

梅雨時期に九州に飛来するセジロウンカの飛来源推定

大塚 彰^{1,*}・渡邊 朋也¹・鈴木 芳人¹・松村 正哉²¹ 中央農業総合研究センター² 九州沖縄農業研究センター

Estimation of the Migration Source for the White-backed Planthopper *Sogatella furcifera* (Horváth) (Homoptera: Delphacidae) Immigrating into Kyushu in June. Akira OTUKA,^{1,*} Tomonari WATANABE,¹ Yoshito SUZUKI¹ and Masaya MATSUMURA² ¹National Agricultural Research Center; 3-1-1, Kannondai, Tsukuba 306-8666, Japan. ²National Agricultural Research Center for Kyushu Okinawa Region; 2421 Suya, Nishigoshi, Kumamoto 861-1192, Japan. *Jpn. J. Appl. Entomol. Zool.* 49: 187-194 (2005)

Abstract: A 3-dimensional backward trajectory analysis was applied for estimating the migration source of the white-backed planthopper that immigrated into Kyushu, western Japan in June from 1987 to 2001. The results showed that the coastal regions of Fujian province in China and Taiwan were found to be possible sources. The migration duration taken to travel between the sources and Kyushu was estimated to be about 36 or 48 h. The comparison between 2-dimensional and 3-dimensional analyses indicated that the former method had a bias toward the southwest in estimating the source.

Key words: White-backed planthopper; long-distance migration; migration source; simulation

緒 言

セジロウンカ *Sogatella furcifera* (Horváth) やトビロウンカ *Nilaparvata lugens* (Stål) などの長距離移動性イネウンカ類の飛来源については、これまで捕獲調査、飛翔実験、気象解析、遺伝的形質を用いた解析、現地調査などの手法を用いて議論されてきた。捕獲調査では、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ている (Kisimoto, 1976; 岸本, 1975)。気象解析ではイネウンカ類の飛来地点からの2次元や3次元の後退軌道解析が行われ、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 (Rosenberg and Magor, 1983; Sogawa, 1994; Otuka et al., 2005a)。トビロウンカを用いた飛翔実験では、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 (大久保, 1973)。トビ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、バイオタイプ1から2への変化がベトナム北部、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、トビロウンカの個体群は、ベトナム北部、中国、日本などの属する東アジア個体群と、フィリピンなどの属する東南アジア個体群とに分けられている (寒川, 1992; Tanaka and Matsumura, 2000)。セジロウンカについては、地域個体群の間で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 (Nagata and Masuda, 1980)。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から、ウンカ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 (寒川, 1993; 鈴木・和田, 1994)。

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。

* E-mail: aotuka@affrc.go.jp

2005年3月11日受領 (Received 11 March 2005)

2005年6月14日登載決定 (Accepted 14 June 2005)

DOI: 10.1303/jjaez.2005.187

これまでイネウンカ類の飛来源推定は 850 hPa の風速度データを用いて行われてきた。Sogawa (1994) は、1987~90 年の捕獲データを用いた 2 次元解析を行い、東経 115 度以東で北緯 26 度以南の中国南部がトビロウンカの飛来源である可能性が高いことを示している。しかし、この解析では風速データが 12 時間間隔のデータでかつ 850 hPa 等圧面に固定されていたため、その結果がどの程度信頼できるかについて議論の余地が残されていた。そうした中でコンピュータ・シミュレーション技術の発展を受けて、3 次元の解析手法が提案された (Otuka et al., 2005a)。新しい手法では、3 次元の数値予報モデルを用いたことにより気象解析の精度が格段に向上した。この手法と、福岡県筑後市において 1969 年に調査された 1 時間間隔のセジロウンカとトビロウンカの捕獲データ (Kisimoto, 1971) を用いて、後退軌道解析を 1 時間ごとに行った結果では、福建省沿岸がその主な飛来源であると推定されている (Otuka et al., 2005a)。

