

コンピュータシミュレーション手法を用いた イネウンカ類の長距離移動の研究

大塚 彰*

目 次

I はじめに	2	3) 長距離移動シミュレーション モデルについて	22
II 3次元後退軌道解析手法の開発	4	4) 既存手法との比較	22
1. 目的	4	5) 捕獲時間間隔	24
2. 材料および方法	4	5. まとめ	24
1) ウンカの長距離移動	4	IV 東南アジア個体群の東アジア個体群への侵入	25
2) ネットトラップによる1時間間隔の 捕獲データ	5	1. 目的	25
3) 解析モデル	5	2. 材料および方法	25
(1) 数値予報モデル	5	1) 捕獲データ	25
(2) 後退軌道解析モデル	6	2) 10年間の解析に用いた順方向の 長距離移動シミュレーションモデル	25
3. 結果	7	3. 結果	26
1) 大気の状態	7	1) 金武	26
2) 軌道解析	7	2) Shao-Ma	26
4. 考察	11	3) 那覇	28
5. まとめ	13	4) 10年間の長距離移動解析	30
III 長距離移動シミュレーションモデルによる 移動解析	13	4. 考察	30
1. 目的	13	5. まとめ	31
2. 材料および方法	13	V 九州へ飛来するセジロウンカの飛来源解析	31
1) ウンカの捕獲データ	13	1. 目的	31
2) シミュレーションモデルの概要	14	2. 材料および方法	31
3) 解析手順	17	1) 捕獲データ	31
4) 評価の方法	17	2) 3次元後退軌道解析	32
3. 結果	18	3. 結果	32
1) 気象条件	18	1) 後退軌道の例	32
2) 連続捕獲	18	2) 4, 5月の早期飛来	34
3) 1時間解析	18	3) 鹿児島における6月の飛来	34
4. 考察	19	4) 佐賀・諫早における6月の飛来	36
1) 飛来源推定	19	5) 佐賀・諫早における7月の飛来	36
2) 飛来の特徴	21	6) 飛翔時間変更の影響	36

7) 2次元解析との比較	37	VII 総合考察	45
4. 考察	37	1. 成果のまとめ	45
5. まとめ	39	2. 下層ジェットについて	46
VI リアルタイム飛来予測システム	39	3. 新しい長距離移動のイメージ	47
1. 目的	39	4. 今後の取り組み	47
2. 材料および方法	39	1) 現地調査の実施	47
1) 予測システムの構造	39	2) 解析精度の向上	47
2) 長距離移動シミュレーションモデル	40	3) 国内移動と戻り移動	48
3) 予測手順	41	4) 他の長距離移動性昆虫への応用	49
4) 評価方法	43	謝辞	49
3. 結果	43	Acknowledgement	49
4. 考察	43	引用文献	50
5. まとめ	44	Summary	53
付録 降雨予報の評価方法	45		

I はじめに

セジロウンカ *Sogatella furcifera* (Horváth) やトビイロウンカ *Nilaparvata lugens* (Stål) は、東アジアにおける水稻の主要な害虫である。現在では、イネウンカ類は長距離移動し、日本には東シナ海を越えて海外から飛来すると考えられているが、過去に大飢饉をもたらすこともあったウンカの異常発生の原因は、長らく不明であった⁽¹³⁾。イネウンカ類が長距離移動性を持つと考えられるようになった経緯には、捕獲調査、飛翔実験、気象解析、遺伝的解析、現地調査などの様々な手法を用いて行われた多面的な議論がある。まず、日本南方の太平洋上の気象観測船において多数のウンカが捕獲され⁽²⁾、これがウンカが海を越えて海外から日本に飛来するという海外飛来説が信憑性を持つ契機となった。その後、東シナ海上と地上でイネウンカ類の捕獲が行われ、低気圧の暖気側に発達する強い南西風とイネウンカ類の飛来とが相関し、そのときの風向きから中国大陸が飛来源となっていることが示唆された⁽¹²⁻¹⁴⁾。気象解析では、飛来源を推定するために、イネウンカ類の飛来地点からの2次元の流跡線解析が行われ、その終点が中国大陸南部に到達することが報告されている^(37,41)。飛翔能力を調べるために、トビイロウンカを用いた宙吊り飛翔実験が行われ、実際に飛来が観測される時のような高温多湿の風の中で長時間飛翔可能であることが示されている⁽²⁸⁾。トビイロウ

ンカの抵抗性品種に対する加害性の違い、すなわちバイオタイプの解析では、例えばバイオタイプ1から2への変化が北ベトナム、中国、日本で1980年代後半から90年代前半にほぼ同時に起こり、一方フィリピンなどでは同様の変化が1970年代半ばに起こったことなどから、トビイロウンカの個体群は、北ベトナム、中国、日本などに生息する東アジア個体群と、フィリピンなどに生息する東南アジア個体群、そしてインド、バングラデッシュなどに生息する南アジア個体群とに分けられている⁽³⁹⁾。セジロウンカについては、バイオタイプの違いは知られていないが、日本とフィリピンで採集した個体群で翅型発現性が異なることが知られている⁽²¹⁾。また殺虫剤感受性が異なっていることも^(22,23)、個体群はお互いに交流することなく独立して存在するという考えを支持している。現地調査は、中国南部やベトナム北部で行われ、水稻の栽培品種や作型、イネウンカ類の発生情報などが調べられた。そしてイネウンカ類がベトナム北部で周年発生しており、4、5月ごろの季節風により中国南部に飛来していると推定されている^(40,41)。

これらの研究で得られた知見は次のようにまとめられる。すなわち、梅雨時期に日本に飛来するイネウンカ類はベトナム北部で周年発生し、春にその一部が中国南部に移出し、そこで1,2世代経過した

後、6、7月に東シナ海北部を東進する低気圧に伴う南西風によって日本へ運ばれる。これらの地域のイネウンカ類は東アジア個体群を形成し、他の個体群から移入を受けず独立して維持されているというものである。

害虫管理にとって殺虫剤感受性^(22,23)、翅型発現性^(21,8)、品種加害性^(30,45)などの重要形質を知ることが極めて重要である。なぜなら、こうした形質はウンカの増殖率、その結果としての水稻被害へ影響を及ぼすからである。一方、こうした形質は飛来源によって異なるため、飛来するウンカの飛来源を推定することは極めて重要である。

飛来源を推定するために、様々な解析手法が開発されてきた。例えば、6時間間隔の気象データから得られた風速場中のウンカの移動軌道は流跡線解析により計算された⁽⁴⁷⁾。同じ手法は中国での移動予測に用いられた⁽⁵⁴⁾。下層ジェットの発達を利用した飛来モデルが提案され⁽³⁸⁾、これに基づいて飛来を予測するソフトウェアが開発された^(49,50)。しかし、こうしたモデルは6時間や12時間と、時間間隔が大きく、かつ特定の気圧面の気象データのみを使った2次元解析手法のために、推定された飛来源がどの程度信頼性があるかは明確ではなかった。例えば、1987年から90年の12時間間隔のデータを利用した解析では、多くの移動の見かけの飛来源が海上となっていた⁽⁴¹⁾。

解析の精度を改善するために、3次元の大気解析データを用いた大気数値モデルが利用され⁽⁴⁷⁾。このモデルは韓国のライトトラップで捕らえられた大きな飛来を適切に説明した。しかし、(i) その最上レベルは2200mに設定され、モデルは大気下層の地表や海面の影響を直接受ける層である大気境界層のみ考慮した簡便なモデルであり、精度の高い気象シミュレーションを行うためには大気全体を計算する必要がある。また(ii) ウンカの飛び立ち時刻は世界標準時(UTC) 0時に設定されていたが、実際は飛び立ちが観測されている現地時間の明け方もしくは夕方10UTCか21UTCに設定すべきである。さらに(iii) 解析では飛来源が固定され、同手法を用いた飛来源推定は行われなかった。このように改善の余地が残されていた。

現在、気象学では高精度の数値予報モデルが公開され、天気予報、大気解析、大気汚染物質の拡散な

ど様々な研究に利用されている⁽²⁴⁾。こうした数値予報モデルを用いれば、3次元の大気の解析を精度高く行うことができると考えられる。したがって、数値予報モデルをイネウンカ類の長距離移動研究に応用すれば、飛来源の推定がこれまでより精度高く行うことができると期待できる。また、解析の時間的、空間的分解能が上がると考えられるため、飛来する時刻や地域、飛翔高度や時間など飛来過程の詳細が検討できるようになると考えられる。さらに、数値予報モデルで予報された大気場の中でのウンカの移動を計算することができれば、飛来予測の精度が向上するだろうと期待できる。

したがって本研究では、水稻作の害虫管理の高度化に資するために、まずイネウンカ類の長距離移動過程の解明を目的とする。そのために、シミュレーション手法を用いてイネウンカ類の長距離移動を解析し、飛来源、飛翔高度、飛来時刻、飛来地域など移動に関わる諸要素を明らかにする。また、飛来予測の予測精度を向上させることを目的として、新しい予測手法を開発する。

手法は、新たに開発した飛来源推定のための3次元後退軌道解析手法と、日本原子力研究所が主体となって共同で開発した長距離移動シミュレーションモデルを用いた。また、モデル検証のために実施した1時間間隔の高頻度連続観測データと過去の捕獲データとを用いた。

本研究は全7章からなり、次の2つの章では新しい解析手法を提案した。第II章では、新しい3次元後退軌道解析手法を提案し、1969年にネットトラップで捕獲された飛来について飛来源を推定した。第III章では、時間的に順方向の手法として、長距離移動シミュレーションモデルを開発し、そのモデルと2003年の6月に連続観測を行った1時間間隔の捕獲データを用いて移動解析を行った。こうした解析手法を用いて、第IV章では、東南アジア個体群の東アジア個体群への侵入について解析した。日本に飛来するウンカは東アジア個体群に属し、重要な遺伝的形質が異なる東南アジア個体群の侵入の推定は、これまでの通説を覆す、新しい解析結果である。第V章では、3次元後退軌道解析手法と15年間の捕獲データを用いて、梅雨時期に九州に飛来するウンカの主要な飛来源を推定した。また既存の2次元手法との違いを論じた。第VI章では、このモデルを用いた

リアルタイム飛来予測システムの開発と評価について論じた。最終章では、以上の結果を総合的に論じるとともに、今後の研究方向について論じた。

なお本報告は、著者が京都大学へ提出した学位論文を一部修正、加筆したものである。

II 3次元後退軌道解析手法の開発

1. 目的

本章では、最新の数値予報モデルと後退軌道解析モデルを用いた新しい長距離移動解析手法を提案する⁽²⁹⁾。

数値予報モデルは3次元の大気場の時間変化を計算し、後退軌道解析モデルはそのデータを利用してイネウンカ類の3次元の後退軌道を計算する。用いた数値予報モデルは、メソスケール(10³から10km規模)の大気循環の時間発展をシミュレーションできるので、従来手法と比較して時空間的に密な解析が可能である。そのため本手法の精度検証には捕獲時間間隔の短いウンカの捕獲データが必要となる。

農林水産省の病害虫発生予察事業の一環として、日本全域でライトトラップによる、また加えて西日本を中心としてネットトラップによるウンカ類の発生量調査が実施されている。ライトトラップはつや消しの60W電球を使っている。ネットトラップは地上10mの柱の先端に取り付けた1mのリングに1.5mの深さのネットを付けたトラップである^(13,14)。しか

しながら、これらの調査では捕獲された昆虫は一日単位でしか計数されない。また、東シナ海における気象観測船上でのネットトラップを用いた捕獲調査が毎年行われているが、その調査間隔は3時間である。そのためここでの精度検証には1969年に福岡県筑後市で得られた1時間間隔のネットトラップによる捕獲データを使用した。

2. 材料および方法

1) ウンカの長距離移動

イネウンカ類は体長が3-4mm、体重が1-3mgである⁽²⁸⁾。ウンカは約1m/sの速度で飛翔するが⁽³⁵⁾、長距離移動が起こる時の東シナ海上空の典型的な風速は10m/s以上である^(38,51)。トビイロウンカの宙吊り飛翔実験によると、ウンカは湿度の高い空気の中では最長23時間飛翔する能力があることが示されている⁽²⁸⁾。また、ウンカは低い温度では飛翔を停止し、半数は16.5℃以下になると飛翔を停止した⁽²⁸⁾。圃場調査によると、ウンカは夕方か明け方に飛び立

Table 1-1. Planthopper catches by the net traps at Chikugo (33.2N, 130.5E) in Japan by Kisimoto (1971)

UTC	Temp. (°C)	Wind Direc -tion	Wind Speed (m/s)	<i>Sogatella furcifera</i>				<i>Nilaparvata lugens</i>				Total	
				Net 1		Net 2		Net 1		Net 2			
				♀	♂	♀	♂	♀	♂	♀	♂		
1969/06/24 07	-	-	-	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1969/06/25 07	23.6	SW	6.8	10	12	20	22	8	5	12	11	100	
09	23.5	SW	6.3	20	38	25	44	9	9	13	10	168	
10	23.1	SW	7.2	33	53	39	54	13	11	7	11	221	
11	22.4	SW	9.0	25	19	26	39	12	4	12	7	144	
12	22.0	SW	8.8	0	1	1	0	0	0	0	0	2	
16	21.2	SW	4.3	6	9	6	8	2	1	1	3	36	
21	19.7	SW	2.0	2	2	4	3	0	2	0	0	13	
23	21.9	SW	1.2	2	0	0	0	0	0	1	0	3	

Catches comprise the total catches from the preceding observation time. A '-' mark denotes no data. A mass migration was first recognized at 07 UTC 25 June. The insects were alive when caught and it was supposed that the catching had started not so long before then (Kisimoto, 1971).

ち、その後0.2m/sで上昇し、数100mから1 km上空まで高度を上げた^(27,35)。長距離移動後の着地過程についてはほとんど分かっていない。

2) ネットトラップによる1時間間隔の捕獲データ

新しい移動解析手法を評価するために、Kisimoto⁽¹⁹⁾が1969年6月24, 25日に筑後(33.2° N, 130.5° E)で取得したネットトラップによる1時間間隔の捕獲データを利用した(Table 1-1)。そのネットは前日まで3時間ごとに捕獲を調査していたが、25日に多数の飛来ウカを確認してからは1時間間隔に変更された。Table 1-1は07:00UTC(世界標準時)より以前にウカが筑後に到達し始め、10:00UTCに飛来数が最大となり、12:00UTCに突然終了したことを示している。その飛来の間、気温は22-23°C、平均風速は7.3m/s、風向は常に南西であった。

3) 解析モデル

ウカの後退軌道は数値予報モデルで計算された3次元の風速場を用いて、後退軌道解析モデルで計算された。

(1) 数値予報モデル

3次元大気場をシミュレーションするためにThe Pennsylvania State University /National Center for Atmospheric Research mesoscale model(通称MM5)が用いられた⁽⁵⁾。このモデルは1970年代初頭ペン

シルベニア州立大学のAnthesが開発したメソスケールモデルが原型となっている⁽¹¹⁾。MM5は非静力学領域モデルで地形準拠座標系を取り、メソスケールの大気循環をシミュレーションしたり、予測したりするように設計されている^(5,24)。このモデルは高度な機能があり、それらは複数の計算領域を入れ子にできるネ스팅、様々な全球解析モデルの出力を入力できる機能、様々な物理過程のモデル化を選択できること、そしていろいろなコンピュータで動作することなどを含む⁽²⁴⁾。そのドキュメントは充実しており、ユーザサポートが受けられることも特徴である。MM5の高い解析の質と信頼性によって世界中に多くのユーザを獲得している。

本研究では、大気のシミュレーションで使用する初期場はNCEP/NCAR再解析データを用いた⁽¹⁷⁾。これは6時間間隔のデータであり、2.5°の水平分解能がある。気象庁を含む世界の数値予報センターで用いられている数値予報技術は、その進歩に伴って数年おきに更新されるのが一般的である。したがって、現業で作成されているデータはその時代の数値予報技術をそのまま反映しており、時間的に不均質である。再解析データはこの欠点を改良し、長期間に及ぶ気象現象を解析するために、最新かつ高性能の数値予報技術を用いて過去数十年のデータを再度解析して作成されたものである。但し、観測データの質や量が年代によって異なるために、解析データの質

Table 1-2. Selection of MM5's schemes and parameters

Scheme/Parameter	Selection
Cumulus Parameterization	Grell
Planetary Boundary Layer (PBL) Scheme	MRF PBL
Explicit Moisture Scheme	Simple Ice
Radiation Scheme	RRTM longwave
Surface Scheme	Five-Layer Soil model
Land Use	USGS 25-Category
Nesting	One-way Nest
Number of Domains	2
Dimension of the Finest Domain	121*121
Resolution of the Finest Domain	33km
Number of Layers	23
Map Projection	Mercator
Forecast time	72 h
Initialization	00UTC 23 June, 1969

Refer to the model's manual for the detail of each parameter (NCAR, 2003).

は年代が古くなるにしたがって悪化するものの、NCEP/NCAR再解析データは、1948年から現在までのデータが利用可能である。したがって、ウンカの歴史的な飛来についても解析することができる。

Fig. 1-1は計算領域を示す。領域は2重の入れ子になっており、内側の小さい領域 (D02) のサイズは121×121格子で、分解能は33×33kmである。24の鉛直レベルがあり、最上位は100hPaである。Table 1-2はシミュレーションに用いたパラメータである。これらは観測された風速場とシミュレーションとを比較しながら決定された。手法の評価では、シミュレーションの初期時間は1969年6月23日00:00UTCであった。計算時間は72時間、出力は1時間おきであった。

(2) 後退軌道解析モデル

イネウンカ類は典型的な風速度よりも小さい速度

で飛翔するため、長距離移動中はウンカは風速度と同じ速度で移動すると仮定した。また飛翔中はウンカの羽ばたきにより重力と釣り合っていると仮定した。したがって後退軌道を計算する基本方程式は次のようになる：

$$\begin{aligned}x(t-1) &= x(t) - Udt \\y(t-1) &= y(t) - Vdt \\z(t-1) &= z(t) - Wdt\end{aligned}\quad (1)$$

ここで (x, y, z) はウンカの位置を、 (U, V, W) は風速度を、 t は計算ステップを表す。1ステップ dt は50sとした。風速度は1時間間隔の出力を用いて時間的かつ空間的に内挿した。計算の領域はMM5の領域と同じである。筑後へのそれぞれの到着時刻に対して、起点高度100-2000m (100m間隔) の20の後退軌道を計算した。捕獲が記録されている時間帯に対して1時間おきに計算を繰り返した。全

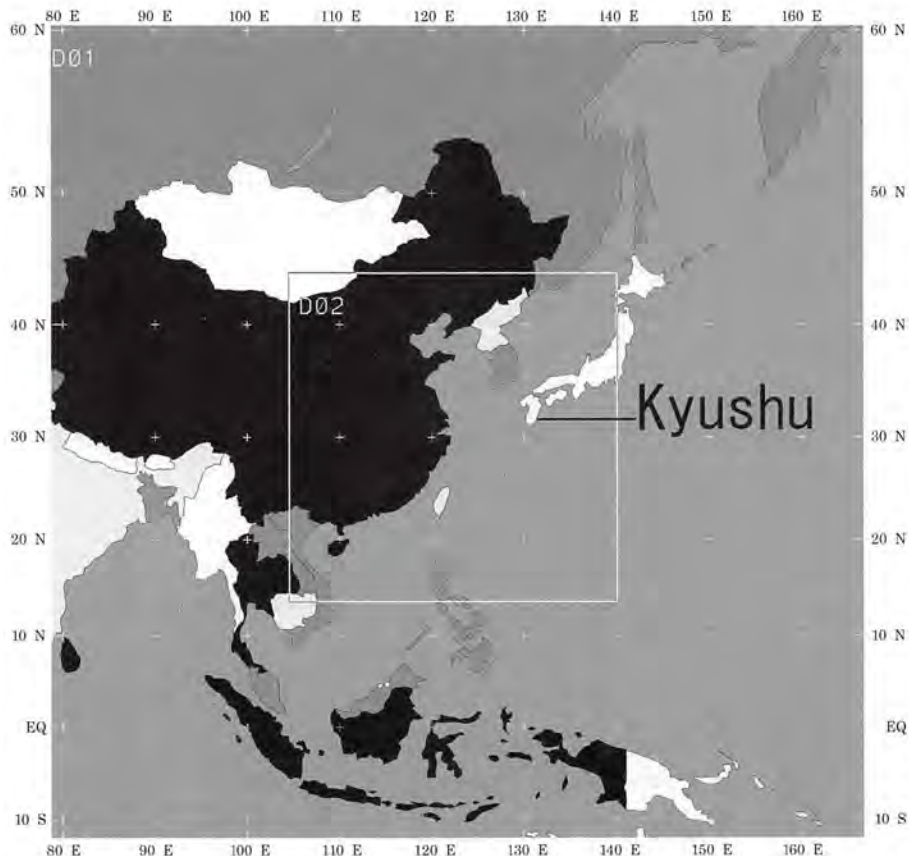


Fig. 1-1. Simulation domains of MM5. Horizontal resolutions or D01 and D02 are 99 and 33 km, respectively. Outputs of the 2nd domain is used by the migration model. Kyushu is a southwestern island of Japan, Where Chikugo is located.

ての軌道は6月23日21:00UTCの夕方終了させた、もしある軌道が可能性のある飛来源へ到達し、かつその起点時間に筑後で飛来が観測されていれば、その軌道は飛来軌道の可能性がある。その飛び立ち域、飛び立ち時間、飛翔高度、移動経路、移動時間が後の解析のために記録された。

混乱をさけるために、後退軌道に対して用いられた用語「起点高度」「起点時刻」「終点」「到達する」は、長距離軌道の記述で用いられた「到着高度」「到着時間」「飛び立ち地点」「飛び立つ」にそれぞれ対応する。

3. 結果

1) 大気の状態

Fig. 1-2は1969年6月23日から25日の海面気圧を示す。低気圧が長江デルタ上に出現し (Fig. 1-2a)、その中心が24時間後に東シナ海上に移動した (Fig. 1-2b)、低気圧は速度約54km/h (15m/s) で移動したと推定された (Fig. 1-2b, c)、低気圧の北東方向への移動に伴って、南西風の領域は東へ拡大し、6月24日21:00UTCに九州を覆い始めた。6月25日10:00UTCには、これは飛来のピークが起こった時間であるが、南西風は九州の北部を覆った (Fig. 1-2c)。900hPa (高度約1000m) の水平風の分布をFig. 1-3に示した。風速10m/s以上の領域は中国南部の沿岸部を覆い (Fig. 1-3a)、拡大しながら東へ移動した (Fig. 1-3b)。飛来のピーク時に900hPaの風速は、筑後上空で約17m/sであった (Fig. 1-3c)。6月25日10:00UTCにおける850 (1500m)、820 (1800m)、800 (2000m) hPa気圧面での計算された気温は、それぞれ約17、16、14°Cであった。

2) 軌道解析

解析された軌道の例をFig. 1-4に示した。Fig. 1-4aは6月25日06:00UTCに1500-2000mの高度に到達する軌道を示した。これらの軌道は中国南東部上空を出発した軌道である。移動中、軌道は連続的にその高度を変えた。地表面への投影軌道は緩やかに曲がった線であった。いくつかの軌道は5時間以上中国の沿岸部に沿って移動した。Fig. 1-4bは6月25日10:00UTCに到着した軌道を示した。高度の低い軌道の一部は沿岸部を出発した軌道であるが、高度の高い軌道は内陸上空を出発した軌道である。高度の

低い軌道の一部は6時間以上沿岸部に沿って移動した。Fig. 1-4cは6月25日11:00UTCに到着した軌道を示した。全ての軌道は陸地の上空を出発した軌道であった。Fig. 1-4dは6月25日12:00UTCに到着した軌道を示した。その軌道は海の上空を出発した軌道であった。Fig. 1-4aにおける軌道が上昇する傾向と、Fig. 1-4bからFig. 1-4dにおける急な上昇は低気圧中心付近の上昇気流が原因であると考えられる。

Table 1-3は筑後でのネットトラップの捕獲に対応した軌道の到着時の高度 (到着高度) を示した。表の列は左から、世界標準時、筑後におけるネットトラップの全捕獲数、飛翔時間、そして軌道の到着高度である。全部で360の軌道が計算され、その飛翔時間は23時間から40時間の範囲にあった。それぞれの軌道は6月23日21:00UTC、中国時間で明け方、に出発した。記号は、その到着高度の軌道が、中国の陸地上空を出発点としなかったことを示す。数字はその到着高度の軌道が、中国の陸地上空を出発点としたことを示し、その数字は出発時の高度 (出発高度) を表す。例えば、6月23日21:00UTCに中国上空541mを出発した軌道は、6月25日10:00UTCに筑後上空1000m地点に到着したことを示す。

Table 1-3は、6月25日03:00UTCから11:00UTCまでと、6月24日23:00UTCから25日00:00UTCまでに、800m以上の到着高度の軌道が中国から出発したことを示している。表では、後ほどの議論のために、1000m以下の出発高度を影付きの数字とした。

Fig. 1-5aは地図上に出発高度を示した。6月24日23:00UTCから25日00:00UTCまでに到着した軌道の出発高度は非常に高いために、それらが、観測された飛来を説明する軌道である可能性は低い。したがって、Fig. 1-5ではそれらが出発高度や位置は示さなかった。グレーの棒グラフは1000m以下であり、福建省の沿岸部に位置している。1000mより高い出発高度は白の棒グラフで、グレーの棒グラフの周囲に分布している。出発高度は海岸線から離れるにしたがって、高くなった。Fig. 1-5bは出発地点の2次元分布を示した。グレーと白の円はそれぞれ出発高度が1000mより低い場合と高い場合である。白い円は主に福建省の山地上空に位置している。一方グレーの円は海岸に沿って分布している。

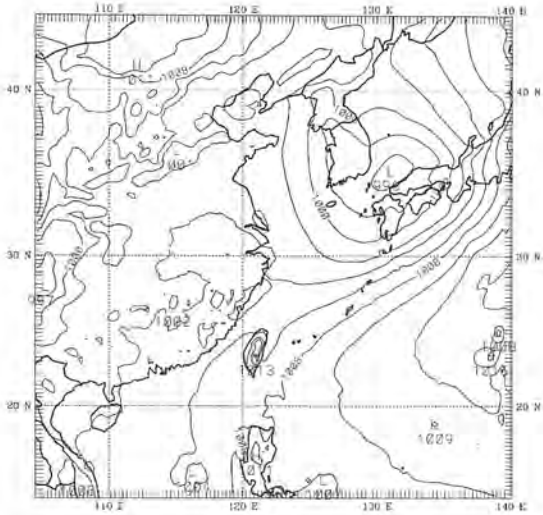


Fig. 1-2c

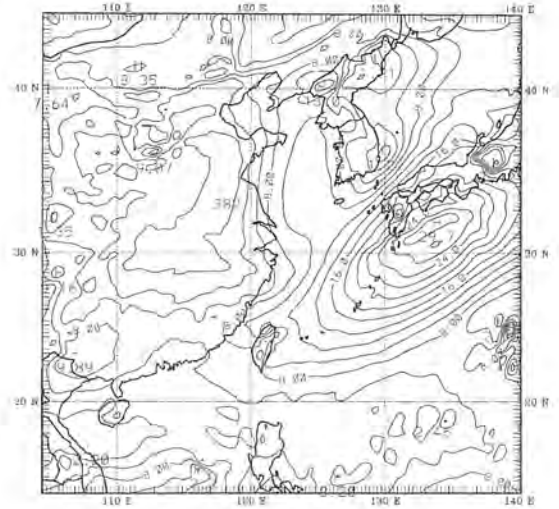


Fig. 1-3c

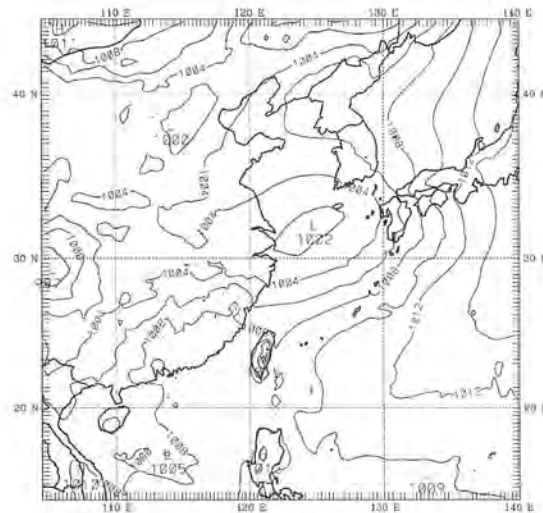


Fig. 1-2b

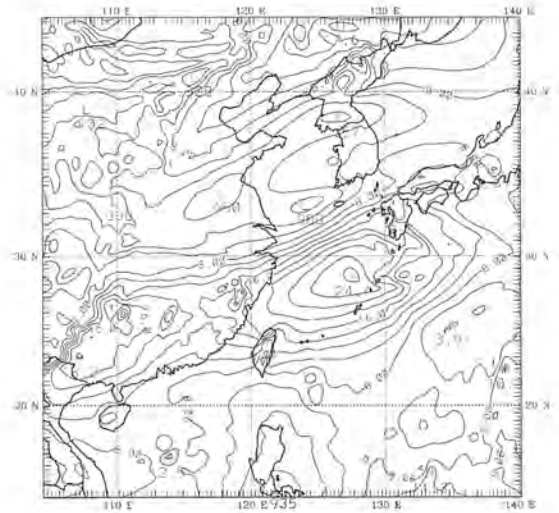


Fig. 1-3b

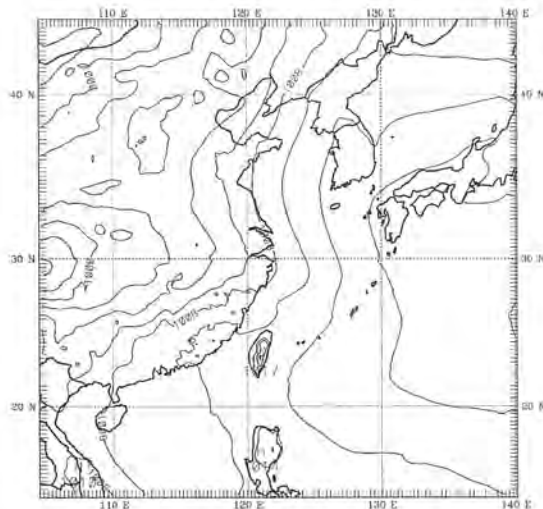


Fig. 1-2a. Simulated sea surface pressure at three different times. (a) 21 UTC 23 June 1969 (b) 21 UTC 24 June 1969 (c) 10 UTC 25 June 1969. The contour interval is 2 hPa.

