

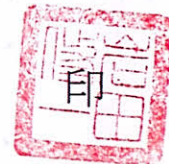
東京大学大学院新領域創成科学研究科
人間環境学専攻

修士論文

葉脈の形態分類と物質輸送の分析

2009年2月17日提出

指導教員 岩田 修一 教授



学生証番号 076802

立川 浩幹

目次

第1章 緒言	1
1.1 はじめに	2
1.2 植物形態による植物分類学と物質輸送	3
1.3 構成的アプローチ	5
1.4 既存の分析的アプローチ	9
1.5 研究目標	10
第2章 葉の形態多様性の俯瞰	11
第3章 葉の中の物質輸送に関する予備的検討	15
3.1 フラクタル解析	16
3.1.1 最小仕事モデル	16
3.1.2 フラクタルモデル作成	17
3.2 形態形成モデル	18
3.2.1 目的	18
3.2.2 モデル作成	18
3.2.3 拡散係数と時間による形状変化	20
3.3 均質媒体中の拡散データ抽出	23
3.3.1 ロジスティック曲線近似	23
3.3.2 二次元拡散方程式作成	24
第4章 葉における物質輸送の分析	26
4.1 対象データと解析ツール	27
4.2 動画データ抽出	29
4.2.1 基部データ抽出	29
4.2.2 葉脈上データ抽出	30
4.2.3 葉肉上データ抽出	32
4.3 葉身全体での物質輸送面積変化	34
4.4 物質輸送量の時間変化	37
4.4.1 葉身、葉脈、葉肉での合計輝度値の変化	37
4.4.2 各葉脈内での合計輝度値の変化	39
4.4.3 各葉肉内での合計輝度値の変化	42
4.5 物質輸送増加量の時間変化	44
4.5.1 葉身全体での輝度値増加量	44
4.5.2 葉脈、葉肉全体での合計輝度値増加	45

4.5.3 各葉脈、葉肉での輝度値増加	47
4.6 物質輸送経路による物質分配解析	49
4.6.1 葉脈内での物質分配	49
4.6.2 葉脈と葉肉での物質分配解析	50
4.7 葉脈内輝度値移動速度計算	51
第5章 考察	55
第6章 結論と今後の課題	63
謝辞	65
参考文献	66
付録	68

第 1 章

第1章 緒言

1.1 はじめに

身の回りには様々な物質輸送が存在する。

ゴミ収集車によるモノの輸送や、川の流れなど様々な所で見る事ができる。

運動量輸送・熱輸送・物質輸送についての物質輸送は輸送現象と呼ばれ^{[1],[2]}、自然は特定の基準に合わせて輸送現象を最適化しているように見える。自然では必要に応じて輸送経路は分岐し、その経路の太さを変化させ物質の輸送量を変化させながら、目的の場所へと物質輸送を行っていると考えられる。

生命の活動における物質輸送は輸送現象により、生命維持に必要な水分や養分を身体に効率よく取り込み、身体全体に効率よく輸送を行うという生命に関わる重要なことである。そのため生物は身体に血管などの物質輸送経路を張り巡らせ、物質を身体全体へと伝達している。例えばヒトの肺の血管構造は分岐を繰り返すごとに、輸送経路である血管の径を細くし、全体としてフラクタル構造をとることで表面積をかせぎ、効率的に酸素を体内に取り込むことができる。しかし、この複雑な血管構造の中でどの様な輸送現象が行われ、どの様な最適化条件に基づきフラクタル構造を取ったのか^[3]は、遺伝子情報や環境因子によって物質輸送経路に影響を及ぼす為に解析及びモデリングが困難なものとなっている。

植物における物質輸送は、輸送現象により植物全体に物質輸送を行っている。植物の物質輸送経路の一つである葉脈構造は、葉身全体へ物質輸送を行う役割を担っている。葉の基部から繋がる主脈が一次側脈、二次側脈と分岐しその過程で太さを細くしていくことで葉身全体に複雑な輸送経路を作っている^[4]。そして基部から入力された物質は、この複雑な輸送経路を通り葉身全体へと物質輸送される。この輸送経路は植物の種により多様な形態を取っている。葉脈構造の複雑さ及び、種による多様性が植物における輸送現象のモデリングを複雑なものとし、これが葉脈のモデリングの課題となっている。

このように自然界の輸送現象は複雑な輸送経路を伴い、モデリングが複雑なものとなる。この複雑な系のモデリング方法として、構成的アプローチと分析的アプローチが存在する。構成的アプローチとは、ある現象の基本となる理論を設定し、その理論によって導き出せる結果を実際の輸送現象に近づけることで、理論により輸送現象を説明づけようとする手法のことである。分析的アプローチとは、対象が示している解を分析的な解析を行いながら輸送現象を調べていく手法である。

本研究では葉において葉脈が示している輸送現象を分析的に調査しながら、複雑な系における輸送現象を漸近的に解く手法について検討する。

1.2 植物形態による植物分類学と物質輸送

約 4 億 7,500 万年前の中期オルドビス紀に地上に上陸した^[6]植物は、進化という自然の淘汰過程を経て、現在は約 35 万種^[6]を持つまでに多種多様な進化を遂げてきた。この進化の道筋を系統と呼び、自然淘汰により一定の規則性を持った種が生き残るため、系統ごとに規則性を持つこととなる。

この規則性の一つとして葉の形態が挙げられる。葉の観察により識別される葉身の形態として、葉の付き方・葉脈の形状・葉の形状として観測される。葉脈構造と葉の形状について、葉脈構造の多くは網状脈と平行脈等に大別することができる。葉の形状に関しては、全形・葉先・葉基部・葉の縁・葉の裂け方により大別されている^[7]。これらの葉の形態が、進化による系統ごとの規則性として観測される。

植物を系統により分類しツリー構造で記述したのが系統樹と呼ばれ（付録①）、植物の系統分類として植物分類学で使われている。古くは古代ギリシア時代に Theophraste が *Historia Plantarum*^[8]で約 480 種の植物を形態により分類した事が知られている。

その後植物の形態分析が進められ、現在一般に使われているエングラー体系では、植物の形態解析より進化の系統を想像した結果による分類が行われている。その後新しい知見をいれて新エングラー体系として広く使われており、最新の情報は Angiosperm Phylogeny Group に蓄積されている^[9]。

その後、種のゲノム解析が進み進化系統がより詳しくわかってきた。1990 年頃から被子植物の葉緑体ゲノム情報による分子分類学である APG 植物分類体系が使われ始めている。ゲノム解析による形態分類による植物分類の結果と、エングラー体系での形態分類による植物分類の大部分が一致することから、系統毎に植物形態の規則性があることが言える。

これらの植物分類を用いると、多様な葉脈形態・葉身形態が系統ごとに分類される。例えば、付録①の左図において、一般的にコケ植物は葉脈を持たず葉の大きさは小さいことが多く、シダ植物の葉脈は二叉分枝であることが多い。裸子植物はマツの様に針状の葉を持つものや、イチョウのようにシダ植物と似た二叉分岐を持つこともある。被子植物は単子葉類と双子葉類に大別され、単子葉類では平行脈を持つことが多く、双子葉類では網状脈を持つものが多い。

葉脈は葉身上の物質輸送経路^[10]であるため、葉脈・葉身形態により葉身上での物質輸送が異なると考えられる。例えば被子植物における平行脈の場合は主脈に対して側脈の接続の角度が小さく、脈同士が平行に走ることから、葉身方向に長い葉身形態を主に取ると考えられる。その時の葉脈による物質輸送は、葉の基部にて物質が入力され、葉端に向かうに従い物質濃度が低くなると考えられる。

一方網状脈は、主脈に対して側脈の接続の角度が比較的大きく、側脈は一次側脈、二次側脈と分岐を行う為、葉身形態は幅が平行脈と比べて広くなると考える。その時の葉脈による物質輸送は、主脈により葉身方向の物質輸送が行われ、側脈により葉身の横方向への物質輸送が行われる。側脈に比べ主脈の径が太い為に、葉身方向への物質輸送が、葉の横方向への物質輸送より多く行われ、葉身上の物質濃度は平行脈と比べ葉身上で均一な物質輸送を行うことができると考える。

以上のことから、植物の形態多様性は、葉身内の物質輸送の多様性と考えることができ、この物質輸送は植物分類学によって大別されていると考えられる。

そこで本研究では、葉脈構造が複雑に現れる被子植物の双子葉類について扱うこととする。主に今回の研究で用いたダイズの分類及び塩基配列を載せる(Table1.2, 付録②)。

また、付録⑤に本研究で用いる植物用語の定義を載せた。

Table1.2 ダイズの分類表

界	植物界
門	被子植物門
綱	双子葉植物綱
目	マメ目
科	マメ科
属	ダイズ属
種	ダイズ

1.3 構成的アプローチ

網状脈は、主脈から一次側脈、二次側脈と分岐していき最終的に複雑な葉脈構造をとる。更に葉脈構造は植物分類により系統により多様な形態が分類される。この様な複雑な構造のモデリングは、対象とする複雑構造において特定の物理量に着目して基本的な関数やアルゴリズムを設定し、その関数系や制約条件を実際の複雑な構造に合うようにフィッティングを行う。

このように複雑な系に合うように関数やアルゴリズムを作成し、この関数やアルゴリズムで複雑な構造の説明を行うことを構成的アプローチとする。ここでは、複雑な生命の物質輸送経路の説明を構成的アプローチにより目指した研究を紹介する。

①ヒトの肺の構造

高木はヒトの肺の構造再現を、肺の血管内を流れる血液に対して運動量の保存と血液を維持するための生理学エネルギーの2点に着目することにより行った³⁾。運動量の保存は、Poiseuille の流れとして記述され、血液を維持する生理学エネルギーは、血管内体積に比例するものとして定義されている。

肺の血管構造のモデリングにおいて実際の肺の観測事実や運動量保存の観点から9つのシンプルな基礎項目を設定した。しかし、血管の空間充填が基本項目のみでは不均一になってしまう為に、4つの修正ルールを追加し、肺の構造を再現した(Fig 1.3-1)。そして、肺がフラクタル構造を持っていることを示した。

このアルゴリズムにより、基本的な肺の構造は運動量と血液を維持する為のエネルギー及び、血管分岐に対する幾何的性質により基本構造が決定されると推測される。また、単純なアルゴリズムより観測事実と似た肺の構造のフラクタル性を導くことにも成功した。また肺の複雑な構造を、計算機によって構成的に説明付けようとした先駆者的な存在であり、高木はこの方法を「計算解剖学」と名称付けた。

一方で基礎9項目のみでは肺の構造の空間に一樣に分布する構造の再現が困難である為、シミュレーション過程において修正ルールを適宜適応しなければならなかった。この事は複雑構造のモデリングを構成的アプローチにより行う事が、困難であることを示していると考えられる。

基礎9項目

1. 親枝は2本の娘枝に分岐する
2. 親枝と2本の娘枝は同一平面状にある
3. 分岐前後で流量は保存される
4. 親枝領域は、分岐平面に垂直な領域分割面によって2つの娘領域に分割される
5. 2つの娘領域は、それらの体積比に等しい
6. 親枝と娘枝の直径比、及び分岐角度は、流量分配率の関数で決定される

7. 各枝の長さは、直径の3倍である（解剖データより）
8. 娘枝が分岐をおこなうとき、第2の分岐平面は前の分岐平面に垂直である
9. 流量がある閾値以下になると、あるいは枝が自分の領域から出るとき分岐が終了する

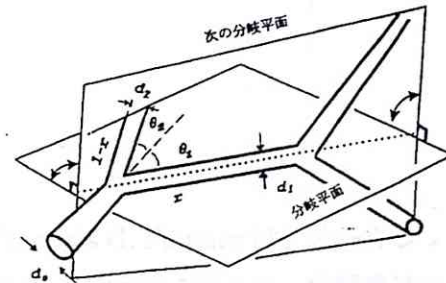
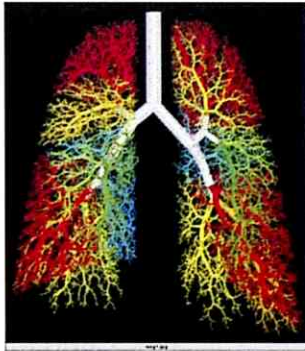


図1 親枝と娘枝の直径 d_0, d_1, d_2 , 分岐角度 θ_1, θ_2 , 流量分割比 r の定義

Fig 1.3-1 高木による肺の構造シミュレーション[3]

②-1 葉脈構造

Turing は化学反応を伴う物質輸送において、反応拡散方程式による解の不安定性に着目した。そして遺伝子の発現が化学反応によるものとして、形態形成因子(morphogens)の化学反応により形態形成の説明付けを目指した[11]。

その後 A. Gierer と H. Meinhardt が反応拡散方程式による葉脈形態の再現を研究した。植物ホルモンで成長促進作用があるオーキシンをアクチベーターとし、成長抑制作用があるホルモンをインヒビターとして、アクチベーターとインヒビターの形態形成因子の反応拡散方程式による解の不安定性により、葉脈構造の再現を目指した[12],[13]。

反応拡散方程式による形態形成モデルは、均質媒体の領域内でアクチベーターとインヒビターの2種類の形態形成因子に伴う濃度勾配による拡散流を基に形態モデリングを行う。形態形成に関する化学物質の流れは拡散流に従う。反応拡散方程式により魚の模様等の再現の場合は、魚の模様により形態形成因子の流れが強まることはない。反応拡散方程式による形態形成が可能だと考える。一方反応拡散方程式を物質輸送経路である葉脈構造再現に適応する場合は、葉脈形態が発生した箇所では物質輸送が強く起こる必要があるが反応拡散方程式はこれを考慮していない。

反応拡散方程式の解には一定の周期性がある。この周期性が比較的等間隔の形態を形成する。この事により、実際の葉脈に見られる葉脈間の幅の等間隔性を再現することができる。しかし一方でこの特性は、葉脈が閉じた脈をとる形態を再現することを困難としている。

また反応拡散方程式による葉脈形態の多様性の再現は、形態形成因子の拡散異方性を変化させることで、平行脈や網状脈の形態形成を可能としている。

$$\begin{aligned}\frac{\partial u}{\partial t} &= \Delta u + uv - a(u, v)u & u: \text{オーキシン抑制因子濃度} \\ \frac{\partial v}{\partial t} &= d\Delta u - uv & v: \text{オーキシン濃度} \\ \frac{\partial w}{\partial t} &= a(u, v)u & w: \text{分化した葉脈}\end{aligned}$$

②-2 葉脈構造

Sachs が発表した運河仮説^[14]を基礎とし、Francois G. Feugier は、オーキシン流量がある場所はより流れやすくなり葉脈が形成されるという仮定に基づき、葉脈構造を再現した^[15] (Fig 1.3-2)。

運河仮説の特徴は、葉脈内の物質輸送を考慮にいれて葉脈形成を行っていることである。これは、オーキシンが存在するところはより流れやすくなるというポジティブフィードバックによるためである。このことより、前述の反応拡散方程式の問題点である、物質輸送経路である葉脈の機能性を考慮していると言える。しかし反応拡散方程式と異なり、葉脈の相互の影響がない為、等間隔の葉脈形態形成が困難である。一方で葉脈の閉じた形態の再現が可能となった。

$$\begin{aligned}\frac{dp_{i,j,k}}{dt} &= g(f_{i,j,k}) - p_{i,j,k} & g(f_{i,j,k}): \text{輸送蛋白の合成速度} \\ \frac{da_{i,j,k}}{dt} &= b - a_{i,j} - \sum_k f_{i,j,k} & p_{i,j,k}: \text{輸送蛋白質質量} \\ & & a_{i,j,k}: \text{オーキシン濃度} & k: \text{細胞膜の番号} \\ & & f_{i,j,k}: \text{オーキシン流量} & i, j: \text{細胞の接続番号} \\ & & b: \text{オーキシン合成速度}\end{aligned}$$

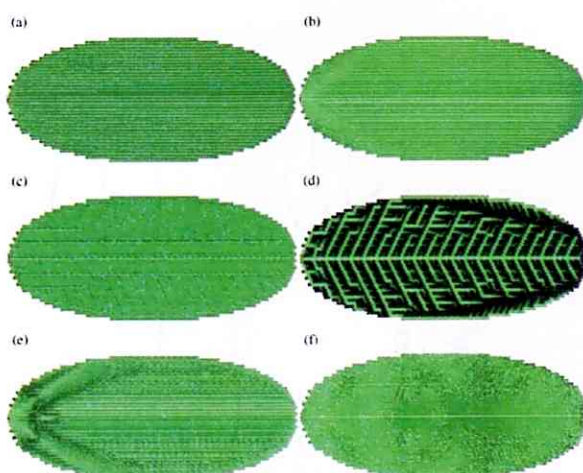


Fig 1.3-2 運河仮説による葉脈モデル それぞれの領域内で流れを変化させ、多様な葉脈構造の再現を目指している^[15]。

②-3 葉脈構造

A Runions は、葉の形状をした空間にランダムに配置されたオーキシンの発生源と脈の基になるノードを幾何学的法則性をもって繋げる事を葉の境界を広げながら行うことで成長する葉の中の葉脈構造を再現した^[16] (Fig 1.3-3)。このアルゴリズムは、11のステップにより成り立っている。

このモデルは、とても単純なアルゴリズムで実際の葉脈に非常に良く似た形を再現することができる。また、葉の成長に合わせた脈の成長を再現することができる。

しかしこのモデルでは葉脈の形成過程で生まれた葉脈内部の輸送現象を考慮していない。またオーキシンの生理学的反応を考慮せず、オーキシンの発生源として名前のみしか扱っていない。高木の肺の構造再現のアルゴリズムのように物理量や観測事実を導入していない為、このアルゴリズムにより植物の複雑経路発生メカニズムの説明をするのは難しい。

葉脈形態作成 11 ステップ

1. オーキシンスソースと葉脈ノードを初期化する。
2. それぞれのオーキシンスソースから最も近くにある葉脈ノードへのベクトルを求める。
3. それぞれのベクトルを正規化する。
4. 正規化したベクトルを足し、再度正規化する。
5. そのベクトル方向に葉脈ノードを配置する。
6. オーキシンスソース近傍に、葉脈ノードが存在するか計測する。
7. 葉脈ノードと近いオーキシンスソースを消す。
8. オーキシンスソースと葉脈ノードを動かさずに、葉を成長させる。
9. オーキシンスソースをランダムに配置する。
10. オーキシンスソース近傍に、葉脈ノードが存在するか計測する。
11. 葉脈ノードと近いオーキシンスソースを消す。

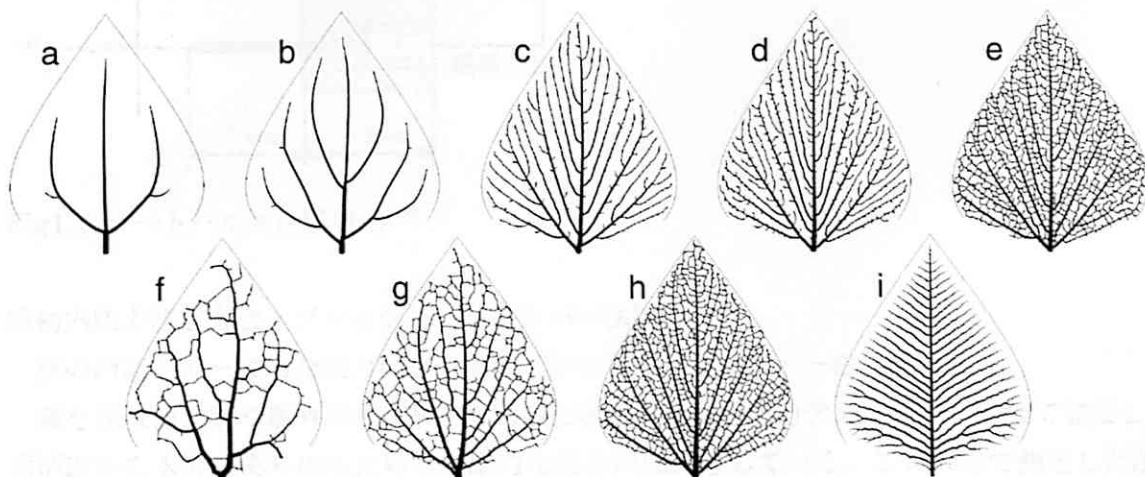


Fig 1.3-3 a-e は脈の間隔を設定し、多様な脈再現を行う。f-i までは、シミュレーションステップごとにオーキシン発生源の空間的分配を変化させている^[16]。

1.4 既存の分析的アプローチ

前節で述べた植物の複雑な構造を構成的に定式化し、その式により複雑な構造を解明するアプローチに対し、実際の植物の現象を分析的に解明するというアプローチを分析的アプローチとする。この分析的アプローチによる研究は、計測機器の技術に大きく依存し、現状では葉脈のような微小な空間で内部の物質輸送の状態が大きく変化する系に対しての計測は容易ではない。ここでは、植物内の物質輸送を計測する主な2つの方法を紹介する。

植物内流速測定方法：ヒートパルス方式^[17]

植物内の流れ測定ではヒートパルス方式と呼ばれる方法を一般に用いる。これは、植物茎にヒーターの役割をもつ針を刺し(Fig1.4)、約1秒間熱を与える。そして、熱源から約9mm上部及び4mm下部の茎に、熱測定用の針を刺し、ヒーターが熱を与えてから測定用の針で温度上昇が観測できるまでの時間を計測する。入力された熱量は、茎内を熱拡散する熱量と、流体の移動に伴う熱量に分かれるため、移流拡散方程式^[18]を用いて流体の移動速度を求める方法である。

この方法で求めた流速は、ヒーター用の針と、測定用の針の間の13mmの平均値になる。また、広い範囲及び詳細な流速測定には不向きである。

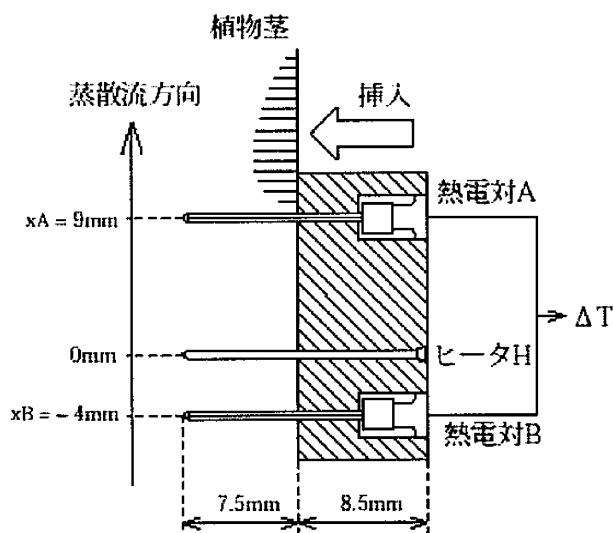


Fig1.4 ヒートパルス法概要図^[17]

植物内圧力測定方法：プレッシャーチェンバー法^[19]

葉の内部での一般的な圧力測定方法はプレッシャーチェンバー法と呼ばれる。

葉を採取後、葉の葉柄部のみを外に出した状態で葉身を圧力チェンバーに入れて加圧し、葉柄部から水分が染み出した時点の圧力を葉身内圧力としている。この方法で測定した圧力は葉身各位置での圧力ではなく、葉全体の平均値となる。また、加圧チェンバーへの加圧速度により、植物内の圧力測定値が変化する。

1.5 研究目標

前節までで葉脈という複雑形態を持つ系に対する研究方法として、構成的アプローチと分析的アプローチによる研究方法を紹介した。

構成的アプローチでは複雑な系を、意味の明確なアルゴリズムや数式で説明できる一方、そのアルゴリズムや数式の導出が困難であることを指摘した。

分析的アプローチでは実際の現象を捉えることができる一方、葉脈のような複雑な経路を持ち微小空間により現象が異なる系に対しては、計測技術に依存することを指摘した。

そこで本研究では植物という複雑な形態を持つ葉脈に対して、数理的な意味の明らかな数理モデルを作成することにより、物質輸送に関する特定の物理量と葉形態の関係を明らかにし、これを数理モデル群として作成する。また実際の葉における物質輸送を撮影した動画データの観察と解析により分析的なアプローチを行い、植物内部の物質輸送の解析を行う。そして数理モデルと現象論とを構成的に組み合わせることで、複雑な系における輸送現象の実現可能なモデリング手法を提案することを目標とする。

