

図3. 藤島におけるヒトスジシマカの産卵消長

表1. 各地ヒトスジシマカのRAPD-PCR
に用いたプライマー

プライマー	塩基配列
A40	GCG GAG GAA CCA
A41	TGG TAC GGT ATA
A42	GAG CAG GAA TAT
A43	ACT CTT CTA CAA
A44	AAG GAC ACA ACA
A45	TGG CCT CTT GGA
A46	TGG CCT ATT GGC
A47	GGT TTC CCA GGA
A48	CCG CAG GGA CCA
A49	TAC TAC TGT GGA
A50	ATT GGT GCA GAA
A51	AAG TCG TTT GGG
A52	AGA GAC ATA GTT
A53	GAC GCC CAT TAT
A54	AAG GCG TGT TTA
A55	TAC GCC GGA ATA
A56	AAC ATC TCC GGG
A57	ATC ATT GGC GAA
A58	GTC ATG CCT GGA
A59	CAG TGG GAG TTT

表2. 各地ヒトスジシマカを用いたRAPD-PCR法の結果

地域名 個体番号	Primer A40			Primer A44			Primer A53						
	300	250	80bp	850	600	300	1500	1000	750	700	600	300	250
沖縄													
1	+	+	+	+	+	-	-	-	-	+	+	-	-
2	+	+	+	+	+	-	-	-	-	+	+	-	+
3	+	+	+	+	+	-	+	-	-	+	+	-	-
4	+	+	+	+	+	+	+	-	+	+	+	+	+
5	+	+	+	+	+	-	-	-	+	+	+	-	-
6	+	+	+	+	-	-	-	-	+	+	+	+	+
7							-	-	-	+	+	-	-
長崎													
1	+	+	+	-	+	-	-	-	+	+	+	+	-
2	+	+	+	-	+	-	-	-	+	+	+	+	-
3	+	+	+	-	+	-	-	-	-	+	+	+	-
4	+	+	+	+	+	-	-	-	+	+	+	-	-
6	+	+	-	-	+	-	-	-	-	+	+	-	-
10	+	+	+	+	+	-	-	-	-	+	+	-	-
11	+	+	+	-	+	-	+	-	-	+	+	-	-
金沢													
1	+	-	-	+	+	+	-	-	-	-	-	-	-
2	+	-	-	+	+	+	-	-	-	-	-	-	-
3	+	-	-	+	+	+	-	-	-	-	-	-	-
5	+	-	-	+	+	+	-	-	-	-	-	-	-
6	+	+	+	+	+	+	-	-	-	-	-	-	-
7	+	-	-	+	+	+	-	-	-	-	-	-	-
8	+	+	+	+	+	+	-	-	-	-	-	-	-
マレーシア													
3	+	+	+	-	-	+	-	-	-	-	-	-	-
5	+	+	+	-	-	+	-	-	-	-	-	-	-
7	+	+	+	-	+	+	-	-	-	-	-	-	-
8	+	+	+	-	-	+	-	-	-	-	-	-	-
11	+	+	+	-	-	+	-	-	-	-	-	-	-
12	+	+	+	-	-	+	-	-	-	-	-	-	-
13	+	+	+	-	+	+	-	-	-	-	-	-	-
インドネシア													
1	+	+	+	-	-	+	-	-	-	-	-	-	-
6	+	+	+	-	+	+	-	-	-	-	-	-	-
7	+	+	+	-	+	+	-	-	-	-	-	-	-
9	+	+	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
10	+	-	-	-	-	+	-	-	-	-	-	-	-
11	+	-	-	-	+	+	-	-	-	-	-	-	-
12	+	+	-	-	+	+	-	+	+	-	-	-	-

表 3. 沖縄県の港湾地区及び人家周辺の水域における蚊の発生調査

	小水域 (容積 2 L以下)				大水域 (容積 2 L以上)				水溜り	側溝	水域計	吸血飛来 (***)
	鉢受け	缶	プラスチック容器	石製の水溜め	その他(*)	タイヤ	ポット	壺				
沖縄本島	2			1	5	1		1	3	13	4	
<i>Aedes albopictus</i>								+			+	
<i>Culex quinquefasciatus</i>	+					+		+				
宮古	3			3	16			1		23		
<i>Aedes albopictus</i>				+	+							
石垣	8	4			22	1		14	2	51	1	
<i>Aedes albopictus</i>					+						+	
<i>Culex quinquefasciatus</i>								+				
<i>Culex pseudovishnui</i>								+				
西表	1	4	10	2	5	1	2	5	1	31	1	
<i>Aedes albopictus</i>	+		+		+			+			+	
<i>Aedes riversi</i>			+								+	
<i>Culex quinquefasciatus</i>			+									
<i>Culex tritaeniorhynchus</i>								+				
<i>Culex fuscanus</i>			+					+				
<i>Armigeres subalbatus</i>					+				+		+	
与那国	4		7	9	2	1	1	33	1	2	60	2
<i>Aedes albopictus</i>			+	+		+		+		+	+	
<i>Ochlerotatus togoi</i>						+		+				
<i>Culex quinquefasciatus</i>				+	+						+	
<i>Culex tritaeniorhynchus</i>								+				
<i>Culex halifaxii</i>			+									
<i>Culex (Lutzia) sp.</i>				+								
<i>Anopheles sinensis</i> group								+				

* : 皿、コップ、水槽、茶碗、セメントブロックの穴等

** : 発泡スチロール容器、タール入れ容器、ドラム缶、プラスチック容器、スチール缶、水槽、バケツ、なべ、ベットの飲み水の容器等

*** : 幼虫発生調査とは別の地点で吸血飛来雌蚊を採集

表4 沖縄県における蚊族卵の採集結果 (沖縄：2002年5月9日～2003年1月27日，
離島：2002年5月9日～12月31日)

	沖縄				与那国
	安謝	具志川	宮古	石垣	
サンプル数	223	220	100	137	150
採集卵総数	13856	2622	12562	8807	18796
(平均±標準偏差)	(62.1±102.5)	(11.9±41.4)	(125.6±128.0)	(64.2±85.8)	(125.3±132.3)
ヒトスジシマカ	7887	1470	4831	3850	5351
トウゴウヤブカ	0	14	0	0	3

分担研究報告書

侵入昆虫の移動分散能力の解析

分担研究者 上宮健吉 久留米大学医学部助教授

研究要旨

蚊はどのくらい遠くへ飛べるのか、データは極めて少ない。感染症媒介蚊が環境変化や人為的要因で国内に侵入定着する可能性が益々高まっている。万一、侵入して一時的に発生した場合に、どこまで成虫が移動分散するかは危機管理の重要な情報である。本研究では昨年度に引き続き、室内実験条件でヒト吸血性の蚊の飛翔による移動分散の範囲を測定した。測定には体重1mg~10mgの微小体重の蚊の飛翔力に対応した電子自動測定装置を使用した。感染症に関係するハマダラカ類、ヤブカ類、イエカ類などの10種と、ヒト非吸血性や捕食性の蚊5種を含めた計15種210頭を供試した。実験条件の固定飛翔は野外の自由飛翔とは異なるので、画像解析的に自由飛翔の速度を測定し、固定飛翔の速度値を補正した。また、新たに飛翔時の翅振動の音響学的特性から、力学的な飛翔能力も解析に加えた。推定する飛翔分散距離は、(1)最大予測値として休止を挟む繰り返し飛翔で全エネルギーを消費し尽くした飛翔の[総飛翔]の速度や飛翔時間を見たものと、(2)最少予測値として、ノンストップで飛んだ1回の飛翔の[最大連続飛翔]の速度や飛翔時間を基礎にした。(1)と(2)の飛翔時間に飛翔速度を乗じて到達距離を求める時、自由飛翔で測定した速度データに基づき、固定飛翔の速度を補正した。(1)と(2)はそれぞれ最も大きく見積もった雌蚊の生存中の累積飛翔距離、及び最も少なく見積もった1日内の1回の飛翔による移動分散距離と見なされる。

その結果次のように主な感染症媒介種の飛翔分散距離が最大値-最小値として推定された：シナハマダラカ(21.9-8.5km)、ヤマトヤブカ(16.5-5.9km)、ネッタイシマカ(8.6-3.1km)、ヒトスジシマカ(7.1-3.1km)、オオクロヤブカ(16.5-8.9km)、アカイエカ(14.8-4.6km)、コガタアカイエカ(13.6-5.1km)。これら推定された分散距離は従来報告された数値よりもはるかに大きい。今後、海外からの侵入が予想される西ナイル熱の感染に係わるアカイエカ、熱マラリアに係わるハマダラカ類、およびデング熱に係わるネッタイシマカの予測値について、危機管理としての緊急防除の対象範囲の策定について考慮すべきデータが得られた。

A. 研究目的

蚊や蠅類は微小な虫体であるために、飛翔能力に関する国内外の研究は極めて少ない。また、長距離飛翔力を示唆する海上や島での採集記録はあるが、蚊の長距離の飛翔力の実態ははまだ解明されていない。このような背景から、本研究では、疾病媒介昆虫の代表な種を中心に、その飛翔に伴う様々な機構を行動学的、生理学的に研究することを目標とする。現実的にマラリアやデング熱などの人体感染症を媒介する熱帯産の蚊類が人為的な経路で空港、港湾で捕捉される事例が明らかになり、西ナイル熱病もさしせまった問題になっている。温暖化傾向と言われるなかで、南方起原の昆虫が北進している状況が衛生ハエ類、カ類に見い出される。蚊類の疾病媒介能はメス蚊の吸血特性と、国内で繁殖した集団が移動分散する能力にかかっており、この予測は疾病媒介コントロールを考える上で非常に重要なことである。そこで、病原媒介性の昆虫の潜在的飛翔能力を推定し、我が国に飛来侵入した時、その移動分散の範囲を予測すれば病気の予防と防除の対策になるだろう。

これまで、わが国の地理的特殊性から、東南アジア諸国から自然的に飛来する昆虫は数多く知られ、地球温暖化傾向に伴い国内へ適応的に分散して繁殖を拡大する可能性は高まってきた。新興・再興感染症の防疫対策を講じる上で、わが国へ飛来侵入する病原媒介性のカ類やハエ類の侵入経路や国内で移動分散する範囲を知ることは、重要であるにもかかわらず、これら微小の昆虫の飛来経路や、国内での移動分散の範囲を予測する方法は確定しておらず、データも極めて少ない。その理由は体重わずか1~10mgの蚊の飛翔能力を通常の飛翔測定装置で計ることはできず、記号放逐再捕法で測定するにはさらに大きな困難がある。