さらに、トビロウンカの捕獲データを同様の解析手法を用いて解析した例では、東アジア個体群の分布する中国、台湾では東南アジア個体群に属するフィリピンから飛来を受けている可能性が示されている (Otuka et al., 2005b)。個体群が異なると薬害抵抗性、品種加害性、翅型発現性など害虫管理にとって重要な性質が異なる可能性が高いため (Nagata and Masuda 1980; Iwanaga et al., 1987; Nagata, 2002)、イネウンカ類の飛来源推定は、害虫管理上重要である。

そこで本研究では、Otuka et al. (2005a) の 3 次元後退軌道解析手法と梅雨時期の捕獲データを用いて、九州に飛来するセジロウンカの主要な飛来源を推定した。さらに従来型の 2 次元解析と 3 次元解析とを比較して、その飛来源推定の信頼性についても検討した。

本研究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技術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。

材料および方法

1. 捕獲データ

近年、トビロウンカの捕獲数は急減していることから (渡邊・田中, 2002)、本研究では捕獲数が多いセジロウンカを解析の対象とした。解析対象地域は、近年でも他地域より相対的に飛来量の多い九州とし、期間は 1987 年から 2001 年の 15 年間とした。この期間を通してセジロウンカが多数捕獲された 6 月を解析の対象とした。7 月上旬については考察で議論する理由により解析の対象としなかった。梅雨明け後の 7 月下旬以降の飛来は、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。

観測点を九州の 3 地点：佐賀 (33.17N, 130.33E)、諫早 (32.82N, 130.02E)、鹿児島 (31.52N, 130.50E) とし、病害虫発生予察事業の日別捕獲データから、セジロウンカが 50 頭以上捕獲された日を選び、次節に述べる後退軌道解析を行った。北部九州 2 地点については地上 10 m に設置した口径 1 m のネットトラップの日別捕獲数を、鹿児島ではネットトラップが未設置のためジョンソン・テイラー型吸引捕獲機の日別誘殺数を用いた。

2. 3 次元後退軌道解析

解析は Otuka et al. (2005a) に準じて下記の手順で行った。3 次元大気の時間変化を計算機で再現する数値予報モデル MM5 (Anthes and Warner, 1978; Grell et al., 1994) を用いて、前項で選択した捕獲日を含む前 3 日間の 3 次元風速場を再現した。シミュレーションでは、ある時点の大気場 (初期場) を出発点としてそれ以後の時間変化を方程式に従って計算するため、初期場として NCEP-NCAR 再解析データを用いた (Kistler et al., 2001)。これは過去の地球全体の大気の状態を解析したもので、水平分解能 2.5° で 6 時間間隔の風速、気温などの格子点データが蓄積されている。シミュレーションにおける計算領域は、北緯 12° から 42°、東経 102° から 140° 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、計算出力間隔は 1 時間である。

ウンカの飛翔速度は 1~2 m/s 程度である (Riley et al., 1991) のに対して、飛来が観測される期間の 850 hPa における典型的な風速は 10 m/s 以上である (Seino et al., 1987) ため、ウンカは風速と同じ速度で移動すると仮定した。また、ウンカは羽ばたきによって飛翔中は重力と釣り合っていると仮定し、鉛直方向の方程式から重力の項を除いた。そこでウンカの後退軌道の計算に用いた方程式は次式のようになる：

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

(x, y, z) はウンカの位置、 t は時間ステップ、(U, V, W) は MM5 で計算された風速場から時間と空間で内挿された値を表し、1 ステップ (dt) は 50 s である。

計算の起点はそれぞれの捕獲地点上空の 100 から 1,500 m (100 m おき) である。この起点高度から求めた後退軌道の終点が陸地に到達しなかった場合には、1,600 から 2,000 m の高い高度でも計算した。起点時刻は、対象捕獲日における 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ように制限したため、プログラムの実装上の理由による。具体的な起点時刻は対象日の 1 時 (世界標準時、以下同じ) から 18 時まで、もしくは同日の 7 時から 24 時までである。主に後

