

論文 / 著書情報
Article / Book Information

題目(和文)	都市熱環境予測のための樹木の蒸散特性の計量化と数値モデル化
Title(English)	Quantification and numerical modeling of tree transpiration characteristics for predicting urban thermal environment
著者(和文)	清野友規
Author(English)	Tomoki Kiyono
出典(和文)	学位:博士(工学), 学位授与機関:東京工業大学, 報告番号:甲第10520号, 授与年月日:2017年3月26日, 学位の種別:課程博士, 審査員:浅輪 貢史,田村 哲郎,木内 豪,神田 学,大風 翼,小林 秀樹
Citation(English)	Degree:Doctor (Engineering), Conferring organization: Tokyo Institute of Technology, Report number:甲第10520号, Conferred date:2017/3/26, Degree Type:Course doctor, Examiner:,,,,,
学位種別(和文)	博士論文
Type(English)	Doctoral Thesis

都市熱環境予測のための
樹木の蒸散特性の計量化と数値モデル化

環境理工学創造専攻

清野 友規

樹木は様々な社会的場所を作り出す潜在力を秘めている。傘型—下に広がる1本の檜のような木は一種の戸外室を形成する。ペア型—2本の木は門を形成する。木立型—数本の木が群生する。広場型—オープンスペースを取り囲む。そして街路型—2列の木が樹冠を接しながら歩行路や街路に並ぶ。樹木の真の存在と意味が感じられるのは、場所の形成という木の潜在力が発揮された場合のみである。

C・アレグザンダー, 1977 [1] (平田翰那 訳)

土壌—植物—大気系 (S-P-A) 研究において、各学問分野の境界内に留まろうとする研究者の知的怠慢が、分野間の協力を妨げ、安直な経験的較正に頼った数値モデルの存在を許してしまっているように思われる。農業実務者のための実用的なモデルを作ろうという善意の競争は、往々に本来の可能性を損なうような頑健でないモデルを生み、遂には実務者からの反発—既に知られていた S-P-A モデルの有用性にまで疑義を呈する強い反発を生んだ。一体いくつの数値モデルが、現実の意思決定や日々の実務に利用されているだろうか？

J. Norman, 2013 [2] (拙訳)

目次

第1章	序論	1
1.1	はじめに	1
1.2	既往の研究	2
1.3	本研究の目的	5
1.4	各章の構成	8
第2章	長期的なケヤキの水収支計測に基づく単木の蒸散特性の把握	9
2.1	はじめに	9
2.2	蒸散計測方法の検討	10
2.2.1	既存の計測方法の評価	10
2.2.2	本研究の対象樹木の位置づけと計測方法の選定	13
2.3	大型重量計による長期的な単木水収支の計測	13
2.3.1	実験サイトと供試木の概要	13
2.3.2	試験体重量と環境条件の計測機器	15
2.3.3	重量計による蒸散量の推定方法・データ品質管理方法の提案	18
2.4	都市緑化樹木に特有な蒸散特性の把握	21
2.4.1	蒸散量推定と品質管理方法の精度	21
2.4.2	日蒸散量と環境条件の季節変化, 月別水収支	23
2.4.3	日蒸散量と気象条件の関係	26
2.4.4	蒸散特性の経年変化	28
2.5	まとめ	31
第3章	複数樹種の計測に基づく単木蒸散能力と形態的・生理的特徴の関係分析	35
3.1	はじめに	35
3.2	蒸散予測に利用しうる樹木の特徴に関する理論的・経験的知見の整理	36
3.3	短期集中計測のための単木蒸散量の計測方法	40
3.3.1	要求条件の検討と吊り下げ式重量計の提案	40

	3.3.2 供試木の概要	41
3.4	単木蒸散量と形態的・生理的特徴の関係分析	42
	3.4.1 吊り下げ式重量計による蒸散量の推定精度	42
	3.4.2 夏季晴天・灌水日における 11 樹種の蒸散特性	46
	3.4.3 形態的・生理的特徴と単木蒸散能力の関係	49
	3.4.4 実験結果の一般性に関する考察	53
3.5	まとめ	55
第 4 章	蒸散予測を目的とした簡便な Soil-Plant-Atmosphere Continuum モデル の構築	57
4.1	はじめに	57
4.2	既存の蒸散モデルの整理と評価	58
4.3	都市緑化樹木の蒸散予測を目的とした簡便な SPAC モデルの構築	63
	4.3.1 設計段階で利用可能と想定される情報の整理	63
	4.3.2 BMF モデルの SPAC 化—BMF & Root Contact モデルの提案	64
4.4	ケヤキ灌水停止実験の概要と土壌水理特性のパラメタリゼーション	67
	4.4.1 検討の目的と実験データの概要	67
	4.4.2 不飽和水分移動の数値モデルと透水係数の逆推定	67
4.5	提案モデルによる灌水停止実験の再現性評価	71
	4.5.1 数値計算条件と樹木モデルパラメータ	71
	4.5.2 計算結果と考察	73
4.6	まとめ	74
第 5 章	気孔コンダクタンスパラメータの実用的な定量化方法の提案	77
5.1	はじめに	77
5.2	都市熱環境シミュレーションのための気孔コンダクタンスパラメータの 実用的な定量化方法	77
	5.2.1 Leuning et al. (2008), Komatsu et al. (2015) のレビュー	77
	5.2.2 本研究での Leuning-Komatsu パラメタリゼーションの拡張	79
5.3	単木における光合成有効放射吸収量の算出	80
	5.3.1 Voxel Canopy Profiling 法による葉面積密度分布の推定	80
	5.3.2 植生放射伝達モデル FLiESvox の概要	81
	5.3.3 6 樹種の葉面積密度・光合成有効放射吸収量の分布	83
5.4	パラメタリゼーション方法の違いが蒸散予測に与える影響の分析	88
5.5	まとめ	90

第 6 章	蒸発散による緑化空間の熱環境緩和効果の予測評価	93
6.1	はじめに	93
6.2	ヒートアイランド緩和と微気候改善における蒸発散の活用方法	94
6.3	SPAC による熱環境シミュレーションの概要	95
6.3.1	検討の目的と計算条件	95
6.3.2	SPAC の熱・水輸送の基礎方程式と数値モデル	96
6.4	土壌水分量変化が熱フラックス・温度に及ぼす影響	99
6.5	周辺地物による気流環境の変化が緑化空間の熱環境に及ぼす影響	104
6.6	まとめ	106
第 7 章	結論	107
7.1	本研究の総括	107
7.2	今後の課題	109
7.2.1	計測方法・実態把握に関して	109
7.2.2	数値シミュレーションに関して	111
参考文献		113
付録 A	樹木の環境適応に関する考察とレビュー	139
付録 B	BMF モデルの導出	147

第 1 章

序論

本章では、緑化樹木が都市の熱環境—特に大気に与える影響を明らかにする上で、現状において何が問題なのかを同定し、その問題を解決するためにはどのような知見が不足しているかを述べる。更に、樹木の熱的効果を適切に評価し緑化空間の設計に活用する上で、どのような要因を考慮する必要があるのかを考察する。

1.1 はじめに

人間の生活空間の熱環境と樹木の関係に対しては、社会的に高い関心が持たれている。機械設備に頼らずに快適な建築環境を創ることを志向した Bioclimatic Design (Olygyay, 1963 [3]; 日本建築学会, 2007 [4]) では、日射や風のコントロールと共に、あるいはその一環として、樹木の利用が古くから言及されている。また、緑化樹木の経済的価値に関する調査研究では、都市生活者は、樹木が美観や空気質などに与える影響よりも、熱的な影響を重視しているという報告も見られる (Lohr et al., 2004 [5])。環境工学分野では、都市スケールでのヒートアイランド現象の緩和（緩和策）・人間の生活高さでの微気候改善（適応策）の双方において樹木の効果が期待されており、国土交通省による建築環境性能評価システム CASBEE においても、2016 年現在、高木に対しては緩和策・適応策の双方で高い評価が付けられている [6]。

高木が日中の都市熱環境に与える影響としては、日射遮蔽、風速の低減と乱れの増加、蒸散による気温上昇抑制の 3 つが挙げられる (図 1.1)。この内、放射・風環境に対しては、単位体積中の葉面積を表す葉面積密度 (Leaf Area Density, 以下 LAD) [m^2m^{-3}] あるいは投影面積あたりの葉面積を表す葉面積指数 (Leaf Area Index, 以下 LAI) [m^2m^{-2}] が支配的な影響を持つ。LAD や LAI をいかに精度よく計測するかという問題は現在においても大きな課題であるが、樹冠内の運動量輸送・放射伝達の数値モデル上の取扱いは（少なくとも熱・物質・運動量フラックスを議論する上では）十分に確立されており

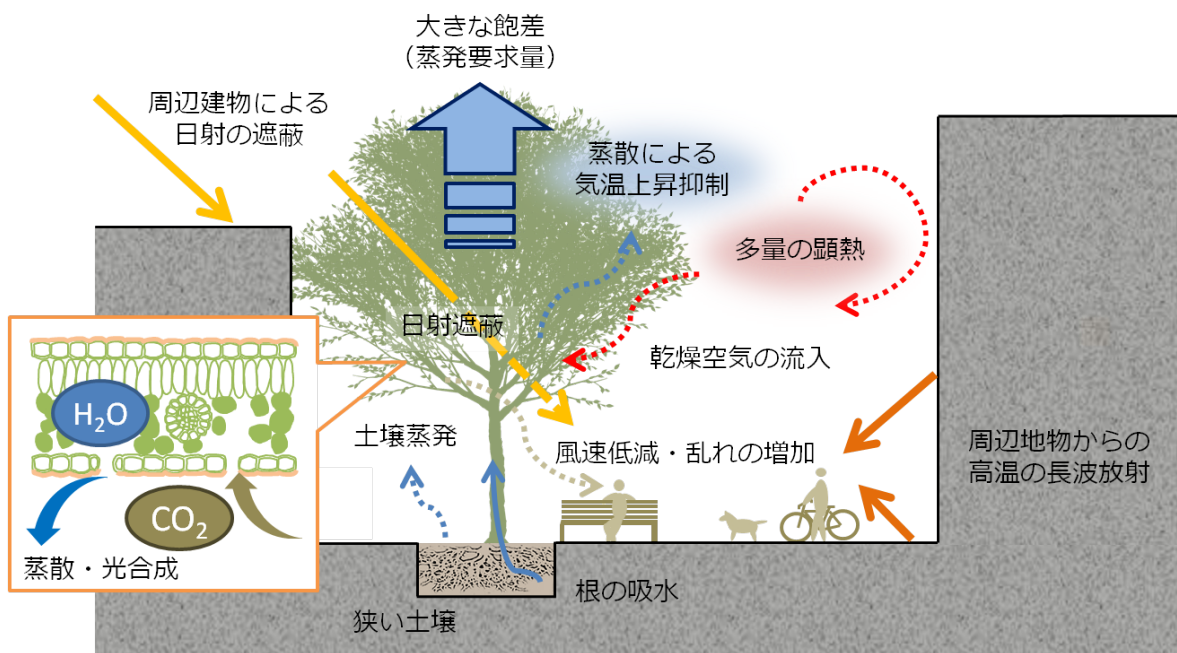


図 1.1 都市の熱環境と緑化樹木の熱的効果

(Campbell & Norman, 1998; 渡辺, 1999; Raupach, 2001; Kumagai, 2011; Monteith & Unsworth, 2013 [7]-[10]), 計測に関しても近年のリモートセンシング技術 (e.g., レーザースキャナー, 以下 LiDAR) の発展による大きな進展が見られる (Jones & Vaughan, 2010 [11]). 一方で蒸散については, エネルギー収支上, 正味放射量の 50% 以上をも占める影響力を持つ (図 1.2) にも関わらず, 計測, 予測, そして熱環境への影響力の評価において, 大きな課題が残されている.

1.2 既往の研究

蒸散に関する計測・予測の困難さは, 植物生理応答と土壌水収支の計測・予測の困難さに由来するものである. この内, 計測の困難さは都市緑化樹木に特有の問題であり, 予測の困難さは, 水文学, 気象学, 植物生態学などにおける植生フラックス (陸面過程) 予測における問題 (Pitman, 2003 [12]; 小松ら, 2005 [13]) と多くを共通としている.

計測の困難さ

都市緑化樹木の蒸散量を計測する上での問題は, 空間設計や灌水計画への応用上は単木スケールでの蒸散量が必要であるにも関わらず, 樹液流法, 渦相関法, ポロメータ法と

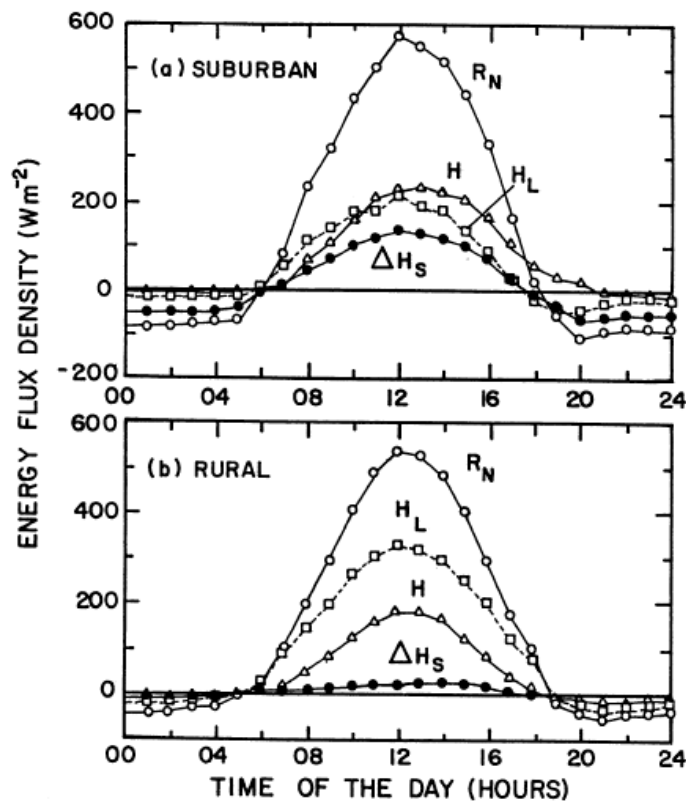


図 1.2 都市部と田園部の地表面熱収支 (Arya, 2001 [14])

一般に、潜熱フラックス H_L の違いがヒートアイランドの原因の一つと言われる。

いった既存の代表的な計測手法の殆どが、

- 個葉または群落スケールを対象としている。
- 樹木（群）が植物群落として一様に成長していることを前提としている。
- 熱的に静穏な環境であることを前提としている。

といった条件の下に成立している点である。異なる空間スケールでの計測値からスケールアップ/ダウンする際には様々な自明でない仮定を要するために深刻な誤差を生じやすく [15]、複雑多様な都市空間と植物の環境適応性のために樹木の生育段階は個体によって様々であり、熱環境工学の研究者が知りたいと欲する対象条件はむしろ熱的に厳しい高温環境である。したがって、都市特有の条件下にある緑化樹木の単木蒸散量を計測するためには、上記の問題を解決する必要がある。

予測の困難さ

次に数値モデルの問題について、建築環境工学分野では2016年現在においても運動量輸送との相似性 (β 法 [16]) から (蒸発効率 β を定数とみなして) 蒸散量を計算している研究が散見されるが、高木の蒸散量は周辺物理環境よりも気孔を介した生物的制御の影響が支配的な場合が多いことが知られている (Jarvis & McNaughton, 1986 [17]). 気象学分野では気孔の重要性は比較的早期から認識されており、第2世代以降の陸面過程モデル (Land Surface Model, 以下 LSM) では気孔コンダクタンスモデルが導入され、気象庁の現業の天気予報でも実際に活用されている (JMA-SiB [18]).

しかし、気孔コンダクタンスモデル (e.g., Jarvis, 1976 [19]; Ball et al., 1988 [20]) はパラメータの経験的較正に対する依存度が著しく、予測対象のサイトや個体で一旦計測すること抜きに予測を行うことが困難であるという問題がある [2]. 土壌—植物—大気系 (Soil-Plant-Atmosphere Continuum, 以下 SPAC) の水輸送は気孔の幅や密度、孔辺細胞内外の浸透圧、道管直径といったマイクロな要因に支配されているために、これらを解像することなしに決定論的な予測は不可能であるが、これらの要因を直接計測・計算することには大きな困難がある。そのため、地球物理学・生物学諸分野では、植生タイプごとに膨大な計測データを蓄積するか (図 1.3), あるいはフラックスタワーや衛星リモートセンシングのルーチン観測結果を LSM にデータ同化するか、いずれかの方法によってパラメタリゼーションが行われている。

都市緑化樹木については、蒸散計測の困難さからデータの蓄積は極めて乏しく^{*1}、そのため都市緑化樹木がどのような蒸散特性 (気孔コンダクタンスパラメータ) を持つかは明らかでない。また、空間設計や灌水計画においては単木スケールの蒸散予測が要求されるため、タワーや衛星の観測結果からパラメータを推定することも困難である。したがって、都市緑化樹木に特有な、計画段階で利用可能な事前情報を活用した予測方法の確立が必要であると考えられる。

評価の困難さ

高木周辺での気温低下を報告した研究事例は数多く見られるが、その原因を樹木の蒸散に求めるもの、木陰の土壌面からの顕熱フラックスが抑制された結果であり蒸散の気温低下効果は限定的とするもの (e.g., 近藤, 2015 [21]) など、解釈には相違があり、プロセスは十分には解明されていない。現状では単木蒸散量がどの程度であるかが明らかでない

^{*1} なお、単木スケールに限らず都市域のフラックス観測データは乏しいのが現状である (Flux Letter Vol.5; Baldocchi, 2012 [27])

ため、緑化樹木の蒸散が熱環境をどの程度改善しているか/しうるかという評価も満足には行えていないと言える。植生キャノピー内では日中の気温は林床部において最低となる場合が多いという観測事実(小松ら, 2007 [22])からは、土壌面の熱収支が生活高さの熱環境に与える影響は大きいと考えられるが、灌水された水田を対象とした既往研究では、葉温が気温以下に低下し、大気を冷却していたことを報告する事例も存在する(大上, 2003 [23])。また、含水率に応じて土壌面は加熱源にも冷却源にもなり得るとする研究もある(田中ら, 2000 [24])。

空間設計や灌水計画への応用においては、樹木の空間配置と維持管理コストの問題(灌水量あるいは土壌の水容量をどの程度確保すればよいのか?)が関心の対象となる。潜熱フラックスを最大化する上では、土壌水分を保った上で分散配置することが有効であること(オアシス/エッジ効果^{*2})は蒸発の原理的にも、既往研究(神田・日野, 1990 [25]; 成田ら, 2006 [26])からも明らかであるが、潜熱フラックスを増大させる上で有効な空間配置はローカルな気温上昇を抑制する空間配置とは必ずしも一致しない(例えば日射を遮蔽した場合、蒸散は殆ど起きない^{*3}が気温も上昇しない)と考えられる。そのため、生活高さでの快適性を改善する上で適切な空間配置は明らかとは言い難い。また、現実の都市緑化では常に灌水されている条件は稀と考えられる上に、しばしば道路舗装などによる土壌容積の制約を受けているという実情を考えると、「一定量の水資源しか利用できない条件において、蒸散と蒸発にどのように分配するのが良いのか」という問題の検討も重要であると考えられる。

1.3 本研究の目的

街路樹や庭木、あるいは屋上緑化などの都市緑化樹木は、森林とは異なり単木で孤立した条件に植えられている場合が多いため、強い日射や風速、乾燥空気の移流を受けやすく、大気から強い蒸発要求量を受ける条件にあると言える。また同時に、道路舗装などによって十分な根量・土壌容積が確保できないために、水供給量に制限を受ける場合も多いと想定される。強い蒸発要求量と制限された水供給という、厳しい乾燥ストレスが想定される都市特有の条件下において、樹木がどのような蒸散特性を持つかは明らかでない。