このような状況で、マラリアやデング熱発症に関わる蚊類が上陸して、施設付近で繁殖した場合、もし大きな飛翔能力を有すれば、各地に一気に移動分散して被害を及ぼす可能性が危機管理として重要視される。そのため、予知としてヒト吸血性の各種蚊類の飛翔能力を推定しておけば、万一の発生時に移

動分散の範囲を予測し、疾病の予防対策を講じることができらう。

以上のような目的で、平成 14 年度は新たに次の項目を調査対象とした。

[1] ビデオ映像の三次元空間投影による自由飛翔の速度測定装置と LabVIEW 開発ソフトの実用化（蚊の固定飛翔の速度を自由飛翔速度と対比させるため）。

[2] 未調査の各種蚊類の固定飛翔能力のデータの拡充（調査サンプル数の確保）

[3] 音響解析法による蚊類の飛翔能力の比較検討（翅振動の物理特性と飛翔能力との関係）。

B. 研究方法

1) 測定装置

Windows PC マシンでフライトミルの飛翔回転の機械変量をレーザー発光と受光センサーで検出し、デジタル信号に変換し、専用計測 DSP ボード、および入力モジュールによって出力信号とし、高速演算処理可能なコンピュータを介して電子情報として計測解析の開発ソフトで自動制御し、測定データを格納し統計的に演算解析した。また飛翔速度について、室内実験下の測定値を自然条件下の実際の飛翔速度を得ることで、データの補償を行うため、キーエンス社のデジタルマイクロスコープの画像解析装置を利用した。時間軸数値は、蚊を釣り下げたフライトミルの回転棒がセンサーを遮断する時に生じる時間変量を回転棒の幅 0.7mm の瞬時の横断のタイムイベントを 0.5mm 光束のレーザー発光と受光センサーで検出し、デジタル信号に変換し、専用計測 DAQ ボード、ホットカプラー、および入出力モジュールによってデジタル変換信号とし、高速演算処理する 1 MHz の CPU を介して計測し、データを

格納した後、Excel のマクロ演算でルーチン化して統計解析した。

図 1 に示したフライトミル装置は、2 個の小さなネオジム磁石によって軸と回転棒を磁気浮上させ、摩擦ロスを軽減したもので、体重 1mg ほどの微小昆虫の飛翔量の測定を可能にしたユニークなものである。本研究の信号処理とデータの解析に関する総ての運用は、Windows PC (Pentium 4、1GHz) 上で、ナショナルインスツルメント社の LabVIEW v. 3.1.1 のグラフィック言語の開発プログラムに基づいた。LabVIEW の信号処理のプログラムを用いて、16 ビット分解能の A/D 変換装置でデジタル信号にし、飛翔の持続や休止のパラメータを完全自動測定してファイル化して、統計処理した。この強力磁性体の反発力を利用して回転軸の摩擦ロスを著しく軽減した磁気浮上式のフライトミル測定装置を用いて、九州の温暖地に生息するハマダラカ類、イエカ類、ヤブカ類などの雌成虫 210 個体について、飛翔前後の体重変化や総飛翔距離、総飛翔時間、総飛翔速度、最長連続飛翔距離、最長連続飛翔時間、最長連続飛翔速度などの飛翔に関わる物理変量を比較解析した。また、吸血虫と非吸血虫の生理的違いが飛翔能力に及ぼす関係を比較し、これまで推測の域を出なかった飛翔速度や到達距離を客観的に推定し、将来的に国内に飛来侵入する衛生上重要な蚊類の移動分散に対処する基礎的なデータを取得した。

固定飛翔の速度は自由飛翔のものとは異なるので、映像的に得た自由飛翔速度で両者の開きを考慮して補正した。デジタル映像した蚊の自由飛翔の画像から、時間軸と距離の座標軸データを抽出して、速度を得た。成虫をガラス容器 (H42×W43×D34cm) にいれ、直線飛翔の軌跡画像をパソコンの映像ソフト

表1 供試した蚊の種類と媒介性

	供試虫 (雌)	学名	調査数	吸血性	媒介疾病
1	シナハマダラカ	<i>Anopheles sinensis</i>	14	人畜吸血性	(三日熱マラリア, 日本脳炎)
2	オオハマダラカ	<i>Anopheles saperoi</i>	5	人畜吸血性	(マラリア)
3	モンナシハマダラ	<i>Anopheles bengalensis</i>	2	人畜吸血性	
4	ヤマトヤブカ	<i>Ochlerotatus japonicus</i>	21	人畜吸血性	(日本脳炎)
5	ネッタイシマカ	<i>Aedes aegypti</i>	36	人畜吸血性	(黄熱病, デング熱)
6	ヒトスジシマカ	<i>Aedes albopictus</i>	30	人畜吸血性	(デング熱), フィラリア症
7	リバーズシマカ	<i>Aedes riversi</i>	6	人畜吸血性	(デング熱)
8	オオクロヤブカ	<i>Armigeres sabalbatius</i>	12	人畜吸血性	
9	トラフカクイカ	<i>Culex halifaxii</i>	13	捕食者	
10	クロツノフサカ	<i>Culex minor</i>	5	非人吸血性	
11	アカクシヒゲカ	<i>Culex pallidothorax</i>	10	非人吸血性	
12	ヤマトクシヒゲカ	<i>Culex sasai</i>	10	非人吸血性	
13	アカイエカ	<i>Culex pipiens pallens</i>	31	人畜吸血性	日本脳炎, フィラリア症
14	コガタアカイエカ	<i>Culex tritaeniorhynchus</i>	12	人畜吸血性	日本脳炎
15	キンバラナガハシカ	<i>Tripteroides bambusa</i>	3	人畜吸血性	

トで時間値と距離から速度を求めた。このネッタイシマカの固定飛翔と自由飛翔の速度の差を他の蚊の自由飛翔と固定飛翔にも対応させた。推定される分散距離は雌蚊（未吸血）が固定飛翔においてノンストップで最も長く飛んだ時の平均速度を自由飛翔の速度で補正し、これにノンストップの飛翔の平均飛翔時間に乗じて得た距離から、最も控え目な一飛びの分散距離を推定したものである。また、ネッタイシマカとオオクロヤブカについて、非吸血と吸血させた条件での飛翔距離を比較した。

2) 蚊類の調査

表1のように、マラリア媒介性のシナハマダラカ、デング熱や黄熱病媒介性のネッタイシマカ、ヒトスジシマカ、フィラリア病媒介性のアカイエカ、日本脳炎媒介性のコガタアカイエカなどのヒト吸血性の種に加えて、ヒト非吸血性の蚊や捕食性のトラフカクイカも比較データとして調査した。実験に用いた成虫蚊は、卵や幼虫を野外で採取し、室内条件で繁殖して羽化後7~14日齢の成虫を供試した。飛翔実験では、まず蚊を炭酸ガスで瞬時的に麻酔し、低温度溶解性のデンタル・インレイワックス微量を微針頭につけ、これを電熱線を経由して溶解して蚊成虫の胸背部中央にて固着させた。この方法は蚊の飛翔筋に温熱や接着剤の悪影響を与えない最も安定した方法であることを確認している。

3) 調査地域

調査した蚊は福岡県久留米市、佐賀市、鹿児島県の大隈半島の鹿屋市や肝属郡、奄美大島、沖縄県石垣市、八重山郡西表島の水系で採集した幼虫である。なおマラリア媒介虫のオオハマダラカは琉球大学（富間博士）の実験システムを用いた。

3) 本研究においては倫理面に係わる問題は研究対象である蚊類の実験生物学的性質によって、特に配慮する必要はなかった。

C. 研究結果

1) 自由飛翔速度の測定

ネッタイシマカ雌の自由飛翔をデジタル映像の三次元空間投映による座標位置の変化から距離と時間の差を得て、自由飛翔の速度を測定した。図2はCCDカメラで撮影したネッタイシマカの飛翔の2次元画像である。成虫はガラス容器（H42×W43×D34cm）にいれ、直線飛翔の軌跡画像をパソコンの映像ソフトで時間値と距離から速度を求めた。その結果、ネッタイシマカ(Dark 系統)の10雌個体の自由飛翔速度（サンプル数37）は $3.06 \pm 1.36\text{m/sec}$ ($=11.02 \pm 4.9\text{km/h}$) となった。これは図3に示すように、固定飛翔によるネッタイシマカの雌の飛翔速度よりはるかに速い。そのため、分散距離を推定する場合には、固定飛翔の速度を補正せねばならない。例えば、固定飛翔の数値を5.3倍（dark 系統）~6.75倍（bright 系統）にするのが妥当である。

2) 音響解析法による蚊類の飛翔能力の比較検討

雌蚊を防音箱に設置した精密マイクロホンの1cm上で固定飛翔させ、その翅振動の物理特性から飛翔能力と羽ばたきとの関係を調査した。図5-6のように9種類について雌蚊の羽ばたきうい周波数10kHzの範囲の瞬時波と、その8msec間のオシログラムを示した。図7は基本基本周波数と基本周波数に対する高潮波ハーモニクスの実効値歪率のプロット図である。図5のハマダラカ属はオシログラムの1つの翅ストロークは中央が少し陥没した程度で、基本周波数の音圧レベルが二次高潮波と同程度かあるいは二次波よりも低いので、高潮波歪率が高い傾向にある。このことはシナハマダラカ2種の翅のたわみが弱く、翅の剛性の強いこと、別の言葉では翅の小回りの運用性が弱いことを示す。図6のヤブカ属ではトウゴウヤブカ亜属のヤマトヤブカに対して、シマカ亜属のネッタイシマイアとヒトスジシマカの間にはストロークのオシログラム波形に明瞭な差異が認められる。すなわち、後者の2種はストロークが前と後に2分し、それぞれがさらに2分する。飛翔においてはヤマトヤブカの低い基本周波数で低い歪率が効率的な長距離飛翔をもたらし、一方、ヒトスジシマカとネッタイシマカは短距離の素早い曲線飛翔を可能にするだろう。クロヤブカ属のオオクロヤブカの飛翔の波形は周波数が高く歪率が低い、極めて機能的な長距離飛翔の特性を示す。さらに、トラフカクイカは極めて低い基本周波数と明瞭な力強い翅ストロークによって、長距離飛翔に適した、持続性のある翅振動を示す。

3) 固定飛翔法による飛翔能力の測定

4台のフライトミル装置で固定飛翔による雌蚊の飛翔距離、飛翔速度、及び休止や連続性などの時間的要素のいくつかのパラメータを測定解析した。

図8に途中の飛翔中止を含めた完全に飛翔停止に至るまでの全ての飛翔距離を累計した[総飛翔距離]を示した。マラリア媒介性のシナハマダラカは高い飛翔力を示し、平均飛翔距離が4.1km、最長飛翔個体は11.3kmであった。ネッタイシマカはbright系の最大値が8.8km、平均値がdark系で2.2kmであった。アカイエカはコガタアカイエカよりも飛翔距離が大きく、最大値が14km、平均値が3.1kmを示した。最も大きな飛翔距離を示したのは幼虫が捕食性のトラフカクイカで、平均値が10.2km、最大値が27.8kmであった。樹洞性や狭所性のクロツノフサ、アカクシヒゲ、ヤマトクシヒゲの3種や昼間活動性のヒトスジシマカ、ネッタイシマカは平均総飛翔距離が2.2~0.6kmと距離が少なかった。

