

昆虫の電磁波による交信

——昆虫分子生物電子工学——

農林省農業技術研究所 玉 木 佳 男

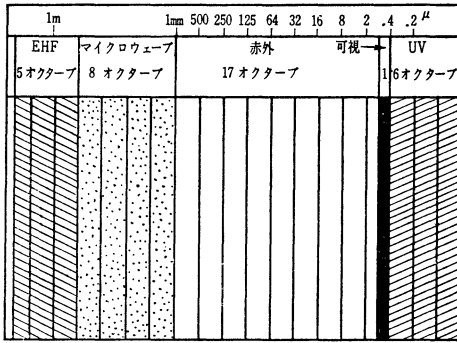
「……この一週間許りは恐ろしい冬のような気違い天気がやって来たところだった。北風が吹き荒れて、花の盛りの杏を滅茶々々にした。これはこの地方で普通、春のさきがけとなる物すごい荒天である。今日、気温はぐっと昇ったが、北の風はやっぱり吹いている。……とりこの雌に馳けつけて来た蛾はみな庭へ北の方からやって来たのである。蛾は風に乗ってやって来たのだ。一匹としてそれに逆らって来たものはない。若しも蛾が我々のものに類する嗅覚を羅針盤として持っているのなら、若しも空気に溶解する芳香分子に導かれたのなら、これは当然起らねばならぬものとは逆の方向だ。南から来たのなら風が載せた発散物で知ったと信じてよい。空気を薙ぎ払う一番の嵐と一緒に北から来たのでは、我々が匂ひと呼ぶものを遠くからどうしてこの蛾が知ったと考えたらよいのか。風の流れと逆なこの芳香分子の流れは私には容認し難いように思われる……」。以上は有名なファーブル昆虫記の一節である(岩波文庫、第14分冊、p.170)。ファーブルはオオクジャクガ、コクジャクガおよびヤママユガについての実験と観察をとおして、雌に雄が集まってくる現象が、単に芳香分子の感覚器管への接触による匂ひの感知だけでは説明できないことを知り、そこにわれわれが使っている無線電信のような何か働いているのではないかと考えた。

アメリカの昆虫学者 C. V. RILEY (1894) は昆虫同士のコミュニケーションに視覚や嗅覚以外のものが一役かっていることを推定し、これがテレパシーであり、その感知にあずかる器官は触角であるといっている。ソ連の昆虫学者イ・ア・ファブリも、その地方には数が多くないある種の蛾について実験を行なっている。それによると、この蛾は雄が最高 8 km のところからかごに入れられた雌のところへやってくるが、マークされた蛾の放飼実験の結果風向きには関係なく、風上に運ばれた雄も雌のところに戻ってきた。すなわち嗅覚器管は利用されない。また、この距離では聴覚器管も利用できないと考えられる。この蛾の雌が雄に対して発する信号は現在のところ十分には解明されていないが、これが電磁波であるということは十分に考えられ、このような通信の方法は生物学的無線通信(テレパシー)と呼ばれている。

I 夜の世界と赤外線

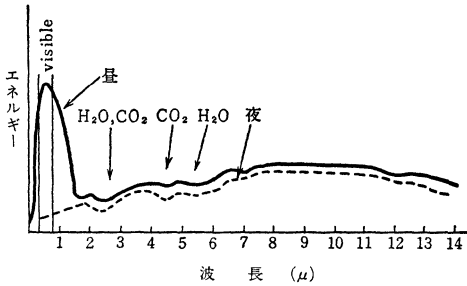
われわれがラジオ放送に使っているのは周波数 $10^6 \sim 10^7$ サイクルの電波であり、これが周波数 10^8 サイクルとなると超短波と呼んでいる。さらに周波数の高いものにマイクロウェーブがあり、これは波長で示すと 1 mm から 1 m 近くのものである。さらに周波数が高くなり波長が短くなると赤外線の領域となる。すなわち波長 1μ から 1 mm までの領域であり光と電波の中間の性質を持つといわれる。そして、周波数 10^{15} 、波長 $0.4 \sim 1 \mu$ の領域をわれわれは可視光線と呼んでいる。さらに短波長の領域に紫外線(波長 $10 \sim 10^3 \text{ \AA}$)、X線(波長 $1 \sim 10 \text{ \AA}$)、ガンマ線(波長 $10^{-2} \sim 10^{-1} \text{ \AA}$)、そして宇宙線(波長 10^{-8} 以下、周波数 10^{22})がある。すなわち、無線通信に使われる電波もマイクロウェーブも、ガストープから発せられる熱線(赤外線)も、太陽の7色の光(可視光線)も紫外線もすべて電磁波と呼ばれるものである。

