

天然林抾伐に伴う生立木枯損防止
のためのフェロモンによる誘殺試験

天然林抲伐に伴う生立木枯損防止 のためのフェロモンによる誘殺試験

I 試験担当者

北海道支所昆虫研究室

小泉 力

同上

秋田米治

同上

前藤 薫

同上

尾崎研一

九州支所昆虫研究室

吉田成章

II 要旨

抲伐に伴うヤツバキクイムシによる枯損の防止にフェロモン剤の効果があるかどうかを調査した。3か所の試験区でフェロモントラップの密度を変えて、捕獲経過を追った。試験方法として対照区との比較ができなかったので、気温とヤツバキクイムシの生息数、立木、倒木に対する寄生の動態から捕獲経過を説明するシミュレーションモデルをつくった。このモデルでフェロモン剤によって生息密度を減らさない場合の計算を行い、トラップ設定数により密度がどのように変化するかを調べた。この結果、2haに8個のトラップを設置した場合、予測の枯損本数は設置しない場合の最高1/10程度になるという結果を得た。

III 試験目的

1982年から1984年に行った「風倒地における生立木虫害防止のためのフェロモンによる誘殺試験」³⁾の結果、タイリクヤツバキクイムシの誘引のためにつくられたフェロモン剤 (Ipslure) は日本のヤツバキクイムシに対しても十分誘引することがわかった。しかし、風倒跡地のように周辺に誘引剤の競合相手となる倒木がたくさんある場所にフェロモン剤を設置した場合、倒木に寄生させないほどの誘引力はフェロモン剤ではなく、倒木での繁殖を阻止できなかった。また、穿入繁殖可能な倒木がなくなり、生立木への加害が始まるとともに生立木を加害させないほど密度を落とすこともできなかった。このため、フェロモン剤を有効的に使用できるのは、穿孔対象になる倒木等少なく虫密度も比較的低い抲伐地における枯損の防止の目的では使用できるのではないかと考えられ、今回の試験は抲伐前にフェロモン剤でヤツバキクイムシの密度を減らして、抲伐を行った場合の枯損防止効果について検討した。

風倒木での試験でもそうであったが、この種の試験では同様の条件をもった対照区を複数することはきわめて難しい。このため、効果の判定に無処理区との統計的な比較処理をすることはできない。そのため前回の試験では対照区は設けず、風倒木以外での倒木を除去するといった試験設計で、ヤツバキクイムシの誘引捕獲率を調べその効果を判定した。しかし、もともと枯損木がなく、ある時間に生息しているヤツバキクイムシのほとんどが移入によるとみられるような天然林では風倒木で行ったような全体の密度推定、捕獲率の算出ができないため、今回は過去のデータも援用して個体群動態のシミュレーションモデルをつくり、このモデルによる予測を、林分の捕獲個体数の推移に当てはめ、フェロモン剤による捕獲の効果がどのように全体密度に反映していくかをみるととした。

IV 試験の方法と結果

1. 試験地の概況

試験地は定山渓営林署（現札幌営林署定山渓営林事務所）の部内で3年後に択伐が予測されている3か所に試験地を設け、それぞれをA, B, C試験地とした。

A試験地は空沼実験林1128林班い1小班に1.13haの面積を試験区に設定した。B, C試験地は奥定山渓国有林210林班は小班に0.6ha, 2.04haの面積を試験区に設定した。各試験地の位置を図1, 2に示した。試験地のトラップ配置と立木配置の概略を図3, 4, 5に示した。択伐時の林況を表1に示した。各試験地の1989年の立木、1987年の択伐木、1987と1988年の枯損木を表2に示した。

2. 試験の経過

試験地は1985年4月に設定した。試験は毎年5月雪解けで林道に入れるようになってから、中にフェロモン剤を入れたノルウェー型トラップをA試験地に8個、B試験地に1個、C試験地に5個を設置した。回収は1985年から1988年までは1週間に1回、1989年は10日に1回の割合で行った。気温の観測はA試験地とC試験地のほぼ中央の林内の直射日光の当たらない場所で行った。

フェロモントラップの設置状況を写真1に示した。

毎日の捕獲数は図15～29の中に示した。

択伐はA試験地では1987年6月、B, C試験地では1987年7, 8月に行われた。

捕獲虫の回収、計数のほかに、生態的調査として、マーク再放虫試験を1986年には支所構内で、1987年にはA試験地、C試験地で行った。成虫の生存期間は飼育試験で調べた。いくつかの時期の捕獲成虫の性比の調査を行った。また、1990年6月に誘引成虫の性比に関する生態調査を行った。

択伐後の実際の生立木の枯れはA試験地で1987年に1本、1988年に4本であった（写真

2）。

3. ヤツバキクイムシ成虫動態のシミュレーションモデル

1) シミュレーションモデルの考え方

越冬あけから越冬に入るまでを単位として、日（時間）を追ってヤツバキクイムシ成虫に関係した生態的なできごとを数学的に記述していく方法をとった。これらの生態にいちばん密接に関係する要因は温度であるので1年間の温度の推移を独立変数と考え試験地における実測データを使用した。

2) 気温

空沼A試験地と奥定山渓C試験地で気温データを収集したが、試験の初年度（1985年）は温度計が間に合わなかったので、8月21日以降のデータしかとれなかった。また実際の温度測定は試験地に入ることのできる雪解けの5月下旬から積雪の始まる9月下旬までであった。5月の上旬には最高気温が16°Cを超える日が現われるので、モデルの起算日は5月1日とした。

1985年の8月21日以前と各年の5月1日から測定初日までの間の欠測データは次のようにして補足した。すなわち気象月報のA試験区には札幌、C試験区には喜茂別のデータと各試験地のデータの完全な部分との回帰関係から推定補足した。

成虫の行動、特に飛翔に関係する温度にはしきい値があり、室内実験では20°C以下では飛翔しないことがわかっている²⁾。このため、成虫の生息場所と温度測定場所とが一致する場合にはこの20°Cを飛翔するか否かの判断に使用できるが、そうでない場合は測定気温と実際の飛翔にずれが起きる。今回測定した林内では16°C付近の気温でも誘引された。このため、脱出、飛翔のための最低気温を16°Cとし、日毎の16°C以上になった時間をデータから読み、欠測値部分は、最高気温と平均気温からSINカーブを描くと仮定して次の計算式から求めた。

$$A = (16 - \text{平均気温}) / (\text{最高気温} - \text{平均気温}) : 16°C \text{以上の時間} = \text{ARCCOS}(A) \times (12/\pi) \times 2$$

実測値とこの計算式との回帰では両者は一致せず、計算式の方が過大に出ることから、欠測値を補足したところでは計算式に0.92をかけ修正した値をとった。16°C以上の時間が8時間を越える場合は1日の行動時間帯がおおよそ朝の8時から夕方の4時までなので8時間とした。

3) 捕獲データの処理

トラップにより捕獲した個体は上述した通りおおよそ1週間に1回、一部10日に1回の

割りで回収したので、このデータを捕獲日の16°C以上の時間で割り振った。このため高温が続く夏期には毎日16°C以上の時間が8時間となり、捕獲数も同数となるかたちになっている（図15～29）。

4) サブモデル

シミュレーションモデルを構成するサブモデルの検討を行った。サブモデルのそれぞれのデータは今回の試験と先の技術開発試験「風倒地における生立木虫害防止のためのフェロモンによる誘殺試験」で得たデータのほか、過去の文献に出てくるデータを解析してサブモデルのそれぞれを構成した。ただし、サブモデルはそれ自身完成されたものではなく、データがないものや、予想されることと実験結果が違うことなどもある。これらについてはかなり大胆に仮説をたててサブモデルを構成した。サブモデルとして次のものを組み込んだ。

(1) 羽化・脱出曲線

(2) 脱出した成虫の生存曲線

(3) フェロモンその他の誘引範囲、誘引の強さ

(4) 最大寄生数、フェロモンの有効期間

(5) 移出入

(6) 生立木への穿入の扱い

(7) 誘引個体の性比とフェロモンに対する反応

(8) トランプで捕獲されなかった個体の動態

(9) 再寄生

(10) 卵から羽化・脱出までの期間

(11) 生立木への寄生数と枯れ

(1) 羽化・脱出曲線

調査例は1例だけで、1983年の阿寒における調査のデータ³⁾を使用した。成虫の脱出は気温に左右されているものとし、気温が16°C以上になった時間を羽化時刻とした。97.8%の脱出をみた5月29日の16°C以上の積算時間が約63時間になったので、全数の脱出に必要な延べ時間は少し多めにとって70時間とした（表3）。この脱出過程は越冬あけの個体群のもので越冬によって齊一化しているとみられるが、再寄生や第一世代ではよりばらつくものとみて、データによって個別に大きめの値をとった。

(2) 脱出した成虫の生存曲線

成虫の生存率の調査を行った。最初、特に餌を与えないで飼育した。片方に網を張った飼育ビンにティッシュ紙を入れ軽く水を含ませたその中に成虫23頭を入れた。6月7日朝

に脱出した。この方法では約10日しか生存しないことがわかった。

成虫が10日しか生存しないのは短命すぎると考え、後食を想定しエゾマツの切り枝を入れた網かごの中で飼育を行った。8月8日に前日フェロモントラップで捕獲した個体を使って室内で飼育を始めた。供試頭数は生枝で100頭と10頭であった。飼育した成虫は一部金網上を這っているものもあったが多くは枝の剥皮部に潜った。ただ剥皮部がうすいので孔道は皮の下に完全に隠れず一部破れて表面からもみえた。孔道はら旋状につくられた。ヤツバキクイムシ生存期間は水のみの場合と同様の結果になった。初期死亡が多いのは、フェロモントラップで捕獲したので弱っていたものがいたためと思われる。

1986年も同様の試験を行った。その結果、ティッシュ紙に蜂蜜をあたえて飼育しても寿命は変わらなかった。エゾマツの生枝を与えたものではおおよそ寿命が倍になったが、野外でエゾマツの枝への食害等が観察されないこと、枝に潜ったものはやはり寄生と同様とみられることから野外における生存とはみなさないとした。飼育による生存曲線を図6に示す。

最終的にモデルには4日まで死亡無し、14日後に全部が死亡するという仮定をした。

(3) フェロモンその他の誘引範囲、誘引の強さ

フェロモンはそれがフェロモン剤であろうと倒木あるいは立木に穿入した虫によるものであろうと同じであり、誘引範囲が異なることはないと考えた。過去の誘引剤の試験から誘引トランプから半径10m以内の生立木はヤツバキクイムシの攻撃を受ける可能性があるとされていることから、実際には誘引範囲は最大半径10mの円上で周辺部に行くほど効果が薄いと考えられるが、モデルでは有効範囲内に入れば100%捕獲されるという仮定をした。フェロモンの拡散は立体的なものとするのが妥当であるが、平面的に置き直すことし、対象地域内で1本のフェロモンの出ている木（トランプ）があるとすると誘引範囲にはいる確率は面積比とした。1ha中に1本の誘引体がある時の有効範囲を半径10m程度と仮定し、半径10m内にはいったヤツバキクイムシが確実にトランプされるとすると、確率は

$$(10^2 \times 3.14) / (100 \times 100) = 3.1\%$$

となる。

この仮定を実際の事例で検証してみた。1982年の阿寒における格子状試験地³⁾と1982年5～7月の十字型試験地は試験地外の対象木が除かれていること、対象地域内のヤツバキクイムシの個体数が推定されていること、試験地内は寄生対象木と誘引剤で埋められていることから、誘引された個体はすべて倒木に寄生するか、誘引トランプに捕獲されたことになり、しかも同じ個体が何度も推定される対象になることがない状況下である。このた

め風倒翌年（1982年）のデータからの推定は仮定した状況をよく反映していることになる。1982年度の5～7月はすべて外部からはいってきたものであったが、1982年8月以降は対象地域内で羽化した個体群を対象としているが、その数値に大きな違いはない。外部から入ってきた場合も地域内にもともといた場合でもこの値は変わらないとみられた（表4）。この結果から、モデルではフェロモン剤の誘引距離は6mとした。

立木、倒木の誘引力は次のように仮定した。生立木で寄生されていない場合はフェロモン剤の0.01倍、倒木で寄生されていない場合は0.3倍、寄生されると集合フェロモンが放出されることから寄生1頭につき0.02倍の誘引力が加算されるものと仮定した。

（4）最大寄生数、フェロモンの有効期間

寄生が一定密度になると抗集合フェロモンが放出され新たな寄生がなくなることから一定密度以上になると誘引力は0になるとした。寄生限界密度は阿寒における立木と倒木の調査から求めた³⁾。

図7、8に示した通り立木、倒木にかかわらず1本の木では400/m²までは寄生が増大するがそれ以上にならない。しかし、400/m²以上の寄生も見られるが、この理由は密度が高い場合に、まだ抗集合フェロモンが出ないうちの短時間に集中的に寄生するためであるとみられる。モデルではフェロモンの持続時間を寄生から3日とした⁵⁾が、この期間内に密度が400/m²を超えた場合は誘引力は0にならないとした。穿入限界密度はバイオニアである雄のみに適用し、雌は雄の2倍が穿入した場合を限度とした。従って、雄で誘引されて食痕に入れない個体は死亡するものとした。ただし、今回のシミュレーションではこの密度を大幅に超えることはなかった。

集合フェロモンは雄が寄生・穿入した後発散され始めるが、いつの時点で終わるのかは不明である。穿入から産卵開始までの期間がおよそ3日であることから⁴⁾、有効期間は3日とした。倒木では寄生は100%成功するが、生立木の場合エゾマツが健全なうちは穿入しても樹脂にまかれて死亡する。穿入から樹脂にまかれて死亡するまでの時間を調査した例はないが、阿寒での観察から1日と考えた。

（5）移出入

今回の試験地は閉鎖系ではないことから、移出入を考えなければならない。また、試験地内だけで系が成り立つとすれば繁殖場所がなければならぬが、現実に試験地に繁殖できる場所は伐採時とその後の立木の枯れ以外にはなかった。そこで、今回のモデルでは、特定の地域への移出入を考えるのではなく、通過していく成虫が立木、倒木に寄生し、またトラップに捕獲されるという概念で構成した。再寄生の経過、第一世代の発生経過を知る必要があることから、実際の試験地内に倒木がない場合も、ダミーとして倒木を1本用意し、それに寄生したとした。

（6）生立木への穿入の扱い

実際の林分では倒木の周辺で枯れが集中的に起こるといったことがみられることから空間的な配置が考慮されたモデルを組めればより現実的であるが、今回は空間的な組み立てはしなかった。その理由は立木配置の違いによる寄生のされ方の違いのデータがないことと現在のパーソナルコンピューターでは空間配置を要素に入れる計算時間が膨大になるためであり、また、移出入の項で述べたように今回のモデルでは特定の場所での予測というより、ある地域の平均的な林分が試験地であると考えたことによる。実際には天然林では樹幹の上部から徐々に寄生され枯れてくるという現象が観察されるが、モデルでは立木はすべて同じ条件で寄生されるとし、特に直径・林齢で寄生され易さの差異をつけないことにした。すなわち、立木寄生は枯死確立計算とし、すべての木を同じ計算にし、誘引係数も木の大きさ別などの扱いはしなかった。

（7）誘引個体の性比とフェロモンに対する反応

前回の風倒地でも今回もフェロモン剤で誘引された個体は雌の方が圧倒的に多かった（表5、6）。この原因をいくつかの方法で生態的に追求した。単純に、雄がバイオニアとして穿入場所を捜すことから、雄の死亡率が高いといった考え方では、時期別に雄の割合を調べた結果から、否定される。すなわち、野外の個体群で雌雄の構成が変化していく、誘引は雌雄で同じであるとする、時間が経つにつれて雄の割合が50%からじょじょに下がるといったデータにならなければならない。しかし、現実はそのようになっていない。

a. 閉鎖空間での誘引率と誘引経過の調査：野外でフェロモン剤の入ったトラップを入れた40×80×350cm（図9）の真鍮の網かごを地上1.5mの位置に宙に浮して設置した。この中にフェロモントラップで採集したヤツバキクイムシを入れ、定期的にトラップに誘引された虫を数えた。最初の2回は100頭中24頭、60頭中4頭が再度捕獲された。その後くり返し数回同様の試験を行ったところまったく誘引されなかった。100頭中24頭が捕獲された場合についての捕獲経過を図10に、網かご内での虫の位置を時間的に追ったものを図11に示した。

24頭の個体は網かごに入れた直後からおよそ2時間の間に誘引されただけであった。その後残りの76頭はまったく誘引されず、網かごのなかでも移動していなかった。誘引されなかった虫の実験のなかで、室内でいったんフェロモントラップで採集した21頭の個体だけを入れるという実験を行ったが、網かごではまったく誘引されなかった。

この結果からフェロモン剤でいったん誘引された個体は再び誘引されないことが明らかになり、いったんフェロモンにあたると虫の状態が変化すると考えられる。24頭と4頭は最初のフェロモン剤にあたる時間が短かったため再び誘引されたものとみられるこのことから、フェロモンに反応する時間も限られており、一定時間以上フェロモンに曝されるとそれ以上反応しないと考えるとこの現象が説明される。