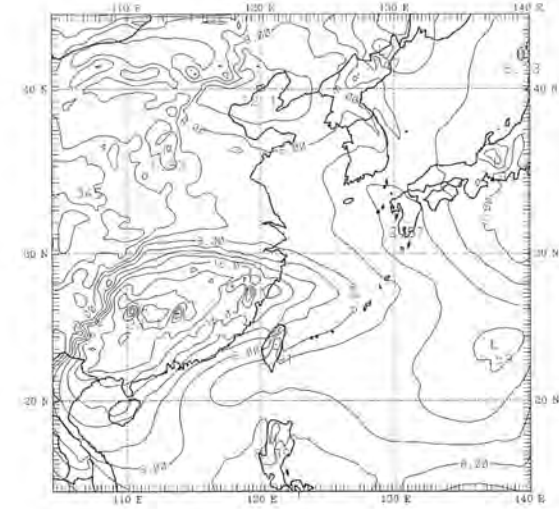


Fig. 1-3a. Simulated horizontal wind speed at 900 hPa (about 1000m) at three different times. (a) 21 UTC 24 June 1969 (c) 10 UTC 25 June 1969. The contour interval is 2 m/s.

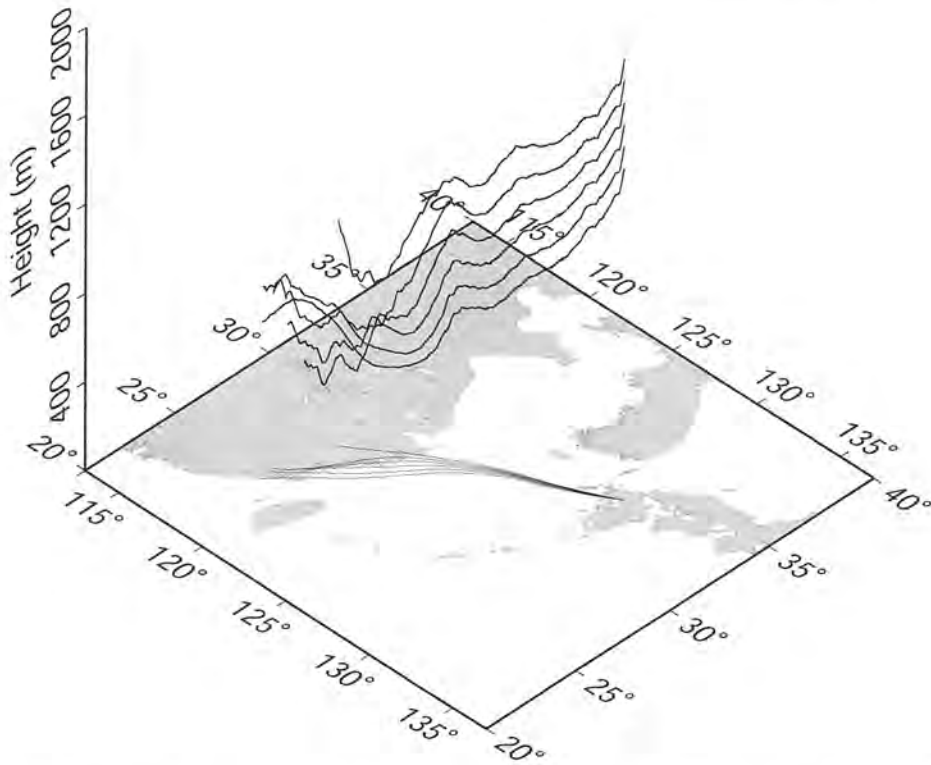


Fig. 1-4a. Examples of backward trajectories started over Chikugo at 4 different initial times. (a) 06 UTC (b) 10 UTC (c) 11 UTC (d) 12 UTC on 25 June. Final heights are 2000-1500 m (a), 2000-1000 m (b) or 2000-1200 m (c,d). All the trajectories end at 21 UTC 23 June. For horizontal information, each trajectory is projected onto the Earth's surface.

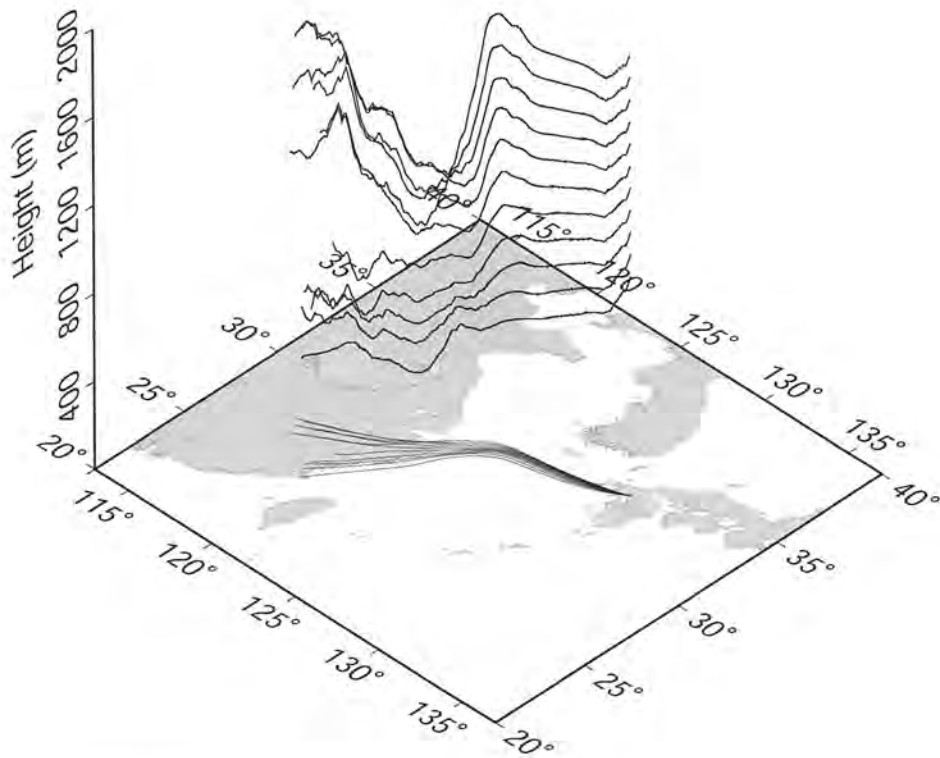


Fig. 1-4b

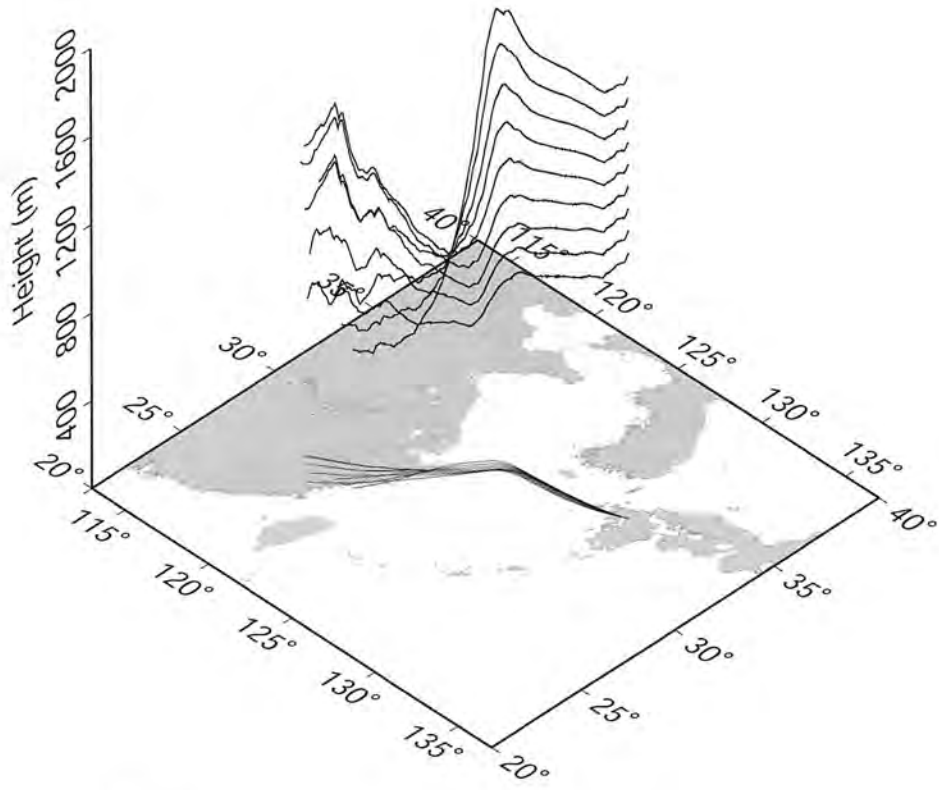


Fig. 1-4c

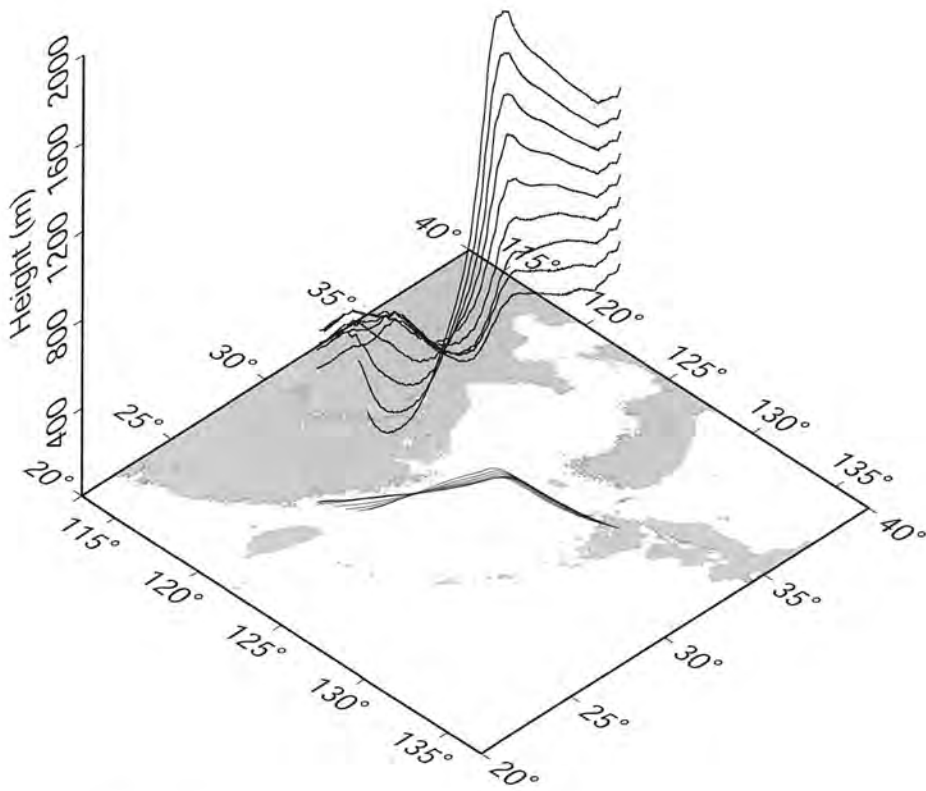


Fig. 1-4d

Table 1-3. Result of backward trajectory analysis

UTC	Net	MD	Final Height (100m)																	
			1	2	3	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19
1969/06/24 20		23	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
		24	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
		25	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
1969/06/25 00		26	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1641	1764	1790	1800	1832	1819	1746	1737
		27	-	-	-	-	-	1297	-	1145	1273	1465	1627	1746	1830	1821	1716	1690	1473	1406
		28	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
		29	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
		30	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1042
		31	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1104	860
		32	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	727	930	874	701	530
		33	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	709	833	795	656	484	1018
		100	34	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	763	710	433	1135	1348	1518	1380
		35	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	798	438	1023	1498	1396	1574	1388
	168	36	-	-	-	-	-	-	-	-	-	721	509	557	1088	1362	1483	1459	1557	1518
	221	37	-	-	-	-	-	-	541	738	784	693	965	1284	1533	1736	1784	1545	1383	
	144	38	-	-	-	-	-	-	-	-	838	996	1153	1333	1405	1286	832	728	-	
	12	2	39	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
		40	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

UTC, Net and MD denote the universal time coordinate, the total number of catches by the net traps at Chikugo and migration duration in hour. Night times in China in UTC column are shaded. The 'Final Height' columns indicate initial heights of backward trajectories over Chikugo. A '-' mark indicates that the trajectory did not originate from China. Numbers in the 'final Height' cells indicate the originating heights for each trajectory that originated from China. Shaded numbers are less than 1000m.

4. 考察

トラップの回収時間の間隔が短い捕獲データが少ないために、本研究では1969年の1例だけを解析した。しかし、新しい手法を用いて詳細な移動過程を記述することができた。

中国から日本へ長距離移動するために、ウシカは南西方向の気流に乗らなければならない。1969年のこの例では、もし気流が1000mより低ければ、軌道解析の結果は適切に飛来事象を説明できる。出発地点は沿岸部に位置していた。沿岸部では土地が低く水田が分布している（飛び立ち域）。気象シミュレーションによれば、飛び立ち域上空の900hPa（約1000m）では気温は19°Cであった。この温度ではウシカは飛翔可能である。出発高度は433から996mの範囲であった（Table 1-3）。1000mの高度へ到達する時間は、もし上昇速度を1.0m/sから0.2m/sとするならば、17分から83分である。この時間は、軌道が飛び立ち域上空を海岸線に沿って移動する時間、もしくは長距離移動に適した上空の気流が飛び立ち域上空に継続して存在していた時間と比較して短い。したがってウシカが南西方向の気流へ到達することは可能である。Table 1-3で、1000m以下の出発高度は1969年6月25日04:00UTCから11:00UTCまで分布している。観測された飛来は07:00UTCから11:00UTCまで起こったので、この結果は完全に観測と一致している。飛翔の間、軌道の大部分の地点では気

温は16°C以上であった。したがって筑後に到着したウシカは福建省沿岸部の飛び立ち域から飛来したと結論付けることができる。飛び立ち時間は6月23日21:00UTCころだったと推定される。

このように、時間間隔の短い捕獲調査と正確な軌道解析によって、飛翔時間を精度高く推定することが可能となり、飛翔時間は31時間から38時間であった。Turner et al.⁽⁴⁷⁾が推定した中国から韓国までの飛翔時間は24時間から45時間の範囲であった。

現在の着地過程に関する知識は大変限られており、本研究の解析手法では着地過程を考慮できなかった。しかし、全体を通して本研究の結果を説明するためには、九州の上空へ侵入してきたウシカは、高度1000mから2000mから地表へ到達しなければならない。着地過程に影響すると考えられる要素のひとつとして気温があるだろう。筑後で飛来ピークが観測された時間帯の、1800m以上の高度の推定気温は、16°Cより低かった。こうした低い温度はウシカの羽ばたきを停止させたり、または下方へ移動させたりするかもしれない。もし羽ばたきを停止すれば、ウシカの終端速度は知られていないものの、ウシカはある終端速度で落下するだろう。直径1mmの雨滴の終端速度は4m/sと報告されている⁽²⁶⁾。1000mから2000mの距離をこの速度で落下すると、約4分から8分（(1000 or 2000) / (4/60)）かかるため、ウシカはすばやく地表に到達できることになる。着地

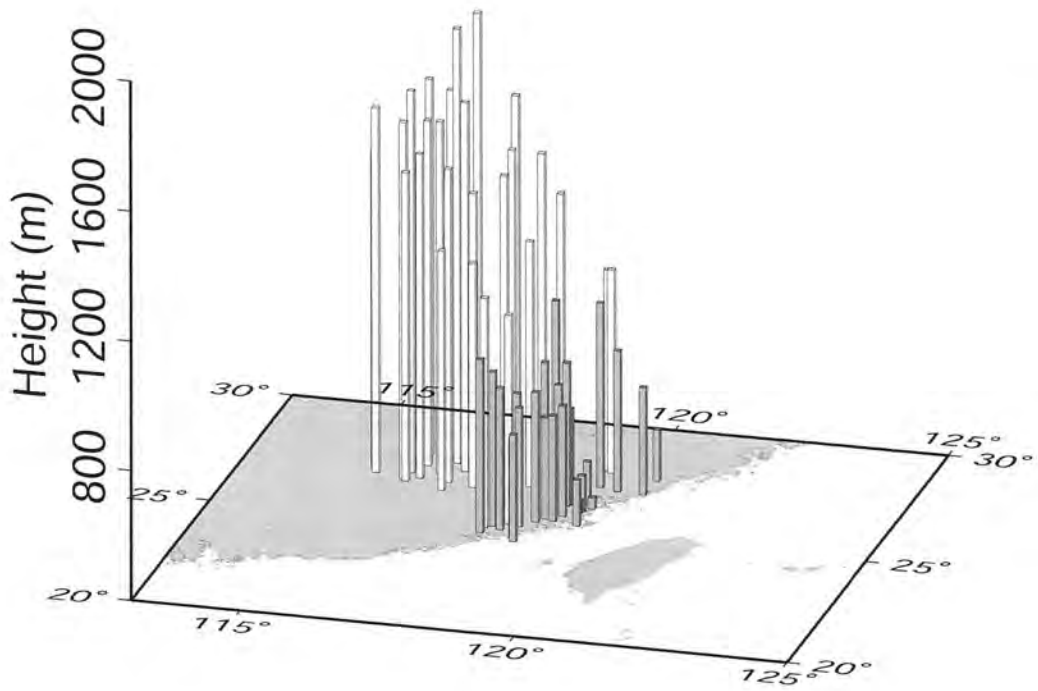


Fig. 1-5a

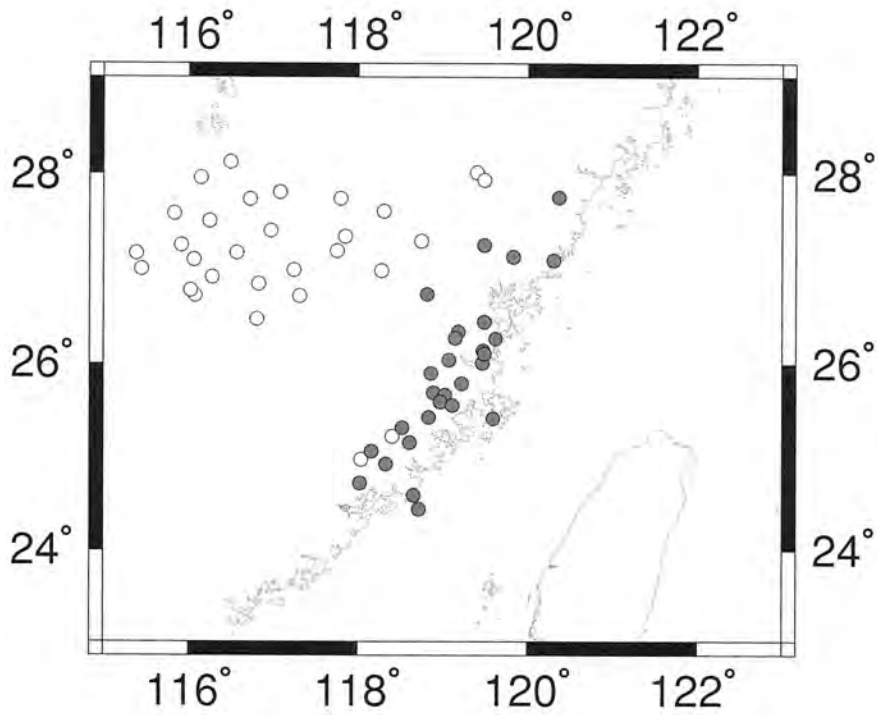


Fig. 1-5b

Fig. 1-5. Locations of originating points of the trajectories in Table 3. (a) Vertical bar graph shows the originating height in meter. (b) Horizontal locations of the points. Shaded bars and circles indicate their heights are less than 1000 m.

過程に影響するであろう2番目の要素は、内部境界層である⁽³³⁾。内部境界層は、表面の粗度の違いにより海岸線付近に形成される。この場合、大気は低い粗度（海）の表面から九州の大きな粗度（地表）の表面へ流れる。内部境界層では強い鉛直方向の混合がおり、それによって昆虫が地表面へ輸送されるだろう。3番目の要素は地形である。九州では標高1000mに達する山が多く存在する。山に影響された風は昆虫の鉛直方向の移動を引き起こすかもしれない。この点については、高分解能のより現実的な地形データを利用して風の構造をシミュレーションすることで検討することができる。

900hPa（約1000m）の東シナ海上空での最大風速は80km/h（Fig. 1-3b）を越えた。したがって100kmオーダーの分解能で飛来源を推定するためには少なくとも1時間間隔がそれより小さい間隔の観測が必要である。一方、我々の調査の経験に基づくと、ネットトラップを用いた場合、1時間より短い間隔で昆虫を回収することは作業上極めて困難である。したがって、精度良く飛来源を推定するためには1時

間間隔の観測が適切と考えられた。

5. まとめ

数値予報モデルによって計算された3次元の風速場を用いた新しい軌道解析手法は、ウンカの長距離移動の様々なパラメータを明らかにした。それらには飛来源、飛び立ち時刻、飛翔時間、移動の軌跡、そして移動高度などが含まれた。軌道解析によって、筑後で1969年6月25日07:00から11:00UTCに観測された飛来は、おそらく福建省の沿岸部、北緯24度から27度の間の地域から飛来したと考えられた。飛び立ち時刻は6月23日21:00UTC頃と推定された。解析ではまた、ウンカは飛び立ち域上空の433から996mの気流によって運ばれたと推定された。

軌道は風速場の構造とその変化に強く影響されるため、現実的な風速場を用いて3次元で軌道を計算することが重要である。したがって、数値予報モデルMM5は、高精度の大気場を提供することで、イネウンカ類の長距離移動研究に対して大きく貢献したと言える。

III 長距離移動シミュレーションモデルによる移動解析

1. 目的

前章において、1時間間隔の捕獲データと3次元後退軌道解析によって、飛来源が推定できた。しかし用いた解析手法は非常に簡単であった。それはウンカの後退軌道とはいえ、実質的に気流を後退的に追跡したものと等価であり、飛び立ち過程、拡散、気温による閾値などは考慮されなかった。ここで、気温による閾値の設定とは、トビイロウンカが気温16.5℃以下では、半数が羽ばたきを停止するという観察⁽³⁸⁾に関連するモデル化のことである。セジロウンカには、気温と羽ばたきに関する実験はまだ行われていない。

そこで、本章ではまず、ウンカの飛翔特性をモデル化して開発した長距離移動シミュレーションモデルを提案する⁽³³⁾。そのモデルは、飛び立ち過程、拡散、気温による閾値などを考慮し順方向にウンカの位置を計算し、相対的な空中密度を解析できる。

続いて、時間間隔の捕獲データと、長距離移動シミュレーションモデルを利用して長距離移動を解析する⁽³³⁾。時間間隔の捕獲データは、2003年の飛来

シーズンに西日本で調査を行い、新たに取得した。この章は、新しい飛来源推定手法の提案と、長距離移動解析において1時間間隔の捕獲データが重要であることを示す。提案する手法は、1時間間隔のセジロウンカの捕獲データを用いて評価された。それはセジロウンカがトビイロウンカより捕獲数が多かったためである。追加的な評価が必要であるものの、本手法はトビイロウンカの移動についても応用可能であるだろう。なぜなら両種の基本的な移動の振る舞いが類似している⁽⁴⁰⁾からである。

2. 材料および方法

1) ウンカの捕獲データ

1時間間隔の捕獲を九州の2地点で行った：佐賀（33.19° N, 130.32° E）と鹿児島（31.51° N, 130.52° E）である（Fig. 2-1）。2地点は、ほぼ南北に188kmだけ離れている。佐賀では地上10mの柱の先端に直径1mのリングにネットを付けたネットトラップ⁽⁴¹⁾を使用した。鹿児島では2階建てビル（高さ8.5m）の屋上に設置した、全高3.8mのJohnson-

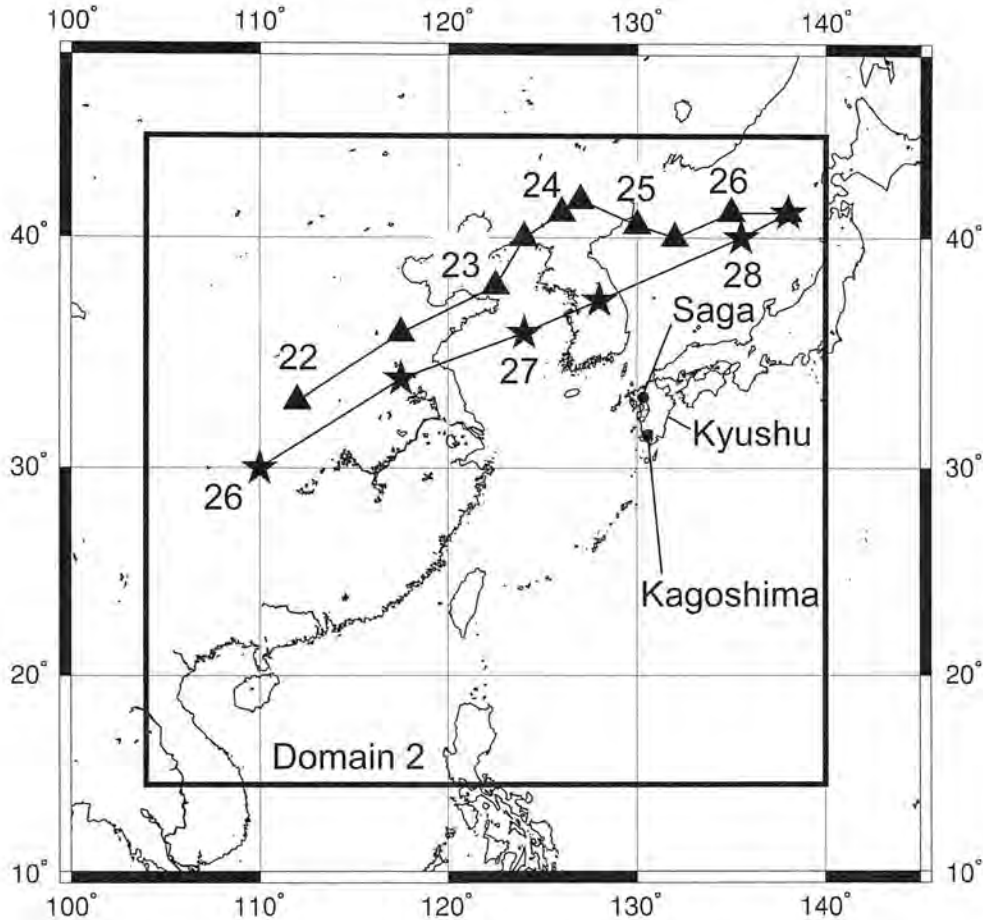


Fig. 2-1. Map of the study area. The rectangle shows the analytical area. The solid circles indicate the observation sites. The solid triangles and stars indicate the center locations of the first and second depressions, respectively during the hourly observation period. The number shows the date of June (00UTC). The locations are shown at intervals of 12 h.

