

第8回

人間の目・昆虫の目・機械の目 自然界における昆虫と植物の共進化

授業の目的: ヒト、昆虫、機械の目の機能を比較し、その違いを理解する。
昆虫と植物を中心に共進化した理由、過程を学ぶ。



KYOTO

京都大学
UNIVERSITY

進化の背景

地球上には約26万5000種の陸上植物が生育している。
そのうち、9割の23万5000種が花を咲かせる被子植物である。



裸子植物(イチヨウ、
マツ、スギ、ヒノキ)

高度2万メートルの成層圏から1万メートルの深海には、
約3,000万種の動物、約50万種の植物、約8万種の菌類などが生息

45億年前:地球の誕生

35億年前:生命の誕生

5億年前:菌類、藻類の繁栄、三葉虫、魚類の出現

4億年前:植物の上陸

3億年前:シダ種子植物の繁栄、は虫類、両生類の出現

2億年前:裸子植物、恐竜、ほ乳類、鳥類の出現

1.5億年前:花の誕生、被子植物の誕生

6500万年前:恐竜の絶滅

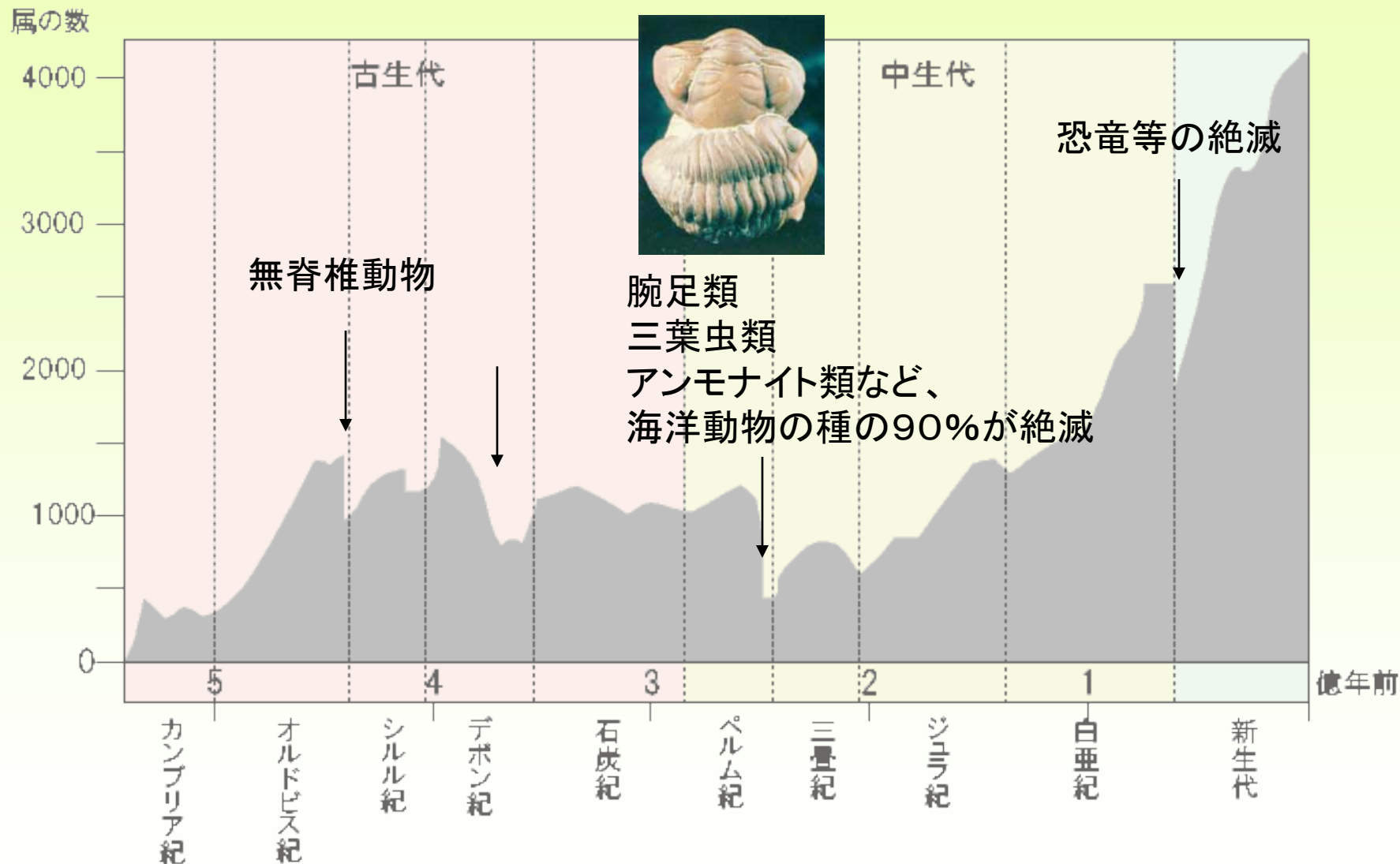
5000万年前:ほ乳類の発展

200万円前:人類の出現



被子植物

生命の大量絶滅



高くなる植物（4億年前）

植物の上陸からわずか3000～4000万年後（4億年前：デボン紀中期）には、植物が木になり始めた。

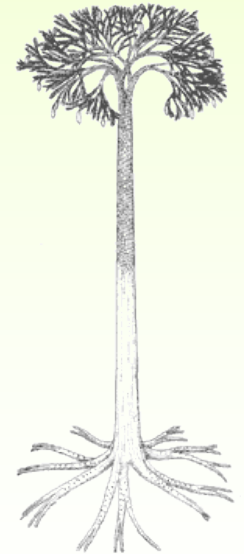
植物は、木になることで、**繁殖のための孢子（種子）**をより広く散布し、葉をより高く繁らせて**有利に光合成**できるようになる。