このとき使用した個体の雌雄は調査しなかったが、フェロモンで捕獲されたものであるので、雌が大部分と見られる。雌雄でフェロモンに対する反応時間が異なるれば捕獲率の違いが説明されることになる。これを直接証明する実験はかなり難しいので、傍証となる3つの実験を行った。

b. 飛来後すぐに捕獲されない個体の雌雄：ノルウェー型（写真1）のトラップでの観察では、フェロモンに誘引された個体は飛来した後すぐにトラップに入るのではなく、トラップの外壁にとまるか、もしくは外壁に当たった後下に落ちてまた飛翔し、トラップにとりつく行動をする。もし雌雄の反応時間が異なり、トラップへの侵入に時間がかかり反応時間内に入れないと、トラップに捕獲された個体の雌雄の性比が1:1にならないとすれば、トラップ本体に飛来して、一度で入れなかった個体の性比を調査すれば雌雄の比は1:1に近いはずである。このことを調べるためにトラップの下に水を入れたバケツを置いた。結果は表7の通りで、性比はトラップで捕獲された個体よりバケツの中の方が雄の数が多くなっているが、1:1にはならなかった。この結果から、雄は誘引範囲内にはいるとすぐにランディングしフェロモン濃度勾配にしたがって濃い方にくるといった行動をする個体は少ないのでないかと判断された。

c. トラップから離れた位置での捕獲虫の性比：上記のことを確かめるため、トラップから0m, 1m, 3m, 6m離れた位置にマツノマダラカミキリ捕獲用の約40cm×60cmの板上に粘着液が塗られたトラップを置いて、誘引中心にたどりつく前にランディングする個体を捕獲し、性比を調査した。しかし、表8に示した通り、捕獲個体数が少なく、確実な結論は得られなかった。ただ、まっすぐトラップ中心に行かずに近傍でランディングしている個体があることは確かめられた。

d. トラップの取付地上高を変えた場合の性比：もしトラップの捕獲効率が悪く、いったん入り損ねた個体が地上に落ち、数回のとりつきで初めて捕獲されるとするとトラップの高さによって捕獲効率、性比が変わるものと判断される。そのため従来からの設置高さは0.5mであるが、トラップの下部の捕獲個体をためる部分の上部の位置を地上0m, 0.5m, 1.5m, 3.0mになるように高さを変えて設置した。捕獲数は設置場所によって異なるので、従来の設置による捕獲数との比較をしてみると、表9, 10に示すように、高さを変えても0.5mの位置での捕獲率と大きく変わらないが、性比は、0mで高くなり、0.5m以上ではほとんど同じであった。これから少なくとも雄は飛翔によって誘引中心部に近づいていないことがわかる。誘引範囲内に入った個体は最初のとりつきで10%程度捕獲され、雌ではその後数回のとりつきで捕獲数が増えるが、雄では再度とりつきを試みる割合は3~5%程度であるとすると、この結果が説明される。

以上のことから、捕獲される雌雄の誘引率の違いは雌雄の誘引に反応する持続時間の違いと考えた。個体は誘引範囲内にはいると濃度の濃い方に移動するという反応をするが、一定時間を過ぎると、それ以降は誘引物質には反応せず、次の行為例えれば雄であれば樹幹

に穿入孔をつくる行動に移る。一連の寄生行動の雌雄による違いによって反応の違いがでるとみられる。

原種タイリクヤツバキクイムシの場合も雄の捕獲比率が低いが、その程度はヤツバキクイムシほどではなく、今回使用したものと同型の1979年型トラップで捕獲した場合19~23%という報告がある¹⁾。ヤツバキクイムシの場合、風倒地の調査を含めても雄の割合が18%を超える例はなかった。数字的にはタイリクヤツバキクイムシとヤツバキクイムシの間で違いが認められるが、生態的な反応の違いだとすればトラップの設置環境にも左右されることから、現在のところタイリクヤツバキクイムシとヤツバキクイムシの間にフェロモンに対する反応に決定的に違いがあると断定することはできない。

生態的には次のように説明される。このフェロモンは集合フェロモンで、雄が寄主に穿入した後に発散する。すなわち、自然状態ではこのフェロモンを探知できた他の雄は寄主に定位したのであるから、特に長い時間寄主であるエゾマツ類を捜す必要はない。これに對して雌は雄と同時に誘引されても雄が交尾孔を掘り終わるまでは入れないし、すでに交尾孔が完成していても、先着雌が2頭入りていれば追い出されることがあり、別の誘引物質を出している穿入孔を探索しなければならない。このことから実際の穿入までにかなり時間を要し、雄よりも長い時間誘引物質に反応する必要がある。

以上の結果から、このモデルでは誘引されてから100%捕獲されるのに必要な時間は2時間、雄が誘引に反応する時間は20分、雌が誘引に反応する時間は2時間とした。

(8) トラップで捕獲されなかった個体の動態

倒木や立木で誘引反応持続時間内に穿入場所を見つけられない場合、トラップに捕獲されなかった個体が、その後どうなるかという点は重要である。誘引反応がなくなれば、誘引範囲外に出るのは難しくない。誘引物質に曝されなくなった後、フェロモンに反応するかどうかを調べる実験はできなかった。しかし、上述の網かご内誘引試験に用いた個体に、フェロモンに反応しない個体がいたことから、誘引反応持続時間を超えた個体はフェロモンに曝されない場所においても二度と戻らないと考えるのが妥当のようである（反応した個体は誘引持続時間を超える前にフェロモンから隔離された）。

また、トラップで雌が圧倒的に多く捕獲されれば、この影響（雄の比率が上がる）が時間の経過とともに現われるはずだが、雄の比率が高くなるといったことを検出することはできなかった。この原因として捕獲率が低い場合が考えられるが、風倒地の試験では50%以上の捕獲率が推定された場合も雄の捕獲率は上がっておらず、誘引された雄は二度とフェロモンに反応しないとするのが妥当である。

モデルではフェロモン剤の誘引範囲に入ったが、捕獲されなかった個体は死亡するものとした。

(9)再寄生

越冬あけ成虫は寄生木に穿入した後、母孔の両壁に卵を産み、母孔はだんだん長くなるが、一定長さ以上の母孔の形成はせず、母孔の長さが6cm程度になるとその母孔を出て新しい寄生場所を見つけて再度寄生する。この再寄生の現象は母孔の長さが一定以上になつた、内樹皮の状態が産卵に適さなくなった、あるいは既定産卵数に達したといったことが考えられるがはっきりしないので、過去のデータから現象的に判断することとした。産卵速度と温度との関係を調べたデータはない。産卵には物理的に穴をあけるという作業が必要なことから、産卵速度の温度に依存している部分はあまり大きくないと考え、一定以上の温度では母孔を作る速度が同じであるという仮定をたて、一定温度以上の時間の積算の考え方をとることとした。産卵をしなくなる温度はまったく不明で根拠はないが、モデルの計算の結果と比較的合致しやすい数値を選んで7°Cとした。

使用したデータは山口⁵⁾で最高気温が図の形で示されていたのでこれから数値に読み直した。最高気温と平均気温の関係は喜茂別の1986年の5~6月から求め、この回帰関係から平均気温を推定した。

この結果、寄生の始まった5月21日から母孔が完成し脱出の条件に達した6月10日までの積算時間は約380時間となった(表11)。この報告では再寄生開始前の数日が温度が低く脱出飛翔が遅れたと判断されていることから実際の脱出時期は採用しなかった。

(10)穿入から羽化・脱出までの期間

幼虫期間の積算温度は調べられたことはないので、山口・小泉⁴⁾のデータから推定した(表12)。卵、幼虫の発育0点は一般的な昆虫の例から10°Cとした。ここではそれぞれのステージの発育について記述しないが穿入から羽化までの積算温度を431日度とし、成虫の後食期間をこの時期の10日、約130日度と考え、卵から脱出までの積算温度を560日度とした。

(11)生立木への寄生数と枯れ

モデルのキーポイントとなる寄生と枯れの関係は今までのデータでははっきりしていないので、阿寒での1983、1984年の調査結果を解析した³⁾。風倒の2年後と3年後に風倒地で増殖したヤツバキクイムシが周辺の生立木を加害する時に、風倒地に接した残存林分で約280本の生立木のおおよそ地上高2m位置の樹幹表面に20cm×50cm調査区を設け、定期的に寄生数を調査した。調査本数は途中で新たな倒木や折損木が発生したため徐々に当初より少なくなった。

このデータから穿入密度と枯損木との割合の関係は図12のようになった。寄生されても枯れなかったもののデータが少ないとから、なめらかではないが、寄生密度が低くても枯損が発生しており、穿入密度が400/m²になると全部枯損するという関係になった。なお、

調査部位に寄生がないものでも枯れたものがあった。これは、寄生密度0として図の中にいた。これには調査部位外での寄生によって枯れたものとヤツバキクイムシの寄生以外の原因で枯れたものとが含まれる。

枯れが部分的に寄生の集中したところに影響されるとすれば、0.1m²の範囲1か所と調査部位が限られた今回のデータでは、過大評価されている(密度に対する枯れなかった割合が多く見積られているため)ことになる。また、枯損時期が不明なことから、枯損後の寄生もデータに入っている可能性があり、これからも多少過大評価されている可能性がある。しかし、データとしてはこれ以外にないので、この結果を使用する。

天然林では過熟木から枯れるといわれていることから、樹齢あるいは直徑と枯損との関係があるかもしれないが、今回のデータでは明確な傾向は出なかった(図13)ので、樹齢と直徑による区別はしなかった。

モデルでは寄生がなければ枯れは0、m²あたり1頭の寄生の増加で枯死の確率が0.0025上り、400/m²の寄生を受ければ全立木が枯死するとした。

5) シミュレーションモデルの組み立て

以上のサブモデルを組み合わせてコンピュータープログラムをコーディングした。使用言語はBASICで日本語を変数に使用できるものを使った。

プログラムのフローチャートは図14に示した。脱出過程、野外成虫の死亡・生存の計算、立木に対する寄生、倒木に対する寄生、フェロモンによる捕獲といった主要サブルーチン群は世代毎に越冬あけ成虫、再寄生成虫、第一世代成虫のそれぞれで使用されるが、プログラム自体はミスコードを避けるため、3つに分けた。すなわち、越冬あけの成虫、再寄生成虫、第一世代の成虫と別々にプログラムを用意し順次計算した。

各群の初期生息数は閉鎖系を仮定している場合には、途中の死亡を計算して世代毎に生息数を引き継げばよいが、今回のように移出入を前提にした試験地で、その地域の平均的なサンプルに過ぎないという状況ではそのようなことができない。そこで、初期生息数を最初に仮定し、計算の結果から、より捕獲過程を説明できる初期生息数になるように、数回繰り返し計算を行った。世代間の重なりがある場合世代間の重なりの部分での最適値を見つけることが難しかった。そこで重なりの少ない部分で計算値と実際値が最小になるようにした。また、どうしても現在のモデルではあてはまらないばらつきもみられ、計算値と実際の捕獲数との間に10%程度の誤差がみられた。しかし、これは現状の計算方法ではかなりの時間を費やさねばならないし、その程度の誤差で全体の結論が大幅にかわることはないので、誤差を5%以内にするといった作業はしなかった。

最初に越冬あけの成虫の初期生息数を設定し日毎に脱出できる温度の判断、脱出倒数の計算、すでに脱出した成虫の生存数の計算、立木寄生数、倒木寄生数、フェロモントラップによる捕獲数を計算し、立木に寄生した数とトラップに捕獲された数を野外の生存成虫

数から除くという計算過程をとった。このとき倒木寄生のダミーデータをつくった。ただし、1987年は実際に伐木がでたのでこれに対する寄生過程を利用した。このダミーの倒木寄生過程から、再寄生成虫の脱出過程と第一世代成虫羽化・脱出過程を計算した。再寄生成虫では初期生息数を仮定して、越冬あけ倒木寄生のダミーデータから寄生日毎の再寄生成虫数の計算を行い、再寄生の脱出源と仮定した。計算は寄生の最初から行い、再寄生成虫の脱出の必要な時間（7°C以上の1日の時間）の積算を行った。越冬あけ成虫の場合と同様の計算を行い、越冬あけ成虫と同様に倒木に対する寄生のダミーデータをつくった。第一世代成虫の計算では越冬あけ成虫の倒木寄生と再寄生の倒木寄生のダミーデータを使って、仮定した初期生息数を寄生日毎に割り振って第一世代の脱出源とした。再寄生と同様に寄生初日から日齢計算・穿入から成虫になるまでに必要な積算温度（平均気温が10°C以上の積算温度）を計算し脱出が始まった後は、越冬あけ成虫と同様の計算を行った。

6) 結果

毎日の16°C以上の最高気温と捕獲成虫を各日に割り振ったものと計算結果を年毎、試験地毎に図15から29に示した。試験地、年度毎にサブモデルで検討した規定値を調節することによって近似を得た。この手続きを終わった後、計算上フェロモンで捕獲しない場合について検討した。すなわち既定値と越冬あけの初期値と同じにして、同様の計算を行い立木寄生の増加とそれに伴う立木の枯損確率をみた。それぞれの試験地は立木配置の調査の都合から面積が異なっているため、集計に当たっては、初期生息数、立木本数を便宜的にいちばん広いC試験地の広さ（2.03ha）に換算した。図30から32に世代毎の初期生息数動向とフェロモンで捕獲した場合としなかった場合の予測の立木枯損本数を示した。何度も述べたように隔離された閉鎖系の中の試験でないことから、第一世代成虫よりも次の年の越冬あけ成虫の密度の方が高い事例が多くみられた。越冬時のモデル化をするためには移入の問題を解決しなければならず、現状ではこれに対するデータがまったくないことから、フェロモンで捕獲しない場合の仮定は1年のみで次の年までは引き継がないこととし、毎年の越冬あけ成虫はフェロモンで捕獲した場合と同じとして計算している。以上の結果、A試験地ではフェロモンを設置した場合としない場合の差が大きく、フェロモンを設置した場合には予測枯損本数が1/10程度になっている。これに対しB、C試験地ではフェロモントラップの数が5個と1個と異なっているにもかかわらず、フェロモントラップの効果が認められていない。

7) 考察

予測枯損本数ではA試験地とB、C試験地との間にかなりの差がみられた。この原因は両試験地の環境によるものとみられる。試験地の位置図でわかるように、A試験地は保残区の中にあることからエゾマツ林全体が孤立した形になっており、試験区画への移出入が

比較的少ないのでに対して、B、C試験地は一帯がエゾマツ天然林の中に設置されていることから、移出入が激しく、多少の捕獲も移入個体によって打ち消されているものとみられる。

以上のことから場所によっては、このフェロモン剤を伐木以前に使用し、ヤツバキクイムシを捕殺することによって、枯損本数を減らすことができる事がわかった。林分全体が狭ければ局地的にフェロモンを設置してもその効果が望めるが、林分全体が広い場合には局地的に使用しても周辺部分の枯損の改善も期待できないということになる。

基準として林分の大きさがどの程度であれば枯損の改善が望めるのかという点に関して今回の試験だけでは結論を出せないが、1つのアプローチとして成虫の行動範囲から考えてみた。

すなわち成虫の飛翔距離はその測定方法が難しく、フェロモンによる捕獲では飛翔途中で誘引捕獲されるため過小評価されるが、一つの目安として、阿寒での調査と今回のマークリリースの結果を掲げる。

1日の飛散距離は雌雄で異ならないと考えた。阿寒のデータ1982、1983年は風倒木の影響があることから、採用せず、1984年6月と1985年6月の格子状試験地の放虫実験³⁾から推定した。この実験はマークリリース法で放虫した虫が風倒木の林縁に置いたトラップに再捕獲される率をみたもので、放虫点からトラップまでの距離と再捕獲率との関係を図33に示す。放虫後回収までの経過時間は約3時間である。これから単純に距離の平均値をとると約140mとなった。確率は近距離でわずかに高くなつた。上述した通りフェロモンで採集したものの中には、反応しないものがあることから再捕獲率は過小評価されている可能性が大きく正確ではない。

1987年の支所構内の実験では、中心に放虫点を設け東西南北500mの地点にフェロモントラップを置いて、試験地のフェロモンで捕獲した個体をマークして放した。放虫は1987年6月24～7月31日に5回行った。表13に結果を示す。500mの距離ではおおよそ8時間以内に捕獲される個体が多いが、1日後（32時間前後）まで捕獲されることが認められた。

1987年C試験地で行った実験では、最短距離のトラップが200mと50mになる位置で放虫した。結果は表14に示す。50mの位置では3時間後に再捕獲されているが、200mになると24時間（夜間を考えないと8時間程度）以上を経過して再捕獲されている。

以上のマークリリースの結果から正確ではないが1日8時間の飛翔時間があるとすれば300～500m移動すると考えてよいのでないだろうか。そうすれば、円形の80ha程度の面積が1日のヤツバキクイムシ成虫の行動範囲となり、今後フェロモンを設置する対象面積の1つの目安となるであろう。単純に80haの孤立した林分でA試験地と同様の効果を得るには、約320個のフェロモントラップを設置する必要がある。

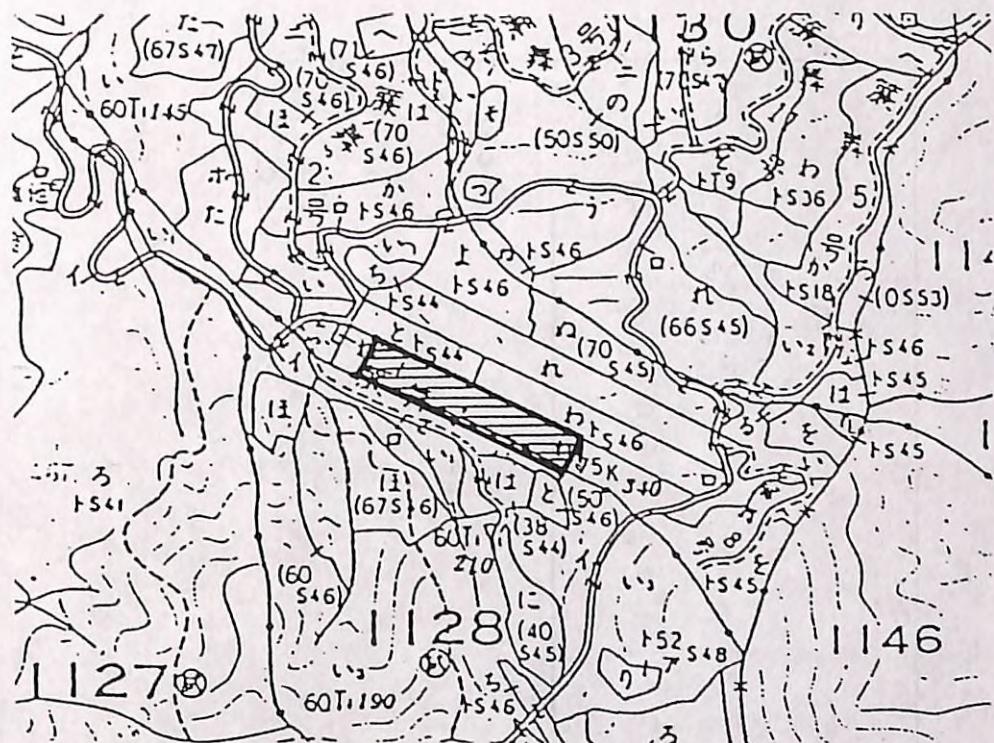
Ⅴ まとめ

モデルについてはかなりよく近似できた年、試験地があったが一部ではどうしても当てはまらない場所も出てきた。その原因はデータのばらつきによるとみられるものもあるが、モデルを改良しより複雑化することによって、解決できる部分もあると考えられる。サブモデルで検討した規定値のうちのいくつかに50%以上の変更しなければならない例がてきた。その一つが越冬あけ成虫の穿入から再寄生のための脱出までの積算時間である。再寄生の起こる原因が不明のため今のところ年毎に対応する以外にないが今後より完成度の高いモデルにするには生態的な捕捉的調査が必要である。