Taylor型吸引トラップを利用した。その口径は70cm、ファンの出力は650Wであった。

これらのトラップは病虫害発生予察事業で用いられているトラップであり、本研究のために一時的に提供された。2地点で同一のトラップを利用したほうがよいと考えられたが、鹿児島ではネットトラップは設置されていなかった。しかしながらシミュレーションモデルは、飛び立ち密度が不明なため、絶対的な飛来密度を計算しないので、2種のトラップ間の捕獲効率の違いは、解析結果に影響を与えないと考えられる。捕獲された昆虫は、毎正時に小さなメッシュ袋で回収され、拡大鏡もしくは実体顕微鏡を用いて種が同定された。2地点の調査は同時に行われ、次のように、2日間の調査が2回行われた：2003年6月23日01UTCから25日00UTCまでと27日01UTCから29日03UTCまでである。

2) シミュレーションモデルの概要

長距離移動の解析は、2つの数値計算のモデルを用いて行われた。ひとつはMM5で^(1,5)、これは大気のシミュレーションを行う数値予報モデルである。もうひとつはGEARNで^(7,8)、これはウンカの移動を計算する粒子分散モデルである。解析の手順は以下の通りである。まずMM5が大気をシミュレーションして、1時間間隔の大気場を出力した。その大気場のうち、風速、気温と鉛直拡散係数がGEARNへ提供された。そしてGEARNはこうした気象データを利用してウンカの移動を計算した。最後に、計算格子の中に何頭のウンカが位置しているかを基にして、相対的な密度を計算した。

Fig. 2-1は本研究の解析領域を示した。その範囲は東経105度から140度、北緯14度から44度である。Table 2-1はMM5のシミュレーションに用いられたパ

ラメータを示した。これらのパラメータは、モデルが、実際の気象現象に近づくように大気シミュレーションを行うための値となっている。その解析データは、気象庁のGANALを用いた⁽⁹⁾。実際、計算された大気場は解析値によく似ていることを確認した。

GEARNは次のようにウンカの位置を計算した⁽³¹⁾。ウンカが飛び立つ領域は中国南部に位置している⁽³¹⁾。モデルの飛び立ち域は、中国の予察灯の分布⁽⁴⁸⁾と水田分布⁽⁶⁾、地形図に基づき、Fig. 2-2の灰色の矩形のように設定した。飛び立ち域のサイズは2種あり、メルカトル投影図上で1度と0.5度の矩形で

あり、飛び立ち域が位置している低地に水田があると想定される面積に依存している。台湾にも2つの飛び立ち域を追加した。

Fig. 2-3は計算手法の概念図を示した。それぞれの飛び立ち域から同じ数のウンカが飛び立つと仮定した (Fig. 2-3a, Table 2-1)。GEARNの計算パラメータのうち、ウンカの数はシミュレーション結果に大きな影響を及ぼした。解析に使用した1852という値は、結果の再現性をもつウンカ数のうちで小さいものとした。ウンカは10UTC (現地時間18時)と21UTC (現地時間5時)に飛び立ちを開始する。ウンカは、水平空間では飛び立ち域内でランダムな位

Table 2-1. Selection of schemes and parameters for MM5 and GEARN

Scheme/Parameter	Selection
(MM5)	
Cumulus Parameterization	Grell
Planetary Boundary Layer (PBL) Scheme	MRF PBL
Explicit Moisture Scheme	Simple Ice
Radiation Scheme	RRTM longwave
Surface Scheme	Five-Layer Soil model
Land Use	USGS 25-Category
Nesting	Two-way Nest
Number of Domains	2
Dimension of the Finest Domain	121×121
Resolution of the Finest Domain	33 km
Number of Layers	23
Top Level	100 hPa
Map Projection	Mercator
Forecast Time	72 h
Initialization	00UTC everyday
Initial Field	GSM JMA (1.25°×1.25°)
Sea Surface Temperature Data	RTG SST (0.5°×0.5°)
(GEARN)	
Dimension of the Domain	118×118
Resolution of the Domain	33 km
Number of Layers	20
Top Level	7500 m
Map Projection	Mercator
Prediction Time	48 h
Number of Particles per One Prediction	1852
Time Step	120 s

The detailed descriptions of the schemes are found in the manual⁽³¹⁾. MM5 was run with the analysis nudging option. It is a recognized four-dimensional data assimilation method⁽⁴⁹⁾ that calculates meteorological values such as wind and temperature similar to analytical data. The initial field was produced from 12-hourly global analysis data, GANAL⁽⁹⁾, and global sea surface temperature data, RTG SST, by NOAA⁽⁴⁰⁾. A horizontal resolution of 33 km was selected because the average distance between operational traps in Japan is of this order. The abbreviation UTC stands for Coordinated Universal Time. An analytical area is called a domain as in meteorology.

置から飛び立った (Fig. 2-3a). 全ての初期高度は10mであった. 個々のウンカの飛び立ちは, 一定間隔で継続して起こり, 1時間後に終了した. 各飛び立ち後, 最初の1時間の間は, ウンカは0.2m/sの一定の速度で上昇した.

飛翔中, ウンカは風速と同じ速度で移動した (Fig. 2-3b). 同時に鉛直方向の拡散も考慮した. 水平方向の拡散を考慮しなかった理由は, 予備実験の結果, これを考慮しない計算結果が考慮した場合より, 捕獲データとの対応が良かったからである. 但し, 放射性物質の大気拡散解析では, GEARNは水平拡散係数を用いるほうが, 測定データとよく合致することが知られている. ウンカが気温16.5°Cの等温面を越えて低温側に移動した場合は, 落下させ, その等温面に戻した. 移動の基本方程式は次の通りである:

$$\begin{aligned} x_{i+1} &= x_i + u\Delta t \\ y_{i+1} &= y_i + v\Delta t \\ z_{i+1}^* &= z_i^* + w^*\Delta t + \frac{\partial K_z^*}{\partial z} \Delta t + \sqrt{24K_z^*\Delta t}R \end{aligned} \quad (2)$$

ここで

(x, y, z^*) : ウンカの位置 (m).

地形準拠 z^* 座標系: $z^* = (z - z_g) / h$, $h = (z_t - z_g) / z_t$,
ここで z , z_g , z_t は カートesian座標系の鉛直座標, 標高, 計算領域の最高高度

(u, v, w^*) : 風速度 (m/s)

K_z^* : 鉛直拡散係数 (m^2/s)

Δt : 時間ステップ (s)

R : 平均0かつ標準偏差1の乱数

第3式に重力項がない理由は, ウンカが羽ばたき, その浮力と重力が釣り合っていると仮定しているためである. 最大の飛翔時間は48時間とした. 予備

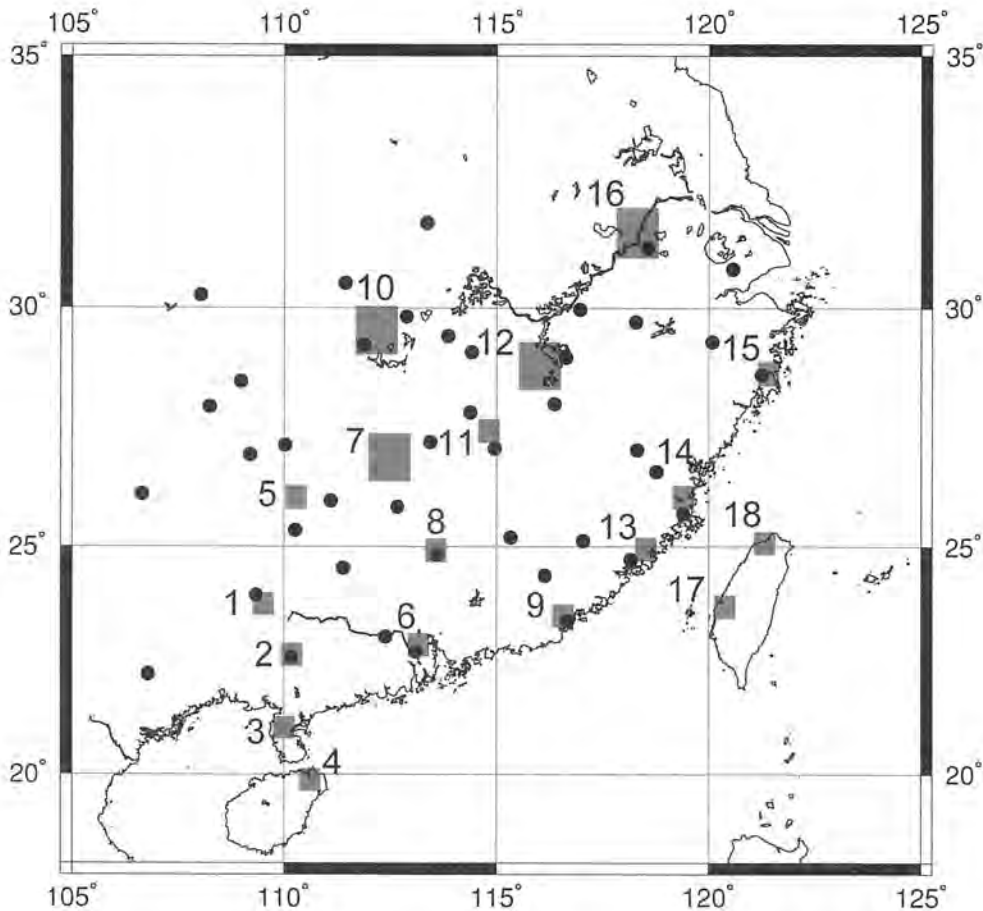


Fig. 2-2. Takeoff areas of 0.5- or 1-degree square for the migration simulation. The solid circles show Chinese light trap locations (Wang, 2001). All the areas are located near the traps and on lowlands in a topographical map

実験から、ウンカはこの時間内に中国南部から西日本へ移動できたからである。飛来源での移動可能な個体群密度が不明であったため、最下層（地上から100mまでの層）の計算格子ごとに相対的な密度を、ウンカの位置を基にして1時間に1回、計算した (Fig. 2-3c)。

毎時、各飛び立ち域からの0でない、計算格子の最下層における相対密度が、観測地点を覆うかどうかを調べた。もし、その地点を覆えば、その飛び立ち域からの飛来がその時間に起こったと解釈した。続いて、解析結果を捕獲データと比較した。

3) 解析手順

解析手順の1つのセットはFig. 2-4に示した。最初に72時間の大気シミュレーションが行われた。そして、開始時刻10UTCと21UTCの18の飛び立ち域からの移動がGEARNによって計算された。その結果は地図に図示された。

4) 評価の方法

評価は特別捕獲データを用いて行われた。飛び立ち域でのウンカの初期密度が不明であったため、飛来強度の定量的評価はできなかった。その代わりに、それぞれの飛び立ち域からの飛来が観測点へ到着する、もしくは飛来が終了する時刻の精度を次の2つの指標で評価した：

Precision (%) = 解析による飛来と観測された飛来との重なり時間 (h) / 解析された飛来の全時間 (h) × 100

Coverage (%) = 解析による飛来と観測された飛来との重なり時間 (h) / 観測された飛来の全時間 (h) × 100

例えば、もし解析による飛来と観測された飛来が時間単位で完全に一致したら、その解析に対するPrecisionとCoverage (PとC) はともに100%となる (Fig. 2-5)。もし解析と観測で重なり時間がない場合は、PとCの値はともに0%となる。解析による

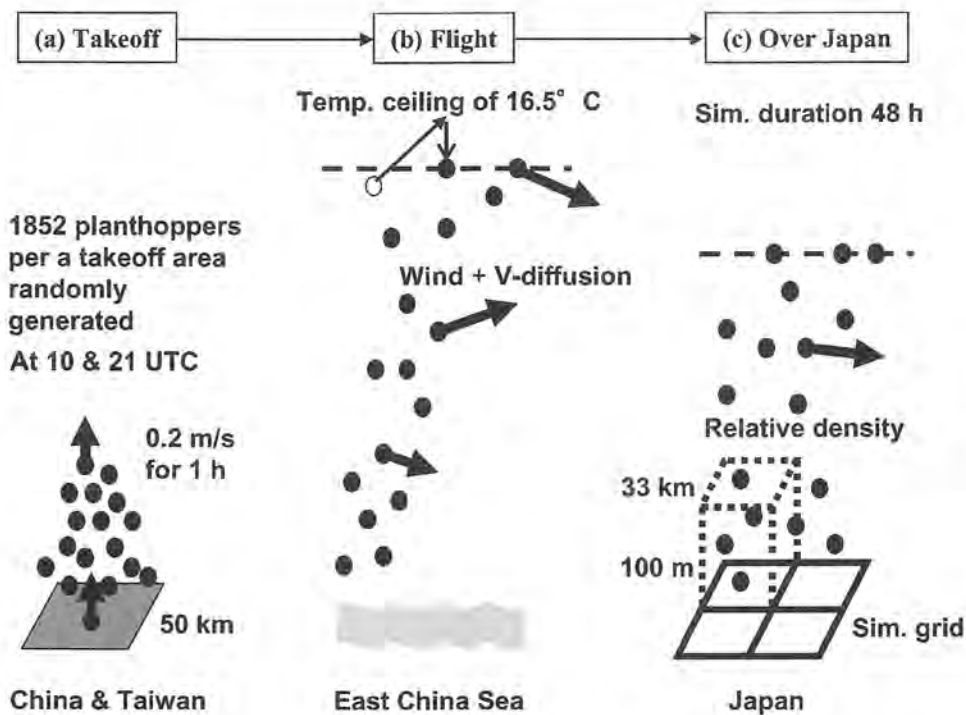


Fig. 2-3. Schematic diagram of the simulation method. (a) A total of 1,852 planthoppers (black circles) in the takeoff area started to take off at 10 or 21 UTC. The planthoppers rose at a speed of 0.2 m/s until 11 or 22 UTC. (b) The planthoppers moved at the same speed as the wind, with vertical diffusion taken into consideration. A planthopper that went beyond a temperature level of 16.5 °C was placed at that level. (c) Relative density was calculated hourly based on the number of planthoppers in each simulation grid in the lowest level.

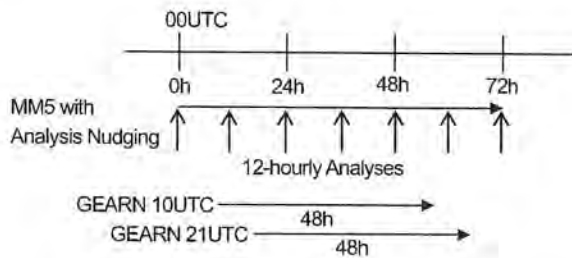


Fig. 2-4. Schematic diagram of analysis procedure. An atmospheric simulation of 72 h started at 00UTC and migration simulations of 48 h started at 10UTC and 21UTC are shown as horizontal arrows.

飛来が、観測より早く始まって、遅く終了した場合は、Pの値は100%より小さな値で、Cの値は100%となる。このように、個々の解析結果は、それぞれ独自のPとCの値を持ち、それらの値は、ある飛来源からの飛来解析が対応する捕獲データを説明する確からしさを表す。

3. 結果

1) 気象条件

1時間間隔の調査を行った期間中の、2つの低気圧の海面上での位置をFig. 2-1に示した。東へ移動したその中心は、12時間間隔で示された。気象データによると、中心の気圧は、2003年6月23日12UTCに988hPa、27日00UTCに995hPaであった。この期間中、南西風が東シナ海上空に発達した。

2) 連続捕獲

Fig. 2-6はセジロウカの捕獲結果を示した。複数の捕獲ピークが捉えられた。3頭以上のピークは10回観測された。それらに順番にAからJの名前を付け、今後これを飛来事象と呼ぶ。事象の継続時間は3から7時間であった。もっと多い継続時間は3時間または4時間であった。Fig. 2-6aからdを比較する。事象CとGが同時に起こっていることがわかる。事象DとHも同時に起こっていた。事象AからHが起こった時、南から南西風が吹いていた。一方事象IとJが起こった時は、西から北風が吹いていた。

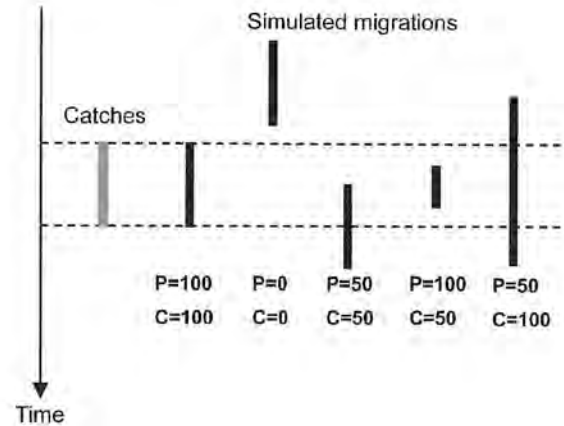


Fig. 2-5. Conceptual diagram of Precision and Coverage, P and C, respectively.

3) 1時間解析

Fig. 2-7と2-8はそれぞれ、飛び立ち域#13と#17からの相対密度の例を示した。相対密度の分布は雲のように見えることからウンカ雲と呼ぶ。2つの飛び立ち域から九州に飛来するのに要した時間は約36時間であった。#13からのウンカ雲は、飛び立ちから36時間後九州全体を覆ったが、#17からのウンカ雲は九州南部を覆った。一般に、ある地点でのウンカ雲の到着時間と継続時間は、飛び立ち域と飛び立ち時刻により異なる。

Table 2-2は解析された飛来の例である。この表は、それぞれの飛び立ち域からのウンカ雲が佐賀をいつ覆ったかを示した。例えば、事象Aは2003年6月21日10UTCに#13を飛び立ったウンカの移動か、同日の21時に#15を飛び立った移動によって説明される。事象Bは同様にして、複数の飛び立ち域(#13, #14, #15, #17, #18)から複数の飛び立ち時刻の飛来によって説明可能である。したがって複数の候補となる飛び立ち域が存在する。ひとつの事象は異なった飛び立ち域からの複数のウンカ雲によって覆われるかもしれないということに注意が必要である。しかし、事象と解析された飛来との同時性、または飛来の開始と終了のタイミングが一致する程度は、ウンカ雲ごとに異なる。多数の候補からひとつかそれ以上の飛来を信頼性をもって抽出するために、PとCの値が計算された。そしてPは30以上で、Cは50以上の飛来がTable 2-3に示された。表で残った飛び立ち域で多い地域は、台湾と中国南部の沿岸部であった。

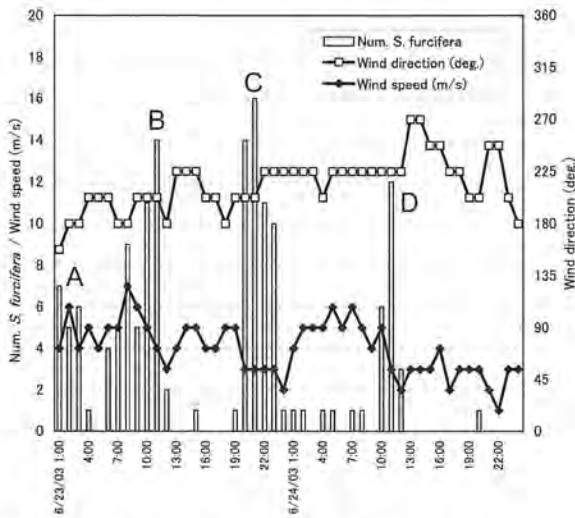


Fig. 2-6a. Catch of *S. furcifera* by the net trap at Saga from 01UTC 23 June to 00UTC 25 June 2003. The wind data were observed at a meteorological station 7km northwest from Saga site

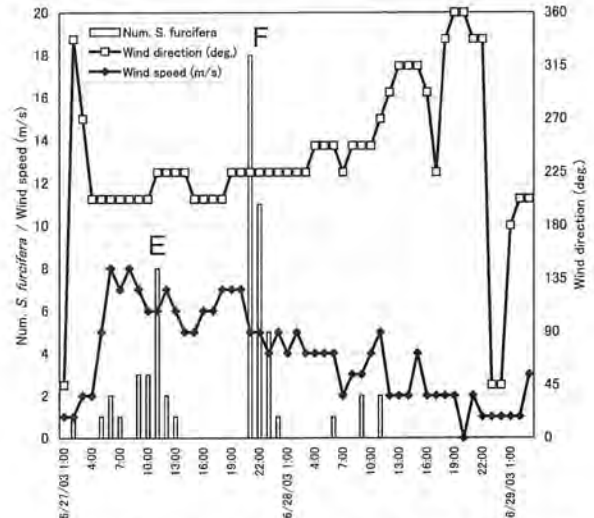


Fig. 2-6b. Catch of *S. furcifera* by the net trap at Saga from 01UTC 27 June to 03UTC 29 June 2003. The wind data were observed at a meteorological station 7km northwest from Saga site

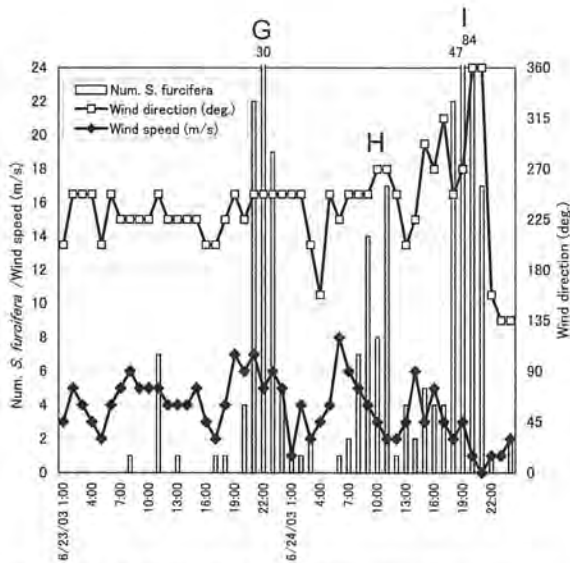


Fig. 2-6c. Catch of *S. furcifera* by the suction trap at Kagoshima from 01UTC 23 June to 00UTC 25 June 2003. The wind data were observed at a meteorological station 7km northeast from Kagoshima site.

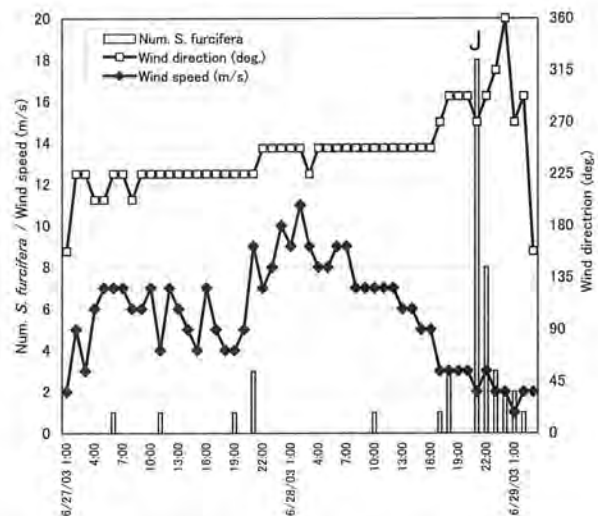


Fig. 2-6d. Catch of *S. furcifera* by the suction trap at Kagoshima from 01 UTC 27 June to 03 UTC 29 June 2003. The wind data were observed at a meteorological station 7km northeast from Kagoshima site.

4. 考察

1) 飛来源推定

Table 2-3にはまだ複数の候補が挙げられている。それらの中で、#13は、事象Jを除く全ての事象に対してPとCの値が大きいので、最も飛来源の可能性が高い。全体を通しての#13のCの値は80%であっ

た。飛び立ち域#13はZhou et al. (54)による広東・広西ゾーンの北東部に当たり、移出の可能性はある。

飛び立ち域#14は、半数の事象に対して大きいPとCの値を示した。この地域は、#13と同じ福建省に位置する。両地域は距離的に近く、同時期に移出が起こる可能性がある。

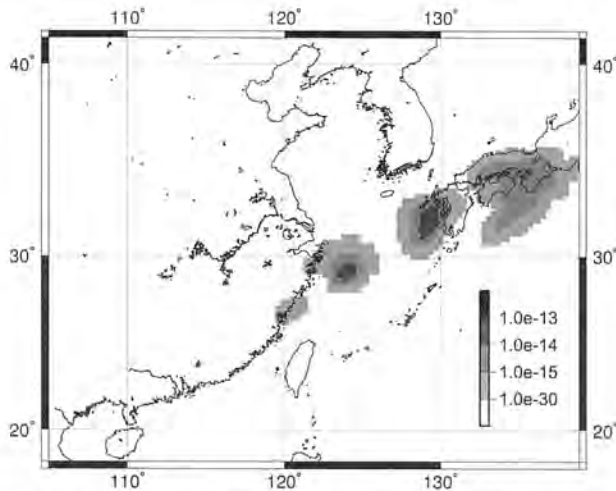


Fig. 2-7. Relative aerial density of planthoppers in the lowest layer (under 100m above the ground) of GEARN started from #13 at 10UTC 22 June 2003. The density 'cloud' is shown at intervals of 12h starting at 22UTC 22 June 2003.

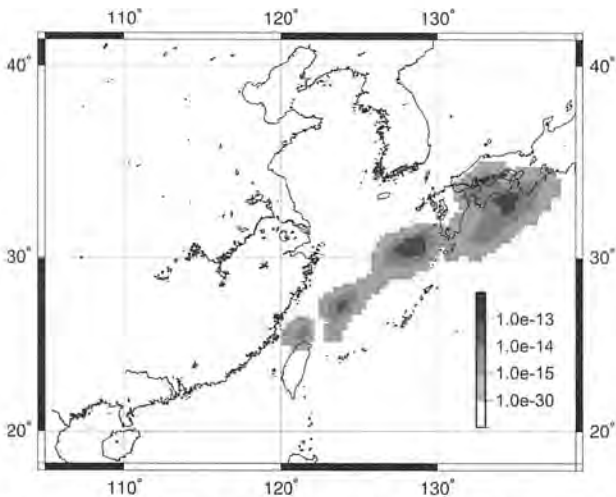


Fig. 2-8. Relative aerial density of planthoppers in the lowest layer less than 100m above the ground of GEARN started from #17 at 10UTC 22 June 2003. The density 'cloud' is shown at intervals of 12h starting at 22UTC 22 June 2003.

飛び立ち域#15も高いPとCの値を示した。しかしこの地域はやや北部に位置し、主要な移出は7月中旬以降に起こる⁽⁵¹⁾。寒川ら⁽⁴²⁾は、長江河口周辺は日本と同様に6月後半にウンカの侵入を受けると指摘した。したがって#15が日本への飛来源となる可能性は低いと考えられる。

飛び立ち域#9は、広東・広西ゾーンに位置し、移出が可能である。事象HとJは部分的にこの地域

Table 2-2. Results of the hourly analyses at Saga site from 01UTC 23 June to 00UTC 25 June 2003

UTC	Saga	Event	Area															
			5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	17	18			
2003/6/23 01	7	A																
	5																	
	6																	
	1																	
	0																	
	06	B	4															
	5																	
	9																	
	5																	
	11																	
	14																	
	12	C	2															
	0																	
	0																	
	1																	
	0																	
	18																	
		D	14															
	16																	
	11																	
	10																	
	0																	
2003/6/24 00			1															
	1		1															
	0		0															
	1		1															
	06		0															
	1		1															
	0		0															
	6		6															
	12		12															
	0		0															
	0		0															
	0		0															
	18		18															
	0		0															
	0		0															
	0		0															
	0		0															
	0		0															
2003/6/25 00			0															

The Saga column, Event and Area *n* show the hourly net trap catch of *S. furcifera*, name of migration event (Figs. 2-6a - d) and analyzed migrations for each takeoff area (Fig. 2-2). Marks solid square, vertical bar, square, cross denote takeoff time of 10UTC 21 June, 21UTC 21 June, 10UTC 22 June and 21UTC 22 June, respectively. Takeoff areas whose clouds did not cover the site are not shown.