本研究は、庭木や街路樹といった単木として存在する都市緑化樹木(図 1.4-1.5)を想定

^{*2} 風上側に水蒸気ソースが存在せず乾燥空気が流入してくる条件では、広大な湿潤面に比べ蒸発量が増す(移流効果)。孤立した蒸発面の蒸発増大に対してはオアシス効果、湿潤面と乾燥面の境界部での蒸発増大はエッジ効果と呼ばれる。前者は都市気象分野(Oke, 1987 [28]; Kanda, 2007 [29])、後者は森林水文分野(cf., Mackay et al., 2010 [30] およびその参考文献)でよく調査されている。また、樹木を対象とした場合において、群落よりも孤立樹木の方が日射を受けやすい・風速が減衰しないことの影響もオアシス効果の内に含める立場もある [26]。

^{*3} エンタルピー変化に必要な熱が供給されない上に気孔が閉鎖するため。

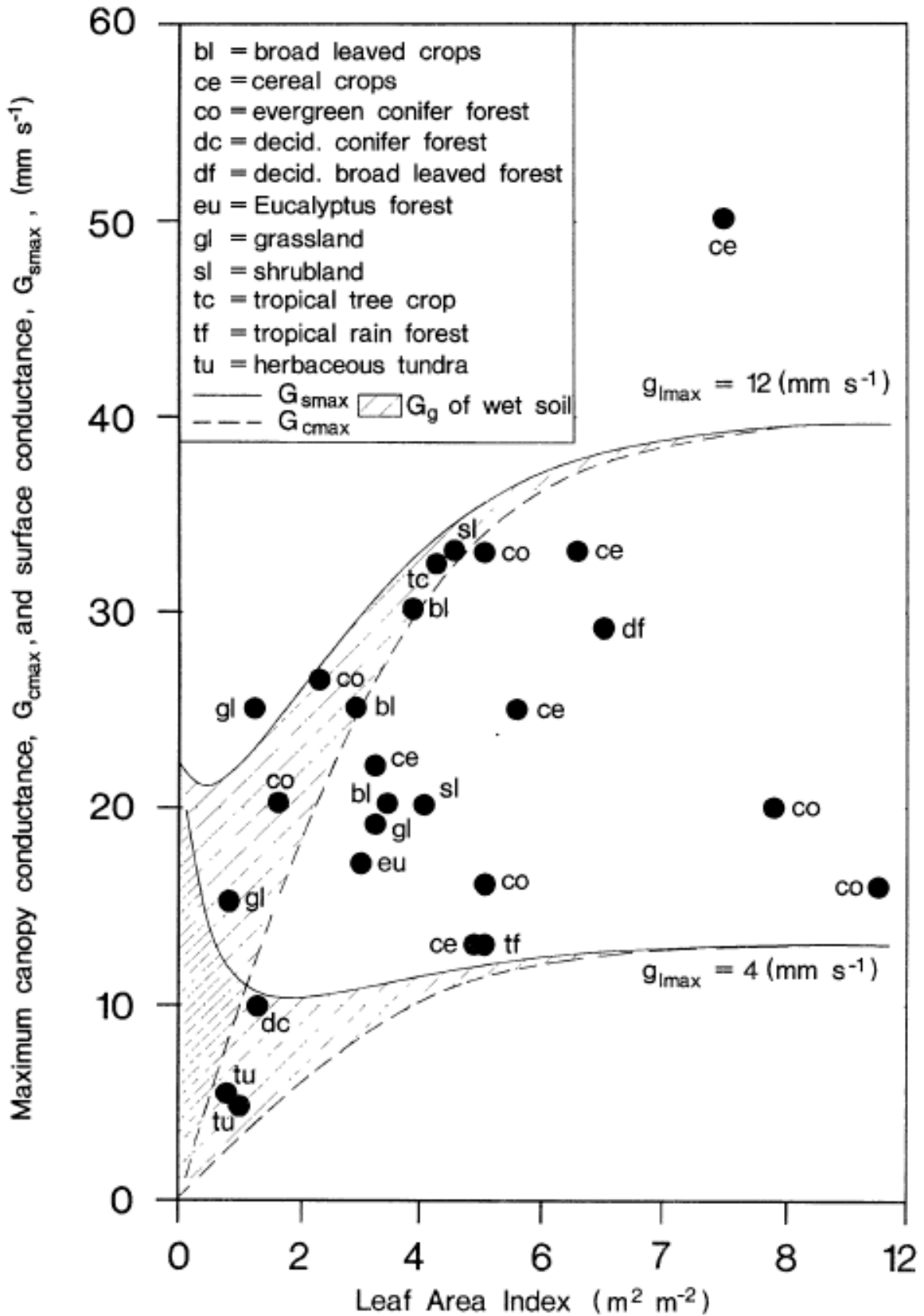


図 1.3 植生タイプごとの水蒸気拡散コンダクタンスの違い (Schulze et al., 1994 [31])
LAI が同程度でも、生理特性の違いで蒸散量は 3 倍以上変わり得ることが判る。

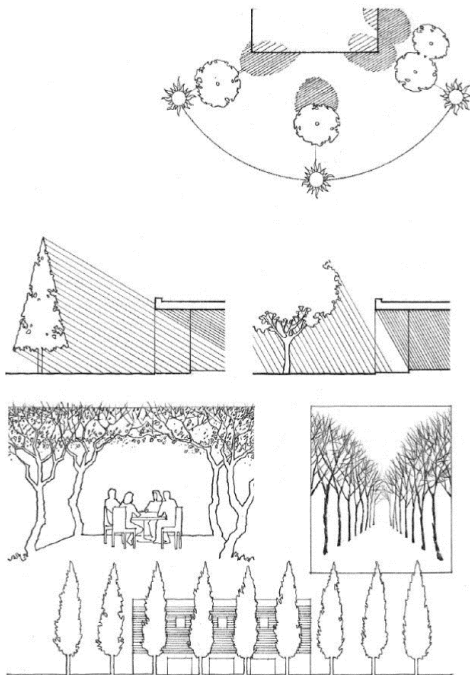


図 1.4 単木スケールの熱環境調整効果の把握によって評価可能となる空間の例 1 (Ching, 2014 [32]).

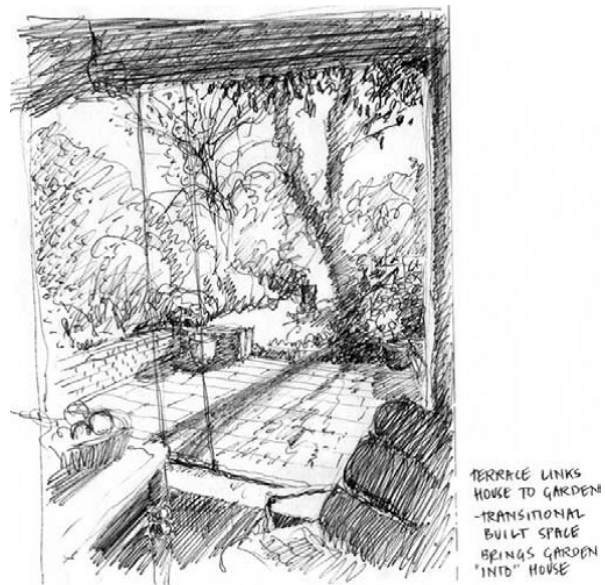


図 1.5 単木スケールの熱環境調整効果の把握によって評価可能となる空間の例 2 (Dee, 2001 [33]).

対象として、その蒸散 (*dry canopy evaporation*^{*4}) による熱環境調整効果を予測・評価するために、単木蒸散量の定量的特性の把握と予測方法の確立を目的とする。ただし、本研究では、土壌塩・貧栄養・大気汚染物質 (SO_x や O_3) の影響、排気ガスなどに由来する高 CO_2 濃度条件への応答といった化学環境上の問題は取り扱わない。また、予測方法 (モデリング・パラメタリゼーション) の検討では、生長や枯死、フェノロジーの予測は行わず、樹冠形態や気孔コンダクタンスパラメータが一定とみなせるような数週から数か月程度の範囲内での予測方法を検討する。

まず、都市に特有な土壌容積の小さな孤立樹木の特性を把握するため、コンテナ植栽 11 樹種の蒸散量を計測する。次に、蒸散の生物的制御を表す気孔コンダクタンスについて、簡便さと予測精度の両立を図った数値モデルと、計測の効率化のためのパラメタリゼーション手法を提案する。更に、提案モデルと SPAC の数値シミュレーションを用いて、土壌蒸発と放射環境を併せた上で緑化空間における熱・水収支と気温を予測し、樹木の蒸散特性の違いが熱環境に与える影響を評価する。

*4 気孔・クチクラ層を介した蒸散。遮断蒸発 (*wet canopy evaporation*) は本研究では扱わない。

1.4 各章の構成

本研究における各章の構成は以下の通りである。

第2章「長期的なケヤキの水収支計測に基づく単木の蒸散特性の把握」では、対象とする土壌容積の小さな孤立樹木において、どのような生物学的・非生物学的要因が蒸散量を決定しているかを検討することを目的として、様々な環境・着葉条件での蒸散データを得るために2年間にわたる長期的なケヤキの水収支計測結果を分析する。

第3章「複数樹種の計測に基づく単木蒸散能力と形態的・生理的特徴の関係分析」では、樹木の形態的・生理的特徴の内、蒸散予測に利用可能な情報を分類・判断するために、前章のケヤキに加えて10樹種の単木蒸散量を計測し、11樹種の蒸散特性の分析を行う。

第4章「蒸散予測を目的とした簡便な Soil-Plant-Atmosphere Continuum モデルの構築」では、都市緑化樹木の熱・水収支特性を予測可能、かつ空間設計への応用について実用的で簡便な SPAC モデルを構築するため、複数のサブモデルを組合せ、モデルの予測能力を比較検討する。

第5章「気孔コンダクタンスパラメータの実用的な定量化方法の提案」では、第4章において最良の予測モデルと判断した BMF & RC モデルの気孔コンダクタンスモデルパラメータについて、計測に要する手間を抑えた効率的な定量化方法を検討する。

第6章「蒸発散による緑化空間の熱環境緩和効果の予測評価」では、第4・5章で得られたモデルとパラメータを利用し、単木による緑化空間の熱環境緩和効果の予測評価を行う。

第 2 章

長期的なケヤキの水収支計測に基づく 単木の蒸散特性の把握

本章と次章では，街路樹や庭木を想定したコンテナ植栽樹木（樹高約 5m）の単木蒸散量 (*dry canopy evaporation*) の実態把握を行う．対象とする都市緑化樹木がどのような蒸散特性を持つのかを明らかにするとともに，数値モデルによる予測を行う際に，どのような情報が必要となるのか，また，必要性が低いのかを分析する．

2.1 はじめに

植物の蒸散は，土壌・大気環境物理条件と，根の吸水—道管内水輸送—気孔を介した水蒸気拡散における生物的制御の影響を受けるが，どの要因が蒸散量を“律速”するかは，生育条件によって変化しうることが知られる [34]．都市気象・建築分野ではオアシス/エッジ効果から都市緑地の蒸散量は森林よりも多い (Spronken-Smith et al., 2000 [35]; Moriwaki & Kanda, 2004 [36]; 成田ら, 2006 [26]) と見る立場が多いようであるが，植物生態学の研究では，高温乾燥化した都市大気による乾燥ストレス，土壌容積の少なさや地下水帯と縁が切れていることによる水供給量の少なさ，容積が少ない上に舗装等で圧縮された土壌条件による根系の発達阻害などの理由から，蒸散量や気孔コンダクタンスは自然条件より小さくなるという報告が多く (Kjelgren & Clark, 1993; Cregg, 1995; McCarthy & Pataki, 2010; Osone et al., 2014; Kagotani et al., 2015 [37]-[41])，両者には齟齬がある．

本章では，本研究の想定対象である，土壌容積が制限された孤立樹木という都市緑化に特有な条件下において，どのような生物的・非生物的要因が蒸散量を決定しているか，また，第 4 章以降で扱う数値モデルにおいて，どのような時間的・空間的情報が考慮されるべきか，あるいは簡略化可能であるかについて，有用な知見を得ることを目的とする．

第1章で述べたように、森林水文学、農業気象学、植物生理生態学などで蒸散計測に一般に利用される、ポロメーター法、樹液流法および乱流フラックス観測は、都市緑化樹木の単木蒸散量を計測する上では問題を有する。渦相関法に代表される乱流フラックス観測は群落を対象とする方法であり、対象スケールが根本的に異なっている。本章では、単木蒸散量計測にしばしば利用されるポロメーター法および樹液流法を都市緑化樹木に適用する際の問題について言及した上で、本研究で採用した計測方法であるライシメーター法がどのような利点・欠点を持つかを述べる。次に、ライシメーター法を野外での長期計測に適用する際の欠点を克服するためのデータ分析・品質管理方法を新たに提案し、その精度確認を行った上で、計測結果について議論していく。

2.2 蒸散計測方法の検討

2.2.1 既存の計測方法の評価

ポロメーター法

図 2.1 に個葉の断面を示す。気孔と葉面境界層を直列抵抗とみなすと、個葉スケールの蒸散速度は Fick 則から以下のように表わせる（クチクラ蒸散と葉内空隙-気孔腔間の拡散過程は無視した）。

$$E_l = g_v(e_l - e_a) = \frac{g_s g_{bl}}{g_s + g_b}(e_l - e_a) \quad (2.1)$$

ここで、 E_l :蒸散速度 [$\text{mmol m}^{-2}(\text{leaf})\text{s}^{-1}$], g_v :水蒸気拡散コンダクタンス [$\text{mmol m}^{-2}(\text{leaf})\text{s}^{-1}$], g_s :気孔コンダクタンス, g_{bl} :葉面境界層コンダクタンス, e_l, e_a :葉内・葉面境界層外の水蒸気分圧 [kPa kPa^{-1}] である。水蒸気濃度勾配 ($e_l - e_a$) の部分は Vapor Pressure Deficit, 葉面飽差 (の分圧) [kPa] or [kPa kPa^{-1}] と呼ばれる。

リーフポロメーター(図 2.2) は個葉をクリップで挟み、クリップ内のチャンバーに乾燥空気を流して水蒸気濃度の変化を計測することで水蒸気拡散コンダクタンスを計測する測器である。建築環境工学や造園学分野ではしばしば、ポロメーターが出力する単位葉面積あたりの蒸散速度を基に単木蒸散量を算出している既往研究が見られる*1。しかし、ポロメーターは原則的には個葉の水蒸気拡散コンダクタンスの測器であり、

- チャンバー内では葉温が上昇しやすい。
- チャンバー内は強制通風されているため、実際の (*in situ* での) 条件に比べ境界層抵抗を過小評価する。

という理由から、ポロメーターで計測された蒸散速度は *in situ* での蒸散速度とは異なる

*1 CASBEE-HI において、高木蒸散量の評価設定の根拠として、この方法による単木蒸散量の推定結果が参考とされている [42]。

場合が多い*2。したがって、個葉のコンダクタンス計測値から単木蒸散量を推定するためには、ポロメーター計測に加えて LAD や LAI と樹冠内外の微気象を計測し、それらの結果を樹冠内微気象の予測モデルに同化させる必要がある。しかし、この方法においても、

- 葉 1 枚ごとに生理特性は異なる。例えば、樹冠内の日陰部位に付いている陰葉と日向に付いている陽葉では光合成・蒸散能力が異なることが知られる。
- 微気象条件、特に放射環境と葉温は樹冠内の位置によって著しく異なる。
- LAD や LAI の計測にも少なくない誤差が含まれる。
- 樹冠内微気象モデルにもモデル化誤差が含まれる。

と言った様々な誤差要因が存在している。例えば、Leverenz et al. (1982) はトウヒ林の計測において、水蒸気拡散コンダクタンスの樹冠平均値を相対誤差 (95% 信頼区間) 10% 以下で求めるためには、少なくとも 155 以上の標本数が必要であることを示している [15]。近年の植生フラックス研究においては、ポロメーター法は樹液流法や乱流フラックス観測と併用される場合が多く、単独で潜熱フラックスの推定に用いられることは稀である。気孔の微気象条件への応答特性を評価する目的では有用であるが、単木スケールの蒸散の総量を求める上では信頼性に欠ける方法と言える。

樹液流法

樹液流法は幹にセンサーを挿して、熱をトレーサーとみなしてその移流速度から樹液流速 (蒸散流速) を推定する計測方法である。高木を対象としたものとしては、Granier 法 [44] とヒートパルス法 [45] の 2 つが広く一般に用いられる。特に Granier 法はセンサーのコストの安さから、渦相関法と共に 90 年代以降の植生フラックス計測の主役となっている。ヒートパルス法は名前の通り、瞬間的に大きな熱量を与えてその移流速度を測る方法であるのに対し、Granier センサーは (Thermal Dissipation Probe と呼ばれるように) 一定の小熱量で発熱するヒーター付き熱電対と基準熱電対 (図 2.3) との温度差から樹液流速を推定するという違いがある。両者の長所・短所はこの熱量の与え方に特徴づけられ、Granier 法は発熱量が小さいために熱的な外乱 (外部の日射・気温変化) に弱く (Oren et al., 1999a [46]; Lu et al., 2004 [47])、ヒートパルス法は発熱量が大きいため木部が乾燥し、熱伝導率が変化してしまうために長期計測での信頼性が特に低いという問題 (Swanson & Whitfield, 1981 [45]) がある。

樹液流法を都市緑化樹木の計測に適用する際の最大の問題は、いずれの方法も、温

*2 ポロメーター LI-1600 を開発していた LI-COR 社の研究員 (McDermitt, 1990) は、LI-1600 の表示する蒸散速度を *in situ* の値とみなすことは「強く非推奨」と警告している [43]。また、Delta-T 社のポロメーター AP4 は蒸散速度は直接出力できない (水蒸気拡散コンダクタンスしか出力しない) 仕様になっている。

度変化と移流速度の関係式を作る際に木部構造に依存した較正が必要になる点である (Clearwater et al, 1995; Steppe et al., 2010; Wullschlegel et al., 2011 [48]-[50]). 樹木の道管種は大きく分けて環孔材・散孔材・仮道管の3種があり、道管径・分布が大きく異なっている (図 2.4). 更に同一の道管種であっても生育段階によって辺材^{*3}面積は異なる上に、幹の根元から枝の末端部にかけて道管径は変化する (先細りする) ことが知られている (Tyree & Zimmermann, 2012 [51]). 森林水文分野では、比較的一様に成長した同一樹種を複数個体計測する (うち数個体は較正用に用いる) ことで、単木・群落蒸散量を推定しているが、非一様な環境である都市では、厳密な較正を行うことが困難な場合が多い。また、樹液流は胸高 (高さ 1.2m 地点) で計測されることが多いが、胸高位置での樹液流速と蒸散速度 (葉—大気の拡散) にはしばしばタイムラグが見られ、高木では最大で 2-3 時間程度の遅れが報告されている (e.g., Saugier et al., 1997 [52]). このため、気象条件と蒸散速度の変化から気孔コンダクタンスモデルをパラメタライズする場合において、大きなバイアスを生じる原因となることも知られている (Kumagai et al., 2009 [53]; Ward et al., 2012 [54]).

なお、比較的最近になって、森林水文学分野の研究者が Granier 法を用いて、都市緑化樹木の樹液流計測を行った研究事例が増えてきている (McCarthy & Pataki, 2010; Pataki et al., 2011; Litvak et al., 2011, 2012; Peters et al., 2010; Chen et al., 2011, 2012 [39], [55]-[60]).