雌雄の捕獲率の違いは解析を始めるまでどうしても不可解な点であった。しかし、今回のモデルの作成の過程で確かではないまでも説明のつくところまでこぎつけた。もし、雄がフェロモンに一定時間曝されればその後フェロモンに反応しないとすれば、注意事項(生立木の近くにフェロモン剤を置かない)を守りさえすれば、必ずしも誘引個体を捕殺する必要はなく、フェロモン剤だけを配置するだけで、トラップ設置と同様の効果を得られることも考えられる。この点については早急に解決する必要がある。

引用文献

- (1) Bakke, A. et al.: Mass trapping of the spruce bark beetle *Ips typographus*. Pheromone and trap technology. *Meddelelser fra Norsk institutt for skogforsk* 38(3), 1 ~ 35 (1983)
- (2) 福山研二・吉田成章: ヤツバキクイムシの飛しょうと温度と関係, 日林学会北海道講集, 31, 146~148 (1983. 3)
- (3) 小林富士雄ほか: 風倒地における生立木虫害防止のためのフェロモンによる誘殺試験, 昭和59年度国有林野事業特別会計技術開発試験成績書, 179~209 (1986)
- (4) 山口博昭・小泉 力: ヤツバキクイ (*Ips typographus* L. f. *japonicus* NIIZIMA) の繁殖, 行動, 分散に関する研究 I - 寄生密度と繁殖との関係 -, 林試北海道年報, 39~47 (1959. 3)
- (5) 山口博昭: ヤツバキクイ (*Ips typographus* L. f. *japonicus* NIIZIMA) の繁殖, 行動, 分散に関する研究 II - 再寄生について -, 林試北海道年報, 147~153 (1959. 7)



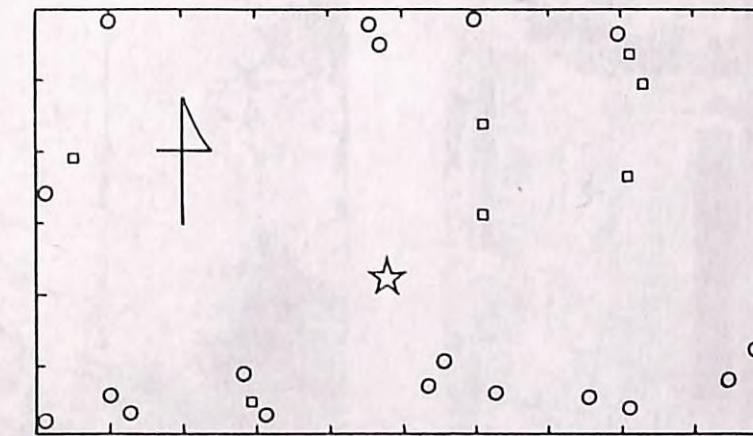
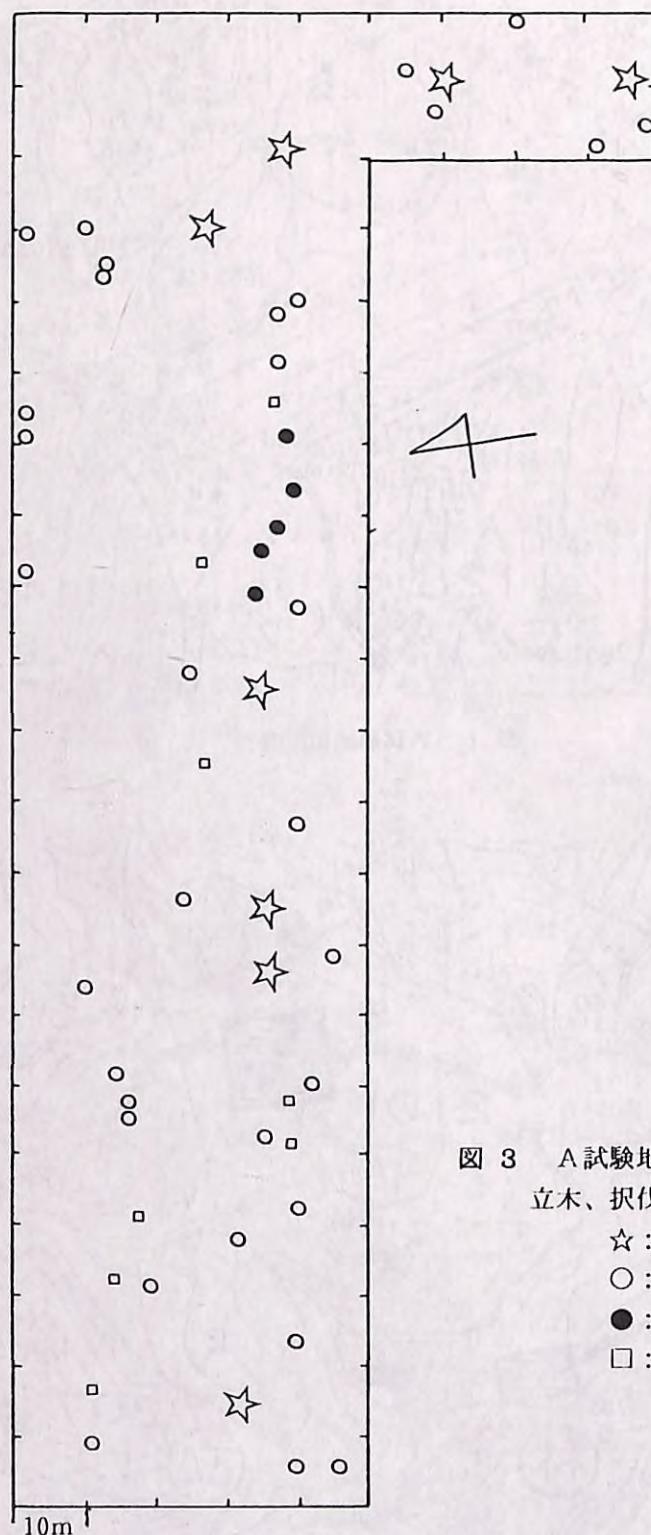


図 4 B 試験地のトラップ配置、立木、抾伐木の位置の概略
記号は図 3 に同じ

表 1 試験地の概況(抾伐時)

林班. 小班	2 1 0 は	1 1 2 8 い 1
伐採前の蓄積 m^3	2 2 0	2 1 0
haあたり伐採 本数(イ' マリ)	7. 4	3. 1
(その他)	1 1. 7	1 5. 5
haあたり伐採量 (イ' マリ, m^3)	3 4	1 0
(その他, m^3)	3 1	1 2
伐採後の蓄積 m^3	1 5 5	1 8 8

表 2 各試験地の立木、抾伐木、枯死木 (1989年)

試験地	立木			抾伐木			枯死木		
	本数	D B H	範囲cm	本数	D B H	範囲cm	本数	D B H	範囲cm
A	34	31	~ 82	8	51	~ 67	5	61	~ 80
B	18	10	~ 100	7	42	~ 59	0	-	-
C	92	6	~ 70	12	48	~ 76	0	-	-



写真 1 フェロモントラップの設置状況



写真 2 A試験地での抾伐後の枯れ状況

表 3 羽化に必要な積算時間の算出

月 日	4.27	5.3	4	11	12	20	21	24	29	30
脱出率 (%)	0							72.1	97.8	
16°C以上の時間		8.0	8.0	7.2	8.0	8.0	8.0	8.0	8.0	
16°C以上の時間の累積		8.0	16.0	23.2	31.2	39.2	47.2	55.2	63.2	
推定羽化率	0	23	33	44	56	67	78	90		

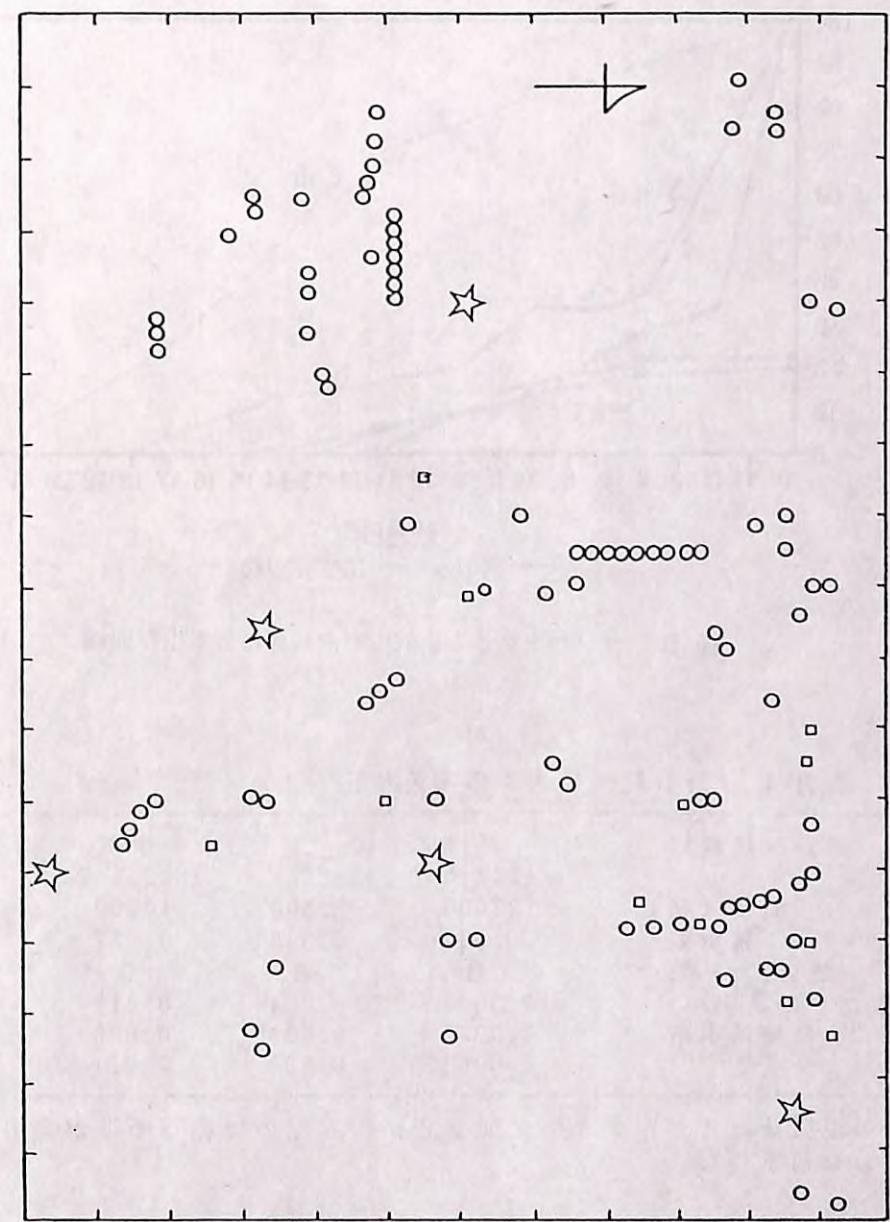


図 5 C試験地のトラップ配置、立木、抾伐木の位置の概略

記号は図 3 に同じ

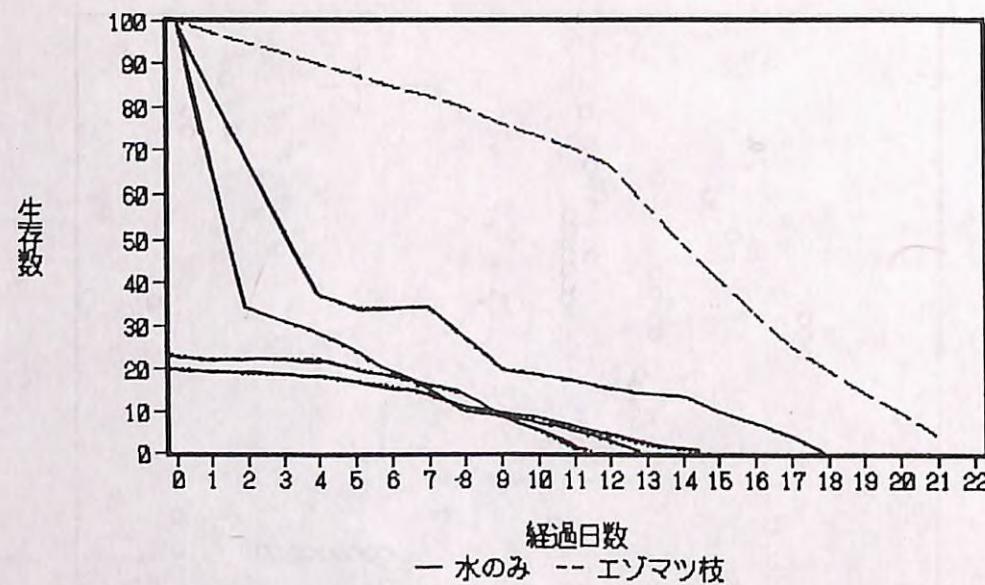


図 6 ヤツバキクイムシ成虫室内飼育による生存曲線

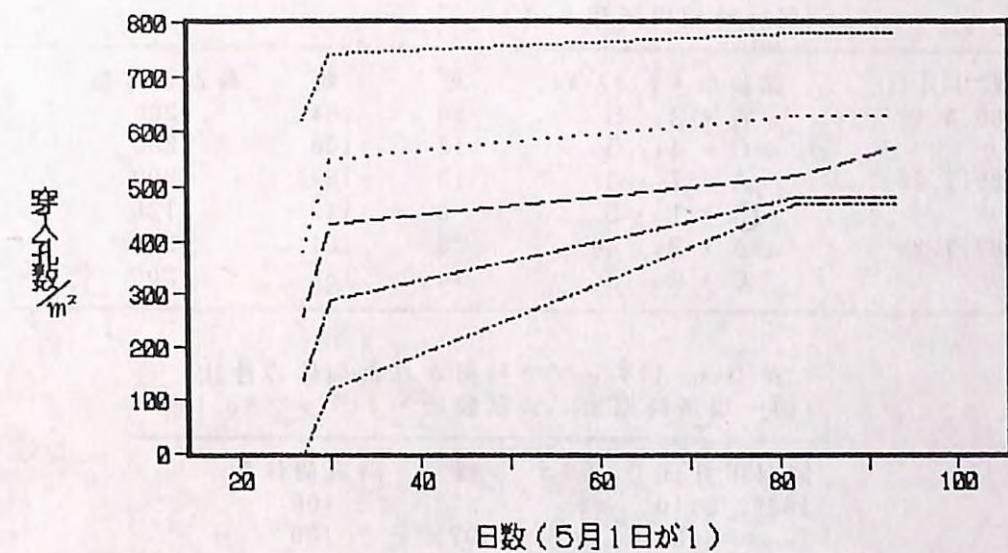


図 7 阿寒における立木への寄生経過

表 4 誘引範囲に入る確率の検定

項目＼試験地	格子状	十字型
年	1982.5-7	1982.8-
面積 (m ²)	22500	22500
誘引率	0.037	0.036
誘引トラップ数	8	8
1トラップあたりの誘引率	0.0046	0.0045
半径 5 m 理論誘引率	0.0035	0.0035
半径 6 m	0.005	0.005
		0.011

*: 実際の設置数は4だがトラップ間が2m程度なので相互干渉があり、
その分を補正した。

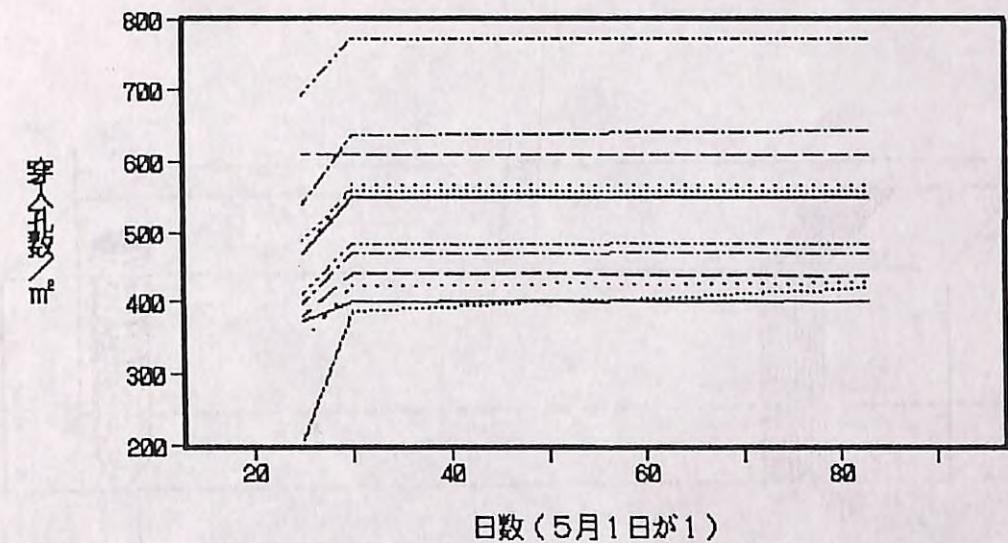


図 8 阿寒における倒木への寄生経過

表 5 ト ラ ッ プ で 捕 獲 さ れ た 個 体 の 性 比
(同一時期場所年度別)