太陽の光かがやく屋間はわれわれにおなじみの可視光線の世界である。可視光線の領域は7色の光で表わされるように1オクターブの波長で構成されている。これに対して紫外部は6オクターブ、赤外線は17オクターブで、そしてマイクロウェーブは8オクターブから構成されている。ひとくちにいうと赤外線やマイクロウェーブの領域は可視光線の領域よりもはるかに大きい(第1図)。しかし、これらの領域に関する知見は可視領域ほどには多くないといわれる。屋間の世界は可視光線のほかにもちろん紫外線も強い。さらに太陽の熱による赤外線も強い。これに反し夜の暗黒の世界は紫外線と可視光線がきわめて弱くなり、ここで主役を演ずるのは赤外線(IR)である(第2図)。分析化学における赤外線吸収スペクトル法でわれわれがおなじみのように、赤外線は物質によって吸収を受ける。大気を透過してくる赤外線に対して最も影響を与えるのは H_2O と CO_2 でありこれらは主として $5 \sim 7$ および 14μ 以上の波長部分をさえぎる。その結果大気が赤外線に対して開いている窓は 1μ (近赤外部)、 $3 \sim 5 \mu$ (中赤外部) および $7 \sim 14 \mu$ (遠赤外部) である(第3図)。



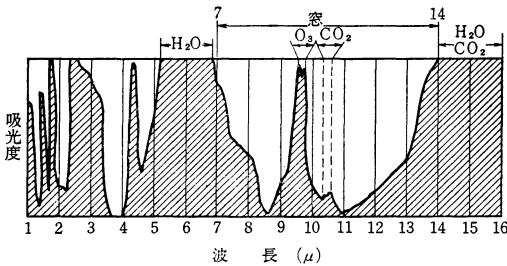
第1図 電磁波のスペクトル

ラジオの領域からX線までの間は 37 オクターブあるが、昆虫学の分野の研究はそのほとんどが可視部と近紫外部に限られている。(CALLAHAN, 1967)



第2図 昼と夜の電磁波の違い

夜は 7~14 μ の赤外部にピークがある。(HACKFORTH, 1960)



第3図 赤外線に対する大気の窓

主として、水蒸気と炭酸ガスによる吸収の結果、赤外線に対する大気の窓は、1~2.5, 3~5 および 7~14 μ にある。(CALLAHAN, 1967)

昼間の世界すなわち可視光線の世界での色は、特定の波長の光の吸収と反射の結果であることは良く知られている。しかし可視光線のない夜の暗黒の世界ではわれわれは色を見ることはできない。そこは近赤外から遠赤外にいたる赤外線の世界である。わずかに1オクターブの可視光線の領域でわれわれが変化に富んだ色彩を感じるのはわれわれがこの領域の波長に対する鋭敏なディテクターである目を持っているからである。もしも赤外線に対

する鋭敏なディテクターも持っていたならば、17オクターブに広がる赤外線が主体をなす夜の世界は、昼間の世界よりももっと変化に富んだ色彩を見せるだろう。

II 電磁波の受信機を持つ昆虫

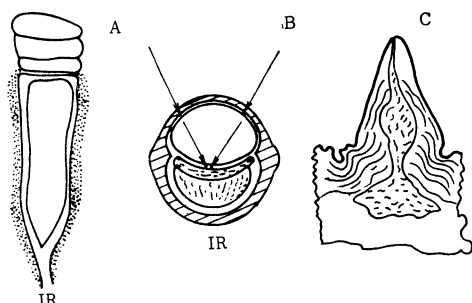
昆虫の触角がまさに電磁波に対するアンテナとしての役割を持つとの推定は比較的古くになされている。すなわち GRANT (1948) は昆虫のアンテナが赤外線の検知に適していると考えた。また、LAITHWAITE (1960) も昆虫の集合または誘引現象が香気説のみでは説明できないことを述べ蛾の触角が赤外線に対するアンテナになっていると推定した。さらに近年 P. S. CALLAHAN は主として夜行性鱗翅目昆虫の感覚器の構造を詳細に研究し、これが赤外線およびマイクロウェーブの検知器としての機能を果たすに十分な構造であると述べている。