ライシメーター法

土壌・植物体の重量 (あるいは土壌含水率) と給排水量を基に水収支から蒸散量を推定するライシメーター法は、一般には草地・土壌の蒸発散量の計測によく利用される。計測原理が最も明快であり特別な仮定や較正を要しないほか、ポロメーター法や樹液流法とは異なり土壌水収支を計測するために、土壌の乾燥ストレスが蒸散に与える影響も把握できるという利点もある。一方で、

- 比較的大掛かりな設備を要する。
- 野外で高木を対象とした蒸散計測に用いる場合には、風圧や降雨による重量変化のノイズを除去する必要がある。

といった問題があるため、高木の蒸散計測には僅かな事例 (Edwards, 1986; 吉田・瑞野, 1999; Ben-Gal et al., 2010; Lorite et al., 2012 [61]-[64]) を除き、あまり用いられてこなかった。高木の既往研究では、風圧ノイズの問題から蒸散量推定の時間分解能は 1-2 時間

^{*3} 木部の内、水・栄養の輸送に使用されている部位。輸送に利用されなくなった古い部位は心材と呼ばれ、区別される。

程度が限界であった。

また、研究事例の多い樹液流法や渦相関法とは異なり、長期的な計測を行った事例が少ないために、誤差評価の方法・指針が確立されていないという問題も挙げられる。多くの既往研究では風圧の影響を除去するローパスフィルターとして単純移動平均や Savitzky-Golay 法を用いているが、これらの方法では誤差の定量的評価は不可能^{*4}な上に、どの程度の時間で平滑化するかは完全に研究者の主観に依っていたとみなせる。

2.2.2 本研究の対象樹木の位置づけと計測方法の選定

2.1 節で述べた本章の目的、即ち、庭木や街路樹、屋上緑化といった土壌容積の少ない条件に植えられた孤立樹木において、その蒸散量がどのような要因で決まるかを明らかにするためには、様々な気象・土壌条件および、着葉条件での蒸散量と環境条件の計測を行う必要がある。蒸散量を決定する要因である水蒸気拡散コンダクタンスは、日射、気温、飽差、風速といった気象条件の影響を受け、時間変化する。しかし、これらの気象条件は1日の間で連動して変化する。つまり、日射が地表面を加熱し、気温が上昇することで自然対流が生じ、また、気温が上昇した影響で飽和水蒸気圧が上がり飽差が大きくなるために、これらの要因の影響力を独立して評価するためには十分な長期間に渡って計測を続ける必要がある。土壌水分条件についても同様であり、土壌の影響だけを独立して、あるいは土壌水分の制約を受けていない条件で気象条件の影響だけを独立して評価するためには、注目している要因以外の条件を可能な限り統一した上で比較することが望ましい。

2.2.1 項では既往研究でも都市域における樹液流計測事例が増えてきていることを述べたが、道路舗装が存在する実際の都市部において、根の広がり度合いを把握し、根系範囲内の土壌水収支を正確に把握することは困難である。そこで本章では、環境条件を正確に把握できるよう、実験圃場内に大型重量計を用いたライシメーターを設置して、2年間に渡る水収支の長期連続計測を行った。

2.3 大型重量計による長期的な単木水収支の計測

2.3.1 実験サイトと供試木の概要

計測は愛知県みよし市内にある約 8800 m² の実験圃場 (35°8'N, 137°6'E) で行った。供試木の周辺 40m 以内には、他のコンテナ植栽樹木 (樹高約 5m) 以外の障害物・建物は存在せず、コンテナ植栽同士の間隔も 4m 以上離れて配置されているために日射・風を受けやすく、孤立環境とみなせる条件であった。

^{*4} 原則的にはこれらのフィルターは単なる視覚表現のための方法である [65]。

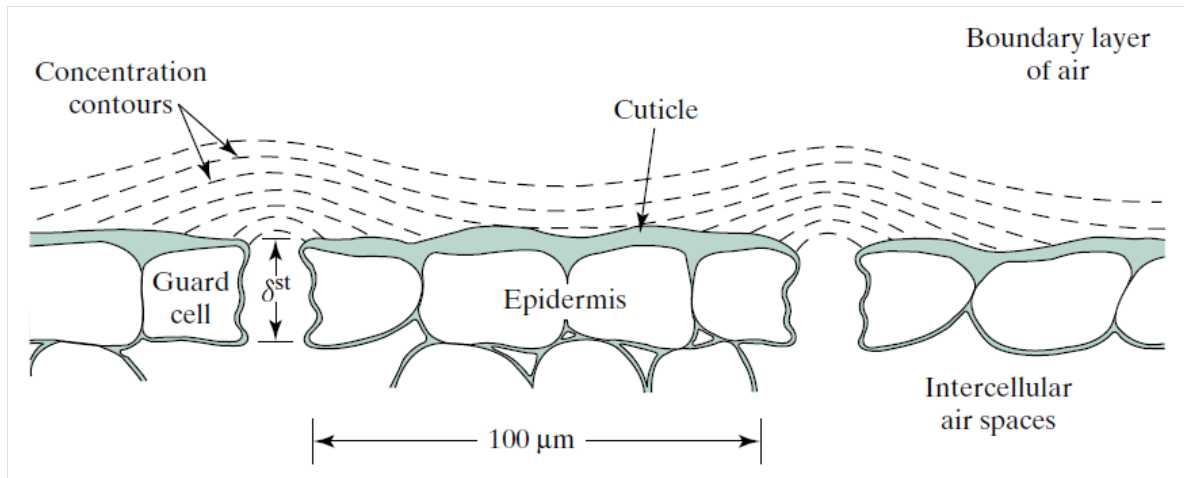


図 2.1 気孔と葉面境界層 (Nobel, 2009[66])



図 2.2 ポロメーター [67]

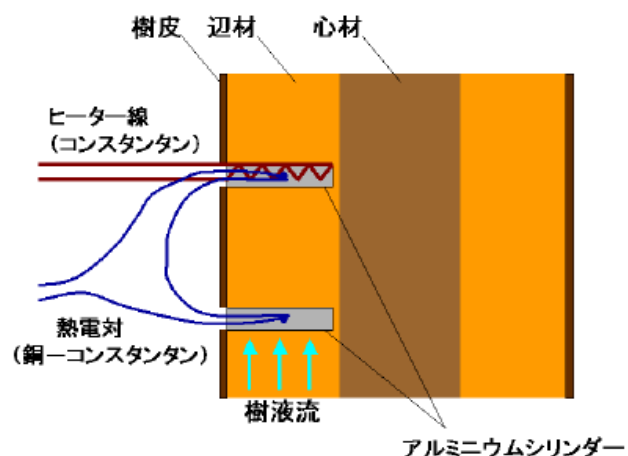


図 2.3 Granier センサーとその設置状況 [68]

供試木は樹齢 13 年 (2010 年当時) のケヤキ (*Zelkova serrata*) とした (図 2.5)。供試木は浅輪ら, 2012 [69], 2014a [70] と同一のものである。ケヤキは日本の街路樹としては 3 番目に多い樹種である。樹高は 6.4m, 幹直径 11cm, 2010 年 9 月時点での総葉面積は 13.2m^2 (片面), LAI は $2.1[\text{m}^2\text{m}^{-2}]$ であった (Asawa et al., 2014b [71])。葉面積と LAI は地上型 LiDAR (VZ-400, RIEGL, Horn, Austria) によって計測した点群情報から, Voxel-based Canopy Profiling 法 (Hosoi & Omasa, 2006 [72]; 押尾・浅輪, 2016 [73]; 以下, VCP 法) を用いて推定した。VCP 法の概要は第 5 章で説明する。

2010 年において, コンテナに移植する際に根を損失した負担を軽減するために蒸散量を減らす意図から葉を剪定していた。2011 年に葉面積は若干減少したが, 2012 年夏季の段階では, 葉面積は 2010 年 9 月と比較してほぼ倍増していた (図 2.6)。なお, 計測期間中, 病害や虫害, 枝の破損などは見られなかった。

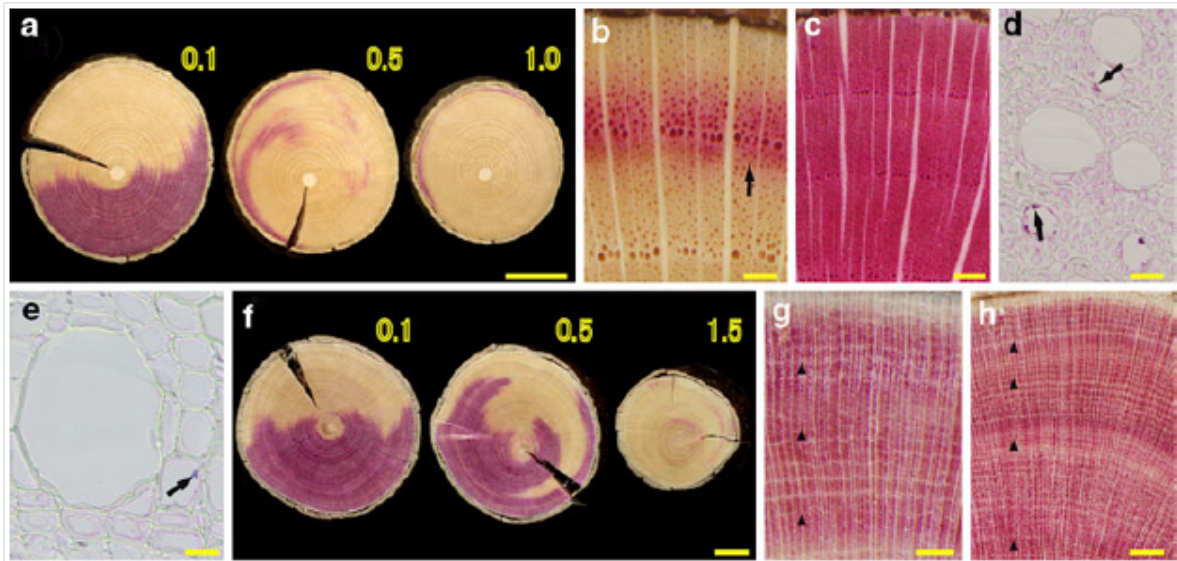


図 2.4 樹種による木部構造・辺材部の違い (Umebayashi et al. [74]).

(a,f) は同じ個体の高さ別断面であり，道管が幹内でらせん状に伸びていることがわかる．環孔材 (b) では，当年生の道管（最も外側の数 mm 部分）だけで 80% 以上の水が輸送される．散孔材 (g) では道管は辺材内に一様に分布しており，1 年以上前に形成されたものも使用される．

供試木は 1m × 1m × 深さ 0.6m のコンテナに植えられていた *⁵．有効土層の厚さは 0.5m で，関東ローム 70%，パーライト 20%，腐葉土が 10% であった．関東ロームは排水性・保水性に優れるとされ，造園用途で広く一般に使われる．水理特性としては，団粒構造を有し，高い空隙率と飽和透水係数を持つ場合が多いことが知られる (開発ら, 1981 [75]; 成岡ら, 2000 [76]).

2.3.2 試験体重量と環境条件の計測機器

試験体重量と環境条件の計測は 2010 年 8 月から 2012 年 9 月まで自動的・連続的に行った．加えて，各年の夏季において，葉面積と熱収支に関する集中計測を行ったほか，灌水量を変えて土壤乾燥ストレスに対する応答を調べた．全ての計測データについて，深刻なエラーなどが発生していないか毎月確認した．

試験体重量と環境条件はデータロガー (C-CR10000, Campbell Scientific, Logan, Utah, USA) に記録した．重量計と風向風速計は同期した上で 1 秒ごとに記録し，ほかの

*⁵ 国土交通省土木工事積算基準 [77] では，幹直径 8-9.5cm の樹木に対する土壤容積は 0.65m³ が目安とされている．土壤深さについては，森林・都市 いずれの環境においても樹木の細根は 80-90% が土壤深さ 40cm までの表層部に集中している [78] ため，一般的な条件と大きく変わらないものと考えられる．なお，本研究の供試木の土壤容積は造園の専門化の助言にしたがって決定している．

項目は1分または10分間隔で記録した。

大型重量計

使用した重量計は浅輪ら, 2012 [69], 2014a [70] と同一のものである。複数年に渡る長期計測が可能ないように, 重量計を選定・設計した。供試木・コンテナ・土壌の合計重量は1t 近くに達することが想定されたため, 台秤式のロードセル重量計を用いた (CAPS4-1500LL-I, Sartorius AG, Göttingen, Germany)。計測前の検討段階において, 蒸散量は少ない条件で 1kg h^{-1} 程度と想定されたため, 測定誤差の許容値は $\pm 100\text{g h}^{-1}$ と考えられた。重量計の公称精度は絶対値で 250g (最大重量 1500kg かつ精度 1/6000) であったが, 重量計測値の変化は 100g 以下の値を検出できることを現地確認した。

図 2.7 にライシメータの断面・寸法を示す。設計の際には以下の点を留意した。

1. 供試木・コンテナが重量計に接触することによる測定誤差が生じないように, 給排水機器を供試木近くに設置した上で, 測器のケーブル類のみが触れるように図った。
2. ケーブル類に引っ張られる形で測定誤差が生じないように, ケーブルをたわませた状態にした。
3. 強風時に供試木が台秤の上から落ちないように, 鉄製の支持アームを 2 本, 供試木の周りに設置した。ただし通常時は計測に影響しないように幹から離れた。風速 10m s^{-1} 以下の条件ではアームには接触しないことを確認した。
4. 風雨や日射によって測器が劣化・故障しないように台秤とコンテナにカバーを被せた。カバーの側面は開閉可能として, カバー内の温湿度をモニターした上で頻繁に換気を行った。

気象条件の計測

気象条件は実験圃場内の北部の代表点 1 か所で計測した。測器は, 日射計 (MS-402, Eko Instruments, Tokyo), 強制通風筒付き気温計 (4 wires Pt100 Ω , Taiyo Keki, Tokyo, Japan & Model 43502, R.M. Young Co., Traverse, Michigan, USA), 相対湿度センサー (CS215, Campbell Scientific), 転倒ます式雨量計 (TE525MM, Campbell Scientific, Logan, Utah, USA), 3次元超音波風向風速計 (Model 81000, R.M. Young Co.), 光合成有効放射 (Photosynthetic Active Radiation, 以下 PAR) センサー (LI-190, Li-Cor Inc., Lincoln, Nebraska, USA) である。風圧が重量計測に与える影響を調べる意図から, 供試木から遠すぎずかつ計測された風速に対する供試木の影響が最小限になるよう, 風速計は供試木から 4.3m 離れた位置に設置した。風速計の設置高さは地面から 4m で, ほぼ樹冠の中央部に相当する位置であった。

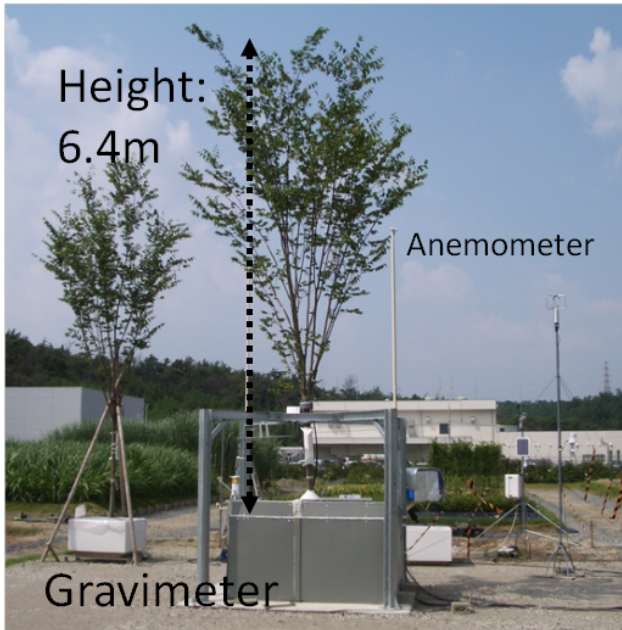


図 2.5 ケヤキ供試木 (2010)
右奥に超音波風向風速計が設置されている。



図 2.6 ケヤキ供試木 (2012)
葉面積はほぼ倍増していた。

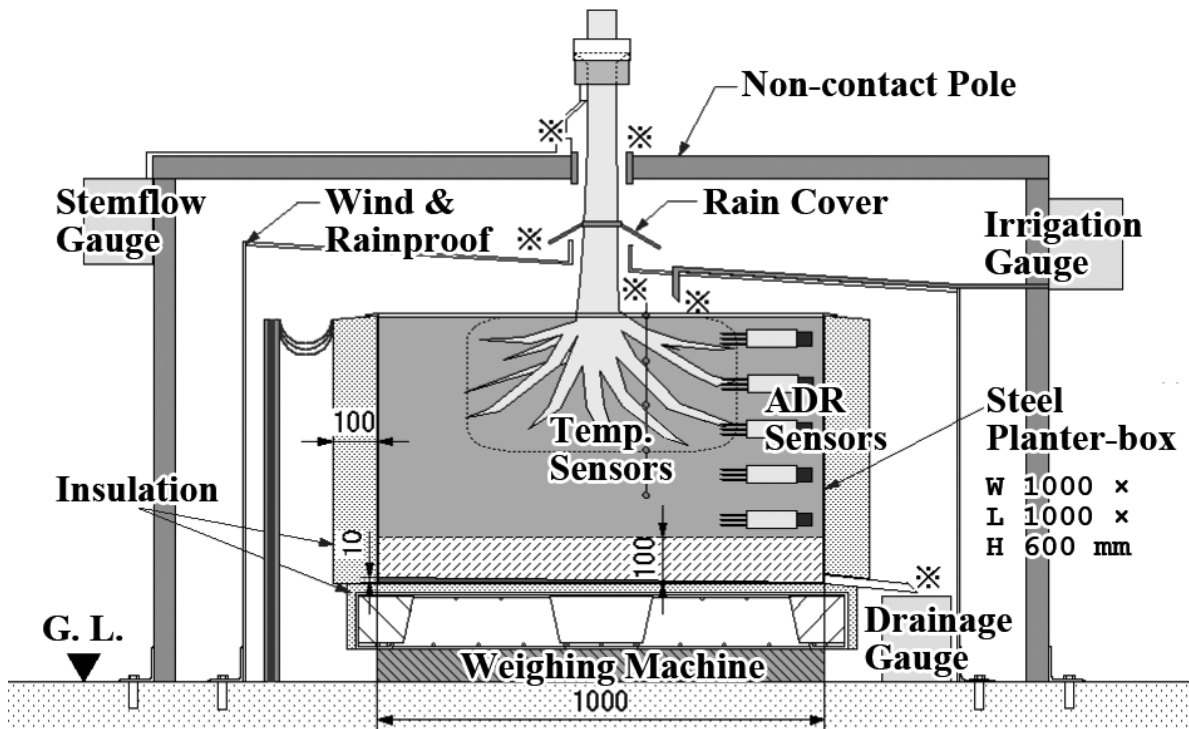


図 2.7 台秤式重量計を用いた長期計測用ライシメーター
※マークは非接触を示す。

灌水方法と水収支計測

自動灌水によって、水収支は人為的に管理した。自然降雨のコンテナ土壌面への浸透量を正確に把握することは困難であることと、本研究の計測は樹木蒸散量の実態把握が目的であり土壌蒸発や降雨遮断の実態把握は目的ではないためである。灌水はほぼ毎日、深夜に行った。灌水される水は一旦タンクに貯留され、既定量に達した後、土壌表層に散水されるように囚った。排水は灌水直後から始まり、標準的な灌水量（約 30kg d^{-1} ）では約4時間続き、蒸散が始まる翌朝までにはほぼ止まることを確認した。植鉢は2mm厚のステンレス製で、底は1/100の勾配を持つ。排水層として、底部に10cm厚分の軽石を敷いた。