第 2 章

第2章 葉の形態多様性の俯瞰

1.2節では、植物の形態と物質輸送の関連性を示した。本章では、植物形態の多様性を表すために事前研究として、形態データベースをエクセル上に構築し、葉の形態分析を行った。また今回研究に用いたダイズの葉の形態が、植物の多様性の中で特異な存在かどうかの検討をダイズと同じマメ科に属するニセアカシアを用いて行う。

本データベースでは52種、143枚の葉に対して(付録⑥)、葉の定量化に一般的に用いられている、葉身面積・葉身長・葉身最大幅・最大幅をとるまでの基部からの距離(Fig 2-1)の計測を行い格納した。

Fig2-2 では横軸に葉身最大幅までの距離/葉身長、縦軸に葉身最大幅/葉身長をとった。このパラメーターより、葉の大まかな形態分布を示すことができる。この散布図により、葉の形状は種により様々な形状を取ることがわかる。この中でマメ科のニセアカシアはピンクの点で表した分布の重心の左側の、グラフの赤線で囲んだ所に存在する。

Fig2-3 では葉身最大幅/葉身長と、葉の面積の比較、Fig2-4 では葉の最大幅までの基部からの距離/葉身長と、葉の面積の散布図である。葉の形態が似ていても、様々な葉の面積を取ることが分かる。両方のグラフ上で、マメ科のニセアカシアを示した赤線の領域は、比較的他の種が密集している箇所が存在する。

マメ科の葉形態がグラフ上で他の種が密集している箇所にあることから、今回選出した52種の葉の形態に対して、ダイズの葉の形態は特異な形態を取っていないと判断する。また、ダイズの葉の形態を多様な葉の形態及び内部の物質輸送を、多様な葉の代表と仮定して本研究では解析を行う。

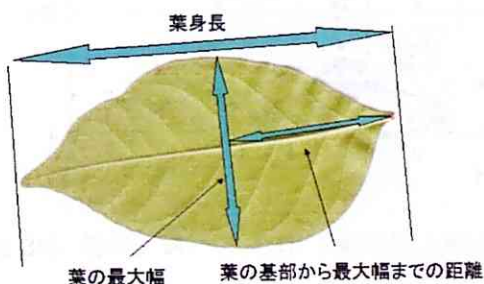


Fig 2-1 葉の計測データ箇所

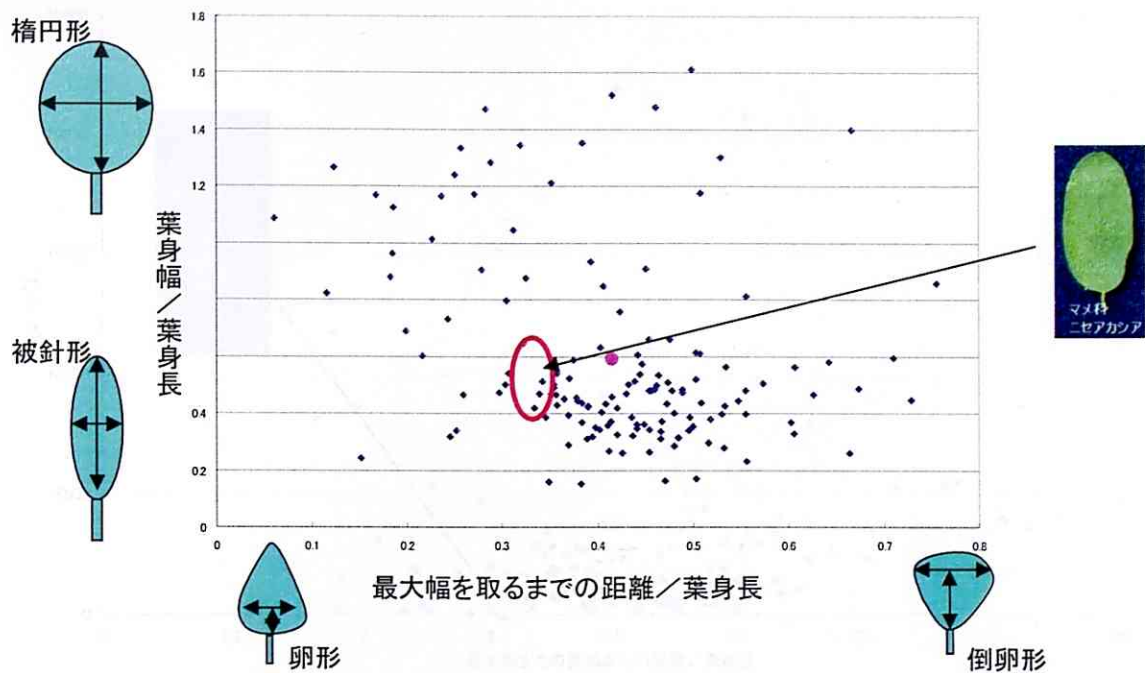


Fig2-2 52 種の葉に対する葉の形状の多様性

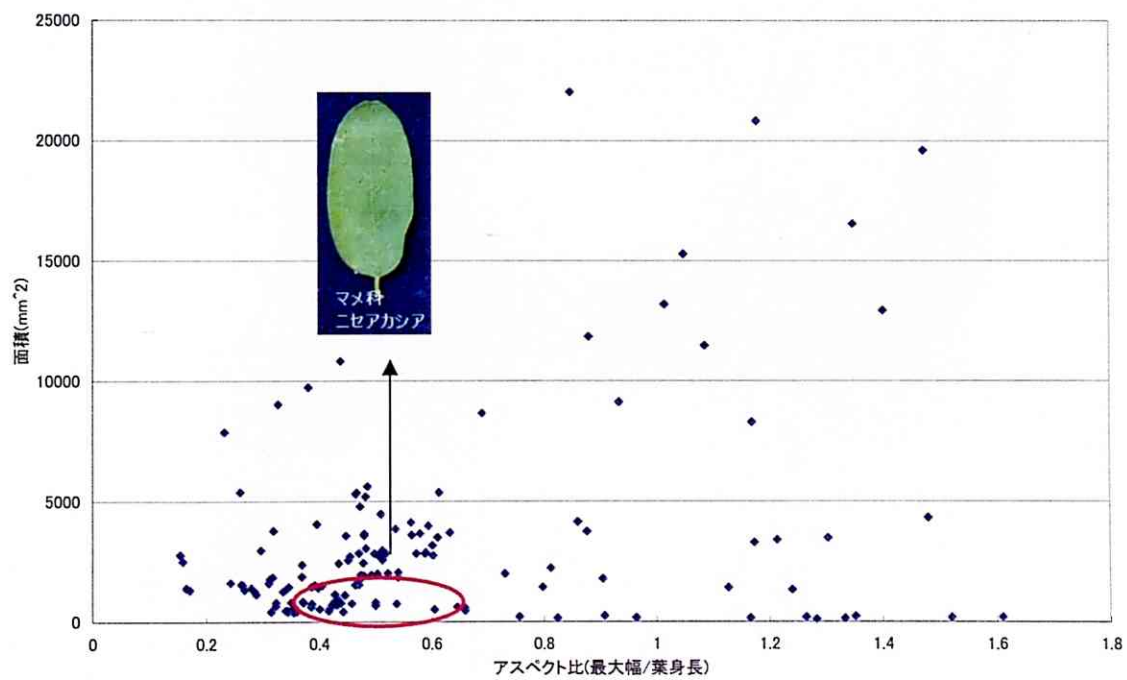


Fig 2-3 葉のアスペクト比（葉身最大幅/葉身長）と面積の散布図

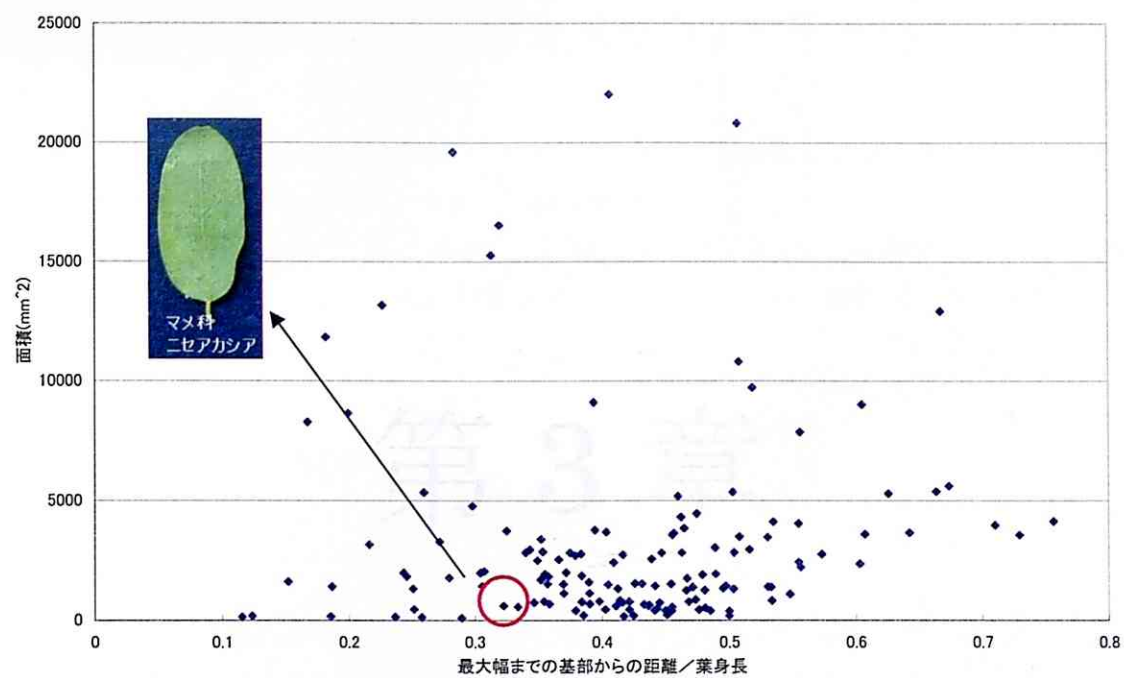


Fig 2-4 葉の最大幅までの基部からの距離/葉身長

第 3 章

第3章 葉の中の物質輸送に関する予備的検討

1.3節でのべたように複雑な輸送現象のモデリングは、葉の形態に合わせたアルゴリズムや数理モデルを作成する必要がある為、困難を極めた。

そこで、本章では植物内の輸送現象を、物質流量・物質濃度のみに着目することでモデリングを簡略化し、物質輸送と葉の形態多様性を再現するための数理的なモデル群を作成する。

3.1 フラクタル解析

3.1.1 最小仕事モデル

ここでは高木の肺の構造再現^[11]を参考に、葉の形態の再現を、運動量の保存・物質を維持するエネルギーの2つを仮定して行った。高木の研究では肺の血管分岐は全て2分岐と仮定しているが、これを3分岐系に拡張して用いた。

葉脈には導管と師管があり、根から吸収された物質は水分と共に導管を通り流れる。植物は導管が繋がる気孔や、葉の端点より水分を蒸発させ導管内に負圧を作ることで圧力差を作り、水の凝集力により物質輸送を行う。この時、導管の分岐により圧力損失が生まれる為、分岐角度によって水分輸送仕事量に変化し、葉全体への水分伝達が変化すると考えられる。本研究では植物は物質輸送の仕事量が小さくなる分岐や半径を取るという仮定の基で葉脈形状再現を目指した。葉脈を円管近似し、円管内部の水の流れを Poiseuille の流れで表す。Murray は円管内部に水分を輸送する際の最小仕事となるような流量 f と半径 r を次式のように定義した^[20]。但し、 k は定数、 η は動粘性係数である。

$$f = \sqrt{\frac{k\pi^2}{16\eta}} r^3 \quad (1)$$

全ての葉脈が毎回3分岐するとし(Fig 3.1-1)、分岐前の流量 f_0 半径 r_0 、分岐後を流量 f_1, f_2, f_3 半径 r_1, r_2, r_3 とすると分岐前後の流量と半径は次式となる。

$$\frac{r_0^6}{f_0} = \frac{r_1^6}{f_1} + \frac{r_2^6}{f_2} + \frac{r_3^6}{f_3} \quad (2)$$

また、分岐角度を次式のように定義する。

$$\cos\theta = \frac{r_0^2 - r_2^2}{2r_1^2} = \frac{r_0^2 - (r_0^3 - 2r_1^3)^{\frac{2}{3}}}{2r_1^2} \quad (3)$$

3.1.2 フラクタルモデル作成

分岐後の半径比 r_2/r_1 を初期条件として与え (1)(2)(3) より、最小仕事となる分岐前後半径比、分岐角度計算を行う。この条件を基に葉脈のフラクタルモデル作成を行った。(Fig 3.1-2)

葉脈の分岐半径比を変化させることで、式(2)により内部の流量が変化し、また式(3)により分岐半径が特定される。この関係をもとに多様なフラクタルモデルを作成することができる。初期条件として半径比を与えると、内部の流量が変化し、葉の形態変化に繋がる。

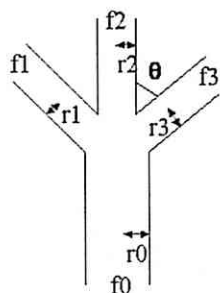


Fig 3.1-1 3分岐モデル

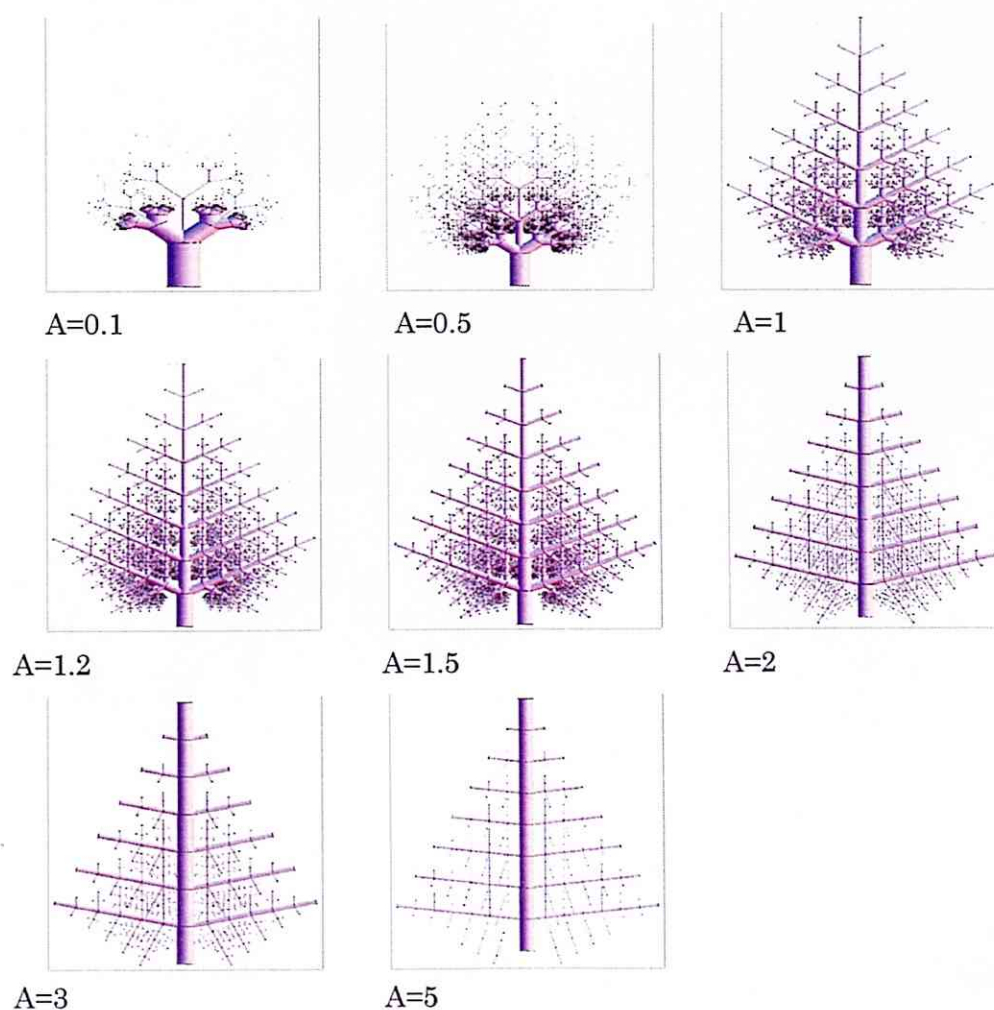


Fig 3.1-2 半径比による形態変化 $r_2/r_1=A$

3.2 形態形成モデル

3.2.1 目的

主脈と側脈の物質輸送速度が異なる際に、葉の形態がどのように変化するか検討を行う。

また同じ植物の葉に着目していても、葉の成熟度により形態変化がおこる。実際の植物では、幼葉の時は葉の先端が丸く、成長するに従って形状が細身になるという形態変化を起こす。平行脈をもつトウモロコシは、導管内の水分の速度が加齢と共に増加していることが測定されている[21]。

そこで本節では、主脈と側脈からなる葉脈モデルを作成し、主脈と側脈の物質輸送速度及び時間の変化に対する、葉の形態変化を検討した。

3.2.2 モデル作成

網状脈の要素モデルとして、主脈と、50本の側脈のモデル(Fig 3.2.2-1)を設定し、そのモデル内での拡散方程式を設定した。 $u(x,t)$ を主脈での物質濃度、 $v_i(y,t)$ を側脈での物質濃度、 k_x, k_y をそれぞれ主脈方向と側脈方向の拡散係数に比例する定数とし、境界条件としてノイマン境界条件を用いた。また、主脈への物質入力に常に一定にし、側脈の物質入力値は側脈が接続する主脈の値に比例するとした。

網状脈モデル

主脈

拡散方程式

$$\frac{\partial u(x,t)}{\partial t} = k_x \frac{\partial^2 u(x,t)}{\partial x^2} \quad (4)$$

初期条件

$$u(x,0) = e^{-100x} \quad (5)$$

境界条件

$$\begin{aligned} u(0,t) &= 1 \\ \frac{\partial u(x,t)}{\partial x} &= 0, (x=4) \end{aligned} \quad (6)$$

側脈 ($i=(0,1,2,\dots,49)$)

拡散方程式

$$\frac{\partial v_i(y,t)}{\partial t} = k_y \frac{\partial^2 v_i(y,t)}{\partial y^2} \quad (7)$$

初期条件

$$v_i(y,0) = u(x_i,t) * e^{-100y} \quad (8)$$

境界条件

$$\begin{aligned} v_i(0,t) &= u(x_i,t) \\ \frac{\partial v_i(y,t)}{\partial y} &= 0, (y=4) \end{aligned} \quad (9)$$

上記の主脈と側脈に関する方程式を解いた結果が Fig 3.2.2-3 である。この時、主脈端が境界でとる値を閾値として、閾値以下では葉が枯れると仮定をし、閾値以上を取る領域を抽出した結果が Fig 3.2.2-4 である。

平行脈モデル

平行脈モデルとして、20本の平行に走るモデル(Fig 3.2.2-2)を設定し解析をおこなった。平行脈モデルの際も、網状脈モデルと式を共通とし、但し、網状脈モデルの側脈の分岐数を20としている。また、先端が境界に達した段階でその時の値を閾値として、閾値以下の領域を削除させる、つまり葉が枯れるという作業を行っている。

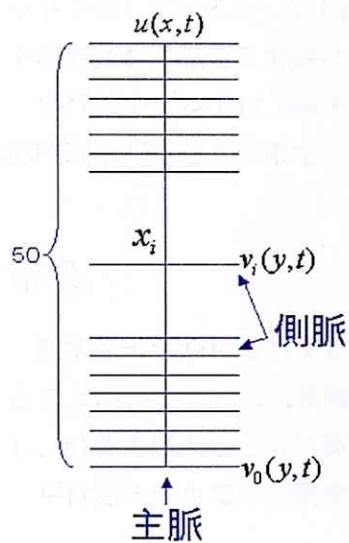


Fig 3.2.2-1 網状脈モデル

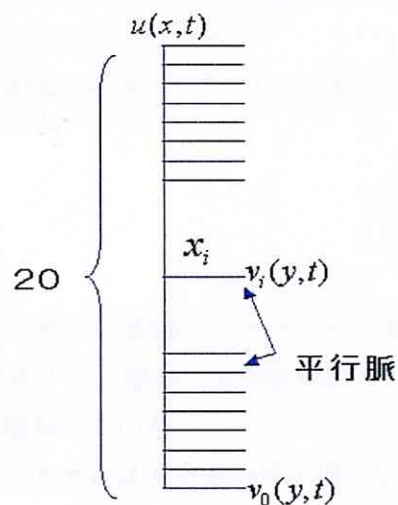


Fig3.2.2-2 平行脈モデル

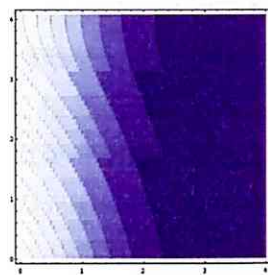


Fig 3.2.2-3 $k_x = 3, k_y = 1$ の時の結果



Fig 3.2.2-4 流量閾値を設けた時の形状

3.2.3 拡散係数と時間による形状変化

3.2.2 節で設定したモデルに対して、モデル内の拡散係数及び計測時間を変化させ、全体の形状変化を行った結果が Fig3.2.3-1, Fig3.2.3-2 である。

網状脈モデルでは、縦方向に主脈方向の拡散係数を増加させた結果を並べ、横方向には計測時間を遅らせて計測した結果を並べている。また、網状脈モデルでは 3 つの図を 1 セットで示しているが、左上が計算結果、右上が葉脈と主脈の接続部に角度を持たせたもの、下部の図が主脈を三本設け、葉に 3 裂を持たせたものである。

平行脈モデルでは、縦方向に葉身方向の拡散係数を増加させた結果を並べ、横方向に計測時間を遅らせた結果を示した。

結果

網状脈モデルに着目すると、縦軸である主脈の物質輸送が大きいほど葉身全体が細くなることがわかる。また横軸である時間が経過すると葉の先端形状が細ることが分かる。但し、時間の経過とともに領域内の物質量は増加している。

平行脈モデルでは、葉身方向の物質輸送が大きいほど先端形状が細ることが分かる。

結論

グラフの縦軸である主脈軸方向の拡散係数を種による主脈と側脈の物質輸送効率の比、横軸である計測時間を葉の成長と考えることができる。

植物の種により主脈と側脈の物質輸送比が変化し、主脈軸の物質拡散速度が大きな種では葉身が細くなることが分かる。また葉が成長することにより葉内の水分量が増大し、葉の先端は細ると捉えることができる。

この物質輸送速度による葉形態の変化は、葉内の細胞分裂スピードが影響している為であると考えられる^[22]。細胞分裂が起きる時には当然養分を消費するために養分輸送が必要となるが、この多様な種毎の養分輸送の差が、葉形態の変化に影響していると予測できる。