回収年月日	試験地・ト ラ ッ プ No.	雄	雌	調査個体数
1985.8.1	A・2, 5	36	164	200
	C・4, 5	12	188	200
1986.7.29	A・1, 4	13	187	200
	C・1~5	6	119	125
1987.7.29	A・2, 4	9	191	200
	C・2, 5	14	186	200

表 6 ト ラ ッ プ で 捕 獲 さ れ た 個 体 の 性 比
(同一場所時期別: A 試験地・ト ラ ッ プ No. 1)

回収年月日	雄	雌	調査個体数
1988. 6.10	3	97	100
6.20	3	97	100
6.30	7	93	100
7.11	11	89	100
7.19	4	96	100
7.28	6	94	100
8. 9	4	96	100
8.20	6	94	100
9. 9	1	34	35

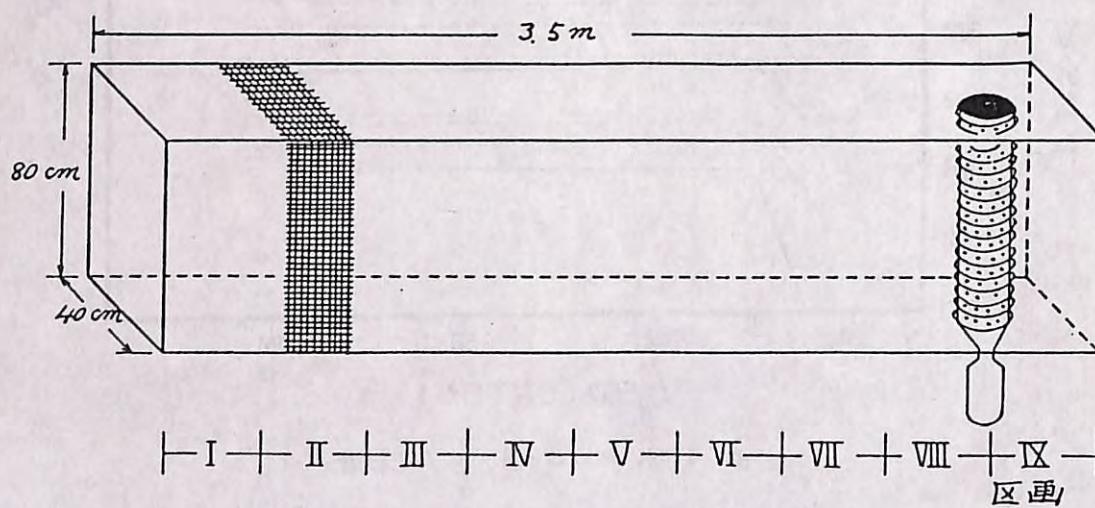


図 9 閉鎖空間での誘引試験用網かご

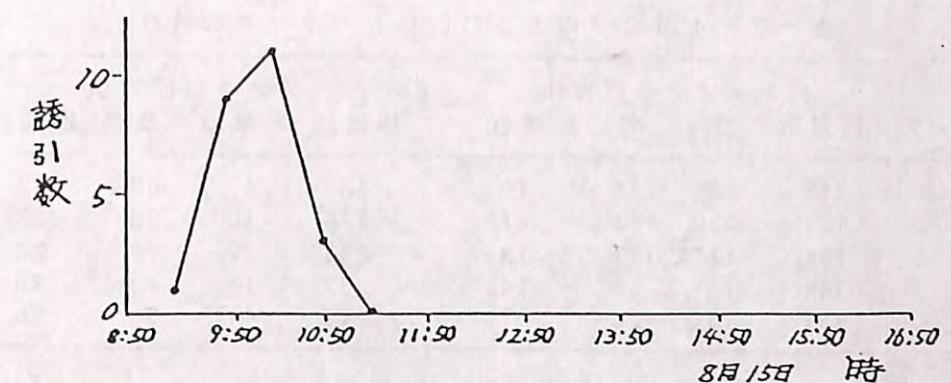


図 10 網かご内での誘引経過

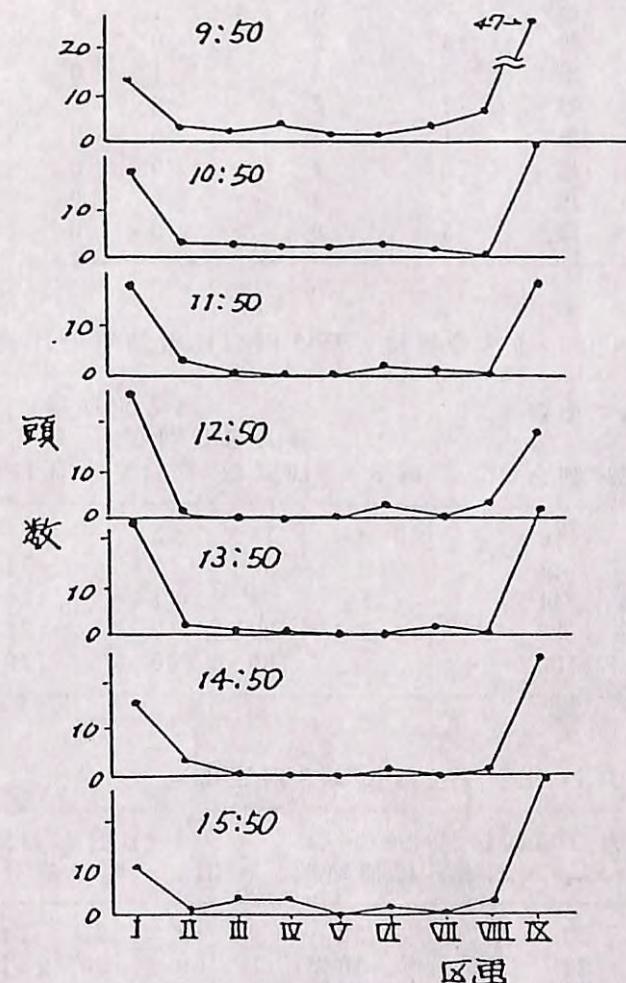


図 11 網かご内で誘引されなかった個体の分布

表-7 ト ラ ッ プ 内 と 下 に 置 い た バ ケ ツ で の 性 比

ト ラ ッ プ	ト ラ ッ プ で の 捕 獲 虫				バ ケ ツ で の 捕 獲 虫			
	捕 獲 数	雄	雌	雄割合	捕 獲 数	雄	雌	雄割合
1	218	16	84	.16	120	40	80	.33
2	144	30	114	.21	128	30	98	.23
3	134	17	117	.13	223	22	78	.22
4	346	14	86	.14	67	18	49	.26
5	134	13	121	.07	49	14	35	.28

表-8 ト ラ ッ プ か ら の 距 離 別 捕 獲 虫

No.	ト ラ ッ プ 内	0 m	1 m	3 m	6 m
1	雄	2	3	1	1
	雌	13	2	1	0
2	雄	0	2	-	1
	雌	17	2	-	0
4	雄	1	3	-	0
	雌	20	4	-	0
5	雄	2	3	-	0
	雌	17	0	-	0

表-9 通 例 の 捕 獲 と 高 さ 別 の 捕 獲 効 率 の 比 較

ト ラ ッ プ	0.5 m で 捕 獲			高 さ 別 捕 獲			計
	捕 獲 数	割 合 %	高 さ m	6 月 8 日 回 収		6 月 12 日 回 収	
				捕 獲 数	割 合 %	捕 獲 数	
5	134	16	0	38	23	117	15
2	144	17	0.5	30	19	93	12
4	346	41	1.5	65	41	444	57
1	218	26	3.0	27	17	122	16
合 計	842	100		160	100	776	100

表-10 ト ラ ッ プ 位 置 の 高 さ 別 性 比

ト ラ ッ プ No. / 取 付 高 さ m	6 月 8 日 回 収			6 月 12 日 回 収			計
	雄	雌	雄割合	雄	雌	雄割合	
5 / 0	5	33	.13	38	18	.99	.15
2 / 0.5	3	27	.10	30	9	.84	.10
4 / 1.5	4	61	.06	65	9	.91	.09
1 / 3.0	2	25	.07	27	11	.102	.10
							117

表-11 穿 入 か ら 再 寄 生 ま で の 積 算 時 間 の 算 出
(最高気温は1958年山口の図から)

1958年 5月	最高気温	推定平 7°C 以上	
		均 気温	の 時 間
21	23.8	14.7	19.9
22	24.2	15.0	20.1
23	20.3	12.4	17.8
24	16.5	9.9	15.5
25	14.3	8.5	14.0
26	17.8	10.8	16.4
27	22.5	13.9	19.1
28	23.8	14.7	19.9
29	28.2	17.7	24.0
30	18.5	11.3	16.8
31	17.8	10.8	16.4
1	15	8.9	14.5
2	21.8	13.4	18.7
3	15.8	9.5	15.1
4	18	10.9	16.5
5	19	11.6	17.1
6	22.2	13.7	18.9
7	26.4	16.5	21.6
8	26.8	16.7	22.0
9	21	12.9	18.2
10	19	11.6	17.1
			379.4
			合 計

表-12 穿 入 か ら 羽 化 ・ 脱 出 ま で の 積 算 温 度 の 推 定 (山 口 ・ 小 泉 1959 か ら)

月 日	5.21-31	6.1-10	11-20	21-31	7.1-10	11-20	21-31	計
平均気温	15.4	14.1	17.2	15.1	20.4	20.1	21.8	
積算温度	21.6	41.0	72.0	56.1	104.0	101.0	35.4	431.1