からの飛来によって説明された。

飛び立ち域#7は南嶺ゾーンと北・南嶺ゾーンとの境界に位置し、通常移出は7月中旬頃である。したがって、この地域からの飛来が事象Cへ寄与する可能性は大きくないだろう。

台湾の#17からの飛来は全Coverageが73%であり、鹿児島島の全事象に対して大きなPとCの値を示した。このことは台湾が飛来源となりうることを示す。実際にこの時期の水稲の生育ステージは、二期作の第一期作水稲の登熟期に当たり、ウンカが多数誘殺されるため⁽¹³⁾、飛来源と推定できる。

飛び立ち域#9と#11-14で囲まれた地域は山地で、水稲の面積は小さく、一方中国南部の沿岸部の低地

Table 2-3. Precision and Coverage for each migration event obtained by the analysis

Event	Precision/Coverage (%)																	
	Area																	
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
A	Precision												77*					
	Coverage												77*					
B	Precision												77*	75	80			100
	Coverage												77*	100	66			83
C	Precision								33				37	80	100			66
	Coverage								100				75	100	100			50
D	Precision												50					
	Coverage												100					
E	Precision												50	50	100			33 42
	Coverage												66	100	66			100 100
F	Precision												75					
	Coverage												100					
G	Precision												50	62	75			33 75
	Coverage												60	100	60			60 60
H	Precision								40				71**					75** 36
	Coverage								50				90**					81** 100
I	Precision												71**					75**
	Coverage												90**					81**
J	Precision									50					42			37
	Coverage									100					100			100

Only those migrations having a Precision larger than 30 and a Coverage larger than 50 are listed. Values with * or ** indicate two successive events. A and B, and H and I were each treated as a single events because a single migration could explain the two events.

には、水田が連続して分布している⁽⁶⁾。Table 2-3に示したように、飛び立ち域#14から#13にかけてPとCの値は増加し、事象に対する飛来の寄与度が増し、#13でピークとなった後、#9で少々減少した。

以上の解析によって、福建省と台湾の沿岸部が、西日本の2つの地点で観測された飛来の飛来源である可能性が高い、と結論付けることができる。

2) 飛来の特徴

捕獲データは2地点で同時に起こったいくつかの飛来を示した。解析結果によると、事象CとGは、#13か#14から6月22日10UTCに飛び立った飛来によって説明された。同じ事象CとGは、#17から21日21UTCと22日10UTCに飛び立った飛来でも説明された。#13から22日21UTCに飛び立った飛来だけは、事象DとHを説明できた。#17と#18からの飛来は事象Hを説明した。こうした結果は台湾からの飛来よりも、福建省からの飛来がよく説明すると示唆されるが、さらなる研究によって確認が必要である。

Fig. 2-6aからdに示したように、観測された事象は、ほぼ12時間間隔である。これは明け方と夕方に飛び立ちを開始するという観測結果と一致する。こ

の飛び立ちの周期性が事象の間隔の理由であろう。

事象は3-7時間の短い時間幅を示した (Table 2-4)。この現象の理由は以下で論じる。飛び立ちは飛来源地域で明け方か夕方に起こる。圃場での調査によって、ウナカが飛び立つ時間幅は小さく、1-2時間であった⁽²⁷⁾。この飛び立ち時の振る舞いが、事象の時間幅が短いひとつの理由であろう。

主要な飛来が起こる梅雨時期では、飛び立ちが起こる好適な条件は、中国南部に限定されており、それは北緯25度以南である⁽⁵⁴⁾。このことが、短い時間幅の事象の2番目の理由であろう。もし、その時期までに、北部の地域、例えば北緯25度以上30度以下の地域がウナカに侵入され、それらの次世代が飛び立ち可能であるとするならば、飛来は、気象条件によっては連続的になるだろう。実際に、Table 2-2の結果は、北部の飛び立ち域、例えば#12や#15から連続的に飛来が起こりうることを示していた。これは、北部の飛び立ち域からのウナカ雲が、佐賀に到達していたからである。

飛び立ち後、ウナカは風に運ばれる。ウナカの飛翔速度は約1 m/s程度であり、風速度 (10 m/s程度) より遅く、また飛翔時間は24時間から36時間であっ

Table 2-4. Event duration and flight duration of analyzed migrations from #13, #14, #17 and #18

Event	Event Duration (h)	Flight Duration (h) Beginning/End	Area			
			13	14	17	18
A	3	Beginning	40			
		End	-			
B	6	Beginning	-	33	44	
		End	48	38	48	
C	4	Beginning	35	34	47	
		End	37	37	48	
D	3	Beginning	37			
		End	39			
E	3	Beginning	24	23	36	36
		End	25	25	38	38
F	3	Beginning	24			
		End	26			
G	5	Beginning	36	34	36	36
		End	38	38	38	38
H	4	Beginning	35		35	35
		End	-	-	-	39
I	7	Beginning	-		-	-
		End	47		46	
J	3	Beginning			35	
		End			37	

The flight duration increases from the beginning to end of the event. Two pairs of successive events A and B, and H and I were treated as single events.

た (Table 2-4). したがって、飛翔中のウンカがそれぞれ異なった向きに向いているとする⁽²⁵⁾ならば、飛翔時間の間に起こる分散は風速度方向に、172.8kmから259.2km ($2 \times 1 \text{ m/s} \times 24.36 \text{ h} \times 3600 \text{ s}$)と計算される。もし平均風速を15m/sと仮定すると、事象の時間幅は3.2時間から4.8時間となる。この見積もりは観測された時間幅と一致する。したがって、事象の短い時間幅に対する3番目の理由は飛翔時におけるランダムな飛翔向きと遅い飛翔速度とによるものかもしれない。

しかしながら、事象の時間幅は、単に拡散の効果の結果である可能性もある。運動方程式は鉛直方向の拡散を考慮した。しかしランダムな飛翔の向きと水平方向の拡散は考慮しなかった。下層のウンカ密度は、上層ほど風速が早いこと、層間でのウンカの混合とによって(鉛直拡散の効果)、移動時間が経つにつれて増加する。九州の観測地点では、ウンカ雲の風速度に沿った方向のサイズは、観測された事象の時間幅と対応していた。そのことでPとCの値が高かった (Table 2-3)。こうした結果は、1時間の捕獲データに関する限り、拡散や風速度による移

動、飛び立ち域、飛び立ち時間などの解析に用いた仮定が妥当であったこと、そしてまた、事象の時間幅は、主に鉛直拡散によって生じているかもしれないことを示している。

現時点では、飛翔中の詳細な振る舞いが不明であるため、ここで指摘できることは、鉛直拡散の効果とランダムな飛翔向きの効果とは、等しい大きさであるということである。

3) 長距離移動シュミレーションモデルについて

モデルでは水平拡散項を除いた。水平拡散を考慮した計算では、考慮しない現在のモデルよりもウンカ雲の拡散領域が広がった。これまでの多数の解析例から、考慮しない場合の方が実際の飛来地域との対応が良かった。ただ、水平拡散を考慮して計算して、ウンカの密度に閾値を設定すれば、新しいウンカ雲の領域を実際の飛来地域に対応させることができると期待されるが、本研究ではモデルを単純化した。

また、鉛直拡散項を計算する乱数については、一様乱数を使用した。これは、統計理論からいえば、平均が0で標準偏差が適切である限り、乱数を正規型にするか一様にするかは本質的な問題ではない。ここでは簡便さの観点で、ほとんどの計算機で乱数発生関数を標準装備している0から1の一様乱数を用いた。実際、粒子数を十分に取って、時間的空間的に一様な単純条件で試した結果、数十ステップで平滑な正規型拡散分布になることが確認されている。

4) 既存手法との比較

飛来源を推定するために、既存の2次元手法は850hPaや地表面の風速度データを用いた^(37,51,41)。最近になって、2つの3次元解析手法が報告された^(47,29)。解析の質を議論するために、ひとつの比較を行った。(Fig. 2-9)。この図は、Rosenberg and Magor⁽³⁷⁾の手法を用いて計算された850hPaと1000hPaレベルでの2次元後退軌道を示した。軌道は、2003年6月23日20UTCから23UTCまでに佐賀上空を出発して、22日10UTCに終了した軌道であり、Table 2-2の事象Cに対応する。図は、Otuka et al.⁽²⁹⁾の手法を用いて計算された3時限後退軌道の終点分布も示した。3次元軌道の基点高度と終点時刻は2次元の場合と同一であった。起点高度は100mから1500mまでで、100m間隔であった。

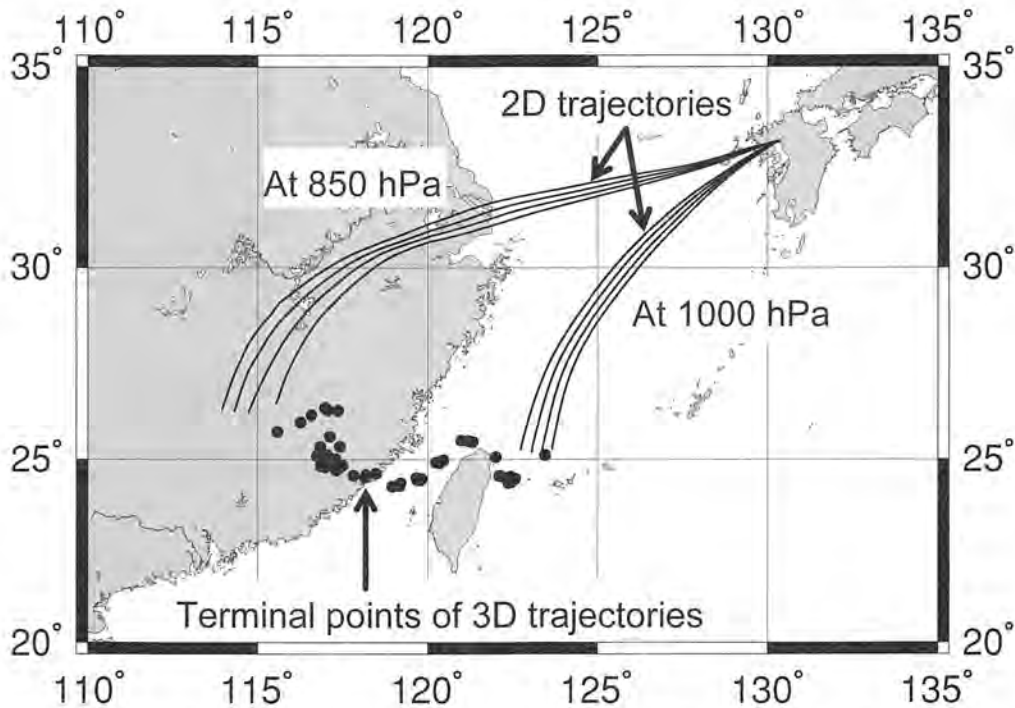


Fig. 2-9. Backward trajectories of two-dimensional (2D) analysis by Rosenberg and Magor (1983) and terminal points of three-dimensional (3D) analysis by Otuka et al. (2005a). The 2D trajectories traveled at pressure level of 850 and 1000 hPa. The 3D trajectories started at points of 100 to 1500 m high over the Saga site. The starting time ranged from 20 to 23UTC 23 June 2003, and the terminal time was set at 10UTC 22 June. The same initial atmospheric data were used for both analyses.

3次元解析に対しては、東経117.5度より西側に分布した終点は、山岳地帯に位置している、そのため飛来源にはならないだろう。海上の終点も同様に飛来源とはならない。このようにして、もっとも可能性が高い飛来源は、福建省の沿岸部（図中の上向き矢）であると推定された。これらの軌道の起点高度は900m以上であった。

2次元解析に対しては、推定された飛来源は、3次元手法での推定地域と比較して北西側に位置した。

一方で、本研究では、事象Cの飛来源は#7、#13、#14と#17を含む地域と推定された。

2つの3次元解析で推定された福建省の飛来源は、よく一致した。2次元解析で推定された飛来源は、#7に対応し、本研究の推定地域の北西の端であった。850hPaでの2次元軌道は北西よりの経路となり、1000hPaの軌道は南東よりの経路となった。この現象は次のように解釈される。すなわち、一般に、ある地点上空の1500m付近で吹く南西風は、地

表面による摩擦によって、高度が下がるにつれて、南風へ徐々に変化する。これをエクマンらせんという^(26,43)。したがって、850hPaの風速度データを用いる2次元手法は、可能な飛来源の中心部を推定せずに、その南西側を推定していた可能性がある。ただし、この仮説はここで議論した一例のみが支持しているに過ぎない（第V章で多数の2次元解析の例を示す）。但し、2次元解析のように、ウンカが等気圧面を飛翔し続けるという証拠はない。一方で、本研究の飛翔モデリングは、飛び立ちの過程や、気温閾値設定、鉛直拡散と最下層での相対密度など様々なウンカの振る舞いを考慮している。結果に示したように、モデルは高い値のCとPを持つ飛来をシミュレーションできた。さらに、同じモデルは、西日本で、天気予報の降雨予測の適中率と同程度の的中率をもって飛来を予測できた⁽³¹⁾。以上から本研究の長距離移動シミュレーションモデルは、少なくとも既存の2次元解析手法よりも、信頼性が高いと言

えるだろう。

5) 捕獲時間間隔

1時間間隔の捕獲データに示したように、飛来は数時間という短い時間幅の事象であった。したがって、論理的に、こうした飛来事象を捉えるためには、時間間隔の短い捕獲が必要である。その理想的な時間間隔を決めるために、1つの飛来事象は時間のガウス関数 $g(t)$ で表され、また2つの強度の同じ事象が続けて起こるとする。事象の平均時間幅が4.1時間であったので (Table 2-1)、関数の幅を4時間に設定する (Fig. 2-10)。もし2つの事象が0時間から4時間離れて起こると、合成された関数は一つだけのピークを形成する (データ略)。しかしながら、2つの事象が5時間以上離れると、合成された関数 $g(t) + g(t-5)$ の内、捕獲間隔が短くサンプリングされたもの (▲や■) は、2つのピークを形成できる。このようにピークを分解するためには、捕獲間隔は少なくとも2時間以下である必要がある。

シミュレーションの観点からは、捕獲間隔は飛来源推定の空間分解能を決めるため、短い捕獲間隔が好ましい。例えば15m/sの風は1時間に54kmだけ移動する。もしも捕獲間隔を n 時間に設定すると、風速度の方向に $n \times 54$ kmだけ離れた2つの飛び立ち域からの飛来は、ある観測地点でのそれらの到着時刻からは区別できる。なぜなら観測地点に近い方の飛来個体群のフロントが、もう一方より n 時間だけ早く到達するからである。Table 2-2は異なった飛び立ち域からの飛来が異なった到着時間に観測地点に到着していることを示している。もちろん、これは単純化された推定である。シミュレーションの誤差は空間分解能を悪化させ、また捕獲間隔と空間分解能との正確な関係はまだ分かっていない。しかし、短い捕獲間隔はより高い空間分解能を与えるとはいえる。

日本の病害虫予察事業で用いられている予察灯は、夜間のみ動作するため、ウンカの侵入のピークを正確に捉えることには使用できない。ネットトラップは多くの研究で侵入する飛翔中のウンカを直接捕獲するために利用されてきた。このトラップはウンカの侵入のピークを正確に捉えるために利用でき

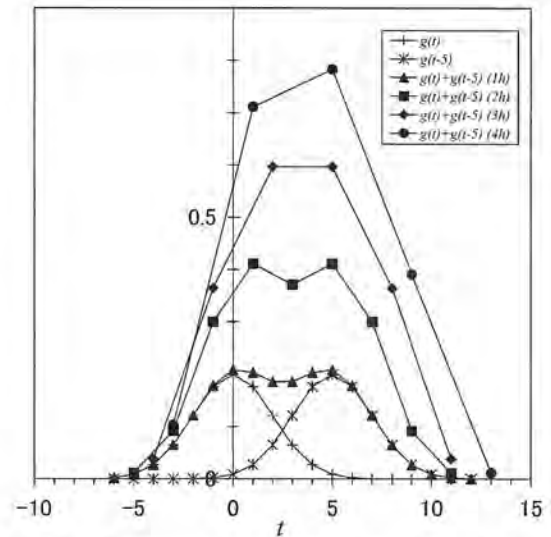


Fig. 2-10. Relationship between the sampling interval and the sum of two time-dependent Gaussian functions, $g(t)$ and $g(t-5)$. The horizontal axis t indicates time in h. The function $g(t)$ has a width of 4 h. The sum is sampled by 4 different time intervals from 1 to 4 h. The time intervals of 1 and 2 h allow for resolution of the peaks. If the separation becomes smaller than 5 h, the sum forms only one peak even if the sum is sampled by a 1-hour interval.

る。しかし、過去の大多数のネットトラップの捕獲データは日別値や、3時間間隔の値であった。これは、回収と計数の作業負荷が大きいためであった。したがって将来のモニタリングシステムのため、自動的に飛翔中のウンカを捕獲し、数える手法を開発しなければならない。

5. まとめ

本章は、捕獲間隔の短い捕獲データの重要性を強調した。ウンカの飛来事象を1時間間隔の捕獲データと長距離移動シミュレーションモデルを用いて解析した。飛来源を推定するために、新たに2つの指標、すなわちPrecisionとCoverageを導入した。その結果、手法は日本に6月に飛来するウンカの可能な飛来源を正確に推定できることを示した。同時に多数の飛来事象の最も可能性が高い飛来源は、福建省と台湾の沿岸部であると推定された。

IV 東南アジア個体群の東アジア個体群への侵入

1. 目的

トビイロウンカに関しては、その個体群は次の3つに分けられている、すなわち東アジア個体群、東南アジア個体群、そして南アジア個体群である。この分類はアジアで観測されたバイオタイプの変遷に基づいて行われた⁽³⁹⁾。バイオタイプとは、抵抗性品種を加害できる個体群のことである。例えば、バイオタイプ1から2への変化は1980年代後半から1990年代前半にベトナム北部、中国、日本でほぼ同時に見出された。一方、同様の变化はフィリピンでは1970年代半ばに起こっており、この時期の違いが東アジア個体群と東南アジア個体群を分ける根拠となった。したがって、個体群はお互いに交流することなく独立して存在すると考えられており、殺虫剤感受性^(22,23)、翅型発現性^(21,23)などの異なった形質を示している。

日本へ移入するトビイロウンカは東アジア個体群に属すると考えられている⁽³⁹⁾。日本と東シナ海で観測された飛来の軌道解析はこの一般的な認識を支持している^(51,41)。しかし、もしある個体群が、異なった形質をもつ別の個体群と交流すれば、その個体群は形質は多様となり、結果として害虫が水稻に引き起こす加害の仕方は異なってくるであろう。したがってそれぞれの個体群が維持される機構を知ることが重要である。最初のステップとして、長距離移動の経路が、注意深く検討されなければならない。

本章では、東南アジア個体群と東アジア個体群が交流することに対する具体的または状況証拠的な解析による証拠を与える⁽³⁹⁾。具体的には、トビイロウンカがフィリピンから台湾、中国、日本へ移動したと推定された。台湾、中国、日本は東アジア個体群が分布する地域である。こうした証拠は、第II章と第III章において提案された3次元の解析手法を用いて得られた。この章では、日本における害虫管理に対する個体群交流の影響を論じる。

2. 材料および方法

1) 捕獲データ

次の3観測地点の捕獲データを利用した (Fig. 3-1). 金武 (きん) (26.4° N, 127.9° E) と那覇 (26.2° N,

127.7° E) は日本の南西諸島の沖縄本島に位置し、Shao-Ma (23.2° N, 121.3° E) は台湾の東海岸に位置する (Fig. 3-2)。金武での捕獲数は病害虫発生予察事業の日別捕獲データを用い、トラップは60Wの白熱電球を用いた予察灯を使用した。その他の2地点の捕獲数は、岸本ら⁽¹⁵⁾とLui⁽¹⁸⁾が直径1mのネットトラップを用いて調査したデータを使用した。Shao-Maにおけるネットトラップは地上10mの柱の先端に取り付けられたもので、那覇のネットトラップは5階建てビルの屋上に設置された3mの柱の先端に取り付けられたものである。

金武では2000年6月17日 (Fig. 3-1a) と1999年6月19日 (Fig. 3-1b) にトビイロウンカの飛来ピークが記録されていた。2つの場合とも、セジロウンカは捕獲されていなかった。他の年では同様なピークまだ見つかっていない。Shao-Maでは1978年8月26日に36頭のトビイロウンカが捕獲された (Fig. 3-1c) が、セジロウンカについては記録がなく、捕獲されたかどうかは不明であった⁽¹⁸⁾。台湾の捕獲データは、文献にあるもので、かつ本章の議論に沿うものはこのピークのみであった。那覇では、1977年6月6日から23日にいくつかの明瞭なセジロウンカの飛来ピーク (Fig. 3-1e) と、相対的に飛来数の少ないトビイロウンカのピークが記録されていた。このピークは、台湾の捕獲データの年に近い採用した。

2) 10年間の解析に用いた順方向の長距離移動シミュレーションモデル

上記の飛来源推定の後で、別の解析を行った。もし4月から6月の飛来シーズン初期にフィリピンから中国南部へウンカの移動が起こったら、中国南部で発生する次世代の成虫が、1ヶ月かそれ以上後の梅雨時期に日本へ飛来することが可能であろう。この2段階移動仮説は日本における害虫管理にとって重要である。フィリピンから中国南部を経由して日本へ飛来する経路が可能であるという仮説を検討するために、10年間の気象データを用いて行った第III章の長距離移動シミュレーション手法⁽³³⁾に基づいて、上記のような移動を探索した。

まず、4月から6月中旬までの12時間間隔の海面

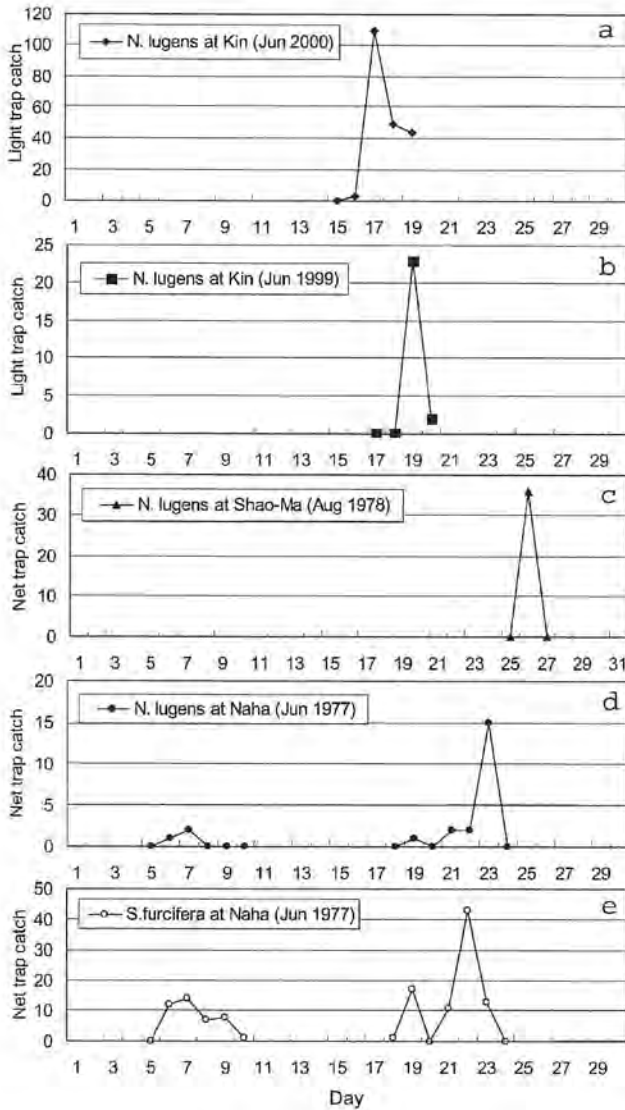


Fig. 3-1. Catch of rice planthoppers. The catches of *N. lugens* or *S. furcifera* at three sites: Kin and Naha in southern Japan, and Shao-Ma in eastern Taiwan. Planthoppers at Kin were captured by an operational light trap, and those at Naha and Shao-Ma by net traps. Data sources: Japan Plant Protection Network (JPPNet) for Kin; Liu (1985) for Shao-Ma; Kisimoto et al. (1982) for Naha.

気圧図から移動に適した気圧配置を探した。移動に適した気圧配置とは、例えば南シナ海に低気圧が位置し、フィリピンから中国へ風が吹くような気圧配置のことである。海面気圧図は気象庁より作成されたものである。次に、長距離移動シミュレーションを行って、ウンカがフィリピンから中国南部へ移動可能かどうかを調べた。

Fig. 3-2のようにルソン島北部に4つの飛び立ち域を設定した。飛び立ち域の位置は地形図で標高の低い場所と、後退軌道解析の結果に基づき選定した。ルソン島北部は中国に近く、したがってより短い飛翔時間で中国に到達することが可能であろう。それぞれの飛び立ち域は地図に示した数字で、例えば#1などと参照される。飛び立ち域の大きさは0.5度×0.5度である。同じ数のウンカが1日2回、10UTC(夕方)と21UTC(明け方)に飛び立つと仮定した。最大の飛翔時間は、予備的な実験から59時間と十分な長さを設定した。もしウンカ雲が中国南部に到達したら、その移動はフィリピンからの可能な移動であるとみなした。

3. 結果

1) 金武

軌道の例をFig. 3-3に示した。それらは、2000年6月17日08UTCまたは09UTCに出発した7つの軌道であり、フィリピン上空へ到達した。これはFig. 3-1aの飛来に対応する。全ての軌道は海の上空を、高度を変えながら移動した。

2000年6月17日01UTCから18UTCの間に出発した軌道の終点はFig. 3-4に記号●で示した。終点はルソン島南部とその周辺に位置した。飛翔時間は39-52時間であった。金武にこの時間帯に移入した個体群が17日の夜、予察灯で捕獲されたと考えられる。この証拠はフィリピンから日本への飛来を支持した。

もうひとつのフィリピンから日本への飛来を支持する証拠がFig. 3-4に示されている。記号★によって示された1999年6月17日10UTCにおける終点はルソン島中央部の東海岸に位置した。それらの後退軌道の起点時刻は6月19日02UTCから20日00UTCまでで、飛翔時間は40-54時間であった。これは1999年6月19日に金武で観測された飛来を説明した。6月17日の風速データによれば、ウンカは東方に位置する高気圧の西側の縁に沿って移動したと考えられる。

2) Shao-Ma

1978年8月26日のネットトラップによるトビイロウンカの捕獲は、6月25日100UTCにルソン島南部(Fig. 3-4の記号▲)を飛び立った移動によって説明された。図は1978年8月26日05UTCから14UTCの間にShao-Ma上空を起点とした後退軌道の終点分布で

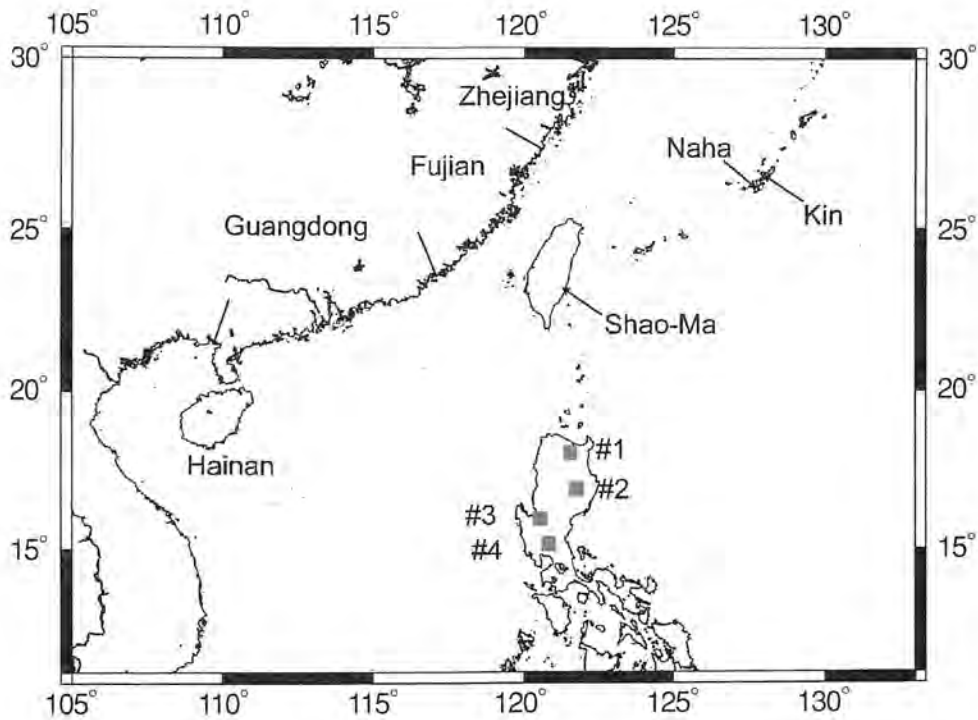


Fig. 3-2. Area of interest. Gray rectangles indicate planthopper takeoff areas modeled in the migrations simulation. These areas are located in the lowlands of the Philippines. For southern China, province names are indicated.