3.5億年前（石炭紀）には巨大な木本生のシダ植物の繁栄に伴い、植物を食べる動物や、分解する微生物は、植物を追って進化した。植物食の節足動物が進化し、羽をもつ**昆虫類**となり、木々の間を飛んでいた。植物は、対抗手段として**種子に固い皮**をつけるなど、さまざまな工夫をこらした。昆虫類も、より**強靱な口器**などを発達した。

羽をひろげた幅が43cmにおよぶ原始的なトンボ、原始的なゴキブリ類、バッタ類や植物の汁を吸う甲虫、クモ類、両生類などが繁栄



木生シダのヘゴ



は虫類の登場（3億年前）

両生類の中から爬虫類が生まれ、両生類とは異なり、水辺を離れることができ、自由に移動できるようになった（爬虫類は、空気はとおしても、**水分をもらさない卵の殻を発明したため**）。



最古の爬虫類
ウェストロジアナ・リジアエ

は虫類から恐竜が登場

裸子植物は、針葉樹類、ソテツ類、イチョウ類、シダ種子類のそれぞれにおいて、多様化の中で最盛期



針葉樹のナンヨウスギ
(アローカリナ)



初期の草食恐竜
ヘテロドンサウルス
(体長 約80cm)



恐竜の繁栄（2億年前）と衰退の間の植物

ジュラ紀(1.5億年前)には、体を大きくすることで、高い木の食物を独占し、肉食動物にも負けなかった巨大恐竜が栄えた(5000万年の間に小型から大型に進化)。6500万年前には絶滅。

この間、被子植物、つまり花をつける植物が広がった。被子植物とは、子房という組織で、種子が完全につつまれるようになったものである。裸子植物の生殖は、風まかせである。大量に花粉をつくって、風が吹けば飛んでいき、運よく受精する。

花は、被子植物と昆虫の共同作業によって進化した(共進化)。花粉を食べていた虫に付着した花粉が、雌しべに運ばれた。植物は、虫たちに花粉をたくさん運んでもらうため、花粉の形を変え、湿り気を増やしていき、花や匂いに加えて、蜜をつくりだした。ガやチョウもそれに応じて、蜜を吸うために、ストロー型の口を進化させた。それは、風まかせで花粉を飛ばすよりも、はるかに確実な方法だった。



バロサウルス
20～27m

現在、生きている裸子植物は、500種、被子植物は、24万種を数える。(裸子植物の受精は、受精が完了するまで半年から1年もかかる。ところが、被子植物では、早いものでは3分程度、遅いものでも24時間程度で完了する。また、花粉を作る労力は虫が運んでくれるなら、少なくてすむ。被子植物は、そのエネルギーを成長にふりむけることができた。



被子植物の進化（1億年前）

被子植物は、種子の散布についても改良をおこなった。**子房の壁は、果実**として発達し、動物の食糧として利用されるようになったのである。

哺乳類は、恐竜と同じ頃に誕生していたが、ほとんどは昆虫食だった。白亜紀(1億年前)になると、被子植物のつくる果実を食べるものがあらわれた。**果実を食べた動物は、離れた場所で糞をして、種をまく**ことになった。被子植物は、哺乳類とも手を結んだのである。



さらに、6500万年前の恐竜の絶滅により、小型の夜行性動物にすぎなかった哺乳類の本格的な発展がはじまった。

その後、地球は寒冷化へと進んだ。とくに4000万年前からの気温の低下はいっそう速度を増していったと考えられる。



気候条件（500万年前）

過去500万年の間は、周期的な寒冷化と温暖化がくり返されてきた。とくに、最近70万年の氷期と間氷期のくり返しの周期は、約10万年であり、木星や土星の引力で地球の軌道が周期的に乱され、日射量が変動することが原因と言われている。

これまでのような常夏の環境から、夏冬の温度変化が大きくなり、嵐も発生しやすくなった。このように変動の激しい環境では、すばやく成長し、子孫を残す生活型の植物が有利である。きびしい冬をやりすごす簡単な方法は、一年草になって、種子として休眠することである。さらに、低温化は、蒸発量の減少をまねき、乾燥化をひきおこした。このような環境は、大きな樹木の成長をおさえ、草原を拡大した。



花の進化

実際、被子植物のなかでも、中生代から、その科があらわれていた、より**原始的な離弁花類**で、大きくなるものや長寿な種が多く、新生代になってから、その大部分が**進化した合弁花類**や単子葉類には、一年草も含め、短命で小さな植物が多くなる傾向がある。イネ科やラン科を生みだした単子葉植物は、タケやヤシを例外として、すべて草本ばかりである。被子植物で、もっとも進化した合弁花類のキク科、ナス科などは、ほとんどが新生代にはいってあらわれ、キク科だけで2万種、ナス科2000種、サクラソウ科1000種と繁栄している。しかし、そのほとんどが草本性のものである。



離弁花
ハクサンフウロ



合弁花
キキョウ

花と昆虫

葉の進化した花は昆虫に、色、形、香り、触感、蜜の味などに関して工夫をすることによって、パートナーの虫にアピールできるように進化してきた。さらに実をつけると、植物と鳥、植物と哺乳類の関係によって進化する。



花の分類

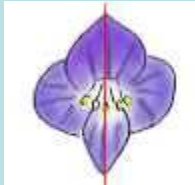
- 1 風媒花 (ブナ、スギ、イネ科)
- 2 水媒花 (水中植物、バイカモ、セキショウモ)
- 3 虫媒花
- 4 鳥媒花
- 5 コウモリ媒花 (夜咲く花に多い)

花の形

花冠の種類



放射相称



左右相称

花はもともとシュートが変形したもののなので、葉と同様に軸の周りに螺旋形となっていた。進化が進むとシュートの腋芽という形で花芽が形成され、同心円上になる。さらに進化すると左右相称となる。