赤外線検知器にモザイクファイバー型と称するものがある。これは色消し二重レンズ、無反射誘電体およびフィールドレンズからなっており蛾の複眼の構造にきわめて似ている。すなわち、蛾の複眼を構成する各小眼の角膜レンズは、アクロマチック二重レンズ、暗適応時の色素は無反射誘電体、そして円錐晶体はフィールドレンズに相当し、複眼全体がモザイクファイバー型の赤外線検知器としての機能を持っていると考えられる。このタイプの構造は赤外線を発する物体を像として感ずることができる。さらに成虫および幼虫の単眼はドーム状の集光レンズの焦点部分にサーミスターを埋めた型の赤外線検知器としての構造に酷似している。このように蛾の複眼および蛾と幼虫の単眼は現在われわれが非干渉性赤外線の検知器に採用している構造に良く似ている。

オオタバコガの一種のアンテナには数種の感覚器が存在する。すなわち剛毛感覚器 (Sensilla chaetica)、毛状感覚器 (Sensilla tricoidea) および有胞感覚器 (Sensilla coelonica) である。これらの感覚器はその先端の細まり方、壁の厚さおよびその材質(ワックスでおおわれていること)から誘電アンテナとしての構造を持っていると考えられ、CALLAHAN (1965) はこれらの感覚器の各部の大きさを測定した結果から有胞感覚器は 34.8 メガメガサイクル、毛状感覚器が 125~250 メガメガサイクル、剛毛感覚器が 50 メガメガサイクルの受信に適合していると考えた。すなわち有胞感覚器が 7~14 μ の遠赤外部 (FIR)、他の二つは 1~6 μ の近赤外部 (NIR) から中赤外部 (IIR) の領域の干渉性赤外線すなわち特定波長の IR の受信に関与していると考えられる。このようなアンテナの構造はその他の夜行性の蛾の多くに共通しており、一般にこれらの蛾の触角はいわゆるポリロ

ッドアンテナに酷似している。

また、オオタバコガの一種の幼虫の持つ突出感覚器 (Sensilla basiconica) は誘電コーンアンテナに似ており多数の神経を含むこの機能は従来不明とされていたがおそらく電磁波の検知に関与し、代謝や休眠を制御するものと思われる。シャチホコガ科の一種の1令幼虫の刺毛の先端は星型反射板の中央に突出した誘電ロッドアンテナに似ており、あたかも走査型アンテナのように周期的に円弧を描く。クモの一種 *Lycosa carolinensis* は完全な暗黒下で餌を攻撃するが、この持つ刺毛はラセン型で多数のヒレ状突起を持つ。この構造はわれわれがマイクロウエーブの検知に用いているアンテナと同じである。



第4図 オオタバコガの一種の3種類の感覚器は赤外線とマイクロウエーブの検知器と見ることができ、複眼(A)はモザイクファイバー型のIR検知器、単眼(B)は浸漬型のIR検知器、幼虫の刺毛(C)は円錐型誘電アンテナ(共振導波管)と見ることができ。(CALLAHAN, 1967)

III 電磁波の発信

昆虫の複眼と触角を初めとした感覚器管が電磁波に対する受信器としての機能を果たすことが推定されることは前節に述べたとおりである。では電磁波はどのようにして発信されているのだろうか。

屋間が可視光線と紫外線の世界であるに反し、夜間ではこれがきわめて弱くなることから相対的に赤外線の世界となることはすでに述べた。すなわち赤外線に対する大気窓は $1.3\sim 2.4\mu$ 、 $3\sim 5\mu$ および $7\sim 14\mu$ である。屋間活動するチョウ類の翅が可視光線の下で華麗な色彩を示すように、夜行性の蛾の翅は赤外線の下で特異なパターンを示す。もしもわれわれが赤外線に対してもすぐれた視覚を持っていたら、夜行性の蛾の色は屋間のチョウのように華麗に見えるかもしれない。ここで夜行性の蛾自身はすでに述べたようにすぐれたIRディテクターを持っているのであるから彼ら自身は夜間の赤外線の反射と吸収の結果である“色彩”を重要な情報として