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前者も計算した。2つの時間帯の組み合わせによる解析により、捕獲日一日分の範囲を覆った。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。イネウシカ類は、夕方と明け方に飛び立つ日周性が観測されているため(大久保・岸本, 1971)、後退計算の終了時刻は2日前の10時、21時、または1日前の10時とした。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。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かった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、従来の2次元解析手法と本研究で用いた3次元解析手法の飛来源推定結果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。計算ではこれまでと同一のモデルを用いたが、850 hPa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。

結 果

1. 後退軌道の例

セジロウシカの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. 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. 1aに示した。この図には、起点時刻が14日10時、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21時であり、飛翔時間は37時間(約1.5日)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

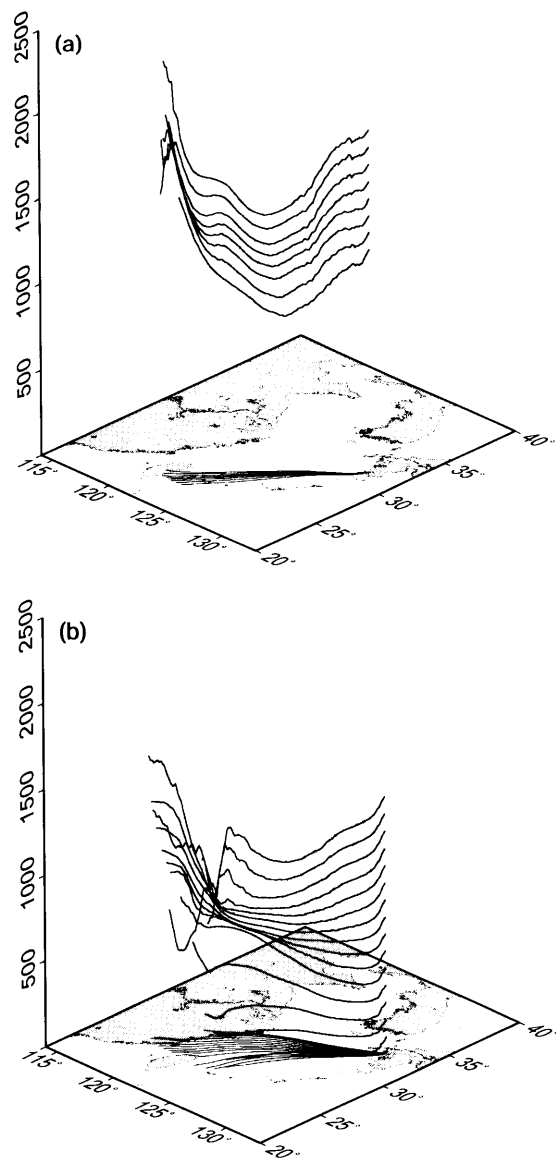


Fig. 1. (a) Examples of backward trajectories that started over Kagoshima at 10 UTC (Coordinated Universal Time) on 14 June 1990. Initial heights were 1,300–2,000 m. All the trajectories ended at 21 UTC on 12 June. For horizontal information, each trajectory was projected onto the Earth's surface. (b) Examples of backward trajectories that started over Isahaya at 12 UTC on 30 June 1991. Initial heights were 100–1,500 m. All the trajectories ended at 21 UTC on 28 June.

軌道の例をFig. 1bに示した。軌道の起点は諫早上空で、起点時刻が30日12時、起点高度が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21時であり、飛翔時間は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、地表面上での起点と終点間の距離も短い傾向が認められた。

Table 1. Dates when a large catch ($\geq 50/d$) of white-backed planthoppers was recorded in Kyushu in June from 1987 to 2001

Date	Place	Catch	Date	Place	Catch	Date	Place	Catch
1988/6/11	Kagoshima (31.52N, 130.50E)	71	1995/6/25	Kagoshima	337	1988/6/23	Isahaya (32.82N, 130.02E)	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			

A Johnson Taylor type suction trap was used at Kagoshima, and net traps were used at Saga and Isahaya. These places are located in Kyushu, western Japan. The data source was the daily catch data in the Japan Plant Protection Network System (JPPNet) (Watanabe, 1997).