図9に最も長くノンストップで連続して飛翔した[最連続飛翔距離]を示した。この特性は連続飛翔の持続性、つまり一飛びでどのくらいの距離を飛ぶかの性質であり、[総飛翔距離]の数値より控えめな、単純に見た連続飛翔距離を示す。ここでも捕食性のトラフカクイカの連続飛翔距離が22.9kmで、平

均距離が 5.1km であった。シナハマダラカは最大値が 6.7km、平均値が 1.7km で、アカイエカやコガタアカイエカの平均値よりも大きかった。最大値で最も長距離に飛翔したのはやはりトラフカクイカで、22.9km を連続して飛び、平均値は 5.1km であった。アカイエカは最大値が 9.5km の個体があった。平均値では 1.1km でコガタアカイエカよりやや距離が大であった。図 10 は休止も含めた総ての飛翔時間を累積した[総飛翔時間]の散布図である。最も長い時間飛翔したのは最大値ではトラフカクイカの 836.7 分(13.9 時間)で、ヤマトヤブカの 582.0 分、アカイエカの 605.0 分、シナハマダラカの 576.3 分が続く。この総飛翔時間は次の図 11 のノンストップの最長連続飛翔時間と種ごとに順位において類似した。図 12-13 は固定飛翔の総飛翔の平均値と、最も長く飛んだ最長連続飛翔の速度を種ごとにプロットしたものである。平均的にオオクロヤブカ、トラフカクイカ、シナハマダラカは総飛翔距離と同様に飛翔速度も他種より早い傾向にあった。コガタアカイエカとアカイエカはヤマトヤブカやネッタイシマカと同程度の速度を示した。図 17~19 に飛翔時間と飛翔距離、および飛翔速度について全ての飛翔の平均である[総飛翔]と 1 回の最大連続飛翔における[最長連続飛翔]の各平均値の相関をプロットした結果、総飛翔と最長連続飛翔には 3 つのパラメータにいずれも非常に強い相関があった。これは最大連続飛翔が総飛翔の大部分を占めるという理由ではなく、どの飛翔行動も遺伝的に決められた一定の能力であることを示すと考えられる。図 20~22 に飛翔時間と距離と速度の相互の関係について、総飛翔と最大連続飛翔にわけて相関を調べた結果、飛翔時間と飛翔距離には高い正の相関があったが、飛翔速度に対する飛翔時間と飛翔距離はいずれも強い相関は認められなかった。つまり、飛翔速度は持続性に係わる距離や時間と異なる要素を含む種があることを示すと考えられる。それには早く飛べるが距離的には遠くへ飛ばない種類(ネッタイシマカ、リバーズシマカなど)が影響していると考えられる。

蚊類の飛翔による分散距離は今回調査した種のなかでシナハマダラカ(約 1km)、ネッタイシマカ(約 800m)、ヒトスジシマカ(約 400m)、オオクロヤブカ(約 500m)、アカイエカ(約 1km)、コガタアカイエカ(約 2km)の報告がある。これらは主に記号放逐再捕獲法によって記録された少ない事例である。固定飛翔はネッタイシマカについて多くの記録があるが、自由飛翔の速度の測定による補正のなされた報告はない。ここではネッタイシマカの自由飛翔速度と固定飛翔速度を比較し、両方の平均飛翔速度の割合により、自由飛翔速度は固定飛翔速度の 5.3 倍に相当することから、他の全ての種についても便宜的にこの乗率で分散距離を補正して距離を算出した。

1) 蚊類の実験結果の概要

雌蚊の移動分散距離の推定を、固定飛翔による回転飛翔の速度と持続時間から算出した。飛翔量測定では休止を含む総ての飛翔行動の速度と持続時間、および再連続飛翔というただ 1 回のノンストップの連続飛翔における速度と持続時間の 2 つの要素について、平均値と最大値、最小値について検討した。求めるべき移動分散距離は蚊がただ 1 回の飛翔でいかに長い時間(遠くへ)へ飛ぶ能力があるかという側面と、何回かの休止を含めて全エネルギーを使い尽くしていかに長い時間(遠くへ)飛ぶ能力があるかの両側面で飛翔距離を推定した。

飛翔実験に用いた 15 種類の蚊は過去に行われてきた標識放飼再捕獲法によって得られた分散距離と比較して、より大きな飛翔距離を示した。各種の総飛翔時間(休止時間を除く総飛翔実行時間の合計)は虫体の保有する飛翔エネルギーに関係があると思われた。幼虫が捕食性であるトラフカクイカは幼虫体重にも比例して大きく、また有機質の多い水圏にいるシナハマダラカ、オオクロヤブカ、ヤマトヤブカなども成虫の体重の大きさと同様に総飛翔距離は大きい傾向があった。最も長い時間飛翔した個体はシナハマダラカ(9.6h)、ヤマトヤブカ(9.7h)、トラフカクイカ(13.9h)、アカイエカ(10.1h)、オオクロヤブカ(3.6h)が記録された。また、ネッタイシマカ(6.4h)、ヒトスジシマカ(5.6h)、コガタアカイエカ(4.8h)が記録された。その他の蚊類もリバーズシマカ、クロツノフサカ、オオハマダラカ、キンバラナガハシカを除いては総飛翔時間の平均値は 1 時間を超えた。

各種の最連続飛翔時間が蚊の連続飛翔性を示す要素と見なされる。総飛翔時間と同様にトラフカクイカが連続飛翔時間でも大きな値を示した。ヒト吸血性の以下の種も最大個体のデータをここに示す。シナハマダラカ(2.9h)、ヤマトヤブカ(3.9h)、ネッタイシマカ(2.1h)、アカイエカ(4.6h)、コガタアカイエカ(1.9h)、ヒトスジシマカ(2.1h)。この連続飛翔時間に速度を乗ずると、ノンストップで飛んだ条件での飛翔距離がでる。蚊の多くは無風条件で飛翔する傾向があるので、風の影響は低いと思われるので、その個体の平均速度でおおよその移動距離が算出される。

雌蚊は栄養生理的に吸血後に飛翔能力が高まることが知られている。吸血後の飛翔と非吸血虫の飛翔を個別別にオオクロヤブカ、アカイエカ、ネッタイシマカについて比較すると、オオクロヤブカやネッタイシマカに顕著な差が認められ、総飛翔時間、総飛翔距離、最大連続飛翔距離は著しく増加した。そのため、本研究で得られた各種の分散距離の予測値は吸血した雌の場合により上方に修正しなければならない。

ハマダラカ属の飛翔分散力は広い沼や池に生息するシナハマダラカに対して溪流性のオオハマダラカ、モンナシハマダラカ、あるいは今回はデータが少なく採用しなかったが、コガタハマダラカは飛翔力が著しく劣ると見なされた。

ヤブカ類は平地を好むヒトスジシマカやネッタイシマカ、ヤマトヤブカなど飛翔速度は速いが分散距離は一定の範囲に留まると考えられた。一方、トラフカクイカやオオクロヤブカは生息地の特殊性から、成虫の強い長距離飛翔性が獲得されていると考えられる。これに対して樹洞性のツノフサカ類、クシヒゲカ類、キンバラナガハシカの飛翔能力が低いと見なされる。アカイエカとコガタアカイエカは産卵行動において環境に対する強い働きかけを要するために、分散の能力が高いことがうかがえた。

飛翔到達距離は蚊の飛翔速度ではなく、飛翔の持続性と有意に相関があった。今回測定した固定飛翔は不自然な飛翔であり、自然状態の自由飛翔による速度が各種について平均的なパラメータとして得られれば、到達距離について、客観的な予測値が得られるだろう。飛翔能力は翅の振動の物理的、生理的な要因にも関係することから、飛翔行動に関する音響特性も今後さらに比較検討する必要がある。現在、画像解析によって立体的な飛翔軌跡から速度を求めた試みを進めている。

D. 結論

固定飛翔装置を用いて 15 種類の蚊による平均飛翔速度、平均飛翔時間、最大飛翔速度、最大飛翔時間の 4 つのパラメータから、平均分散距離、最大分散距離を推定した結果、従来のマーク虫放飼再捕獲による距離と比較してより広い範囲に飛翔する能力が算出された。平均飛翔速度、平均飛翔時間、最大飛翔速度、最大飛翔時間の飛翔特性から、固定飛翔条件での平均到達距離と最大到達距離を算出し、ネッタイシマカの自由飛翔速度と固定飛翔速度の比較から、補正された平均到達距離、最大到達距離を求めることができた。総飛翔の平均の速度と飛翔時間で見た最大到達距離を見ると、トラフカクイカが 50.1km、シナハマダラカが 21.9km、オオクロヤブカが 16.56km、ヤマトヤブカが 16.5km と高い値を示した。ネッタイシマカやヒトスジシマカ、アカイエカ、コガタアカイエカでも最大に見積もった分散距離は 10km を超えるものであった。最も少なく、控えめに見積もった分散距離をただ 1 回の飛翔で最も長い時間をかけて飛んだ個体の平均飛翔速度で距離を求めた結果、従来知られていた分散距離の 3~4 倍の数値が出た。すなわちシナハマダラカ (8.9km)、ネッタイシマカ (3.3km)、ヒトスジシマカ (3.1km)、アカイエカ (4.6km)、コガタアカイエカ (5.1km) などである。この飛翔距離は極めて控えめに出されたもので、最小に見積もった予想到達距離として考慮されるべきである。危機管理としての予測では数日をかけて飛翔行動を続ける

という要素を含めた総飛翔の最大到達距離を考えるべきである。そのとき、例えばマラリア媒介性のシナハマダラカは 21.9km、デング熱に関係するネッタイシマカは 12km、西ナイル熱に関係するアカイエカは 14.8km、日本脳炎に関係するコガタアカイエカは 13.6km の到達距離を予測しておくべきである。

F. 研究危険情報 なし

G. 研究発表

1. 論文発表

Kanmiya, K : Flight properties of orthorrhaphous Brachycera flies in tethered flight performance (Insecta:Diptera). Med. Entomol. Zool. 53 (Suppl. 2):109-120, 2002.

Kanmiya, K. and Sonobe, R. : Records of two citrus pest whiteflies in Japan with special reference to their mating sounds (Homoptera: Aleyrodidae). App. Entomol. Zool. 37(3):487-495, 2002.