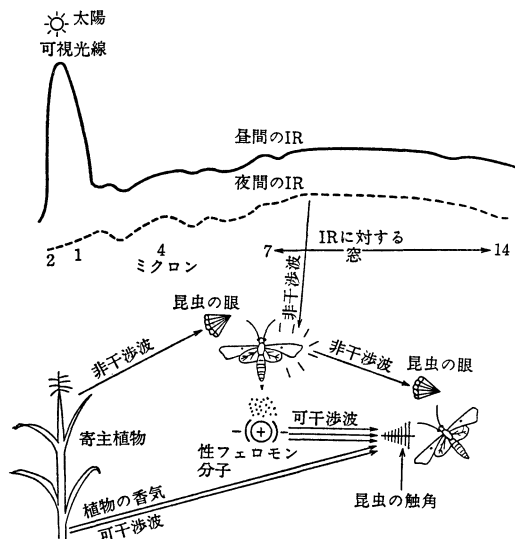
利用していると考えられる。

赤外線の単なる反射や吸収の他に昆虫自身は赤外線を発信している。翅の振動によって昆虫の体温が上昇することは良く知られているが、この温度は夜間の気温よりも $4\sim 18^\circ\text{C}$ も高くなるといわれる。そしてこの温度上昇の程度は種によってほぼ一定である。たとえばエビガラスズメの近縁種の飛行時の胸部温度は 39°C でありその時の気温より 15°C 高い。これは 9.25μ の赤外線に相当する。この蛾の胸部面積を 1cm^2 として 39°C のときのエネルギーを計算すると 5×10^{-2} ワット/ cm^2 、 1km 離れたところでは 1.6×10^{-12} ワット/ cm^2 となり、赤外線検知器で十分に検知できる。またオオタバコガの一種の成虫の飛行時の温度上昇によって生ずる赤外線も $9\sim 11\mu$ の範囲にある。これらはいずれも $7\sim 14\mu$ の大気窓の範囲にあり、霧や雲などにも妨害されることなく遠方まで到達する。また、昆虫体からの赤外線は翅の振動による反射によってチョッピングを受け、これが種に独特のシグナルとなることが考えられる。さらに飛行時や停止時の翅の振動は決して一様ではなくそこにはあるリズムがあることが知られている。

以上の昆虫体の発する赤外線のほかに植物体もこれを発する。夜間に上空から赤外線写真をとると植物のある畑の部分と何もない裸地や道路とはめいりょうに区別することができる。これは植物体がバックグラウンドよりも高い温度も持っていることを示し、赤外線を発していることを示す。たとえば、トウモロコシは外気温より 2°F 高い温度を持っている。さらに、月夜には植物体が蛍光 (1μ 領域のNIR) を発することが知られている。これら植物体から発せられる赤外線は夜行性昆虫がその寄主植物を見出すにあたって重要な手がかりとなっていると思われる。寄主の発見に関しては屋間に活動する昆虫においても、屋間の可視光線や紫外線による妨害をなんらかの方法で除去することにより赤外線を利用している可能性がある。たとえばある種のハエが屋間太陽によって暖まった黒いアスファルトの路面に集まっていることが観察されている。また THORSTEINSON (1958) はウマバエの誘殺装置として黒い球体を利用する方法を考案した。このトラップの中心をなす黒い球体は太陽光線によって暖められ赤外線を放射していると考えられる。

屋間の赤外線を利用する話が出たところでもう一つ屋間の赤外線について述べよう。赤外線の中でも近赤外部(NIR)の $0.7\sim 1.1\mu$ と中～遠赤外部(IIR, FIR)の $2.5\sim 14\mu$ とを比較すると前者は屋間に強く、後者は相対的に夜に強い。ここで緑色植物の赤外線透過性を見ると NIR は約 50% 透過するが可視光線や IIR, FIR は

ほとんど透過しない。昆虫の休眠がその幼虫期の昼と夜の周期によって決定される場合は多いが、この場合、明期一暗期のことばで示されるように、一般に可視光線の周期として扱われている。しかし、幼虫期を緑色植物の内部で過ごす習性を持つ昆虫では可視光線が影響を与えることはその透過性から考えて不可能であり、いわゆる明期すなわち、昼間の長さとしての作用因子は昼間に強度大で透過性の大きい近赤外部の波長であると考えられる。要するにこの場合休眠を決定するのは明一暗の周期ではなく NIR-IIR-FIR の周期である。



第5図 夜の赤外線環境下における夜行性蛾の
 交信機構 (CALLAHAN, 1967)