穿入は5月27日、ほとんどが成虫になった日は7月23日、発育0点は10°C

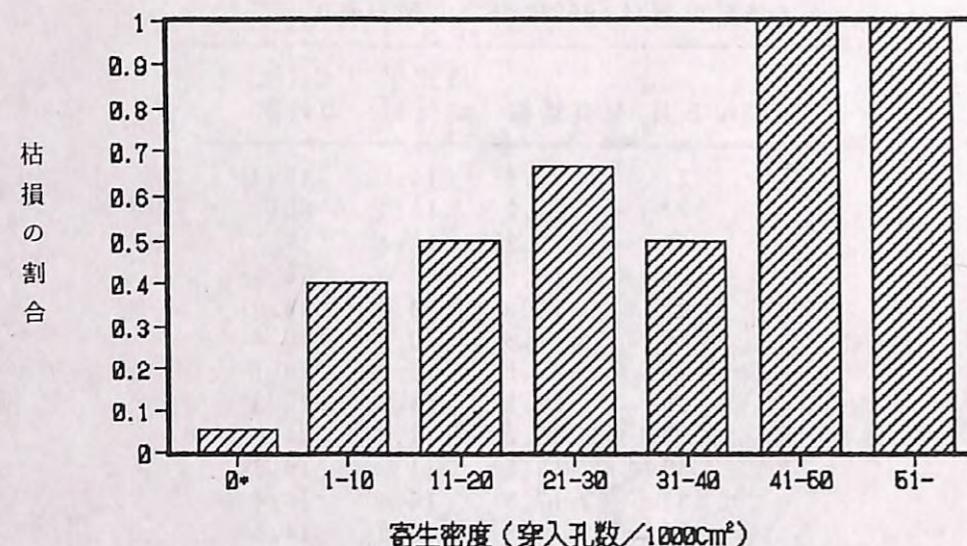


図 12 寄生密度と枯損の割合

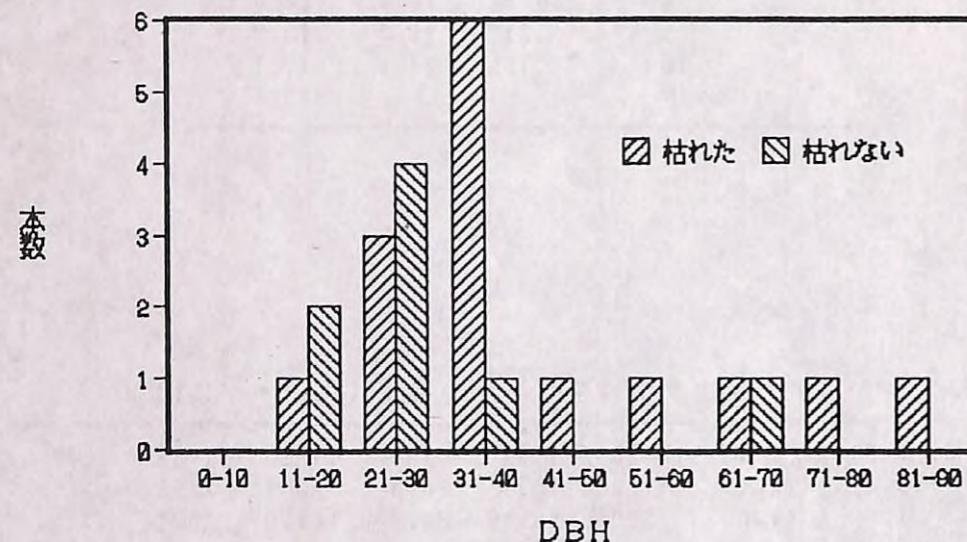


図 13 寄生を受け枯れた木と枯れなかった木のDBHの分布

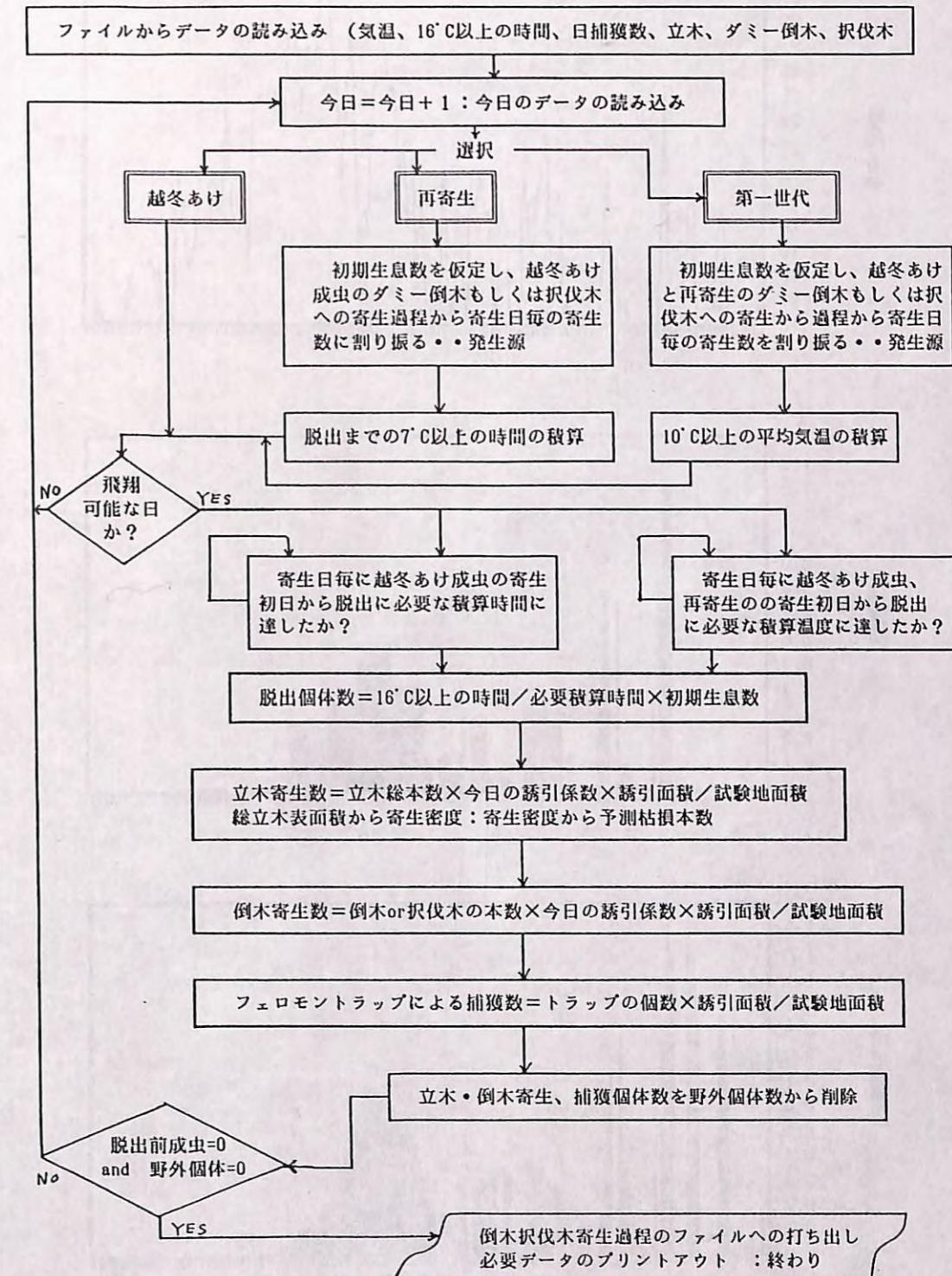


図 14 シミュレーションプログラムのフローの概要

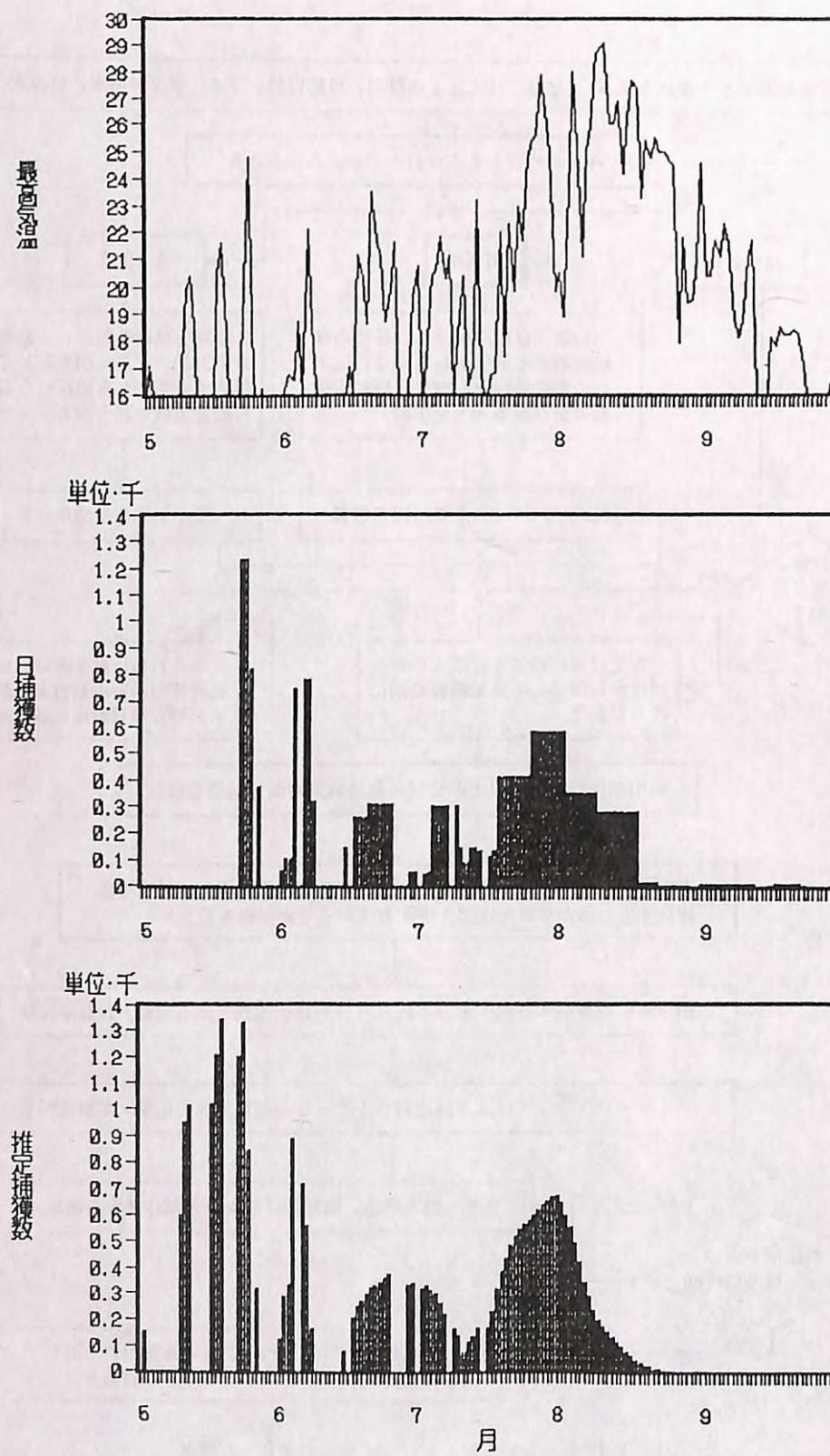


図 15 A 試験地1985年の16°C以上の最高気温、日捕獲数、推定捕獲数

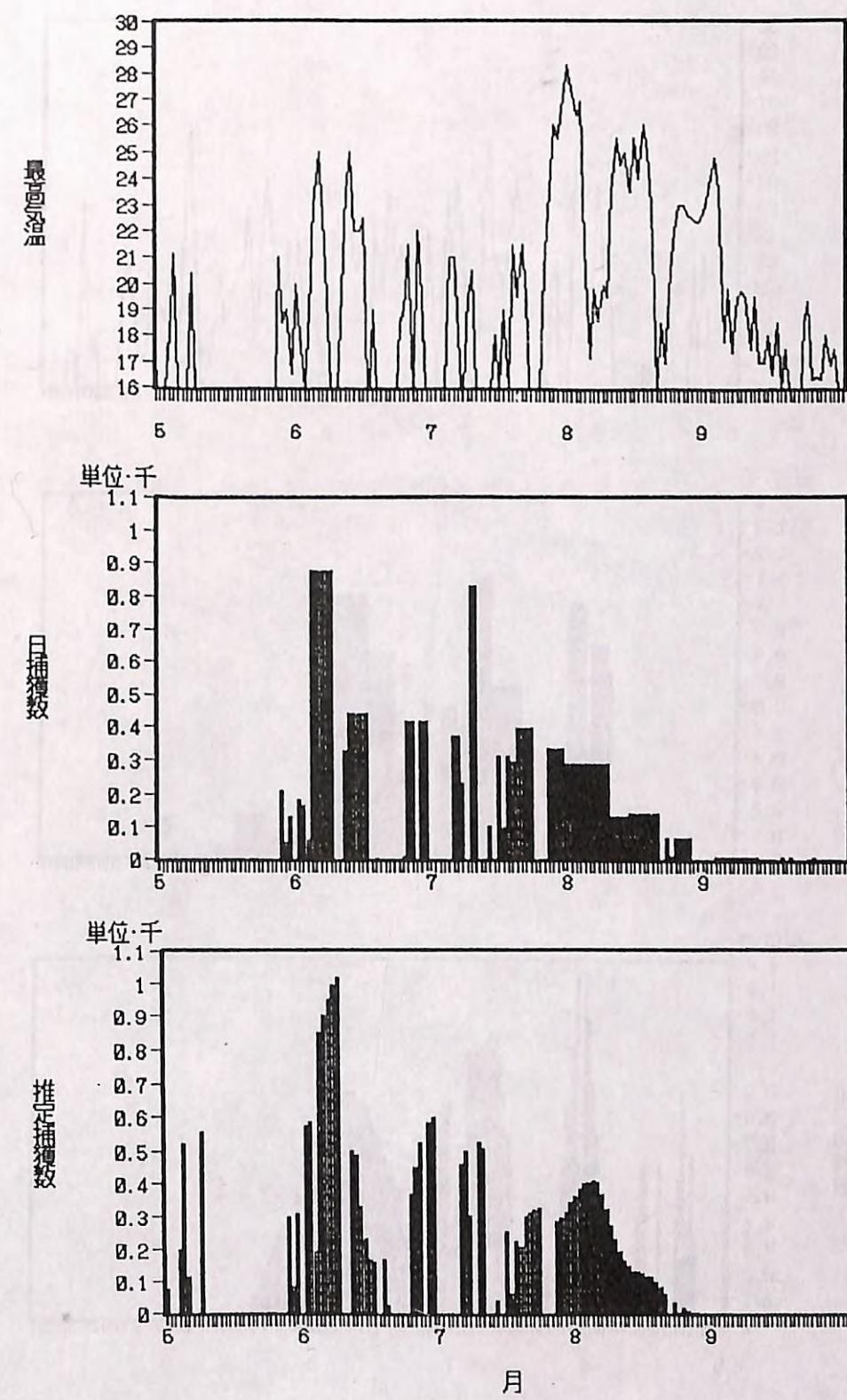


図 16 A 試験地1986年の16°C以上の最高気温、日捕獲数、推定捕獲数

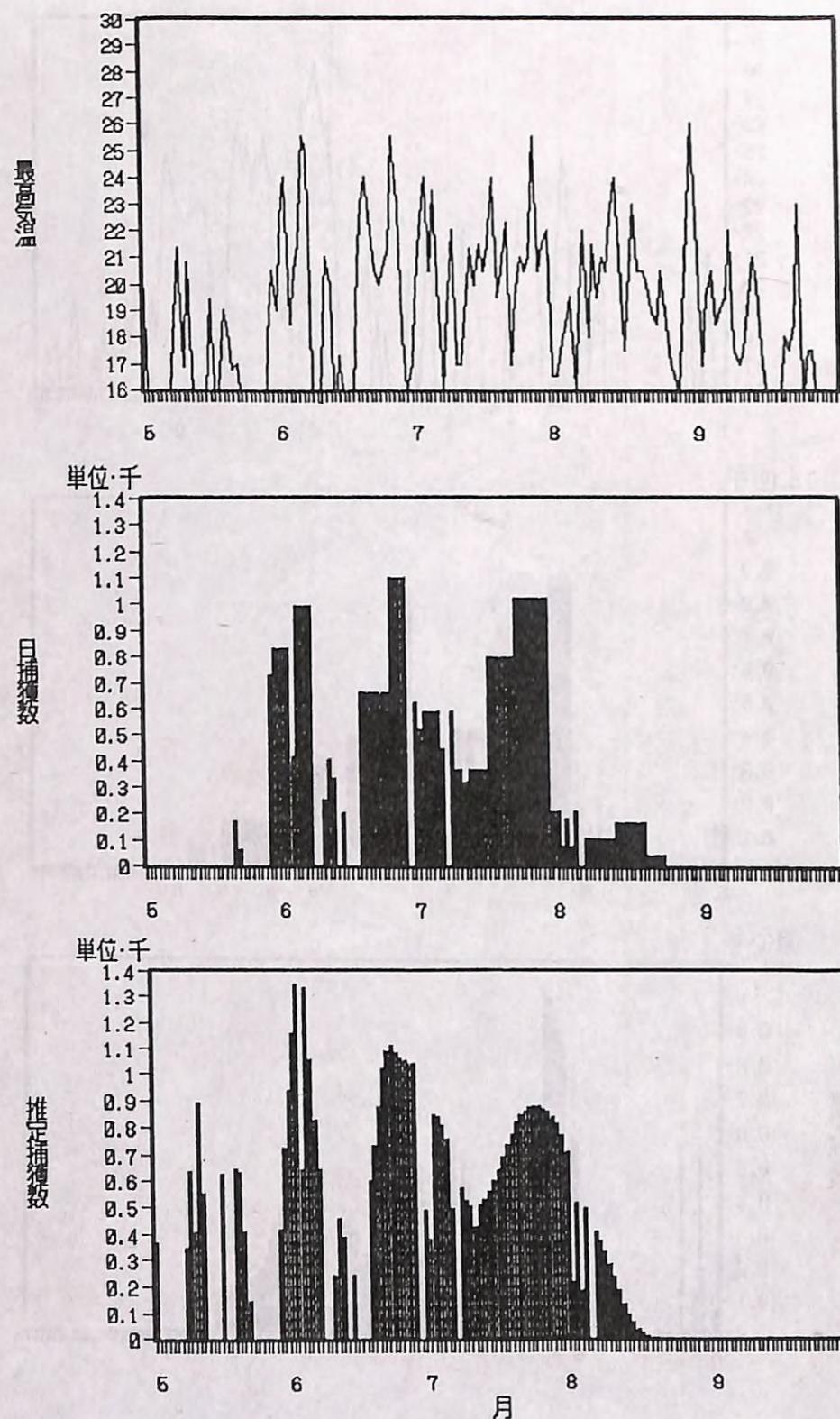


図 17 A試験地1987年の16°C以上の最高気温、日捕獲数、推定捕獲数

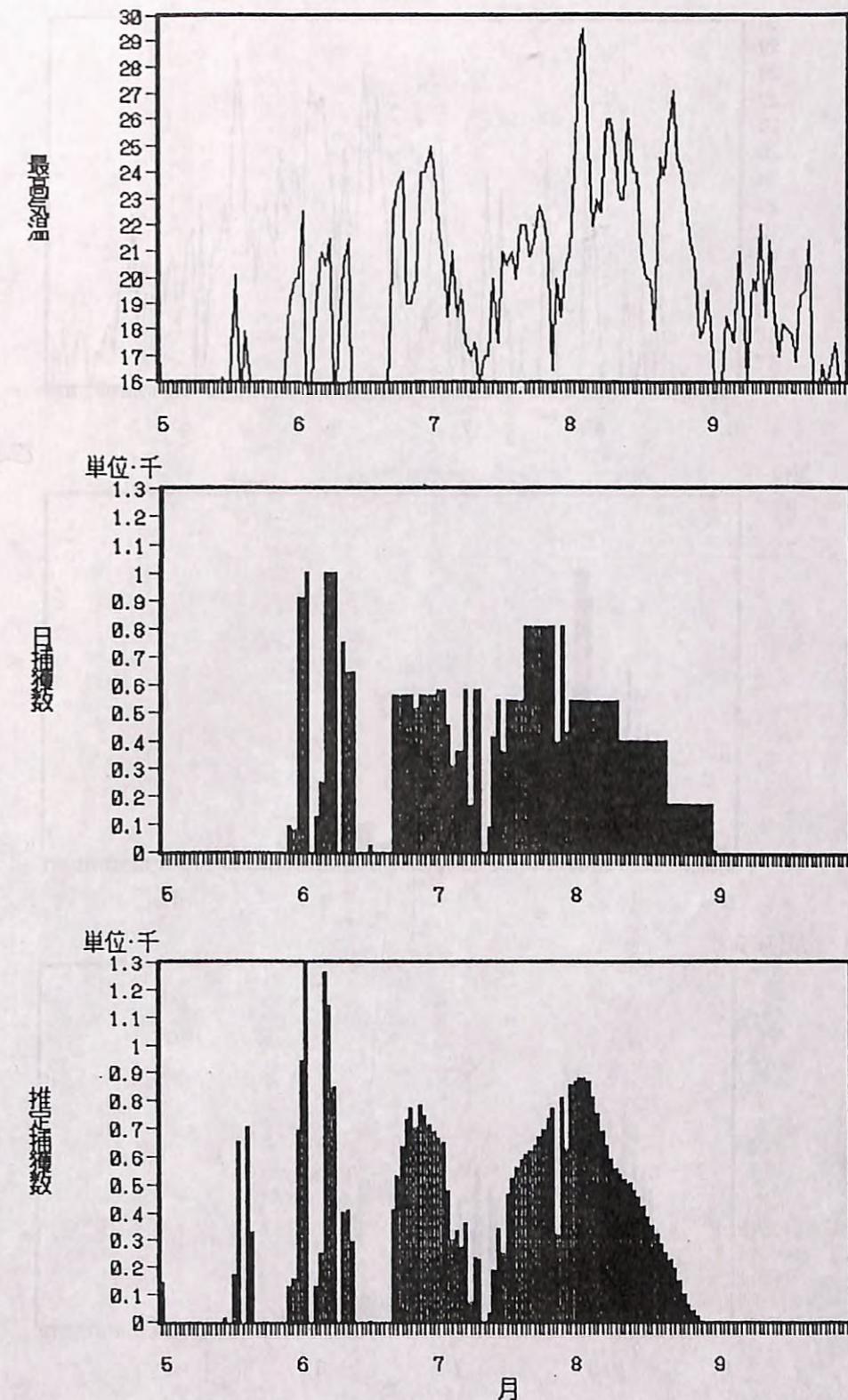


図 18 A試験地1988年の16°C以上の最高気温、日捕獲数、推定捕獲数