ろうと形



高盆形



車形



釣り鐘形



筒状花



つぼ形



くちびる形



蝶形



舌状花

(筒状花が変化したもの)

キクのように頭状花序
(頭花)では、中央が筒状花でまわりが舌状花

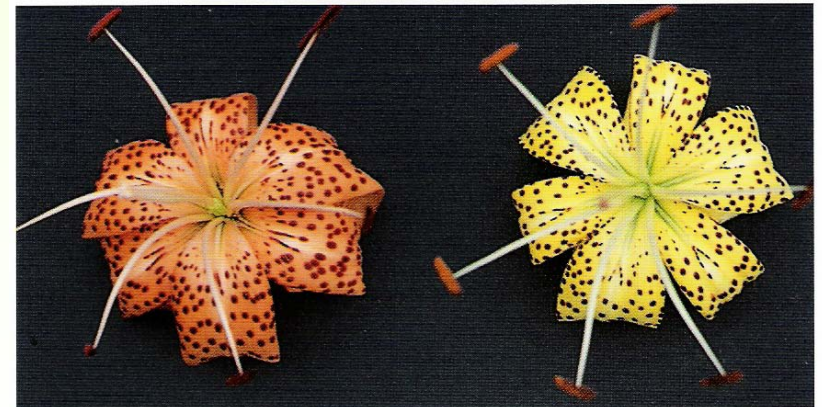
花の形と昆虫

・ハナアブ媒花は、花の形がコスモスの花のように皿状で、葯や柱頭、蜜腺（蜜の出るところ）が露出しており、ハナアブなどが扱いやすい

・チョウ媒花は、花の形がユリの花のように深い漏斗（ろうと）状で、雄しべや雌しべが長く突き出ており、蜜腺が深い位置にある



フクジュソウとハナアブ



母種オセロリ(右)と変種オウゴンオセロリ(左) レモより徳休(野田昭三氏撮影)

<http://blog.so-net.ne.jp/asagi-iro/>など

大原 雅:花の自然史, 北海道大学図書刊行会などより



KYOTO

京都大学
UNIVERSITY

花の形と虫の口

・山ツツジはアゲハ蝶媒花で上の花びらに濃い斑点があり、その中心に蜜に通じる管の入り口がある。山ツツジを訪れた昆虫はアゲハ4種が43回、トラマルハナバチが28回、その他5回であるが、ツツジの管の長さは10-15mm、アゲハの口のストローは22-30mm、マルハナバチは10-15mmでようやくとどく。

(山ツツジは実際にはマルハナバチよりもアゲハに来て欲しい。アゲハはひらりひらりと飛んで遠くの株へと移動するが、ハチは効率第一主義で短く飛んで隣から隣へ移る。)

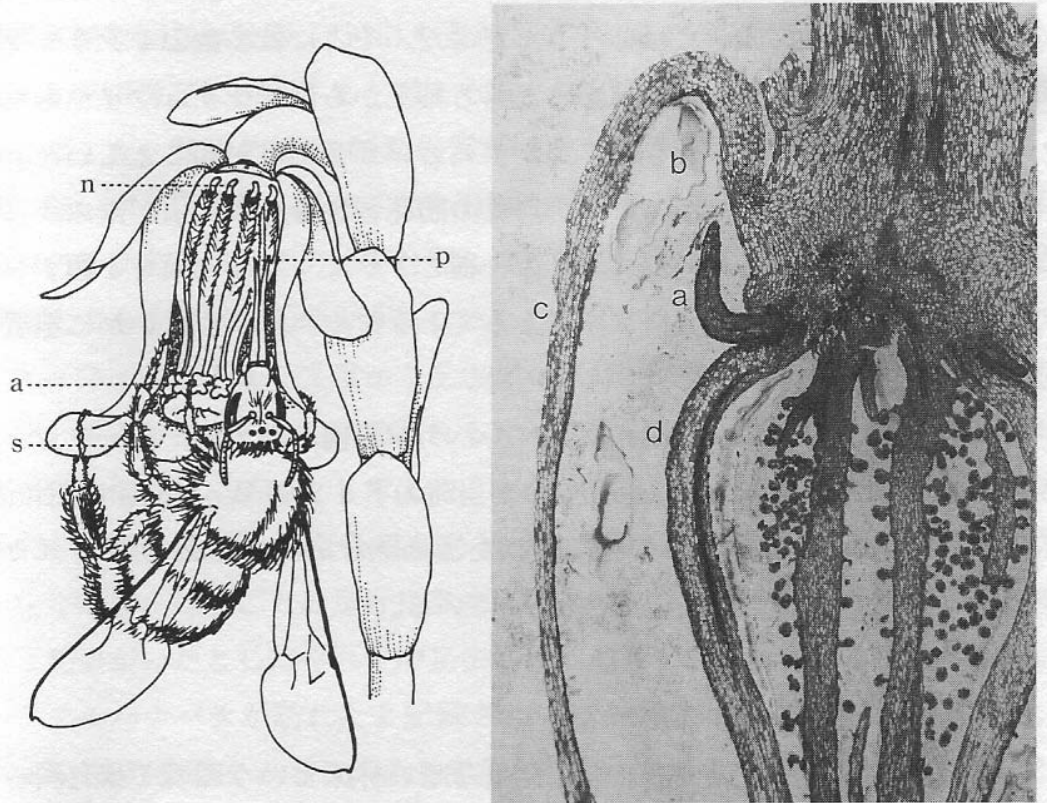


図4 左：ギンリョウソウの花と訪れたトラマルハナバチ(田中, 1978より)。手前の花弁をはずし、ハチの口吻の先端が蜜腺に達した状態を示す。a：葯, n：蜜腺, p：口吻, s：柱頭。右：ギンリョウソウの花の縦断切片(森田竜義撮影)。a：蜜腺, b：貯蜜部, c：花弁, d：子房