{{領域 x、領域 y},{x 軸方向の拡散係数、y 軸方向の拡散係数}、計測時間}

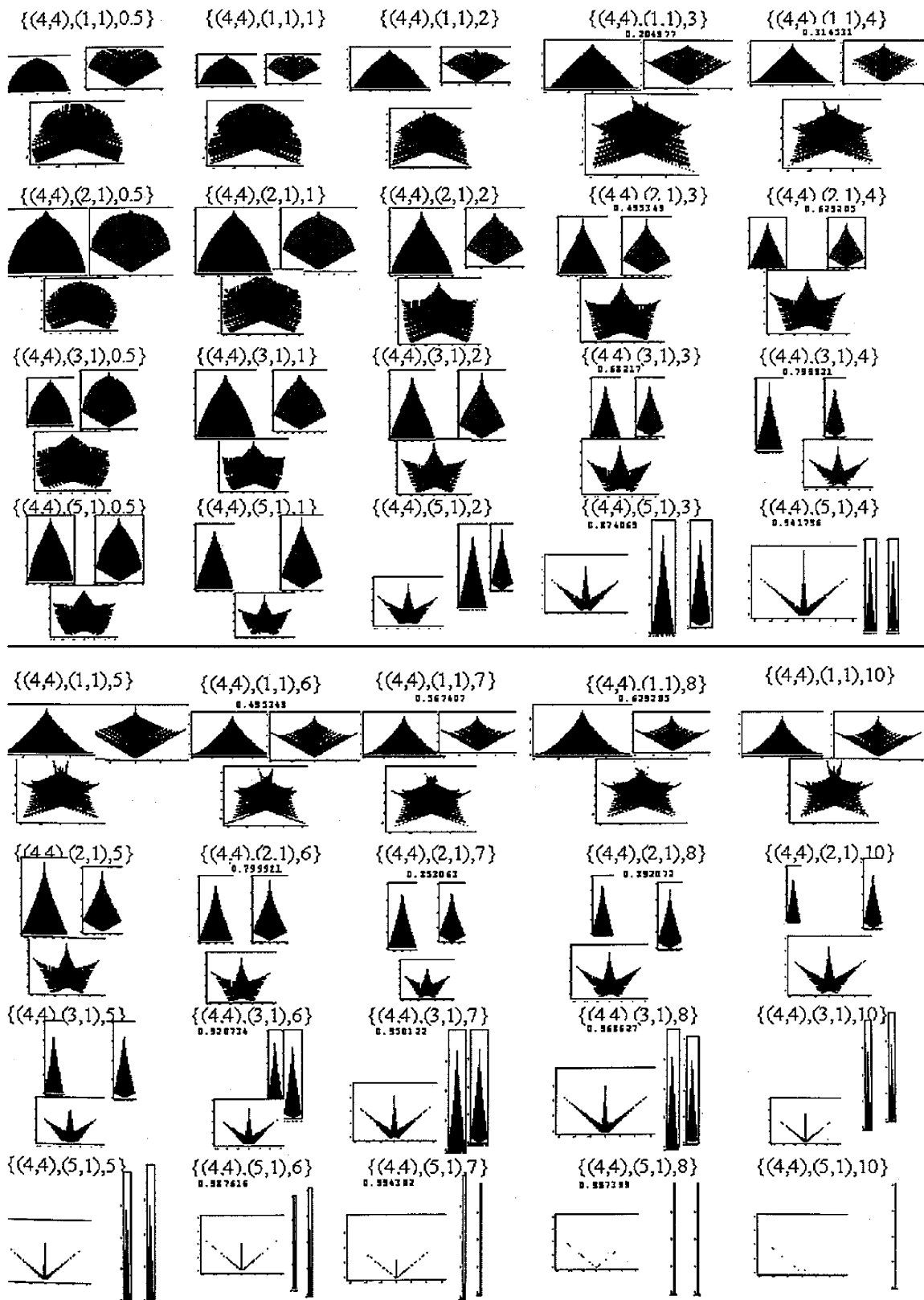


Fig 3.2.3-1 網状脈モデルの拡散係数と計測時間を変化させた時の形状変化

{{領域 x、領域 y},{x 軸方向の拡散係数、y 軸方向の拡散係数}、計測時間}

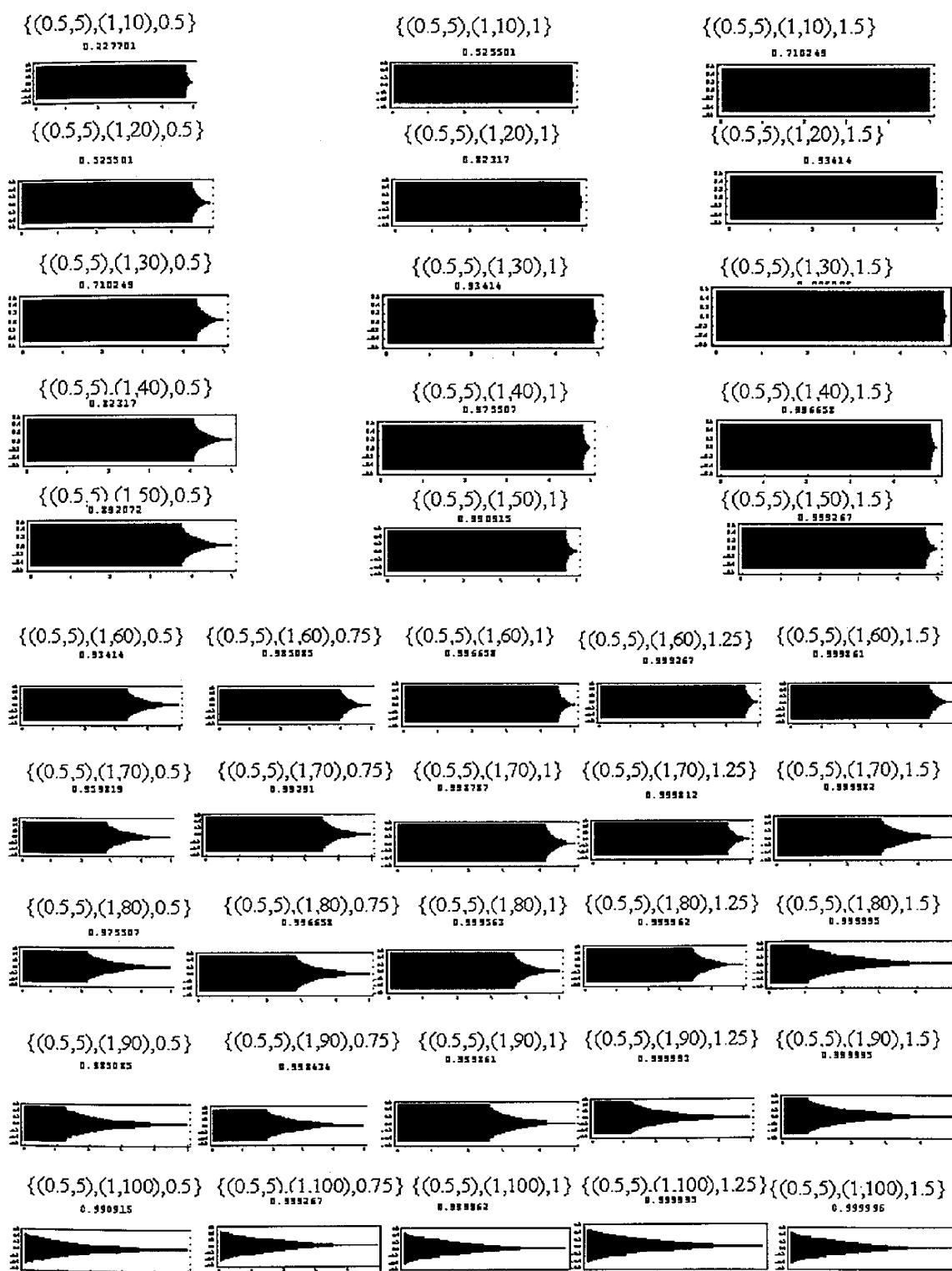


Fig 3.2.3-2 並行脈モデルの拡散係数と計測時間を変化させた時の形状変化

3.3 均質媒体中の拡散データ抽出

3.2 節での形態変化モデルを二次元平面に拡張し、均質媒体内での物質輸送モデルを作成する。均質媒体内に入力される物質濃度として、後に述べる本論文の 4.2.1 節で述べるダイズの葉の基部にて計測した輝度値を入力値として用いた。

3.3.1 ロジスティック曲線近似

基部のデータの近似モデルを作成する。輝度値は、ある一定の値に漸近していくことがわかる。

ある一定の上限値に近づくモデルとしてロジスティック方程式が考えられる。

ロジスティック方程式は以下の式で与えられる

$$\frac{du}{dt} = P \frac{a-u}{u} u \quad (10)$$

ここで、 u は輝度値、 a は輝度値の上限値、 P を u と輝度値上限差に対する u の増加係数とする。

この方程式を解くと以下の解が得られる

$$u(t) = \frac{a}{2} \tanh\left(\frac{P}{2}t + A\right) + \frac{a}{2} \quad (11)$$

ここで A は定数であり、方程式を時間軸方向に平行移動させる役割を持つ。

Table4.2.1 の実際の基部での輝度値に基づいて、ロジスティック方程式で近似した結果は以下の式となる。

$$u(t) = 126 - 126 \tanh(1.59 - 0.019t) \quad (12)$$

Fig3.3-1 では輝度値の近似値と、実測値のグラフを表した。青の線が実測値の推移で、赤が近似曲線である。葉柄での輝度値変化はロジスティック方程式により近似できていることが分かる。以後、葉柄入力値を関数として扱う時は、数式(12)を用いることとする。

3.3.2 二次元拡散方程式作成

均質媒体へのリンの入力値を式(12)より

$$v(t) = 126 - 126 \tanh(1.59 - 0.019t) \quad (13)$$

とし、領域 $(0,0) \times (260,435)$ 内を扱うとし、 $u\{t,x,y\}$ を領域内の物質濃度、 k を拡散係数に比例する定数とする。境界条件をディリクレ境界条件とし二次元拡散方程式モデルを作成した。

その後、領域全体の時間に対する増加量を測定した(Fig3.3-2)。

二次元拡散モデル

$$\frac{du}{dt} = k \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) \quad (14)$$

初期値

$$u(0, x, y) = v(0) e^{-((x-130)^2 + y^2)} \quad (15)$$

境界条件

$$\begin{aligned} u(t, 0, y) &= u(t, 260, y) \\ u(t, x, 0) &= v(t) e^{-(x-130)^2} \\ u(t, x, 435) &= 0 \end{aligned} \quad (16)$$

とし数値解析をおこなった。(Fig 3.3-2)

拡散係数フィッティング

拡散係数 k の導出として、実データとの誤差を少なくなるようにフィッティングを行い、今回は $k = 150(\text{pixel}^2 / \text{枚})$ とした。ここで、 $1\text{pixel} = 100 \mu\text{m}$ 、画像1枚=120秒より、単位変換は $8.3 \times 10^{-11} \text{m}^2 / \text{s} = \text{pixel}^2 / \text{枚}$ である。

拡散係数を変換すると、 $k = 1.245 \times 10^{-8} \text{m}^2 / \text{sec}$ となる。

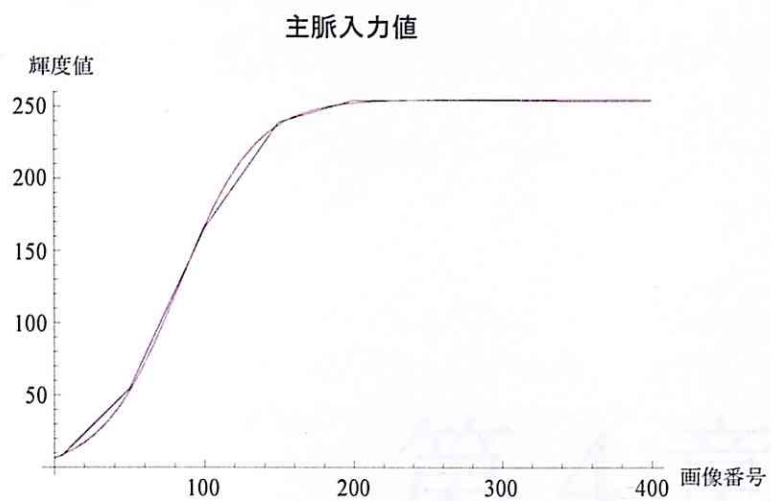


Fig3.3-1 葉柄リン入力値の時間推移（青：実測値、赤：近似値）

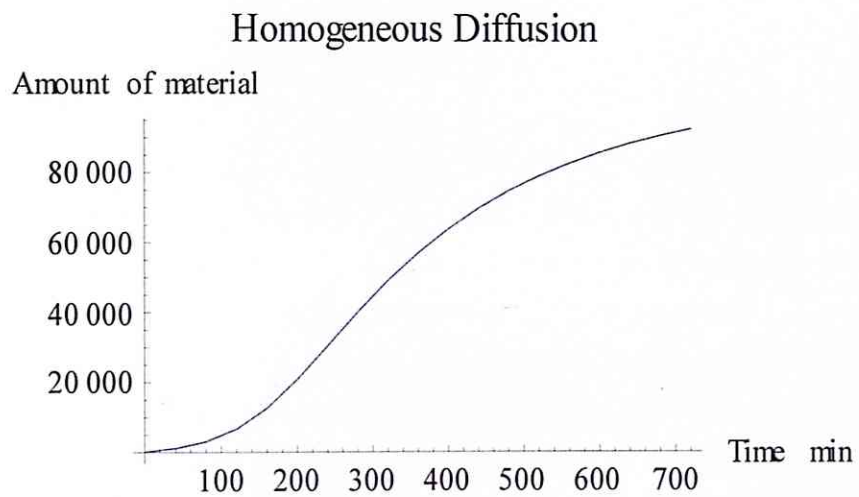


Fig 3.3-2 均質拡散方程式上の値の時間変化

第 4 章

第4章 葉における物質輸送の分析

4.1 対象データと解析ツール

対象データ説明

今回の解析に用いた対象データは植物体内中での物質移行を非破壊かつリアルタイムに2次元解析を行う計測装置を開発し計測を行った物であり、この技術により高精度な解像度で、植物内の物質輸送の解析が可能になった^{[23],[24]}。計測システムは、根から植物内に吸収させた放射性同位体元素 ^{32}P (オルトリン酸¹) の動態を、 ^{32}P から放出される β 線を CsI シンチレータで微弱な可視光に変更し、フォトカウンティングするものである。

このデータは、中西友子(東京大学大学院農学生命科学研究科農学部応用生命化学専攻生物生産化学講座教授)及び、菅野里美(同研究室学生)より提供のデータである。

解析データ

このシステムにより Fig4.1-1 に示すダイズより四角で囲んだダイズ葉中のリン移行を2分間隔で $100\mu\text{m}$ の解像度で 15.1 時間、計測した結果を解析に用いた(Table 4.1-1)。この動画から葉身部が写っている 280×435 ピクセルサイズを切り取り、放射線量と対応^[26]した 8bit の 0-255 までの数値データを作成し、これを輝度値として定義する。数値データは白黒の濃淡として表され、数値が大きいほどリン濃度が高く、画像上では白く表されている。今回は、この輝度値を植物の葉上の物質輸送量として解析を行う。

動画データから 453 枚の画像データを抽出して解析を行った(付録③参照)。但し、計測初期の動画データでは実際の輝度値と計測の際のノイズの値が近い為、データにノイズの影響が出てしまうと考えられる。そのため一部例外を除き十分に輝度値がノイズ値を上回る 100 枚目以降の画像より解析を行う。そして、100 枚目以降の画像より画像番号として 0~353 の数値を対応させる。但し、4.2.1 節では 453 枚全ての画像を使用した。

また、輝度値とリン濃度の検量線が動画データには存在しないため、本稿では輝度値を葉の物質移行を測るパラメーターとして取り扱う。また葉の上の座標 (x, y) 、時間 t での (x, y) 上の輝度値を $f(x, y, t)$ と表す。本稿で用いる輝度値に対する用語の意味を Table 4.1-2 に載せる。

¹ オルトリン酸は肥料によく使われている無機リン酸の一種であり、多くの酵素反応での基質となり、多くの重要な酵素の反応制御に働く。リン酸含量の低い場合は植物の成長が遅れる傾向にあるなど植物にとって不可欠な物質である^[25]。

使用解析ツール

Excel：表計算ソフト

ImageJ：画像解析ソフト

Mathematica：数式処理ソフト

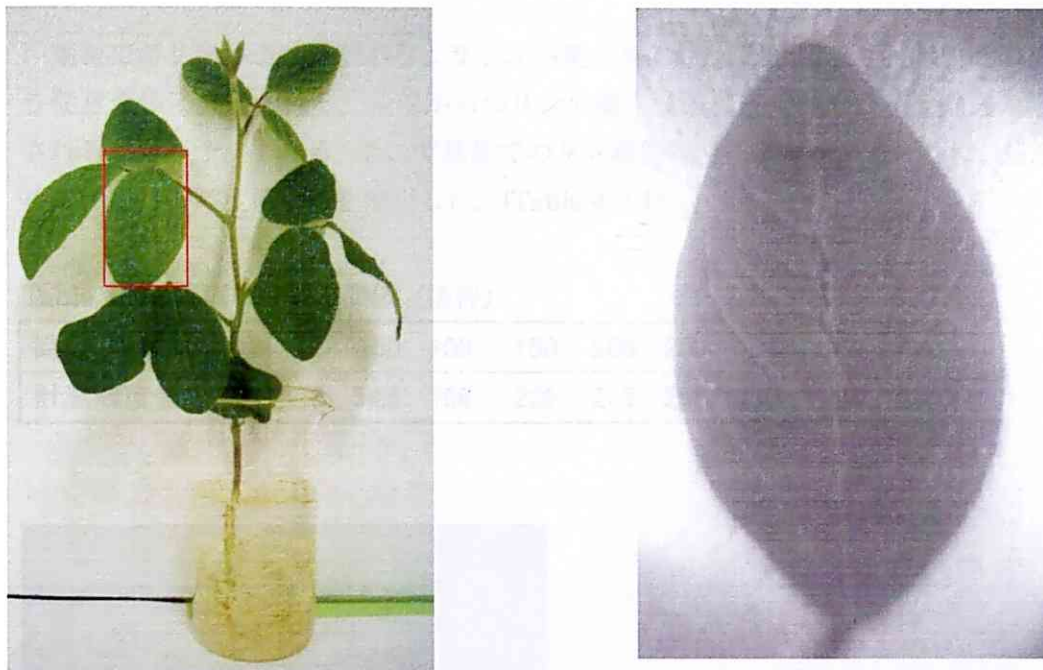


Fig 4.1-1 計測に用いられたダイズ全体図及び、葉の光学写真

Table 4.1-1 動画データ

計測時間	15.1 時間	解析に用いた時間 11.8 時間
計測単位	2 分間	
合計画像枚数	453 枚	解析に用いた画像 353 枚
ピクセル数	656*480	解析に用いたピクセル数 280*435
解像度	100μm	

Table 4.1-2 本稿で取り扱う輝度値に対する計測（x, y を pixel、t は画像番号とする）

輝度値	$f(x, y, t)$
輝度値の合計値	$\sum_x \sum_y f(x, y, t)$
合計輝度値増加量	$\sum_x \sum_y f(x, y, t+1) - \sum_x \sum_y f(x, y, t)$

4.2 動画データ抽出

4.2.1 基部データ抽出

葉身でのリン輸送は葉柄からよりリンが葉の基部(Fig 4.2.1)に輸入され、その後葉脈を通り葉身全体に輸送される。基部からのリンの流入量により葉身でのリン輸送の結果が変化されることが予測される。そこで基部でのリン濃度の時間変化を見るために、基部での 453 枚の画像毎の輝度値変化を抽出した。(Table 4.2.1)

Table 4.2.1 葉柄輝度値実測値 (抜粋)

時間(画像番号)	1	50	100	150	200	250	300	350	400
計測輝度値	8	54.5	166	239	255	255	255	255	255

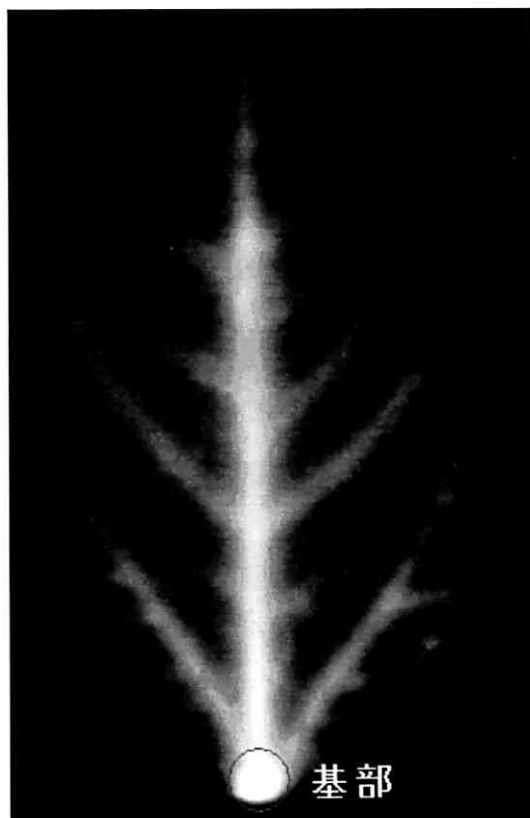


Fig 4.2.1 基部データ測定位置

4.2.2 葉脈上データ抽出

葉脈は維管束と呼ばれ物質を輸送する管であり、葉身への物質移行に重要な役割を持っているが、葉脈同士の接続が葉脈毎に異なるために、それぞれの葉脈により物質輸送速度及び量が異なると予測される。そこで葉脈ごとの物質輸送変化を調べるため、葉身から葉脈上を選出した。また葉脈抽出を画像認識により自動的に行うことが困難だった為、手作業にてリンの拡散データ及び、葉の写真を参考に選出した。また、画像上で識別可能な一次側脈までを対象とする。

解析方法

葉の画像より、葉脈の、面積・半径・長さ・基部からの距離を計測した。

動画データより主脈と一次側脈 12 本を選択し、ImageJ を用い選択した脈上の 1pixel 毎の 0-255 の輝度値データを計測した(Fig 4.2.2)。抽出した輝度値データは膨大な情報量の為、抽出データの一部を Table 4.2.2 に示す。

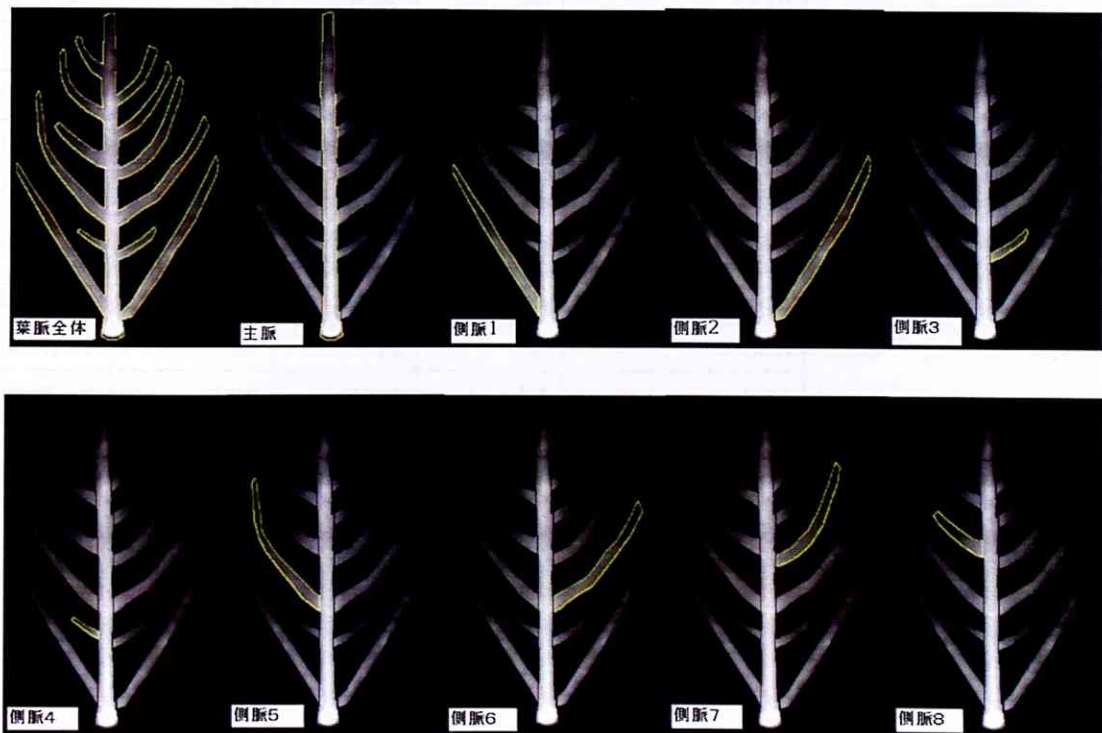


Fig 4.2.2 選択した葉脈画像と脈番号

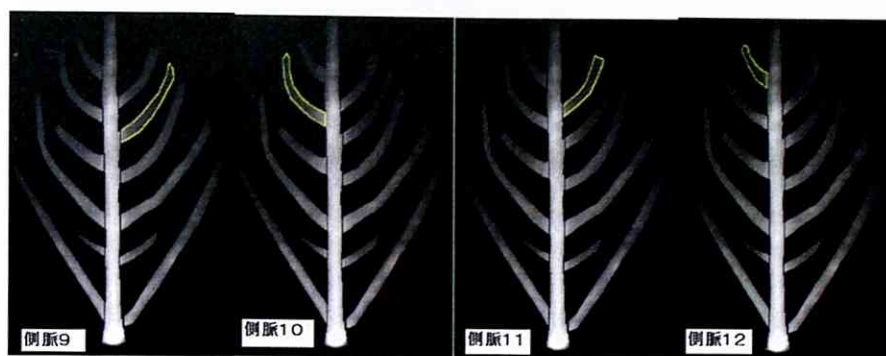


Fig 4.2.2 選択した葉脈画像と脈番号（続き）

Table 4.2.2 葉脈計測データ

	葉脈面積 (pixel ²)	葉脈半径 (pixel)	葉脈長さ (pixel)	基部からの距離 (pixel)
主脈	7546	20.15	415	0
側脈 1	2361	10.35	208	41
側脈 2	3033	9.9	236	24
側脈 3	554	8	55	105
側脈 4	274	6.85	40	118
側脈 5	2007	10.8	186	153
側脈 6	2264	12.75	168	153
側脈 7	1913	9.6	152	212
側脈 8	1060	11.5	75	231
側脈 9	1307	10.25	113	263
側脈 10	1102	10.5	104	288
側脈 11	996	10.15	85	305
側脈 12	588	11.1	54	344