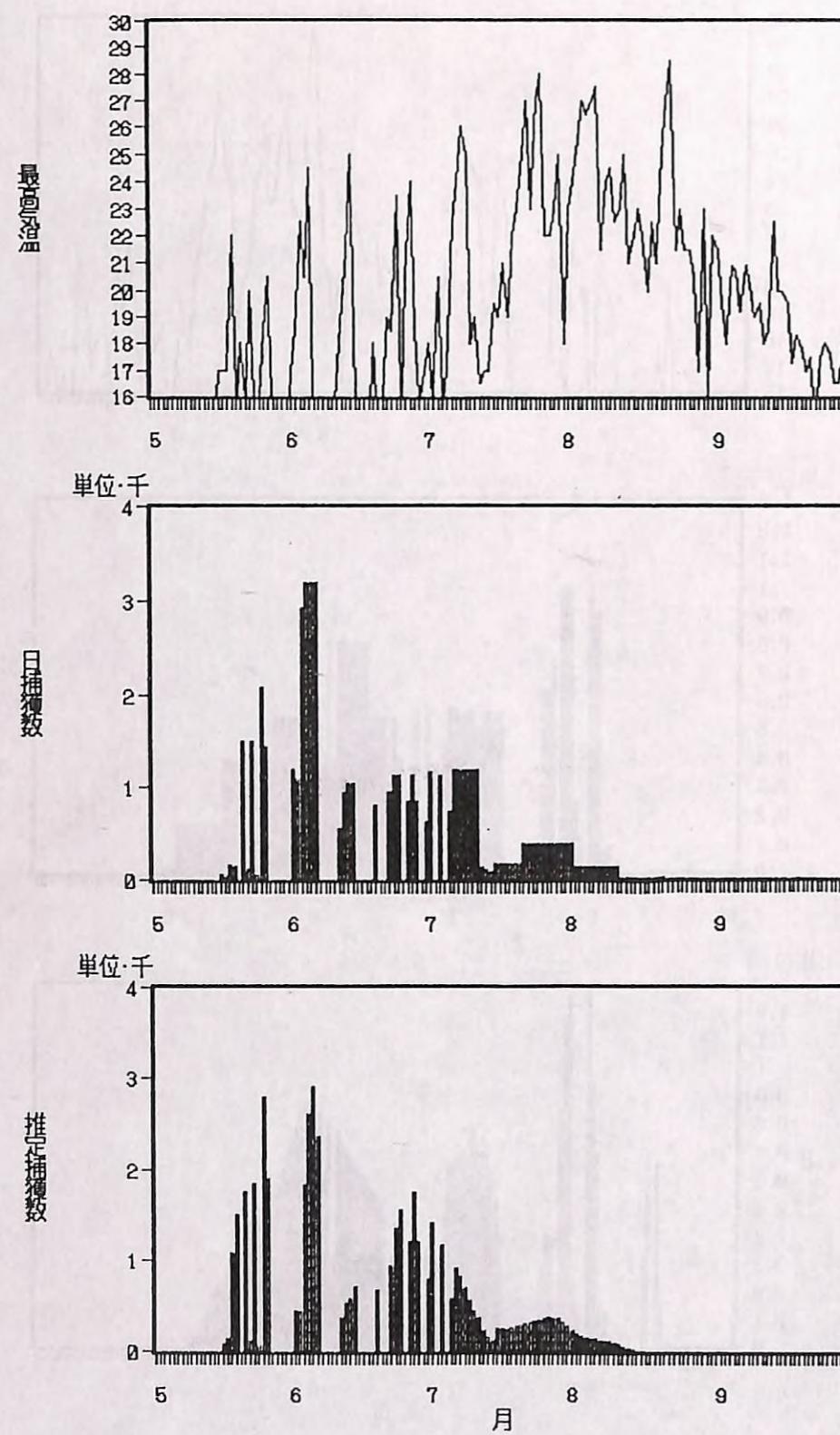


図 19 A 試験地1989年の16°C以上の最高気温、日捕獲数、推定捕獲数

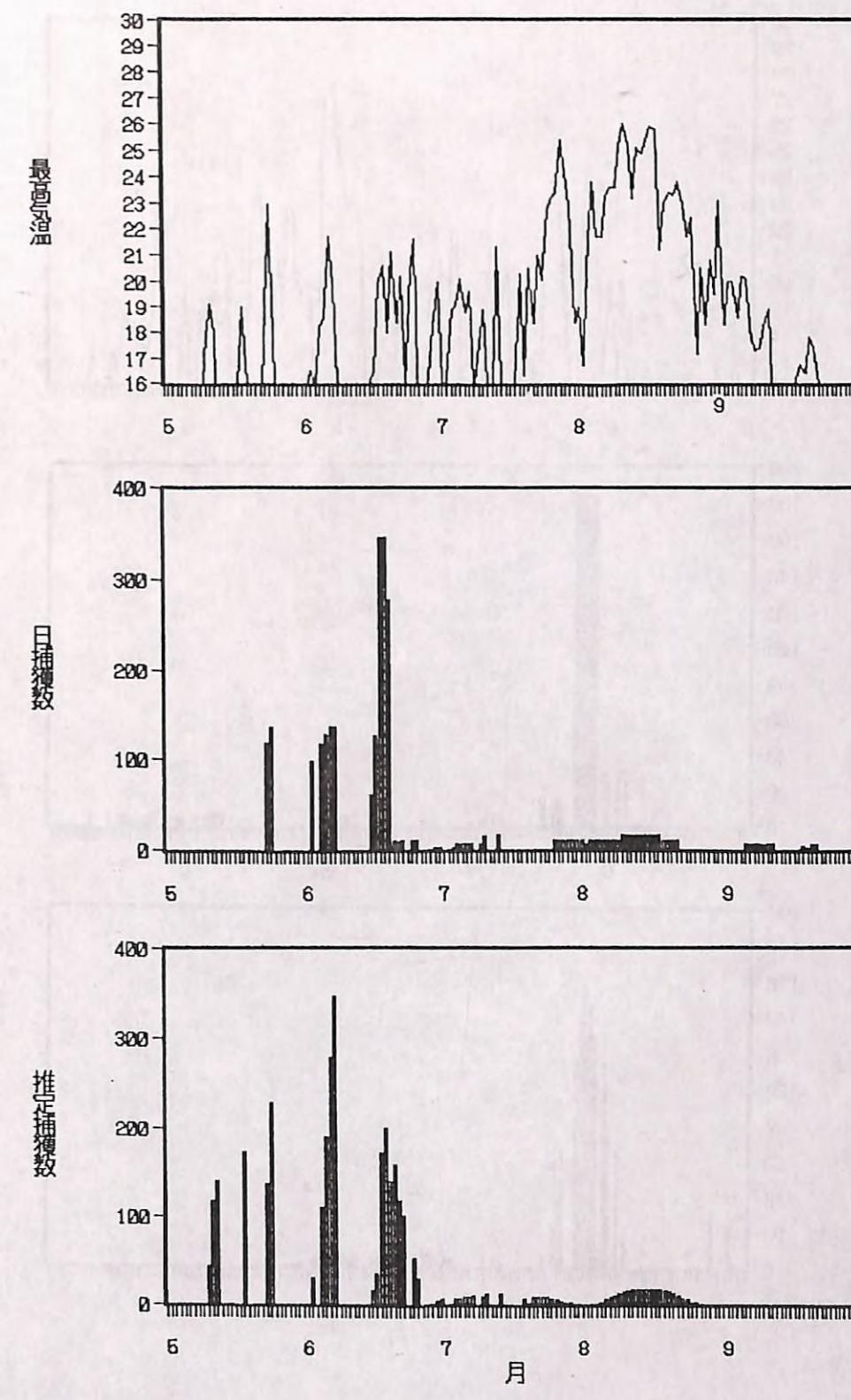


図 20 B 試験地1985年の16°C以上の最高気温、日捕獲数、推定捕獲数

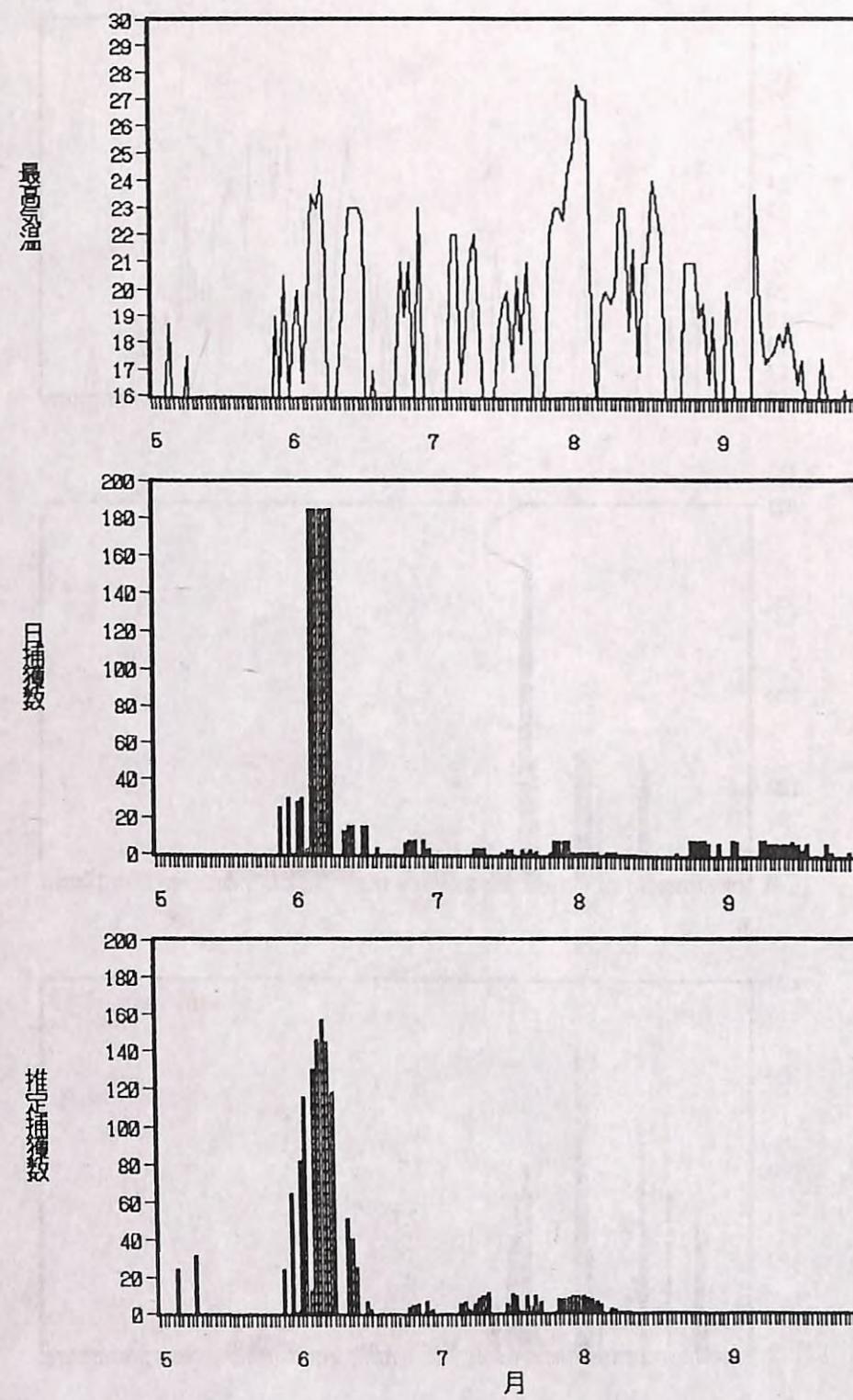


図 21 B 試験地1986年の16°C以上の最高気温、日捕獲数、推定捕獲数

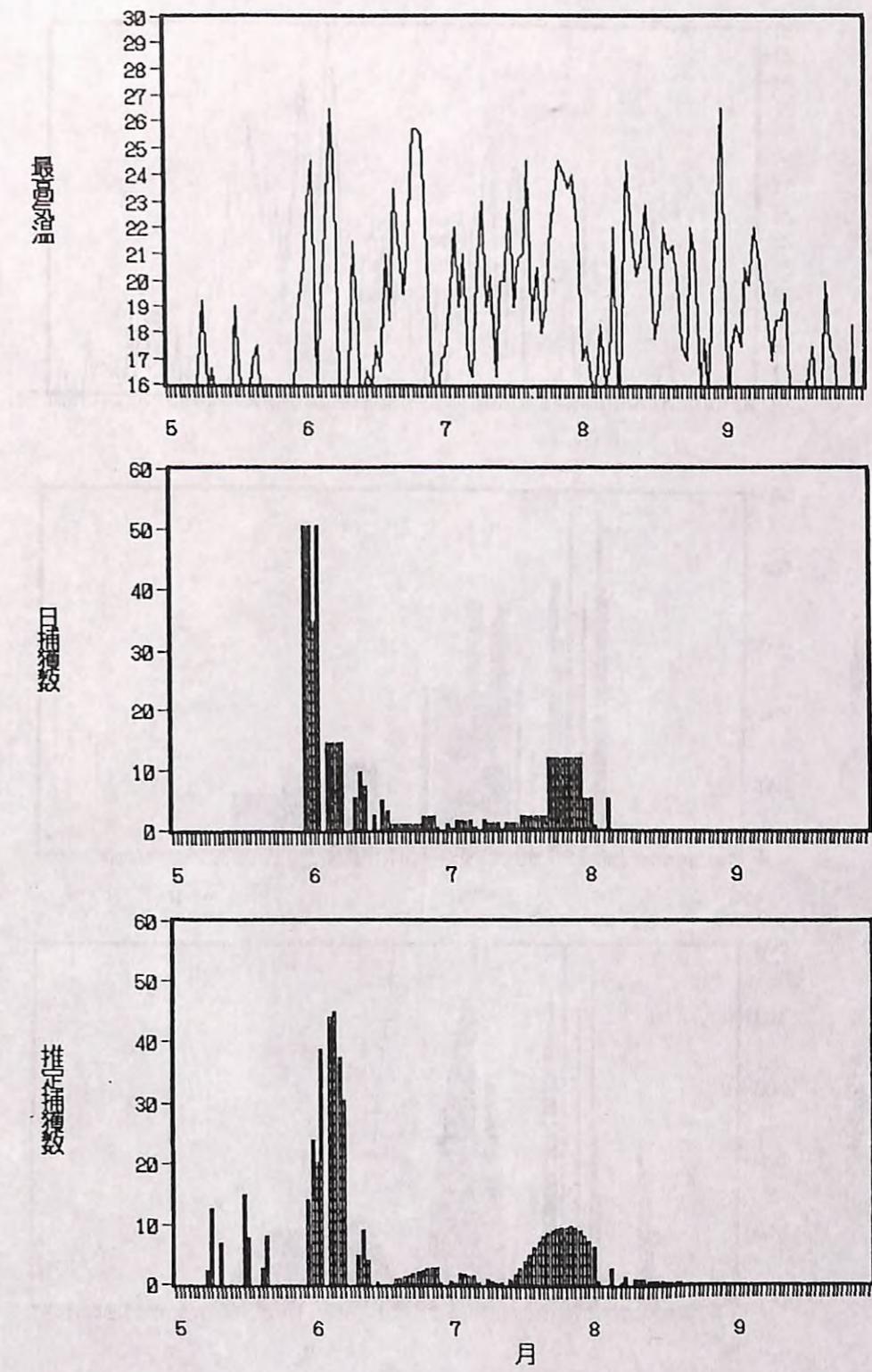


図 22 B 試験地1987年の16°C以上の最高気温、日捕獲数、推定捕獲数

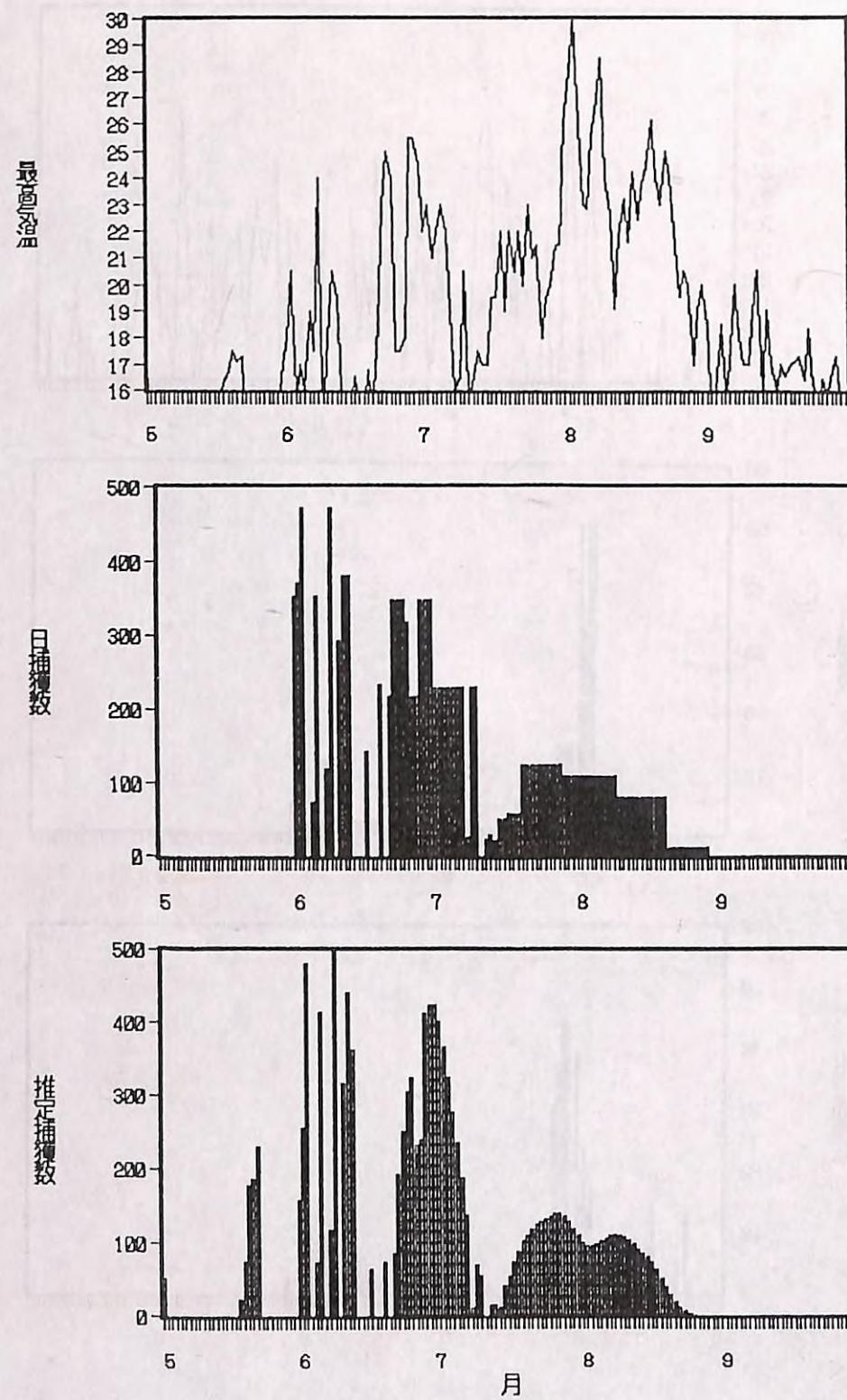


図 23 B 試験地1988年の16°C以上の最高気温、日捕獲数、推定捕獲数

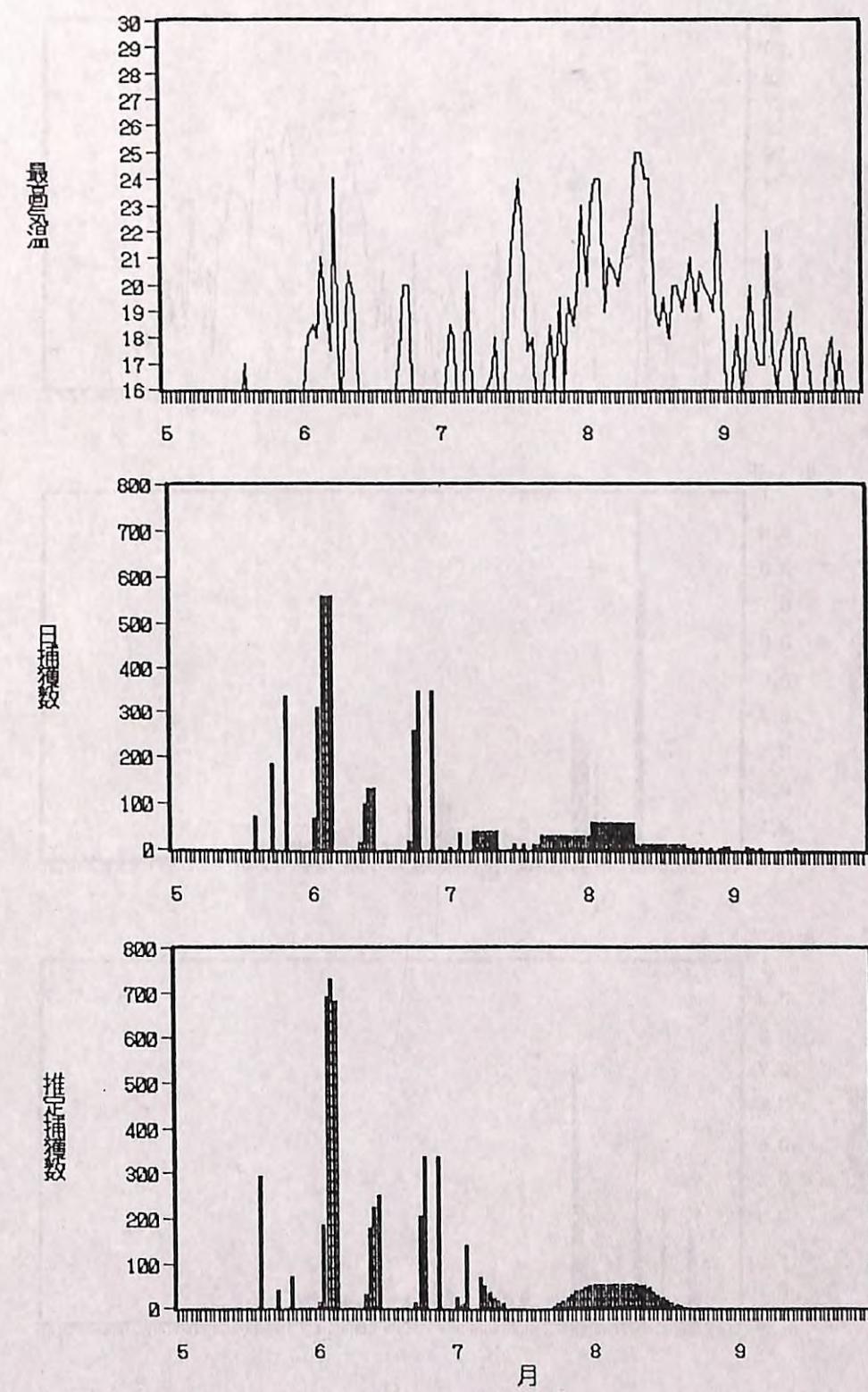


図 24 B 試験地1989年の16°C以上の最高気温、日捕獲数、推定捕獲数

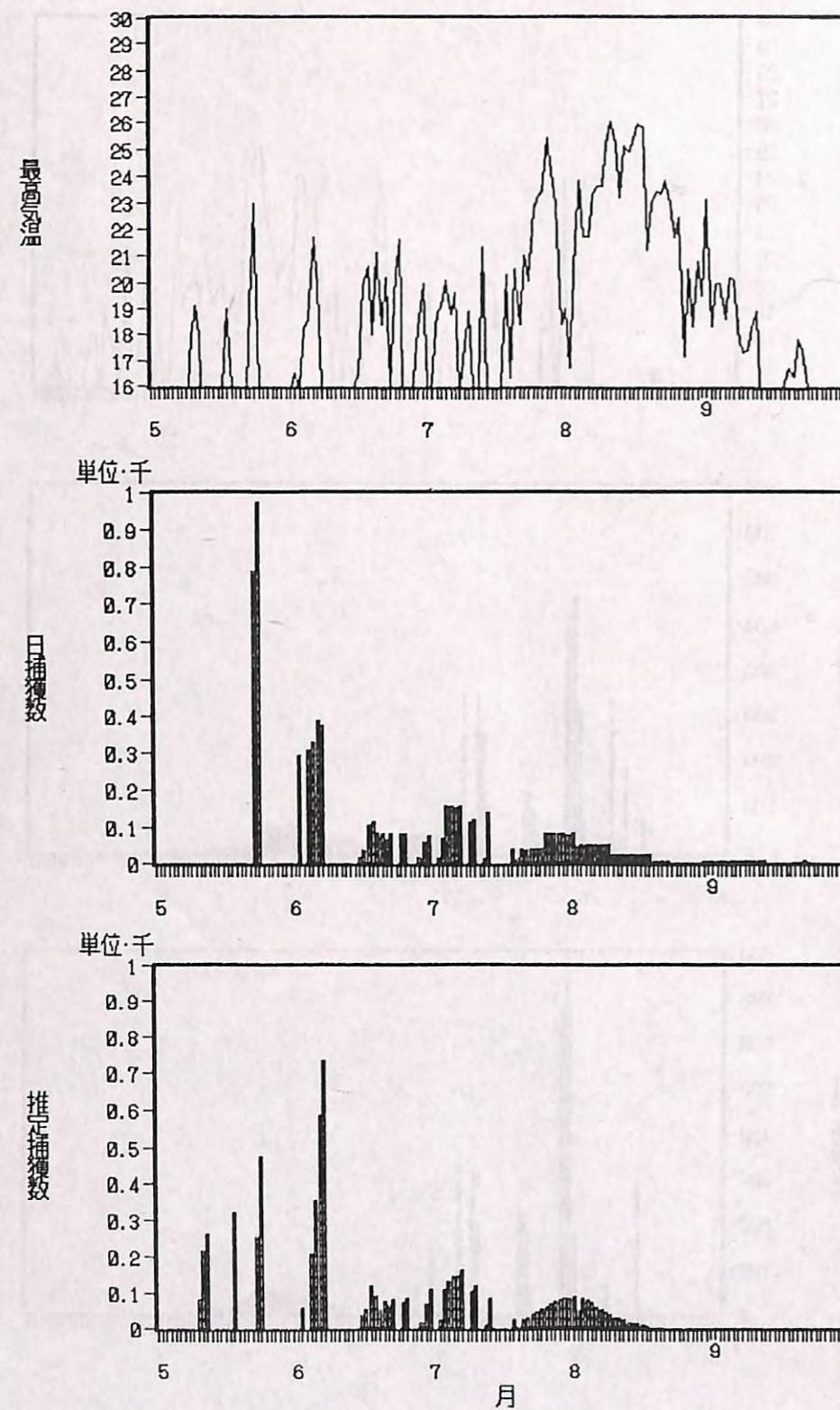