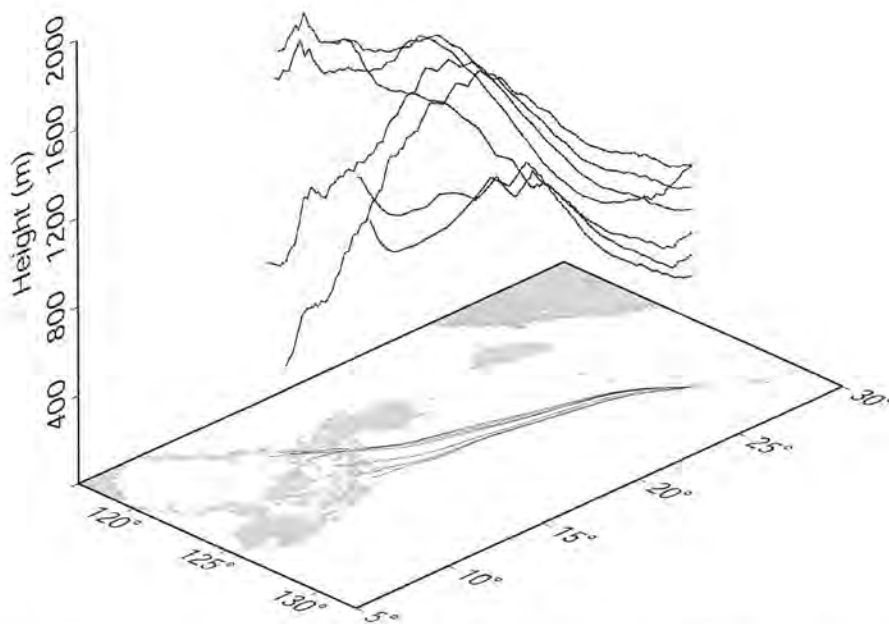


Fig. 3-3. Example of backward trajectories that started over Kin at 08 and 09 UTC on 17 June 2000. The vertical axis indicates height in m. Final heights are 500-1000 m. All the trajectories end at 10 UTC 15 June. For horizontal information, each trajectory is projected onto the Earth's surface. These trajectories correspond to the catch peak in Fig. 3-1a. Note that the vertical displacement was exaggerated, and that trajectories whose terminal point was not over the Philippines or beyond 2000 m were not shown.

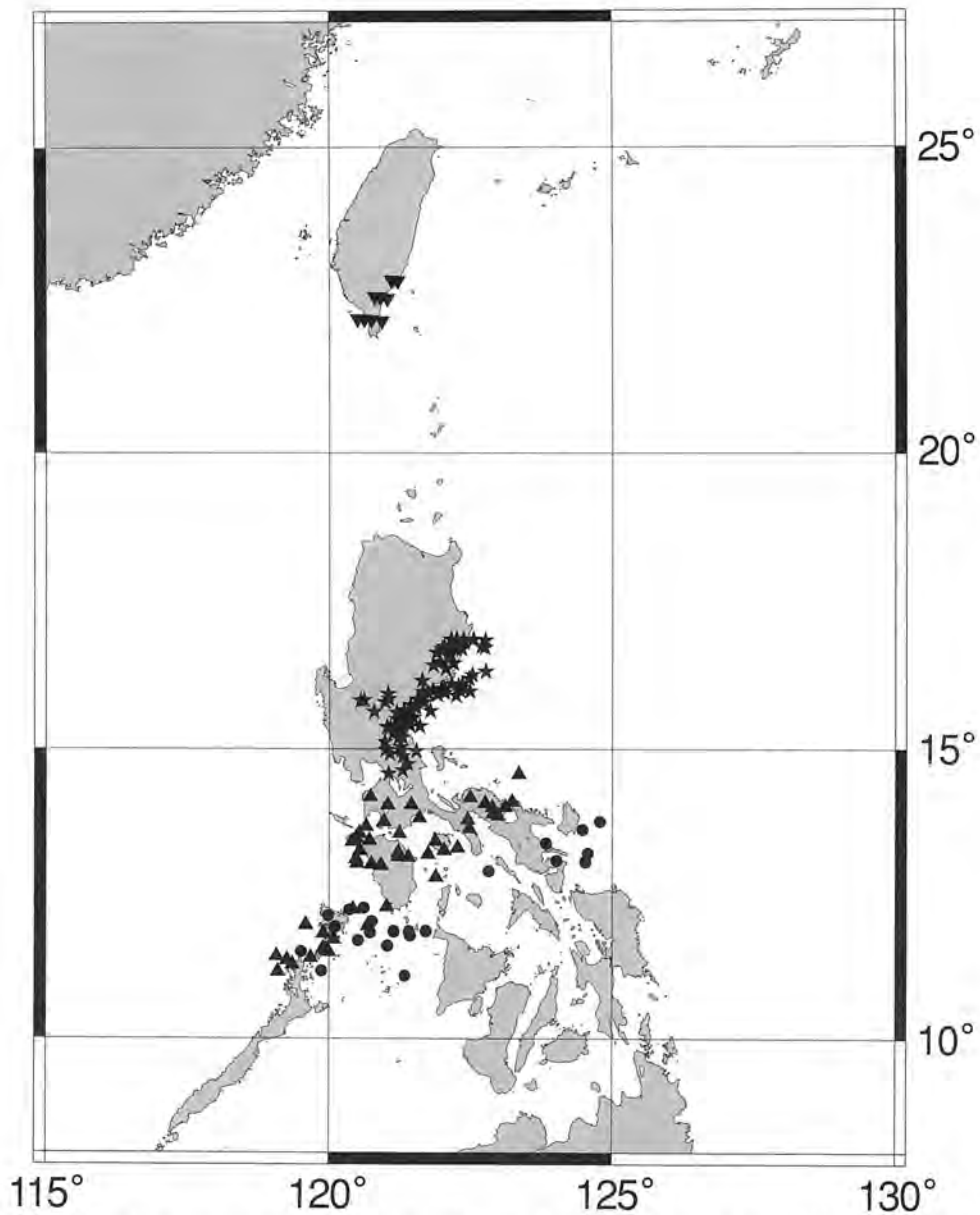


Fig. 3-4. Terminal points of backward trajectories for the catch peaks in Fig. 3-1. Symbol ● indicates terminal point of the trajectories that started over Kin from 01 to 18 UTC on 17 June 2000, and terminated at 10 UTC 15 June. Symbol ★ indicates terminal point of the trajectories that started over Kin from 02 UTC on 19 June to 00 UTC on 20 June 1999, and terminated at 10 UTC on 17 June. Symbol ▲ indicates terminal point of the trajectories that started over Shao-Ma from 05 to 14 UTC on 26 August 1978, and terminated at 10 UTC on 25 August. Symbol ▼ indicates terminal point of the trajectories that started over Naha from 09 to 11 UTC on 23 June 1977, and terminated at 10 UTC on 22 June.

ある。飛行時間は19-28時間であった。これはフィリピンから台湾への移動を支持する証拠である。この移動は南シナ海に位置した台風によって引き起こされた。

3) 那覇

Fig. 3-4の記号▼は、1977年6月23日09UTCから

11UTCに那覇上空を起点とした軌道の、6月22日10UTCにおける終点分布を示した。この結果により、6月23日の大きな捕獲ピーク (Fig. 3-1d) の飛来源は、台湾南部の沿岸部だったと推定された。同様に、Fig. 3-1dの7日、19日、22日の捕獲ピークは広東省、福建省、台湾からの移動であると推定された (データ非表示)。こうした移動は北緯27度辺りを東へ移

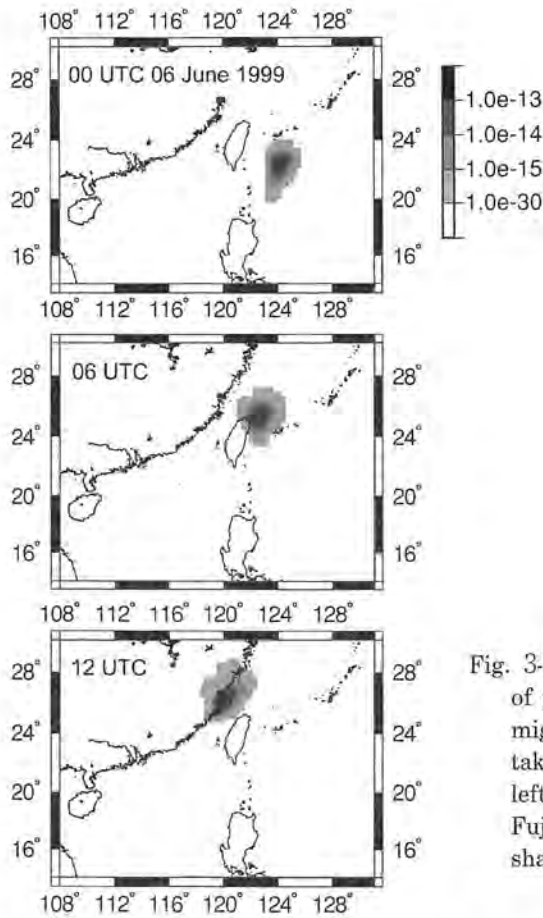


Fig. 3-5. Example of simulated relative density of planthoppers at three different times. The migration started at 10 UTC on 5 June from takeoff area #3. The migration cloud took a left-curved course around Taiwan and reached Fujian province at 12 UTC on 6 June. Darker shade indicates higher relative density.

Table 3-1. Result of 10-year analysis

Date	Takeoff time (UTC)	Takeoff area	Destination	Flight duration (h)
27 Apr 2002	21	#1,2,3,4	Guangdong, Hainan	42-54
27 May 2002	10	#1	Fujian	48
12 May 2000	21	#1,2	Guangdong	54
30 Apr 1999	10	#3,4	Hainan	48
30 Apr 1999	21	#1,2,3,4	Guangdong	27-30
05 Jun 1999	10	#2,3,4	Fujian	26
05 Jun 1999	21	#1,2,3,4	Fujian	24
06 Jun 1999	10	#1,2,3,4	Fujian, Zhejiang	20-35
06 Jun 1999	21	#3,4	Fujian	27
03 Apr 1998	10	#1,2,3,4	Hainan	44
17 Apr 1998	10	#1,2	Guangdong	48
17 Apr 1998	21	#1,2,3,4	Guangdong	39-45
18 Apr 1998	10	#1,2,3	Guangdong	36-38
18 Apr 1998	21	#1,2,3	Guangdong	39-42
19 Apr 1998	10	#1	Guangdong	43
01 Apr 1997	10	#1	Guangdong	43
04 May 1997	10	#1,2,3,4	Fujian, Guangdong	38-48
04 May 1997	21	#1,2,3,4	Fujian, Guangdong	36
05 May 1997	10	#1,2,3,4	Fujian, Guangdong	32-38
05 May 1997	21	#1,3,4	Fujian, Guangdong	23-45
19 May 1996	21	#1,2,3,4	Guangdong	27-32

The table shows simulated migrations from the Philippines to southern China. The "Date" column indicates date of taking off, and the "Destination" column indicates Chinese province where migration clouds reached. The "Flight duration" shows time taken to reach the destination. The migration in Fig. 3-5 corresponds to the 6th case in this table.

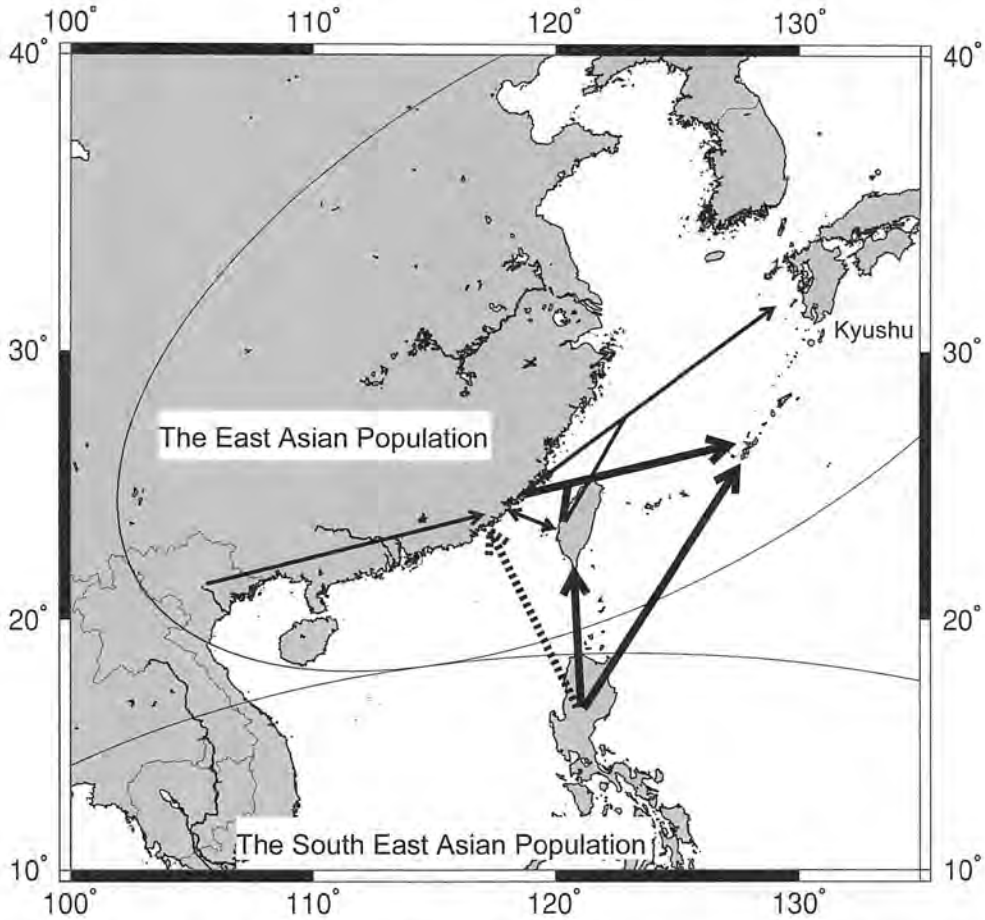


Fig. 3-6. Migration paths on the border of the East Asian and the Southeast Asian populations. Arrows indicate conceptual paths; bold and dotted arrows indicate those paths found in this study, and a feasible path, respectively.

動した低気圧によって引き起こされたと考えられた。

4) 10年間の長距離移動解析

ウンカ雲の例をFig. 3-5に示した。これは1999年6月5日10UTCに#3から飛び立ったウンカが、26時間後の6日12UTCに福建省の沿岸部に到達したことを示している。Table 3-1は、飛来シーズン早期における、ルソン島から中国南部への可能な移動のリストである。この結果によると、10年間に21のフィリピンからの可能な移動が見つかった。主に、福建省と広東省の沿岸部がフィリピンからの飛来を受けている可能性が示された。特に福建省沿岸部は日本への主要な飛来源である。表に記述されない年は、可能な移動が見つからなかった年である。1998年と2002年4月の可能な移動は高気圧の縁に沿った気流により引き起こされ、その他は南シナ海に位置した低気圧や台風の風により引き起こされた。以上から

フィリピンから中国南部への可能な移動経路が複数見つかったといえる。

4. 考察

3次元長距離移動シミュレーションによって、フィリピンから沖縄、台湾へのトビロウンカの移動と、中国南部、台湾から沖縄へのセジロウンカとトビロウンカの移動が推定された。東南アジア個体群に属するトビロウンカが日本南部へ進入していたと推定された。すなわち、東アジア個体群と東南アジア個体群の交流が起こっていたと考えられる。

長期の移動解析では、フィリピンから中国南部へ移動が起こっていた可能性が示された。1984年3月から6月に広東省沖の船上での調査でウンカが捕獲され、2次元解析により、その飛来源がフィリピンであると推定されている⁽¹⁹⁾。加えて、その熱帯気候によって、フィリピンでは1年中ウンカが発生し

ていることが知られている。こうした結果と事実、もし適当な気象条件が満たされれば、フィリピンに生息するウンカが6月中旬より以前に中国南部へ移入することができることを示唆している。これがもうひとつのフィリピンからの移動経路である。

本研究の結果に加えて、中国南部から九州とそのほかの日本本土に飛来するイネウンカ類は、主に梅雨時期の南西風によって運ばれると考えられており、第II章において、セジロウンカとトビロウンカの福建省から九州への飛来が解析されている。したがって、これまでに研究された移動経路をまとめるために、Fig. 3-6はイネウンカ類の個体群分布と移動経路を示した。太線の矢は、本研究で見つかった経路で、太い点線の矢は可能性のある経路である。明らかに、東アジアでの移動経路は多様である。

本研究は単に東南アジア個体群からの移動経路を示しただけであり、フィリピンからの個体群が中国で独立した個体群を維持するか、または東アジア個体群に融合するかについては、まだ分からない。どちらの場合でも、最も重要な結果のひとつは、東南アジア個体群からウンカが、中国南部で1、2世代経過した後、日本へ飛来してくるかもしれないということである。もし2段階移動が起こるとするならば、日本での害虫管理では特別な注意が必要となるだろう。なぜならば、異なった個体群からのウンカが移入するということは、殺虫剤感受性、翅型発現性などの重要形質が遺伝的に異なったウンカが侵入することになるからである。沖縄の水田の面積は相対的に小さいが、既にフィリピンからのウンカが飛来していたと考えられる。したがって国内のいずれ

の場所においても、侵入したウンカの性質をモニターすることが非常に重要である。

もう1点強調したいことは、1980年代後半に東アジア個体群に起こったバイオタイプ1から2への変化⁽³⁹⁾についてである。この変化は、この地域の水稲の栽培品種がBph1遺伝子を持つ品種へと変化したために、東アジア個体群のトビロウンカが自らバイオタイプ2へと変化したと信じられている。これがこれまでの考え方であった。本研究の結果に基づくと、他の解釈が可能である。すなわち、中国で栽培品種が変化した時に、バイオタイプ2の東南アジア個体群のトビロウンカが勢力範囲を拡大したというものである。もしこの仮定が真実ならば、バイオタイプ変化の基となった遺伝子はフィリピンから移入した個体群によってもたらされたと言えるだろう。現在のところフィリピンから移入するトビロウンカの移入頻度、移入量が不明であり、またその個体群が中国でどのように維持されているかも不明であるため、バイオタイプ変化の原因を決定することは時期尚早である。ここではひとつの可能性を論じたに過ぎない。

5. まとめ

本章は、トビロウンカの東アジア個体群と東南アジア個体群が交流しているいくつかの証拠を示した。そして、そのことの可能な帰結について注意を向けた。個体群交流の効果については現在のところはっきりとした理解は得られておらず、中国と日本で継続的に個体群のモニタリングを続けることが重要である。

V 九州へ飛来するセジロウンカの飛来源解析

1. 目的

本章では、第II章の3次元後退軌道解析手法と長期間の捕獲データを用いて、九州へ飛来するイネウンカ類の主要な飛来源を推定した。九州は日本の西方に位置するため飛来のフロントとなり、飛来数が最も多い。これまで2次元解析による飛来源推定の例はあったが⁽⁴¹⁾、今回、3次元後退軌道解析手法を用いて飛来源を推定した⁽³²⁾。

さらに、従来の2次元後退軌道解析と3次元での解析とを比較して、その飛来源推定の信頼性について

も検討した⁽³²⁾。

2. 材料および方法

1) 捕獲データ

近年、トビロウンカの飛来量が急減している⁽⁵³⁾ことから、本研究ではセジロウンカを対象として、4、5月と6月、7月に区分して解析を行った。8月以降の飛来は、水田において飛来個体群の次世代成虫がすでに発生しており、飛来個体の判断が複雑になることから解析の対象としなかった。飛来数が圧

倒的に多く、主要な飛来時期となる6月については解析期間を1987年から2001年の15年間と長くする一方、4、5月と7月については、解析期間を5年と短くした。解析期間が短い場合は、最近の傾向を調べるために1997年以降を選んだ。

4、5月の早期飛来では、通常飛来数が少ないため、60W白熱電球を光源とする予察灯による捕獲データを利用した。九州地域において1997年から2001年までの5年間でセジロウカが3頭以上捕獲された日を選択した。対象地域として九州を選んだ。記録があった地点は鹿児島(31.52°N, 130.50°E)と諫早(32.82°N, 130.02°E)、佐土原(32.02°N, 131.47°E)、本渡(32.50°N, 130.53°E)の4地点であった。ただし予察灯データの場合、飛来した個体が飛来の翌日以降に捕獲される可能性もあるため、3頭以上の捕獲数が2日以上連続していて、かつ後退軌道解析の結果、前日までの飛来によると判断された場合、その2日目以降の捕獲日は対象から除いた。

6月の解析では、後退軌道の起点となる観測点を、飛来が多い九州の3地点：佐賀(33.17°N, 130.33°E)、諫早、鹿児島とし、病害虫発生予察事業の日別捕獲データから、セジロウカが50頭以上の捕獲された日を選び、後退軌道解析を行った。解析期間は1987年から2001年の15年間であり、北部九州2地点についてはネットトラップの、鹿児島ではネットトラップが未設置のため吸引トラップのデータを用いた。

7月については、九州北部の諫早と佐賀で、1997年から2001年までの5年間でセジロウカが20頭以上捕獲された日を選び解析対象とした。また近年の7月の飛来数は少ない傾向があるため、基準値を20頭と小さく設定した。

2) 3次元後退軌道解析

解析は第II章に準じて下記の手順で行った。気象シミュレーションにおける計算領域は北緯12度から42度、東経102度から140度の範囲で、水平分解能は33 km、鉛直方向に23のレベルがあり、計算された大気場の出力間隔は1時間とした。

後退軌道解析の起点は、それぞれの捕獲地点上空の100から1,500m(100mおき)である。この起点高度で終点が陸地に到達しなかった場合には、1,600から2,000mの高い高度でも計算した。起点時刻は、

対象日における1時間間隔の18の時刻とした。捕獲日に対応した1日分(起点時刻の数で24)の計算を一度に行わなかったのは、計算変数の配列が大きくなり過ぎないためのプログラムコード上の理由による。具体的な起点時刻は対象日の07UTC(世界標準時)から24UTCまで、もしくは同日の01UTCから18UTCまでである。主に前者の時間帯で計算し、到達点が飛来源となり得る地域に到達しなかった場合には後者も計算した。後退軌道の終点が海上であった場合など飛来源が推定できなかった場合は、その前日に対して同様の解析を行った。後退計算の終了時刻は2日前の10UTC、21UTC、または1日前の10UTCとした。これらは中国時間での夕方や明け方に相当する。

以上の計算により、飛来日に対して18の起点時刻ごとに15個の終点が得られた。ただし、飛翔途中で地表に到達した軌道と高度が2,500mを越えた軌道(気温が低い領域へ入ったもの)は、その時点で計算を終了した。得られた終点の2次元頻度分布を作成するために、対象領域を0.5°の格子に区切って、それぞれの格子ごとの終点の数を集計した。

後退軌道解析における飛来源推定では、飛翔時間(起点と終点間の時間)の長短によって飛来源の位置が変わるため、飛翔時間の合理的な設定が重要となる。そのため、飛翔時間の長短が終点分布に対する影響を調べた。具体的には、既述の条件で選択された鹿児島における6月の捕獲日のうち、各年の捕獲数の最も多い日に対応した軌道を、6月の結果と比較して約半日短縮もしくは延長して分布を調べた。

最後に、新旧の解析手法による精度の違いを議論するために、鹿児島における6月の捕獲日すべてに対応した2次元移動解析を行い、3次元解析の結果と比較した。2次元の計算ではこれまでと同一のモデルを用いたが、850hPaレベルの風速データのみを使用するように制限し、鉛直方向の移動は計算しなかった。

3. 結果

1) 後退軌道の例

主要な飛来が観測された6月のうち、捕獲数の多かった日の典型的な後退軌道を2例示した(Fig. 4-1)。鹿児島において捕獲数が2,942頭と対象期間で最も多かった1990年6月14日の後退軌道の例をFig.

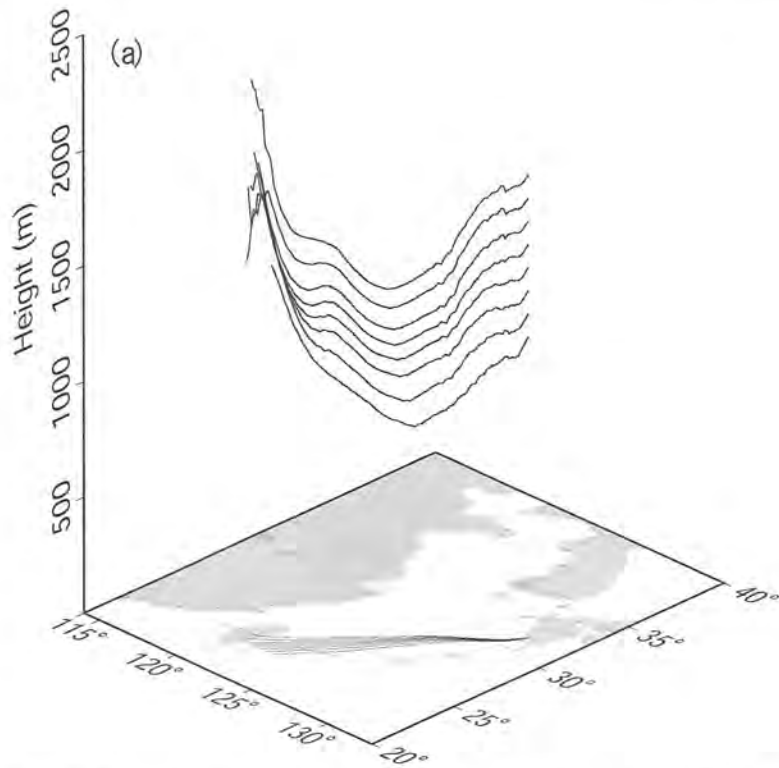


Fig. 4-1a. Examples of backward trajectories that started over Kagoshima at 10 UTC (Coordinated Universal Time) on 14 June 1990. Starting heights are 1300-2000 m. All the trajectories end at 21 UTC 12 June. For horizontal information, each trajectory is projected onto the Earth's surface.

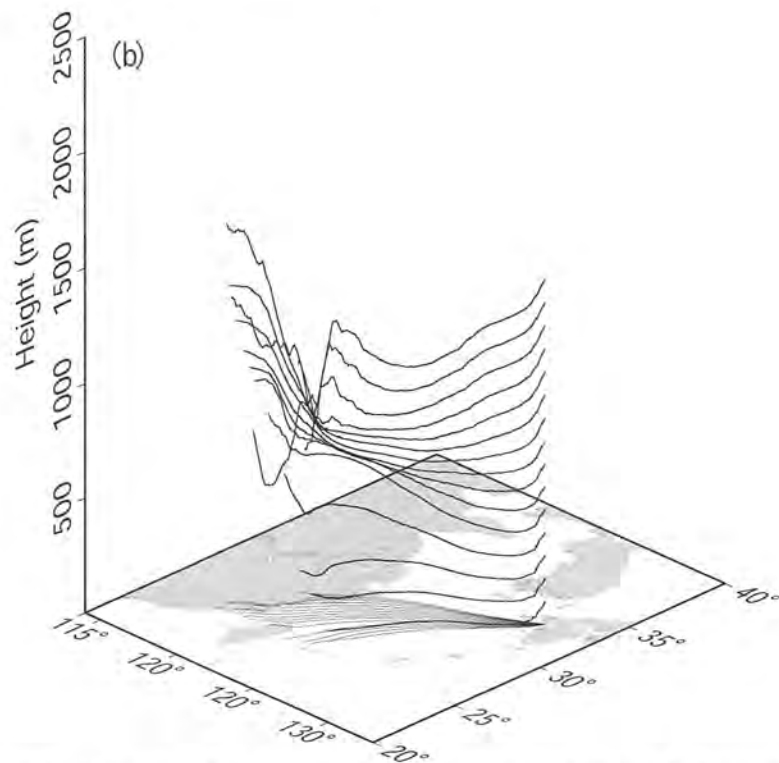


Fig. 4-1b. Examples of backward trajectories that started over Isahaya at 12 UTC on 30 June 1991. Starting heights are 100-1500 m. All the trajectories end at 21 UTC 28 June.