2. 鹿児島における飛来

セジロウカが50頭以上捕獲された日は、鹿児島では15年間で70例であった (Table 1)。

鹿児島を起点とする後退軌道の終点分布を Fig. 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。陸地と終点分布とが重なっている南部の地域に限ると、中国では福建省と広東省北東部に終点分布があり、特に福建省沿岸は頻度が高かった。内陸部にも終点分布が存在するが、その一部である福建省の内陸部は山間部であり水稻栽培は小規模であるので (Huke and Huke, 1982)、主要な飛来源とは成りにくいと考えられる。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。以上から福建省と台湾の沿岸部が主要な飛来源であると推定される。Fig. 2a から推定され

た飛翔時間は、1日半から2日の場合と、2日から2日半の場合があった。また、後退軌道の終了時刻より推定された飛び立ち時刻は、夕方と明け方でほぼ同数であった。

3. 佐賀および諫早における飛来

佐賀および諫早でセジロウカの捕獲数が50頭以上であった日は、15年間で26例であった (Table 1)。

佐賀および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. 2b)。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、1日半から2日の場合と、2日から2日半の場合があった。また、推定された飛び立ち時刻は、夕方と明け方でほぼ同数であった。

4. 飛翔時間変更の影響

Table 1 の鹿児島における各年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

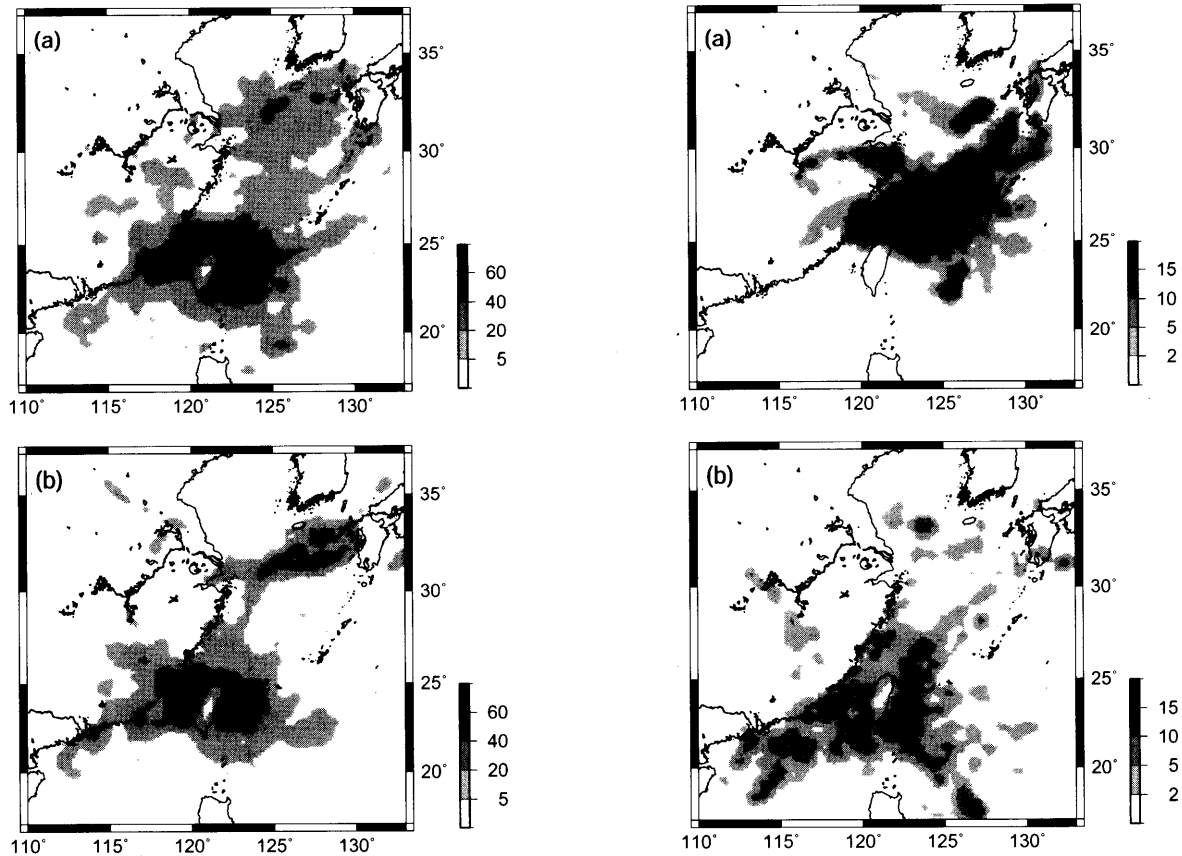


Fig. 2. Frequency distribution of terminated points of backward trajectories, (a) which started over Kagoshima on days when large catches of *S. furcifera* were recorded in June from 1988 to 2001 (Table 1), and (b) which started over Isahaya or Saga on days when large catches of *S. furcifera* were recorded in June from 1988 to 2001 (Table 1). Initial height ranged 100 to 1,500 m. Terminated time was set to 10 or 21 UTC, and flight duration ranged about 36 to 60 h. There were 2 kinds of minimum flight duration (1.5 and 2 d). The frequency indicates the number of terminated points in a square grid column, 0.5 degrees on the bottom side and 2,500 m in height. The grid column covered the whole area.

を Fig. 3a に、延長した場合の終点分布を Fig. 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。

飛行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の終点分布と重なった。

5. 2次元解析との比較

従来型の 850 hPa 等圧面上の風速場を用いた 2次元後退軌道解析を行って終点を求めた結果を Fig. 3c に示した。この解析は、鹿児島における 3次元解析 (Fig. 2a) に対応し、

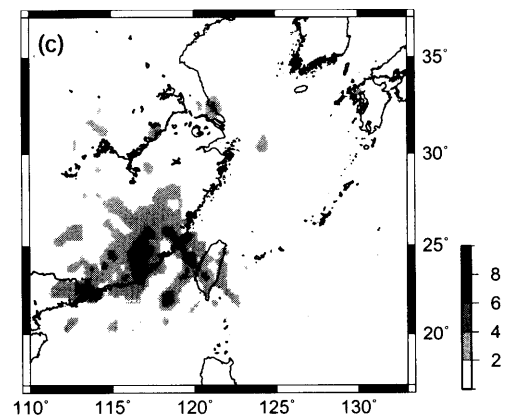