土壌の体積含水率は5, 15, 25, 35, 45cm深さの鉛直5点で、Amplitude-Domain Reflectometry (以下ADR) センサー (Thetaprobe ML2x, Delta-T Devices, Cambridge, UK) を用いて計測した。マトリックポテンシャル (圧力水頭) は、計測した含水率と土壌水分特性曲線から計算した。水分特性曲線は、5箇所のADRセンサー付近の土壌から不覆乱試料を100ccサンプリングし、実験室にて遠心法と圧力板法を用いて推定した。灌水量は流量計 (ND10-NATAAA, Aichitokei, Nagoya, Japan) で、排水量は転倒ます式雨量計 (TE525-L25, Campbell Scientific) でそれぞれ計測した。樹幹流は幹中央付近で集め、雨量計 (UIZ-TB500, UIZIN, Tokyo) で計測した。したがって、樹幹流は土壌に浸透しない状態となっていた。土壌表面にはカバーを被せて蒸発を防いだが、土壌呼吸を妨げないように表面には空気を自動供給した。土壌表面での換気量、気温・湿度は流入部と流出部で計測されており、それらの値から土壌蒸発量を計算できる。2010年夏季における土壌蒸発量は 150g d^{-1} 以下であった。

2.3.3 重量計による蒸散量の推定方法・データ品質管理方法の提案

水収支計算

蒸散量を推定するためには、重量変化に影響する他の要因を特定する必要がある。単木の重量変化と水収支は以下のように表わせる (単位は質量または時間当たりの質量変化)。

$$W^* = W + \epsilon_w \quad (2.2)$$

$$\frac{\Delta W}{\Delta t} = -E_T - E_S + Irr - Dr + Int - E_{WC} + \epsilon_o \quad (2.3)$$

ここで、 W は試験体重量 (供試木, 土壌, コンテナの合計重量) で W^* はその計測値, ϵ_w : 風圧荷重, E_T : 単木蒸散量, E_S : 土壌蒸発量, Irr : 灌水量, Dr : 排水量, Int : 樹冠による降雨遮断量, E_{WC} : 遮断蒸発量および樹冠から落下した雨量, ϵ_o : その他, 結露や落葉など

の誤差要因である。 E_S , Irr , Dr は直接的に計測された。晴天日における E_T の推定誤差の大半は ϵ_w と、 Irr と Dr の測定誤差であり、雨天日では ϵ_w , Int と E_{WC} である。

Irr と Int の影響は灌水または降雨中のデータを破棄することで容易に除去できるが、 ϵ_w , Dr と E_{WC} は特別な処理を要する（後述）。結露は冬季を除けば値が小さく、かつ供試木は落葉樹のケヤキなので本研究においては問題にならない。落葉の影響を W^* から直接分離することは行わなかったが、別の計測によって検証した。2012年8月に供試木とほぼ同じサイズのケヤキを対象に葉の刈り取りを行った結果、葉の生重量は 5.8kg tree^{-1} であった。したがって、落葉期に入る前の期間、特に日単位の蒸散量を議論する上では、落葉の影響を無視することは十分に妥当と考えられる。

根の吸水量を把握するため、土壌の水収支も検討した。表面からの蒸発が無視できる条件で、水分移動を積分形で表すと水収支は式 2.3 に類似した形となる。

$$v \frac{d\theta}{dt} = -E_T' + Irr - Dr \quad (2.4)$$

ここで、 v :土壌容積, θ :土壌の平均体積含水率 [$\text{m}^3 \text{m}^{-3}$], E_T' :単木吸水量である。 E_T' は日単位では E_T とほぼ等しいが、日変化では E_T に対して遅れる。 Irr と Dr が無視できる場合、土壌水分量変化 $-vd\theta/dt$ は E_T' に等しい。灌水時でなく、かつ含水率が圃場容水量以下の時、この条件が満たされる。

蒸散量推定における統計解析

データ分析には統計解析環境 R 3.2.4 [79] を用いた。2010年における W^* の生データ（記録間隔 1Hz）を図 2.8 に示す。標準的な日では、 W^* は夜間に灌水によって増大し、昼は蒸散によって減少していた。図 2.8 枠内の図は 8月17日の昼頃の W^* とその線形トレンド（回帰直線）を示している。回帰直線の負の傾きは蒸散速度を意味するが、その回帰残差からは明らかに、強い時系列相関が確認できる。これは、風圧を受けた供試木が揺れ戻り、振動していたことを示唆している。計測値の非独立性は標準誤差や検定に対して極めて深刻な影響を及ぼすことが知られている (von Storch & Zwiers, 1999 [80])。したがってここでは、実効的に独立な標本間の時間 (*Time between effectively independent observation*) T_0 を推定し、 W の標準誤差を補正した。有効標本数 N_{eff} と T_0 は以下のように計算できる (Trenberth, 1984 [81])。

$$N_{eff} = \frac{N}{T_0} \quad (2.5)$$

$$T_0 = \sum_{L=-N}^N \left(1 - \frac{|L|}{N}\right) r_L = 1 + 2 \sum_{L=1}^N \left(1 - \frac{L}{N}\right) r_L \quad (2.6a)$$

ここで、 N :観測数、 r_L :ラグ L での自己相関係数である。観測結果が1次の自己回帰モデルで表現でき、かつ N が十分大きなとき、式 2.6a は以下のように単純化できる [81]。

$$T_0 \sim 1 + \frac{1 + r_1}{1 - r_1} \quad (2.6b)$$

本研究では、 W の直線回帰の残差系列に対して1次の自己回帰モデルを適用した（正規誤差を仮定し Yule-Walker 法で r_1 を求めた）。

本研究で新たに提案する、高木を対象としたライシメーター長期計測における蒸散量 E_T の推定手順は以下になる。

1. 重量計測値 W^* の時系列データを、蒸散量の変化を見る上で十分に短い長さ分割する。以下、分割された各記録を「レコード」と呼ぶ。Vico et al. (2011) のレビュー [82] によると、孔辺細胞の応答時間は典型的には30分以下であるため、本章では1レコードの長さを20分 ($N = 1200$) とした*6。
2. 灌水または降雨が検出された時間のレコードを破棄する。
3. 全てのレコードについて、最小二乗法による直線回帰を行い線形トレンドを除去した上で、式 2.5 と式 2.6b を用いて各レコードでの有効標本数 N_{eff} と代表重量（ここでは $\Delta t = 601$ [sec] での値）を回帰直線から推定する。その後、各レコードでの W の標準誤差を N_{eff} と回帰残差から計算する。
4. 各レコード間の重量変化 ΔW の日変化*7について、各月の典型的な範囲を評価した上で（測器やロガーのエラーなどによる）外れ値を除去する。1日の間の各時間帯における ΔW について、月ごとの25パーセンタイル点および75パーセンタイル点から四分位偏差 (Inter Quartile Range, 以下 IQR) の3倍以上離れたレコードは外れ値として除去する。この3IQRルールはTukeyの箱ひげ図の描き方と同じ方法である。
5. 各レコードの高次モーメント（尖度と歪度）を、線形トレンド除去後の回帰残差から求める。高次モーメントが正規分布から逸脱した*8レコードには「フラグ」を立てる。本章では尖度の絶対値が1以上、歪度が8以上のレコードにフラグを立てた。手順3.で評価した標準誤差は1レコードの長さ以下の高周波ノイズだけを評価・検出するものであり、主に ϵ_w に由来する。一方で、手順5.の高次モーメント検査は線形性（1レコード内の定常性）および低周波ノイズを評価・検出するもので、こちらは主に Dr と E_{WC} に由来する。定常性の仮定はノイズだけでなく、1レコード内における素早い気孔開閉 (g_s の変化) によっても崩れうる。したがって、

*6 1レコードの長さは測器の精度と研究目的に依存した任意性がある。

*7 晴天・弱風条件においては蒸散量に相当する。

*8 どの程度の値を「逸脱した」とみなすかは測器の精度と研究目的による任意性がある。

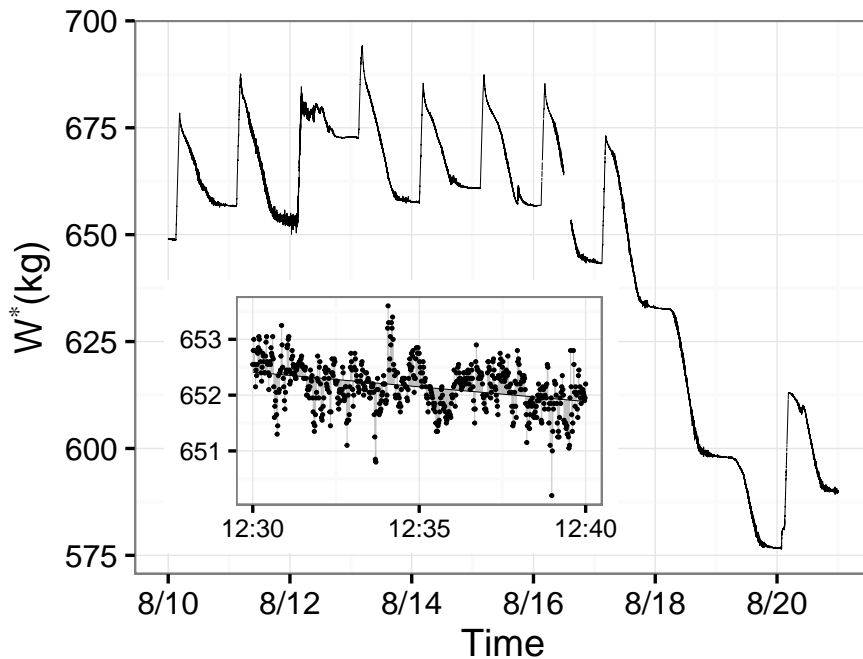


図 2.8 2010 年におけるケヤキ重量計測値の生データ（記録間隔 1Hz）。

本研究では灌水と降雨の前後において連続してフラグが立ったレコードだけを破棄し、通常時のレコードはフラグを立てるだけに留めた。

6. 日単位の蒸散量 E_T を ΔW の合計として計算する。1 日の間で破棄されたレコードが 20% 以上に達した場合は、日単位 E_T も破棄する。本研究では、破棄された、あるいは計測されなかった期間の E_T の補完は行わなかった。

2.4 都市緑化樹木に特有な蒸散特性の把握

まずはじめにライシメーターの精度を確認する。次に、季節変化と経年変化の特徴を理解するために計測期間全体の日単位 E_T と月単位水収支を概観する。最後に、蒸散の環境応答および特性変化の原因を分析するために、 E_T と根の吸水の日変化パターンがどのように経年変化したかを示す。

2.4.1 蒸散量推定と品質管理方法の精度

表 2.1 に、成長期（各年の 5-10 月）における N_{eff} と W^* の記述統計量を示す。風速の増大に応じて N_{eff} 、標準偏差と歪度は増大し、尖度の絶対値は減少していた。年ごとの変化は明瞭でなく、このことは測定期間中ライシメーターが問題なく有効に機能していたことを示唆している。 E_T 推定精度の検証のために、図 2.9 に典型的な条件での ΔW

表 2.1 成長期 (5-10 月) における有効標本数 N_{eff} と記述統計量. レコード長は全て 1200 秒であり, 圃場代表風速 (観測高度 4m) に応じて, 静穏 ($< 0.5 \text{ m s}^{-1}$), 標準 ($0.5-2.0 \text{ m s}^{-1}$), 強風 ($2.0 \text{ m s}^{-1} <$) の三段階に区分した. 表中の値は各区分の中央値.

WS Class	Year	N_{eff}	S.D.	Skewness	Kurtosis
静穏	2010	80	0.040	0.771	4.73
	2011	117	0.029	0.727	4.79
	2012	69	0.053	0.701	5.02
標準	2010	101	0.221	0.621	5.27
	2011	100	0.171	0.516	5.20
	2012	86	0.264	0.490	5.13
強風	2010	203	0.419	0.342	5.23
	2011	193	0.352	0.514	5.23
	2012	194	0.599	0.486	5.62

の日変化パターンを示す. 誤差棒は 2 標準誤差 ($\sim 95\%$ 信頼区間) であり, 黒色のプロットは正規性からの逸脱を表わしている. N_{eff} は概ね風速に対応しており, 値は 200 以下 (つまり補正前の標本数 N の $1/6$ 以下) であり, 系列相関の考慮によって標準誤差・信頼区間が 3 倍以上に増大した結果である. 図 2.9a は晴天・灌水日の結果である. 重量変化には大きな乱れ ($-\Delta W/\Delta t$) が見られるが, この変化は日射量 R_s の変化によく対応しており, 相対誤差の値も小さい (2 標準誤差の日平均相対誤差は 23.1% であった). したがって, この日の $-\Delta W/\Delta t$ は E_T によるものと判断できる. 強風日 (図 2.9b) においても大きな重量変化の乱れが見られるが, N_{eff} によって補正され広がった誤差棒の範囲から, 晴天日の結果とは容易に区別ができる. 更に, 雨天日 (図 2.9c) において, 誤差棒と高次モーメント検査は降雨後において疑わしい $-\Delta W/\Delta t$ を検出している. この大きな $-\Delta W/\Delta t$ は E_{WC} によるものと考えられる. 加えて, 一定量の水が溜まるまで降雨を検出できない転倒ます式雨量計のメカニズムによるタイムラグの存在を考慮すると, 降雨前における負の $-\Delta W/\Delta t$ (すなわち試験体重量の増加) は降雨遮断 Int の影響と判断できる. この結果から, 高次モーメント検査は E_{WC} や Int による誤差を考慮する上で, いくつかのレコードを破棄すべきかの定量的基準として利用できることが判る. この日のデータについては, 降雨前後の 2 レコード分を破棄した.

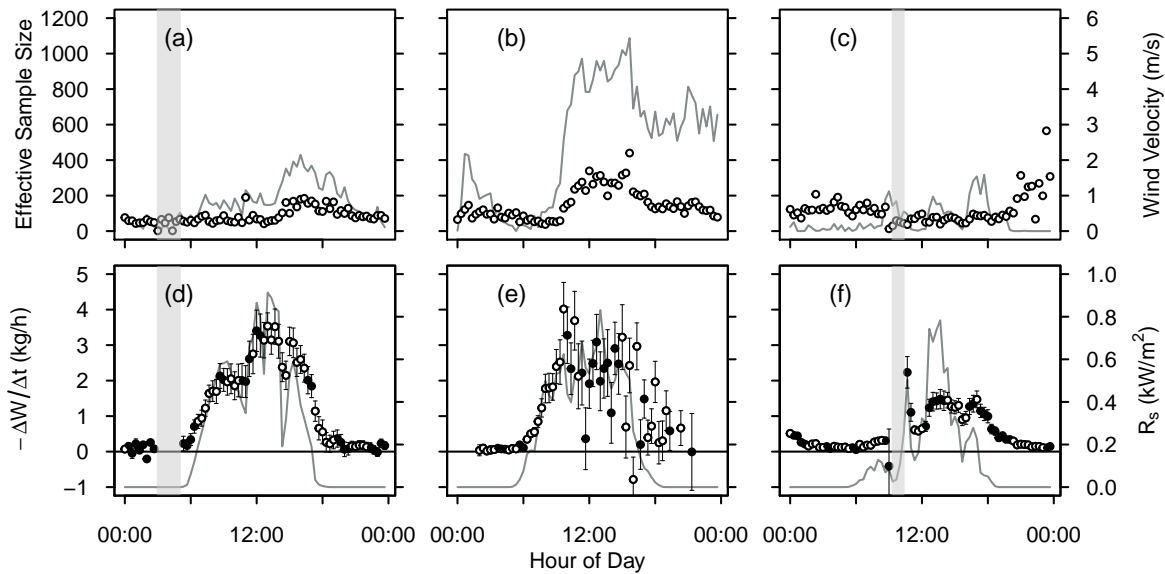


図 2.9 (a-c):有効標本数 (N_{eff} , 白丸), 風速 (灰線), (d-f):重量変化 ($-\Delta W/\Delta t$, 丸), 日射量 (R_s , 灰線) の日変化. (d-f) の黒丸は正規分布から逸脱したデータを表わす. (d-f) の誤差棒は 2 標準誤差を表わす. (a,d) の影部は灌水, (c,f) の影部は降雨を表わす. 計測日は (a,d) が 2010 年 8 月 30 日, (b,e) が 2012 年 5 月 1 日, (c,f) が 2011 年 8 月 19 日である.

2.4.2 日蒸散量と環境条件の季節変化, 月別水収支

環境条件と日蒸散量の計測結果

2010 年 8 月から 2012 年 9 月までの日単位環境条件の計測結果を図 2.10 に示す. 2010 年の夏は全国的に猛暑かつ乾燥の厳しい年であり, 気象庁の発表では過去 113 年間で最も気温が高い夏だった [84]. また, 東京管区気象台の発表によると 2010 年夏季の無降水継続日数は, 1968 年の観測開始以来, 史上 2 番目の長さであった [85]. 本研究の実験サイトにおいても 2010 年の 8 月下旬から 9 月上旬が, 計測期間中最も暑く乾燥した期間だった. 日最高気温は 38°C , 大気飽差の最大値は 4.5kPa に達した. 2010 年の最大無降水継続日数は 8 月 21 日から 9 月 7 日までの 18 日間だった.