IV 性フェロモンと電磁波

性誘引物質ということばでおなじみのいわゆる性フェロモンを初めとしたフェロモンの研究は最近非常に注目されてきている。これら一群のフェロモンのうち交尾行動に関与するフェロモンは雌または雄が分泌する化学物質であり同種の異性の臭覚器官を通じて作用し、誘引あるいは興奮などの結果として、交尾行動をとらせるものである。臭覚現象の機構の詳しいことはまだわかっていないが一般に揮発性の香気分子が臭覚器官の受容器に接触することによって香気分子の認知が行なわれると考えられている。昆虫の雄が遠方にいる雌を発見しそこにやってくるのも性フェロモン分子がこのように作用しているのだろうか。香気分子の認知が香気分子の感覚器への接触を必要とするなら、冒頭に引用したファーブルの観察はどういうことになるのだろうか。香気分子が風に逆らって飛んで行かなければならない。

さて、物質の原子と分子の振動と回転はそれぞれ固有の電磁波を発生することが知られている。振動によって発生するのは赤外線であり、回転によって発生されるのはマイクロウェーブである。この場合、直鎖化合物の回転は強いマイクロウェーブを発生する。すなわち分子はそれ自体が赤外線やマイクロウェーブの発信体である。そして分子の構造によってそれぞれ定まった IR やマイクロウェーブを発生する。ここで現在までに分離同定された性フェロモンの大部分のものが直鎖化合物であることに注目していただきたい。他方、昆虫の触角にある種々の大きさの感覚毛は、それぞれある特定の波長の IR やマイクロウェーブに同調したアンテナであると考えられる。性フェロモンの認知にあたって、分子の発生する電磁波を昆虫が受信しているとすれば分子と感覚器との接触は必要ない。したがって冒頭に引用したファーブルの観察も納得がゆくわけである。ただし、この場合でも風向にまったく無関係というわけにはゆかない。なぜならば電磁波のエネルギーは発信体からの距離の二乗に反比例するわけであるから香気分子に近いところほどエネルギーは強く、したがって受信しやすいわけである。

分子が発生する電磁波そのものはきわめて弱いものであると考えられるが励起された分子は比較的強い電磁波を発生する。また励起された分子中を通過した電磁波は増幅されることが知られており、この現象を分子増幅(メーザー)という。昆虫が性フェロモンを分泌する場合、翅を細かく振動させていることがある。この翅の振動はすでに述べたように 6~18°C の温度上昇をもたらすフェロモン分子の特定の電子を励起し、分子全体として高いエネルギー準位に移させる。そして、この高エネルギー準位の状態から放出された性フェロモン分子はメーザー様効果とあいまって強い電磁波(赤外線とマイクロウェーブ)を放出し遠方にいる異性をひきつける作用を表わすと考えられる。

SHOREY と GUSTON (1965) はイラクサキンウワバの性フェロモンの生物試験法を考案する過程で一つのやっかいな問題に直面した。すなわち一つの臭覚試験装置の一端にフェロモンを含む抽出物を置き、反対の端に小さな灯をおくと雄蛾はすべて灯のほうに集まってしまう、抽出物の効果の推定ができなくなってしまう。同様の現象はすでに1913年にファーブルによっても観察されている。オオクジャクガの1頭の雌は8晩の間に150頭の雄を呼び寄せるが、雌の入ったかごに集まっている雄もわずか1本のローソクの灯によって簡単に雌を見捨て、灯のほうに集まってくる。さらに、HENNEBERY と HOWLAND (1966) はイラクサキンウワバの処女雌を近くに置いた

ブラックライトの誘蛾燈が処女雌を併置しない誘蛾燈の20~30倍の数の雄を誘殺することを観察している。同様の処女雌併用誘殺燈の効果がHOFFMANら(1966)によってスズメガの一種でも認められ、わが国ではアメリカシロヒトリについて湯嶋と野口(1968)によって初めて確認された。これらの結果は通常、雌の分泌するフェロモンが走光性へのひき金の効果を持っており、フェロモンで誘引され興奮した雄も光を認めると雌に対する反応から光に対する反応へとその行動が転換されるのだと説明されているが、これは説明にはなっていない。分子の励起は光によっても行なわれることに注目しよう。フェロモンの分子が光のエネルギーによって励起され、メーザー様の作用によって強い電磁波を放出しているとするれば、光源に近いところほどその電磁波のエネルギーは大きく、したがってフェロモン分子からの情報は燈に近いところのほうが強力であると考えられる。先に述べたSHOREYとGUSTON(1965)の観察の場合も試験装置のフェロモンのある一端に比較して燈のある他端のほうが光によるフェロモン分子の励起はいちじるしく、したがってフェロモンからの情報は実際のフェロモン分子の濃度の低い燈のある一端のほうがむしろ強いと考えられる。また、処女雌併用誘殺燈に多数の雄が飛来する現象も、処女雌の分泌するフェロモンの情報が同様の作用によって光によって増幅されたと考えられることができる。