4.2.3 葉肉上データ抽出

葉肉は葉身内の維管束部を除いた部分をさす。葉肉部は柵状組織と海綿状組織からなる柔組織からなる。この組織内に葉緑素を含む為に、植物の養分生成において重要な箇所となる。

今回は、4.2.2 節で抽出した葉脈を動画画像上で除去した際に残る部分を葉肉とした。その際、葉脈除去の為に分けられた領域毎に葉肉 1、葉肉 2、と名称をつけた(Fig4.2.3)。そして各葉肉上の輝度値データを抽出した。抽出した輝度値データは膨大な情報量の為、各葉肉内部のピクセル数をカウントした面積データのみ Table 4.2.3 に示す。



Fig 4.2.3 選択した葉肉部画像

Table 4.2.3 葉肉計測データ

	面積(pixel ²)
葉肉 1	6087
葉肉 2	5647
葉肉 3	8407
葉肉 4	8661
葉肉 5	7430
葉肉 6	5231
葉肉 7	2705
葉肉 8	1970
葉肉 9	2095
葉肉 10	2853
葉肉 11	1208

4.3 葉身全体での物質輸送面積変化

葉身全体に対して時間及び物質濃度による物質輸送面積変化解析を行う。

時間による葉身内のリンの拡散面積変化を計測し、その後リン濃度による物質輸送面積変化を計測した。

解析方法

輝度値に対応した数値データによって物質輸送がどの様に変化するかを解析するために、453 枚の各画像に対し、0-255 の各輝度値をとるピクセル数をカウントした。

その後、輝度指定閾値として {10,30,50,70,90,110,130,150,170,190,210,230} を設定し、設定した輝度値以上を取る領域のピクセル数を表にしたのが Fig4.3-1 である。

より詳細に輝度値に対する領域測定を行うため、{20-30,30-40,40-50,50-60,60-70,70-80} の 6 つの範囲内の輝度値を用いて面積の時間変化をまとめたのが Fig 4.3-2 である。輝度値 80 以上ではお互いのグラフが近い値を取るため 80 までの輝度値を取り扱う。

結果

Fig 4.3-1 において、測定ノイズにより結果が影響されないと判断した輝度値の閾値が 10 以上の輝度値を取り扱った。つまり 10-255 までの範囲の輝度値をとる箇所のピクセル数に着目する。この輝度値範囲は、リンの濃度が少量でも存在する面積と一致すると仮定する。すると、時間初期では穏やかにリンが存在する面積が増え、時間が経過するに従い葉身内のリンが存在する面積が増加し、ピクセル数約 75000 に漸近して行くことが分かる。これは、葉のピクセル数が約 75000 であり、リンの拡散が葉の全域に至ったことを示している。

続いて、リン濃度が高めの輝度値 30 以上に着目すると、輝度値 10 の時と比較して遅いスピードでリンの葉身内の輸送面積を広げていることがわかる。そして、測定時間内ではピクセル数約 30000 までリンの輸送が行われたことがわかる。

さらにリン濃度が高い輝度値 50 以上に着目すると、輝度値 30 の時よりさらに葉身へのリンの輸送が遅いことがわかる。また、測定時間内ではピクセル数約 20000 にまでリンの輸送が行われたことがわかる。

以降の輝度値に着目しても、リンの濃度が高くなるにつれ、葉身でのリンの輸送速度が遅く、最大値での面積が徐々に少なくなることが分かる。

Fig 4.3-2 では、リン濃度が低い値をとるときの葉身内の面積変化を示した輝度値が 20-30 をとるグラフに着目すると、時間 170 付近で葉身内のリンの輸送面積の最大値を向かえ、その後減少していることが分かる。面積の最大値は約 32000 である。

リン濃度を高くした 30-40 のグラフに着目すると、リンの拡散面積の最大値を時間 300 付近でとり、その後面積を減らしている。面積の最大値は約 22000 である。

それ以降は、最大値をとる時間が、計測時間を越えているため計測できないが、それぞれのグラフの最大値を取るまでの時間は、リンの濃度が濃くなるに従い時間が後方にずれ、その時のリンの拡散面積はリン濃度が高くなるほど低くなることがわかる。

考察

Fig 4.3-1 の解析により、リン濃度の閾値を低くとるほど、時間初期で葉身全体にリンを輸送させていることが分かる。また、リン濃度が高いほどゆっくりと葉身へリンを輸送させていることが分かる。

よって、植物の葉身内の物質輸送は、時間初期に葉身全域に低い濃度の物質を行き渡らせてから、その後葉身内の物質濃度を上昇させることが予測される。

Fig4.3-2 の解析により、リン濃度による拡散面積の最大値の時間に着目することにより、リン濃度が低い時ほど拡散面積が広く、時間が初期時間に最大面積をとり、リン濃度が高くなるほど最大面積をとる時間が後方にずれていくことが分かる。

よって、Fig4.3-1 では時間初期の広い範囲のリンの拡散がいえ、Fig4.3-2 では時間初期ではリン濃度が低いエリアが拡散をし、時間が経過するごとにリン濃度が高くなっていることが分かる。

結論

解析の結果、葉身内の物質輸送は、時間初期において物質濃度を低く葉身全体に輸送し、その後徐々に葉身内の物質濃度を高めていることが分かった。

4.4 物体伝達量の時間変化 指定輝度以上をとるピクセル数

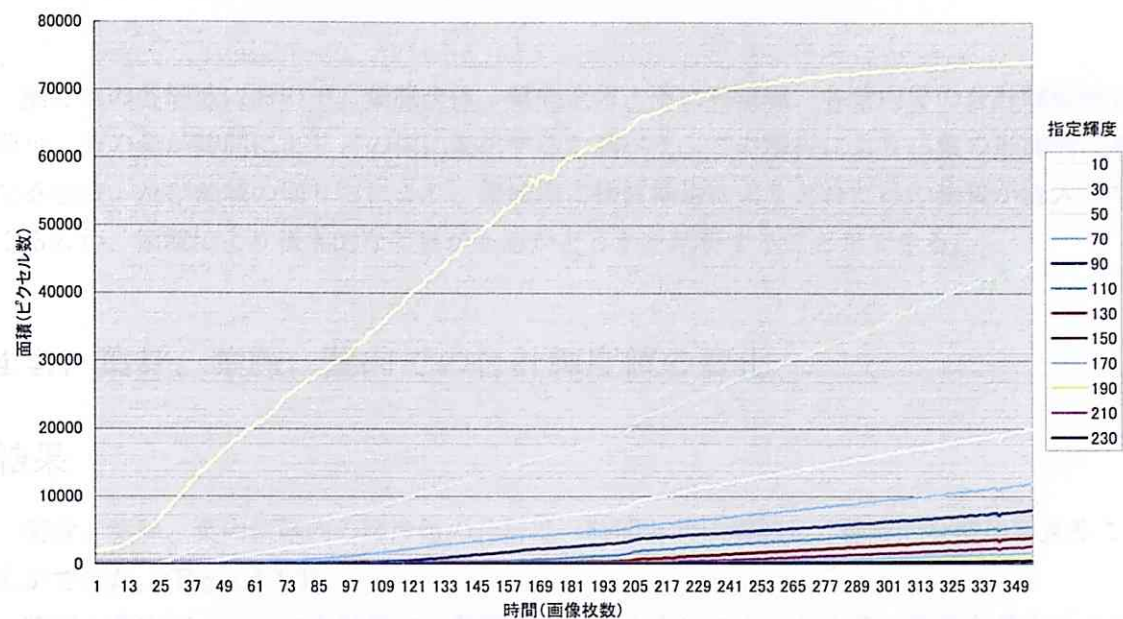


Fig 4.3-1 指定輝度値以上をとるピクセル数変化

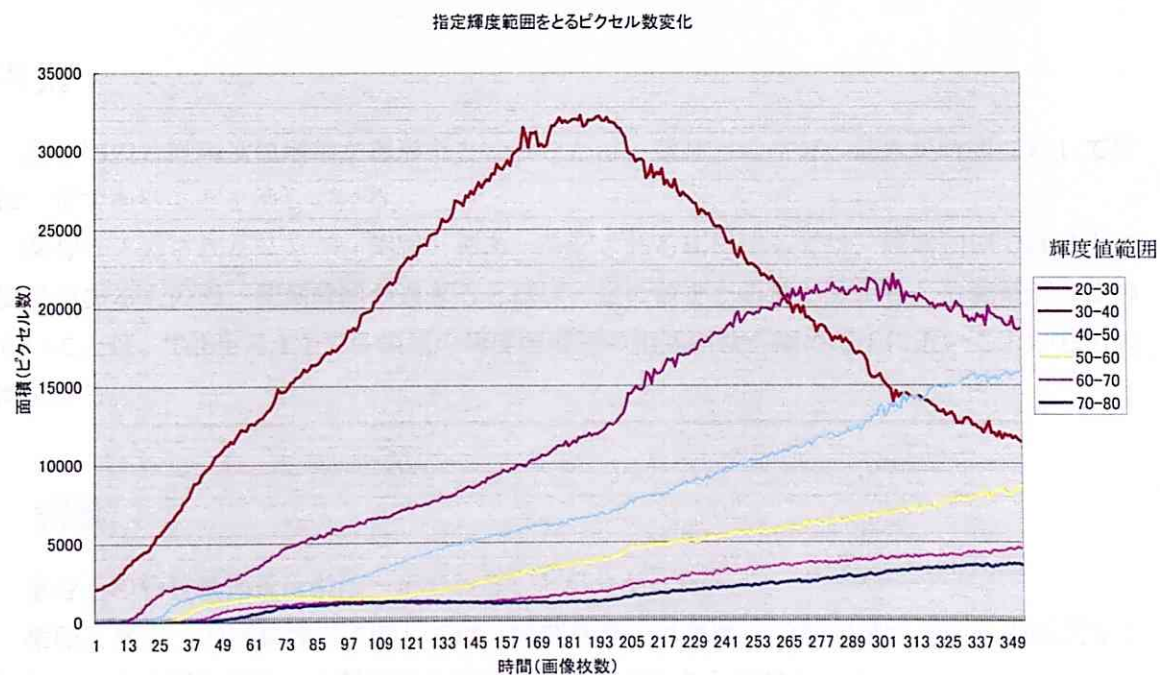


Fig 4.3-2 指定輝度値範囲をとるピクセル数変化

4.4 物質輸送量の時間変化

葉身内の各領域において、葉脈全体、葉肉全体、更に各葉脈、各葉肉での合計輝度値を調べ、その量が時間によりどの様に変化するか調べた。この解析により、葉の形態的に異なる領域、及び領域の切り方により、領域内に物質輸送によりどれだけの物質が流入してくるのか、領域により根本的な差異があるかどうかを解析することができる。

4.4.1 葉身、葉脈、葉肉での合計輝度値の変化

結果

葉身、葉脈、葉肉領域内の輝度値の合計は、時間と共に増加し、線形的な増加を見ることができた。(Fig 4.4.1-1)

葉脈と葉肉でのリンの合計値は、葉脈のほうが大きいことが分かる。葉脈と葉肉との輝度値の合計の比の時間変化は、時間初期に変動があり、その後この比はほぼ1前後をとる。(Fig 4.4.1-2)

考察

葉身内の合計輝度値増加が線形だということは、葉身へのリンの流入が時間に対して常に一定であることを示している。

葉身へ入力されたリンが、葉脈と葉肉へ分配される比に関しては、時間初期では多少の変動があるものの、初期時間が過ぎるとほぼ一定の値をとる事が分かる。分配量がほぼ等しいことは、Table 4.4.1 で各領域の輝度値増加の相関係数が極めて1に近いことから判断できる。

結論

葉身への物質輸送量は常に一定であることが分かった。

葉脈と葉肉への物質輸送に関しては、時間初期では葉脈への輸送量が葉肉への輸送を上回り、一定時間経過後その輸送量の比は一定に近づくことが分かった。

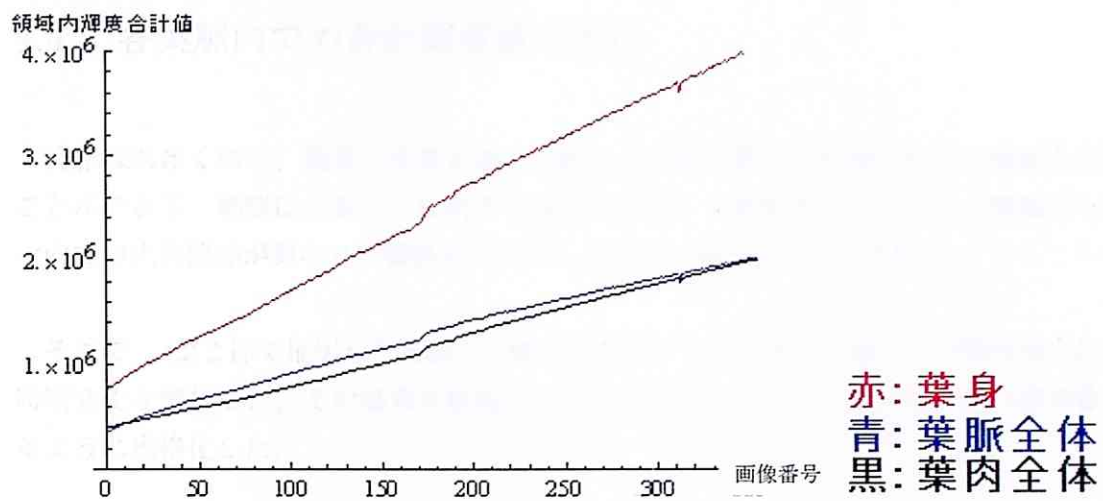


Fig 4.4.1-1 葉身、葉脈、葉肉上の合計輝度値の時間変化

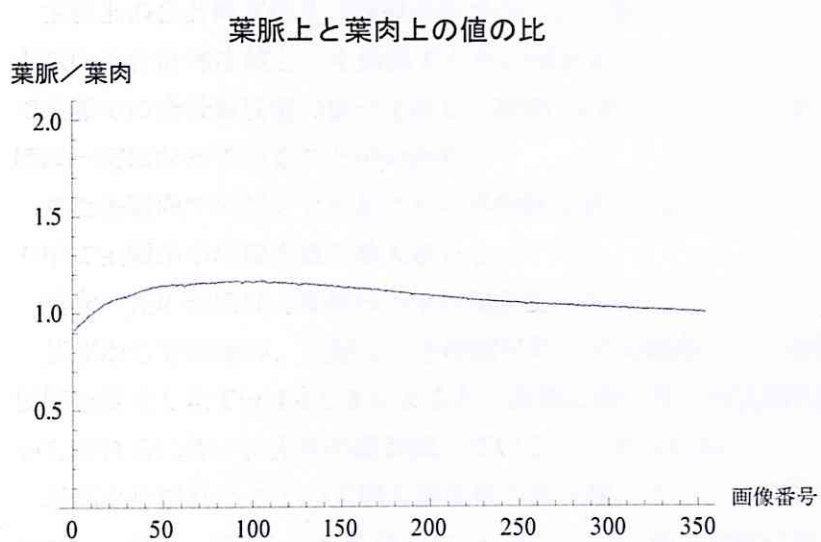


Fig 4.4.1-2 葉脈上と葉肉上の合計輝度値割合の時間変化

Table 4.4.1 領域同士の相関係数(小数第4位四捨五入)

葉身と葉脈 : 0.998
葉身と葉肉 : 0.998
葉脈と葉肉 : 0.992

4.4.2 各葉脈内での合計輝度値の変化

葉脈は大きくわけ、葉身の中央を通る主脈と、主脈に繋がり外側へのびる側脈と分けることができる。側脈は主脈上に接続する位置をずらして複数存在するため、側脈ごとに葉身内での位置関係が異なり、側脈毎でのリンの総量が異なると予測される。

そこで、4.2.2 節で抽出した葉脈上の輝度値変化データを基に、脈ごとの輝度値合計値の時間変化を解析した。その結果を脈毎のピクセル数割ることで、ピクセル毎の増加量となるように規格化した。

結果

主脈上の合計輝度値及び側脈全体での合計輝度値の時間変化を計測し、Fig 4.4.2-1 では主脈内の合計輝度値と、全側脈での合計輝度値の比をとった。その結果、時間初期において主脈での合計輝度値の値が上昇し、時間 50(枚)あたりで主脈と側脈の合計輝度値の差がほぼ一定になっていることがわかる。

また各脈内でのピクセルあたりの平均輝度値を Fig 4.4.2-2 より比較すると、13 本の葉脈の中で主脈が平均輝度値の最大値をとっている。

葉身の先の側脈ほど葉脈内の平均輝度値が低くなっている。

基部から等距離の、主脈での全時間平均の平均輝度値と、側脈での全時間平均の平均輝度値を測定した Fig 4.4.2-3 によると、基部に近い所では主脈の値が側脈より大きく、基部から離れるに従い、主脈の値が減っていることが分かる。

基部から離れるごとの主脈の輝度値の減少幅に比べて、側脈での輝度値の減少が非常に少ない。また、基部からの距離 300(pixel)ほどで主脈と側脈の値がほぼ一致し始めることが分かる。

考察

時間初期から時間 50 (枚) まで主脈の合計輝度値が増加し、時間初期では主脈への物質輸送量が増加していることがわかり、そのことは葉身内の主脈方向への物質移行が行われていることである。

その後側脈への輸送量が増加していることは、葉身の横方向への物質輸送が行われていることがわかる。

その後一定時間経過後、主脈と側脈への物質輸送の割合は一定値に近づいていくことから、葉身全体で物質濃度が上がっていることがわかる。

結論

時間初期では主脈に物質輸送が集中することで葉身の縦方向への物質輸送が強まり、その後、側脈への物質輸送が強まり、葉の横方向へ物質が輸送される。

また、一定時間経過後を境に主脈と側脈の物質輸送量の比が一定になり、葉身全体で領域によった一定の濃度上昇が起こる。

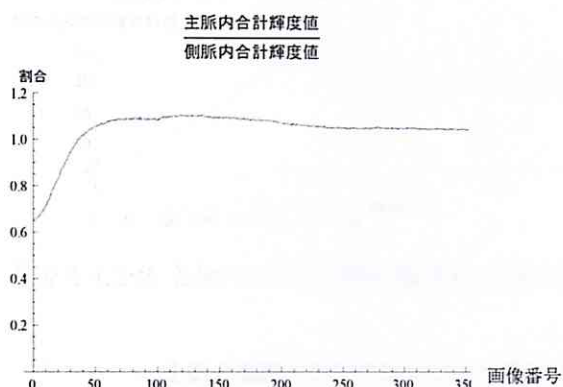


Fig 4.4.2-1 合計輝度値の主脈/側脈

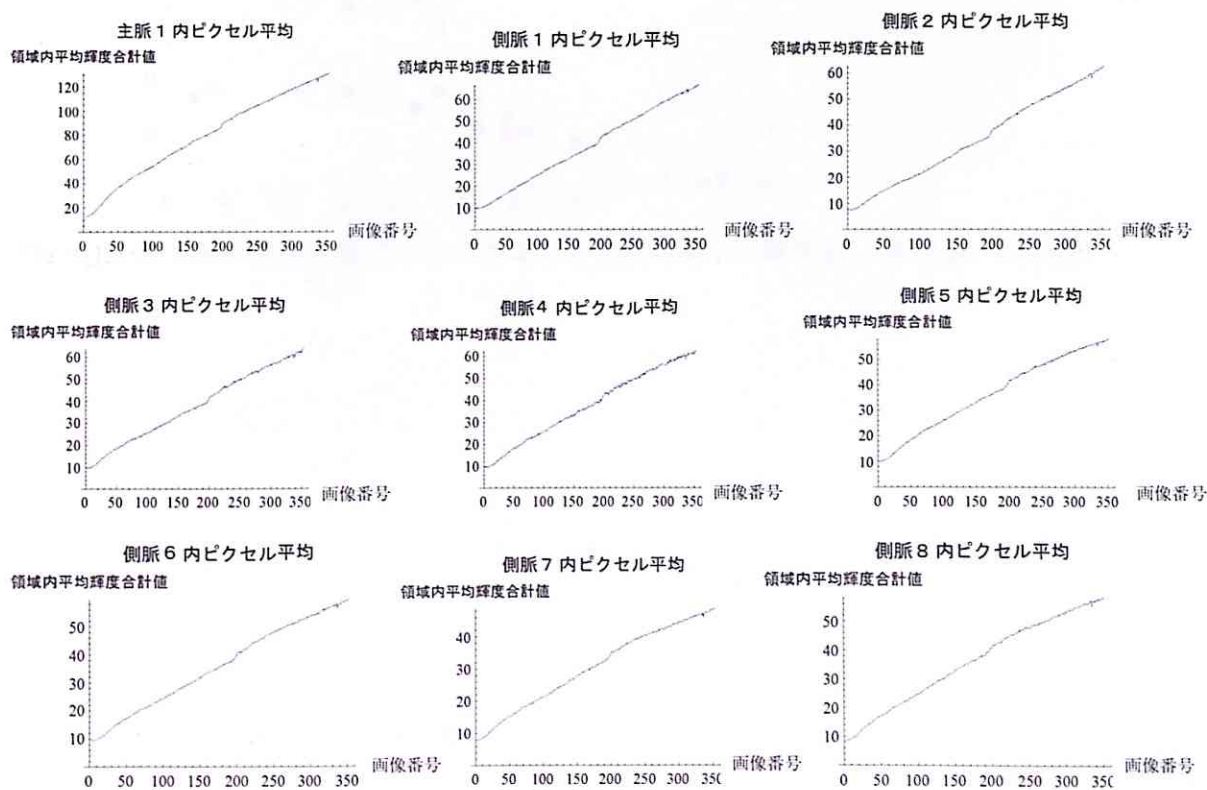


Fig 4.4.2-2 各脈での合計輝度値変化

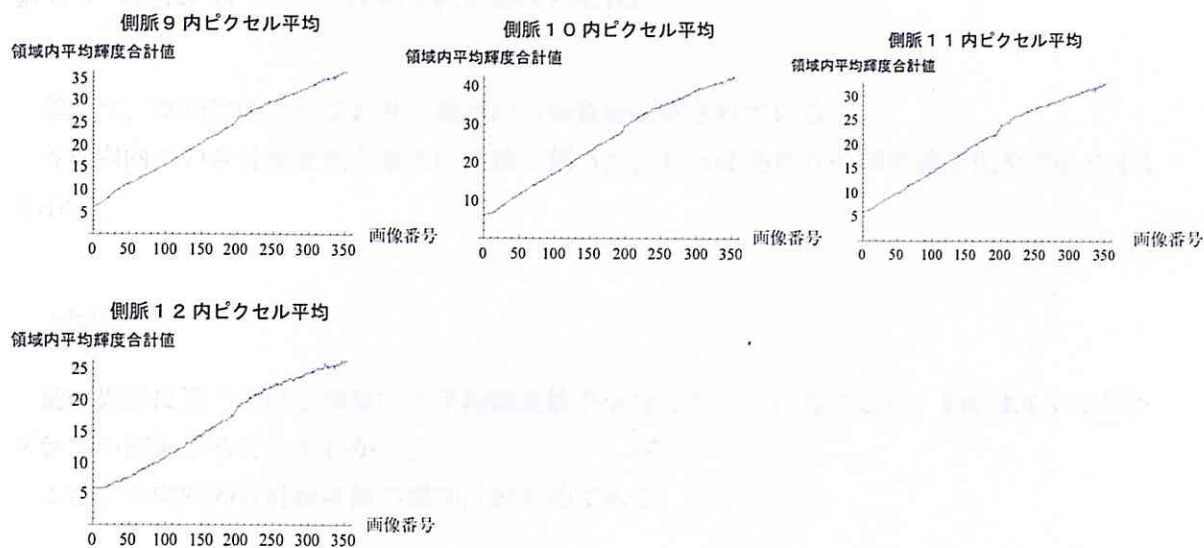


Fig 4.4.2-2 各脈での合計輝度値変化（続き）

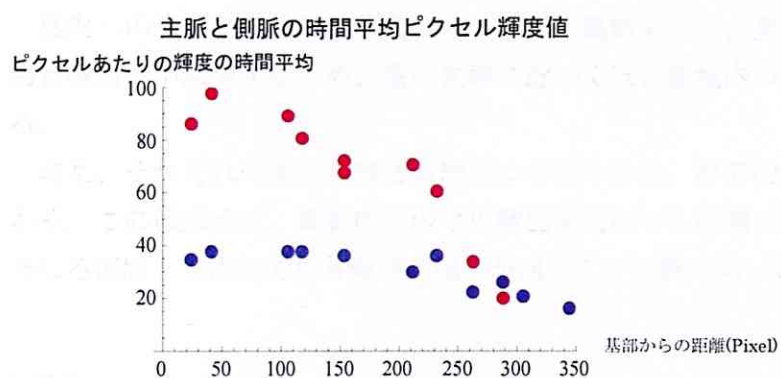


Fig 4.4.2-3 主脈と側脈の基部からの距離による総時間平均輝度値（赤:主脈 青:側脈）

4.4.3 各葉肉内での合計輝度値の変化

葉肉は、葉脈に囲まれており、葉脈から物質輸送をされている。

各葉肉内での合計輝度値を葉肉の面積で割った、1pixelあたりの輝度値変化を Fig 4.4.3 で示す。

結果

葉の先端に近づくほど領域内の平均輝度値が少なくなっていることが、Fig 4.4.3 での各グラフの値をみることでわかる。

また、葉肉内の合計輝度値の増加は線形的である。

考察

葉肉へのリンの供給源が葉肉の回りを囲む葉脈であり、葉身の先端に近づくほど葉脈の物質輸送量が減少するため、葉の先端に近づくほど領域内の平均輝度値が少なくなっている。