成長期にはほぼ毎日, 一日あたり約 $30\text{-}50\text{kg m}^{-2}(\text{soil})$ の灌水を行った. これは蒸散による水損失を十分埋め合わせる量であった. ただし前述の通り, 計測期間中に数回, 灌水停止実験を行っている. Rodriguez-Iturbe & Porporato (2007) によれば, 典型的には植物は土壌水ポテンシャル ψ が -0.03MPa 程度に減少した段階で気孔を閉鎖をはじめ, -3MPa に達するまでにはほぼ完全に気孔を閉鎖する [83]. 本研究の計測結果では, 灌水停止期間以外では $5\text{-}45\text{cm}$ の平均含水率 θ は $36.6\%\text{Vol.}(\psi = -0.03\text{MPa})$ 以上の値を常

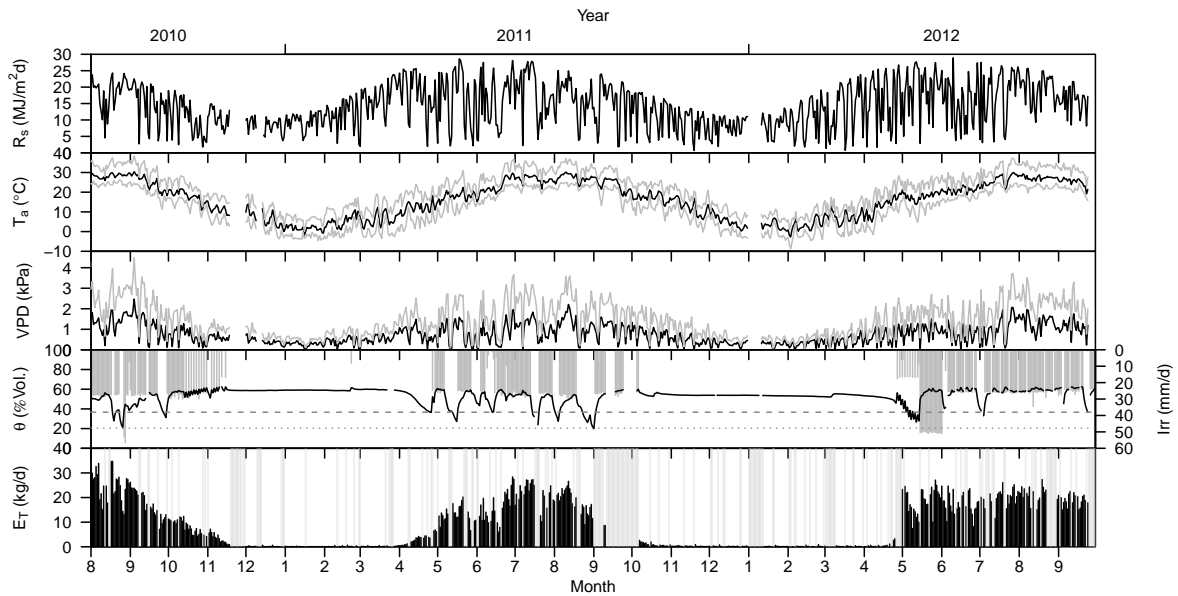


図 2.10 全計測期間における日単位での環境条件と日蒸散量。上から順に、日積算日射量 R_s 、日平均（黒線）、日最高・最低（灰線）気温、日中平均（黒線）、日最高（灰線）大気飽差 D 、深さ 5,15,25,35,45cm 地点の含水率 θ の算術平均値（黒線）、灌水量 Irr （灰棒）、日積算単木蒸散量 E_T である。含水率グラフ中の破線・点線は $\theta=36.6\%$ & 24.4% の値（それぞれ $\psi=-0.03$ & -3.0MPa に相当）である。蒸散量 E_T グラフ中の影部は欠測または破棄された日を表す。

に保っていた。また、2010年8月26日において、平均土壌 ψ は -2.5MPa を下回ったが、この日の E_T は 14.4kg d^{-1} を保っていた。このとき、35, 45cm 深さ地点の ψ はそれぞれ $-1.92, -0.72\text{MPa}$ であった（データ略）。

日単位の E_T を図 2.10 の下段に示す。 E_T は 2010 年の 8 月中旬では 35kg d^{-1} に達したが、2011 年と 2012 年では、最大 E_T はそれぞれ 28.4 と 27.1kg d^{-1} であった。図 2.10 から E_T の季節変化は明瞭であるが、 E_T が始まる時期と止まる時期（展葉・落葉時期）は年によって異なっていた。2010 年では 11 月中旬に、2011 年では 10 月上旬に E_T はほぼゼロになっていたが、9 月以降の気象条件は 2010, 2011 年間で大きな違いは見られなかった。展葉時期については、2011 年では 4 月中旬に E_T が検出され徐々に増大していったのに対し、2012 年では 4 月下旬から 5 月上旬の範囲で、急激に増大していた。2011 年、2012 年とも E_T が正の値を示すと同時に土壌体積含水率 θ も減少し始めていたことから、図 2.10 の展葉時期における E_T の結果は、ライシメーター測定や蒸散量推定の誤差ではなく、年によって蒸散が開始した（展葉した）時期が実際に異なっていたものと考えられる。

月別水収支の計測結果

項目別の月別水収支結果および E_T の充足率を図 2.11 に示す。前述の通り、破棄された、あるいは計測されなかった期間の補間を行っていないため、2011 年 9 月に大きなインバランスが生じた。成長期において、 Irr に対する Available E_T （計測され、破棄されなかった E_T ）の比は 32-123% で、平均値は 69% であった。灌水を人為的に管理していたため、この比には明瞭な季節変化は見られなかった。2010 年 10 月と 2012 年 5 月において、 Irr の大半は Dr として流出しており、またこの期間中の土壌含水率 θ は 60%Vol. に保たれていたことから、この値を計測対象土壌の圃場容水量とみなすことができる。2010, 2011 年において、月別の Available E_T は 8 月に最大に達し、それぞれ 706 kg と 406 kg であった。灌水停止実験は両方の期間で行っており、また土壌貯留量 ΔS は大きくは異ならない（2010 年 8 月では 89kg, 2011 年 8 月では 103kg）ことから、この経年年変化は気象条件の違いと、供試木の生物的特性の変化によるものと判断できる。

水収支結果の考察

もし仮に、熱環境調整効果を最大化するためにケヤキ供試木の蒸散量を最大に保ちたいと考えた場合、圃場容水量が 60%Vol. であることと、ケヤキが典型的な植物同様に $\psi = -0.03\text{MPa}$ ($\theta = 36.6\%\text{Vol.}$) で気孔を閉鎖し始めることを仮定すると、ケヤキは最大で $500 \text{ kg container}^{-1} \times (60.0 - 36.6) \%\text{Vol.} = 117 \text{ kg}$ の水を利用できることになる。図 2.10 では成長期の晴天日における水消費量は $25\text{-}30\text{kg}^{-1}$ であったため、もし仮に灌水を完全に停止したとすると、ケヤキは長くとも 4-5 日程度の間には最大利用可能水分量 117 kg を使い果たす計算になる。前述の通り、本研究で用いたコンテナは日本の街路樹の一般的な基準とほぼ同じ容積であるため、この概算結果は、灌水されていない日本の街路樹は頻繁な乾燥ストレスを受けているということを示唆するものであり、また植物生態学分野の既往研究の報告と合致していると言える。

日本の森林を対象とした既往研究ではしばしば、土壌の浅い層における含水率の変化が E_T に与える影響は無視できるとみなされる (e.g., Kosugi et al., 2007 [86]; Kumagai et al., 2008 [87])。これは森林においては、根が深い土層まで達しているために大きな水容量が確保できること (Zhang et al., 2001 [88]) と、地下水帯からの水供給が受けられることが理由である。本研究のケヤキ供試木を対象とした概算からは、日本の街路樹において土壌水分変化の影響を無視することは、降雨中や降雨後の数日程度は妥当な可能性があるが、長くとも 4-5 日の晴天が続いた後では E_T を過大評価する可能性が高いことが示唆される。

陸面過程の熱・水収支予測において根の鉛直分布を考慮することの重要性は、水文・気象学分野ではよく知られていた [89]。しかし同時に、コンテナなどの土壌容積が狭い条件

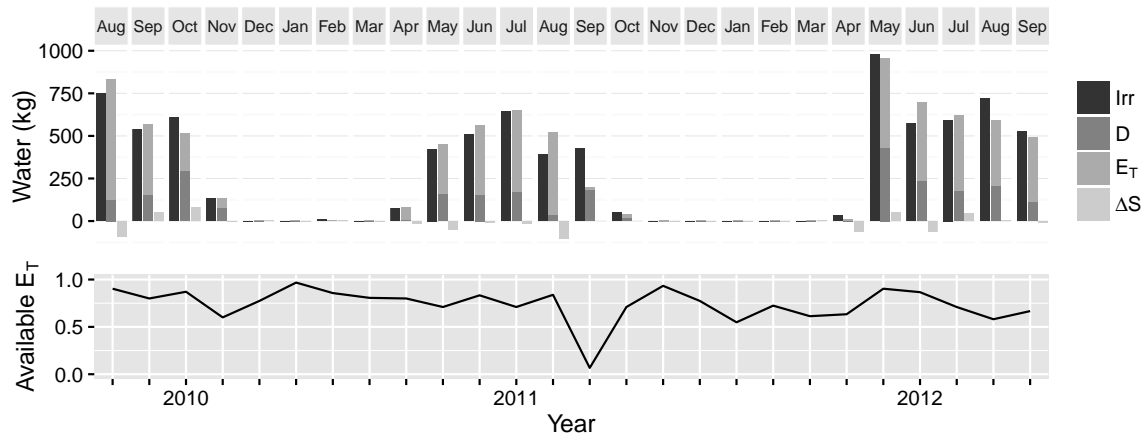


図 2.11 月別水収支。灌水量 Irr ，排水量 D_r ，単木蒸散量 E_T ，貯留変化 ΔS である。
Available E_T は欠測や破棄されなかったデータの割合。

に植えられた樹木では，自然条件に比べて根の空間分布が一様化しやすいことも知られていた (e.g., Gilman and Masters, 2010 [90]). 本研究の計測結果では，2010 年 8 月 26 日の計測において土壌の平均 ψ は所謂永久しおれ点 (-1.5MPa) を下回っていたが， E_T は灌水日の約 50% 程度の値を維持していた (図 2.10 および浅輪ら (2012 [70]) を参照). この結果は，サイズの小さな本研究のコンテナ (0.5m^3 & 深さ 50cm) においても，土壌乾燥ストレスの影響を踏まえて蒸散を予測する上では根の鉛直分布を考慮する必要があることを示している。

2.4.3 日蒸散量と気象条件の関係

結果

植生フラックス研究では，飽差と日射量の 2 つが蒸散の主要な駆動力であることが一般に知られているが，これらの相対的な重要性は剥離率 (decoupling coefficient) ^{*9}によって変わることが知られる [10] [17]. したがってここでは，日単位の E_T と大気蒸発駆動力 (日積算日射量 R_s ，日中の平均大気飽差 D ，風速) の関係を分析した (図 2.12). 全計測期間を通して見ると E_T と D の間に最も強い相関が確認された ($R=0.80$) が，対象を日平均気温 T_a が 20°C 以上の温暖期に限定すると， D と R_s の相関係数は同じになった ($R=0.63$). 風速の E_T に対する影響は明瞭でなかった ($R=0.21$). 2011 年と 2012 年において E_T は D に対して非線形的に変化していると考えられるため，複数の線形回帰モデル

^{*9} 剥離率 Ω は g_s , g_{bl} , 乾湿計定数から計算される指標であり，蒸散量変化に対する気孔コンダクタンスの寄与度を表す ($dE/E = (1 - \Omega)dg_s/g_s$) と同時に，平衡蒸発量 E_{eq} と強制蒸発量 E_i の比でもある ($E = \Omega E_{eq} + (1 - \Omega)E_i$). 移流のない湿潤面における蒸発量が E_{eq} であるため， Ω は移流の影響力の指標ともみなせる。

を用いて E_T の D と R_s の変化に対する応答（直線回帰モデル $E_T = \beta_i D$ or $E_T = \beta_i R_s$ における β_i ）の年ごとの変化および D への非線形性（ $E_T = \alpha + \beta \ln D$ ）を分析した。結果を表 2.2 に示す。赤池情報量基準（以下、AIC）は、経年変化を考慮した対数飽差モデル（ $E_T = \alpha_i + \beta_i \ln D$ ）で最小となった。このモデルの予測結果と 95% 信頼区間を図 2.13 に示す。切片（ α ; $D=1\text{kPa}$ における E_T ）は年が経つにつれ増大していた（表 2.2）。対数飽差モデルの傾き β の標準誤差は大きいですが、 β_{2010} は 2011 年、2012 年よりも明らかに大きく、またその標準誤差の範囲は重なっていなかった（表 2.2）。対数飽差モデルが予測した 2011 年、2012 年の E_T 平均値は、 $D > 1.3\text{kPa}$ の範囲では殆ど重なっていた。

考察

針葉樹において風速は E_T に殆ど影響を及ぼさないことは植生フラックス研究者の間では非常によく知られていたが、この傾向は広葉樹においては必ずしも常に当てはまるわけではないことも指摘されていた（cf., 小松, 2003 のレビュー [91]）。本研究の供試木であるケヤキは広葉樹であるが、風速の影響は明瞭でなかった（図 2.12c）。この結果はケヤキの剥離率が小さく強制蒸発に近い状態であったこと、すなわち、 g_{bl} が小さく、葉温が気温に近く、 E_T が主に気孔によって制御されていたことを示唆する。これは供試木が孤立条件に置かれていたことが原因と考えられる。

全計測期間を通して見た際の、 E_T — D の強い相関と E_T — R_s の弱い相関の差異は、フェノロジー（植物季節）の違い、つまり、着葉期間の違いによるものと考えられる。 $T_a < 20^\circ\text{C}$ 以下の日は概ね、落葉期に対応している（図 2.10 の $E_T \sim 0$ の期間）。季節変化において、日射は気温に対して数か月先行して変化するため、 R_s は $T_a < 20^\circ\text{C}$ 以下の日においても大きな値を取り得る。しかし、大気飽差 D は直接 T_a を用いて計算されるために、 T_a が低い条件では必ず小さな値を取る。つまり、全計測期間を通じた季節変化で見ると、 D — T_a —葉面積— E_T の間で相関が存在していると考えられる。全計測期間を通して見た際の E_T — D の強い相関（図 2.12）は、 D が水蒸気拡散の駆動力として働いたことだけによる結果ではなく、交絡要因として、葉面積の影響があった可能性が考えられる。

図 2.6 に示した通り、供試木の葉面積は 2010 年から 2012 年で顕著に増大したが、 E_T は増大していなかった（図 2.10）。原因の一つは 2010 年夏季に D が最大値を取っていたためである。また、葉の相互被陰の影響から、日向面の葉面積が大きくなることは変化していなかったという可能性も考えられる。更に第 3 の可能性として、小さなコンテナ土壌容積が根系の発達を阻害したために、増大した葉面積によって増えた蒸発要求量を賄い切れるほどには水供給能力が発達しなかった影響もありうると思われる。図 2.14 に、蒸散計測を行った供試木とほぼ同サイズのケヤキの根の分布を示す。根長密度などの定量的な計測は行わなかったが、コンテナの側面・底面まで根が広がっている様子は見て取れる。 E_T — D の非線形的な応答およびその経年変化（図 2.13）は、Oren et al. (1999) の発見

に対応するものと解釈できる。Oren et al. (1999) は膨大な数の蒸散計測研究のレビューを基に、広範な植物種・スケールにおいて g_s の D 応答には一定の関係性が成り立つことを示している [92]。Oren et al. (1999) によれば、 D が小さな条件において大きな g_s を持つ（したがって大きな E_T を示す）植物個体は、水供給の制約から、 D の増大に対してより鋭敏に反応する傾向があるという。この傾向は本研究の供試木においても成り立っていた（図 2.13）。図 2.13 からは、高 VPD 条件において 2010 年のケヤキ供試木が、2011, 2012 年よりも多量の蒸散を行っていたと言える。この原因として、「葉面積が増大した 2012 年に蒸散量が低下した」と考えた場合には、クチクラ蒸散に対する気孔応答やキャビテーションによる通水コンダクタンスの減少によって部分的に説明ができる（付録 A を参照）。しかし、葉面積が大きくは違わなかった 2010 年と 2011 年の特性の違いについては、明確な原因はわからなかった。

温暖期 ($T_a > 20^\circ\text{C}$) において、水平面で計測された R_s に対して E_T が線形的に変化していたこと（図 2.12b）は興味深い。一般的には、 g_s は強い PAR に対して飽和することが知られる [19]。また、密な植生キャノピーの蒸散量が入力放射エネルギー (R_s または正味放射量 R_n) に対してほぼ線形的に増大することも広く認められた事実であるが、これは密な植生における蒸散が平衡蒸発量、つまり移流のない湿潤面の蒸発でよく近似できるという事実に基づいている [17]。しかし、本研究の供試木のケヤキは孤立環境にあり、平衡蒸発からは程遠い条件であった。本研究の結果と類似した計測結果は、Pereira et al. (2007) によっても報告されている [93]。Pereira et al. (2007) は、様々な LAI の対象を範囲とした灌水された果樹および孤立環境にあったクルミの木の E_T が、芝生の上で計測された R_n を Priestley & Taylor 式 [94] に対して用いることで、精度よく予測できたと報告している。この E_T と水平面で計測された放射量の線形的な関係性は、一部は葉の相互非陰と g_s の PAR に対する飽和型の応答の相互作用の結果 (Sellers, 1985 [95]) として説明できる可能性がある。ただし、この相互作用による線形化は針葉樹のような LAI の大きなキャノピーで特に顕著とされている [95]。本研究のケヤキ供試木の LAI は小さく (2010 年 9 月時点では 2.1)、また Pereira et al. (2007) の結果は LAI に対して明瞭な依存性は見られていない。未だ検討されていない可能性の一つとしては、孤立樹木に対する三次元的な放射伝達が影響した可能性が挙げられる。

2.4.4 蒸散特性の経年変化

結果

図 2.15 に E_T 位置変化パターンの経年変化を示す。根の吸水量 E_T' を検討するため、2010 年 8 月 18 日（図 2.15a & c）と 2012 年 7 月 4 日（図 2.15b & d）を選定した。これらの日は、灌水停止期間中かつ平均含水率 θ が圃場容水量以下の値となった条件であ

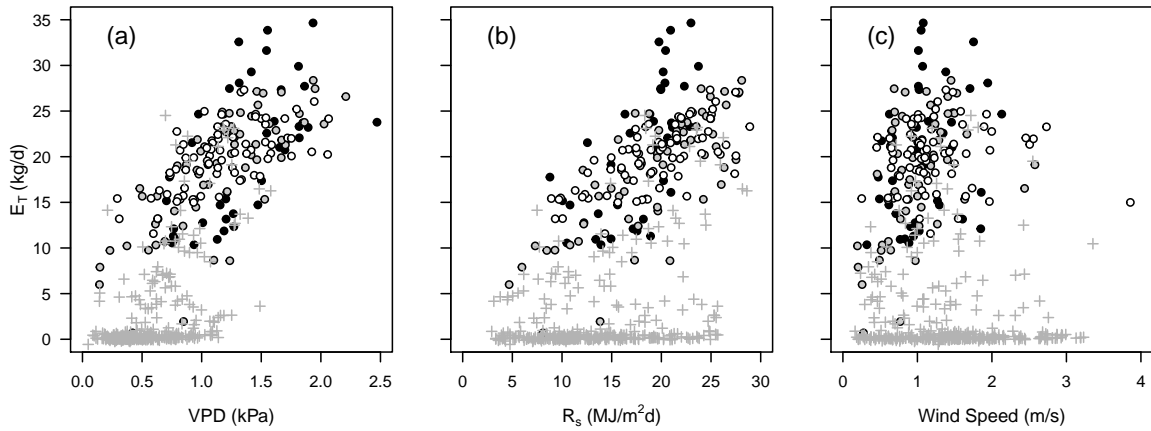


図 2.12 日単位蒸散量 E_T の気象条件に対する応答. 横軸はそれぞれ (a) 日中平均大気飽差 D , (b) 日積算日射量 R_s , (c) 日中平均風速である. 丸は日平均気温 $T_a > 20^\circ\text{C}$ の温暖日のデータであり, 黒丸は 2010 年, 灰丸は 2011 年, 白丸は 2012 年のデータ. 十字は日平均気温 $T_a < 20^\circ\text{C}$ のデータを表す. 全てのデータは灌水日 (平均 $\psi > 0.03\text{MPa}$) のもの.

表 2.2 図 2.12 の温暖日を対象とした日蒸散量 E_T [kg d^{-1}] の線形回帰モデルのパラメータ一覧. 説明変数は日積算日射量 R_s [MJ d^{-1}] または日中平均大気飽差 D [kPa] である. 誤差は 1 標準誤差.