虫媒花の花型

露出型：甲虫、ハナアブ、ハエ、ハナバチ
短筒型（浅筒型）：ハナバチ
長筒型（深筒型）：チョウ、スズメガ
細管型（管型）：チョウ、ハナバチ
はい込み型（仕掛型）：ハナバチ
旗状型：ハナバチ
下向き型：ハナバチ
長蕊型：アゲハチョウ、スズメガ



昆虫の目

ミツバチ: 1個の複眼に5000個の個眼

ヒト: 網膜にある視細胞の数は1億2000万個

ヒトに比べると非常に低い解像度であるため形の認識は正確にできない。そのことより、花は色やにおいでアピールする。

ミツバチは色を区別できると同時に近紫外を識別できる。

チョウ、ハナアブも近紫外に反応する。

人間の可視領域では、ハナアブは黄色、モンシロチョウは赤を好む。

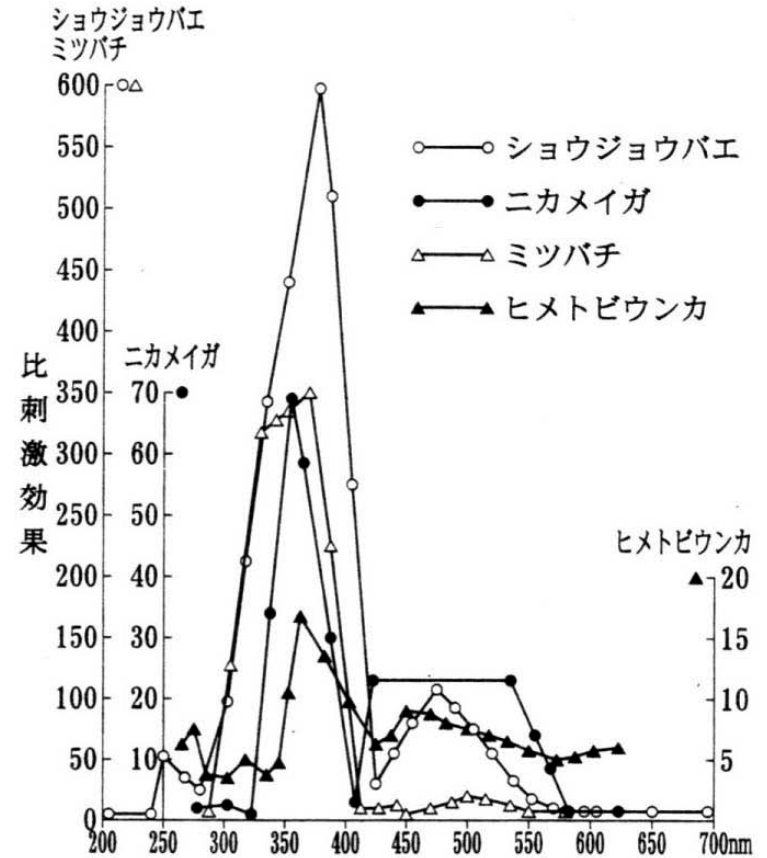
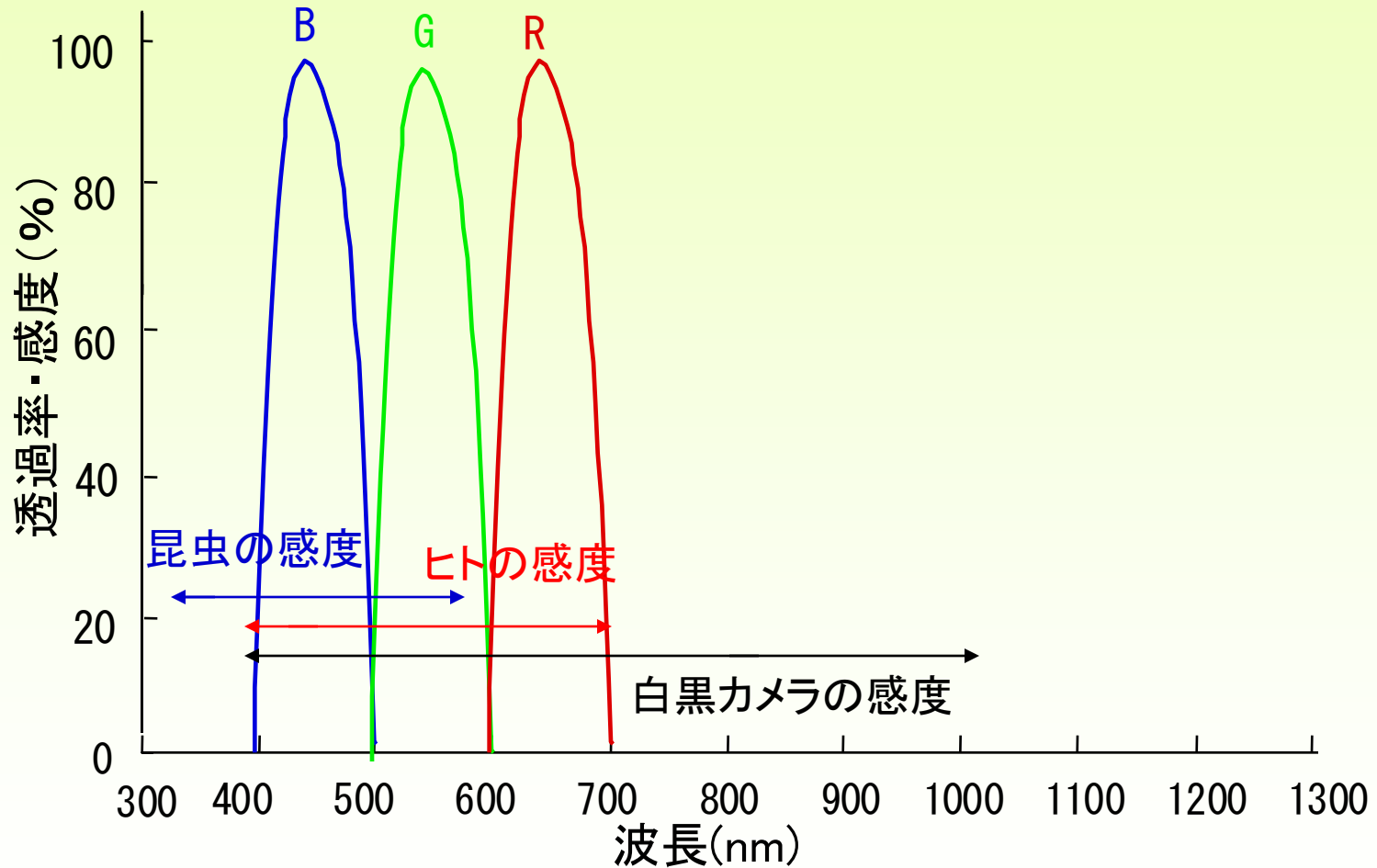