また、それぞれの葉肉の輝度値増加に着目すると、線形的な増加を見せていることが分かる。この線形性は、葉脈内での平均輝度値増加でも観測できたことであり、本来機能が異なる葉脈と葉肉部で物質輸送の様子が同じことは興味深い点である。

結論

葉身先端部の葉肉ほど物質輸送量が減少する。

葉肉内での輝度値増加が時間に対して線形である。

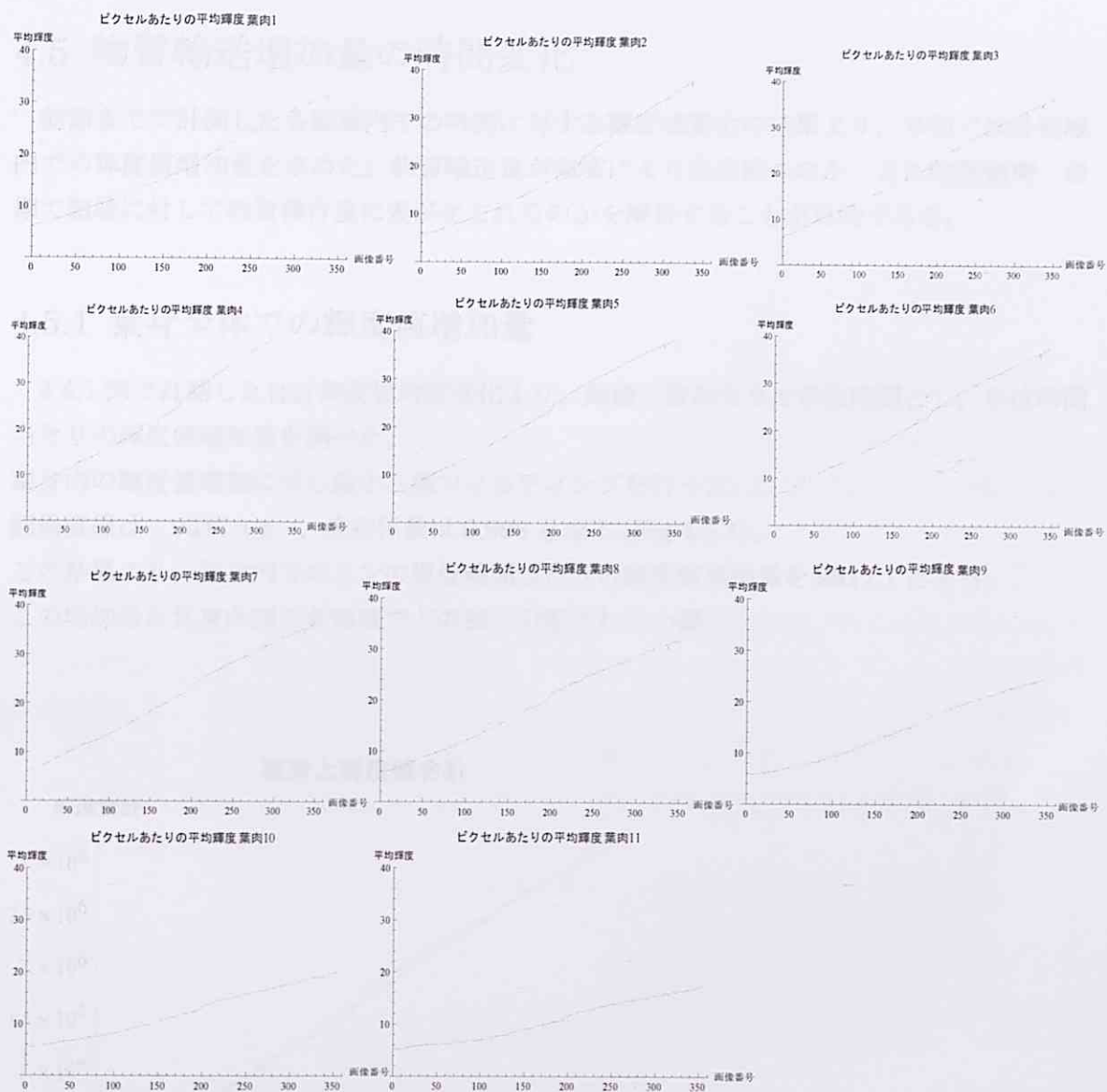


Fig 4.4.3 葉肉内の合計輝度値変化

4.5 物質輸送増加量の時間変化

前節までで計測した各領域内での時間に対する輝度値変化の結果より、本節では各領域内での輝度値増加量を求めた。物質輸送量が領域により差を持つのか、また時間初期、後期で領域に対して物質移行量に差が生まれるのかを解析することが目的である。

4.5.1 葉身全体での輝度値増加量

4.4.1 節で計測した合計輝度値時間変化より、画像一枚あたりを単位時間とし、単位時間当たりの輝度値増加量を調べた。

葉身内の輝度値増加に対し最小二乗フィッティングを行った。

回帰直線は $9517.1 t$ 、決定係数は 0.998 となる (Fig 4.5.1)。

この結果より、葉身内でのリンの単位時間当たりの輝度値増加量を 9517.1 とする。

この増加量が葉身内部の各領域でどの様に分配されるか調べた。

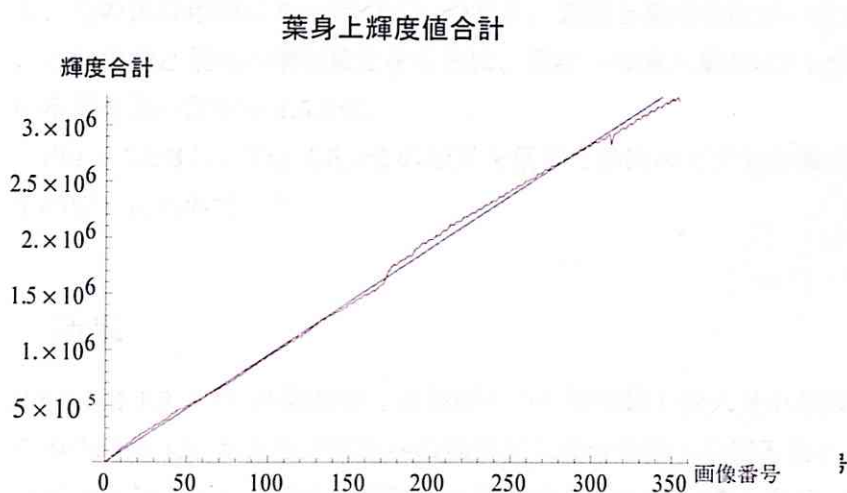


Fig 4.5.1 葉身上合計輝度値（赤）及び傾き 9517.1 の線形近似関数（青）

4.5.2 葉脈、葉肉全体での合計輝度値増加

4.5.1 節で葉身全体への時間当たりの輝度値増加量が 9517.1 t であることから、画像一枚あたりの葉身での輝度値の増加を 9517.1 とする。その増加量が葉肉部及び、葉脈部でどの様に配分されているか解析を行った。

解析

葉脈上と葉肉上の合計輝度値を単位時間ごとに差分をとることで増加量を求めた。

増加量の時間変動が差分を用いた為激しく、グラフを滑らかにする為画像ごとに増加量値の平均化を行った。平均化する画像の増加量を、平均化する画像以降 19 枚の画像の増加量との平均値で置き換えることで平均化した。この作業を全画像に対して行った。

平均化した葉脈上の増加量と、平均化した葉肉上の増加量の比を取った (Fig 4.5.2-1)。

Fig 4.5.2-1 のグラフに対し最小二乗フィッティングを行った結果、回帰曲線が $0.596176 + 80.5419/(67.3434 + t)$ であり決定係数は 0.970627 である。このフィッティング結果を時間微分すると、 $-(80.5419/(67.3434 + t)^2)$ となる。この関数は $t=200$ で 0.00112689 をとり、その後は単調に 0 へ近づく。つまり、葉脈と葉肉の比が一定に近づくことを差す。

この葉脈と葉肉の増加量比をもとに、葉身への流入量 9517.1 が葉脈と葉肉に配分されている量を調べた (Fig 4.5.2-2)。

Fig 4.5.2-3 は、Fig 4.5.2-2 の結果を葉脈と葉肉のピクセル数で割り、ピクセルあたりの平均値したものである。

結果

Fig 4.5.2-1,2 より、時間初期では葉脈の方の輝度値の流入量が葉肉の流入量を上回っている。その後時間 120 あたりで葉肉への物質流入量が葉脈への流入量を上回る。時間 200 付近から、葉肉と葉脈への物質流入量比が一定に近づいていく。

結論

葉脈と葉肉の物質輸送は時間に依存することが分かった。

時間初期では葉脈の物質輸送量が多い。時間 120 付近で葉肉の物質輸送量が多くなる。

4.4.2 節では、時間初期で主脈への流入が強まり、その後側脈への流入が強まっていた為、本節の結果より、時間初期では、葉脈及び主脈にリンの流入が強く起こり、その後葉肉及び側脈へリンの流入が強まることが分かった。

一定時間経過後、葉脈と葉肉への流入量の比が一定に近づいてくることが分かった。

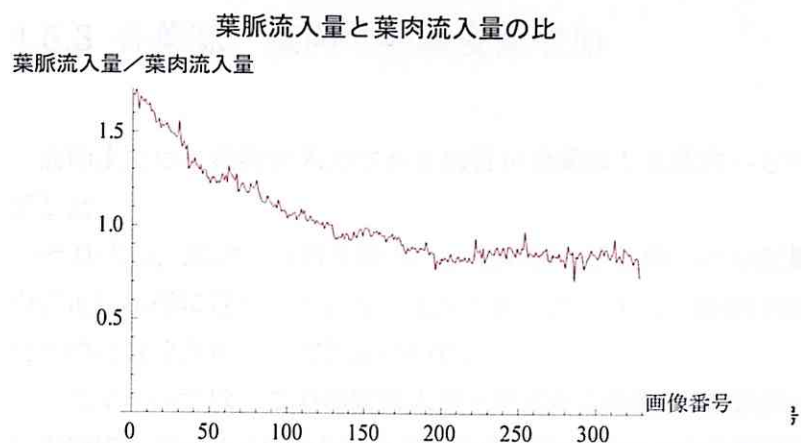


Fig 4.5.2-1 葉脈と葉肉リン流入比の時間変化

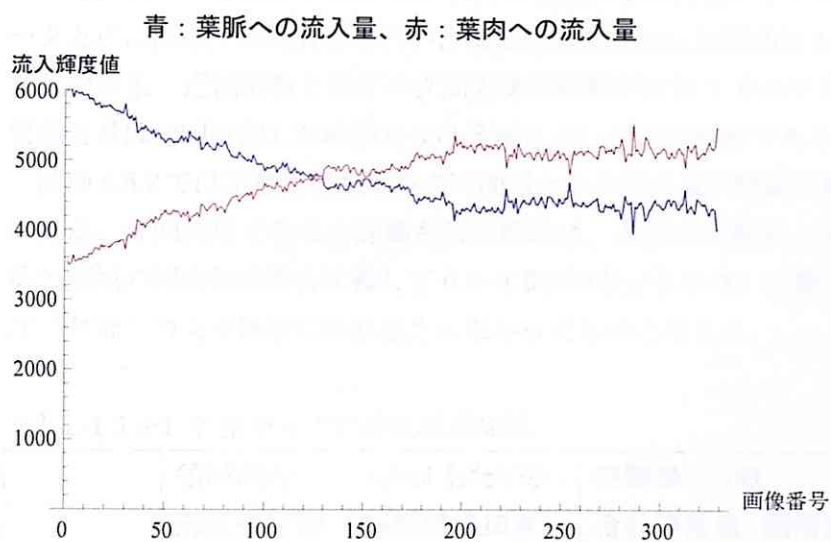


Fig 4.5.2-2 葉脈と葉肉の時間当たりの流入量

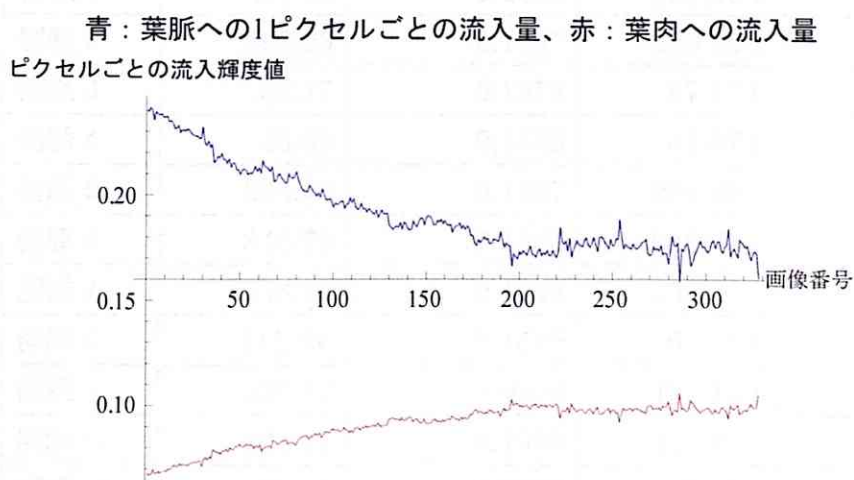


Fig 4.5.2-3 葉脈と葉肉への 1pixel あたりの平均流入量

4.5.3 各葉脈、葉肉での輝度値増加

前節までは、葉身に入力された物質が全葉脈と全葉肉へどのように分配されていくか計測した。

その結果、葉身への物質流入の、全葉脈と全葉肉への分配量は時間によって変動し、その後定常状態に近づいていくことがわかった。今回の場合は時間 200 あたりから葉脈と葉肉への物質流入量が一定に近づいた。

そこで本節では、この物質流入が一定になる時間 200 以降の各葉脈、各葉肉への物質配分の近似関数を 4.4.2 節及び 4.4.3 節の葉脈と葉肉の合計輝度値および、側脈が接続する主脈部の合計輝度値に最小二乗フィッティングを行うことで求めた。

また、この近似関数が時間 200 以前でも使えるか判断するために、時間 200 以前の実データと近似関数で回帰分析を行い、決定係数を算出した(Table 4.5.3-1~3)。

その結果、近似関数と実データ間の決定係数がほぼ 1 であり各葉脈、各葉肉領域内部物質輸送量は今回計測した時間 0-353 全域においてほぼ線形であるといえた。

前節 4.5.2 では葉脈及び葉身への時間当たりの流入量が時間初期と後期では変化すると述べたが、今回線形であると評価された原因は、本来は非線形と判断されるべき変化量が全体の領域の輝度値総量と比較して 0.3~1.6%のという小さい変動であったため、この変動が回帰分析での決定係数には影響されなかったものとする。

Table 4.5.3-1 各葉脈上での輝度値増加量

	領域内の 輝度値増加	1pixel あたりの 輝度値増加量	時間当たりの 合計輝度値 回帰直線	決定係数
主脈	2746.59	0.3640	2746.59 t	0.99
側脈 1	381.43	0.1616	381.43 t	1.00
側脈 2	469.25	0.1547	469.25 t	1.00
側脈 3	87.17	0.1574	87.17 t	1.00
側脈 4	43.38	0.1583	43.37 t	1.00
側脈 5	294.48	0.1467	294.48 t	0.99
側脈 6	340.72	0.1505	340.71 t	1.00
側脈 7	238.11	0.1245	238.11 t	0.99
側脈 8	162.76	0.1535	62.76 t	0.99
側脈 9	118.12	0.0904	118.11 t	0.99
側脈 10	121.11	0.1099	121.11 t	0.99
側脈 11	80.58	0.0809	80.58 t	0.99
側脈 12	35.98	0.0612	35.97 t	0.99

Table 4.5.3-2 主脈上の側脈結合部での輝度値増加量

	領域内の 輝度値増加	1pixel あたりの 輝度値増加量	時間当たりの 合計輝度値 回帰直線	決定係数
主脈 1	704.47	0.5419	704.46 t	0.99
主脈 2	527.94	0.4403	527.94 t	1.00
主脈 3	329.93	0.4417	329.93 t	0.99
主脈 4	361.52	0.4085	361.52 t	0.99
主脈 5	145.74	0.3662	145.73 t	0.99
主脈 6	185.36	0.3497	185.35 t	0.99
主脈 7	184.54	0.3736	184.53 t	1.00
主脈 8	99.81	0.3251	99.80 t	1.00
主脈 9	117.41	0.1704	117.41 t	1.00
主脈 10	89.87	0.0901	89.87 t	1.00

Table 4.5.3-3 葉肉部での輝度値増加量

	領域内の 輝度値増加	1pixel あたりの 輝度値増加量	時間当たりの 合計輝度値 回帰直線	決定係数
葉肉 1	430.06	0.0707	430.05 t	0.99
葉肉 2	490.88	0.0869	490.88 t	0.98
葉肉 3	703.70	0.0837	703.70 t	1.00
葉肉 4	867.46	0.1002	867.45 t	1.00
葉肉 5	684.58	0.0921	684.58 t	1.00
葉肉 6	462.57	0.0884	462.57 t	1.00
葉肉 7	234.22	0.0866	234.22 t	1.00
葉肉 8	147.18	0.0747	147.18 t	1.00
葉肉 9	111.36	0.0532	111.36 t	0.99
葉肉 10	112.81	0.0395	112.81 t	0.99
葉肉 11	39.21	0.0325	39.20 t	0.98

4.6 物質輸送経路による物質分配解析

4.6.1 葉脈内での物質分配

4.5.3 節より葉の分岐地点のデータを抽出したのが(Table 4.6.1-1)である。

データの上3列(1,2,3)は、葉脈が3分岐している箇所をしめしており、4列目からは二分岐系を示している。

ここで分岐前後の主脈と側脈に対する増加輝度値の平均をとり、分岐前の主脈の値を1に規格化すると(Table 4.6.1-2)となる。

結果、主脈から側脈が分岐する際に、分岐前の主脈の物質量を1に規格化すると三分岐系では物質分配は、平均で分岐後の主脈に約0.9、側脈に約0.3ずつ起こることがわかった。

また、二分岐系においては、分岐後の主脈に約0.8、側脈に約0.3分配されることがわかった。

Table 4.6.1-1 分岐地点データセット

	分岐前	分岐後		
	主脈平均増加輝度値	主脈平均増加輝度	側脈平均増加輝度	側脈平均増加輝度
1	0.54190	0.44032	0.161556	0.154715
2	0.44032	0.44168	0.158318	0.157351
3	0.44168	0.40850	0.146726	0.150494
4	0.40850	0.36617	0.124471	
5	0.36617	0.34973	0.153549	
6	0.34973	0.37356	0.090374	
7	0.37356	0.32511	0.109902	
8	0.32511	0.17041	0.080905	
9	0.17041	0.09014	0.061185	

Table 4.6.1-2 葉脈分岐による平均増加輝度値の分配

		3分岐系平均	2分岐系平均
分岐前	主脈平均増加輝度値	1	1
分岐後	主脈平均増加輝度値	0.9135	0.8072
	側脈平均増加輝度値	0.3299	0.3141
	側脈平均増加輝度値	0.3278	

4.6.2 葉脈と葉肉での物質分配解析

次に、葉脈に囲まれた葉肉について考える。葉肉とそれを囲む葉脈のデータを抽出したのが Table 4.6.2-1 である。ここで、下段の方の側脈についての空白部は、葉肉に対して葉脈が上下片側しかない箇所を示している。各値の平均値をとり、主脈の値を 1 に規格化したのが Table 4.6.2-2 である。この表より、葉肉が上部と下部両方にある時と、片側にしかない場合で、葉脈が片側のみの場合のほうが葉肉内部の輝度値上昇率が少なくなることが分かる。

Table 4.6.2-1 葉肉データセット

	葉肉内平均輝度値増加	主脈平均輝度値増加	側脈(下)平均輝度値増加	側脈(上)平均輝度値増加
1	0.088430	0.408498	0.150494	0.124471
2	0.074713	0.373555	0.090374	0.080905
3	0.053156	0.170411	0.109902	0.061185
4	0.083704	0.440999	0.161556	0.146726
5	0.100157	0.440999	0.154715	0.150494
6	0.092138	0.374802	0.153549	0.109902
7	0.086589	0.357953	0.124471	0.090374
8	0.070652	0.541899		0.161556
9	0.086928	0.541899		0.154715
10	0.039541	0.090145	0.080905	
11	0.032455	0.090145	0.061185	

Table 4.6.2-2 葉脈から葉肉に分配される平均増加輝度値

	側脈が上下にある場合	側脈が上方もしくは、下方のみの場合
葉肉内の輝度値増加割合	0.2257	0.1816
主脈内の輝度値増加割合	1.0000	1.0000
上側脈内の輝度値増加割合	0.2957	0.1813
下側脈内の輝度値増加割合	0.3681	

4.7 葉脈内輝点移動速度計算

次に側脈 1 内の輝点移動速度計測を行った。輝点の移動速度は、葉脈内の物質輸送速度となる。しかし輝点の移動速度は、実際の脈内の水分移動速度とは対応つかないので注意が必要である。これはリンが葉脈内の水分移動と共に移動する体積流としての流れと、リンの濃度勾配により流れる拡散流とが、合わさっている為である。

計測方法は、特定の輝度値に着目し、葉脈内における輝度値の座標の時間変化を記録し、その座標情報より葉脈内での移動量を計算した。

0~255 の輝度値情報のうち、葉脈内の移動が広範囲にわたって観測できる輝度値 23~94 を解析に用いる。それぞれの輝度値に着目した際に、Fig2.2.2 の側脈 1 の根元から何 Pixel に指定輝度値があるか計測した。輝度値 {23,33,43,53,63,73,83,93} を抜粋した計測結果が Fig4.7-1 である。側脈 1 の長さ 208(pixel)に漸近していく様子が分かる。また、Fig4.7-2 は全グラフを原点に合わせたものである。輝度値により、葉脈内の移動スピードに差があることが分かる。

輝度値毎に回帰分析を行い、回帰曲線を Table 4.7-1 にのせる。
この結果より、輝度値 f と時間に対する葉脈根元からの距離 $u(f,t)$ に対し、近似関数を製作すると以下となる。

$$u(f,t) = \frac{920}{f} \text{Log}(t) \text{ (Pixel)} \quad (17)$$

よって、速度は時間と輝度値に依存し、

$$v(f,t) = \frac{920}{f \times t} \text{ (pixel/枚)} \quad (18)$$

として、葉脈内の 1 次元方向の平均移動速度を、輝度値と時間の関数で表すことができた。
この結果より、輝度値が高いほど移動速度が遅く、輝度値が低いほど移動速度が遅いことが分かる。一般的な拡散流では、化学ポテンシャルの勾配により物質を流すが、拡散方程式の結果も時間初期で、低い濃度が空間的に広く拡散を起こし、その後高い濃度が広がっていく現象が観測できる。