Equation	Coeff							R^2	AIC
	β	β_{2010}	β_{2011}	β_{2012}	α_{2010}	α_{2011}	α_{2012}		
$E_T = \beta R_s$	1.01 ± 0.02							0.952	1059
$E_T = \beta_i R_s$		1.15 ± 0.04	0.95 ± 0.04	1.00 ± 0.02				0.957	1044
$E_T = \beta D$	15.4 ± 0.3							0.936	1112
$E_T = \beta_i D$		17.3 ± 0.7	16.8 ± 0.7	16.0 ± 0.5				0.937	1113
$E_T = \alpha_i + \beta_i \ln D$		13.9 ± 2.0	8.4 ± 2.2	6.1 ± 2.4	16.9 ± 0.8	18.3 ± 0.5	19.4 ± 0.5	0.960	1034

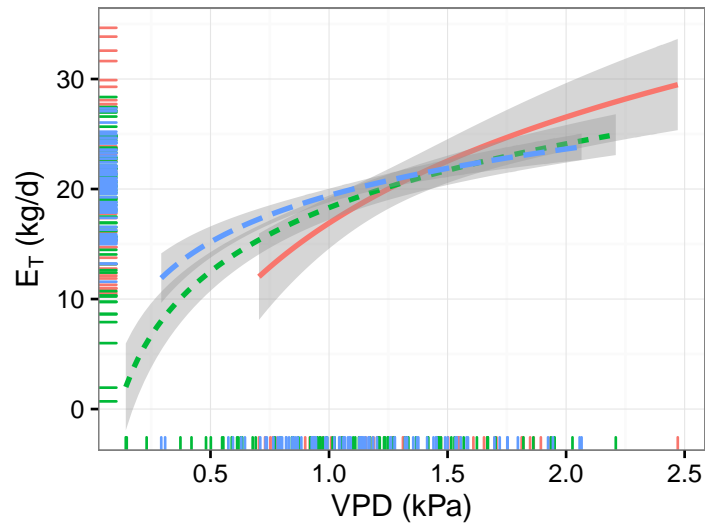


図 2.13 温暖期の E_T に対する対数変換 D の回帰モデルの予測結果。赤線が 2010 年，緑線が 2011 年，青線が 2012 年である。



図 2.14 蒸散計測を行ったケヤキ供試木と同サイズのコンテナ，かつ，ほぼ同サイズのケヤキの根分布（2012 年 9 月）。

り，すなわち， I_{rr} と D が無視でき，式 2.4 において土壌含水率の変化 ($-d\theta/dt$) が E_T' の近似とみなし得る条件であった（両日において，日平均 $\psi = -0.09\text{MPa}$ ）。日積算 R_s は両日でほぼ等しかったが (24.3 & 23.6 MJ d^{-1})， E_T と大気飽差の最大値は大きく異なっていた。全ての変数 ($E_T, -\Delta\theta/\Delta t, R_s$ & D) が 12:00-15:00 に最大値を取っていたが，2012 年の E_T のみ，二峰性の変化を示していた（図 2.15b）。 $R_s, D, -\Delta\theta/\Delta t$ の E_T に対する相互相関係数を図 2.16 に示す。2010 年 8 月 18 日では， E_T は大気飽差より 20 分早くピークに達しており， R_s と $-\Delta\theta/\Delta t$ とのタイムラグは見られなかった（図

2.16a). しかし, 2012年7月4日では, E_T は $-\Delta\theta/\Delta t$ に約40分先行し, D と同時にピークに達していた. R_s に対しては約80分の遅れがあった (図 2.16b). R_s, D の E_T との相互相関係数は2010年より2012年の方が小さかった.

考察

図 2.15 からは, 供試木は日単位においてだけでなく, 日変化においても蒸散による水消費に対して保守的な特性を示すようになっていたと判断できる. また, 図 2.16b に示された根から葉までの約40分の水輸送の遅れがこの変化に影響していた可能性があると言える. これらの結果は根系が十分に発達しなかったという前述の仮説を支持するものである. 何故なら, 単木全体の水供給能力が増大しなかったとすれば, 葉面積の増大は単位葉面積あたりの水供給速度の低下を意味するからであり, 更に, 2012年において E_T の日変化が二峰性となった (日中低下していた) ことは, 葉面積あたりの蒸散量が減ったために葉温・葉面飽差が増大し, 2010年より強い乾燥ストレスを受けていたことの結果と解釈できるためである.

根から葉までの水輸送時間は, g_s モデルのパラメタリゼーションの際に特に重要である. g_s は蒸散量と飽差の計測値から計算されるために, 両者にタイムラグがある場合には g_s の気象条件への応答特性だけでなく, 最大気孔コンダクタンスの推定値にもバイアスが生じうるためである. このタイムラグの問題は, 樹高10-20m程度の高木については, 既往研究でも指摘されていた [53][54]. 本研究のケヤキ供試木は樹高6.4mと比較的小さく, また太い道管を持つ環孔材樹種であったが, 2012年において蒸散と根の吸水との間に約40分の時間遅れが確認された (図 2.16b). したがって, 水輸送の定常性を仮定した g_s モデル (e.g., Buckley et al., 2003 [96]) を用いて数十分単位 of フラックス変化を議論することは, 大きな誤差を生じる可能性が示唆される.

2.5 まとめ

本章では, 都市緑化樹木においてどのような生物的・非生物的要因が蒸散量を決定しているのかを明らかにすることを目的として, ライシメーター法によって高木の長期計測を行う際のデータ分析・品質管理方法を提案した上で, 孤立環境にあるコンテナ植栽のケヤキを対象に2010-2012年の長期連続計測を分析した. 重量計によって蒸散量及びその誤差を推定する際には, 系列自己相関の考慮が必要であることを示し, また本研究で使ったライシメーターが2年間の計測に耐える十分な精度を保っていたことを示した. 本章の目的に対する結論は以下ようになる.

- 日蒸散量と大気の蒸発駆動力の関係においては, 飽差が最も重要であり, 風速の明

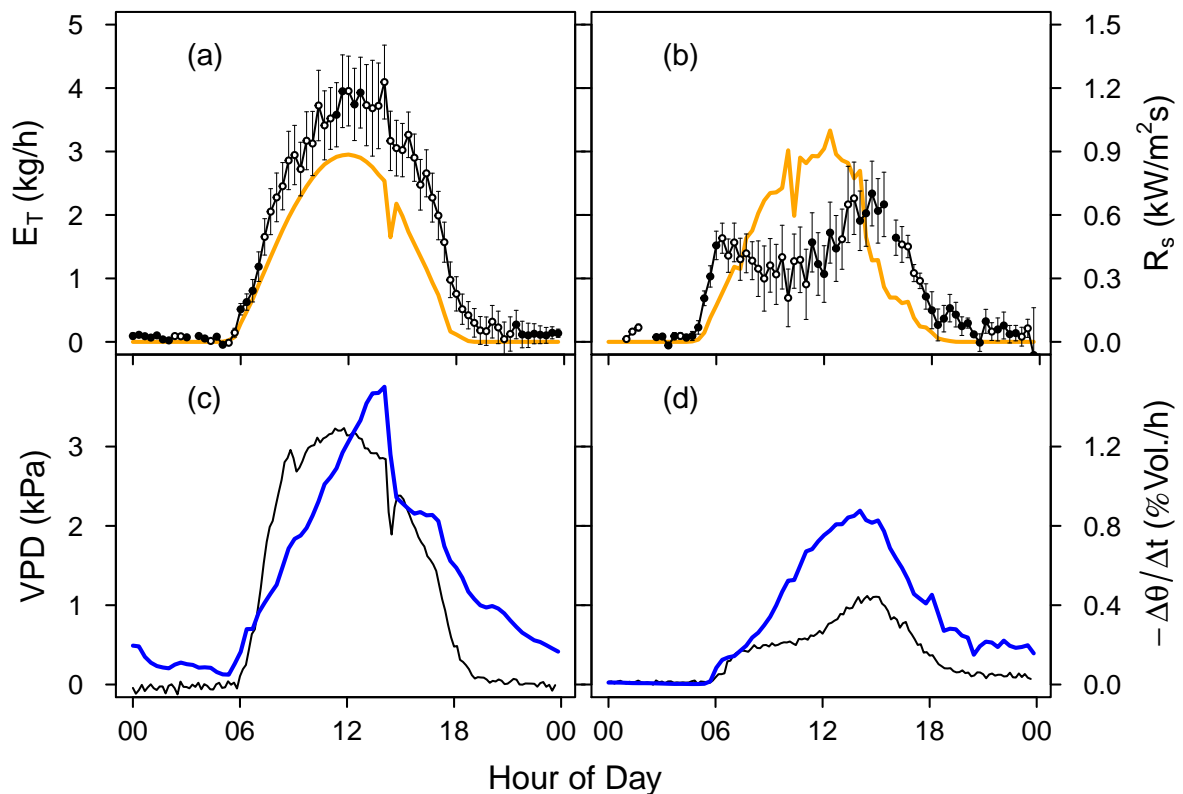


図 2.15 (a,b) 単木蒸散量 E_T :丸, 日射量 R_s :橙線, (c,d) 大気飽差 D :青線, 含水率変化 θ :黒線. 誤差棒は 2 標準誤差, 黒丸は正規性からの逸脱を示す. (a,c) は 2010 年 8 月 18 日, (b,d) は 2012 年 7 月 4 日.

瞭な影響は確認されなかった. 孤立樹木の蒸散量を予測する場合, 風速の相対的重要性は低いと考えられる.

- 温暖期の日蒸散量と水平面で計測された日射量の関係からは, 樹冠内放射伝達の三次元性の影響が考察された.
- 生物的要因について, 2010 年と 2012 年で葉面積は増大していたが, 日蒸散量は増大していなかった. この原因として, 葉の相互被陰の影響で日向の葉面積が顕著に増大しなかった可能性と, 狭いコンテナによって根が成長できなかった可能性が考察された. 街路樹のような土壌容積が制限された条件において葉面積は蒸散量を決定する唯一最大の要因ではなく, 葉面積と根面積のバランスによって決定されることが示唆された.
- 水収支の分析から, 灌水されていない街路樹において土壌乾燥ストレスの影響を無視することは, 長くとも 4-5 日程度晴天が続いた後の条件では蒸散量の過大評価を招く可能性が高いと考察された. これは日本の森林の蒸散特性とは大きく異なる特性と考えられる. また, 土壌水分を考慮する際には, 本研究のコンテナサイズ (0.5m³ & 深さ 50cm) においても根の鉛直分布の考慮が必要であることが分

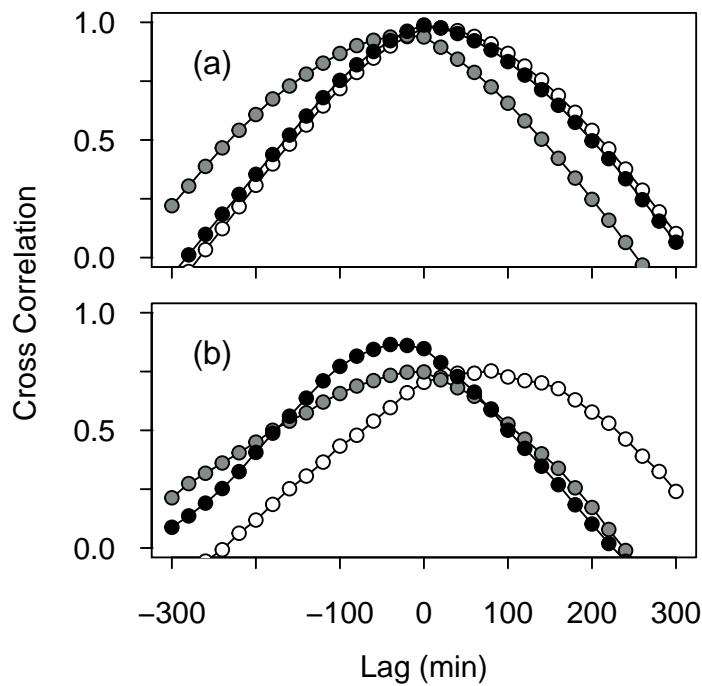


図 2.16 図 2.15 における単木蒸散量 E_T の、日射量（白丸）、大気飽差（灰丸）、土壌含水率変化（黒丸）に対する相互相関係数。(a) は 2010 年 8 月 18 日、(b) は 2012 年 7 月 4 日。

かった。

- 2012 年において蒸散量と根の吸水に時間遅れが見られたことから、樹高 6-7m 程度の樹木においても、定常性を前提とした気孔コンダクタンスモデルを使用して数十分単位のフラックス変化を議論することは問題がある可能性が示唆された。

第3章

複数樹種の計測に基づく単木蒸散能力と形態的・生理的特徴の関係分析

3.1 はじめに

第1章では、既往研究を基に以下の点を指摘した。

- 気孔コンダクタンス (g_s) モデルはパラメタリゼーションに依存せざるを得ない。
- 植生タイプごとの生理特性の違いによって最大 g_s は3倍以上異なる (図 1.3)。
- 都市緑化樹木については計測データそのものが極めて少ない。

更に、第2章では孤立環境にあるコンテナ植栽のケヤキの計測結果から、都市緑化樹木は森林とは異なる蒸散特性を持つとの結論を得た。

水文・気象学分野では、気孔コンダクタンスや可能蒸発量比^{*1}といった指標を利用して、葉齢や樹形などの樹木の特徴に基づいたパラメータの比較分類が行われている。熱環境調整や灌水計画のための蒸散予測においても、どのような樹種を植えればいいのかという判断基準として樹木の特徴による分類は有用な可能性があるが、都市緑化樹木に対しては(計測データそのものが少ないという問題があったため)、単木スケールでの蒸散能力の算定・比較は殆ど行われてこなかった。また、孤立環境や土壌の制限という都市特有の条件下において、森林や農地で得られている知見が利用可能か否かも明らかではない。

本章では、同じタイプの都市緑化樹木(孤立環境にある容積 0.5m^3 のコンテナ植栽)において、生物的要因の違いによって単木の最大蒸散能力がどの程度異なるか、また違いがあるとすればその違いは予測可能であるか否かを明らかにすることを目的とする。より具

^{*1} *Potential Evaporation Ratio*; 平衡蒸発量や Penman 式 [97], Priestley & Taylor 式 [94] などを可能蒸発量とみなして、その何割程度の蒸発散が生じたかを示した値 [16].

体的には、可能蒸発量比を用いて日単位の蒸散能力を評価し、既往研究の温帯広葉樹林の値も含めて比較分析する。更に、樹木の形態的・生理的特徴と蒸散能力の関係を明らかにする。そのために、第2章で用いた（長期計測を目的とした）重量計測手法に加え、短期間での複数個体の計測を可能とする吊り下げ式重量計測法を新たに開発し、11樹種を対象に実験圃場において単木蒸散量の計測を行った。

前提とする想定範囲

本章では土壌容積を 0.5m^3 で統一した供試木（幹径約 10cm）を対象としているが、一般に地上部（葉面積・幹径）と根の成長には相関があるため、本研究の結果はこのサイズの都市緑化樹木の蒸散能力の目安になり得るものと考えられる。したがって、この条件内においては熱流体シミュレーションあるいは CASBEE-HI などによる屋外熱環境評価の検証にも応用できるものと考えられる。

また、本章では夏季晴天・灌水日の計測結果を報告する。ここでは、

- 舗装や植栽升によって土壌容積が制限された条件。
- 街路樹や庭木のような孤立環境にあり風や日射の影響を受けやすい条件。
- 十分に灌水された条件。

を想定対象としているが、この結果は実際の都市において既に灌水されている樹木だけでなく、現状で水不足の状態にある樹木を適切に管理した場合に期待される効果を検討する上でも有用な知見を提供するものである。

3.2 蒸散予測に利用しうる樹木の特徴に関する理論的・経験的知見の整理

まず、「予測に利用しうる」という言葉の意味を具体化しておく。本研究の立場は、小松ら (2005) の注3 で述べられている考え方と基本的に同様である。以下に引用する [13]。

森林の特徴の記述にあたって、とりあげる特徴は目にみえる（ないし、ごく簡単に計測できる）ものの範囲にとどめるのがよい、と筆者らは考えている。これは以下の二つの理由からである。第一に、今の目標は、詳細な計測をしなくても、森林の蒸発散量を議論できるようにするところにあることである。第二に、目にみえない（ないし、簡単には計測できない）特徴を用いると、詳細な計測をしないと森林の蒸発散の議論ができない、ということになってしまうことである。

このことを踏まえた上で、筆者が都市緑化樹木の蒸散予測に利用可能であると考える樹木

の特徴をそのメカニズムと併せてまとめると、以下のようになる。

1. 葉面積を表す指標（LAD/LAI/樹冠投影面積/幹径）—蒸発面積
2. 葉の大きさ—境界層コンダクタンス
3. 幹径，道管種—通水コンダクタンス
4. 葉齢—光合成能力
5. 樹高—*メカニズムは不明，経験的關係

葉面積を表す指標

第1章では必ずしも最大の影響要因ではないと述べたが，基本的には葉面積の大きさは蒸発面積の大きさに直結するため，森林や農地においては葉面積が増えるほど蒸散量は増大することが知られる（図 1.3）。葉面積の増加に対して飽和するのは，葉の相互非陰のためである。三次元情報である LAD が最も高精度な指標だが，応用的な観点から言えば簡単に計測できる指標の方が好ましい。幹径は葉面積の指標ではないが，水の消費器官と供給器官の關係にあるので，概ね対応關係があることが古くから知られる (Huber, 1928 [98]; Sinozaki et al., 1964 [99])。

葉の大きさ

葉が小さいほど葉面境界層が発達しづらくなるため，蒸散には有利に働く。既往の植生フラックス研究では，葉面境界層コンダクタンスの式として伝熱工学分野の知見（多くは風洞実験）を基にした無次元量に基づく実験式を利用する機会が多い*2。特性長さとしては葉の幅が用いられる。以下に，強制対流での長方形平板の実験式および空気中の水蒸気拡散（式 2.1）に関する式を示す [7][10]。

$$Nu = 0.66Re^{1/2}Pr^{1/3} \quad (3.1)$$

$$g_{bl} = 0.147\sqrt{\frac{u}{d}} \quad (3.2)$$

ここで， Nu :ヌセルト数， Re :レイノルズ数， Pr :プラントル数， u :風速 [m s^{-1}]， d :特性長さ（葉幅）[m]である。楕円形の特性長さ d は長方形平板の 0.7 倍程度となることが知られており，葉の形状を楕円板と近似して計算する場合も多い。また，野外環境を想定した計算では，乱流の影響を考慮するために式 3.1, 3.2 に 1-2 程度の係数をかける場合も多い。本研究でも葉の形状は楕円と近似し，乱流の補正には典型値 [7] の 1.4 倍を用いた。

*2 興味を持たれた読者は，Schuepp, 1993; Vogel, 2008; Maes & Steppe, 2012; Defraeye et al., 2013 のレビュー [100]-[103] を参照されたい。

植物種ごとに葉の大きさは概ね一定の値をとるため予測には利用しやすいと考えられる。ただし、第1章で示した通り、本研究の対象である孤立環境下の高木では境界層コンダクタンスの影響力は小さく、明瞭な影響は見られなかった（結果略）。

幹径，道管種

幹が太いほど（正確には辺材面積が広いほど）、また道管が太く密度が高いほど、通水コンダクタンス^{*3}に優れるため蒸散量が増える。2.2.1項でも述べたが、道管種は3種に大別でき、環孔材（図2.4b-d）>散孔材（図2.4a, f-h）>仮道管の順に径が太い。道管密度では逆順になるため、単木スケールにおいてどの道管種の通水コンダクタンスが高いかは植物生理学分野においても比較的最近まで明らかではなかったが、近年の研究では環孔材樹種の通水性が特に優れるという結果が得られている（図3.1）。ただし図3.1は幹枝だけの通水性の比較結果であり、植物体全体の抵抗の中では、幹枝よりも根や葉内の方が（輸送距離の短さにも関わらず）抵抗が大きいことが知られている [51]。これは部位ごとの道管径の違いと、水輸送のメカニズムの違いによるものである^{*4}

葉齢

g_s と光合成能力、葉齢^{*5}と光合成能力（図3.2）の間にはそれぞれ相関がある [20]。気孔は光合成用の CO_2 を取り込むために開くものであるから g_s と光合成能力に相関があるのは当然である^{*6}。葉齢と光合成能力の相関は経験的事実としては1980年代から知られており (Chabot & Hicks, 1982 [104])、また理論的にも、「光合成能力が低い葉ほど、葉の生産に消費した炭素・窒素コストを償却するまでに長い時間を要するため、長い寿命を持つ（でなければ敢えて低い光合成能力という不利な形質を採用する理由がない）」というコストベネフィットの生態学理論 (Kikuzawa, 1991 [105]) によって合理的に説明される。

^{*3} 長さ数 mm 程度の道管要素の通水性はハーゲンポアズイユ式で計算できるが、道管要素同士は穿孔・壁孔で繋がっているため木部全体では多孔質材の特性を持つことが知られる [51]。

^{*4} アポプラスト（細胞間隙）では毛管力、シンプラスト（細胞壁を貫通する経路）では浸透圧によって輸送される。シンプラストの抵抗が特に大きいことが知られる [51]。死細胞である道管はアポプラスト、土壌から植物体内に水を取り込む際の細根表皮はシンプラストである。葉内の輸送（葉柄から孔辺細胞まで）は主にアポプラスト輸送と考えられているが、道管直径は葉内で最小になるため（ハーゲンポアズイユ式から予想されるように）距離の短さの割に通水抵抗は大きい。

^{*5} 典型的には常緑樹と落葉樹の違い。また、常緑樹でも1年で葉を付け替える樹種、数年かけて付け替える樹種の違いがある。

^{*6} 第3世代以降のLSMではこのタイプ (Ball-Berry-Leuning) の気孔コンダクタンスモデルが用いられている。

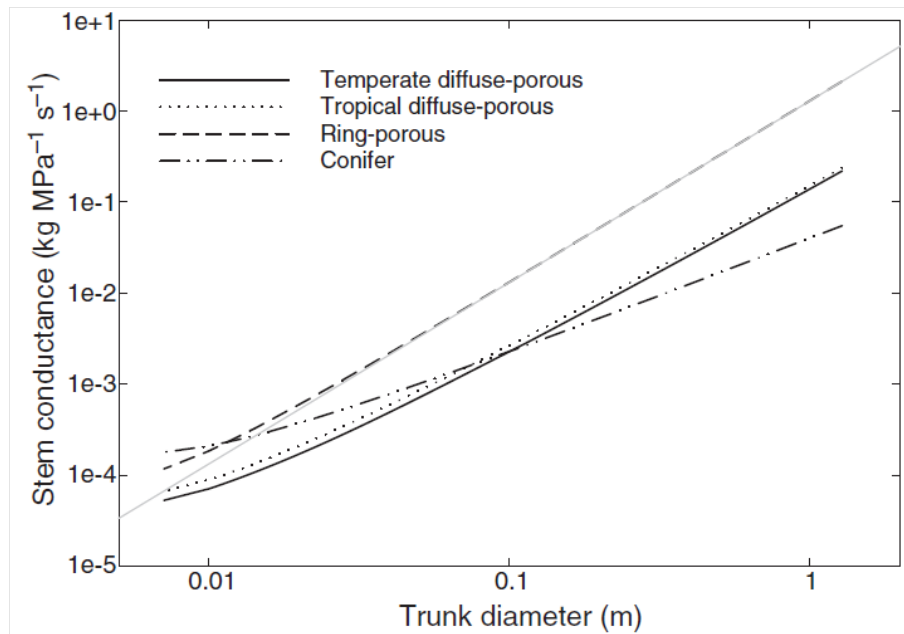


図 3.1 道管種別の単木スケールの幹通水コンダクタンス (McCulloh et al., 2010 [108])

樹高

高木においては、樹高が増すほど蒸散量が減る傾向が知られる (Novick et al., 2009 [106]). ただしそのメカニズムは未解明である (鍋島・石井, 2008 [107]). また、針葉樹においてこの傾向は正しいが、広葉樹においては当てはまらないという指摘もある [13].