なお、誘蛾燈についてひとことつけ加えるならば、誘蛾燈に集まるといことは、これから発せられる赤外線を遠方から認めた結果であり、紫外線には誘引効果はなく逆に行動を抑制し致死効果がある。たとえばオオタバコガの一種の成虫は2537Å下ではまったく活動せず摂食もせずにそのまま死んでしまう。すなわち、夜行性昆虫の誘蛾燈への反応はまず熱せられた管球壁からの遠赤外部波長を認知し、これに向って飛行し、その近くまでくると紫外部波長に反応して複眼の明適応が起こって行動が静止すると考えられる。

最後に性フェロモンからの電磁波利用のおもしろい方法について述べよう。すなわち、フェロモン分子を赤外線またはマイクロウェーブの発信体(たとえばゲルマニウム)中に封入し小さい電極またはヒーターでフェロモン分子を刺激することにより、赤外線またはマイクロウェーブ領域の一種のプラズマ放射器を作れる可能性がある。もしも、これに成功したら、これは各害虫に対して種特異性のきわめて高い永久的なトラップとなるだろう。

あ と が き

以上はアメリカ農務省(Southern Grain Insects Res.

Lab., Tifton, Georgia)のP. S. CALLAHAN博士の“昆虫分子生物電子工学”と称している説の概要である。CALLAHAN自身もことわっているように、これはまだ仮説の域をでていない。現在、彼はこれを実験的に証明する仕事を進めており、すでにこの説の一部を裏づけるデータも若干は見うけられるようである。

殺虫剤の大量施用が殺虫剤抵抗性や人畜毒性などの非常にやっかいな問題を提起していることについてはいまさらいうまでもない。毒物質を自然界へ大量に投与するいわゆる殺虫剤一辺倒の防除法は大いに反省されなければならないところである。昆虫の行動を制御しているいろいろのしくみを解き明らかにし、これを利用することは一つの新しい害虫防除につながる。昆虫が彼らのコミュニケーションの一手段として用いている化学物質、すなわち、フェロモンについては近年多くの人によってその重要性が認識されてきた。自然界における昆虫の行動を制御しているものを利用する防除法には一つの大きな利点がある。それは抵抗性の発現ということがほとんど考えられないということである。たとえば性フェロモンについて見ると、これを利用した防除法に対して抵抗性を獲得するということは、その昆虫の種の絶滅を意味していることである。

敵の情報を知らうとすればまず暗号を解読しなくてはならない。害虫のこぼさを知り、これを利用することは彼らを倒すための有効な手段を与えることとなろう。フェロモンは確かに彼らのこぼさである。しかし、その他にもまだまだわれわれの知らないしくみが働いていることは十分に考えられることであり、その意味でも電磁波による交信は一つの見逃げせない問題を提起していると考えられる。もとより筆者はエレクトロニクスについてはまったくのしろうとであるので、この分野の研究の紹介には不適任であるが、この拙文がエレクトロニクスと昆虫の両方に興味を持つ方の目にとまれば幸いである。

終わりに、この紹介をするについては当研究室の湯嶋健博士のご教示を受けたことを記し、感謝の意を表する。

参 考 文 献

- CALLAHAN, P. S. (1965): Ann. Ent. Soc. Amer. 58: 159~169.
 ——— (1965): ibid. 58: 727~745, 746~756.
 ——— (1965): Nature 207: 1172~1173.
 ——— (1965): Proceeding North Central Branch—E. S. A. 20: 20~31.
 ——— (1966): J. Georgia Ent. Soc. 1: 6~14.
 ——— (1967): Miscellaneous Publications Ent. Soc. Amer. 5: 315~347.
 SNOW, J. W. & P. S. CALLAHAN (1967): Ann. Ent. Soc. Amer. 60: 1066~1071.