Table 4-1. Date with noteworthy catch in April and May

Date	Place	Catch
4-Apr-1997	Sadohara(32.02N,131.47E)	4
15-May-1997	Isahaya (32.82N,130.02E)/Kagoshima (31.52N,130.50E)	14/19
23-Apr-1998	Kagoshima	4
24-Apr-1998	Kagoshima	41
5-May-1998	Kagoshima	17
18-May-1999	Kagoshima	3
31-May-2000	Isahaya/Hondo(32.50N,130.53E)	14/44

Catch: white-backed planthopper. Trap type: light trap. Data source: the Japan Plant Protection Network System (JPPNet) (Watanabe, 1997). Catches are larger than 3.

4-1aに示した。この図には、起点時刻が14日10UTC、そして起点高度が1,300から2,000mの3次元の軌道と、その軌道を地表面に投影した2次元の軌道が表示されている。1,200m以下の軌道は台湾から離れた海上で終了したので図示しなかった。起点を出発した後退軌道は高度を変えながら南西方向へ進み、そのうち起点高度の高い軌道は台湾東部上空へ到達した。終点時刻は12日21UTCであり、飛行時間は37時間(約一日半)であった。地表面への投影軌道から、高度が低い軌道は東寄りの軌跡となったことが分かり、その地表面上での飛行距離(起点と終点間の距離)は高度が高い軌道と比べて短かった。

諫早において捕獲数の多かった1991年6月30日の後退軌道の例をFig. 4-1bに示した。軌道の起点は諫早上空で、時刻は30日12UTC、高度は100から1,500mの軌道を示した。起点高度500m以上の軌道は台湾北部沿岸から福建省沿岸へ到達した。終点時刻は28日21UTCであり、飛行時間は39時間であった。地表面への投影軌道から、この例でも起点高度の低い軌道は東寄りの軌道となり、地表面上での飛行距離も短い傾向が認められた。

2) 4, 5月の早期飛来

予察灯で3頭以上が捕獲された日は、1997年から2001年までの5年間に4観測地点で7例あった(Table 4-1)。それらの捕獲日は4月上旬から5月下旬まで散らばっており、特定の旬に集中することにはなかった。4観測地点を起点とする後退軌道の終点分布をFig. 4-2aに示した。飛来源となりえない東シナ海に終点分布がみられるのは、実際には飛来がない時刻まで含めた幅広い時間帯で後退軌道を計算したためであると考えられる。また北緯26度以北の地

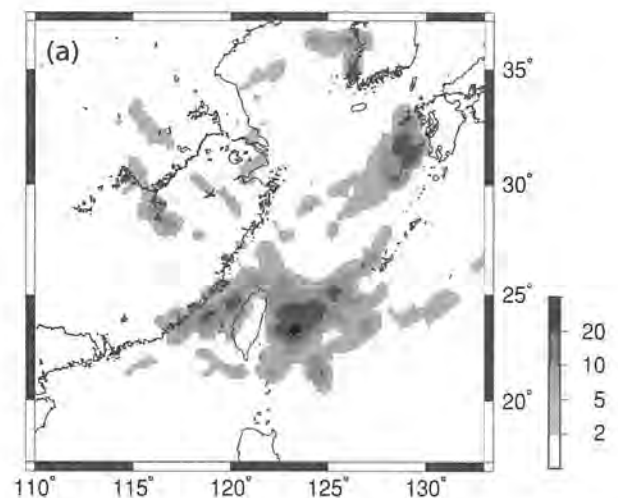


Fig. 4-2a. Frequency distribution of terminated points of backward trajectories, which started over the sites in Table 4-1 in April or May from 1997 to 2000.

域は、この時期日本と同様に南部からの飛来を受ける地域で飛来源とはなりにくいと考えられる¹⁵⁾。陸地と終点分布とが重なっている南部の地域に限ると、中国では福建省沿岸の頻度が高かった。また台湾海峡の西岸に頻度が高い分布が認められた。台湾東部の分布は少し海岸線から離れており、東岸の北部のみ終点分布と重なっている。Fig. 4-2aに示した後退軌道の飛行時間は、約1日半から2日の場合、約2日から2日半の場合があった。

3) 鹿児島における6月の飛来

セジロウカが1日当たり50頭以上捕獲された日は、6月の鹿児島では15年間で70例であった(Table 4-2)。この表にない年には1日の捕獲数が50頭に達した日はみられなかった。

Table 4-2. Date with big catch larger than 50 per day in June

Date	Place	Catch	Date	Place	Catch	Date	Place	Catch
1988/6/11	Kagoshima	71	1995/6/25	Kagoshima	337	1988/6/23	Isahaya	702
1988/6/12	Kagoshima	70	1995/6/26	Kagoshima	421	1988/6/25	Isahaya	118
1989/6/16	Kagoshima	207	1995/6/30	Kagoshima	318	1988/6/29	Isahaya	192
1989/6/29	Kagoshima	389	1996/6/20	Kagoshima	127	1989/6/15	Isahaya	55
1989/6/30	Kagoshima	505	1996/6/21	Kagoshima	130	1990/6/14	Saga(33.17N,130.33E)/Isahaya	215/233
1990/6/14	Kagoshima	2,942	1996/6/26	Kagoshima	115	1990/6/15	Saga/Isahaya	417/108
1990/6/15	Kagoshima	374	1996/6/30	Kagoshima	415	1990/6/26	Isahaya	68
1991/6/14	Kagoshima	1,336	1997/6/8	Kagoshima	55	1991/6/15	Saga/Isahaya	55/60
1991/6/15	Kagoshima	106	1998/6/13	Kagoshima	110	1991/6/30	Saga/Isahaya	213/522
1991/6/16	Kagoshima	493	1998/6/18	Kagoshima	280	1992/6/7	Isahaya	91
1991/6/17	Kagoshima	69	1998/6/19	Kagoshima	119	1993/6/17	Isahaya	53
1992/6/7	Kagoshima	157	1998/6/20	Kagoshima	228	1993/6/22	Isahaya	173
1992/6/10	Kagoshima	53	1998/6/21	Kagoshima	1,140	1993/6/23	Isahaya	356
1992/6/14	Kagoshima	127	1998/6/22	Kagoshima	103	1995/6/19	Saga	58
1992/6/15	Kagoshima	102	1998/6/23	Kagoshima	72	1998/6/13	Saga	302
1992/6/16	Kagoshima	64	1999/6/17	Kagoshima	83	1998/6/18	Saga	234
1992/6/22	Kagoshima	125	1999/6/18	Kagoshima	65	1998/6/19	Saga	105
1992/6/23	Kagoshima	83	1999/6/27	Kagoshima	263	1998/6/21	Saga	128
1993/6/15	Kagoshima	94	1999/6/28	Kagoshima	360	1999/6/16	Saga	91
1993/6/17	Kagoshima	84	2000/6/2	Kagoshima	52	1999/6/17	Saga/Isahaya	99/148
1993/6/19	Kagoshima	77	2000/6/3	Kagoshima	535	2000/6/23	Saga	51
1993/6/22	Kagoshima	82	2000/6/8	Kagoshima	1,319	2000/6/26	Saga	101
1993/6/24	Kagoshima	60	2000/6/9	Kagoshima	198	2000/6/27	Saga	51
1993/6/25	Kagoshima	67	2000/6/10	Kagoshima	580	2000/6/29	Saga	78
1993/6/26	Kagoshima	195	2000/6/24	Kagoshima	146	2000/6/30	Saga	76
1993/6/30	Kagoshima	50	2000/6/25	Kagoshima	165	2001/6/13	Isahaya	50
1994/6/11	Kagoshima	51	2000/6/26	Kagoshima	112			
1994/6/12	Kagoshima	190	2000/6/27	Kagoshima	50			
1994/6/13	Kagoshima	123	2000/6/28	Kagoshima	194			
1994/6/24	Kagoshima	351	2000/6/29	Kagoshima	146			
1995/6/17	Kagoshima	254	2000/6/30	Kagoshima	53			
1995/6/18	Kagoshima	190	2001/6/5	Kagoshima	133			
1995/6/21	Kagoshima	83	2001/6/6	Kagoshima	92			
1995/6/22	Kagoshima	87	2001/6/13	Kagoshima	232			
1995/6/24	Kagoshima	191	2001/6/21	Kagoshima	53			

Catch: white-backed planthopper. Trap type: Johnson Taylor type suction trap at Kagoshima, and net trap at Saga and Isahaya. Data source: the Japan Plant Protection Network System.

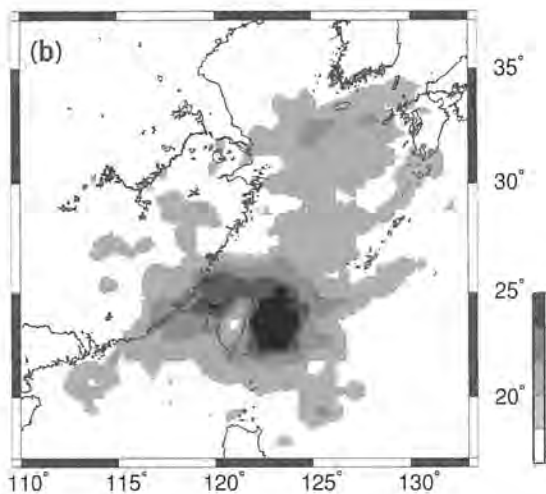


Fig. 4-2b. Frequency distribution of terminated points of backward trajectories, which started over Kagoshima in June from 1988 to 2001.

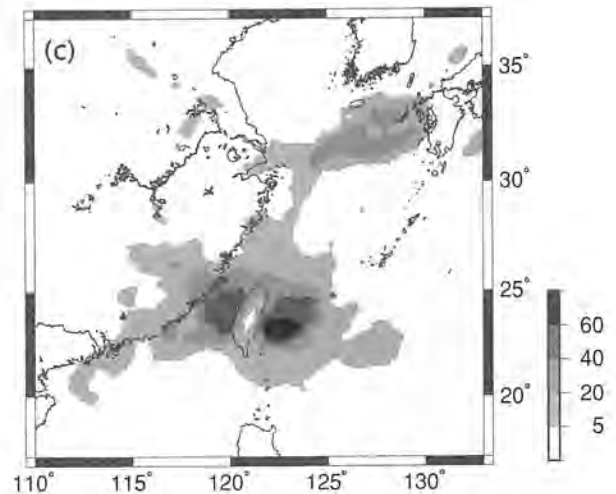


Fig. 4-2c. Frequency distribution of terminated points of backward trajectories, which started over Isahaya or Saga in June from 1988 to 2001.

Table 4-3. Date with big catch larger than 20 per day in July

Date	Place	Catch
7-Jul-1997	Isahaya	21
8-Jul-1997	Isahaya	20
<i>30-Jul-1997</i>	<i>Saga</i>	<i>39</i>
<i>31-Jul-1997</i>	<i>Saga</i>	<i>51</i>
1-Jul-1998	Saga	22
2-Jul-1998	Saga	32
1-Jul-2000	Saga	81
2-Jul-2000	Saga	21
19-Jul-2000	Saga	21
<i>22-Jul-2000</i>	<i>Saga</i>	<i>46</i>
<i>23-Jul-2000</i>	<i>Saga</i>	<i>110</i>
<i>24-Jul-2000</i>	<i>Saga</i>	<i>22</i>
<i>25-Jul-2000</i>	<i>Saga</i>	<i>27</i>
<i>26-Jul-2000</i>	<i>Saga</i>	<i>84</i>

Catch: white-backed planthopper. Trap type: Net trap. Data source: the Japan Plant Protection Network System. Catches in Italic indicate local, not migratory, planthoppers.

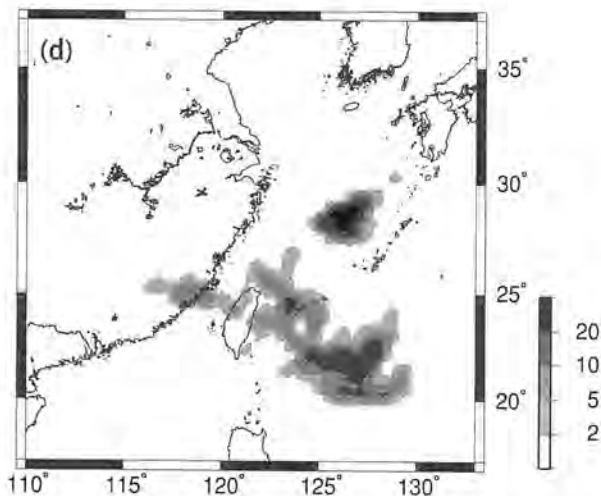


Fig. 4-2d. Frequency distribution of terminated points of backward trajectories, which started over Isahaya or Saga in July from 1997 to 2001.

6月の鹿児島を起点とする後退軌道の終点分布をFig. 4-2bに示した。中国南部では福建省と広東省北東部とに終点分布があり、特に福建省沿岸は頻度が高かった。中国内陸でも分布が重なったが、その一部である福建省の内陸は山間部であり水稲栽培は小規模であるので⁽⁶⁾、主要な飛来源となりにくいと考えられる。北緯26度以北にも終点分布があるが、これらは既述の理由で飛来源とはならないと考えられる。台湾では東部、西部の沿岸部とも終点分布の頻度が高かった。Fig. 4-2bから推定された飛翔時間

は、約1日半から2日の場合と、約2日から2日半の場合があった。

4) 佐賀・諫早における6月の飛来

セジロウカノ捕獲数が1日当たり50頭以上であった日は、6月の佐賀・諫早では15年間で26例であった (Table 4-2)。

6月の佐賀・諫早を起点とする軌道の終点分布は鹿児島の場合とよく似ており、福建省、広東省北東部の沿岸、台湾沿海部の頻度が高かった (Fig. 4-2c)。後退軌道から推定された飛翔時間も鹿児島の場合と同様であり、約1日半から2日の場合と、約2日から2日半の場合があった。

5) 佐賀・諫早における7月の飛来

セジロウカノ捕獲数が1日当たり20頭以上であった日は、7月の佐賀・諫早では14例であった (Table 4-3)。該当事例が少ない理由は、近年の飛来が6月に集中し、7月の飛来が少なくなっていることに対応している。捕獲日が7月下旬であり、かつ後退軌道の終点分布が海上のものについては、6月に飛来した個体の次世代が捕獲された可能性がある。また2000年7月1日と2日も終点が海上で、前日までに飛来した個体が捕獲されたものと推定された。これらを除いた7月の佐賀・諫早を起点とする軌道の終点分布はFig. 4-2dのようになった。これまでと同様に、福建省沿岸と台湾の東西兩岸の頻度が高かった。推定された飛翔時間は約1日半から2日、または約2日から2日半であった。

6) 飛翔時間変更の影響

Table 4-2の鹿児島における、各年の6月の最多捕獲日に対応した14例の飛来について、飛翔時間を短縮した場合の終点分布をFig. 4-3aに、延長した場合の終点分布をFig. 4-3bに示した。短縮した場合、終点分布の先端は福建省と台湾の北部に到達しているものの、終点分布の大部分は東シナ海の海上に位置した。

飛翔時間を延長した場合、頻度の高い終点分布は台湾海峡の南部から南シナ海上に位置し、広東省東部と福建省南部の沿岸部がこの終点分布と重なった。台湾の東部にあった終点分布はあまり変化せず、台湾東部と西部の沿岸部は終点分布と重なった。

7) 2次元解析との比較

解析手法として従来の850hPa等圧面上の風速場を用いた2次元解析を行って終点を求めた結果をFig. 4-3cに示した。この解析は、鹿児島における6月の3次元解析 (Fig. 4-2b) に対応し、捕獲日と起点時刻、終点時刻は両者とも同一である (Table 4-2)。図示された終点分布の頻度が小さい理由は、鉛直レベルが850hPaの結果のみを示したためである。2

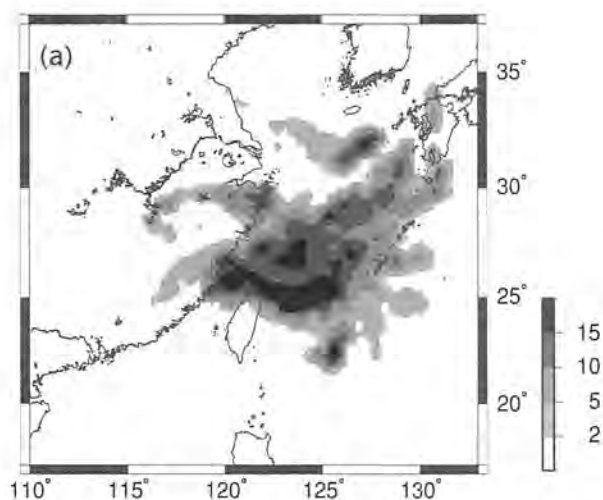


Fig. 4-3a. Frequency distribution of terminated points of shortened trajectories that started over Kagoshima in June from 1988 to 2001, and stopped about 12 h before terminated times in Fig. 4-2b

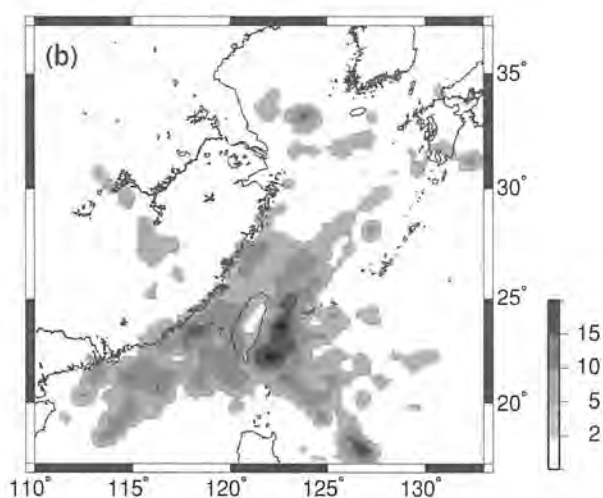


Fig. 4-3b. Frequency distribution of terminated points of extended trajectories that started over Kagoshima in June from 1988 to 2001, and stopped about 12 h later than terminated times in Fig. 4-2b

次元解析を行った場合、台湾東部の高い頻度分布は減り、一部は台湾海峡に分布し、主要な終点分布は福建省の沿岸と内陸の上空にあり、南の広東省広州のデルタ上空にも位置した。したがって、2次元解析の終点分布は3次元と比較して南西側へ移動したといえる。

4. 考察

はじめに本研究の結果の妥当性について議論する。イネウツカ類の飛来源推定において、終点分布に直接的に影響を与えるものとして次の2点、すなわち、後退軌道を求める基本方程式が妥当であることと、飛翔時間の選択が妥当であることが重要である。まず第II章の基本方程式(1)では、飛翔中のウツカは風速度と同じ速度で移動すると仮定した。ウツカの飛翔速度は小さいため⁽³⁵⁾、海外飛来が起こるような強風の中では、ウツカは風下に移動すると考えられる。その速度は不明であるが、レーダ観測が示唆するように多数の飛翔個体の飛翔方向と向きがランダムである⁽³⁵⁾とするならば、飛翔個体群の速度(群の平均の速度)は、風速度と一致すると考えられる。したがって方程式の仮定は妥当であると考えられる。

後退軌道解析では、飛翔時間の設定を変えると推

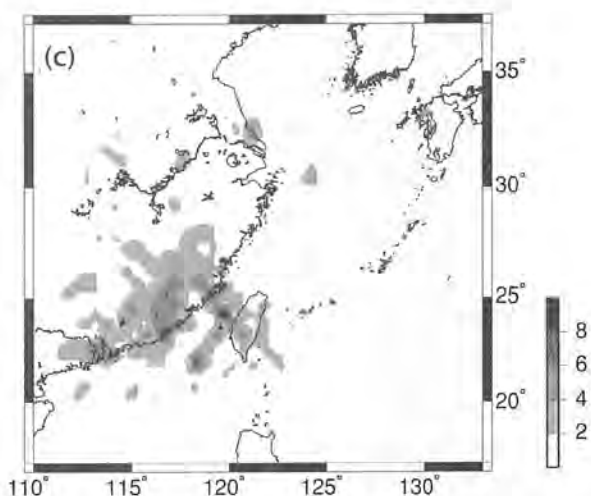


Fig. 4-3c. Frequency distribution of terminated points of 2-dimensional trajectories that started over Kagoshima in June from 1988 to 2001. Two-dimensional trajectories were calculated for all the listed dates for Kagoshima in June in Table 4-2.

定される飛来源の位置が変わる。そのため推定された飛来源が妥当であるための2点目の条件として、設定された飛翔時間が妥当でなければならない。すなわち本研究においては、飛翔時間の短い場合の終点分布 (Fig. 4-2b) と、長い場合の終点分布 (Fig. 4-3b) のいずれが妥当なのかを検討しなければならない。

飛翔時間の長さについては、地理的理由により最小値がある。本解析では日本を起点とし、その南西側には東シナ海が広がり、その先に中国や台湾という飛来源の候補である陸地が位置している。したがってもし後退する時間 (飛翔時間) を短くした場合、明け方から夕方まで11時間、もしくは夕方から明け方に13時間というように約半日短くする必要がある。そのように短縮した場合の終点分布は、Fig. 4-3aのように分布の先端が福建省や台湾北部に到達したものの、大部分は海上に位置し、それらは飛来源とはならなかった。つまり、Fig.4-2bの飛翔時間は陸地に到達できる最小の飛翔時間となっており、それが約1日半の場合と約2日の場合があったことになる。

また、飛び立つ個体数が同じならば、飛翔時間の短い方が飛来数が多くなると期待できる。実際に、東日本より西日本で、また九州内でも北東部より南西側の沿岸でイネウンカ類の飛来数が多いことが知られており⁽¹²⁾、これは西側ほど飛翔時間が短いことが原因のひとつであろうと考えられる。したがって、九州において多数の飛来個体が捕獲されていることを考えると、飛翔時間の短い場合の終点分布 (Fig.4-2b) の方が、長い場合の終点分布 (Fig.4-3b) より、飛来源として信頼性が高いと考えられる。

さらに、九州の筑後における1時間間隔のネットトラップの捕獲データを用いた解析では、数時間幅の飛来ピークと後退軌道の終点分布との対応から、1つの飛来事象を再現する飛来源は福建省の沿岸部であり、飛翔時間は約1日半と推定されている (第II章)⁽¹⁰⁾。すなわち、時間単位で飛来の開始時刻と終了時刻が分かれば、それを説明する終点分布とその時の飛翔時間が推定できるといえる。第II章で推定された福建省沿岸部は、Fig.4-2で示された地域と同一であり、かつ飛翔時間は本結果のうち短い場合に一致してため、飛翔時間としてFig.4-2bの短い場合を支持していると考えられる。以上から、Fig.4-2に示した飛翔時間が妥当であると考えられる。

以上の考察から、九州へ飛来するイネウンカ類の主要な飛来源は、福建省と台湾の沿岸部であると推定できる。その場合の飛翔時間は約1日半から2日、または約2日から2日半であった。この主要な飛来源は、4、5月の早期飛来に対しても、6、7月の飛来に対しても同様に飛来源となり、季節による違いはなかった。このことは、東シナ海にウンカを移動させるような典型的な風が存在する場合、台風などを除けば、大部分は南西風となることが原因であると考えられる。

イネウンカ類の九州への飛来が、15年間という長期にわたって福建省、台湾の沿岸部という比較的限られた地域から起こっていると推定された意義については、次の2点が挙げられる。第1点は、直接的な飛来源がより具体的かつ狭い範囲に限定されれば、飛来源の水稲の栽培品種や防除管理、発生状況などの情報を効率的に収集することが可能となる。飛来源でのこうした情報は、日本におけるイネウンカ類の個体群管理の上で非常に重要であるため、飛来源推定の精度が向上した意義は大きい。また、将来的に飛来源の地域と研究協力関係が構築できれば、共同で防除管理手法を開発するなど国際的な害虫管理の可能性が広がると考えられる。

第2点目はフィリピンからの飛来に関係する。第IV章では3次元の長距離移動シミュレーションモデル⁽³¹⁾を用いて、フィリピンから中国南部へのイネウンカ類の移動について解析し、トビイロウンカがフィリピンから中国南部を経由して日本へ飛来する可能性を指摘した。本論文の結果から九州へのイネウンカ類の主要な飛来源は中国南部の福建省や台湾の沿岸部であると推定されたため、フィリピンから中国南部を経由して間接的に東南アジア個体群が日本へ飛来する可能性があることがより明確に示された。したがって、日本では、東アジア個体群だけでなく、フィリピンなどからのバイオタイプ形質等の遺伝的形質の異なる東南アジア個体群の飛来にも注意する必要があることを示している。

最後に、後退軌道解析手法の精度向上について考察する。2次元解析と3次元解析を比較した場合、推定された飛来源の位置が異なることがわかった (Fig. 4-2と3c)。これは、実際の風速は高度によって大きさと向きが異なるが、2次元解析が高度の高い風速データのみを用いているために誤差が生じた

と考えられる。大気下層では、1500m程度の上空で南西風が吹いている時は高度が下がるにつれて、風速が小さくなるとともに北向きに（左周りに）向きが変化する。このために、2次元解析では3次元と比較すると、より南西に到達点が分布することになる (Fig. 4-3c)。Sogawa (41) は87年から4年間の6月のトビイロウカの捕獲データを用いた2次元解析によって、飛来源の分布を中国南部で東経115度より東で、北緯26度より南、それに海岸線に囲まれた三角地帯と推定した。これは本研究の2次元解析の結果 (Fig. 4-3c) とよく対応した。一方、3次元解析の結果では、福建省の沿岸部と台湾が九州へのイネウカ類の飛来源であると推定された。2次元解析の分布は3次元の分布と比較すると南西より

であり、この数百kmの終点位置の違いが二手法の精度の違いであると考えられる。

5. まとめ

九州地域へ飛来するイネウカ類の飛来源を求めするために、1987年から2001年までのセジロウカの日別捕獲データを用いて3次元の後退軌道解析を行った。その結果、中国の福建省と台湾の西部と東部の沿岸部という比較的限られた地域が飛来源としての可能性が高いと推定された。飛来源から九州までの飛行時間は約1日半もしくは2日であった。また従来の2次元解析手法は今回行った3次元解析の手法に比べて南西よりの飛来源推定誤差をもつことが示された。

VI リアルタイム飛来予測システム

1. 目的

本章では、第Ⅲ章の長距離移動シミュレーションモデルを飛来予測に応用し、予測精度の向上を試みた。そのモデルを利用したリアルタイム飛来予測システムを構築し、オンラインの気象データを用いて、自動で気象予報を行い、そして飛来予測を行った。飛来予測は2003年のシーズンの日別捕獲データを用いて評価した。本章では、その評価結果と予測システムの詳細を記す。

2. 材料および方法

1) 予測システムの構造

システムの模式図をFig. 5-1に示した。楕円と長方形はそれぞれデータと処理系を示す。矢はデータの流れを示す。システムはMM5とGEARNという2つの主要なモデルで構成される。MM5は数値予報モデルである^(1,5)。このモデルは気象学では最も利用されている領域モデルのひとつである。そのソースコードは公開されている。MM5は気象学の様々

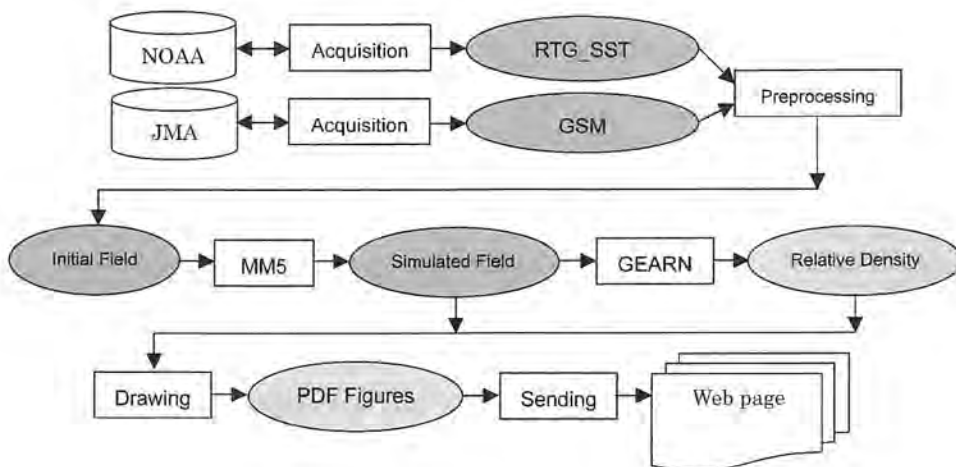


Fig. 5-1. Schematic diagram of system structure

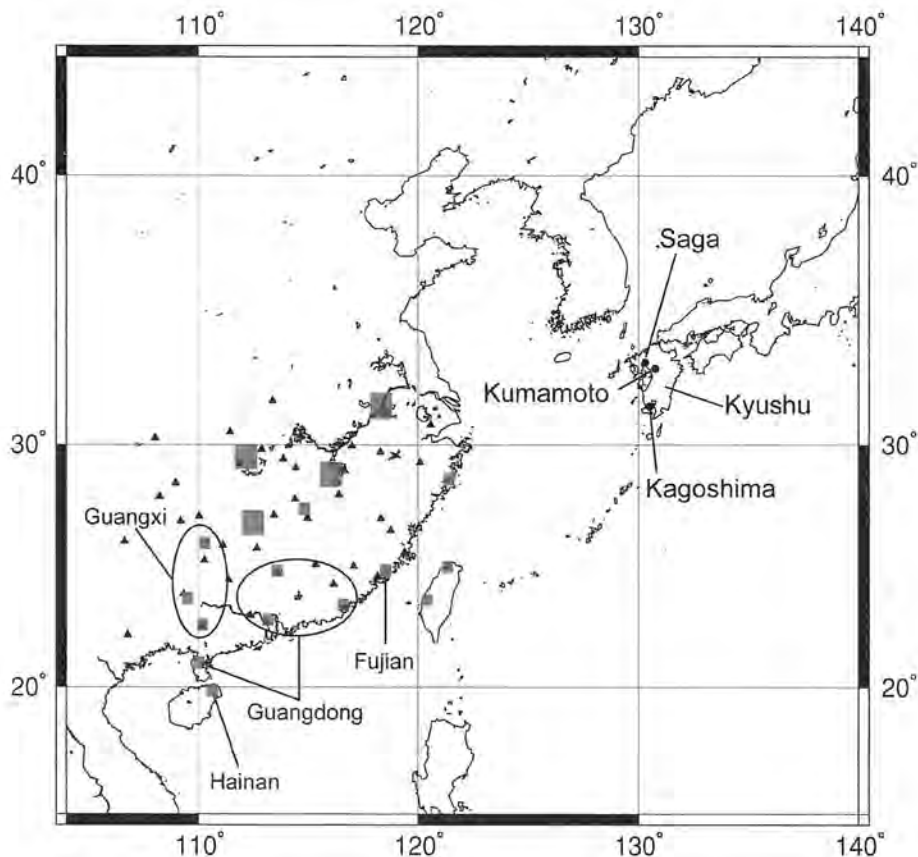


Fig. 5-2. Prediction domain. The geographical area that is shown in this figure is the prediction domain. Solid squares and solid triangles indicate takeoff areas and light traps (Wang, 2001), respectively. The size of a takeoff area was 1×1 or 0.5×0.5 degrees depending on the size of the surrounding paddy area. The size of the takeoff area does not affect the total number of planthoppers released in each takeoff area. The three trap sites, Saga, Kumamoto and Kagoshima, were located on Kyushu Island, in western Japan.