Fig. 3. Various frequency distributions of terminated points of (a) shortened trajectories that started over Kagoshima in June from 1988 to 2001, and ended about 12 h before terminated times in Fig. 2a, (b) extended trajectories that started over Kagoshima in June from 1988 to 2001, and ended about 12 h later than terminated times in Fig. 2a, and (c) 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 1, however, the shortened and extended trajectories were calculated only for dates with the biggest catches in each year (Table 1). The frequency indicates the number of terminated points in a square grid column, 0.5 degrees on the bottom side and 2,500 m in height.

捕獲日と起点時刻、終点時刻は両者とも同一である (Table 1)。図示された終点分布の頻度が低い理由は、鉛直レベルが 850 hPa の結果のみを示したためである。2 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。

考 察

イネウシ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。まず基本方程式 (1) では、飛翔中のウシカは風速度と同じ速度で移動すると仮定した。ウシカの飛翔速度は小さいため (Riley et al., 1991)、長距離移動が起こるような強風の中では、ウシ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 (Riley et al., 1991) とするならば、ある飛翔個体のある向きの飛翔速度は、別の飛翔個体の逆向きの飛翔速度で打ち消され、全体として飛翔個体群の群速度は風速度と一致すると考えられる (Otuka et al., 2005a)。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. 2a) と、長い場合の終点分布 (Fig. 3b) とはどちら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、後退する時間 (飛翔時間) を短くした場合、明け方から夕方 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. 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り得なかった。つまり、Fig. 2a 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部でイネウシカ類の捕獲数が多いことが知られており (Kisimoto,

1971)、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. 2a) の方が、長い場合の終点分布 (Fig. 3b) より、飛来源として信頼性が高いと考えられる。

さらに、九州の筑後市における 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 (Otuka et al., 2005a)。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。Otuka et al. (2005a) によって推定された福建省沿岸部は、Fig. 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いたため、飛翔時間として Fig. 2a の短い場合を支持していると考えられる。以上から、Fig. 2 に示した飛翔時間が妥当であると考えられる。