図 25 C 試験地1985年の16°C以上の最高気温、日捕獲数、推定捕獲数

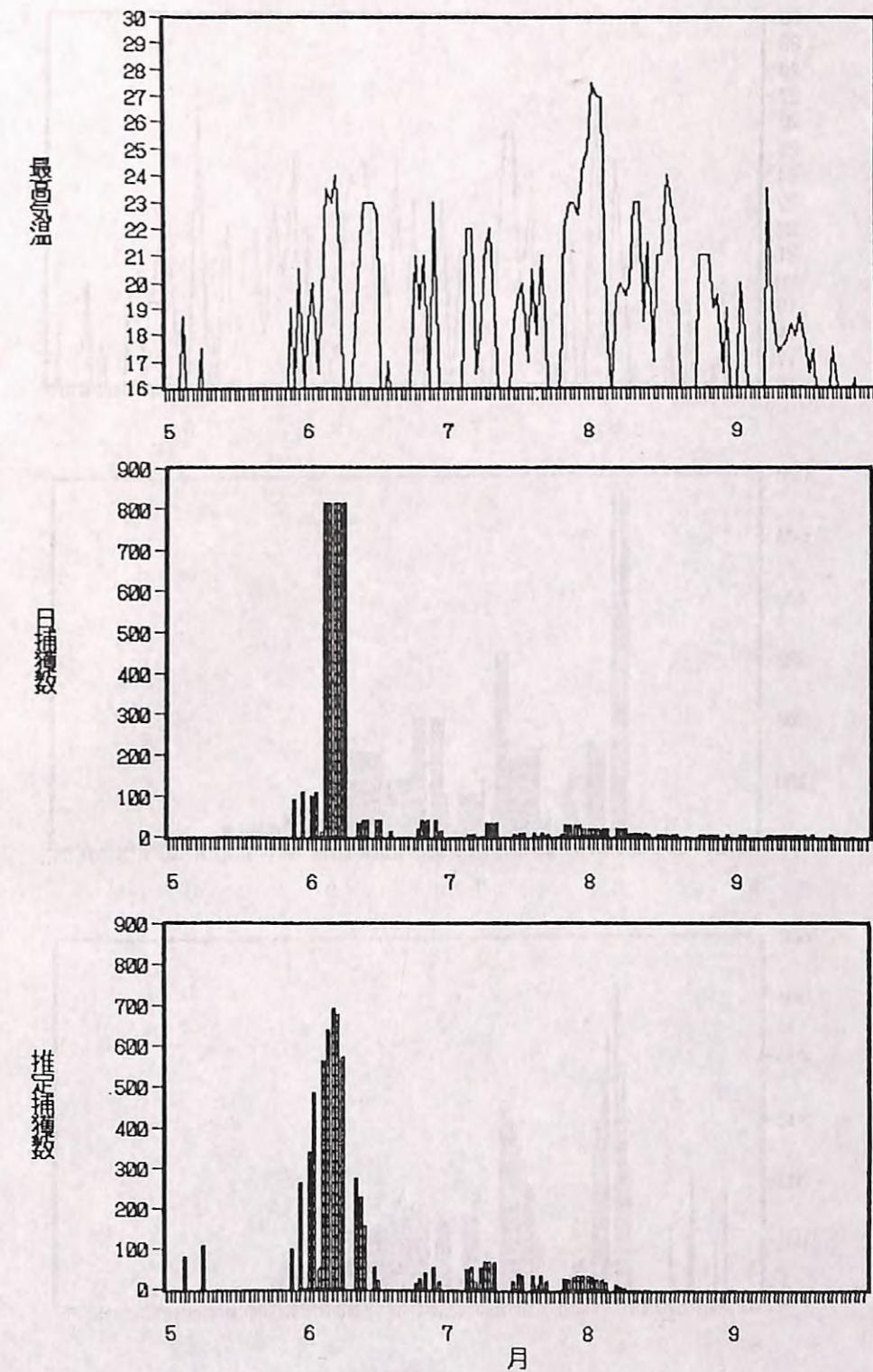


図 26 C 試験地1986年の16°C以上の最高気温、日捕獲数、推定捕獲数

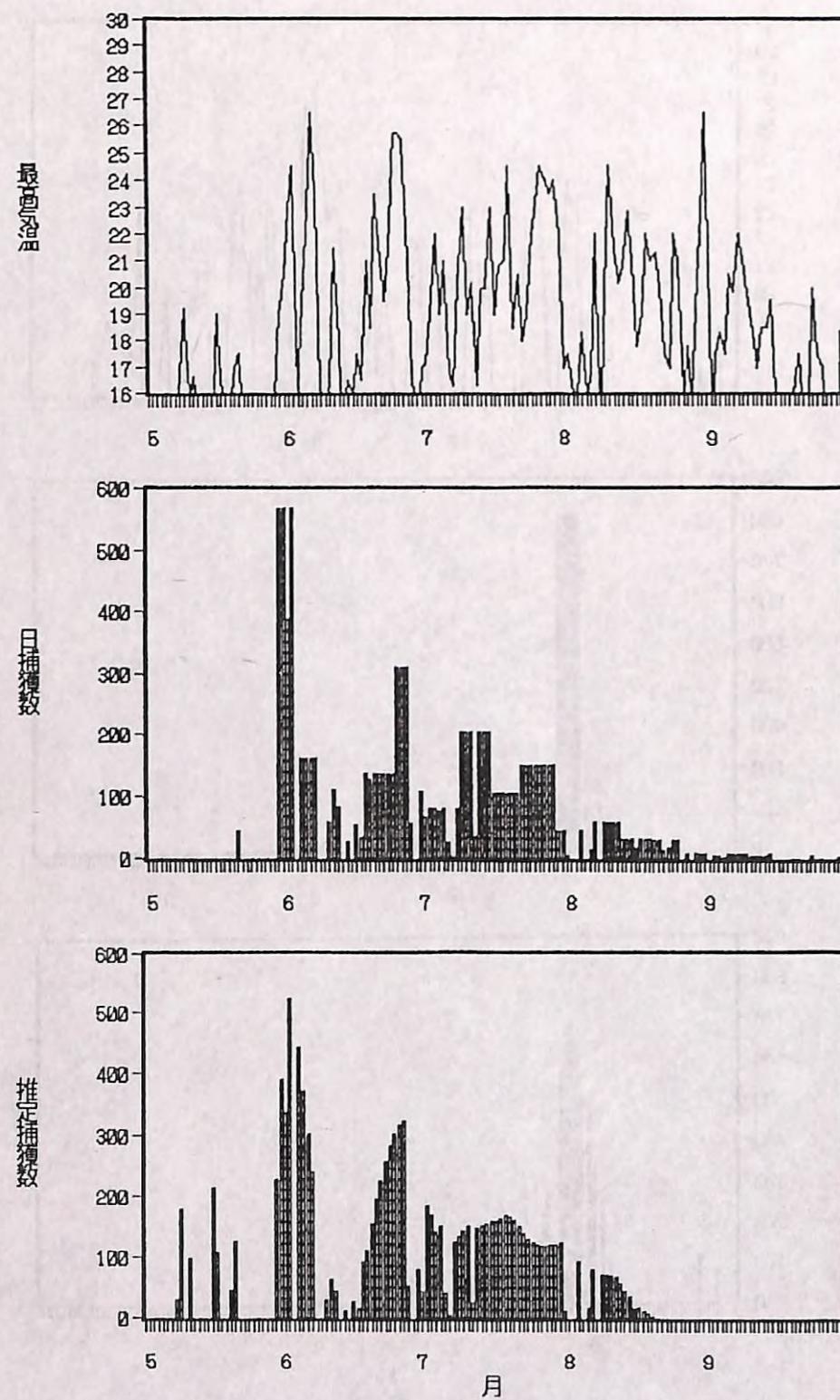


図 27 C 試験地1987年の16°C以上の最高気温、日捕獲数、推定捕獲数

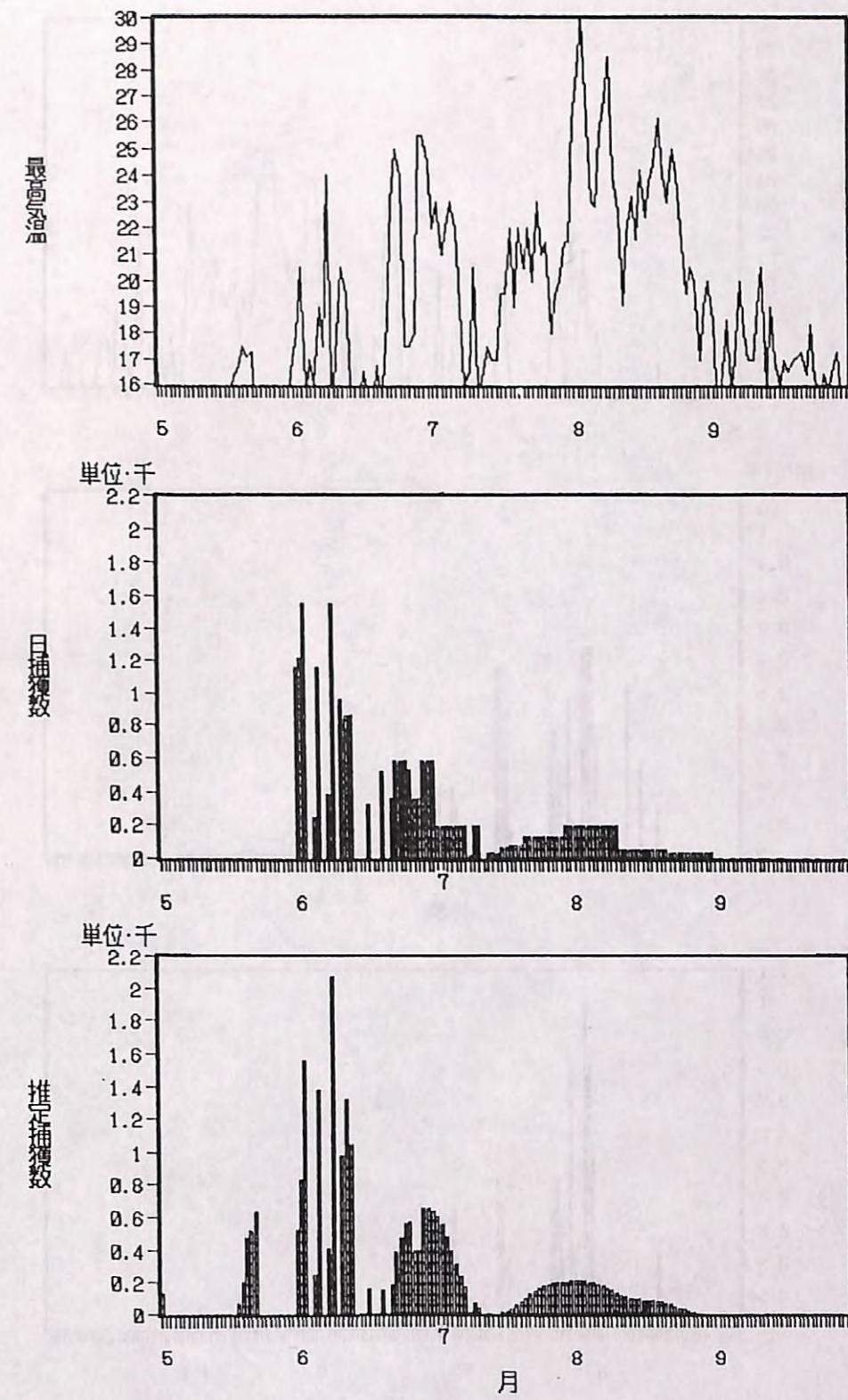


図 28 C 試験地1988年の16°C以上の最高気温、日捕獲数、推定捕獲数

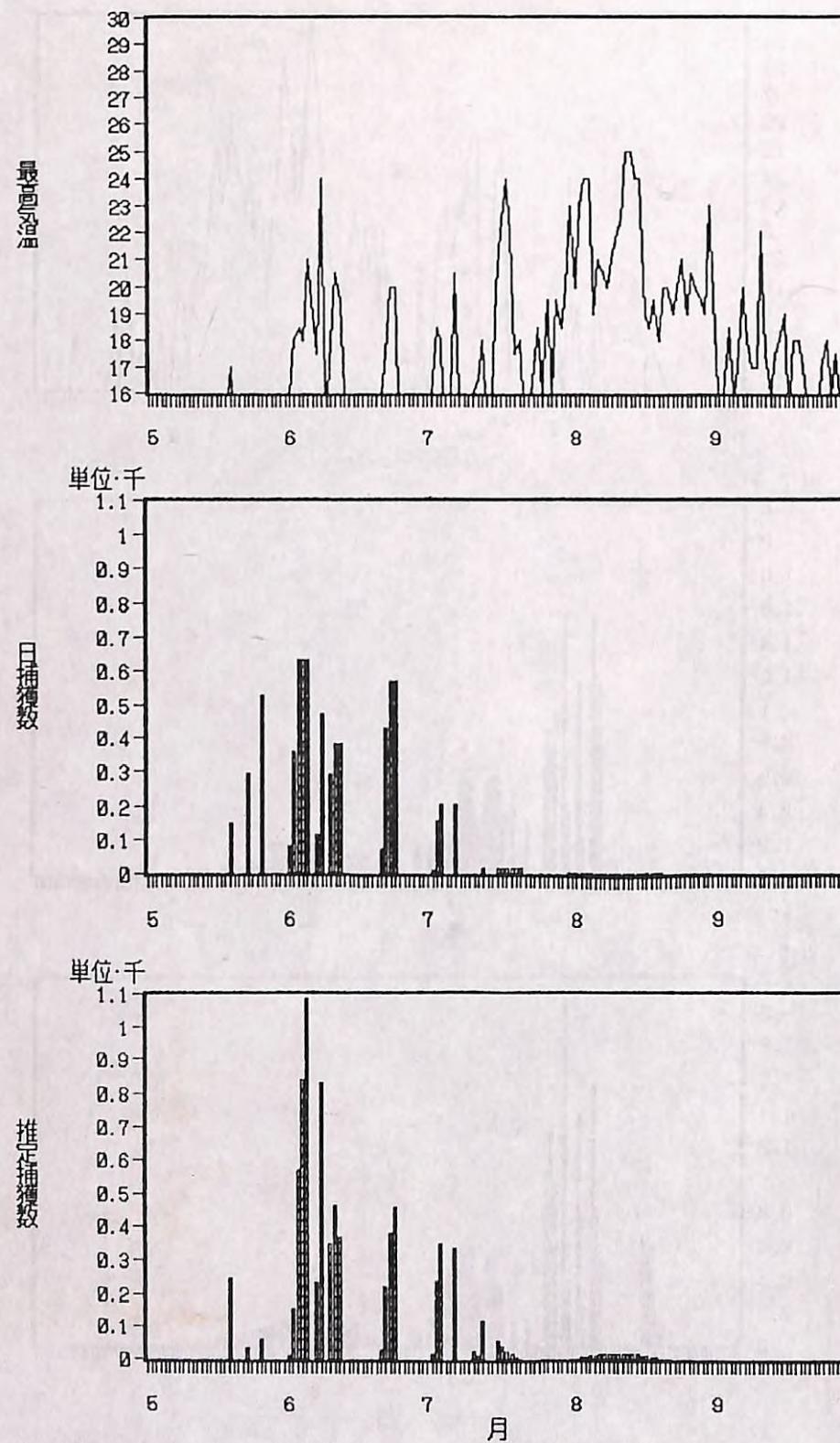


図 29 C 試験地1989年の16°C以上の最高気温、日捕獲数、推定捕獲数

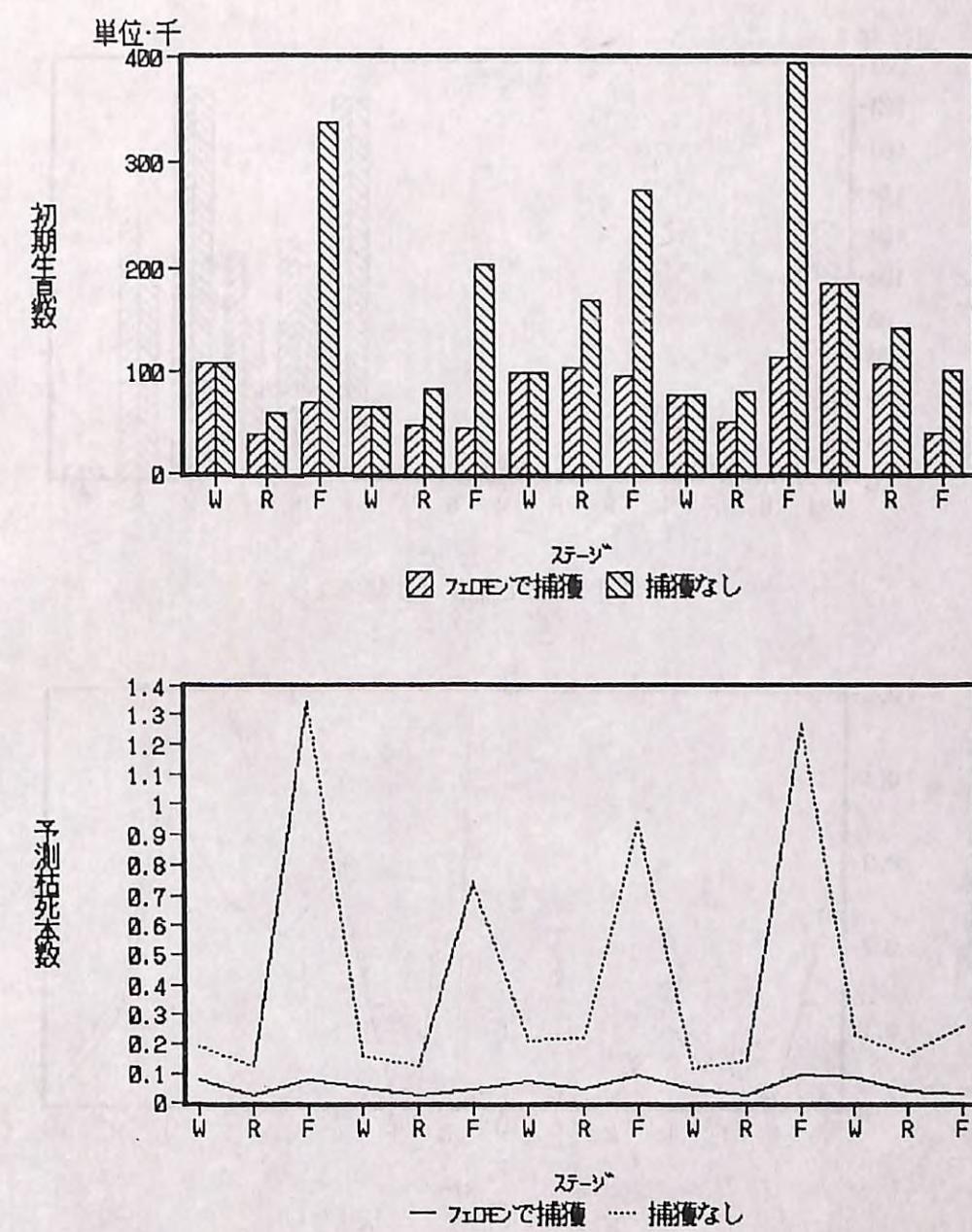


図 30 A 試験地でフェロモンで捕獲した場合と捕獲しなかった場合の初期生息密度の推移と予測枯損率の推移
(W: 越冬明け、R: 再寄生、F: 第一世代)

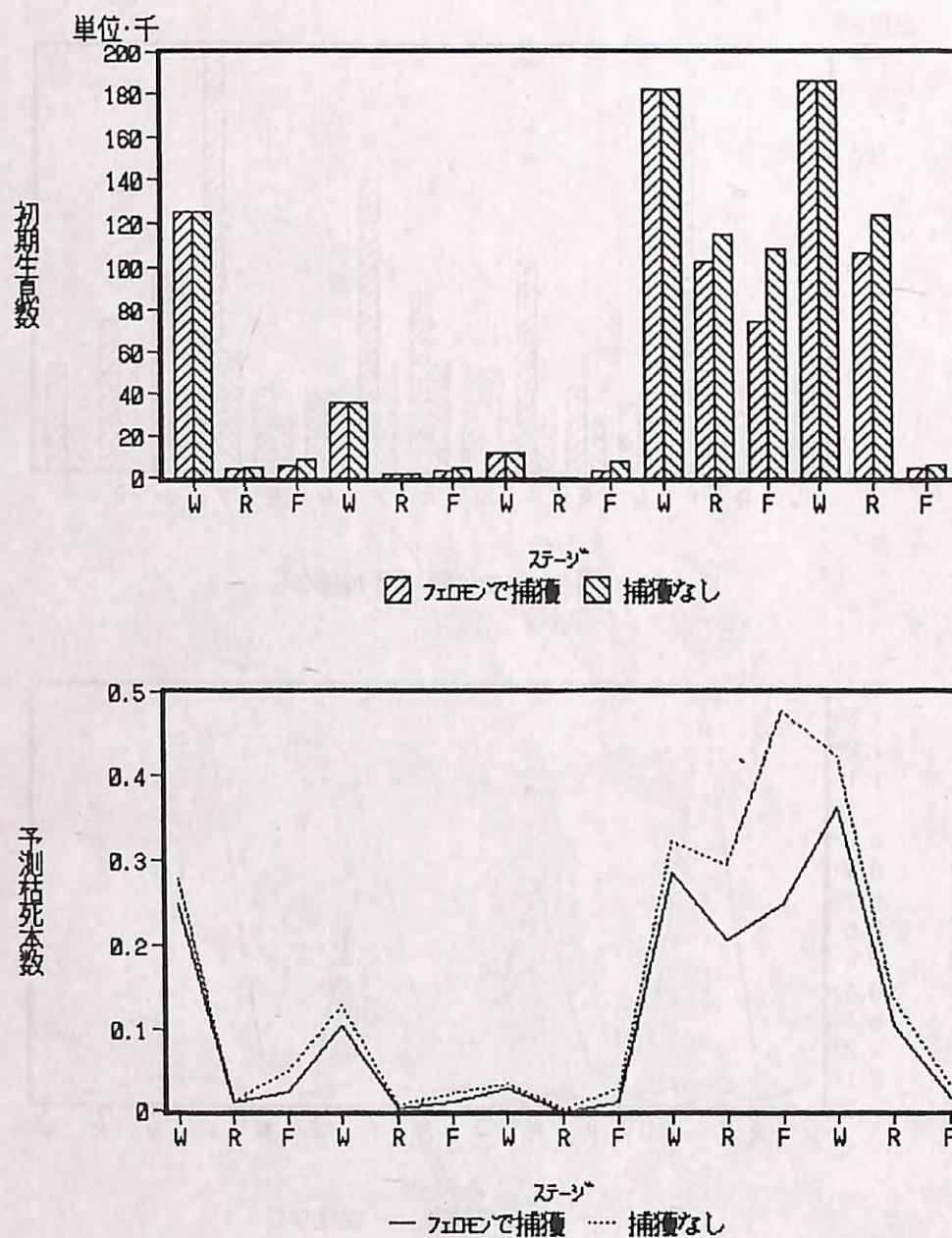


図 31 B 試験地でフェロモンで捕獲した場合と捕獲しなかった場合の初期生息密度の推移と予測枯損率の推移