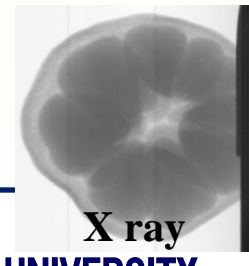
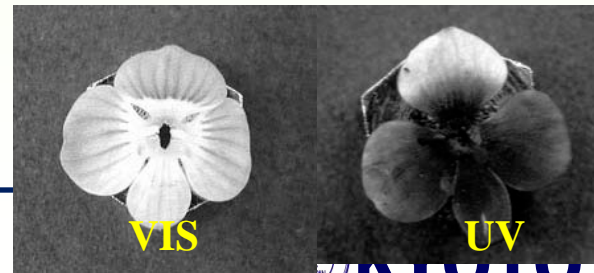
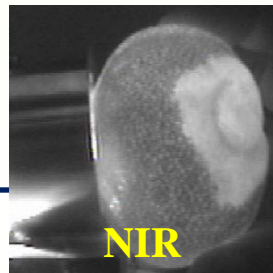
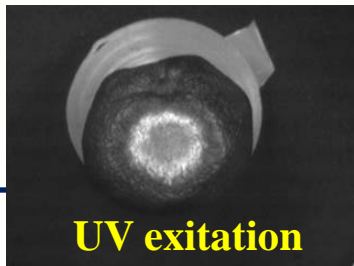
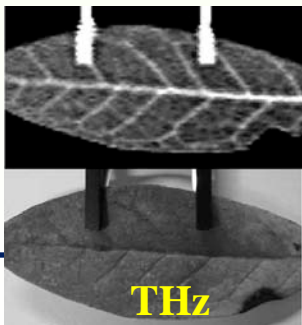
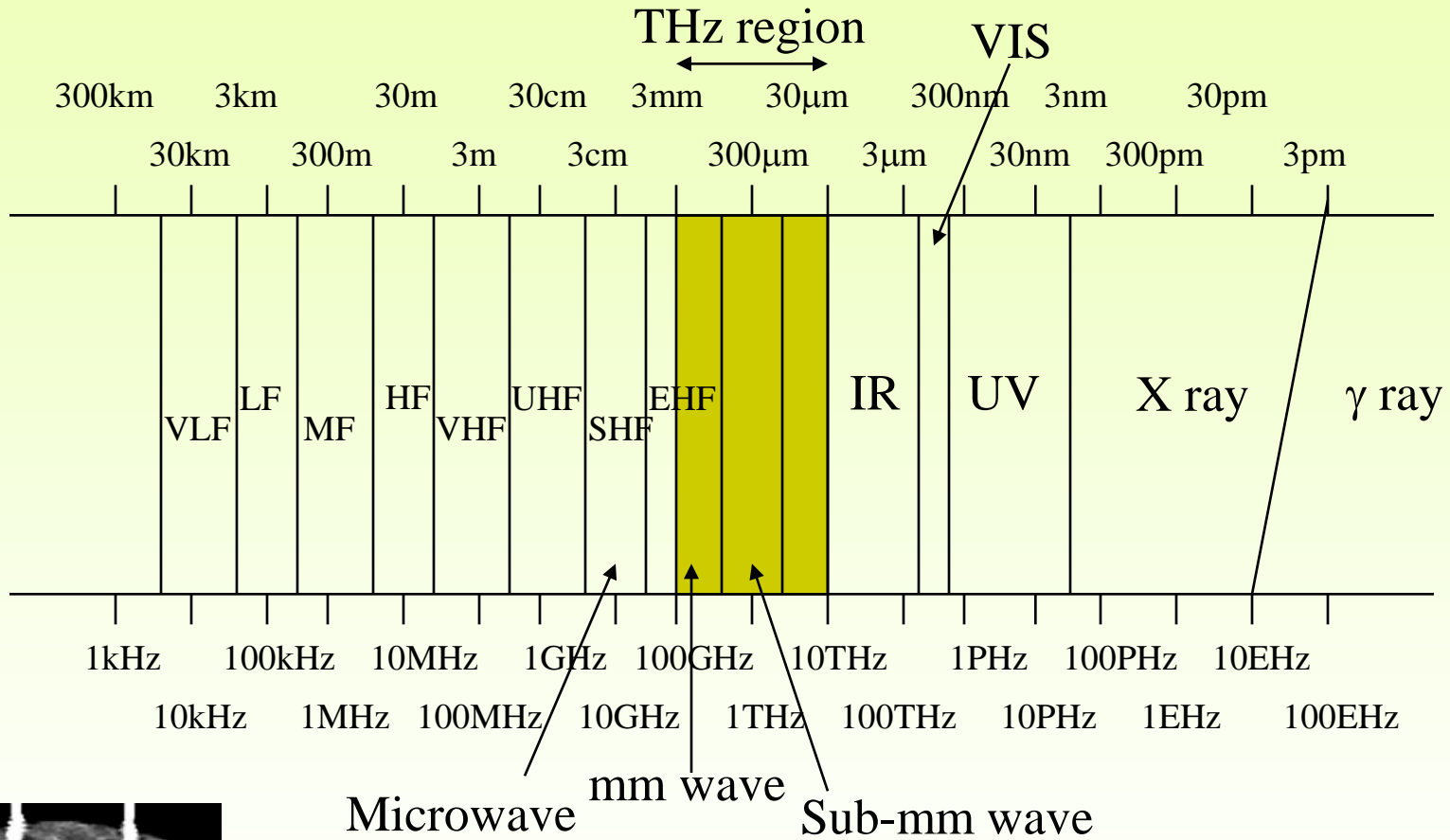
図4 複眼の感度曲線 (八木, 1957を改変)