また、Fig. 2 には北緯 26 度以北の地域にも終点頻度が分布している場合があるが、これらの地域は、梅雨時期に日本と同様に南部からの飛来を受ける地域であり、飛来源とはなりにくいと考えられている (Zhou et al., 1995)。

以上の考察から、九州へ飛来してくるセジロウシカの主要な飛来源は、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。

梅雨期の 6 月に起こるイネウシカ類の九州への主要な飛来が、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シ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する。本論文の結果から、九州へのセジロウシカ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。ところが、1969 年に筑後市で行われたイネウシカ類の捕獲調査に対する後退軌道解析では、セジロウシカとトビイロウシカの捕獲数が同程度であり、その両種の飛来源は福建省沿岸部であったと推定されている (Otuka et al., 2005a)。すなわち、トビイロウシカについても福建省沿岸部が九州への主要な

飛来源であると推定する証拠はまだ提示できていないものの、少なくとも、トビロウシカが福建省沿岸部から日本に移動することがあると考えられる。

一方、視点をさらに南へ移動させると、Otuka et al. (2005b) は3次元の長距離移動シミュレーションモデル (Otuka et al., 2005c) を用いて解析し、トビロウシカがフィリピンから福建省沿岸部などの中国南部に移動する可能性を指摘している。したがって、もしその移動が実際に存在し、その移動後、福建省沿岸部で個体群密度が増加すれば、フィリピンからの個体群が中国南部を経由して日本へ移動する可能性も出てくる。以上の考察は、日本においても、フィリピンからバイオタイプ形質等の性質の異なる個体群が侵入する可能性に対して注意する必要があることを示している。

梅雨時期の7月上旬を解析対象としなかった点について議論する。予め複数の年次 (1974年, 1988年, 2003年, 2004年) の梅雨時期 (6月下旬から7月上旬) の予備的解析を行ったが、推定された飛来源が6月と7月とで異なる傾向は見出せなかった。また梅雨期間中、ウシカを運ぶ南西風は主に低気圧の暖気側に発生するが、その南西風の位置やその風速などを決める低気圧の構造や規模が、6月下旬と7月上旬とで大きく変化するとは考えられない。いくつかの解析事例と気象学的な考察とを根拠にして、6月のみを解析対象としても、梅雨時期の妥当な飛来源推定ができると考えられた。さらに、1980年代後半からセジロウシカの飛来時期が早期化し、6月上旬に初飛来が多くなっている (寒川・渡邊, 1989; 松村, 1992)。またセジロウシカは、7月と比較して、6月に飛来する割合が高くなっている (渡邊・田中, 2002)。このため、7月の捕獲には次世代個体群が混じる可能性があり、飛来の判定が難しくなっている。以上から、飛来判定の信頼性が高いと考えられる6月に解析対象を絞った。

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. 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。大気下層では地表面の摩擦によって、1,500m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。この現象は気象学でエクマンらせんと呼ばれている (小倉, 1999)。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. 3c)。Sogawa (1994) は87年から4年間の6月のトビロウシ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. 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シ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、これはエクマンらせんで説明可能である。この数百kmの終点位置の違いが2手法の精度の違いであると考えられる。

摘 要

九州地域へ飛来するセジロウシカの飛来源を求めるために、1987年から2001年までの6月のセジロウシ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である可能性が高いと推定された。飛来源から九州までの飛翔時間は約1日半もしくは2日程度であった。また従来の2次元解析手法は、今回行った3次元解析手法と比較して、南西よりの飛来源推定誤差をもつことが示された。