2. 学会発表

上宮健吉：病原媒介性蚊類の飛翔能力の測定。日本昆虫学会第 62 回大、2002 年 9 月 28 日、富山市。

上宮健吉：蚊はどこまで遠くへ飛べるのか。日本昆虫学会・日本鱗翅学会合同九州支部大会、2002 年 12 月 15 日、鹿児島市

吉武啓・上宮健吉・湯川淳一・紙谷聡志：ノンストップで数十キロ、フライトミル装置によるヤシオサゾウムシの飛翔能力の推定。日本昆虫学会・日本鱗翅学会合同九州支部大会、2002 年 12 月 15 日、鹿児島市。

H. 知的財産権の出願・登録状況 なし

図1 蚊飛翔測定装置の概略図

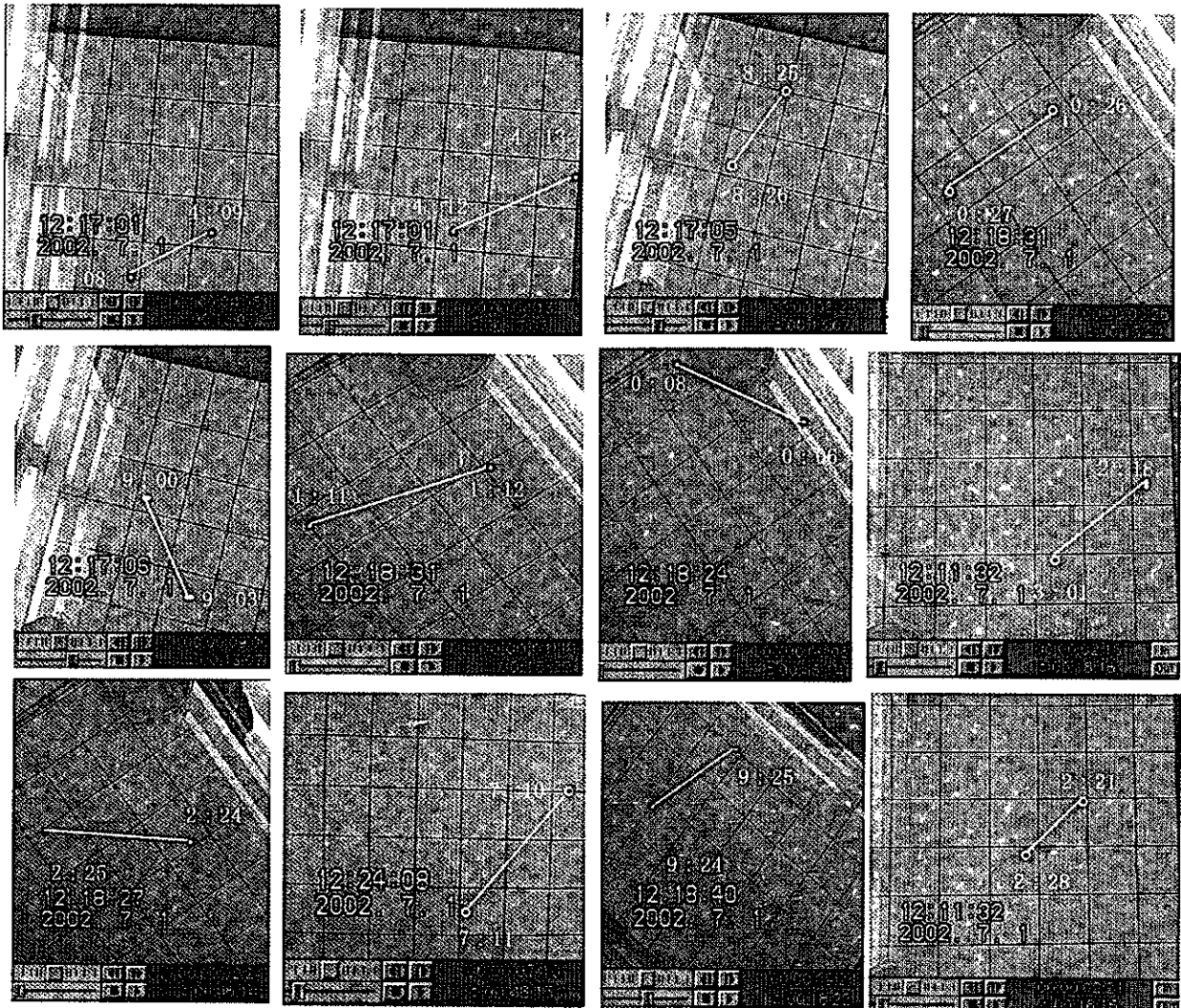
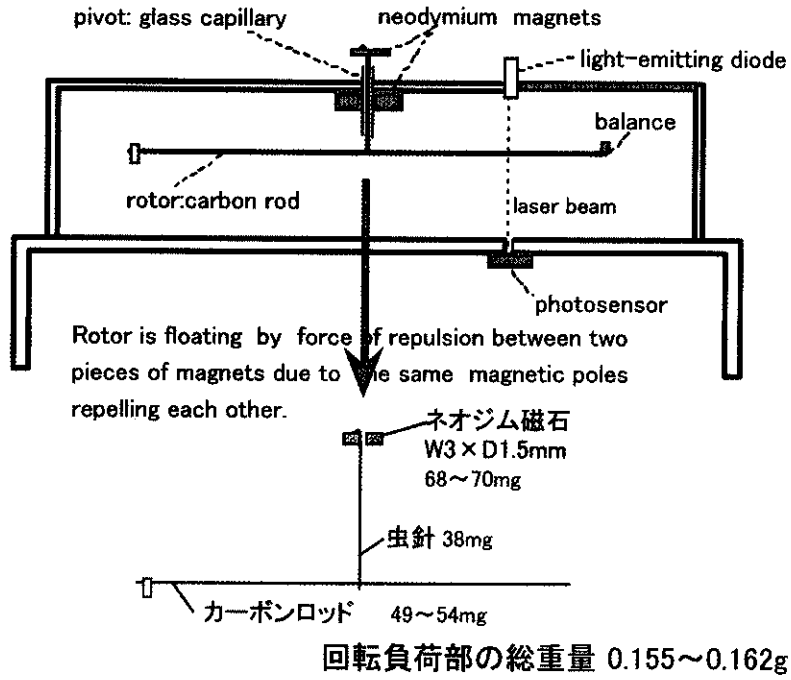


図2 画像解析によるネッタシマカ雌の自由飛翔速度の計測例

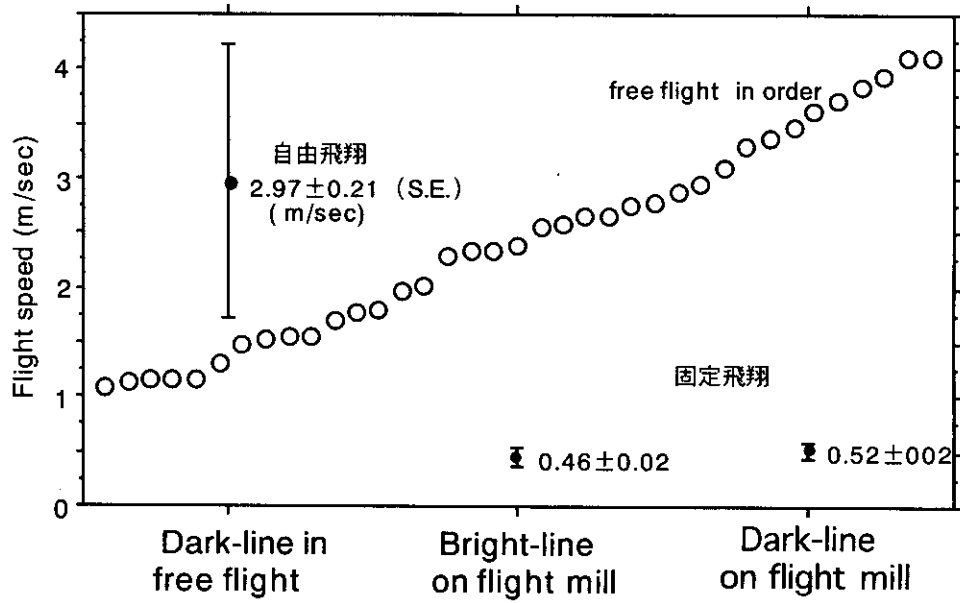


図3 ネットイシマカの自由飛行速度と固定飛行速度

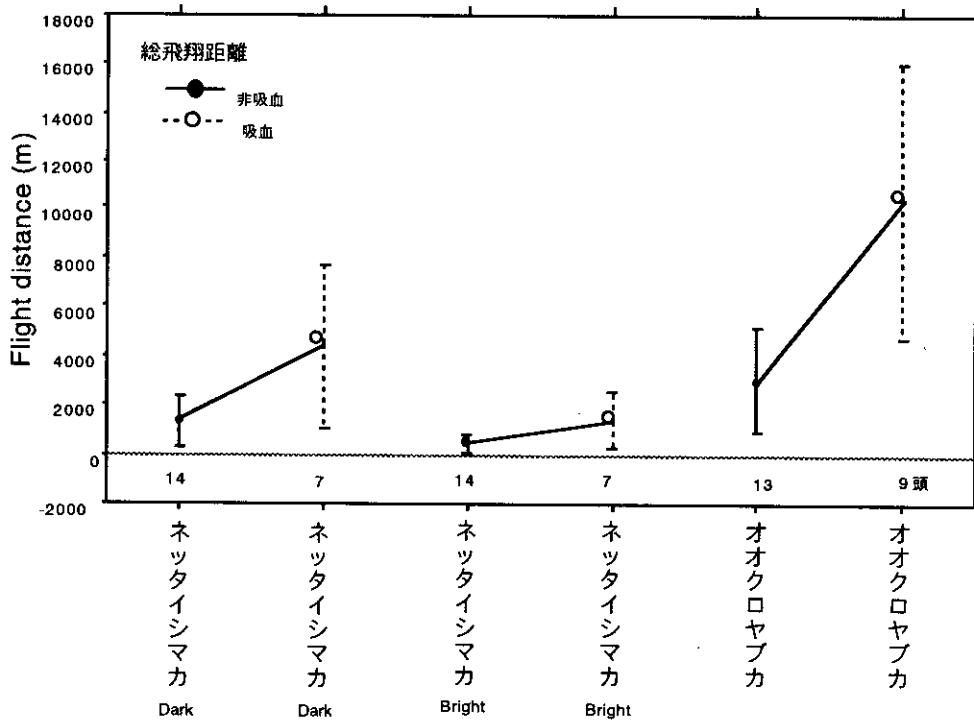
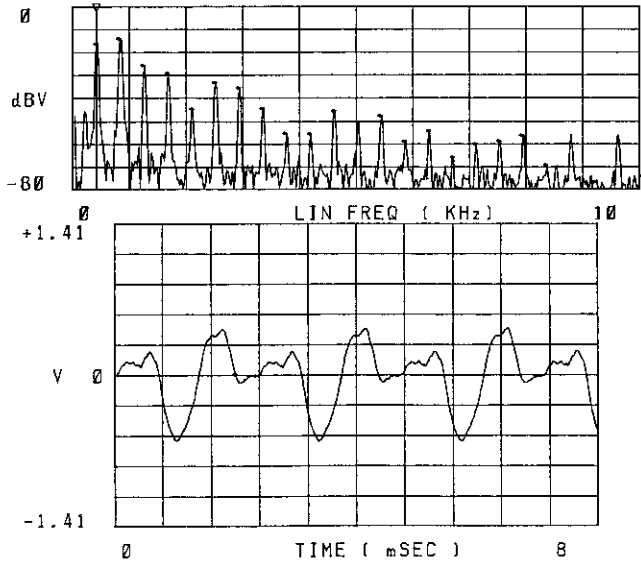