本項で取り上げた樹木の特徴と蒸散量の関係は、樹高以外の要素については、生物物理学的なメカニズムが明確にわかっているので、これらは都市緑化樹木においても多かれ少なかれ影響している可能性が高い。しかし、単木というスケール、土壌容積の狭い孤立樹木という環境における各要因の影響力の大きさはわかっていない。したがって本研究でこれを調べる。

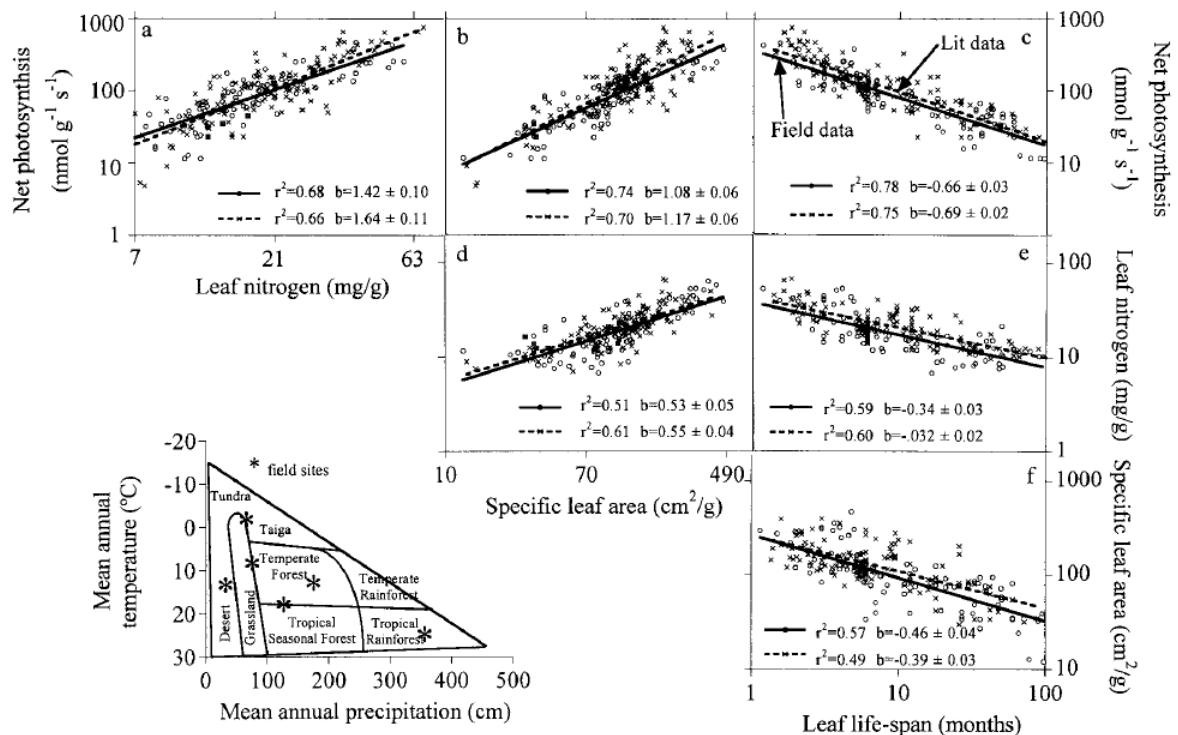


図 3.2 光合成能力，比葉面積，窒素含有量と葉齢の関係 (Reich et al., 1997 [109])

3.3 短期集中計測のための単木蒸散量の計測方法

3.3.1 要求条件の検討と吊り下げ式重量計の提案

複数樹種の計測・比較を行うために，以下の条件を考慮した。

1. 道管タイプの異なる樹種間で蒸散量の（時間変化のパターンなどではなく）絶対量を比較する場合，樹液流法の信頼性は低い [50]。また，環孔材樹種の Granier センサーによる計測は極めて困難とされる [48]。
2. 計測が長期に及ぶと気象条件・フェノロジーが変化してしまうため，可能な限り同一期間内に集中計測する。
3. 短期間に複数樹種を計測するためには，計測対象となる供試木（または測器）の移動・入れ替えの手間を極力減らす必要がある。
4. 土壌水分が少ない場合は樹種によらず蒸散が制限されるため，十分に灌水する。
5. 樹木の蒸散能力の比較が目的であるため，土壌蒸発は防ぐ。

上記 1 番の問題から，本章の検討においても，第 2 章と同様に大型重量計を用いることとした。ただし従来の台秤式では供試木の移動・載せ換えに重機が必要であったために，短

期集中計測を可能とするように手動操作可能な新たな重量計を開発した。

図 3.3 に本章で開発した吊り下げ式重量計の模式図を示す。鉄骨製の支持フレーム上の 3 点から S 字ビーム型ロードセル (U3S1-500K-NS, Minebea, Nagano, Japan; 秤量 500kg, 表示分解能 0.1g) 3 台とコンテナを設置した台座を連結し、レバーブロックを操作して吊り上げることで計測を行う。従来の台秤方式と比較して、着脱・持ち運びが容易なロードセル (本体重量 2.6kg) と手動操作のレバーブロックを用いることで、各試験体を移動させることなく計測が可能なのが特徴である。一方で欠点として風による計測値の振動が大きくなる点がある。同時に 3 個体ずつ計測が可能のように、重量計は計 3 台作成した。

コンテナ容積や土壌種などはケヤキのものと同じとした。供試木ごとの最大蒸散能力の把握という目的から、灌水は全て管理し、根への酸素供給を確保しつつ雨の侵入と土壌面からの蒸発を防ぐためコンテナ上部を天板で覆った。排水量は計測しなかったが、排水が日中の蒸散速度推定に影響しないように、ケヤキの実測結果より灌水開始から約 4 時間で排水が終わることを確認した上で、主に深夜に灌水を行うことで対処した。またケヤキ同様、途中灌水停止実験を行っていた期間以外では圃場容水量まで毎日灌水した状態で養生を行った。

3.3.2 供試木の概要

実測は 2012 年夏季を中心に、第 2 章と同じ実験圃場で行った。図 3.4 に圃場内と実測の様子を、図 3.5 に供試木の配置を示す。本研究では孤立環境と土壌容積の制限を想定するため、隣接樹木 (平均樹高 5.2m) の樹影が被らないように 4m 以上の間隔を取って配置した。

表 3.1 に供試木の形態的・生理的特徴と計測期間を示す。ケヤキ (*Zelkova serrata*), シラカシ (*Quercus myrsinifolia*), エゴノキ (*Styrax japonica*), ソメイヨシノ (*Cerasus × yedoensis*), イチョウ (*Ginkgo biloba*), コナラ (*Quercus serrata*), クスノキ (*Cinnamomum camphora*), ヤマボウシ (*Benthameidia japonica*), シデコブシ (*Magnolia stellata*), クヌギ (*Quercus acutissima*), コブシ (*Magnolia kobus*) の 11 種、各 1 本を対象とした。樹種の選択は、緑化樹種としての一般性を考慮した上で、既往研究で蒸散特性への影響が報告されている、葉への水供給能力を決める道管種、光合成速度・気孔開度と相関のある葉齢 (常緑・落葉) の影響を検討するために決定した。各供試木の投影面積やケヤキの葉面積等の樹木形状の計測には地上型レーザースキャナーを用い、投影面積は計測した点群データを基に樹冠外周上から 45° 間隔で 8 点選び計算した。なお供試木は計測開始前に各樹種 2 本ずつ用意して圃場内で養生させた後、生育の良かったものを選んだ。

大半の供試木は 2011 年から図 3.5 中の位置に配置していたが、シラカシだけは 2012

表 3.1 計測期間と供試木の形態的・生理的特徴

Species	Period	Projection [m ²]	Height [m]	Stem Dia. [cm]	Leaf Age [month]	Xylem
<i>Z.s</i> 2010 (ケヤキ)		5.5	6.4	10	12	Ring
<i>Z.s</i> 2012 (同上)		9.2	6.4	11		
<i>Q.m</i> 2012 (シラカシ)	29,July-9,Aug	3.3	5.5	10	36 (Ever Green)	Diffuse
<i>Q.m</i> 2013 (同上)	18-21,Aug	-		10		
<i>S.j</i> (エゴノキ)	29,July-9,Aug	6.6	4.4	9	12	Diffuse
<i>C.x y</i> (ソメイヨシノ)	1-8,Aug	7.8	5.5	10	12	Diffuse
<i>G.b</i> (イチヨウ)	10-22,Aug	4.5	5.4	10	12	Tracheid
<i>Q.s</i> (コナラ)	10-22,Aug	7.3	5.8	9	12	Ring
<i>C.c</i> (クスノキ)	12-23,Aug	3.6	4.7	9	12 (Ever Green)	Diffuse
<i>B.j</i> (ヤマボウシ)	24,Aug-5,Sep	6.9	4.5	9	12	Diffuse
<i>M.s</i> (シデコブシ)	24,Aug-5,Sep	1.5	3.0	5	12	Diffuse
<i>Q.a</i> (クヌギ)	24,Aug-5,Sep	7.5	6.7	8	12	Ring
<i>M.k</i> (コブシ)	5-26,Sep	6.1	4.1	8	12	Diffuse

年の実測前まで圃場中央部の植栽群内にあった。また第2章で述べた通り、ケヤキでは2010年と2012年で大幅な葉面積変化が見られた(表3.1)。この2樹種は蒸散特性にも変化が確認されたため、特性変化後のケヤキ2012年とシラカシ2013年も本章の分析対象とした。

図3.6に試験体重量と土壌含水率の計測結果を示す。灌水日では、供試木ごとに概ね一定した日重量変化や灌水直後の急激な重量の減少が見られ、圃場容水量まで十分に灌水されていることが分かる。なお乾燥ストレス応答を調べる目的から計測期間中に灌水停止実験を行っているが、本研究では灌水日のみを評価対象とし、雨天日(2012年8月3, 6, 11, 14, 18, 30日, 9月1, 2, 11, 15, 19, 20日)も対象外とした。

3.4 単木蒸散量と形態的・生理的特徴の関係分析

3.4.1 吊り下げ式重量計による蒸散量の推定精度

屋外での重量計測から蒸散速度を求める場合は風の影響を評価する必要がある。吊り下げ計測では特に重要な問題となる。表3.2に吊り下げ式重量計による、晴天日における樹種・風速別の30分間の標偏差の平均値を示す。供試木の日中の蒸散速度は約1-3 kg tree⁻¹h⁻¹と想定されたが、風速2m s⁻¹以下の条件においても多くの供試木で標準偏差が1kg tree⁻¹h⁻¹を超える振動が見られた。そこで本章では相対誤差(95%信頼区間)の

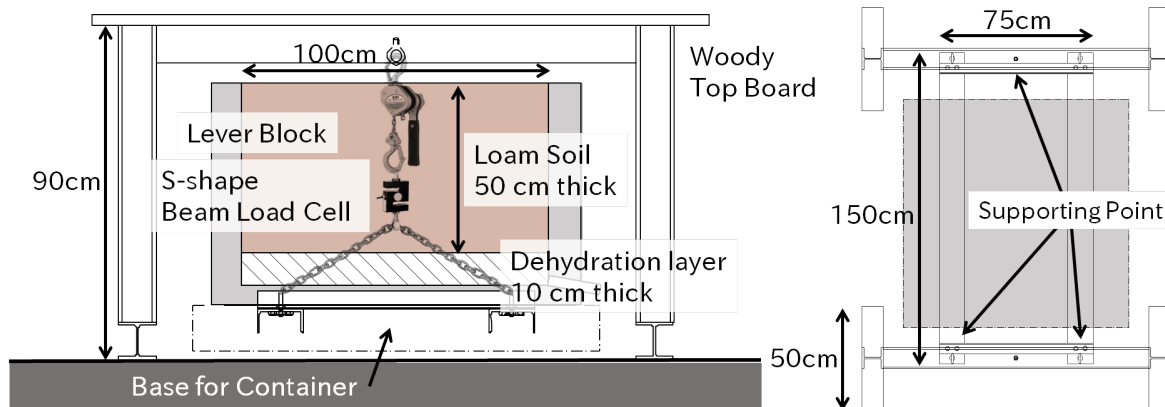


図 3.3 吊り下げ式重量計の模式図.



図 3.4 ヤマボウシの計測の様子 (左) と圃場内の環境 (右)

許容値を 20% と定め、1 時間単位の蒸散速度を議論するため、レコード長さを 30 分として計算した。その他の手順は第 2 章で説明した方法と同様である。表 3.2 に直線回帰の残差から求めた樹種・風速別の高次モーメントの平均値を示す。風速 2 m s^{-1} 以下では歪度の絶対値は殆どの供試木で 1 以下、尖度はソメイヨシノ、ヤマボウシ、クヌギ、コブシ以外では 6 以下であり正規分布からのずれは顕著ではないが、風速 2 m s^{-1} 以上では殆どの供試木で大幅な値の増加が見られた。特に歪度の増大は平均値を代表値として扱う上で大きな問題となるため、本章では日中の平均風速が 2 m s^{-1} を超える強風日 (2012 年 8 月 1, 15, 31 日, 9 月 14, 17, 18 日) を評価対象外とした。

シラカシ 2012 年は最も蒸散量が少なく相対誤差が大きな個体であったため、ここではシラカシ 2012 年の誤差評価結果を示す。計測間隔 1 秒のデータから求めた 1 時間ごとの

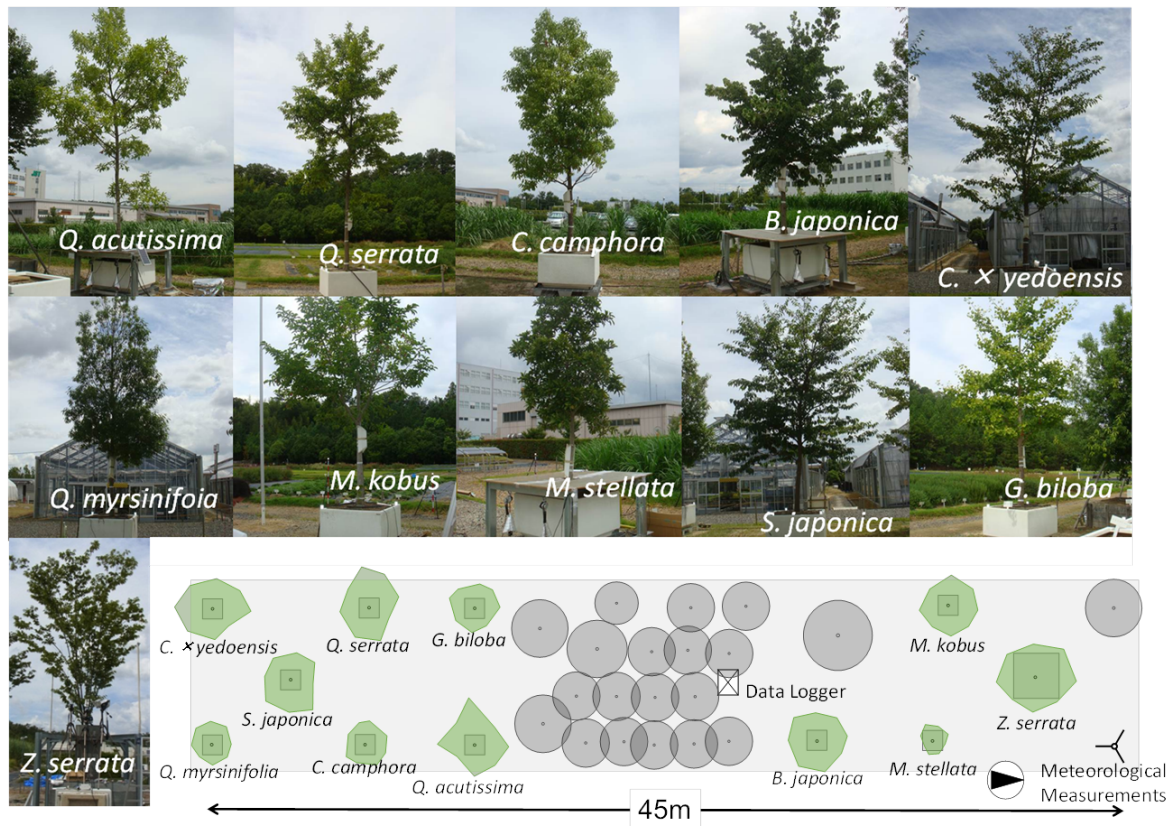


図 3.5 各供試木の写真と圃場内の配置 (2012 年夏季)。殆どの供試木は養生も図の位置で行ったが、シラカシ (*Q.m*) だけは、計測前の時点では中心部の樹木群内に配置されていた。