また、一般の距離 L に式(18)を拡張すると以下となる。

$$u(f,t) = L * \frac{4.5}{f} \text{Log}(t) \text{ (Pixel)} \quad (19)$$

$$v(f,t) = L * \frac{4.5}{f \times t} \text{ (pixel/枚)} \quad (20)$$

注意点として、この結果は葉脈のような形態的に近い特徴を持った領域中での定式化であることと、その際の輝度値が 0-255 の中の 23-94 までで近似を行ったために、それ以外の輝度値には適応が難しいことである。例えば式(18)で輝度値 1、時間 1 において検証を行うと、画像一枚の間隔が 2 分で 1 ピクセルが 0.1mm の為、一秒あたりの移動速度が約 1mm/s となる。一方、直径 $60\mu\text{m}$ の管で最大樹液速度を 2m/h とすると、その中心は 0.28mm/s の移動となる。この差は誤差とは言えず、上記モデルの強い限定範囲を示している。この原因は、関数近似過程で用いた $\text{Log}(t)$ 及び、 $1/x$ が互いに 0 で発散してしまうために、特に時間初期、低い輝度値では使えない。

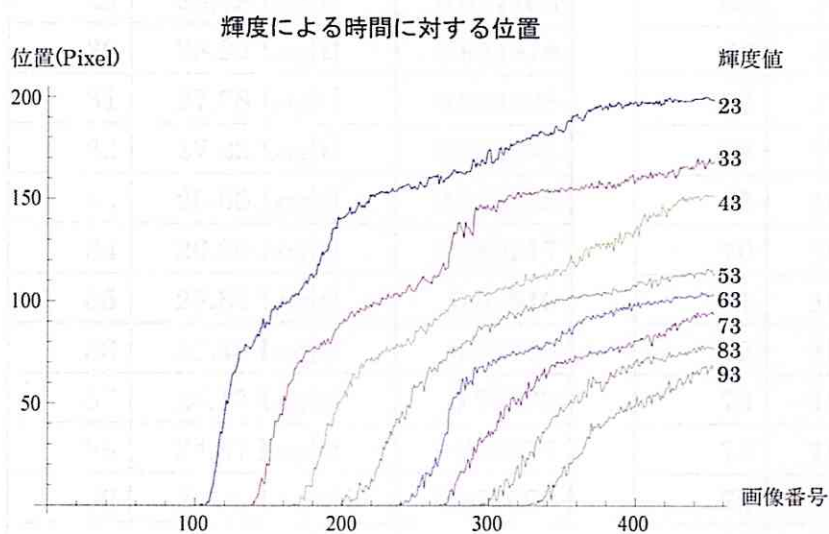


Fig 4.7-1 輝度値{23,33,43,53,63,73,83,93}に着目した際の葉脈内の位置変化

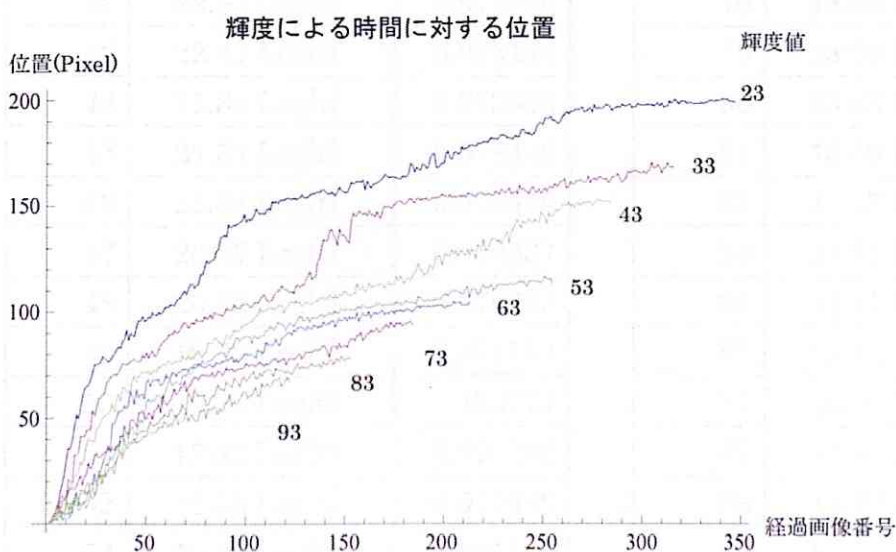


Fig 4.7-2 輝度値{23,33,43,53,63,73,83,93}に着目した際の位置変化

Table 4.7-1 輝度値毎の時間に対する位置の回帰曲線と決定係数(小数第3位四捨五入)

輝度値	回帰曲線	決定係数	輝度値	回帰曲線	決定係数
23	32.11 Log[t]	0.988104	59	18.03 Log[t]	0.965716
24	31.53 Log[t]	0.986865	60	17.77 Log[t]	0.96162
25	30.76 Log[t]	0.983662	61	17.90 Log[t]	0.968784
26	30.29 Log[t]	0.983887	62	17.83 Log[t]	0.969985
27	29.66 Log[t]	0.982099	63	17.69 Log[t]	0.969883
28	29.06 Log[t]	0.981243	64	17.52 Log[t]	0.969493
29	28.49 Log[t]	0.981166	65	17.60 Log[t]	0.976384
30	28.22 Log[t]	0.984818	66	17.26 Log[t]	0.972598
31	27.78 Log[t]	0.984928	67	17.16 Log[t]	0.975873
32	27.22 Log[t]	0.982995	68	17.11 Log[t]	0.981143
33	26.60 Log[t]	0.979738	69	16.97 Log[t]	0.984016
34	26.30 Log[t]	0.980217	70	16.62 Log[t]	0.981038
35	25.85 Log[t]	0.97816	71	16.17 Log[t]	0.975505
36	25.45 Log[t]	0.97718	72	15.94 Log[t]	0.975711
37	25.17 Log[t]	0.97893	73	15.63 Log[t]	0.973156
38	24.87 Log[t]	0.980317	74	15.31 Log[t]	0.969215
39	24.32 Log[t]	0.977609	75	14.84 Log[t]	0.960253
40	23.85 Log[t]	0.976592	76	14.53 Log[t]	0.956022
41	23.18 Log[t]	0.972266	77	14.07 Log[t]	0.945646
42	22.82 Log[t]	0.973729	78	13.88 Log[t]	0.943871
43	22.41 Log[t]	0.975147	79	13.76 Log[t]	0.943868
44	21.82 Log[t]	0.973853	80	13.63 Log[t]	0.944696
45	21.51 Log[t]	0.978446	81	13.59 Log[t]	0.947981
46	21.04 Log[t]	0.979456	82	13.27 Log[t]	0.941115
47	20.47 Log[t]	0.976837	83	13.31 Log[t]	0.948138
48	20.12 Log[t]	0.976753	84	13.11 Log[t]	0.945834
49	19.72 Log[t]	0.974153	85	12.81 Log[t]	0.940606
50	19.62 Log[t]	0.9771	86	12.70 Log[t]	0.942422
51	19.42 Log[t]	0.976396	87	12.30 Log[t]	0.933662
52	19.08 Log[t]	0.971242	88	12.26 Log[t]	0.938711
53	18.61 Log[t]	0.961769	89	12.11 Log[t]	0.939019
54	18.45 Log[t]	0.960195	90	11.78 Log[t]	0.933393

55	18.53 Log[t]	0.966154
56	18.26 Log[t]	0.962153
57	18.38 Log[t]	0.968719
58	18.27 Log[t]	0.969174

91	11.79 Log[t]	0.943178
92	11.53 Log[t]	0.942073
93	11.36 Log[t]	0.946026
94	11.08 Log[t]	0.945756

第 5 章

第5章 考察

従来までの構成的アプローチ・分析的アプローチに対する考察

始めに植物の輸送現象モデリング手法のアプローチ法を探る為に、現在までに行われている構成的なアプローチによる物質輸送経路作成について分析した。その結果、葉脈構造の再現に関する構成的なアプローチでは、基礎となるアルゴリズムの妥当性及び、全体の最適解を導出する事が困難であった。これは植物が長い年月をかけ進化してきた植物内輸送経路内で、運動量輸送・熱輸送・物質輸送がそれぞれ複雑に複合することと、葉の形態が多様性に富む為、モデル化することが困難であったと考えられる。

また葉の形態に関して維管束における水分物質輸送経路一つとっても、死んだ細胞からなる導管と、生きている細胞からなる仮導管で形成されており(Fig 5-1)、双方において水分輸送効率が異なる。これは、導管が長い管状になっているのに対し、仮導管は短く、仮導管双方の水のやりとりには、細胞壁を通して行っている為であり、この局所的な関係をモデル化し全体を再現することは困難である。

また、従来の一般的な分析的アプローチでの植物内物質輸送測定を行うと 1.4 節で述べたように平均値でしか追えない為、物質輸送を現象論的に解析することにも限界があった。

よってこの結果を基に植物の茎内の導管での物質輸送解析を行っても、茎内の局所的な圧力を参考に、導管内流れを Poiseuille の流れや多孔質流れとしてモデリングする方法がとられている^[10]。

分析的アプローチの考察

本研究では詳細なダイズの葉の内部の物質輸送の動画データに基づき、分析的アプローチにより植物内の物質輸送を詳細に計測できたことにより、植物の物質輸送の一部を解析することができた。

4.4.1 節及び 4.4.2 節にて葉脈と葉肉、主脈と側脈で時間初期と後期での物質輸送量が異なることを観測することができ、葉身での物質輸送段階に対して分けると次の三段階となる。この三段階により、4.3 節の葉身全体での物質輸送を実現していると予測される。

- ①：物質輸送初期において葉脈に物質輸送量が多くなると共に、主脈での物質輸送量が多くなることが観測された。
- ②：時間が経過すると共に側脈の物質輸送量が多くなり、結果的に葉肉への物質輸送量増加が観測された。
- ③：一定時間経過後、葉肉と葉脈、主脈と側脈への物質輸送量の比が安定して葉身内の物質輸送が各領域で一定の割合で増加することを観測された。

第 4 節では、葉身・葉肉・葉脈上の合計輝度値（物質輸送量）が各領域で時間に対して線形的に増加していることがわかる。ここで実際観測された線形的な増加に対比して、放物型や対数型に増加した場合を考える。Fig 5-2 は、(a)に線形型、(b)に放物型、(c)に対数型の物質輸送量の増加及び、時間当たりの物質流入量の時間変化のモデルである。線形型の物質輸送量では、流入量は時間に対して定常であることが分かる。放物型であるならば、流入量は物質輸送初期では少なく、物質輸送が進むにつれて増加していくことが分かる。また、対数型の場合は流入量が物質輸送初期で最大値を取り、その後少なくなることが分かる。

物質流入量が時間に対して極端に変動することは、その流入量を変化させる為に、植物生理学的に余計なエネルギー消費が必要となると考える。仮に砂漠などで養分が少しでもあれば早急に取り込まなければならない環境では、対数型の物質輸送量増加も考えられる。しかし一般の場合ではこの物質流入量が線形であることが自然界の物質輸送の最適解だと考える。

構成的アプローチの提案

ここでは葉身内での輸送現象モデリングの為の考察を行う。

まずは葉脈内部での線形性を実現させる要因の考察を行う。4.7 節では葉脈内の輝度値による速度変化の解析を行った。そこで 4.7 節のデータを基に、Fig 5-3 では物質輸送の時間変化を物質輸送濃度で分解した。抽出した輝度値が 23~93 までの為、時間後期ではグラフの線形性が少し崩れているが、実際は線形的だと考えられる。このグラフでは、葉脈内の濃度拡散により、脈内の物質輸送が線形的になっていることが分かる。よって、植物内部で物質濃度を調節させる機構により線形性を実現していると考えられる。

次に葉の各領域での線形的な物質輸送量の実現方法を考察する。物質輸送を時間に対して線形に上昇させる為には、物質輸送経路が分岐を行っても特異点となり物質輸送を停滞させないこと、物質輸送速度が時間によらず一定であることが重要となる。

3.3 節では均質媒体中での物質輸送をモデリングしたが、均質媒体中では物質輸送の線形的な上昇を再現できなかった。

植物はこの機能を、主脈・一次側脈・二次側脈と分岐することを繰り返し最終的に脈により葉を微小空間に分割するまで分岐する葉脈のフラクタル的な複雑経路構造及び、葉の各所に散らばった気孔によって引き起こされる 250 気圧とも言われる葉身内の負圧の分布など様々な要因がお互い複合されることで実現していると考えられる。

現状のアプローチ方法で葉の様々な領域で輝度値変化が時間に対して非常に線形的であることの再現は難しいと考える。葉身上では場所により密度や特性が異なるが、その中を輸送される物質の増加量が線形であることは、構成的なアプローチで説明するのは難しい。これは、葉の領域により密度が異なる場合は、その中の物質輸送速度も密度が高いところでは輸送速度が遅く、密度が低いところでは速くなり、その合計を物質輸送時間に対して線形に合わせることは困難である為である。

3.1 節で作成したフラクタルモデルを基として、実際の植物の葉脈の輸送現象の近似モデルを作るためのアルゴリズムを提案する。

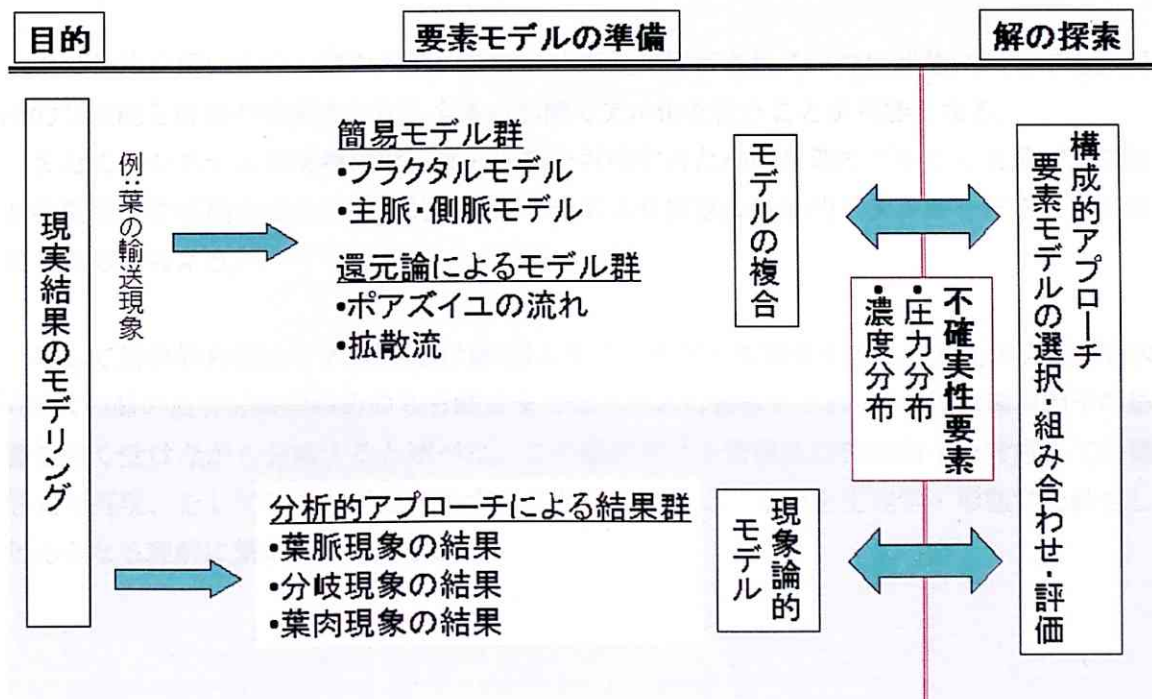
- ①葉身の形状方向に主脈を設ける。
- ②主脈上の一次側脈の位置を設定する。
- ③主脈上に一次側脈を等間隔で配置する。
- ②' 一次側脈上の二次側脈の位置を決定する。
- ③' 一次側脈上に二次側脈を等間隔で配置する。

以上の流れを、脈により空間が細分化するまで行えば脈の構造ができると考える。しかし、内部の物質輸送がこの作業で最適化されたわけではなく、実際の作業においては、脈同士の位置を少しずつ変化させ、全体の物質輸送量が線形に近くなるような脈構造をとるという手法をとる必要があると考える。

葉脈全体の形状を少しずつ変形させ内部の物質輸送の変化させる一例として、Fig 5-4 では、3.1 節で述べたフラクタルモデル内部において拡散流にのみ物資輸送が行われると仮定して、内部の物質輸送量の時間変化を計算した。また、フラクタルモデルの半径比 A を変化させるに伴い、物質輸送量のグラフ形状が変化することが分かる。分岐後の側脈の半径を大きくするに従い、物質輸送量全体の増加が緩やかになることがわかる。しかし、実際の植物は半径比 $A=0.5$ や $A=3$ を取ることはほとんどない。よって、 $A=1.5$ に着目すると、時間 200 あたりから物質増加量が頭打ちになっている。よって、時間 200 以前の物質輸送に影響するフラクタルモデルの部分では、ほぼ線形的な物質質量増加を示す物質輸送経路を作成することができる。

しかし葉脈のモデリング精度を高めていく過程において、正確な圧力分布や速度分布が分からなければ線形的な物質輸送経路設定を行えない場合も考えられる。そこで第 3 章で述べた簡易モデルや、要素還元論的な機構論的モデル群を数理モデル群として更に充実させ、第 4 章での分析による経路に対する物質輸送現象の現象論的モデル群を組み合わせることで、目的の物質輸送状態に合わせた、物質輸送経路設計を行うことができると考える。

以下でその概要を述べる。



分析的アプローチにより、形態的に有意な差がある葉脈や、葉肉部の各領域内での物質輸送の機能性を動画より解析することができる。例えば、葉脈内及び葉肉内での物質輸送量の増加は、時間に対して線形的に行うこと。また、葉脈の分岐における物質輸送量の分配比、葉脈から葉肉への物質輸送量の分配比等ということである。

このようなデータセットを集めることにより、形態と物質輸送の特徴を関連付けた現象論的モデル群を得ることができる。

例えば葉身全体及び各領域での、時間に対しての線形的な物質輸送量を増加のモデリングを考える。分析的アプローチにより集積された機能群より、葉の形態を数理モデル群から初期条件として与え、その際に起こると予測される全体の物質輸送を葉の形態で要素分解することで現象論的モデル群より推測する。

目標となる線形性とは異なる物質輸送を示す時は、葉の形態を変化させ全体の物質輸送を再度現象論的モデル群より推測する。この作業を繰り返すと最終的には、線形的な物質輸送を実現させる葉の形態モデリングが可能になると考える。

またモデル群同士を結合させる過程において、モデル群を結合が近似の精度に影響する。例えば今回の研究では、葉身全体及び各領域の物質輸送量が時間に対して線形であったことから、各領域を線形結合することで葉身上での物質輸送の近似モデルを作成できると考える。仮に線形結合で現実と合致しない場合は、上記で記述した形態変化と共に、線形結合のパラメーターフィッティングを行う必要がある。そして、線形結合では精度をあげることができない時には非線形結合を考える必要がある。

この手法を用いると、葉の内部の詳細な物理量が解析されていない状態においても、局所的な機能と形態の関連性より、全体の形態モデル化を行うことが可能となる。

またこのシステムの実現には、葉の形態を再現するための数理モデルの充実及び、複雑な物質輸送を推測する為に分析的アプローチにより豊富な現象的モデル群を作ることが重要となると考える。

そして最終的目標はゲノム情報(付録②)よりこのモデルを構築することだと考える。高木¹⁸⁾は人の肺の血管分岐の始めの3分岐目まではゲノムに書き込まれ、その後は環境因子の影響を強く受けながら分岐すると述べた。この様にゲノム情報及び環境因子を考慮して形態形成を再現、そして物質輸送を再現することができれば、生物を生理学・形態学を統合した完全なる理解に繋がると考える。

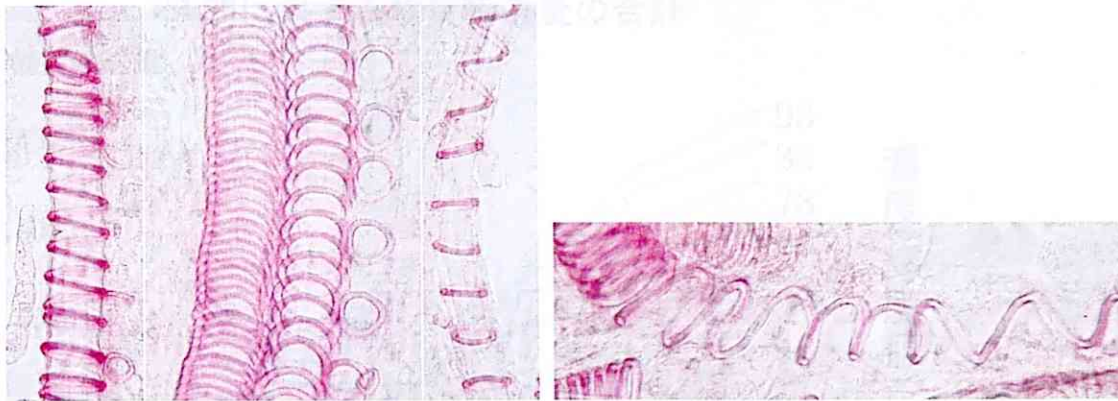
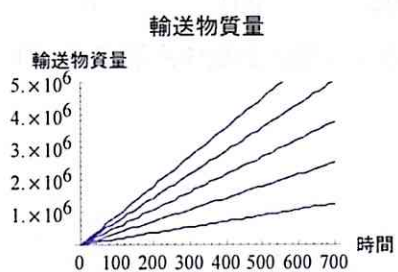
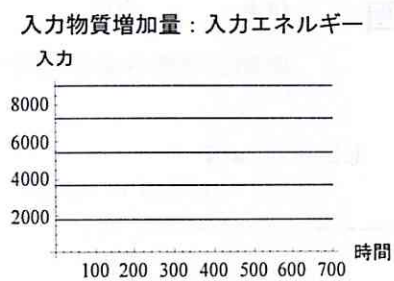


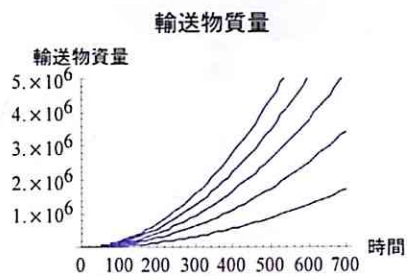
Fig 5-1 カボチャの花柄の導管写真[27]