図4 吸血と非吸血による雌蚊の飛行距離の比較

SINAHADARA FEMALE AUG25(1)3158- KANOYA

↑ 425 Hz -16.1 dBV

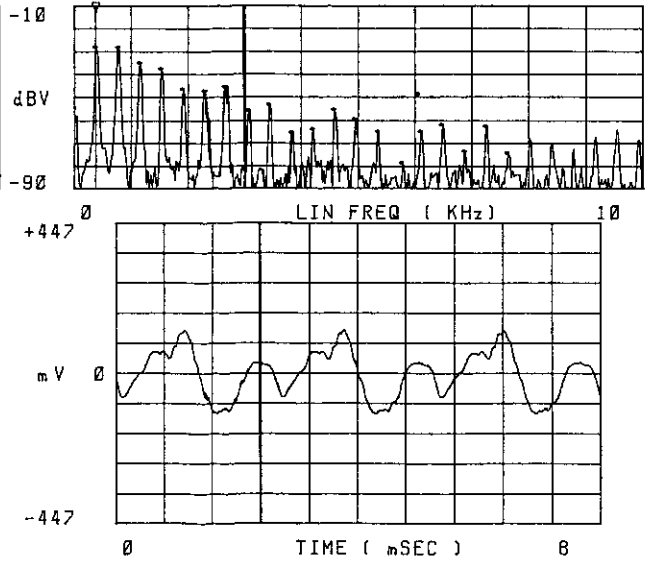
シナハマダラカ Total harmonic RM -13.3dBV
Total haramonic dist. 137.8%



ANOPHELES SAPERDI JAN5FS3 0.00183G

↑ 375 Hz -27.9 dBV

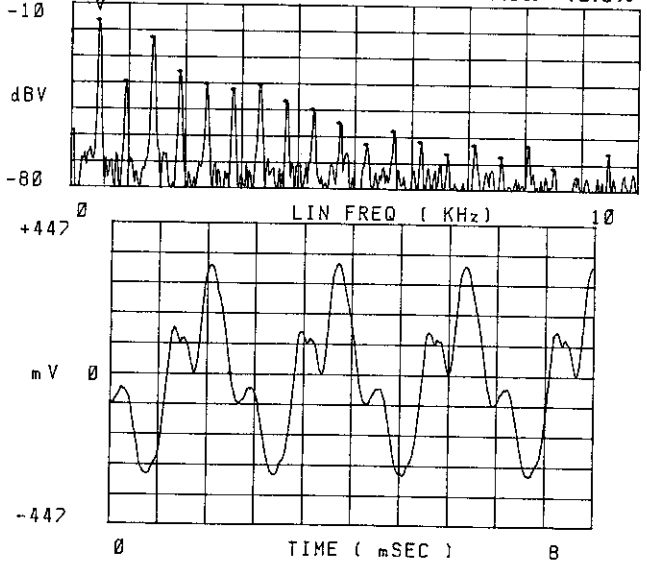
オオハマダラカ T.H.RMS -26.7dBV
T.H.Dist. 114.9%



OHKUROYABU FEMALE AUG23(1)2005- AUG23F1

Pk 475 Hz -16.4 dBV

オオクロヤブカ T.H.RMS -18.1dBV
T.H.Dist. 48.8%



TORAFU FEMALE AUG23(1)02#10B-

↑ 325 Hz -18.8 dBV

トラフカクイカ T.H.RMS -17.5dBV
T.H.Dist. 86.1%

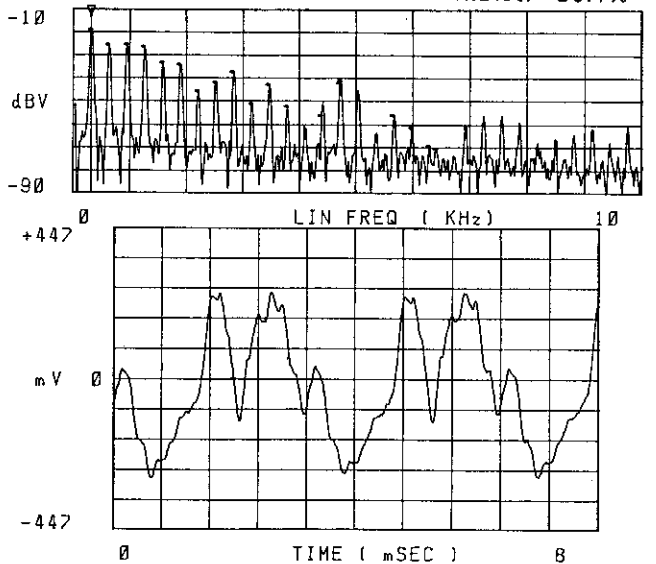
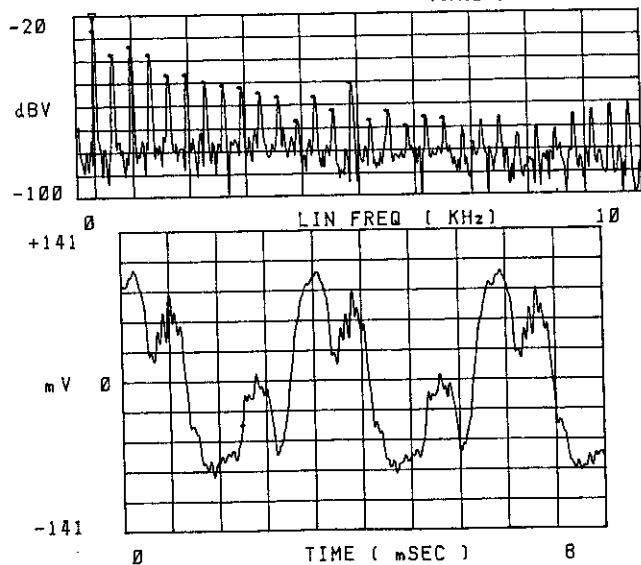


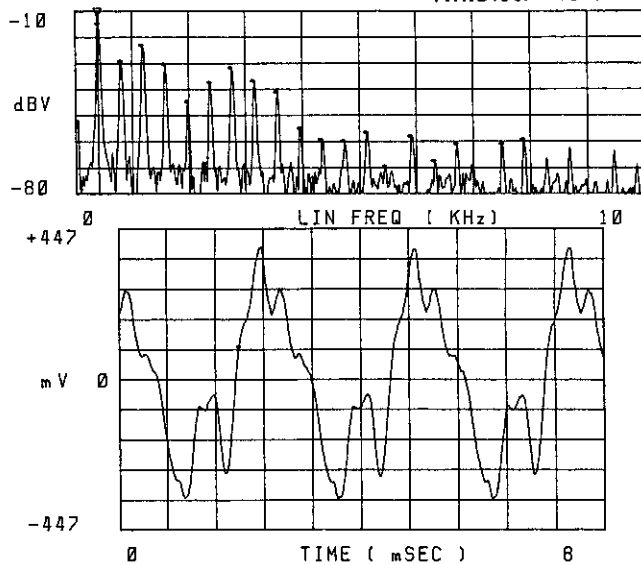
図5 固定飛翔による雌蚊の音響解析

上図：10kHz周波数スペクトル、下図：8msecオシログラム

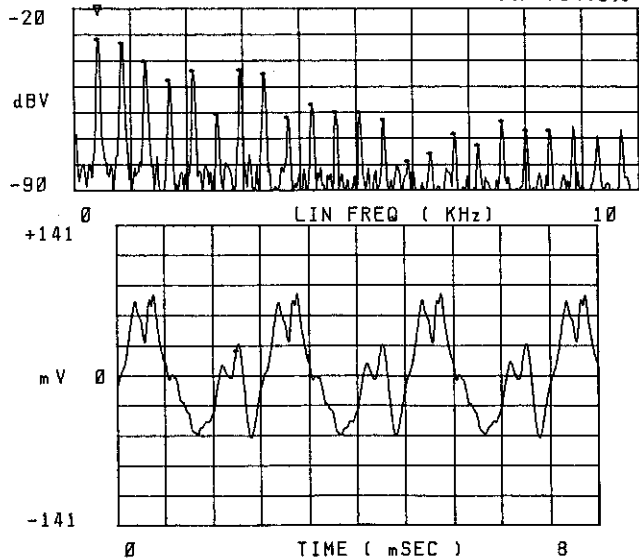
OCHLEROTATUS JAPONICUS JAN11FS1 C2960
 † 325 Hz -26.5 dBV
 ヤマトヤブカ T.H.RMS -30.5dBV
 T.H.Dist. 63.3%



A. REGYPTI MAY30(02)4658 JUN17DAF2 NOFIL
 † 400 Hz -14.8 dBV
 ネットイシマカ T.H.RMS -20.9dBV
 T.H.Dist. 49.5%



REDES ALBOPICTUS OCT18FS1 5DAYS OLD
 Pk 425 Hz -31.7 dBV
 ヒトスジシマカ T.H.RMS -31.6dBV
 T.H.Dist. 101.6%



AKAIEKA KURUME MAY30(02)250- FEMALE
 † 325 Hz -27.4 dBV
 アカイエカ T.H.RMS -18.2dBV
 T.H.Dist. 290.6%