引用文献

- 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.
- 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, National Center for Atmospheric Research, Boulder. 122 pp.
- Huke, R. E. and E. H. Huke (1982) *Rice Area by Type of Culture: South, Southeast and East Asia*. International Rice Research Institute, Los Banos, The Philippines. 32 pp.
- Iwanaga, K., F. Nakasugi and S. Tojo (1987) Wing polymorphism in Japanese and foreign strains of the brown planthopper *Nilaparvata lugens*. *Entomol. Exp. Appl.* 38: 101–108.
- Kisimoto, R. (1971) Long distance migration of planthoppers, *Sogatella furcifera* and *Nilaparvata lugens*. *Tropic. Agric. Res. Ser.* 5: 201–216.
- 岸本良一 (1975) ウシカ海を渡る。中央公論社, 東京, 233 pp. [Kisimoto, R. (1975) *Rice Planthoppers Migrate over the Sea*. Chuokouronsha, Tokyo. 233 pp.]
- Kisimoto, R. (1976) Synoptic weather conditions inducing long-distance immigration of planthoppers, *Sogatella furcifera* Horváth and *Nilaparvata lugens* Stål. *Ecol. Ent.* 1: 95–109.
- 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. Am. Meteorol. Soc.* 82: 247–268.
- 松村正哉 (1992) 北陸地方におけるセジロウシカの発生動態。植物防疫 46: 209–211. [Matsumura, M. (1992) Population dynamics of the white-backed rice planthopper, *Sogatella furcifera* (Horváth) in the Hokuriku district. *Plant Prot.* 46: 209–211.]

- 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.
- 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.
- 小倉義光 (1999) 一般気象学 (第2版). 東京大学出版会, 東京. 308 pp. [Ogura, Y. (1999) *General Meteorology*. Second Edition. University of Tokyo Press, Tokyo. 308 pp.]
- 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. [Ohkubo, N. (1973) Experimental studies on the flight of planthoppers by the tethered flight technique. *Jpn. J. Appl. Entomol. Zool.* 17: 10–18.]
- 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. [Ohkubo, N. and R. Kisimoto (1971) Diurnal periodicity of flight behaviour of the brown planthopper, *Nilaparvata lugens* Stål in the 4th and 5th emergence periods. *Jpn. J. Appl. Entomol. Zool.* 15: 8–16.]
- 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: 1–9.
- 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.
- 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.
- 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.
- Rosenberg, L. J. and J. I. Magor (1983) Flight duration of the brown planthopper, *Nilaparvata lugens* (Homoptera: Delphacidae). *Ecol. Entomol.* 8: 341–350.
- 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.
- 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. [Sogawa, K. (1992) A change in biotype property of brown planthopper populations immigrating into Japan and their probable source areas. *Proc. Assoc. Pl. Prot. Kyushu* 38: 63–68.]
- 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. [Sogawa, K. (1993) Rice cropping and occurrence of rice planthopper in source areas. *Monthly Agriculture* 37(7): 32–36.]
- Sogawa, K. (1994) Windborn displacements of the rice planthoppers related to the seasonal weather patterns in Kyushu district. *Bull. Kyushu Natl. Agric. Expt. Stn.* 28: 219–278.
- 寒川一成・渡邊朋也 (1989) 九州農業試験場の予察灯資料にみるイネウンカ類の長期的発生変動の概要. 九病虫研会報 35: 65–68. [Sogawa, K. and T. Watanabe (1989) Outline of long-term yearly fluctuations of the rice planthopper occurrence from light-trap data at Kyushu National Agricultural Experiment Station. *Proc. Assoc. Pl. Prot. Kyushu* 38: 63–68.]
- 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. [Suzuki, Y. and T. Wada (1994) Rice cropping and occurrence of brown planthopper in Vietnam. *Plant Prot.* 48: 19–22.]
- 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.
- Watanabe, T. (1997) Long-distance migration of rice planthoppers. *Farming Japan* 31: 16–21.
- 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. [Watanabe, T. and K. Tanaka (2002) Recent migratory patterns of rice planthoppers and new technologies of weather analysis for forecasting their occurrence. *Plant Prot.* 56: 459–462.]
- Zhou, B.-H., H.-K. Wang and X.-N. Cheng (1995) Forecasting systems for migrant pests. I. The brown planthopper *Nilaparvata lugens* in China. In *Insect Migration* (V. A. Drake and A. G. Gatehouse eds.). Cambridge University Press, Cambridge, pp. 353–364.