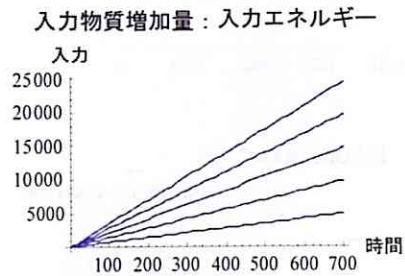
(a)-1 線形



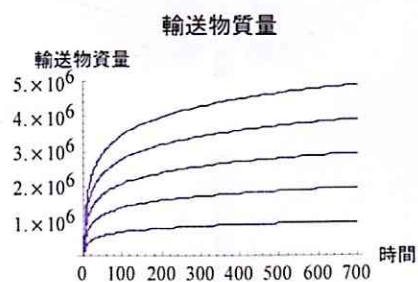
(a)-2



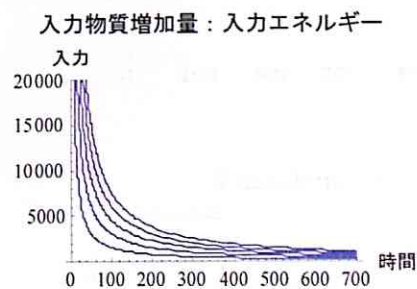
(b)-1 放物型



(b)-2



(c)-1 対数型



(c)-2

Fig 5-2 物質輸送量と、物質流入量の代表例

時間に対する物質輸送量の合計

物質輸送量

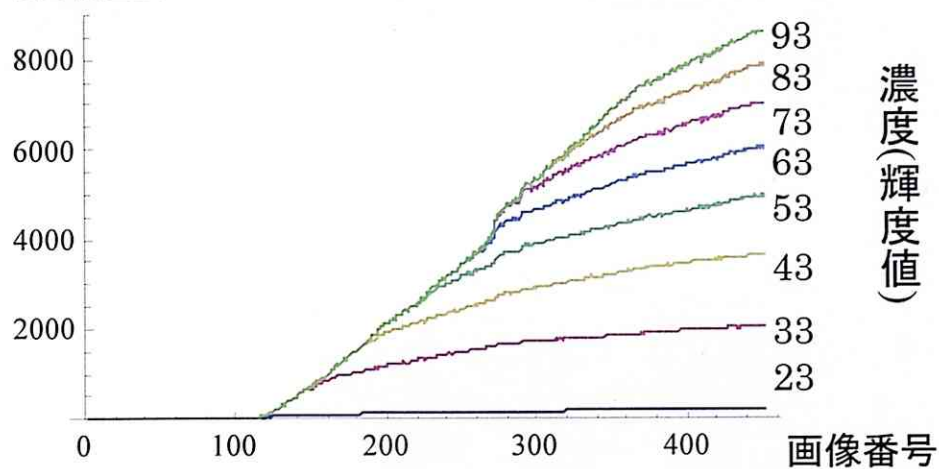


Fig 5-3 脈内の濃度勾配による物質輸送量の線形的増加

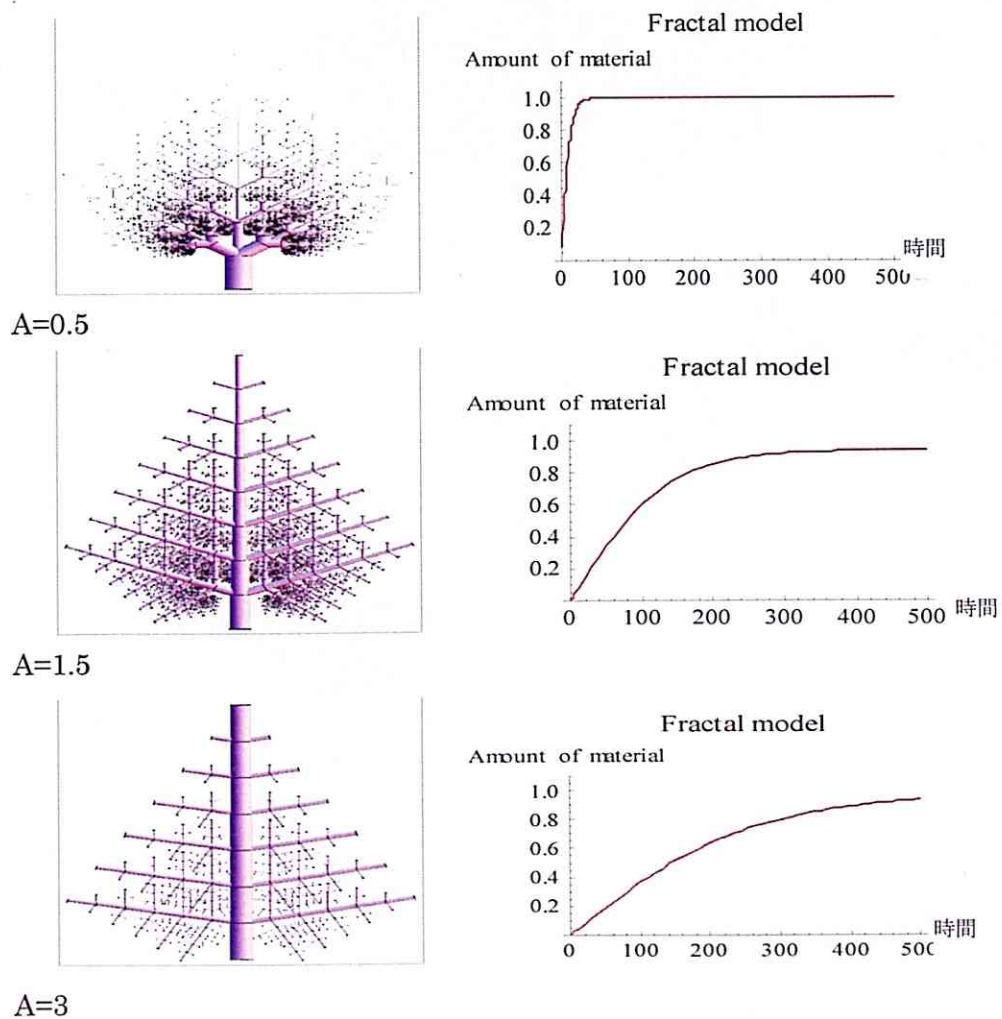


Fig 5-4 フラクタルモデル内部での物質輸送量変化のシミュレーション($r_2/r_1=A$)

第 6 章

第6章 結論と今後の課題

結論

本研究では、調査・輸送現象に関する数値モデル作成・輸送現象の動画解析を行い、その結果を基に複雑経路のモデリング手法の提案を行った。

動画データの解析により、葉身内のリンの輸送は、主脈・側脈・葉肉が関与する三段階の輸送現象として行われていることが分かった。

また、リンの輸送総量は、主脈・側脈・葉肉が関与する輸送はいずれも時間に関して線形に行われることが観測され、この線形性が植物の物質輸送に関する最適化だと予測することができた。

脈内の線形的な物質増加は物質濃度の拡散が影響していることがわかった。

各領域において線形的な物質増加の実現の為に、物質輸送に関する数値モデル群を作成し、観察された線形の輸送現象を、数値モデル群と現象論的なモデルの複合によって近似する手法の提案を行った。

課題と展望

今回は画像から判断できる一次側脈までの観測で終わったが、葉脈の構造は、主脈、一次側脈から分岐する二次側脈、三次側脈と続き、最後に微小な多角形領域に分割されるまでフラクタル構造として取り扱われることが多くある。

今後この二次側脈以降の高次の側脈内の物質輸送の現象を分析し、現象論的モデル群に加えることができれば、物質輸送経路のモデリングの際に、複雑な経路のモデリングを行うことができる。また、葉脈構造の再現をフラクタル構造と組み合わせることにより、複雑な物質輸送経路をもつ葉脈の明確なモデリングに繋がると考える。

謝辞

修士論文を作成するにあたり、先生方、研究室の皆様など多くの方からご指導、助言頂きました。ここに感謝の意を表したいと思います。

主査である指導教官の岩田修一教授には、研究の方向性から論文の執筆に至るまで最後まで格別のご指導を頂きました。また、大学院生活の中、様々な私にとってかけがえのない貴重な経験をさせていただきました。また、様々な御足労を大学入学前よりお掛けしてしまいました。ここでお詫び申し上げると共に、最大の感謝を致します。先生の無限に広がると思える知識量と心の広さに近づけるよう努力します。本当に有難うございました。

中西友子教授には、本研究に不可欠な葉脈における物質輸送の貴重なデータを快く提供して頂きました。始めて植物内の物質輸送を目で見た時の感動は今でも忘れていません。菅野里美さんには、データについて親切にご指導頂きました。今回植物を研究対象として、難しくも魅力的な対象であることを垣間見ることができました。本当に感謝致します。

副査である飛原英治教授には、論文の校正案を示して頂き感謝致します。

福原達人准教授(福岡教育大学)からは、植物系統樹や植物画像をいただき感謝致します。

檜目雅准教授には、入学前から大学院での研究テーマについて相談に乗っていただきました。陳迎准教授には、中国で清華大学での活動時に、材料データベースの使い方を教えていただきました。金田保則助教には、青森の六ヶ所での骨折時に介助をしていただきました。お三方から、修士2年間を通して様々な知識をいただいたことを感謝致します。

岩田研究室の皆様には、本研究に関して多くの助言を頂き、感謝しております。

腐れ縁の星田さん、研究相談と共に論文校正、論文締め切り間近では深夜まで残って頂きました。本当に有難うございました。岡さん、貴重なアドバイスを有難うございました。唯一の同期である亀田君、JAVAのコードを書き換え、動画解析時の作業効率・精度を上げて頂き有難うございました。その他学生の方々、手伝っていただいて有難うございます。

また修士2年間で知り合ったアメリカ・インド・ウクライナ・フランス・韓国・中国の学生の仲間たち、私の人生をこれまで以上に豊かにしてくれた事に感謝致します。

最後に、中学時代から大学卒業まで数学の巨大な魅力を常に教えて頂いた四方義啓教授、私の人生で最高の恩師です。人生をかけ教えていただいた力を発揮できる様勤めます。

上記の皆様、この場には書ききれなかった皆様、私の学生生活を支えて頂き感謝致します。

参考文献

- [1] R.Byron Bird, Transport Phenomena, Ed. 2ND, (2002)
- [2] 宗像健三, 輸送現象の基礎, コロナ社, (2006)
- [3] 高木隆司,北岡裕子著, 肺の構造をコンピューターで作る, 応用数理学会, 日本応用数理学会誌, 12, 1, pp.2-13 (2002)
- [4] 松野享, キンモクセイ葉脈の分岐点における脈の太さと曲がり角の関係, 京都府立医科大学教養教育, 28, pp117~122, (1994)
- [5] 高橋正道, 白亜紀~古第三紀の陸上植物の変遷過程, 石油技術協会誌, Vol. 70, No. 1 pp.37-46 (2005)
- [6] LC Pearson, The Diversity and Evolution of Plants, Crc Pr I Llc (1995)
- [7] A .Ash, Manual of Leaf Architecture, Smithsonian Institution(1999)
- [8] Theophraste, 植物誌 1, 小川洋子訳, 京都大学学術出版会(2008)
- [9] Angiosperm Phylogeny Website
<<http://www.mobot.org/MOBOT/Research/APweb/>>(2009/01/25)
- [10] M.T.Tyree, 植物の木部構造と水移動様式, 内海泰弘訳, シュプリンガー・ジャパン, pp15-20(2007)
- [11] Turing. A.M, The chemical basis of morphogenesis Phil, Proceedings of the Royal Society. B, Biological sciences, pp37(1952)
- [12] A. Gierer and H. Meinhardt, A theory of biological pattern formation, Biological Cybernetics, Volume 12, Number 1, pp30-39 (1972)
- [13] H. Meinhardt , Models of biological pattern formation, Academic Press, London (1982)
- [14] Sachs, T, The development of vascular networks during leaf development, Plant physiology and biochemistry, pp168-183 (1989)
- [15] Francois G. Feugier, Self-organization of the vascular system in plant leaves, Journal of Theoretical Biology, Volume 236, Issue 4, 21, pp 366-375 (2005)
- [16] A Runions, Modeling and visualization of leaf venation patterns, International Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques, pp 702 - 711 (2005)
- [17] 清水忠昭, (1993), 複合サーモカップル式ヒートパルス茎内流速測定法, 日本農業気象学会 1993 年度全国大会・日本生物環境調節学会第 21 回集会合同大会
- [18] 丸岡昇, 小保内啓太, 奥村弘, 移流拡散問題における Semi-Lagrange Galerkin 法, 日本流体力学会誌 27(2),143-152, (2008)

- [19] 小葉田亨, プレッシャーチェンバーによるイネ葉身の水ポテンシャル測定方法の検討, 日本作物学会, 日本作物學會紀事, Vol.53, No.3, pp. 290-298, (1984)
- [20] Murry, C. D., The Physiological principle of minimum work.1, Proc. Nat. Acad. Sci. 12, 207., pp 207-214 (1926)
- [21] 森田茂紀, 圃場で栽培したトウモロコシの出液速度と根量との関係, 日作記, 69(1), pp80-85, (2000)
- [22] 古谷雅樹「成長」(シリーズ<植物成長学 7>) 朝倉書店) pp25 (1982)
- [23] 中西友子, 植物における物質動態のリアルタイムイメージング, バイオサイエンスとインダストリー, Vol.66, No.10, pp. 562~564, (2008)
- [24] 中西友子, 植物物質動態のリアルタイムトレーサー解析装置の開発, CREST 学会資料 (2008)
- [25] 茅野充男, 「物質の輸送と貯蔵」(現代植物生理学 5) 朝倉書店, pp91-94,(1991)
- [26] Rai. H, Development of a Real-time Autoradiography System to Analyze the Movement of the Compounds Labeled with beta-ray Emitting Nuclide in a Living Plant, Radioisotopes, 57, 287-294(2008)
- [27] <<http://www.fukuoka-edu.ac.jp/~fukuhara/keitai/index.html>>(2009/01/25)
福岡教育大学 福原達人准教授の HP 上には植物形態学に対する知見が初学者にもわかりやすくまとめてあり、研究にあたり大きな参考となった
- [28] 奈良教育大学のインターネット植物図鑑
<http://kaede.nara-edu.ac.jp/plants_of_NUEhomepage.htm>(2008/10/20)
葉の多様な形態を見ることができる
- [29] 日本 DNA データバンク
<<http://www.ddbj.nig.ac.jp/index-j.html>>(2009/01/25)
世界三大 DNA データバンクの一つで植物分類学に必要な DNA 情報を見ることができる

付録 1 日本経済の発展

1. 日本経済の発展

2. 日本経済の発展

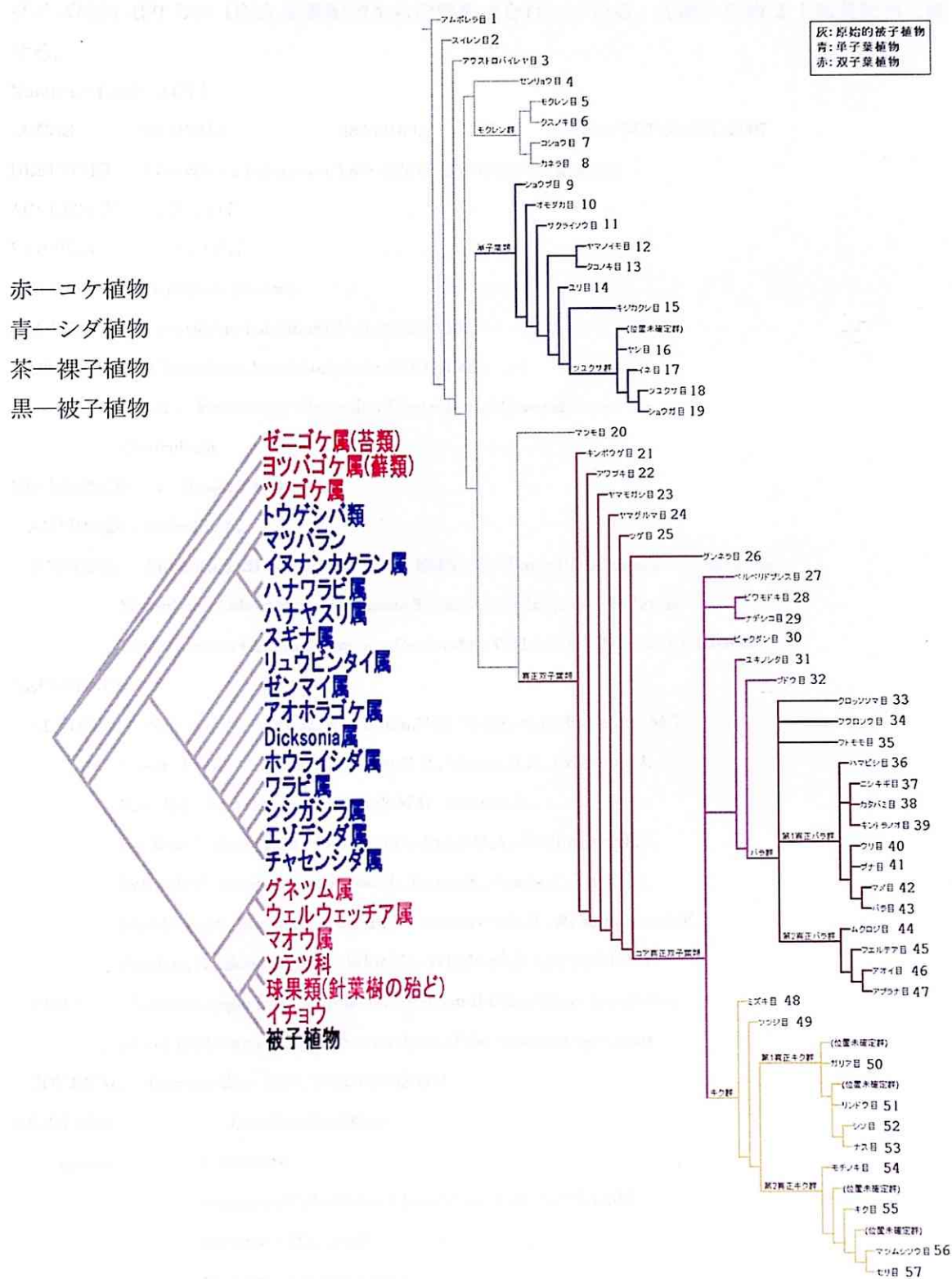
3. 日本経済の発展

4. 日本経済の発展

付録

付録 2 日本経済の発展

付録① (左) 属までの系統樹 (右) 被子植物門系統樹



(福岡教育大学 福原達人准教授提供^[27]、参照下データ^[9])

付録② ダイズのゲノム情報(日本 DNA データバンクより)

ダイズは約 400 万の DNA 塩基配列から形態形成を行っている。先頭から約 2 千塩基配列を載せる。

Number = [AM412317]

LOCUS AM412317 3886916 bp DNA circular BCT 06-JUL-2007

DEFINITION *Clostridium botulinum* A str. ATCC 3502 complete genome.

ACCESSION AM412317

VERSION AM412317.1

KEYWORDS complete genome.

SOURCE *Clostridium botulinum* A str. ATCC 3502

ORGANISM *Clostridium botulinum* A str. ATCC 3502

Bacteria; Firmicutes; Clostridia; Clostridiales; Clostridiaceae;

Clostridium.

REFERENCE 1 (bases 1 to 3886916)

AUTHORS Sebaihia,M.

JOURNAL Submitted (21-NOV-2006) to the EMBL/GenBank/DDBJ databases. Sebaihia

M., Sulston Laboratories, Wellcome Trust Sanger Institute, Wellcome

Trust Genome Campus, Hinxton, Cambridge, CB10 1SA, UNITED KINGDOM.

REFERENCE 2

AUTHORS Sebaihia,M., Peck,M.W., Minton,N.P., Thomson,N.R., Holden,M.T.,

Mitchell,W.J., Carter,A.T., Bentley,S.D., Mason,D.R., Crossman,L.,

Paul,C.J., Ivens,A., Wells-Bennik,M.H., Davis,I.J.,

Cerdeno-Tarraga,A.M., Churcher,C., Quail,M.A., Chillingworth,T.,

Feltwell,T., Fraser,A., Goodhead,I., Hance,Z., Jagels,K., Larke,N.,

Maddison,M., Moule,S., Mungall,K., Norbertczak,H., Rabinowitsch,E.,

Sanders,M., Simmonds,M., White,B., Whithead,S. and Parkhill,J.

TITLE Genome sequence of a proteolytic (Group I) *Clostridium botulinum*

strain Hall A and comparative analysis of the clostridial genomes

JOURNAL Genome Res. 17(7), 1082-1092(2007).

FEATURES Location/Qualifiers

source 1..3886916

/organism="Clostridium botulinum A str. ATCC 3502"

/strain="ATCC 3502"

/mol_type="genomic DNA"

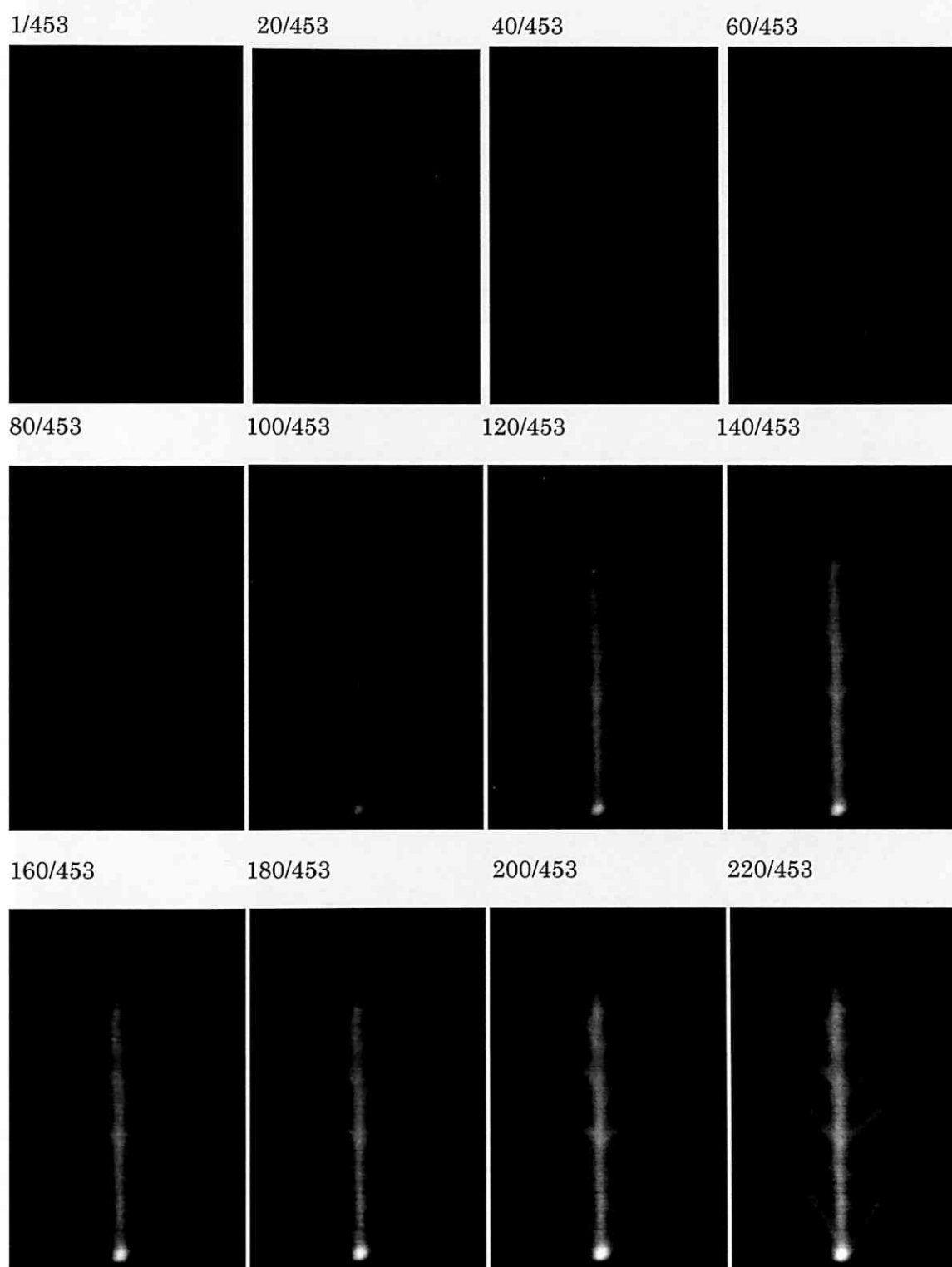
/db_xref="taxon:413999"

BASE COUNT 1378925 a 555960 c 541887 g 1410144 t

ORIGIN

1 atgaatacc accctacaga aacctgggaa aaggcaataa atattataaa aggtgaactt
61 acagaagtaa gttttaatac atggattaaa agtattaacc ctatttctct tgaataaat
121 tcattgaaac tagctgtacc aaatgatttt acaaaaggaa ttcttgaag taggtacaaa
181 gatcttatag ttaatgcgct aaaattactt acctcaaaaa aatataatat agattttatt
241 gtaactactg aagaaaaaat agaagaaaat caaaaaatc ataataacga aaaatcta
301 atagttgtaa atgatgaaat gtctactatg ttaaatccta aatatacttt tgattcggtt
361 gtaataggaa atagtaatag attcgctcat gcagcatctt tagcagtagc agaatacct
421 gctaaagcat ataactcttt atttatatat ggtggagtgt gtcttggtta aactcactta
481 atgcatgcta toggctatta tatattacat aacaatccta aatctcaagt agtttatgta
541 tctctgaga aatttcaaaa tgaattaatt aattctataa aagatgataa aaatgtagaa
601 tttagaata aatatagaaa tatagatatt ttattagtgt atgatattca atttatgtct
661 ggaaaagaaa gaactcaaga ggaatttttc catactttta atgcactgta tgaagctaac
721 aaacaaataa ttatatcaag tgaccgtccc ccaaaagaaa tacctacttt agaagataga
781 ttaagatcta gatttgaatg gggacttata gctgatattc aagcacctga ttttgaacc
841 aggatggcca ttttaagaa aaaagctgat gtagaaaatt taatatctc taatgaagta
901 atggtatata tagctacaaa aattaaatca aatattcgtg aattagaagg agctttaata
961 agaatagtag ccttttcac acttactaat aaagaaataa gtatagattt agcttctgaa
1021 gcactgaaag atataatctc aagtaaacag acaaggcaag tcactataga tattattcaa
1081 gaagttgtag caaactatta taatctaaaa atagaagatc taaaatcagc tagaagaaca
1141 agaaatatgt ctttccccg ccaaatagcc atgtaccttt ctagaaaact aacggacatg
1201 tcattaccta aaattgggtg agaatttggc ggacgtgatc atactacagt tattcatgcc
1261 tatgaaaaga tatctaataa cttaaaaaaa gatgaaagtc ttcaaatgc aataaaggaa
1321 ttaataatac gaattaatca aaaataaaaa taatatacaa atgtttataa taatacttta
1381 ttttttgggt gataatgtac taaatataaa ttaaacatat ttctgtgga taagcactta
1441 attttaatgt taacttatcc acaattattt tgttatgaaa aatgttgata ttttaggott
1501 tgtaagactt attaacatat caacaagccc tactactact actactattt tattatatta
1561 tctatttcta ttctaacaat aggaattggt aataaaggag gctaatttta tgaataaac
1621 ttgtcaaaaa aacattttac tagaagggtat atctatagtt caaaaagcag taactggaaa
1681 atcaacttta cctatattat ctggaatact tattagagct aataaaaatg aattggcttt
1741 aactgggtct gatatggatc ttagtattga aactaaagta aaagctaaca ttttagaaga
1801 gggaactata gttttagatg ctgacttttt tggtagata ataagaaat tacctaata
1861 tctaatagaa ataaatacgt tagaagataa ttctatagaa ataatatgtc aaaattctag
1921 atttaactta atatatatga atccaggtga gtttctaact ccactatta tcaatgaaaa
1981 tatgatattt tctataggtg aaagtaaatt aaaaaatatg attaaaggaa ctatatttgc