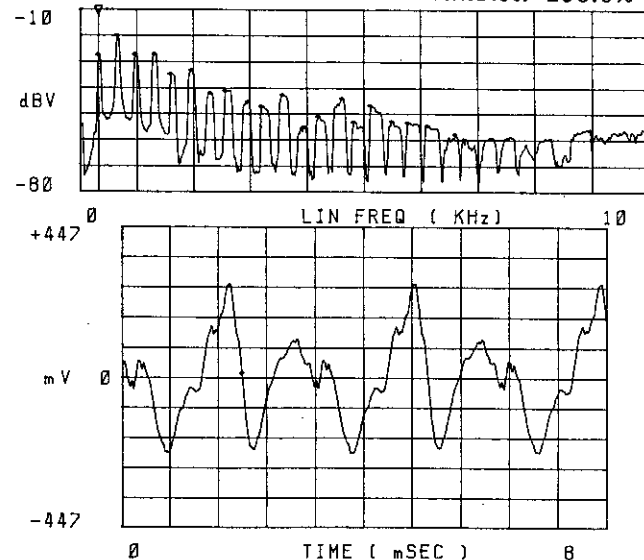


図6 固定飛翔による雌蚊の音響解析

上図：10kHz周波数スペクトル、下図：8msecオシログラム

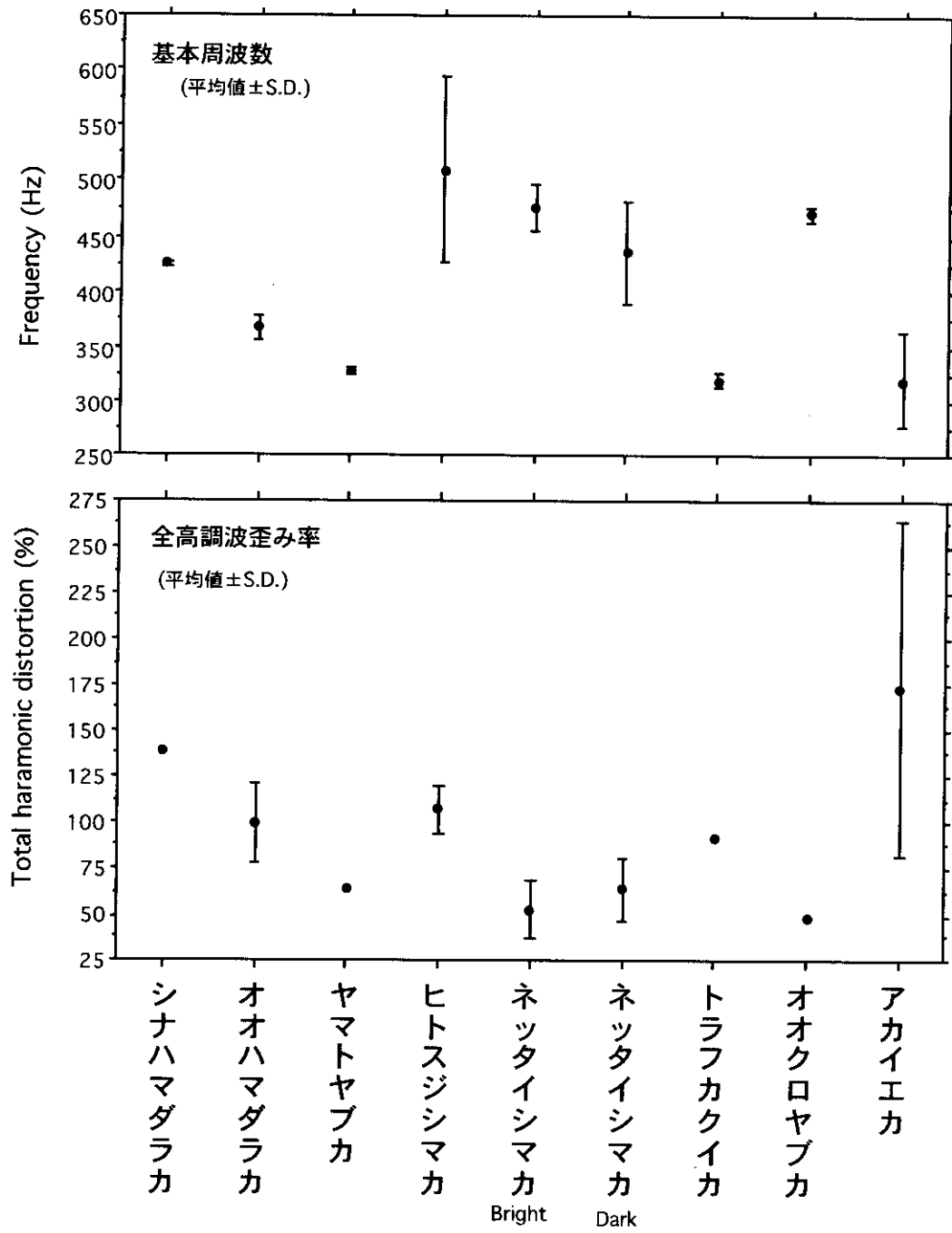


図7 雌蚊固定飛翔音の音響解析

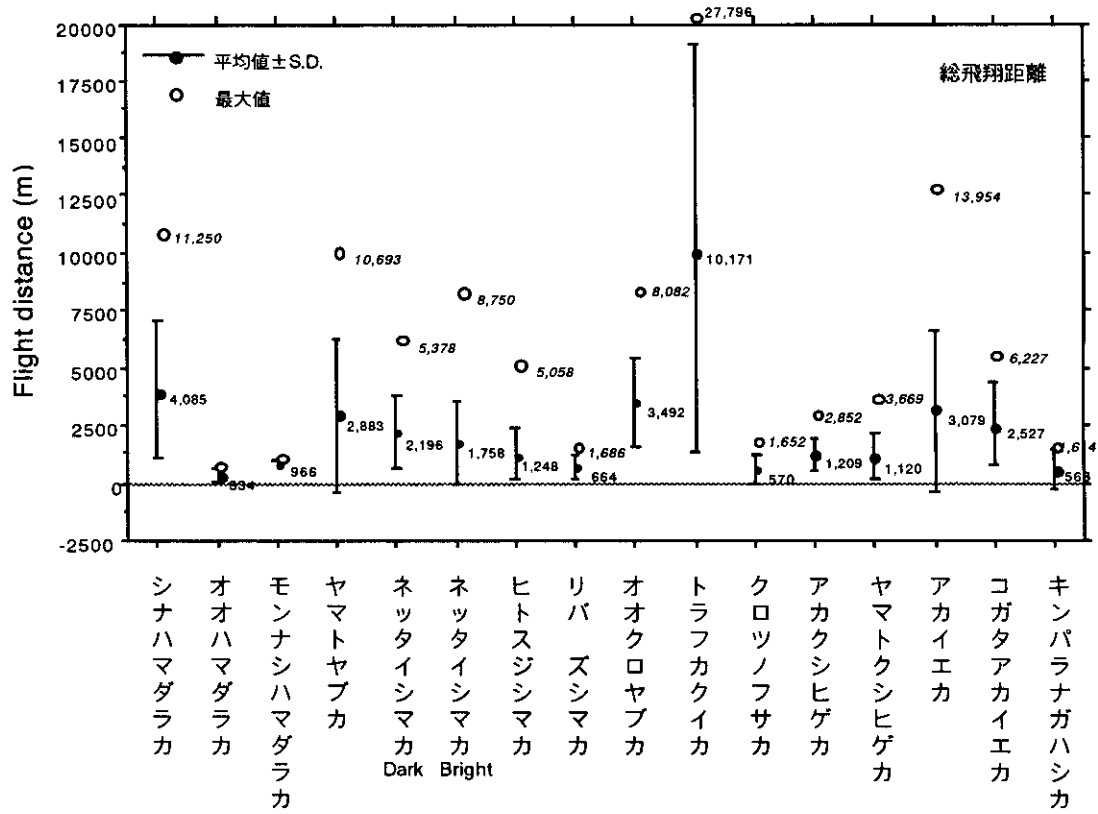


図8 固定飛翔の総飛翔距離

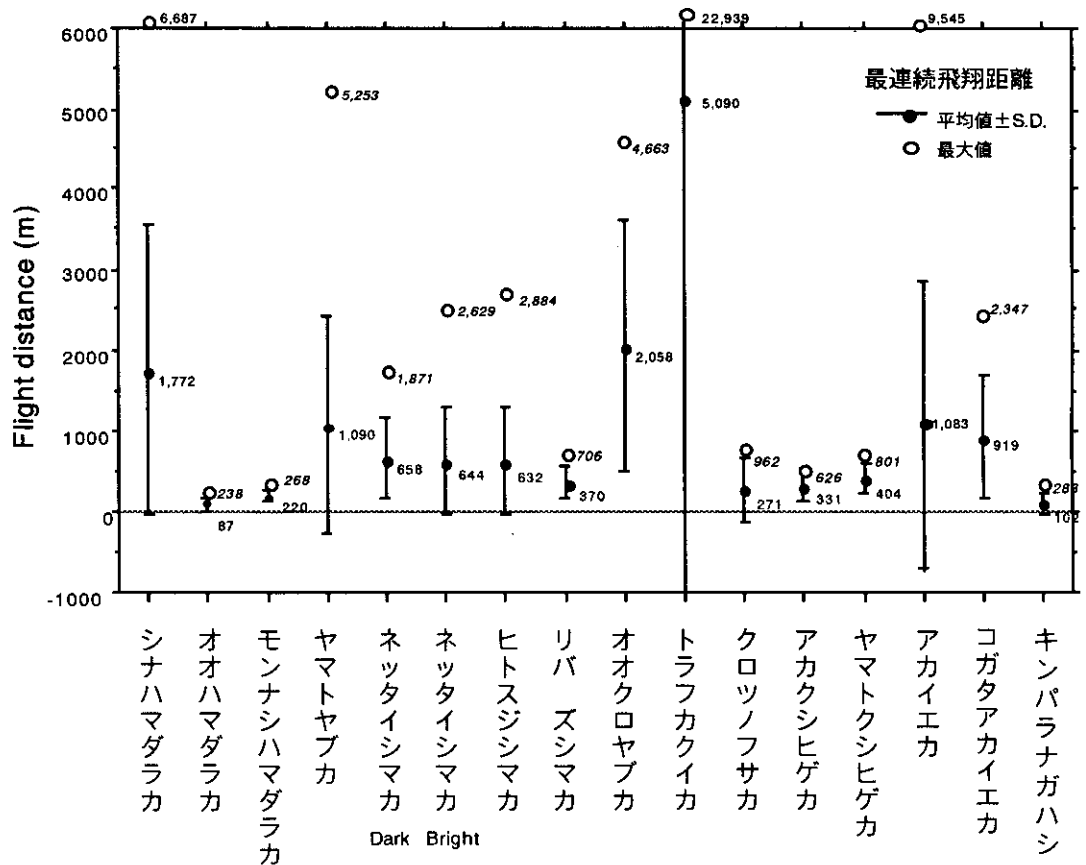