な現象の解析に利用されており⁽²⁴⁾、初期場が与えられれば、地球上のどの場所でも気象シミュレーションが可能である。

GEARNは飛来するウンカの移動を計算する粒子分散モデルの一種で、元来、放射性物質の分散研究のために日本原子力研究所が開発したものである⁽²⁴⁾。ウンカの位置から、各格子内の相対密度を計算するための変更点は次項にて記述する。

予測手順は、まずデータベースから気象データを取得するところから始まる。この研究での気象予報の初期場は、気象庁のGlobal Spectrum Model (GSM) のデータを使用した⁽⁹⁾。海水面のデータは米国海洋大気局 (NOAA) のリアルタイム全球海面温度RTG_SSTを用いた⁽⁴⁶⁾。GSMデータは気象サービス会社を経由して、RTG_SSTデータはインター

ネット上のデータベースから取得した。これらの解析データは、前処理を行いMM5の初期場へ変換した。そして気象予報を行い、一時間間隔の予測場を出力した。出力データはGEARNの入力となり、ウンカの相対密度を予測した。その結果は作図され、PDFフォーマットに変換後、公開Webサーバへ転送された。サーバでは、海面気圧、3つの気圧面の風速場、ウンカの相対密度とその時間変化の動画が公開された。サーバのアドレスは <http://agri.narc.affrc.go.jp> である。

2) 長距離移動シミュレーションモデル

Fig. 5-2に示した計算領域は予測に用いられ、その中に、中国の予察灯の分布 (Fig. 5-2の三角記号)⁽⁴⁸⁾と水田分布⁽⁶⁾、それに予備実験結果に基づき、

中国と台湾に17の飛び立ち域が設定された。飛び立ち域とは、計算時にウシカが飛び立つ地域を指し、それらは主要な水稲作地帯に設定された。通常、予察灯は主要な水稲作地帯に設定されるため、飛び立ち域はそれらの近傍に設定された。予備実験によると、福建省と台湾の沿岸部が多数の日本への飛来事例で飛来源であると推定された。したがって、まず福建省と台湾に合計3の飛び立ち域を設定した。水田分布は連続であるので、飛び立ち域は空間的に密に設定したほうがより正確な予測ができるかもしれない。しかしながら、計算量の観点からは、飛び立ち域の間隔は大きく設定したほうがよい。さらに予備実験では、互いに近接した飛び立ち域から計算された2つの飛来は、拡散の効果により、日本上空では重なった。そのため、非常に近接した飛び立ち域を設定する必要はないと考えられた。以上から飛び立ち域の設定は200-300kmと決定された。その値は、西日本上空で1つの飛び立ち域からの典型的な飛来の水平規模に等しかった。他の14の飛び立ち域は、主要な水稲地帯に、互いに上記の設定距離を取りながら、設定された。山地地帯には飛び立ち域は設定されなかった。結果として、全ての飛び立ち域はほぼ均一に中国南部と台湾に設定された。

計算ではそれぞれの飛び立ち域から、1852頭のウシカが、現地時間夕方(10UTC)または明け方(21UTC)に移動を開始し、1時間後に飛び立ちを終了すると仮定した。開始位置は、飛び立ち域内でランダムに、飛び立ち開始後1時間は時間的に等間隔であった。飛び立ち域当たりのウシカの頭数は、シミュレーション結果が再現性をもつ最小の値のひとつに決定された。飛来源地域でのウシカの個体密度は不明であったため、飛来予測期間中、全ての飛び立ち域からそれぞれの飛び立ち時間にウシカが飛び立つと仮定した。飛行中、相対密度の計算方法は第III章と同じである。

3) 予測手順

MM5によって毎日00UTCから始まる72時間の予報計算が行われた。その後、GEARNによって飛び立ち時刻10UTCと21UTCの2つの48時間飛来予測の計算が行われた。この計算時間は、中国から日本への飛来の飛行時間が36時間程度であったという予備実験の結果を基に決定された。主要な飛来時期である

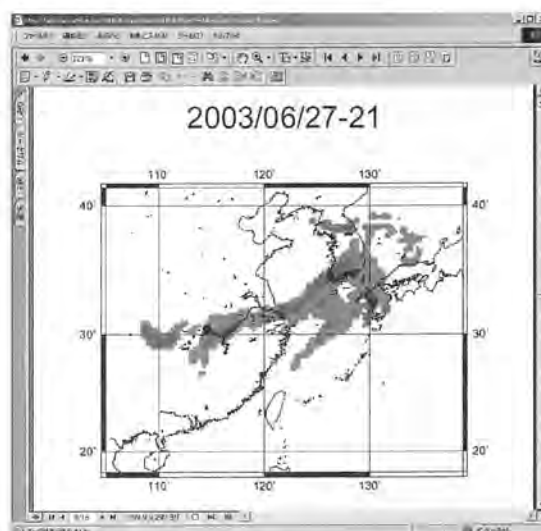


Fig. 5-3. An example of combined relative aerial density (migration cloud) of planthoppers from all the takeoff areas. The density indicates the value at the lowest level of less than 100 m above ground level. The part shaded in deep gray is ten times greater than that in light gray.

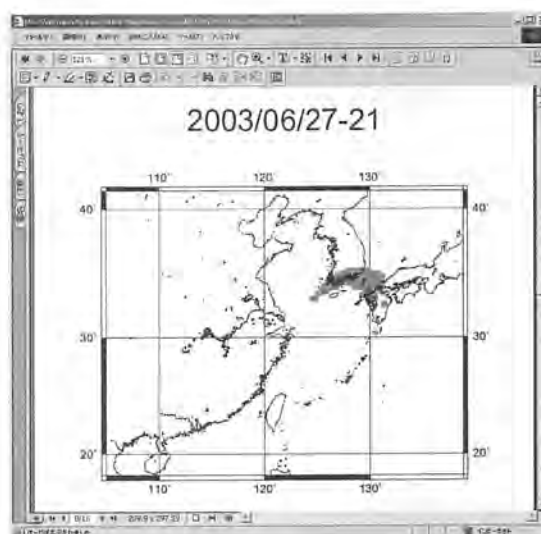


Fig. 5-4. An example of relative aerial density (migration cloud) from the takeoff area in Fujian shown in Fig. 5-2. A migration cloud map was made for each takeoff area.

6月、7月において毎日1回この予測手順が実行された。もし最下層の密度が0より大きい領域が24時間のうち1時間以上観測地点を覆えば、予測システムはその日のその地点の飛来を予測したことになる。密度が0より大きい領域をウシカ雲と呼ぶ。

Table 5-1. Daily prediction results of the 2003 season

Date	Saga		Kumamoto		Kagoshima		Date	Saga		Kumamoto		Kagoshima	
	P	Net	P	Net	P	Suction		P	Net	P	Net	P	Suction
06/01	N	0	N	0	N	1	06/24	Y	28	Y	69	Y	246
06/02	N	0	N	0	N	0	06/25	Y	15	Y	16	Y	36
06/03	N	0	N	0	N	0	06/26	Y	10	Y	4	Y	9
06/04	N	0	N	0	N	0	06/27	Y	57	Y	18	Y	6
06/05	N	0	N	0	N	0	06/28	Y	5	Y	-	Y	36
06/06	N	0	N	0	N	0	06/29	Y	0	Y	-	Y	60
06/07	N	0	N	0	N	0	06/30	Y	39	Y	91	Y	24
06/08	N	0	N	0	N	0	07/01	Y	7	Y	32	Y	55
06/09	N	0	N	0	N	0	07/02	N	239	Y	17	Y	145
06/10	N	0	N	0	N	0	07/03	Y	159	Y	457	Y	40
06/11	N	0	N	0	N	0	07/04	Y	73	Y	631	Y	31
06/12	Y	21	Y	0	Y	24	07/05	Y	12	Y	-	Y	3
06/13	N	5	Y	3	Y	11	07/06	Y	95	Y	-	Y	0
06/14	N	6	Y	-	Y	38	07/07	Y	12	Y	25	N	-
06/15	N	2	N	-	N	9	07/08	Y	16	N	-	N	0
06/16	N	0	N	0	N	22	07/09	N	2	N	3	N	0
06/17	N	0	N	1	N	13	07/10	×	1	×	1	×	0
06/18	N	0	N	0	N	6	07/11	N	0	N	139	N	1
06/19	N	0	Y	1	Y	8	07/12	Y	5	N	-	N	3
06/20	Y	2	Y	0	N	8	07/13	Y	1	Y	-	Y	146
06/21	N	0	N	0	N	7	07/14	×	0	×	20	×	19
06/22	Y	1	N	0	Y	26	07/15	N	1	N	5	N	32
06/23	Y	123	Y	65	Y	91	07/16	N	1	N	0	N	13

The evaluation was conducted at Saga, Kumamoto and Kagoshima site. The letter Y or N in P column indicates that some or no migration was predicted, respectively. The catch in Net or Suction column shows the number of *S. furcifera*. Letter '×' indicates no prediction was conducted because of no incoming GSM data. Letter '-' indicates no catch data was available.

4) 評価方法

Fig. 5-3は2003年6月27日21UTCにおけるウンカ雲の例である。これは6月26日21UTCに飛び立った全ての飛び立ち域のウンカ雲を合わせて表示させている。ウンカ雲は九州の全域を覆うと予測された。それぞれの飛び立ち域からのウンカ雲もWebサイトから得られる。例えば、6月26日21UTCに福建省からのウンカ雲をFig. 5-4に示した。こうした図からウンカが飛来する時期と地域を知ることができる。

予測精度は以下のように評価された。もしモデルが、対象の24時間で、ある地点においていずれかの飛び立ち域から飛来を予測し、かつ、その地点でウンカの捕獲があった場合、予測は正しかったと見なした。もし、モデルが飛来なしと予測し、かつ実際に捕獲がなかった場合も、予測は正しかったと見なした。他の場合では予測は正しくなかったとした。日別予測は次の式で定義される的中率で評価した。

$$\text{的中率 (\%)} = \frac{\text{正しく予測された日数}}{\text{全予測期間の日数}} \times 100$$

ウンカの捕獲データは、九州の3地点で得られた日別データを利用した：佐賀 (33.17° N, 130.33° E)、熊本 (32.95° N, 130.78° E)、鹿児島 (31.52° N, 130.50° E) (Fig. 5-2)。地上10mの高さに設置されたネットトラップを佐賀と熊本で使用し、2階建てビルの屋上に設置された、高さ3.8mのジョンソン・テラー型吸引トラップを鹿児島で使用した。吸引トラップの口径は70cmで、吸引ファンの消費電力は650Wであった。評価期間は2003年6月1日から7月16日だった。ウンカの回収は毎日00UTCに行われ、捕獲数が数えられた。こうしたデータは日本植物防疫ネットワークシステム (JPPNet) ⁽⁵²⁾ から入手した。評価期間のトビイロウンカは捕獲数が非常に少なかったため、セジロウンカの捕獲数を用いて評価を行った。

3. 結果

Table 5-1に日別評価の結果を示した。佐賀に対する的中率は82% (=36/44) であった。同様に熊本と鹿児島に対する的中率はそれぞれ、83%と72%であった。3地点での平均的中率は79%であった。

梅雨時期の初飛来は6月12日に記録され、予測システムは正しく予測した。一方、7月2日に佐賀において記録された目立った予測失敗は、風速の予報

ミスによると考えられた。

予測システムは予測期間中2日を除いて自動的に正常に動作した。予測計算をしなかったのは7月10日と14日で、GSMデータが未確認の原因で気象サービス会社から配信されなかった。

4. 考察

結果が示すように、予測システムは正常に動作した。このシステムは数値予報によって計算された3次元の風速場を使用した最初のリアルタイム飛来予測システムである。システムは、飛来の時期と飛来地域を予測できた。しかしながら、以下では飛び立ちについての仮定、評価期間、飛来と判断する基準、飛来源の推定と、システムの改良などについて議論する。

予測に対して行った最も強い仮定は、全ての飛び立ち域から全ての飛び立ち時刻にウンカが飛び立つというものであった (飛び立ち仮定)。水田でウンカの個体密度は6月と7月に高い地域は、北緯25度以南の中国南部に分布している ⁽⁵⁴⁾。福建省、広東省、広西省、海南省に位置する飛び立ち域はそうした地域として条件を満たしている (Fig. 5-2)。しかし、いくつかの年では、北緯30度辺りの北部地域が6月の初めまでにウンカの侵入を受けている。したがって、北部にも飛び立ち域を設定した。このように、論理的に設定した飛び立ち域は、可能な飛来源地域を広く覆っているため、飛び立ち仮定は妥当であると考えられる。

評価期間は6月から7月中旬に限定した。この制限にはいくつかの理由があった。一つ目は、評価期間は、飛び立ち仮説を満たしていなければならない。4月や5月といった早期の飛来地域では、ウンカの個体群密度がまだ小さいため ⁽⁵¹⁾、この仮説を満たさないと考えられる。したがって、こうした時期を含む評価を行うと、間違った飛来あり予測を多く生むものと考えられる。結果としての的中率を下げるだろう。二つ目の理由は、梅雨時期は海外から飛来するウンカの捕獲数が最も多く、その期間が興味の対象であるからである。三番目は、評価の視点からは、早期の飛来数は限られているため、6、7月にトラップで捕獲される飛来次世代が飛来個体と混じる可能性は小さいと考えられる。ところが、7月中旬以降になると、飛来次世代の混合によって飛来の

判断が困難となる可能性が高い。したがって、本研究では評価期間を6月から7月中旬とした。

評価では、1頭以上のセジロウンカが捕獲された場合に飛来が起こったと見なした。日別捕獲では、飛来個体の次世代の成虫が捕獲された可能性や、飛来個体が飛来した周辺での寄主植物への移動など2次的な分散の間に捕獲された可能性などが考えられるため、その飛来とする基準は議論の余地が残る。特に大きな捕獲の後のいくつかの小さな捕獲は、このような分散の可能性がある。しかし同時に、飛来した個体が捕獲された可能性も、完全に否定されるわけではない。一般に飛来次世代の成虫と飛来直後の個体との明らかな違いはないため、飛来の判断は、気象条件、捕獲数、トラップの種類、時期などを総合的に用いて行わなければならない。ところが、もし飛来判断において気象解析を利用すると、例えば後退軌道解析が利用されるかもしれない。しかし従来の2次元手法では精度が高くないので、推定ミスが起こる可能性がある。したがって現時点で信頼性の高い気象解析手法は見当たらない。以上から本研究では飛来判断に気象解析を利用しなかった。例えば、もし3頭以下の小さい捕獲を評価対象から除けば、新しい試算は84%的中率(90/107)となった。これまでに述べたように、的中率は飛来の判断基準に敏感であるが、それは予測精度の推定値を表していると考えられる。

評価期間に対して日別飛来予測の的中率は79%であった。システムは向こう2日に渡る飛来を予測する。この飛来予測精度を考察するために、飛来予測の的中率と日本における天気予報の適中率(気象庁ではこの語を使用している)とを比較した。気象庁は降雨予測の評価を行い(付録)、ホームページで公開している。その結果、2003年6月の九州地方の翌日と翌々日の降雨予報の適中率は、それぞれ80%と75%であった。この値はウンカの飛来予測の的中率と同程度であった。

本システムは飛来源推定に利用できる。そのためには各飛び立ち域のウンカ雲を後退的に追跡する。例えば2003年6月23日に九州で観測された飛来の飛来源は、福建省、広東省と台湾の沿岸部であると推定された。この推定には予報された風速場の誤差によって主に引き起こされる予測誤差がある。これに対しては再解析データを用いて風速場をシミュレ-

ションすれば、より正確な風速場が得られる。したがって予測システムによる推定飛来源は、速報値として扱うべきものである。

その他の予測システムの制限と可能性について論じる。トビイロウンカの捕獲数が小さかったために、セジロウンカの捕獲数を評価に用いた。このことは、言い換えると、同じ気象条件下で、両種の飛来強度が異なったことになる。この現象が示唆することは、もし飛翔行動、飛翔能力が両種で大きく異なることがないと仮定するならば、飛来源でのトビイロウンカの個体群密度は、セジロウンカのそれより小さいことになる。同時に、予測システムは、両種を分けて予測することはできなかったことを示した。

もうひとつの制限は、予測システムは相対的な密度しか予測できなかったということである。これは飛来地域での飛び立ち可能なウンカの個体群密度が不明であるため、予測モデルの初期値が設定できないことによる。もしそれが分かれば、絶対的な飛来強度を予測することが可能となるかもしれない。さらには、これとは逆に、日本での捕獲量と移動シミュレーションから求まる飛来密度から、飛来源での飛び立ち密度が推定できる可能性がある。そのためには、海上での飛翔や日本での着地過程の詳細な情報が必要であり、さらに研究が必要となる。

トビイロウンカの東アジア個体群は、ベトナム北部、中国南部、台湾、韓国、日本に渡る地域を移動しながら維持されていると考えられている⁽³⁹⁾。予測システムは西日本への飛来を対象としているが、韓国への飛来⁽¹¹⁾も予測可能である。また中国国内の南北の移動も予測、解析することができる。

5. まとめ

セジロウンカとトビイロウンカの高精度な飛来予測を行うためにリアルタイム予測システムを開発した。システムでは、最新の気象データがオンラインで数値予報モデルMM5に提供され、そのモデルは1時間間隔の3次元大気場を予報する。移動シミュレーションモデルGEARNはその大気場中でウンカの移動を計算し、3時間ごとの相対的空中密度を予測する。これらの結果は地図に変換され、インターネット上で公開される。相対的空中密度の地図は向こう二日間の飛来が起こるタイミングと地域の情報を提供する。本予測システムは飛来シーズンを通し

て問題なく動作し、2003年の梅雨期の予測精度は気象庁の降雨の予測精度と同程度であった。

付録 降雨予報の評価方法

気象庁が降雨予報の評価として行う適中率の計算について記述する。評価には日本時間17:00時に発表される天気予報が使用される。その予報は、予報区ごとに次の2日間の降雨を予測する。予測がある

予報区に対し降雨あり/降雨なしと予測し、実際に降雨がそれぞれ、あった/なかった場合に、予報は正解となる。予報区内には複数の降雨観測地点がある。降雨の適中率は正しい予測の観測地点数の、全観測地点数に対する比率で計算される。本研究で引用された適中率は、次の24時間、もしくは2日後の24時間に対する適中率であった。

Ⅶ 総合考察

1. 成果のまとめ

本研究で、セジロウンカ、トビイロウンカというイネウンカ類の長距離移動について、新たな解析・予測手法を開発し、飛来源、移動経路などを解析してきた。得られた主要な結論をまとめると次の通りである。

飛来源を推定する方法として、3次元の後退軌道解析手法を開発した。本手法では、最先端の気象数値予報モデルを導入し、時空間的に分解能の高い気象シミュレーションが可能となった。その精度の高いデータを利用する3次元後退軌道解析モデルは、捕獲地点上空から3次元のウンカの後退軌道を計算することができる。軌道計算は、ウンカの飛び立ち時刻と考えられている明け方、または夕方に合わせて終了させ、その軌道の終点分布から飛来源が推定される。

後退軌道解析手法を1969年にKisimoto⁽¹²⁾によって取得された1時間間隔の捕獲データに適用した結果、飛来源、飛び立ち時刻、飛翔高度、飛翔経路などの詳細な移動過程を推定することができた。現在、海上などを飛翔中のウンカの情報はほとんど得られてため、モデルが推定するこうした移動に関する種々のパラメータを直接評価することは難しい。しかしながら、解析結果は、実際の捕獲のタイミングをよく説明したことから、本手法が有効であり、得られた移動パラメータは、現実の移動実態をある程度正確に表していると考えられる。この解析で推定された飛来源は、福建省沿岸部の水田地帯という比較的限られた地域であった。また、調査地点での飛来終了時刻が、調査と計算とで完全に一致したが、こうした詳細な解析は過去に例がない。このように、高精度の長距離移動解析が可能となった最も大きな

要因は、数値予報モデルを導入し、気象シミュレーションが高精度に行えるようになったことにあり、応用昆虫学における気象学の貢献の一例となった。

九州に飛来するセジロウンカの主要な飛来源は、1987年から15年間の日別捕獲データと後退軌道解析手法を用いて推定された。その解析の結論は、主要な飛来源は、福建省と台湾の沿岸部であるというものであった。飛来ごとにその飛来源が異なるというのではなく、比較的狭い地域が繰り返し飛来源となると推定された。このように、飛来源が限定された地域であることの害虫管理上の意義は大きい。飛来源における使用農薬の種類や使用頻度の変化や、栽培品種の変遷は、殺虫剤抵抗性の獲得やバイオタイプの変化に影響を与えられられる。そのため、飛来源が明確になれば、こうした情報を効果的に収集、監視することが可能となるからである。また、台湾が飛来源となる可能性は、これまでほとんど指摘されておらず、今回の解析結果の重要な結論のひとつである。

飛来源解析においては、同一の捕獲データに対して、2次元解析と3次元解析で推定された飛来源が比較され、前者は、後者と比べ飛来源がより南西側に推定される傾向が見出された。イネウンカ類は3次元空間を移動すること、第Ⅱ章において3次元解析が時間別捕獲パターンを明確に説明したことなどを総合的に考慮すると、3次元解析の方が、従来型の2次元解析より、解析の信頼性が高いと考えられる。

加えて、後退軌道解析において、東アジアの個体群間での移動が検討された。その結果、東南アジア個体群の分布するフィリピンから、東アジア個体群の分布する沖縄、台湾への移動が今回初めて推定さ

れた。これまで、アジアにおけるトビイロウンカの3個体群間の移出入は少なく、互いに独立して維持されていると考えられてきたが、少なくとも東南アジア個体群から東アジア個体群への個体群間移動が存在している可能性が高い。

また、第Ⅲ章の長距離移動シミュレーションモデルを用いた解析では、フィリピンから、九州への主要な飛来源と推定された中国南部への移動の可能性が示された。このことは、1980年代後半に東アジア個体群に起こったバイオタイプ1から2への変化⁽³⁰⁾が、フィリピンから移動したバイオタイプ2の個体群によってもたらされたのではないかという新しい解釈を想起させた。また同時に、個体群間の移動解析によって、翅型発現性など遺伝的形質が異なるフィリピンの個体群が中国南部を経由して日本へ飛来する可能性、すなわち2段階移動仮説が提案された。もし、2段階移動が存在するならば、日本での侵入個体群の増殖性は、通常の東アジア個体群と異なってくる可能性がある。実際、過去に強い短翅型の発現性を示すトビイロウンカ個体群が飛来したことがあり、飛来源が異なるのではないかと議論されたことがある⁽⁶⁾。この時の飛来源を推定して、2段階移動仮説との関連性を検討することは、興味深い解析となろう。また、今後とも飛来個体群の形質を注意深くモニタリングしていくことが重要である。

新しいイネウンカ類の長距離移動解析手法として、順方向の長距離移動シミュレーションモデルも開発された。そのモデルは、飛び立ちとその後の上昇や、温度による飛翔停止と降下、鉛直拡散などを考慮し、ウンカの長距離移動時の、より詳細な振る舞いをモデル化している。このモデルによって、ウンカの相対的な空中密度が計算でき、その地上付近の分布から、ウンカが日本のどの地域にいつ飛来したかを解析することができた。

長距離移動シミュレーションモデルの出力の詳細な検証には、それに対応した時間間隔での捕獲データが必要であるが、そのような資料は前述のKisimoto⁽¹²⁾以外得られていない。そのため、2003年6月に佐賀、鹿児島において1時間間隔の連続捕獲調査を行った。その結果、複数の飛来事象が捉えられ、それらの継続時間が約4時間と短く、出現間隔が約半日であった。半日ごとに現れる飛来事象は、明け方、夕方の飛び立ちに対応していると考えられ

る。本調査で捉えられた鋭い飛来事象ピークと、半日の出現間隔は、比較的狭い飛来地域から、明け方、もしくは夕方に極めて短い時間幅で一斉に飛び立ち、その後、個体群がある程度まとまりを保ったまま長距離移動していることを示唆している。

この連続観測データと長距離移動シミュレーション手法を用いて、飛来源の解析を行った。本解析では、飛来のタイミングを評価する2つの客観的指標を導入した。その結果、福建省と台湾の沿岸部が飛来源として選び出され、後退軌道解析手法の結果とよい一致を示した。

さらに、この長距離移動シミュレーションモデルを用いて、リアルタイム飛来予測システムを開発した。システムは、オンラインで気象データを取得する部分、気象予報を行う部分、予報大気場を用いて飛来予測を行う部分とから構成され、飛来シーズン中、毎日自動で動作し、翌日と翌々日の飛来地域と飛来時期を出力した。2003年の6、7月に、九州を対象として日別の飛来予測を行い、セジロウンカの捕獲数と、システム出力に基づく予測結果とを比較したところ、的中率が79%であった。04年は同84%であった(データ非表示)。この的中率は、気象庁が同一期間・地域について行った降雨予報の適中率(慣例でこの字を使用する)と同程度であった。このように、高い的中率を示したことは、モデルの有効性を示していると考えられる。