注) 比刺激効果 = 波長別光源への移動個体 / 普通電球光源への移動個体

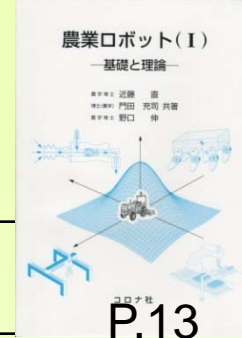
昆虫、ヒト、マシンビジョンの視覚の感度



種々のマシンビジョンによる画像



ヒトと一般的なCCDカメラの比較



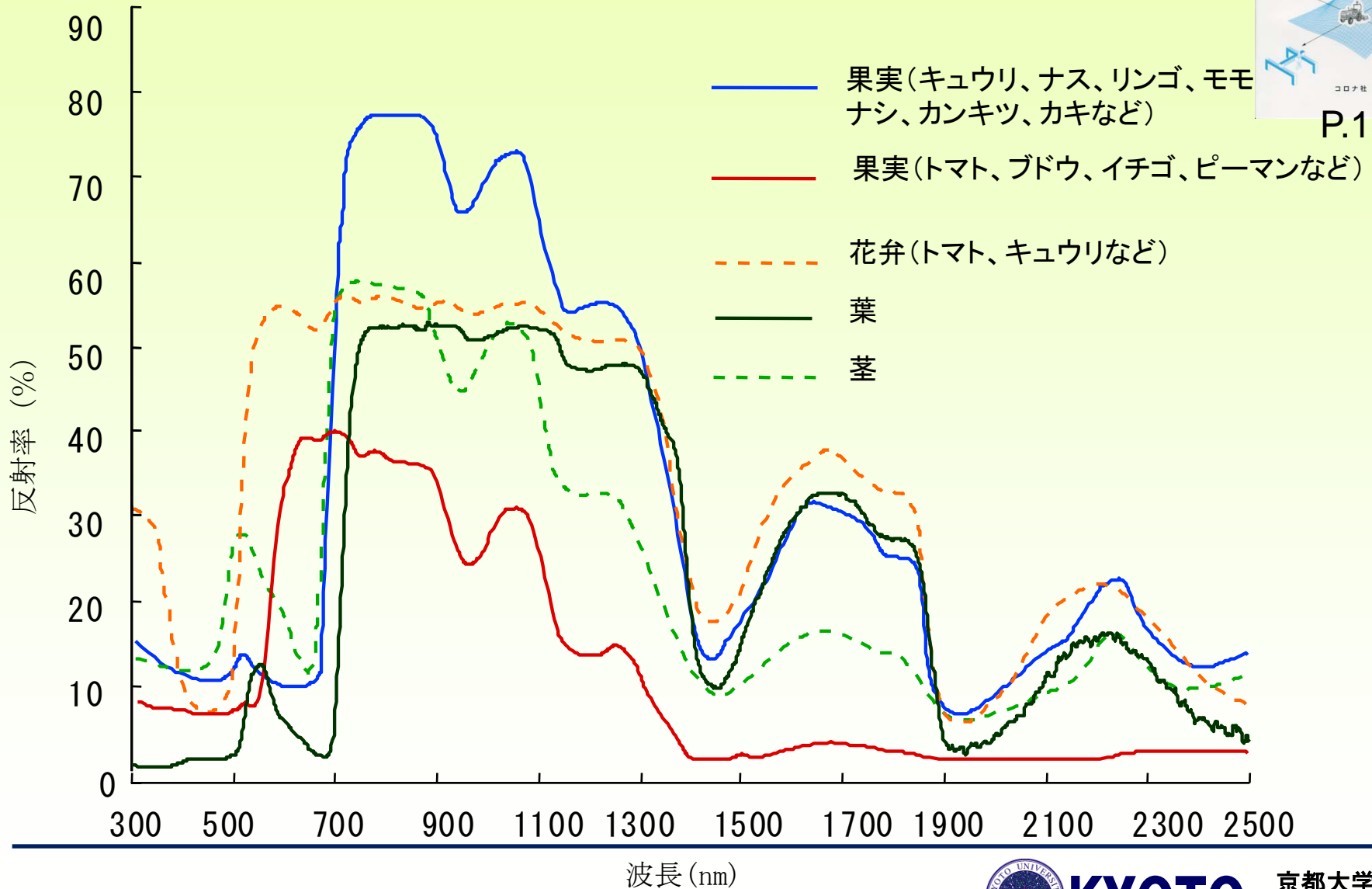
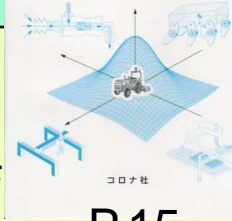
| | ヒト | CCDカメラ |
|--------|---|---|
| 焦点距離 | f17.1mm(可変) | f12mm(2/3CCDとしたときの画角から) |
| 画角 | 約50° (視認角度: 水平180°、 垂直90°、ピントの合う範囲4°) | 約49° (標準レンズ40° ~ 50°) |
| 口径 | F3.4 | F1.4 |
| 視細胞の寸法 | φ1.5μm | 12μm × 12μm |
| 分解能 | 10,000 × 10,000 | 640 × 480 |
| 被写体分解能 | 約0.07mm (明視の距離25cm) | 約0.7mm (レンズによる) |
| 最低視認照度 | 0.005 lx | 約9 lx |
| 感度 | ISO10 ⁹ ~ ISO10E400 | ISO1600相当 |
| 視認発光間隔 | 約10Hz | 約30Hz (現在では1280 × 1024画素を カラーで75Hz走査可能) |