付録③ 動画データ (画像番号/全画像数)

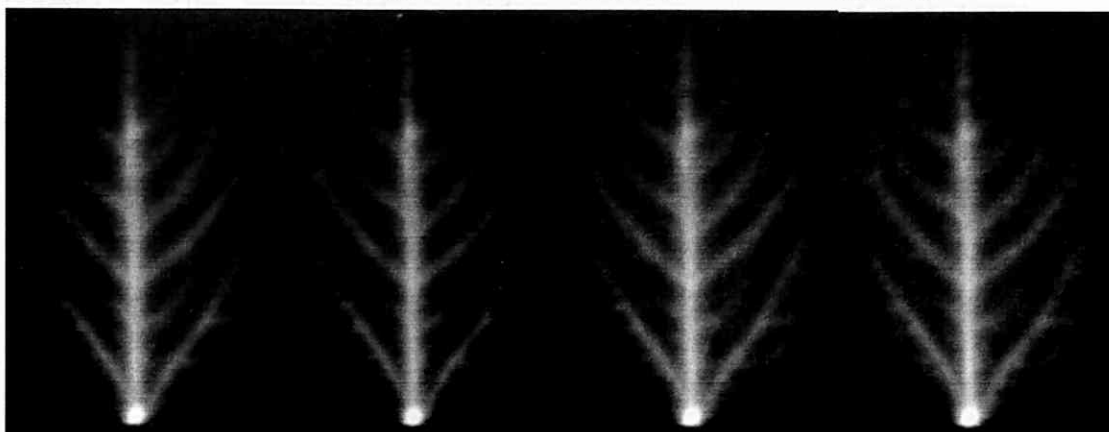


240/453

260/453

280/453

300/453

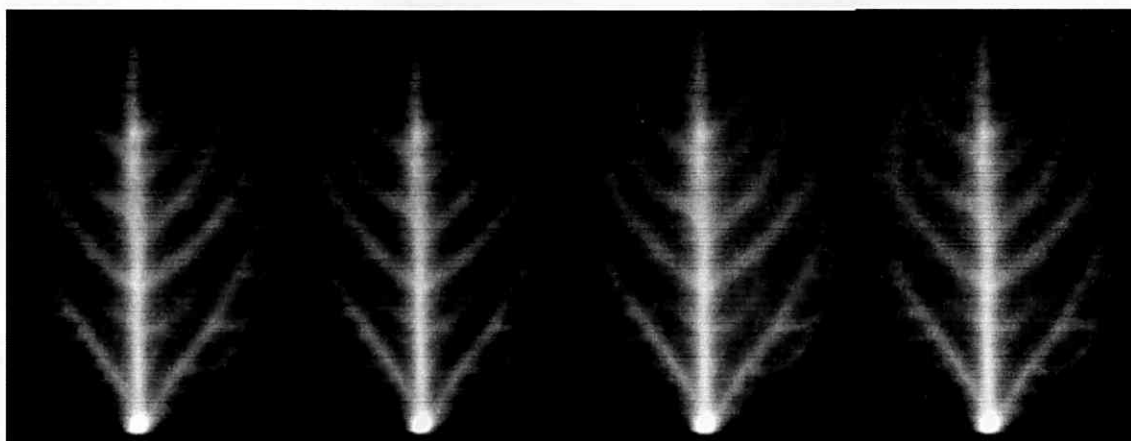


320/453

340/453

360/453

380/453

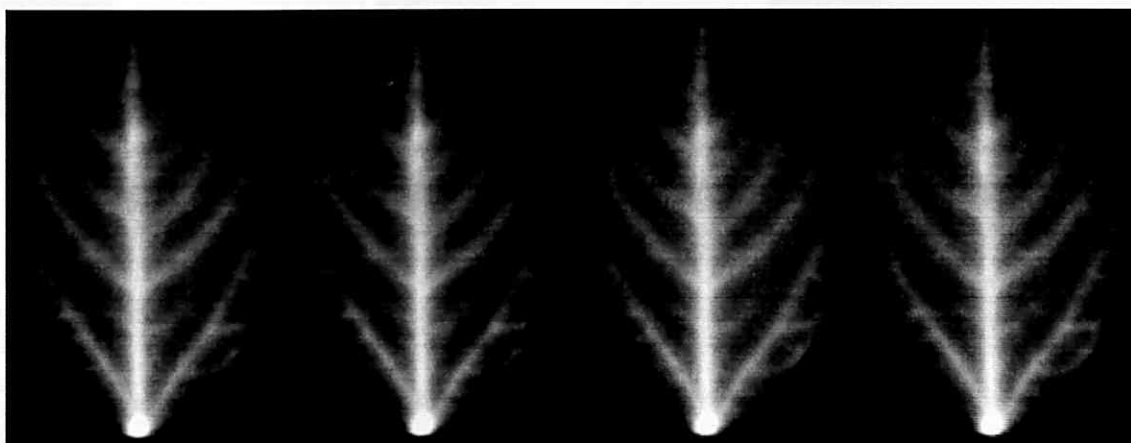


400/453

420/453

440/453

453/453



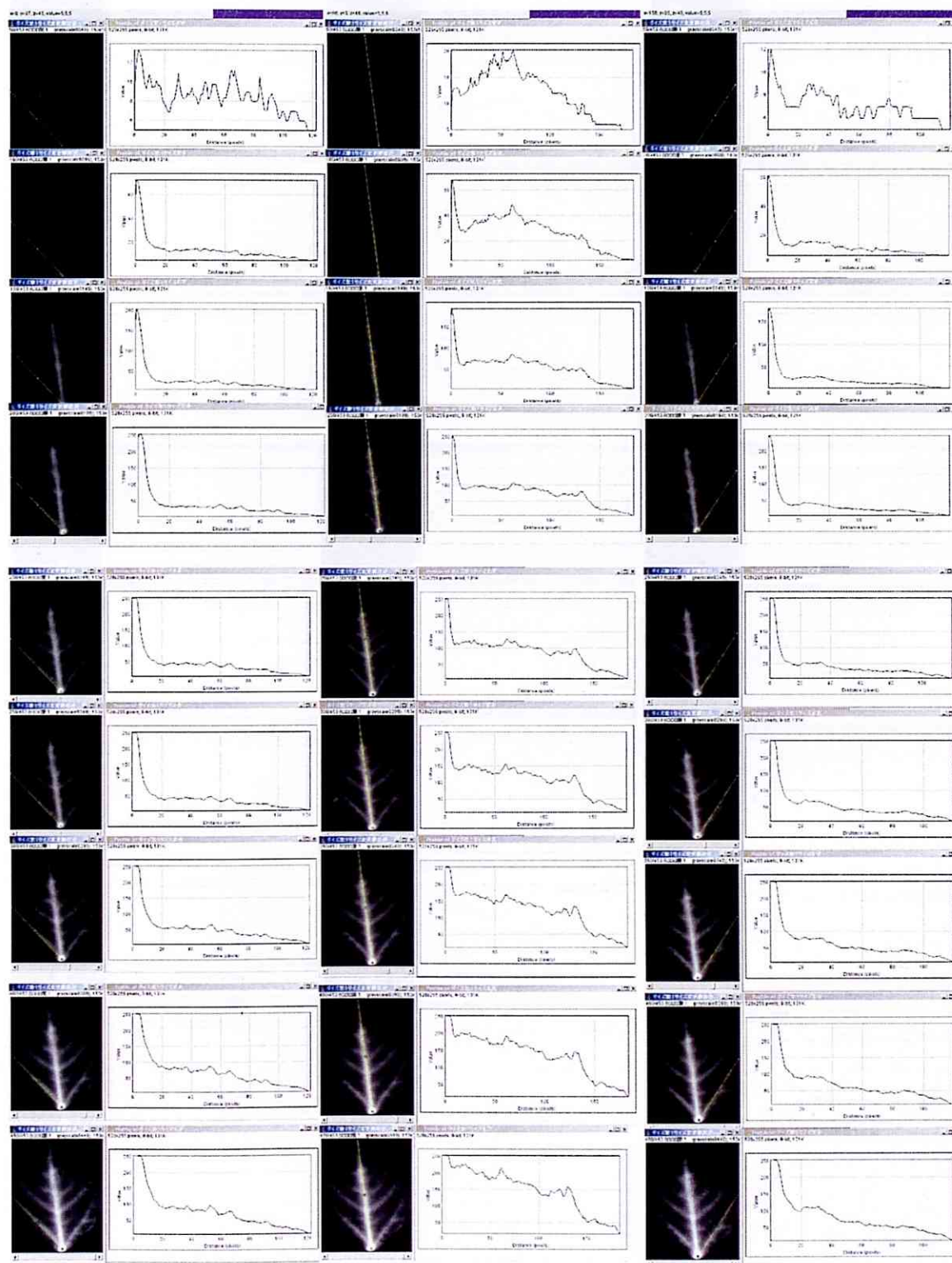
付録④ 葉脈上データ (453 枚中 {50,100,150,200,250,300,350,400,453}枚目抜粋)

各脈の画像縦方向に時間変化、グラフ(横軸：葉脈長さ、縦軸：輝度値)

側脈 1

主脈

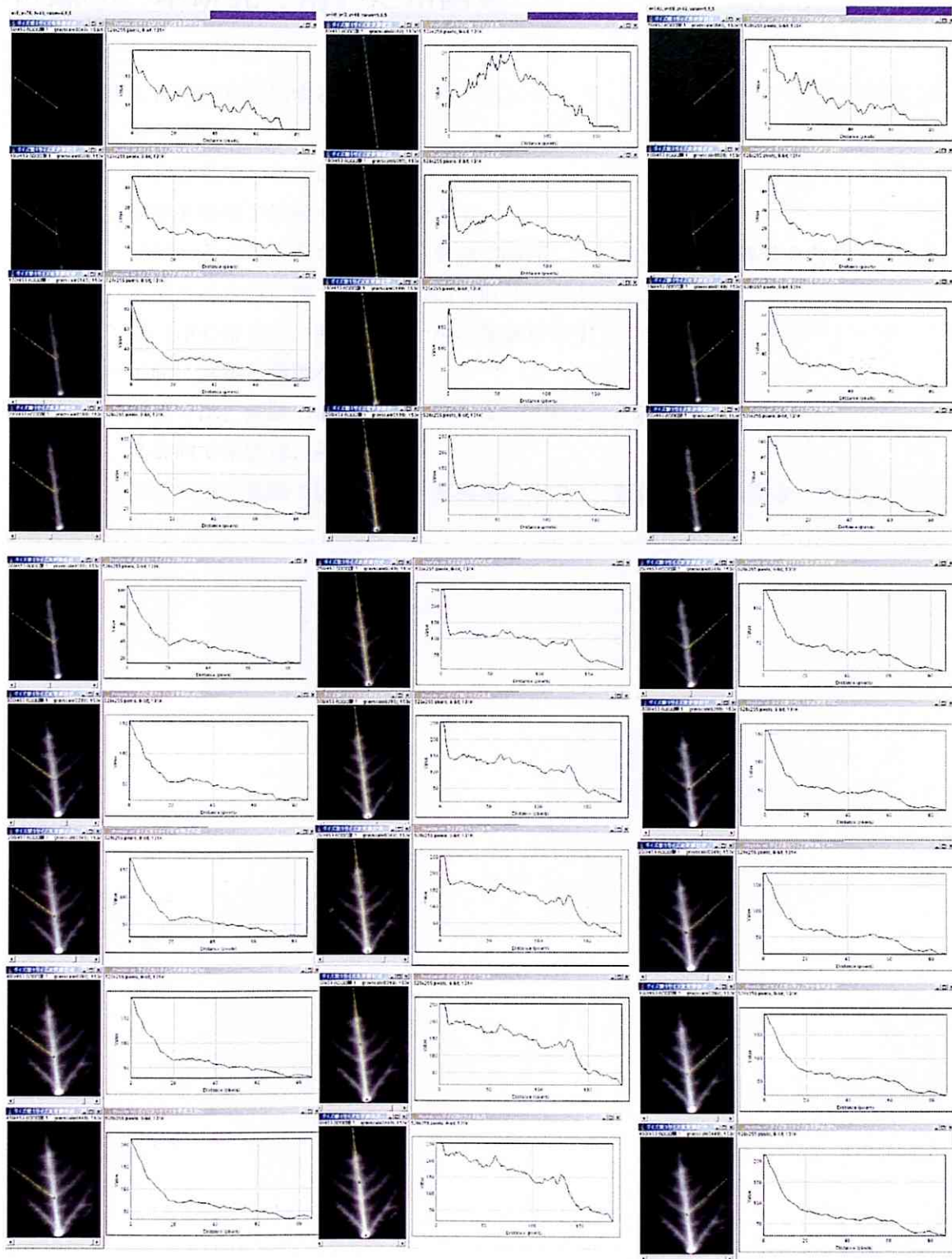
側脈 2



側脈 5

主脈

側脈 6



付録⑤ 本研究で用いた用語集

本稿で使用した用語を説明する。

1. 葉身：葉全体をさす
2. 葉柄：葉身と茎をつなぐ箇所をさす
3. 基部：葉身と葉柄が接続する箇所をさす
4. 葉脈：葉にある維管束をさし、養分を流す師部、主に水分を流す導管を含む。

本稿では水分を流す導管について取り扱った。

5. 主脈：葉の中心を走る、基部とつながる葉脈をさす
6. 側脈：主脈に繋がる葉脈をさす。

本稿では、側脈の場所により側脈 1、側脈 2、と名称をつけた。

7. 葉肉：葉身内で葉脈部以外をさす。

本稿では、葉脈で区切られた葉肉毎に葉肉 1、葉肉 2、と名称をつけた。

付録⑥ 葉の形態 (奈良教育大学植物図鑑)

ここでは、第二章で計測した葉を示す。



アオギリ
アオギリ科



アキニレ
ニレ科



アキニレ
ニレ科



アキニレ
ニレ科



アキニレ
ニレ科



アメリカキササゲ
ノウゼンカズラ科



アメリカスズカケノキ
スズカケノキ科



アメリカノウゼンカズラ
ノウゼンカズラ科



アメリカノウゼンカズラ
ノウゼンカズラ科



アラカシ
ブナ科



イボタノキ
モクセイ科



イロハモミジ
カエデ科



イロハモミジ
カエデ科



ウバメガシ
ブナ科



エゴノキ
エゴノキ科



エゴノキ
エゴノキ科



エノキ
エノキ科



エノキ
エノキ科



オガタマノキ
モクレン科



カキノキ
カキノキ科



カツラ
カツラ科



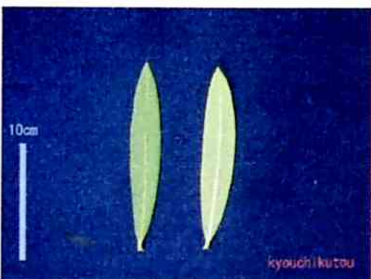
カツラ
カツラ科



カナメモチ
バラ科



キョウチクトウ
キョウチクトウ科



キョウチクトウ
キョウチクトウ科



キリ
キリ科



キリ
キリ科



キンモクセイ
モクセイ科



クサギ
クマツヅラ科



クスノキ
クスノキ科



クチナシ
アカネ科



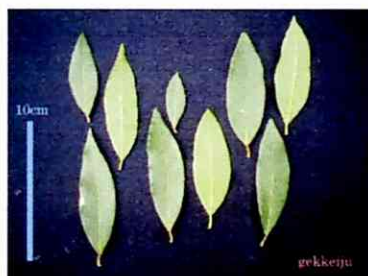
クヌギ
ブナ科



クロガネモチ
モチノキ科



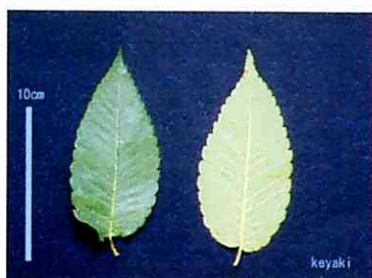
ゲッケイジュ
クスノキ科



ゲッケイジュ
クスノキ科



ゲッケイジュ
クスノキ科



ケヤキ
ニレ科



コブシ
モクレン科



ザクロ
ザクロ科



サルスベリ
ミソハギ科



サルスベリ
ミソハギ科



サンゴジュ
スイカズラ科



シダレヤナギ
ヤナギ科



シダレヤナギ
ヤナギ科



シラカシ
ブナ科



ジンチョウゲ
ジンチョウゲ科



スダジイ
ブナ科



ソメイヨシノ
バラ科



タイサンボク
モクレン科



トウカエデ
カエデ科



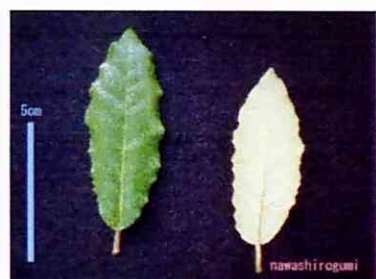
トウネズミモチ
モクセイ科



トネリコ
モクセイ科



ナラノヤエザクラ
バラ科



ナワシログミ
グミ科



ナンキンハゼ
トウダイグサ科



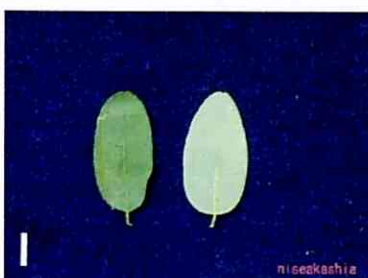
ナンテン
メギ科



ナンテン
メギ科



ニセアカシア
マメ科



ニセアカシア
マメ科



ハクモクレン
モクレン科



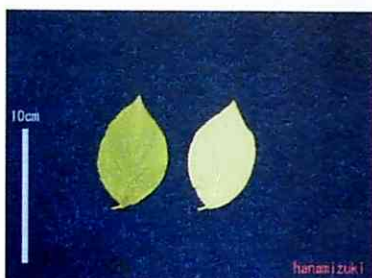
ハコネウツギ
スイカズラ科



ハナズオウ
マメ科



ハナズオウ
マメ科



ハナミズキ
ミズキ科



ハンノキ
カバノキ科



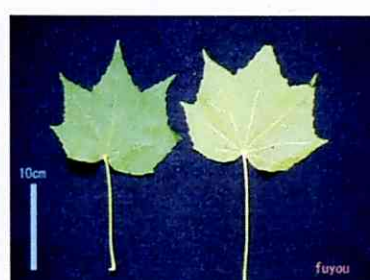
ヒイラギモクセイ
モクセイ科



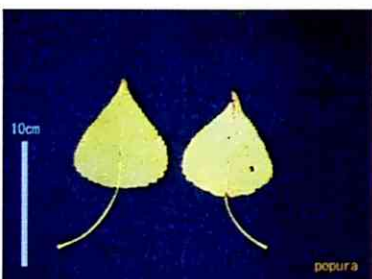
ビワ
バラ科



フウ
マンサク科



フヨウ
アオイ科



ポプラ
ヤナギ科



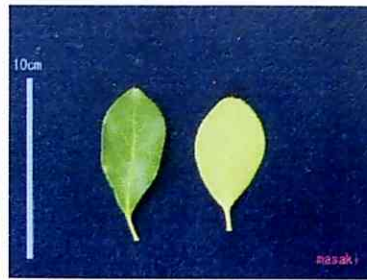
マグワ
クワ科



マグワ
クワ科



マグワ
クワ科



マサキ
ニシキギ科



ムクゲ
アオイ科



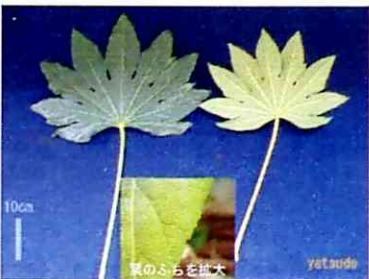
モッコク
ツバキ科



モミジ
バスズカケノキ
スズカケノキ科



ヤエザクラ
バラ科



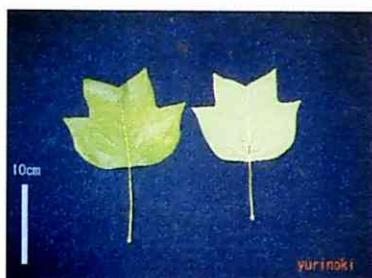
ヤツデ
ウコギ科



ヤブツバキ
ツバキ科



ユズリハ
ユズリハ科



ユリノキ
モクレン科



レンギョウ
モクセイ科



レンギョウ
モクセイ科

学生人生を終えるにあたり

私の人生を通し一生心に残るであろうこの場を借り、来年から社会人となる自分の為にスペースを使わせていただきたいと思う。私の人生は、世間一般の人と異なることが多く様々な人に迷惑をかけてきた。その度に母立川伸子、父立川満には一般的な親以上に迷惑をかけ、支えてもらい、周りの先生にも常に支えてもらってきた。現在私が23歳まで成長し、東京大学というすばらしい場で、2年間修士生活を送れたのも両親そして、皆さんの最大限のバックアップがあってからこそである。特に家族には最大の感謝を述べたい。いつかは家族4人一緒にそろい恩返しをと考えているが、どの様な形で、またいつという最適解が分かっていないがいつかは恩返しをしたいと思う。そして新潟大学附属小学校時代に私の人間としての成長に大きな影響を与えていただいた吉田先生。僕の人生の学問における方向性を完全に決めるきっかけを作っていただいた奈良女子大学附属小学校時代に出会った谷岡先生には格別の感謝を述べると共に一生忘れない存在です。先生の科学の実験は楽しかった（先生から特定の実験を押し付けられた記憶がなく、真の意味で自分の好きな実験を自由にできてよかった）。そして奈良女子大学附属中学校時代の本当の親友たち、富井君（彼はその後どうしているのかな）。そして数学の面白さ、神秘性、数学の巨大な懐、数学の無限の可能性を見せていただいた人生最大の恩師である四方先生には格別の感謝を示したい。四方教授に会わなければ、私は機械工学（もしくは化学）に進んでいたと思う。現状の私の能力ではどちらが最適解だったか判断できないが、私の心の根底では、物事の本質的な事象を追い求め、その本質を見つめることで簡略化し大域的な目で分析するという、工学屋とは異なる数学屋の根底があり、いつかは工学屋とは異なるアプローチで工学に価値を持つ新しい切り口をつくれたらと思う。

卒業できたら自動車業界に行くにあたり、人生の大半を純粋工学屋に囲まれて過ごしていくと思う。しかし、その環境でも自分らしさを見失わず、四方教授から学んだこの自分らしさを生かしつつ、自分らしく価値あるプロを目指して人生を歩んで生きたいと思う。

学生生活も終わりに近づき、後ろ髪を引かれている。しかし、私の人生これからの方が長い。社会人として、規律ある生活を送り、学問を学ぶことを一生忘れず、人とは異なるユニークな視点を持ち、親からもらった身体と名を持つ私、立川浩幹として、世界に向けた価値の創造を私の一生をかけて実現していきたいと思う。