(W: 越冬明け、R: 再寄生、F: 第一世代)

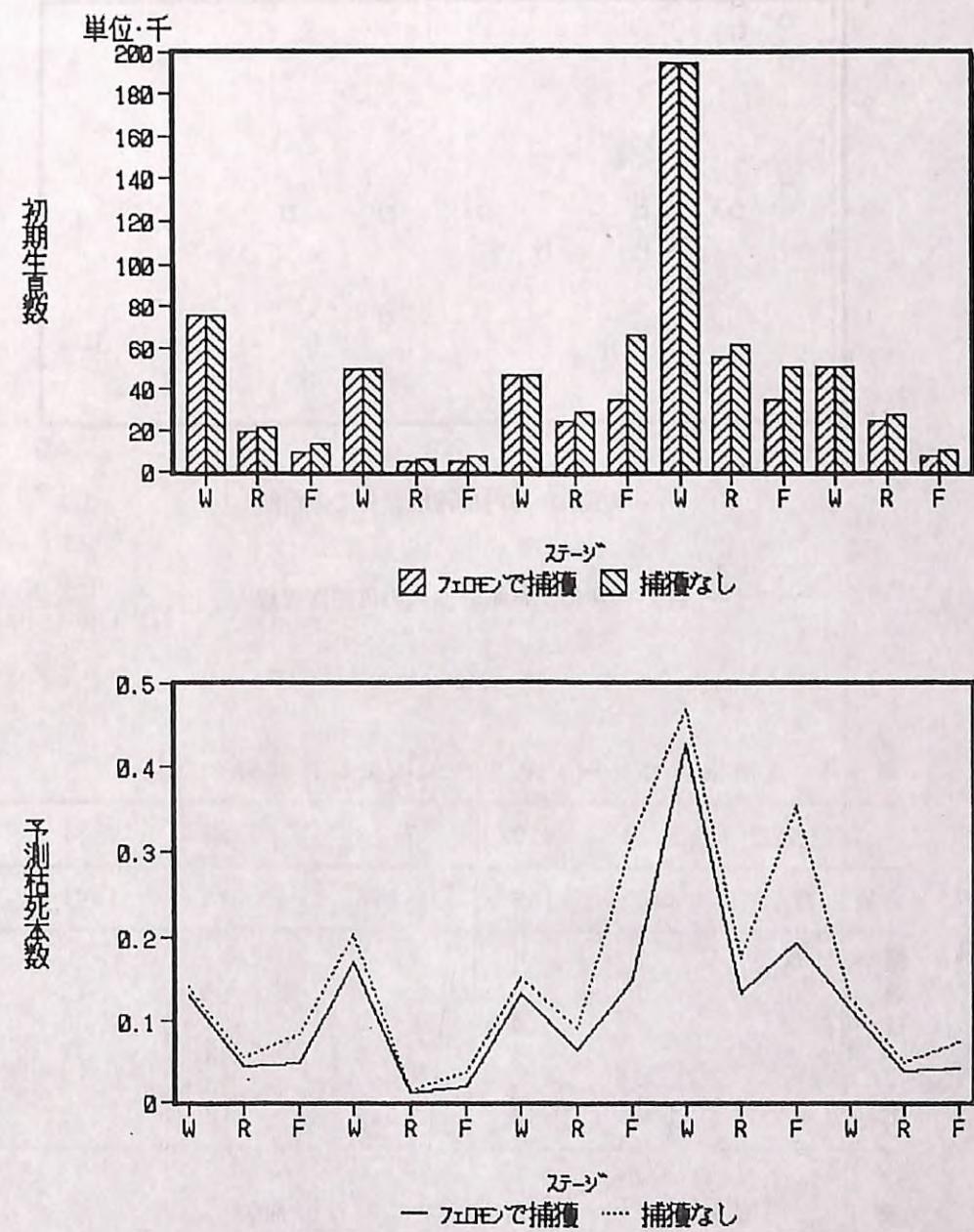


図 32 C 試験地でフェロモンで捕獲した場合と捕獲しなかった場合の初期生息密度の推移と予測枯損率の推移
(W: 越冬明け、R: 再寄生、F: 第一世代)

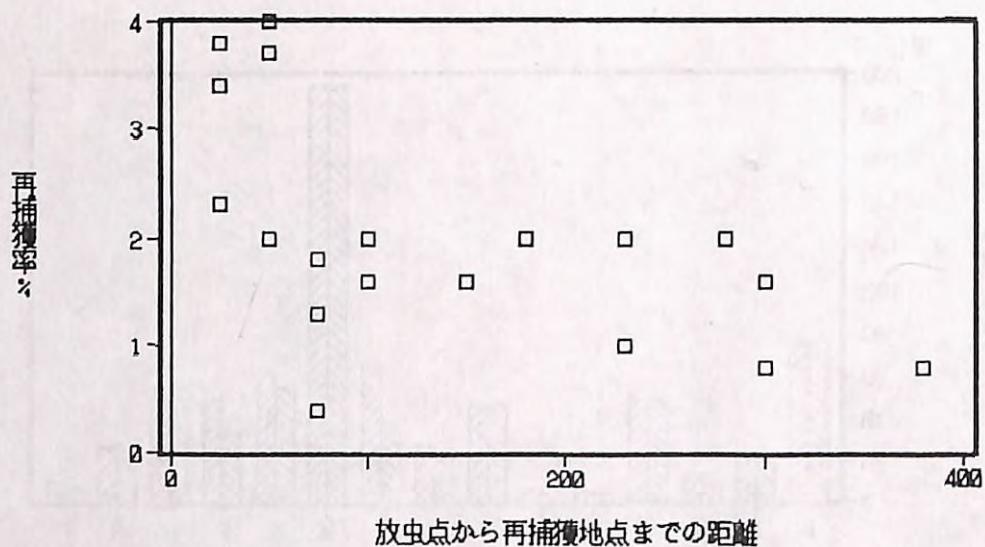


図 33 阿寒格子状試験地での再捕獲距離

表 13 支所構内でマークリリースによる再捕獲

放虫日	6.24	7.02	7.16	7.22	7.31
放虫数	440	182	288	375	1861
経過日	0.3	7	0	0	-
1	0	0	2	0	13
2	0	0	0	0	0
3	-	-	0	0	1
4	-	-	-	0	0
再捕獲率%	1.6	0	0.7	0	0.8

表 14 C 試験地でマークリリースによる再捕獲

放虫日	6.10	6.12		
放虫数	1084	418		
再捕獲距離	200m	250m	50m	100m
0.4	0	0	3	1
1	1	1	0	0
2	0	0	0	0
3	0	0	0	0
4	0	0	0	0
再捕獲率	0.1	0.1	0.7	0.2