紫外線

- ①UVA 波長 400～320nm ブラックライト（結婚式場などの照明）
- 伸長抑制
 - アントシアン色素の発現
 - ミツバチなどの昆虫は行動する
- ②UVB 波長 320～280nm 健康ランプ（日焼けサロン）
- 日焼け
 - 皮膚ガンをおこす可能性
- ③UVC 波長 280～ 殺菌灯（エアータオル）
- 太陽から放射されるUVCは、地球上空の「オゾン層」でほぼ吸収



植物各部位の反射特性 (Spectral Reflectance)



花の色

代表的色素

1. フラボノイド

a)フラボン、フラボノール

(キンギョソウ、バラ、アサガオ、チューリップ、ユリ、コスモス等の
白～クリーム色)

b)カルコン、オーロン

(ダリア、ベニバナ、カーネーション、ボタンの黄～赤色)

c)アントシアニン

(イチゴ、リンゴ、ブドウ、ナス等の赤、紫、青色)

2. カロチノイド (カロチン類、キサントフィル類)

(タンポポ、レンギョウ、ヤマブキ、キンセンカ、バラ、パンジー、カボチャ、
シュンギク等の黄色、トマト、スイカ、サンザシ、トウガラシ等の果物の赤、ホ
オズキ、マンゴウ、セイヨウカボチャ、トウモロコシ、カキ等の黄色、橙赤色)

3. ベタレイン (ベタシアニンとベタキササンチン)

(アカザ目とサボテン目の植物の花の赤、赤紫、紫、黄色)

4. クロロフィル

(つぼみの緑色)

カロチンの黄色：紫外を反射

フラボンの黄色：紫外を吸収

同じ黄色でも色素を使い分けてガイドマークを作る。



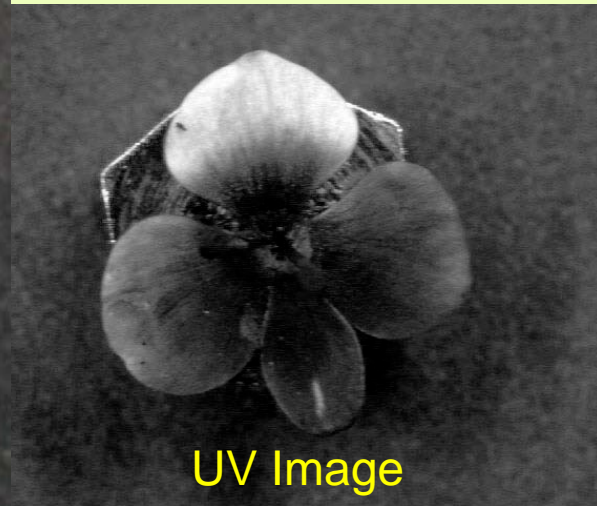
KYOTO

京都大学
UNIVERSITY

ネクターガイド



イヌノフグリ



UV Image

20 第1部 色

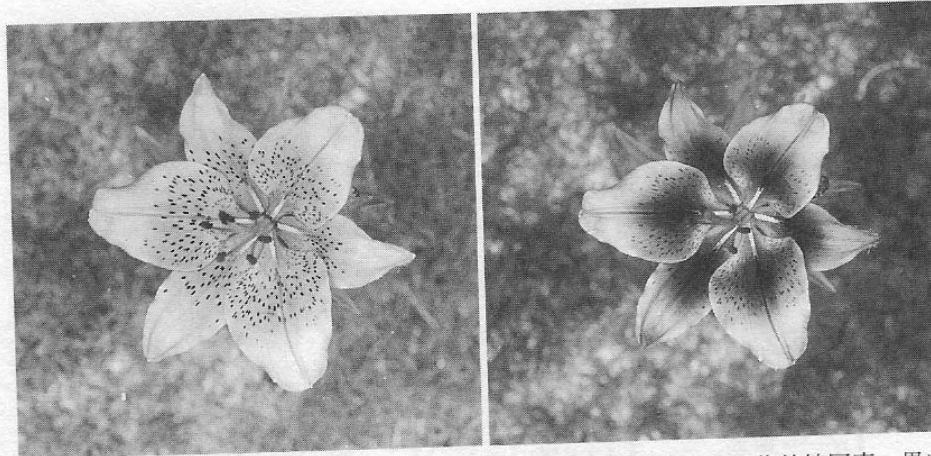
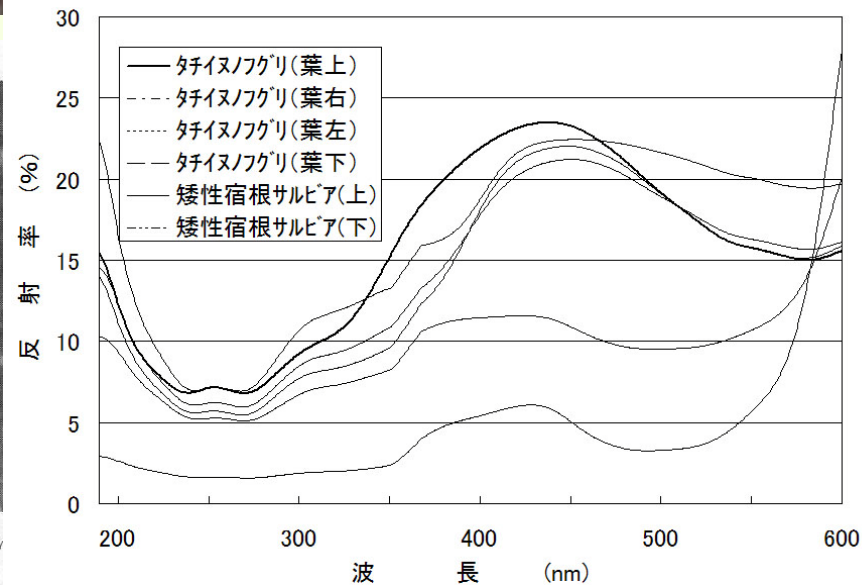


