて

2006年は暖冬という気象庁の長期予報に反して20年ぶりの寒い冬を迎え大雪となった。社会的に重大な災害をもたらすような大量の雪が降り積もること（大雪，多雪）を豪雪と呼び，年次を区別するための年号が付けられる（36，38，56，59，60，61豪雪）。この用語は1961年の大雪以降に使われるようになり，同年，災害対策基本法で豪雪が初めて災害の対象と認められた経緯がある。一昨年，1963年に発生した「38豪雪」と「平成18年豪雪」発生した豪雪災害の違いに興味を持ち，「平成18年豪雪」に関する調査を始めた。このシンポジウムの趣旨からすれば，この豪雪災害を解析してわかったこと，さらに将来の展望へと話が展開していくのが筋であろうけれども，私はその研究をするにあたって感じた点を列記し，学協会とくに研究対象領域の２番目として，「気象変動・異常気象評価対策、農業気象災害の発生予測・軽減法、気象改良・微気象改善技術、気象環境保全など」を理念に掲げる日本農業気象学会が何かできないかという思いを述べてみたい。

2. 平成18年豪雪の農林災害に関する研究・資料などについて

まず文献的にしらべてみてわかったことは，積雪に関する資料はたくさんあるにもかかわらず，雪害に関するものは意外に少ないことであった。すなわち，ハザード（Hazard）に関する研究は多いがディザスター（Disaster）に関する研究は少ないと言いうことである。さらに，それを農業被害に限定すると，横山宏太郎会員を中心とした中央農業総合研究センター北陸センターが行った一連の研究以外は非常に少ないものであった。

自然災害が発生したとき，その学術調査は，科学研究費補助金「特別研究促進費」で調査団を組織して行われることが多い。「平成18年豪雪」に関しても，防災科学技術研究所佐藤篤司総括主任研究員を研究代表者として「2005－06冬期豪雪による広域雪氷災害に関する研究調査」が行われ，研究分担者21名，研究協力者65名の調査が行われた。残念なことに，農林災害の解析はほとんど行われていない。2001年以降11件の気象災害の研究調査が「特別研究促進費」によって行われているが，その報告書の中に農業関連の被害が独立して記述されているのは2件に過ぎない。これらの災害に関する総務省の統計資料にはほとんど農林災害の被害額などが記載されているので，これらの災害の調査研究に農林災害の研究者に声がかからなかった可能性がある。

研究論文以外の有用な資料として都道府県作成の統計資料存在した。各県内の市町村別，作目別に被害面積，被害金額などを取りまとめたものである。使いづらかった点は，県毎にデータのフォーマットが違っていたことと，果樹の樹体被害やパイプハウスの倒壊などについて日付が記録されていなかったことであった。これら明らかにするため，青森を除く東北各県の関係者に被害地を紹介して頂き，被害農家のインタビューなども行った。その結果，一定の結果は得られたが，そこにたどり着くまでに，各県へ調査に行ったとき誰に尋ねればよいのか，という問題があった。結局，以前存在した「農業気象担当」という仕事が消滅しており，個人的なネットワークに頼らざるを得ないことを実感した。また，訪問した研究者によっては大変貴重と思われるデータをとられていながら，発表する場がないことを話された方もいた。人的なネットワークの消滅とデータの存在に関わる情報の脆弱さが気になった。その他に都道府県の資料として，何時どの様な対策に関する情報を出したかというものがある。これは警報などの形で出されているの，ホームページ上などに存在し，比較的整理しやすかった。

公的な情報ではないが，利用できた情報として新聞記事や，質的問題はあるがインターネット上の個人ホームページの情報があった。これを研究に使える情報として整理するのは至難の業であったが，全てを網羅しているわけではないが地道に整理していくと，何時どこで何が起こったという貴重な情報である。これをどうすれば整理できるかはここでは触れないが，阪神淡路大震災についてこのような情報がかなりの量整理され，その整理法の

ノウハウなどが公開されつつある。農林災害についてもこれらの方法が応用できるのではないか，と考えた。

さらにそれらを「38豪雪」と比べて整理したときに，よく言われるように時代の変化とともに災害の質が変わってきていることがわかった。しかし，その質の変化を比較するための資料が手に入りにくいこともわかった。もう少し詳しく述べると，農林被害であれば，1963年当時，どのような栽培技術でどの様な人達が栽培をしていたという資料が残っておらず，「平成18年豪雪」で起こったことと，そのままでは比較しづらいということである。このように，自然災害を構成するハザードの部分は未来永劫変化がなくても，ディザスターの部分は，その社会的状況によって変化する。したがって，次回災害が発生したときのために，どの様な状況で何が起こったのかという記録を，ハザードの部分だけでなく，ディザスターの部分も等しく後世に残す必要があろう。

以上「平成18年豪雪」を調査して突き当たった問題点は，

1） 災害研究に関する人的ネットワークの存在が消滅した。
2） ハザードの資料はたくさん残されているが，ディザスターの資料はあまり残っていない。
3） どの様な資料が存在するかという情報が不足している。
4） 様々な質のデータが存在していて整理が難しい。
5） 災害研究の中で，農林災害の研究者の存在が忘れられている。

ということであった。

3. 他の自然災害研究と比較して

私は，日本自然災害学会で災害研究のあり方などの検討する機会を得て，そのときに地震，津波，火山災害の研究者と災害研究について議論したことがあった。それらの災害の研究者は，災害が人命と直接関係したものであるため，とにかく人をどのように災害現場から救出するか，あるいは避難させるかという技術と情報を最優先としていた。私はそのとき農業気象災害は，それらに比べ少しのんびりした災害であるなと思うと同時に，彼らが言った災害が発生したときにそれらの技術を有効にする最良の方法は，

1） 人々に災害の記憶を維持してもらうこと
2） 現在発生している災害について共通認識を持つこと

であるということが印象に残った。

4. 災害研究に学協会とくに日本農業気象学会が寄与できること

自然災害の研究は，基本的に問題解決型の研究である。上記をふまえて，今後も災害研究を行っていく上で，必要なことは，災害が発生したら，それに携わる研究者は

1） どのようなハザードが発生しているかの共通認識
2） どのようなディザスターが発生したのかの共通認識
　i） どのような社会的背景であったのか
　ii） どの様な準備が行われていたのか
　iii） どのような事後対策が行われたのか

を後世に伝える必要があろう。日本農業気象学会にはかつて，気象災害部会，耕地気象改善部会が存在し，その当時発生した災害のメカニズム，その対策技術の提案などを非常に有意義な足跡を残した。その一方で残念なことに主立った農業気象災害でもそれらの部会が記録に残っていないものも多い。

このように考えると，災害科学に対する学協会の役割，もう一歩踏み込んで，農業気象災害に対する日本農業気象学会の役割は，定期的に研究者に発生している（た）災害の共通認識に関わる情報交換の場を設けること（特に人的ネットワークを育てること），それに関するハザードとディザスターに関するデータの存在場所を明示的に示しておくことの2点であろう。さらにもう１点，「災害研究の中で農林災害に関する研究者のネットワークは，日本農業気象学会に聞けばわかる」ということを，他の災害関係の学協会にアピールすることではないかと考える。