図9 固定飛翔の最連続飛翔距離

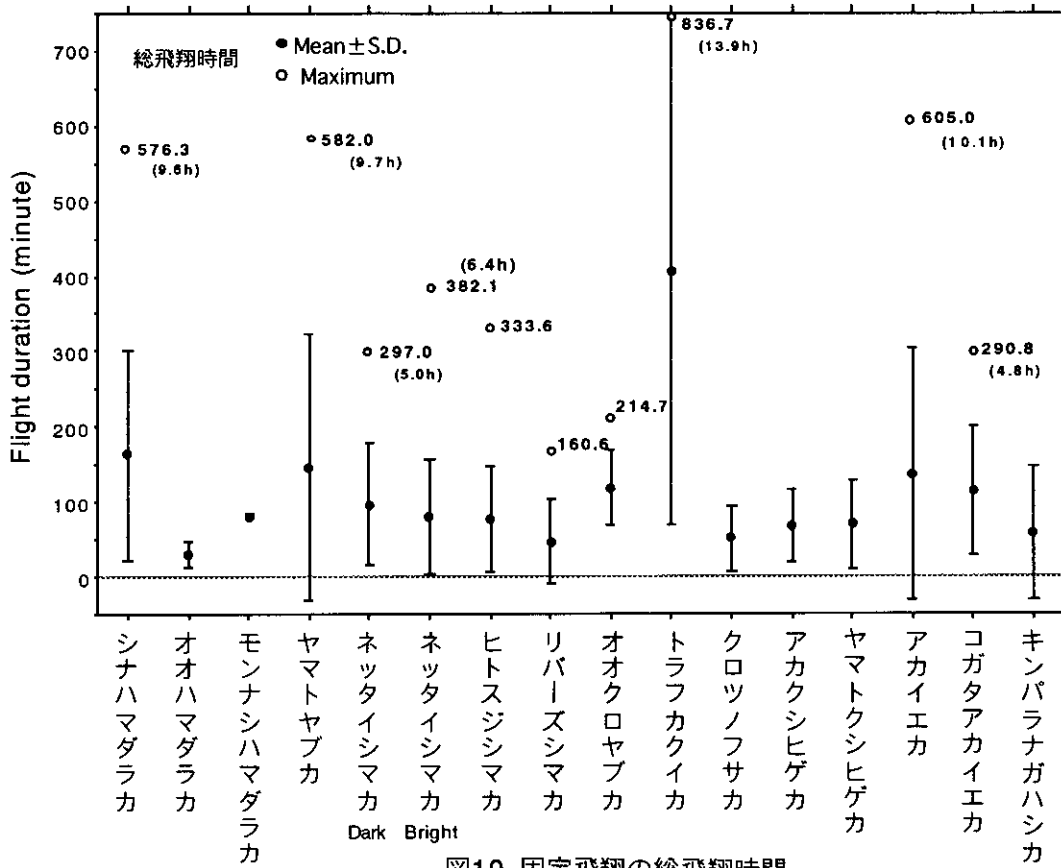


図10 固定飛翔の総飛翔時間

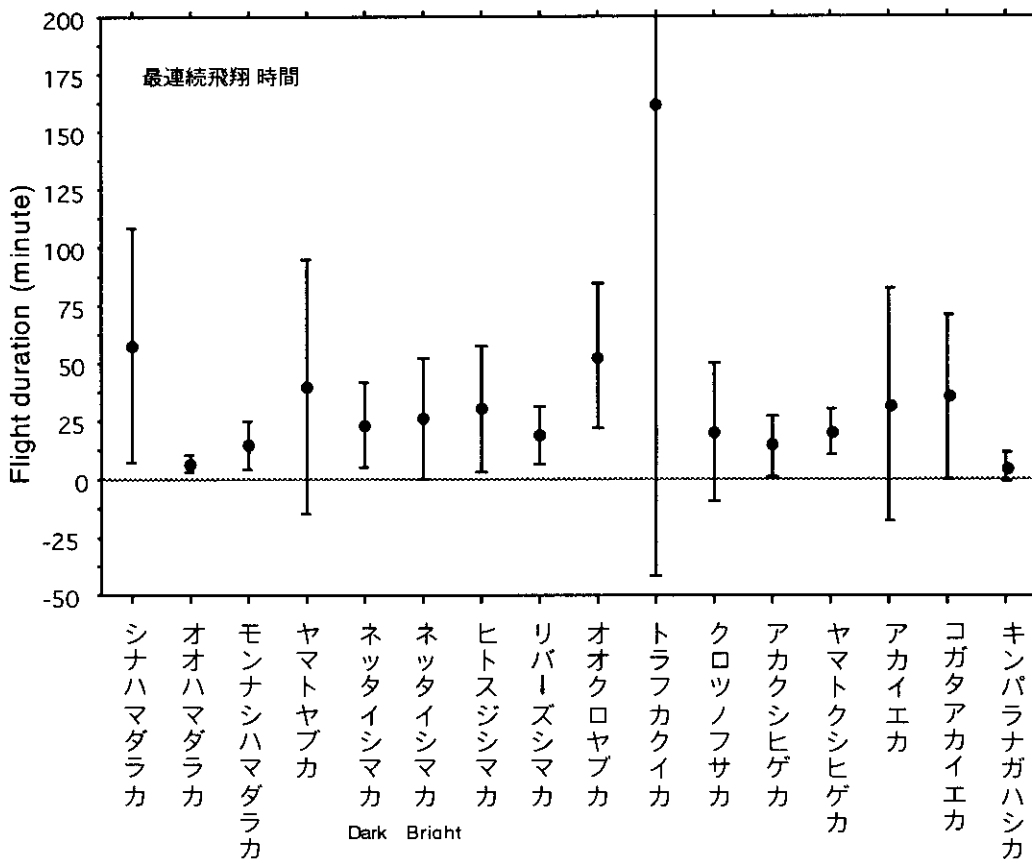


図11 固定飛翔の最長連続飛翔時間

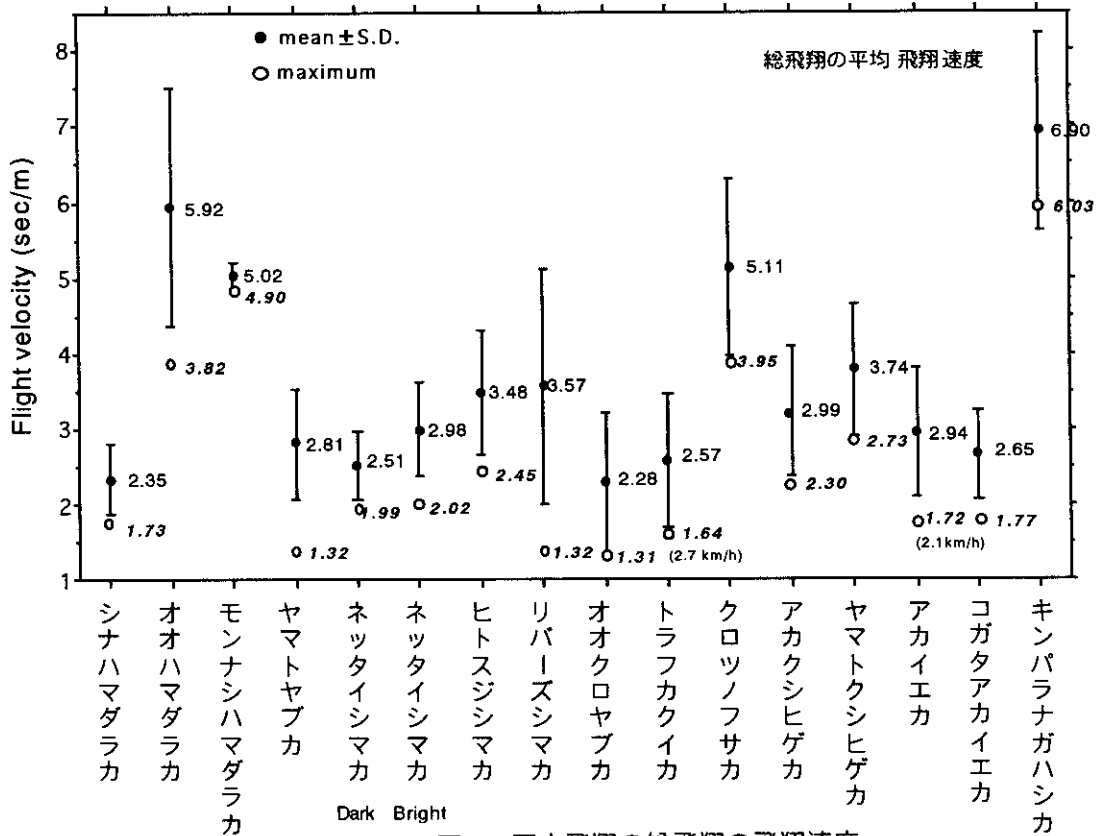


図12 固定飛翔の総飛翔の飛行速度