図3 エゾスカシユリの紫外線吸収反応(林原図)。左は可視光, 右は紫外線写真。黒い分が紫外線を吸収している。



KYOTO

京都大学
UNIVERSITY

野生の花の色と トラマルハナバチが訪れた花の色

| 花の色 | 白 | 紫 | 黄 | 緑 | 赤 | 青 | 褐 | 黒 | 計 |
|-----------|------|------|------|------|------|-----|-----|-----|------|
| 虫媒花の種数 | 493 | 329 | 277 | 131 | 101 | 15 | 9 | 4 | 1359 |
| 百分率(a) | 36.3 | 24.2 | 20.4 | 9.6 | 7.4 | 1.1 | 0.7 | 0.3 | |
| 訪れた花の種数 | 30.5 | 46 | 18.5 | 3 | 13 | | | | |
| 百分率(b) | 27.5 | 41.4 | 16.7 | 2.7 | 11.7 | | | | |
| 選考指数(b/a) | 0.76 | 1.71 | 0.82 | 0.28 | 1.58 | | | | |

虫は紫外域にも視覚感度を有することから、人間の視覚だけから花と虫の色、感度に関する共進化を論じることは難しい。



昆虫の嗅覚

昆虫は花の色や形、また、花や植物の芳香成分によって誘引される。

花の花弁を除去して昆虫の訪花性を調べると、ミツバチ、ハナバチなどは飛んできて花粉を食べたり運んだりするが、チョウ目類はまったくよりつかない。また、造花などには、チョウ目が飛来するが、ミツバチやハナバチは飛んでこない。しかし、ハチミツなどをつけてやるとミツバチやハナバチは飛来する。

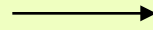
これは、**チョウ目などは視覚**が発達しているため、形をみて行動することが多く、また、**ミツバチなどは臭覚**で行動することが分かる。

蛾媒の花の特徴（スズメガ、ヤガ、シャクガ、メイガ）
白色か淡色、夜間に開花、甘いにおい、細長い花筒

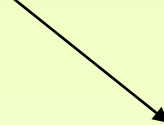


花のにおいの進化

昆虫に食害された植物
(特に損傷を与えられた葉)



植食者に対する摂食忌避物質
(揮発性物質)



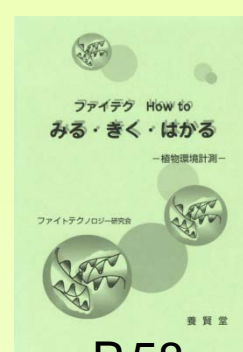
食害から数時間後、植食者の天敵を誘引
するための異なる揮発性物質

(β -オシメン、リナロール、(E)-4、
8-ジメチルー1、3、7-ノナト
リエンなどのテルペノイド
トウモロコシ、綿、リンゴ、キュウ
リ、ライマメにおいて)



花からは葉と比べて非常に多様なにおいを
発する。

特に送粉昆虫を誘引するフェロモン (ベン
ゼノイド、脂肪酸誘導体)



P.58



鳥媒花

鳥媒花には赤い色の花が多い（ツバキ、サザンカ、ハイビスカス、リュウゼツラン、ビワ、ポインセチア、サルビア、アロエなど）

鳥媒花は鳥の嗅覚は発達していないので、香りはあまりない。鳥の視覚は人間と同様

鳥：メジロ、ヒヨドリ、ハチドリ、シジュウカラ、ウグイス、モズ

赤い花は昆虫にはみえない（ミツバチなど）
花のミツはメジロなどの冬のエネルギー源

・
鳥がくちばしをつっこみ、蜜を吸うため、がっちりしたつくり
確実に花粉媒介をさせるため、深い筒の奥にみつを隠している。



多くの果実が熟すと赤く甘くなるわけ

元来果実は種の保存のため、鳥や猿を引き寄せようと発達した器官なので、目立つ赤、橙、黄色が多く、果肉も鳥や猿のために、甘いものが多い。

ただし、熟するまでは緑色で目立たないようにしており、万一取られた場合も酸味や渋味によってまずく感じさせるよう進化している。

小さな虫に対しては、「ただ食い」するだけで種を遠くへ運んでももらえないため、植物からすると受粉の時以外には来てもらいたくない。

これらより、花びらは虫のために、紫外域を反射したり、紫、白、黄色などを呈するが、果実は虫には見えづらく、鳥や猿にはよく見える赤系統の色が多い。