以上のように、本研究は、3次元の後退軌道解析モデルと長距離移動シミュレーションモデル、並びにリアルタイム飛来予測システムという新しい解析・予測手法を提供した。こうした手法と過去の捕獲データから、これまで知られなかった東アジアにおける個体群間移動や、九州に飛来するウンカの主要な飛来源を精度高く推定した。また、今回行った連続観測で検出された、まとまりを保った移動形態は、イネウンカ類の長距離移動に新しい知見を提供した。さらに、西日本への飛来予測では高い的中率を実現することができた。

2. 下層ジェットについて

これまでの海上、地上の様々な調査により、典型的な梅雨時期のウンカの飛来は、低気圧に伴った寒冷前線東側の暖気にある強風域(下層ジェット)と相関があることが知られている。ウンカの飛翔速度

は最大で1m/s程度と下層ジェット速度10m/s以上と比して小さく、強風の中のウンカは風下に流されると考えられる。日本と中国の間には東シナ海が存在し、そこは飛来源とはならず、風上の中国南部は、現地調査から飛び立ちの条件を満たしている⁽⁴⁴⁾。したがって、論理的に「最も多い典型的な例では、ウンカは下層ジェットにより運ばれる」という命題は正しいと考えられる。下層ジェットが応用昆虫学で議論されるようになった歴史的経緯(Seino et al.⁽³⁶⁾ など)から、応用昆虫学研究者の暗黙の了解に「下層ジェット=850hPa(約1500m上空)」というものがある。しかしながら下層ジェットは立体的な構造を持っており、典型的には850hPaレベル前後に風速最大域を持ち、そのレベルから地表にかけて摩擦によって風速が弱くなる。したがって「ウンカは下層ジェットにより運ばれる」という場合、850hPaレベルの上空を飛翔しなければならないというわけではない。計算された3次元の軌跡、3次元シミュレーションによるウンカの位置の分布、航空機と山頂、海上、地上での捕獲例、レーダによる観測、九州山地を越えて四国中国でも飛来があることなど総合的に考えると、ウンカは、長距離移動して日本へ飛来する場合、大気下層に、例えば九州上空では1800m程度以下の層に、時間的に変化するある分布で飛翔していると考えるのが適当であろう。

3. 新しい長距離移動のイメージ

これまでに理解されている東アジアでのウンカの発生活動と、本研究によって明らかになった知見とを合わせると、日本に飛来するイネウンカ類の長距離移動は、次のように理解される。

日本に飛来してくるセジロウンカやトビイロウンカなどのイネウンカ類は、主にベトナムの北部から、中国南部、台湾、韓国、日本などの地域に分布する東アジア個体群に属する。ウンカは、ベトナム北部で周年発生しており、1、2月に移植し、5、6月に収穫する冬春稲で増殖したウンカは、4月上旬から5月中旬にかけて移出し、南西モンスーンによって中国南部の華南二期作地帯(広東省、広西チワン族自治区、福建省、海南省を含む地域)と台湾に移動する⁽⁴⁰⁾。

この地域の第一期作水稲(早稲)は、3月下旬から4月下旬に移植し、6月中旬から7月中旬に収穫

される。華南の早稲に侵入したウンカは、1、2世代増殖し、6月中旬の出穂期以降から移出し⁽⁴⁰⁾、その内、主に福建省から移出したウンカが日本に飛来する(第IV章)。台湾でも同じように水稲の二期作が行われており、例えば台中市では、第一期作水稲は6月から7月にかけて登熟期を迎え、同時にトラップ誘殺数も増加する⁽¹³⁾。この時期のウンカが台湾を移出する。福建省や台湾の沿岸部を移出したウンカは、南西の気流に移送され、飛翔高度を変えながら東シナ海を横断し、九州に飛来する(第IV章)。飛翔中のウンカの鉛直方向の空中密度分布は不明であるが、例えば九州上空では、1800m程度以下の大気最下層にある分布を持って存在していると考えられる。九州に飛来するまでの飛翔時間は、1日、または1日半程度が多い(第II章やTable 24)。

フィリピンに生息するトビイロウンカは、気象条件によって、沖縄や台湾に飛来することがある(第IV章)。これは東アジア個体群と東南アジア個体群の境界で起こる移動である。フィリピンから中国南部へ移動する経路が存在する可能性があり、フィリピンから、福建省や台湾を経由して日本へ飛来する2段階移動仮説が提案されている。

4. 今後の取り組み

1) 現地調査の実施

九州に飛来するセジロウンカの主要な飛来源は、福建省と台湾の沿岸部と推定された。本研究ではこれらの地域の現地調査は行っていないので、梅雨時期に推定された飛来地域で、飛び立ち可能な成虫の個体群密度が十分に高まっているかを確認する必要があるだろう。近年、トビイロウンカの捕獲数が減っているが⁽³⁰⁾、これは、飛来源でのトビイロウンカの個体群密度が低下していることを示唆していると考えられる。本研究によって主要な飛来源の地域が推定されたので、今後、対象地域を絞って調査を行い、上記のことを確認する必要がある。

2) 解析精度の向上

解析精度の向上へ向けた取り組みは、まず空間分解能の向上が考えられる。日本国内に多数設置されているトラップの中で、他と比較して捕獲数が多い傾向があるトラップが存在する。例えば、九州北部では佐賀県嬉野(33.17° N, 130.00° E)は、周辺の

トラップと比較して捕獲数が多い傾向がある。考えられる要因として、設置位置が飛来源に近い西側にあること、地形の影響を受けてウンカが降下しやすいことなどが考えられる。このうち地形の飛来への影響は、モデルの水平分解能を上げることで検討できる。分解能を上げると、詳細な地形を考慮できるようになり、地形に影響された細かな大気の流れが計算できるようになる。山の稜線の風下側にできる下降気流を計算できれば、上層を飛翔するウンカが下層へと運ばれる過程を推定できると期待される。過去に山地の東側や谷筋において坪枯れが多いという調査があり、風の影響であると考察されたが⁽²⁵⁾、モデルの分解能を上げれば、地形に沿った風の影響を計算によって実験的に検証することができるだろう。現在のモデルの水平分解能は33kmであるが、1kmまで上げて設定できる。

解析精度を向上させる第2点目は、着地過程のモデル化である。現在の長距離移動シミュレーションモデルは、着地過程をモデル化していない。これは、着地過程におけるウンカの振る舞いが不明であるためである。その振る舞いに接近するためには、フィールドでの観察、または実験室での観察が必要である。フィールドでの観察には、Riley et al.^(35,36)の行ったようなレーダによる観察が適していると考えられる。しかし、東シナ海を越えるような長距離移動では、日本上空での侵入個体群の空中密度が低く、かつ飛来時期に降雨が多いことなどから、信号（昆虫のエコー）とバックグラウンドノイズ（降雨のエコー）の比が悪化し、レーダによる観察が困難となるかもしれない。

着地過程のモデル化で重要となるひとつの視点は、気流だけでなく、ウンカによる自発的な着地行動の有無である。例えば、アブラムシではフライトチャンバーによる自由飛翔実験が行われており、飛翔中のマメクロアブラムシ *Aphis fabae* Scopoli が緑色の刺激に惹かれて、その刺激の方へ移動することが知られている⁽³⁾。また、様々な草食性昆虫が黄色の刺激に引き付けられることが知られている⁽³¹⁾。このように、飛翔中の視覚刺激とそれへの反応が目される。もし、ウンカが風によって運ばれるだけで、自ら飛翔高度の制御を行わず、高度が下がったウンカが地表面に落下するとするならば、そのモデル化は、地上数mに達したウンカは着地するという

ような過程をモデルに組み込むことで実現できるだろう。もし、ウンカが高い高度から自発的に飛翔を制御して、飛翔高度を変えて着地するのであれば、その行動の観察とその時の環境条件の解明が必要となる。着地過程については次の仮説を立てる。すなわち「ウンカは、上空から見た風景の違いという視覚情報を基に、羽ばたきを制御し自発的に高度を下げている。」この仮説に対して、例えば次のような実験を提案する。視覚情報を制御できる空間内に飛翔を制御する環境を設置し、視覚情報を変化させた時のウンカの振る舞いを観察する。本研究によって飛翔時間や飛翔経路、飛翔高度、大気パラメータなどが推定されているので、それらパラメータに合わせて視覚情報や実験室内の環境を制御できるだろう。このようにして着地過程におけるウンカの振る舞いの一端が明らかになると期待される。但し、光の環境が異なるため、日中と夜間での行動は異なるかも知れないことに注意が必要である。

解析精度を向上させるためには、モデルの改良とともに、初期値である飛来源での飛び立ち可能な成虫密度の取得も必須である。現在、中国における病害虫発生情報をリアルタイムで入手することは困難であるが、もし、この情報とモデルの改良とが結合すれば、相対密度ではなく、絶対密度が解析、予測できるようになる可能性があり、今後とも研究協力関係の構築への働きかけを継続していく必要があると考えられる。

3) 国内移動と戻り移動

西日本に飛来し、増殖したウンカはどこに移出するのであろうか。未検討の移動として、国内移動と戻り移動がある。これらの点については、まだ詳細な検討が行われていない。北陸で行われた8月の捕獲調査によれば、南風が吹いていた時に飛来が観測されており（松村、私信）、国内移動が示唆されている。また、一般には中国から日本に移動する個体群は非適応的である、すなわち、日本に飛来した個体群は越冬できずに絶滅する、とされているが、戻り移動が本当に存在しないのかどうか、検討の必要がある。（ただし、気象条件だけからいうと、秋から冬にかけて日本から中国に向かう大規模な気流が存在することは稀であるは指摘しておく。）今後、国内移動と戻り移動について解析を進めていかなければ

ればならない。なお、中国国内では秋に南への移動の観察がある⁽³⁶⁾。

4) 他の長距離移動性昆虫への応用

長距離移動を行うと考えられている昆虫は、作物害虫に限っても数多い。ウンカと同様に梅雨期に移動する種として、コブノメイガやアワヨトウが知られている。またコナガなどは、国内での長距離移動の可能性が指摘されている。ハスモンヨトウは、これまで国内での越冬個体群が主な発生源と考えられ

てきたが、近年海外飛来の可能性が指摘されている⁽³⁰⁾。本研究で開発した後退軌道解析、移動シミュレーションは、移動開始時期、移動中の飛翔行動などのパラメータを改変することで、様々な昆虫の飛来源推定、飛来時期予測などへ応用が可能である。ウンカ以外の昆虫では、飛翔に関わる野外観察、行動実験等の報告はきわめて限られているが、高精度の気象学的アプローチを最大限活用するには、飛翔行動に関する知見の蓄積を今後進めていく必要がある。

謝 辞

本研究の成果は、非常に多くの方々のご協力の下で達成された。

(独)日本原子力研究開発機構の茅野政道氏、古野朗子氏には、高度な粒子分散モデルをウンカの長距離移動研究のベースとして提供していただいた。長距離移動シミュレーションモデルの共同開発も両氏の多大なるご協力で成功させることができた。

米国の国立大気研究センター (NCAR) のJimy Dudhia氏とMMM部の各氏、また同時期にNCARに滞在した筑波大学の日下博之氏には、気象予報モデルMM5の解説と利用法、後退軌道解析モデルと飛来予測システムの開発で、ご指導をいただいた。

九州における連続捕獲調査では、佐賀県農業試験研究センターの御厨初子氏、山口純一郎氏、佐賀大学の藤條純夫氏、吉賀豊司氏と学生諸氏、鹿児島県農業試験場の牟田辰朗氏、上室剛氏、鎌田茂氏、鹿児島大学の津田勝男氏と学生諸氏にご協力いただいた。

また、第V章に使用したセジロウンカの日別捕獲データの一部をご提供いただいた佐賀県農業試験研究センターの近藤知弥氏、長崎県総合農林試験場の小嶺正敬氏、鹿児島県農業試験場の鎌田茂氏に感謝の意を表する。

中央農業総合研究センターの渡邊朋也氏、鈴木芳人氏、九州沖縄農業研究センターの松村正哉氏には、研究の構想から、実施、取りまとめに至る全ての段

階においてご指導、ご協力をいただいた。連続観測では、湿った梅雨の雨の中、共に汗を流した。本研究が極めて順調に成果を上げることができたのは、諸氏との議論により、正しい見通しが得られたお陰であった。ここに深く感謝する。

本論文のとりまとめに際して、御校閲を賜った京都大学大学院の藤崎憲治教授、高藤晃雄教授、佐久間正幸教授には厚く御礼申し上げる。

本研究の一部は、農林水産省総合食料局の支援を受け行われた。また本研究のシミュレーション解析および飛来予測システムのシミュレーションの部分は、農林水産省農林水産技術会議事務局筑波事務所農林水産研究計算センターの計算機を利用させていただいた。

なお、本論文は次の既発表論文を取りまとめたものであり、各論文の著作権者から利用許可をいただいた。第II章と第III章は、雑誌Agricultural and Forest Entomologyに発表された文献29と33を邦訳、一部加筆修正したものであり、王立昆虫学会The Royal Entomological Societyに感謝する。第IV章は、雑誌Population Ecologyに発表された文献30を邦訳、一部加筆修正したものであり、個体群生態学会に感謝する。第V、VI章は、雑誌Applied Entomology and Zoologyおよび日本応用動物昆虫学会誌に発表された文献31と32を邦訳、一部加筆修正したものであり、日本応用動物昆虫学会に感謝する。

Acknowledgement

The chapters II-VI are based on papers previously published in following journals. I thank societies who

hold the copyright of the papers and gave me permission to reprint. The papers^(29,33) published in

Agricultural and Forest Entomology were translated into Japanese and partly modified to be Chapter II and III. I thank the Royal Entomological Society for the permission. A paper⁽³⁰⁾ in *Population Ecology* was translated into Japanese and partly modified to be Chapter IV. I thank the Society of Population Ecology.

The papers^(31,32) published in *Applied Entomology and Zoology* and *Japanese Journal of Applied Entomology and Zoology* were translated into Japanese and partly modified to be Chapter V and VI. I thank the Japanese Society of Applied Entomology and Zoology for the permission.

引用文献

1. Anthes, R. A. and T. T. Warner (1978) Development of hydrodynamic models suitable for air pollution and other mesometeorological studies. *Mon. Wea. Rev.* 106, 1045-1078
2. 朝比奈正二郎・鶴岡保明 (1968) 南方定点観測船に飛来した昆虫第2報. *昆虫*, 36 (2), 190-202
3. David, C. T. and J. Hardie (1988) The visual responses of free-flying summer and autumn forms of the black bean aphid *Aphis fabae*, in an automated flight chamber. *Physiol. Ent.* 13, 277-284
4. 古野朗子・茅野政道・山澤弘実 (1999) 世界版緊急時環境線量情報予測システム (WSPEEDI) モデルコード (II) -広域用濃度・線量予測モデル GEARN-. JAERI-Data/Code 99-044, 茨城, 日本原子力研究所, 68p.
5. Grell, G., J. Dudhia, and D. Stauffer (1994) A Description of the Fifth-Generation Penn State/NCAR Mesoscale Model (MM5). *NCAR Technical Note*, NCAR/TN-398+STR, Boulder, National Center for Atmospheric Research, 122 p.
6. Huke, R.E. and E.H. Huke (1982) *Rice Area by Type of Culture: South, Southeast and East Asia*. Los Banos, The Philippines, International Rice Research Institute, 32 p.
7. Ishikawa, H., and M. Chino (1991) Development of regionally extended / worldwide version of system for prediction of environmental emergency dose information: WSPEEDI, (II) long-range transport model and its application to dispersion of Cesium-137 from Chernobyl. *J. Nucl. Sci. Tech.* 28, 642-655
8. Iwanaga, K., F. Nakasuji and S. Tojo (1985) Wing polymorphism in Japanese and foreign strains of the brown planthopper *Nilaparvata lugens*. *Entomol. Exp. Appl.* 38, 101-108
9. JMA (2002) *Annual WWW Technical Progress Report on the Global Data Processing System 2002* Japan Meteorological Agency. GDPS Technical Progress Report Series No. 12, WMO/TD-No. 1148-21.03.03
10. Kalnay, E. (2003) *Atmospheric Modeling, Data Assimilation and Predictability*. Cambridge, Cambridge University Press, 341p.
11. Kim, H. Y., C. G. Park, M. W. Han and K. B. Uhm (2001) New education program to improve the BPH identification ability. *Proceeding of the 3rd International Workshop on Inter-Country Forecasting System and Management For Brown Planthopper in East Asia*, 3-22, November 13-15, National Institute of Plant Protection, Hanoi, Vietnam, 53-61.
12. Kisimoto, R. (1971) Long distance migration of planthoppers, *Sogatella furcifera* and *Nilaparvata lugens*. *Tropic. Agric. Res. Ser.* 5:201-216.
13. 岸本良一 (1975) ウンカ海を渡る. 東京, 中央公論社, 233p.
14. Kisimoto, R. (1976) Synoptic weather conditions inducing long-distance immigration of planthoppers, *Sogatella furcifera* Horváth and *Nilaparvata lugens* Stål. *Ecol. Ent.* 1, 95-109
15. 岸本良一・平尾重太郎・平原洋司・田中章 (1982) 沖縄, 奄美, 九州および東シナ海におけるトビイロウンカ, セジロウンカの飛来の同時性. *応動昆*, 26, 112-118.
16. Kisimoto, R. and L. R. Rosenberg (1994) Long-distance migration in Delphacid planthoppers. In *Planthoppers: their ecology and management*. R. F.

- Denno and T. J. Perfect eds. New York, USA, Chapman and Hall, 302-322.
17. Kistler, R., E. Kalnay, W. Collins, S. Saha, G. White, J. Woollen, M. Chelliah, W. Ebisuzaki, M. Kanamitsu, V. Kousky, H. van den Dool, R. Jenne and M. Fiorino (2001) The NCEP-NCAR 50-Year Reanalysis: Monthly Means CD-ROM and Documentation. *Bull. Amer. Meteorol. Soc.* 82, 247-268
18. Liu C.H. (1985) Study on the long-distance migration of the brown planthopper in Taiwan. *Chinese J. Ent.* 4, 49-54
19. Mills, A.P., J.F. Rutter and L.J. Rosenberg (1996) Weather associated with spring and summer migrations of rice pests and other insects in Southeastern and eastern Asia. *Bull. Ent. Res.* 86, 683-694
20. Murata, M., T. Etho, K. Itoyama and S. Tojo (1998) Sudden occurrence of the common cutworm, *Spodopera litura* (Lepidoptera: Noctuidae) in southern Japan during the typhoon season. *Appl. Entomol. Zool.* 33, 419-427
21. Nagata, T. and T. Masuda. (1980) Insecticide susceptibility and wing-form ratio of the brown planthopper, *Nilaparvata lugens* (Stål) (Hemiptera: Delphacidae) and the white backed planthopper, *Sogatella furcifera* (Horváth) (Hemiptera: Delphacidae) of Southeast Asia. *Appl. Entomol. Zool.* 15, 10-19
22. Nagata, T. (2002) Monitoring on insecticide resistance of the brown planthopper and the white backed planthopper in Asia. *J. Asia-Pacific Entomol.* 5, 103-111
23. Nagata T., T. Kamimuro, Y.C. Wang, S.G. Han and N.M. Noor (2002) Recent status of insecticide resistance of long-distance migrating rice planthoppers monitored in Japan, China and Malaysia. *J. Asia-Pacific Entomol.* 5, 113-116
24. NCAR (2003) PSU/NCAR Mesoscale Modeling System Tutorial Class Note and User's Guide: MM5 Modeling System Version 3. Boulder, National Center for Atmospheric Research.
25. 野田隆志・桐谷圭治 (1990) 移動性ウンカ類の着陸地. 植物防疫, 44, 281-284
26. 小倉義光 (1999) 一般気象学 (第2版). 東京, 東京大学出版会, 308p.
27. 大久保宣雄・岸本良一 (1971) トビイロウンカ第4, 5回成虫期の飛しょう行動の日周期性. 応動昆, 15, 8-16
28. 大久保宣雄 (1973) 宙吊り飛しょう法によるウンカ類飛しょうの実験的研究. 応動昆, 17, 10-18
29. Otuka, A., J. Dudhia, T. Watanabe and A. Furuno (2005a) A new trajectory analysis method for migratory planthoppers, *Sogatella furcifera* (Horváth) (Homoptera: Delphacidae) and *Nilaparvata lugens* (Stål), using an advanced weather forecast model. *Agri. Forest Ent.* 7, 1-10
30. Otuka A, T. Watanabe, Y. Suzuki and M. Matsumura (2005b) A migration analysis of the rice planthopper *Nilaparvata lugens* from the Philippines to East Asia with three-dimensional computer simulations. *Popul. Ecol.* 47, 143-150
31. Otuka A, T. Watanabe, Y. Suzuki, M. Matsumura, A. Furuno and M. Chino (2005c) Real-time prediction system for migration of rice planthoppers *Sogatella furcifera* (Horváth) and *Nilaparvata lugens* (Stål) (Homoptera: Delphacidae). *Appl. Entomol. Zool.* 40, 221-229
32. 大塚彰・渡邊朋也・鈴木芳人・松村正哉 (2005d) 梅雨時期に九州に飛来するセジロウンカの飛来源推定. 応動昆, 49 (4), 187-194
33. Otuka, A., T. Watanabe, Y. Suzuki, M. Matsumura, A. Furuno, M. Chino, T. Kondo and T. Kamimuro (2006) A migration analysis of *Sogatella furcifera* (Horváth) (Homoptera: Delphacidae) using hourly catches and a three-dimensional simulation model. *Agri. Forest Ent.* 8, 35-47
34. Prokopy, R. J. and E. D. Owens (1983) Visual detection of plants by herbivorous insects. *Ann. Rev. Entomol.* 28, 337-364
35. Riley, J.R., X.-N. Cheng, X.-X. Zhang, D.R. Reynolds, G.-M. Xu, A.D. Smith, J.-Y. Cheng, A.-D. Bao and B.-P. Zhai (1991) The long-distance migration of *Nilaparvata lugens* (Stål) (Delphacidae) in China: radar observations of

- mass return flight in the autumn. *Ecol. Entomol.* 16, 471-489
36. Riley, J.R., D.R. Reynolds, A.D. Smith, L.J. Rosenberg, X.-N. Cheng, X.-X. Zhang, G.-M. Xu, J.-Y. Cheng, A.-D. Bao and B.-P. Zhai and H.-K. Wang (1994) Observations on the autumn migration of *Nilaparvata lugens* (Homoptera: Delphacidae) and other pests in east central China. *Bull. Ent. Res.* 84, 389-402
37. Rosenberg, L. J. and J. I. Magor (1983) Flight duration of the brown planthopper, *Nilaparvata lugens* (Homoptera: Delphacidae). *Ecol. Ent.* 8, 341-350
38. Seino, H., Y. Shiotsuki, S. Oya and Y. Hirai (1987) Prediction of long distance migration of rice planthoppers to northern Kyushu considering low-level jet stream. *J. Agric. Meteorol.* 43, 203-208
39. 寒川一成 (1992) わが国に飛来するトビイロウンカのバイオタイプ形質の変化とその飛来源地帯の推定. 九病虫研会報, 38, 63-68
40. 寒川一成 (1993) ウンカ飛来源地帯の稲作とウンカの発生. 今月の農業, 37 (7), 32-36
41. Sogawa, K. (1995) Windborn Displacements of the Rice Planthoppers Related to the Seasonal Weather Patterns in Kyushu District. *Bull. Kyushu Nat. Agric. Exp. Stn.* 28, 219-278
42. 寒川一成・高橋明彦・唐建・朱敏・清田洋次 (1997) 1996年梅雨期におけるイネウンカの中国浙江省富陽市への飛来状況. 九病虫研会報, 38, 63-68
43. Stull, R. B. (1988) The Ekman Spiral in Atmospheres and Oceans. In *An Introduction to Boundary Layer Meteorology*, Dordrecht, The Netherlands, Kluwer Academic Publishers, 210-213.
44. 鈴木芳人・和田節 (1994) ベトナムにおける稲作とトビイロウンカの発生. 植物防疫, 48, 19-22
45. Tanaka, K. and M. Matsumura (2000) Development of virulence to resistant rice varieties in the brown planthopper, *Nilaparvata lugens* (Homoptera: Delphacidae), immigrating into Japan. *Appl. Entomol. Zool.* 35, 529-533
46. Thiebaut, J., B. Katz and W. Wang (2001) *New sea-surface temperature analysis implemented at NCEP*. WCRP Series Report No. 115, WMO/TD-No. 1083.
47. Turner, R., Y.-H. Song, and K.-B. Uhm (1999) Numerical model simulations of brown planthopper *Nilaparvata lugens* and white-backed planthopper *Sogatella furcifera* (Hemiptera: Delphacidae) migration. *Bull. Ent. Res.* 89, 557-568
48. Wang, J. Q. (2001) Using ARCVIEW (GIS) to Create and Display Distribution Maps of Rice Plant-Hoppers and to Obtain Population Dynamics Information from the Maps. *Proceeding of the 3rd International Workshop on Inter-Country Forecasting System and Management For Brown Planthopper in East Asia*, November 13-15, Hanoi, Vietnam, National Institute of Plant Protection, 3-22.
49. 渡邊朋也・清野豁・北村實彬・平井剛夫 (1990) 高層天気図を利用した長距離移動性ウンカ類飛来時期予測のためのコンピュータプログラム (LLJET). 九州農試報告, 26, 233-260
50. Watanabe, T., K. Sogawa, Y. Hirai, M. Tsurumachi, S. Fukamachi and Y. Ogawa (1991) Correlation between Migratory Flight of Rice Planthoppers and the Low-Level Jet Stream in Kyushu, Southwestern Japan. *Appl. Ent. Zool.* 26, 215-222
51. Watanabe, T. and H. Seino (1991) Correlation between Immigration Area of Rice Planthoppers and the Low-Level Jet Stream in Japan. *Appl. Ent. Zool.* 26, 457-462
52. Watanabe, T. (1997) Long-distance migration of rice planthoppers. *Farming Japan*, 31, 16-21
53. 渡邊朋也・田中慶 (2002) 長距離移動性イネウンカ類の近年の飛来傾向と気象解析に関する新しい取り組み. 植物防疫, 56, 459-462
54. Zhou, B.-H., H.-K. Wang and X.-N. Cheng (1995) Forecasting systems for migrant pests. 2. The Brown Planthopper *Nilaparvata lugens* in China. In *Insect migration*. V. A. Drake and A. G. Gatehouse eds. Cambridge, Cambridge University Press, 353-364.

A long-distance migration analysis of rice planthoppers using computer simulations

Akira Otuka*

Summary

Since long-distance migration of rice planthoppers immigrating into Japan in the *Bai-u* rainy season had been analyzed by using 2-dimensional methods, there were limitations of precision in both estimating migration sources and predicting migrations. In order to improve analytical precision, this study has developed two kinds of 3-dimensional methods. One is a backward trajectory analysis method that estimates migration sources. The other is a migration simulation method that conducts a forward migration analysis.

The backward trajectory analysis method consists of a numerical weather prediction model to simulate 3-dimensional atmosphere, and a backward trajectory analysis model to calculate planthoppers' trajectories backwardly using simulated atmospheric data. A migration event observed at Chikugo in western Japan was analyzed, and a paddy field area along the coastal region of Fujian province in China was estimated to be a possible migration source. Moreover, various migration parameters such as takeoff time, migration course, flight height and so on could be estimated.

The migration simulation method consists of the weather prediction model and a migration simulation model to calculate relative aerial density of migrating planthoppers. A field survey to catch white-backed planthoppers hourly was conducted at two sites in Kyushu in June 2003, and several migration events captured in the survey were analyzed with the simulation method. The results indicated that the coastal region in Taiwan as well as in Fujian province were estimated to be possible migration sources, showing a good agreement with the result of the backward trajectory analysis.

Furthermore, a number of trajectories were calculated to find major migration sources for 15-year catch data of white-backed planthoppers caught in Kyushu. The result showed that the major source region was estimated to be located in the coastal region of Fujian province and Taiwan.

A new finding on migration between the populations in East Asia was presented as well. It had been believed that there was no migration across the border between the populations. However, migrations of brown planthoppers that might have occurred on the border of the East Asian and South East Asian populations was suggested by the trajectory analysis.

The migration simulation model was also applied to migration prediction, and could predict migrations over the next two days. An evaluation indicated that the hitting ratio of the prediction was as good as that of rainfall forecast by Japan Meteorological Agency.

As described so far, this study provided new advanced analytical methods and knowledge, and, therefore, greatly contributed to science and pest management. The new methods are expected to be applied to migrations of other migratory insects.