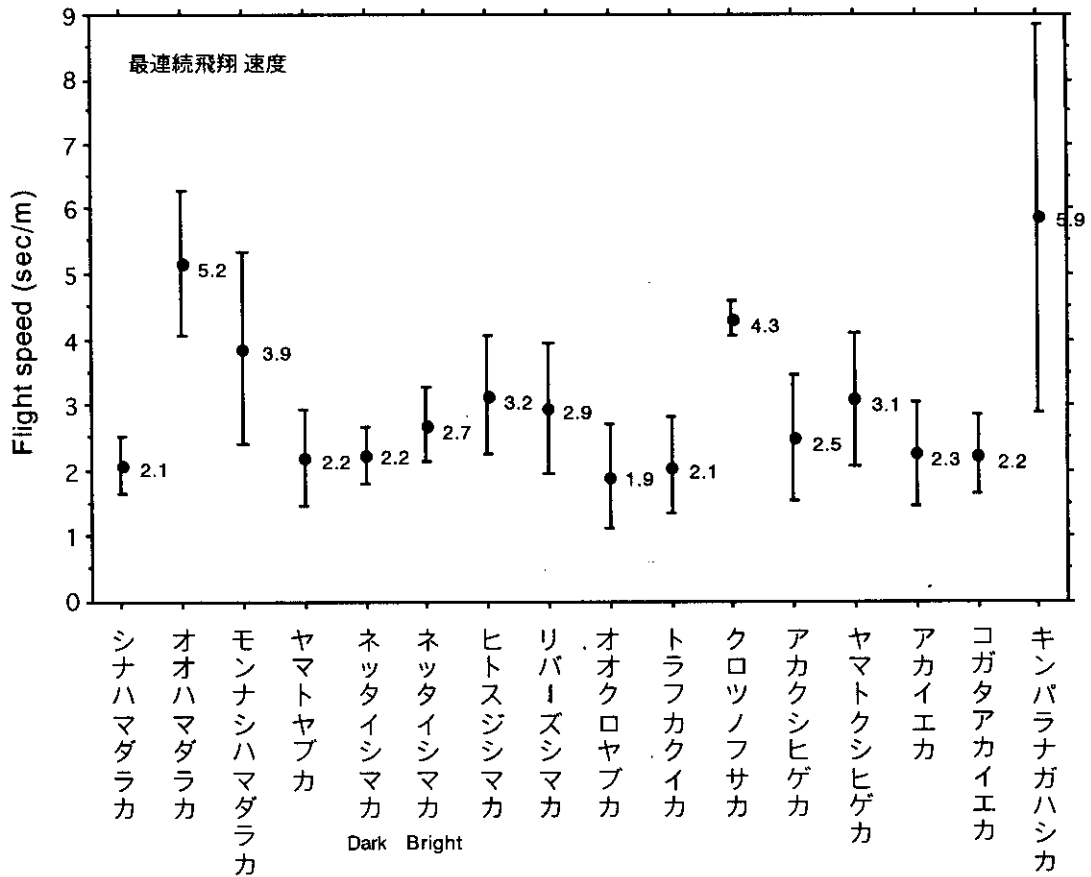


図13 固定飛翔の最長連続飛翔の飛行速度

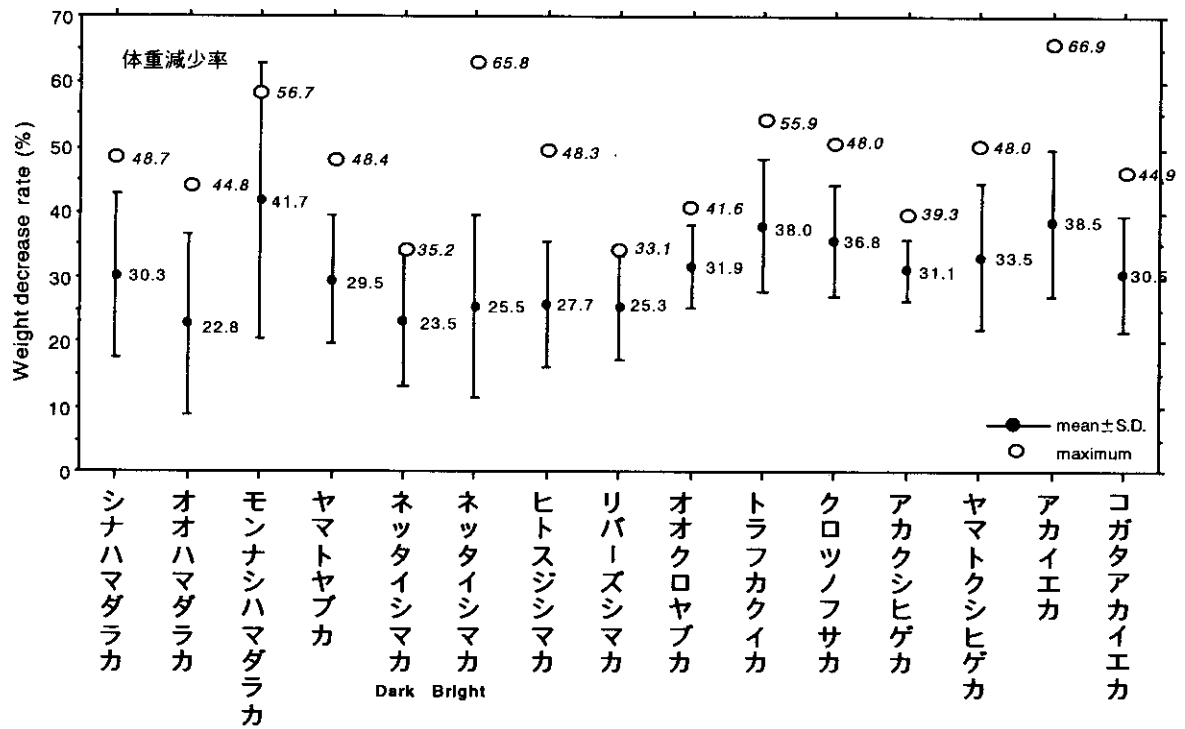


図14 固定飛翔の前・後の体重減少率

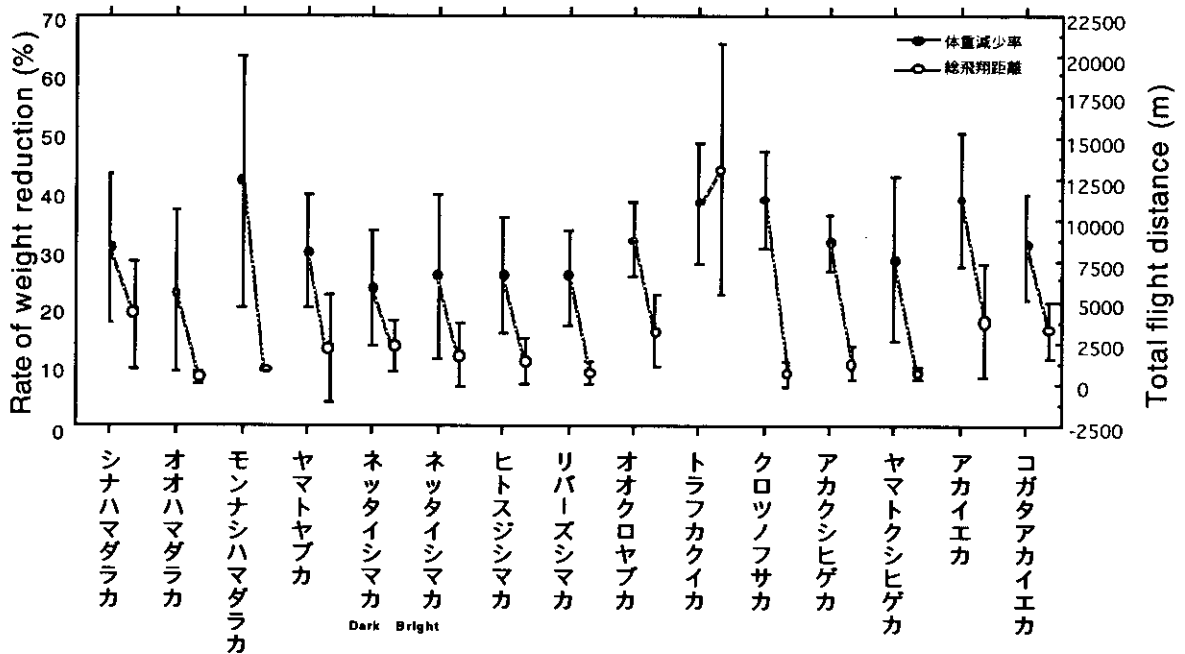


図15 体重減少率と総飛翔距離との関係

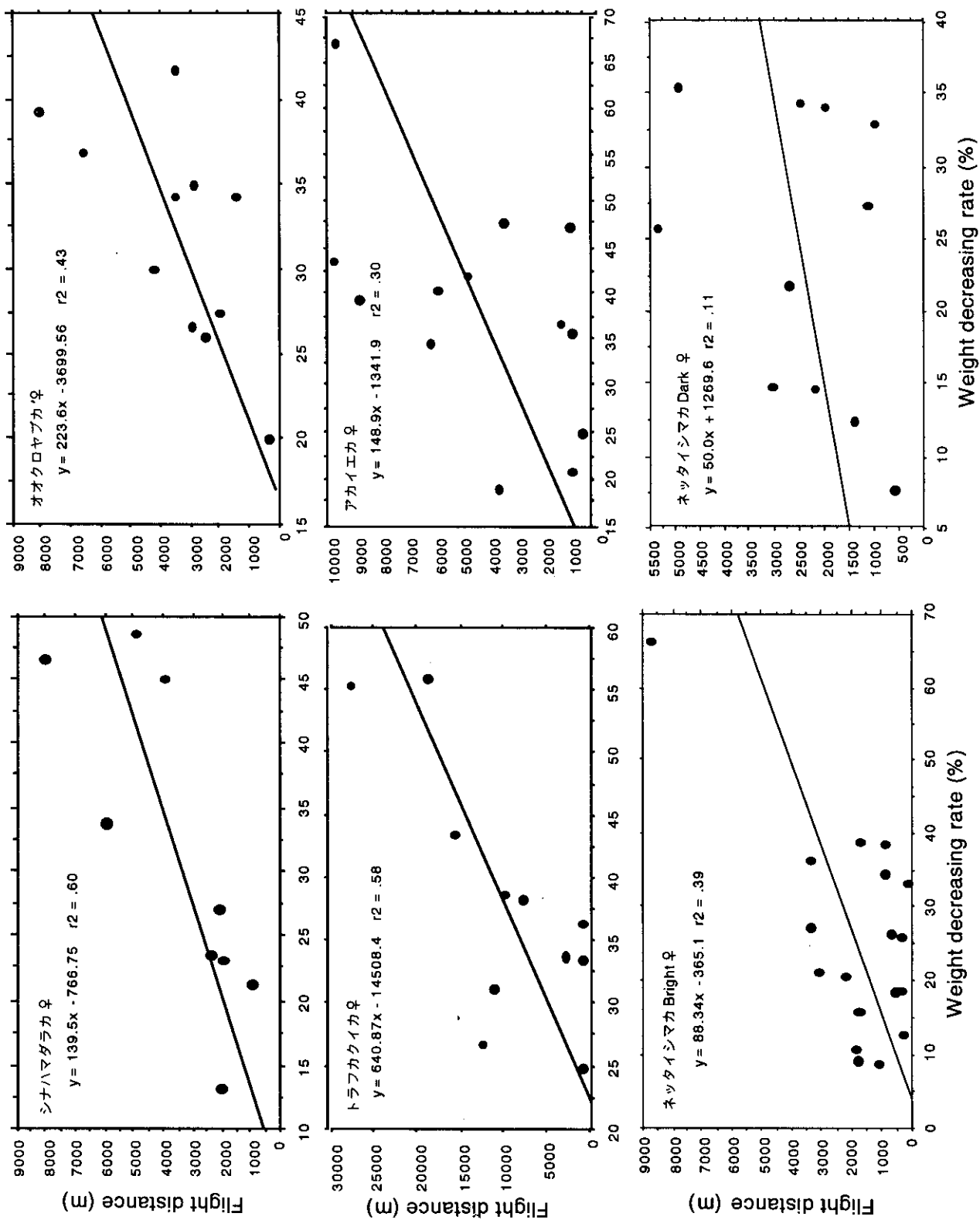


図16 個体ごとの総飛行距離と体重減少率との関係