重量変化 (蒸散速度) とその 2 標準誤差 ($\sim 95\%$ 信頼区間), N_{eff} と気象条件を図 6 に示す。試験体の振動が激しくなるにつれて自己相関が弱まるため, N_{eff} は概ね風速に対応していた。1 日の大半が風速 2 m s^{-1} 以下である 7 月 29-31 日, 8 月 2-4 日では N_{eff} は元の標本数 1801 の 3 分の 1 以下に減少しており, 自己相関の考慮によって信頼区間が約 1.7-3 倍まで増大する結果となった。強風日である 8 月 1 日, 日射変化の大きな 8 月 5 日はいずれも重量が激しく変化しているが, 誤差範囲から両者を明確に区別できることが分かる。7 月 29-31 日, 8 月 2, 4 日の日中の蒸散速度の相対誤差 (2 標準誤差の比) は平均 19.8% (最大 49.2%) となり, 目標の許容値を満たしていることを確認した。他の供試木の風速 2 m s^{-1} 以下での相対誤差は 4.6-13.9%, 全 10 種の平均値は 9.2% であった。

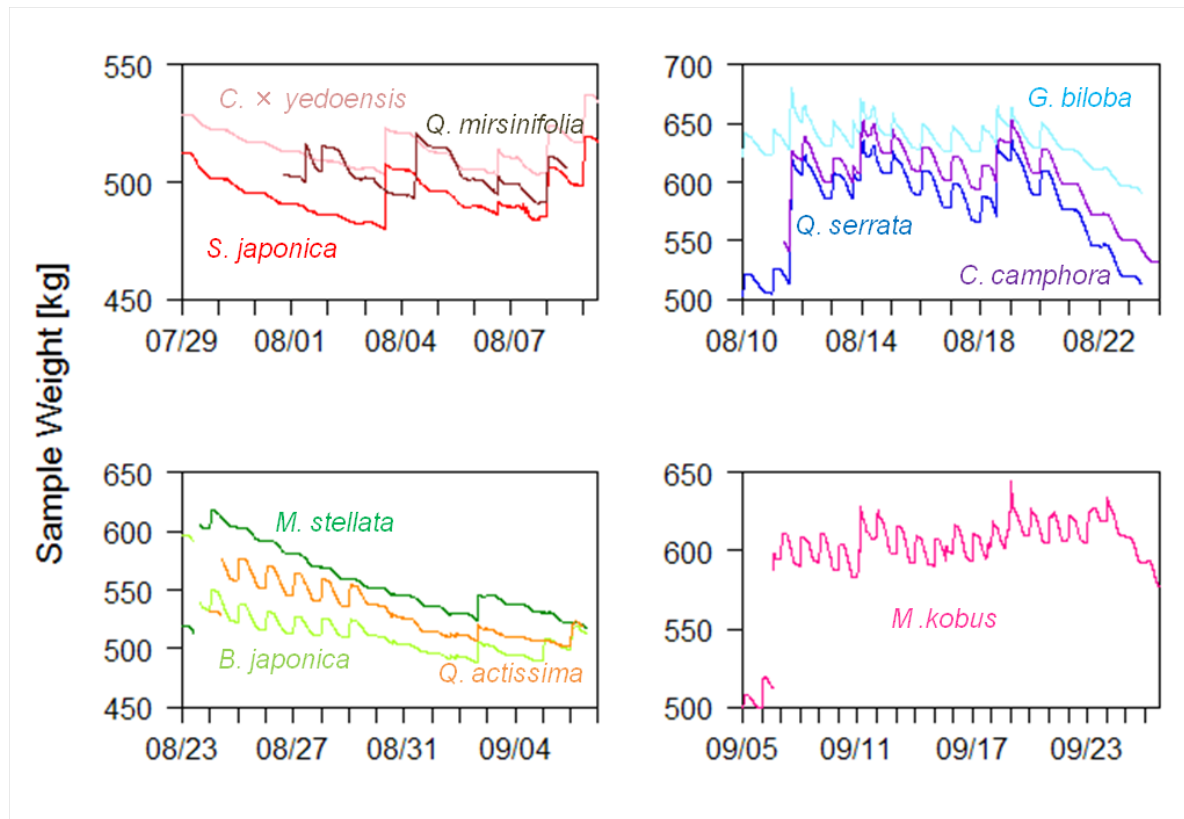


図 3.6 各供試木の重量計測結果生データ。計測間隔は 1Hz または 5Hz。

表 3.2 各供試木の記述統計量。レコード長は 30 分。圃場代表風速（観測高度 4m）に応じて、静穏 (< 0.5m s⁻¹), 標準 (0.5-2.0 m s⁻¹), 強風 (2.0m s⁻¹ <) の三段階に区分した。表中の値は各区分の中央値。

	S.D.			Skewness			Kurtosis		
	< 0.5	0.5-2.0	2.0 <	< 0.5	0.5-2.0	2.0 <	< 0.5	0.5-2.0	2.0 <
<i>Q.m</i>	0.22	0.37	0.72	0.06	0.20	2.11	2.01	4.00	48.7
<i>S.j</i>	0.17	0.82	0.62	0.05	0.54	1.43	2.14	4.97	7.40
<i>C.x.y</i>	0.07	0.28	0.47	0.21	1.05	1.12	3.81	9.24	9.80
<i>G.b</i>	0.67	0.78	1.78	0.25	0.44	0.51	4.20	5.34	7.24
<i>Q.s</i>	0.65	1.28	3.45	0.14	0.36	0.22	2.60	4.93	4.84
<i>C.c</i>	0.62	0.88	1.56	0.41	0.59	0.47	4.08	5.82	6.72
<i>B.j</i>	0.42	0.44	0.41	0.18	0.73	1.10	3.24	7.46	8.843
<i>M.s</i>	0.21	0.51	0.27	0.07	0.16	0.33	2.10	3.10	5.22
<i>Q.a</i>	0.43	0.48	1.32	0.62	0.67	2.00	5.00	6.27	31.2
<i>M.k</i>	0.14	0.35	0.87	0.37	1.04	1.24	4.64	7.27	7.84

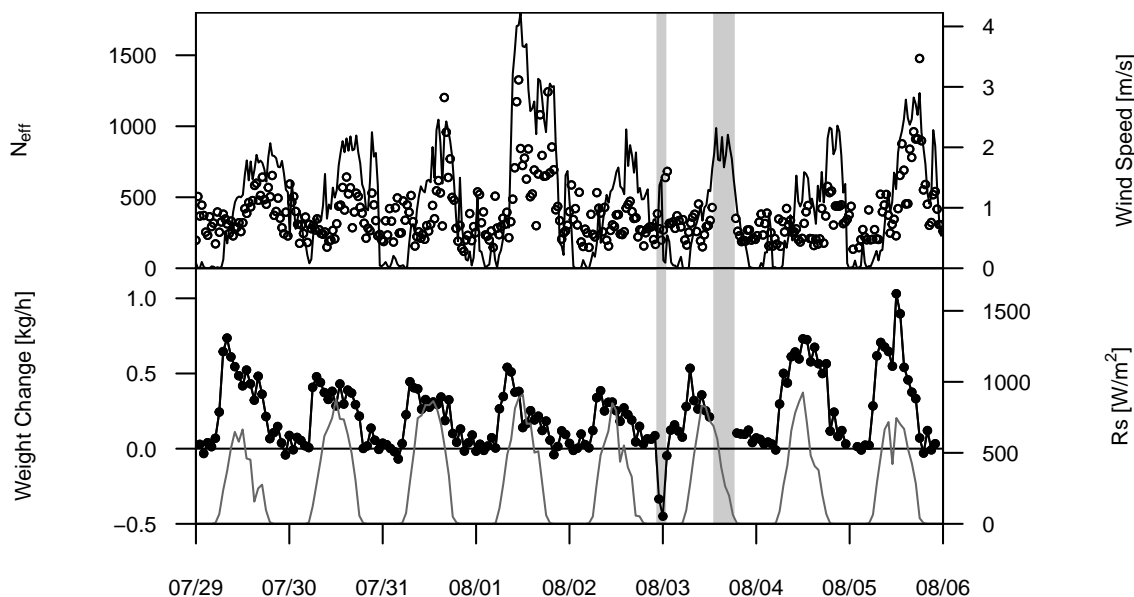


図 3.7 (a) シラカシの有効標本数 N_{eff} :丸, 風速:黒線, (b) 重量変化:黒線, 日射量 R_s :灰線. 8月2日の影部は降雨, 3日午後の影部は灌水を表わす.

3.4.2 夏季晴天・灌水日における 11 樹種の蒸散特性

本項では気孔の環境応答を議論するため, 単木蒸散量 E_T を式 2.1 と類似した形式で近似的に以下のように表わす.

$$E_T = G_v(e_{cr} - e_a) \sim G_v D \quad (3.3)$$

ここで, G_v :単木の水蒸気拡散コンダクタンス, e_{cr} :樹冠平均葉面飽差, D :大気飽差である. 境界層コンダクタンスが無限大で葉温が気温に等しく, 強制蒸発とみなせるような時, 3.3 式の第 2, 第 3 辺は (近似ではなく) 等しくなる. このような近似を用いる理由は, 以下の通りである.

- 2012 年の夏季晴天日に供試木を赤外線放射カメラで計測した結果, 全ての樹種において樹冠平均温度が気温を 2 度以上超えることがなかったことから, 第一次近似として妥当と考えられるため.
- 本項では G_v の絶対値は議論せず, 供試木が環境ストレスに応答していたかどうかを判断する材料の一つとしてのみ用いるため.
- 一般に風通しの良い環境では高木の樹冠平均温度は気温に近い値を取ることが知られており, 葉温を気温相当とみなすことは森林水文学・植物生理生態学分野などでも一般的であるため (例えば, [87][92][96][106]).
- 単木の三次元放射伝達・熱収支を解いて e_{cr} を計算することが容易ではないため.

気温 33 °C, 水蒸気圧 2.4kPa の環境 (葉温と気温の差が最大となる昼過ぎの条件) において葉温が 35 °C の場合, 葉温を気温相当とみなすことによる G_v の推定誤差は約 22% となる。したがって以下の議論における G_v の値には, 2 割程度は誤差が含まれる。

単木蒸散量と水蒸気拡散コンダクタンスの変化

図 3.8 に比較的風速の安定した, 典型的な晴天・灌水日における各樹種の E_T と G_v の日変化を示す。なお, 試験体重量 W の歪度の絶対値が 1 以上または尖度が 6 以上となった条件については E_T を白抜きのプロットで表す。全供試木での E_T の最大値はケヤキ 2010 年, コナラの約 $3.5\text{kg tree}^{-1}\text{h}^{-1}$ となった。これは潜熱量 2.3kW, 家庭用エアコン 1 台分の冷房能力に相当する値である。一般に蒸散速度は蒸発の駆動力である D や R_s の変化に連動するが, 本章の供試木でも E_T のピークは多くの個体で 13-14 時頃に表れていた。しかし, ソメイヨシノ, イチョウ, ヤマボウシは午前中にピークを持ち日中横ばいに近い変化を示していたことから, これらの供試木では水ポテンシャル低下による通水制限が起きていた可能性が考えられる。蒸散流 (樹液流) 速度は土壌-葉の水ポテンシャル勾配に比例するが, 葉の側で低下可能な水ポテンシャルには一定の限界 (温帯広葉樹では約-2MPa) があるため, 通水制限下では G_s は水ポテンシャルが限界値以下に下がらないよう (即ち蒸散速度が一定以上にならないよう) に制御される。通水性は葉と根の面積比で決まるため, ソメイヨシノ, イチョウ, ヤマボウシはコンテナによって根の生長が阻害され葉と根のバランスが崩れていた可能性が考えられる。

G_v はケヤキ 2010 年以外の全ての供試木において朝 6-8 時頃に明確なピークを持ち, E_T の増大に応じるように日中低下 (*midday depression*; 昼寝現象) していた。 G_v の日中低下は孔辺細胞が蒸散速度の増大を感知することによる G_s のフィードバック的応答, または昼の強い日射による強光阻害・高温による酵素不活性化を要因とする光合成速度低下による G_s のフィードフォワード的応答によって引き起こされる。したがって日中低下が明確でないケヤキ 2010 年, シラカシ 2013 年, コナラの 3 個体は乾燥・光・熱ストレスを比較的受けておらず, そのために E_T の値も他の個体より大きくなったものと考えられる。

日積算蒸散量はケヤキ 2010 年, コナラ, クスノキが約 $30\text{kg tree}^{-1}\text{d}^{-1}$ と最も多く, 次いでケヤキ 2012 年, シラカシ 2013 年, クヌギが約 $25\text{kg tree}^{-1}\text{d}^{-1}$ となった。一方, 少ないものではシラカシ 2012 年, エゴノキが $10\text{kg tree}^{-1}\text{d}^{-1}$ 程度となり, ケヤキとシラカシでは蒸散特性に大きな経年変化が生じていた。シラカシは外形に目立った変化が見られなかったにも関わらず 2012-2013 年にかけて日蒸散量は約 3 倍に増大していた。この特性変化の原因として, 2012 年に図 3.5 中央部の植栽群内から図中に示した孤立環境に移動させたことで光環境が改善し, 光合成能力が増大した可能性が挙げられる。2012 年の実測前に配置を変えていたにも関わらず当時は E_T が小さかった理由として, シラカシ

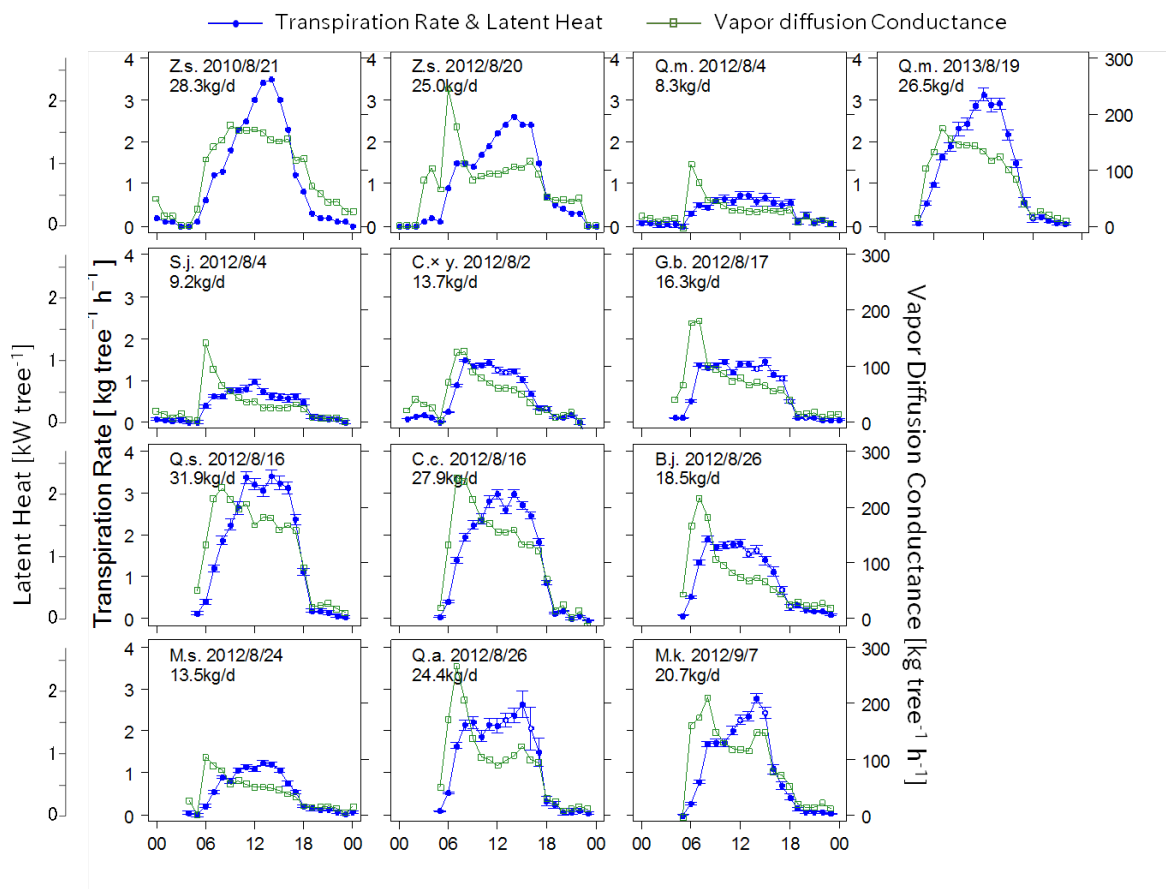


図 3.8 11 樹種 (13 日分) の単木蒸散量 E_T と水蒸気拡散コンダクタンス G_v . G_v の計算において葉温を気温と仮定して算出している。

の葉の寿命が 36 か月あるために光合成能力の増大 (新たな環境下での着葉) に時間がかかったことが考えられる。また根の生長には一般的には数週から数か月程度かかるため、日射環境の変化に対して通水性の変化が追いついていなかった可能性もある。ケヤキの葉面積は 2010-2012 年にかけて 15.4m^2 から 28.9m^2 に倍増していたにも関わらず G_v は約 $2/3$ に減少し、葉面積あたりの蒸散速度は 30-50% 程度まで減少する結果となった。これは第 2 章で述べたように単木の通水性が変化しなかったことの影響と考えられる。2010 年当時は枝打ちによって葉面積が減少していたために単位葉面積あたりの通水性が過剰であったと考えられ、ケヤキ 2010 年の G_v が日中に横ばいとなる (気孔閉鎖が不明瞭な) 変化パターンはこの仮説を支持するものである。類似した現象として、既往研究では Oren et al. (1999a) が竜巻被害を受けた針葉樹林において、葉面積が 55% に減少したものの樹液流は 80% 程度の値を維持していたことを報告している [46]。

樹冠投影面積あたりの潜熱量

図 3.9 に供試木の樹冠投影面積あたりの潜熱量 λE_{cr} と水平面全天日射量 R_s の日変化を示す。なお、シラカシ 2013 年は幹直径に変化が見られなかったことから 2012 年と同サイズと仮定して計算した。イチヨウヤクスノキでは λE_{cr} が R_s の短時間変化に連動している様子が見られ、本章で提案した吊り下げ法が 1 時間単位での蒸散速度変化を正確に捉えていることがわかる。 λE_{cr} の大きなものとして、投影面積の小さなシラカシ 2013 年、クスノキ、シデコブシの 3 個体は最大 500W m^{-2} を超えていた。ただしシデコブシについては E_T は他と比べて小さい部類であった (図 3.8)。シラカシ 2013 年とクスノキの λE_{cr} は一日を通して R_s とほぼ同等の値を取っており、LAD や個葉単位での蒸散速度、またはその双方が他の供試木より大きいものと判断できる。一方で λE_{cr} が小さなエゴノキとソメイヨシノは最大約 100W m^{-2} であり、ピーク値には約 5 倍の個体差が見られた。

既往研究では孤立環境にある樹木が群落より多く蒸散する可能性が指摘されているが、本研究の結果では過半数の供試木の潜熱ピーク値が 300W m^{-2} 以下と、標準的な温帯広葉樹林並みの値であった。孤立樹木は側面から受ける日射量も大きいため、実際の吸収日射量と潜熱量の比はさらに小さくなるものと考えられる。図 3.8, 3.9 は典型的な夏季晴天日かつ十分な灌水条件の結果であるため、蒸散速度の制限要因としてはコンテナに限定された土壌容積による根系の発達阻害がボトルネックとなっていた可能性がある。乾燥ストレスの影響が顕著でないケヤキ 2010 年の潜熱量は日射量の 50% 以上に達し、単位片面葉面積あたりでは最大 $153\text{W m}^{-2}(0.23\text{mm h}^{-1})$ 、日中平均 $91\text{W m}^{-2}(0.13\text{mm}^{-1})$ となった。葉面積の増大後のケヤキ 2012 年の潜熱量は単位片面葉面積あたり最大 $62\text{W m}^{-2}(0.09\text{mm h}^{-1})$ 、日中平均 $44\text{W m}^{-2}(0.07\text{mm h}^{-1})$ であった。

3.4.3 形態的・生理的特徴と単木蒸散能力の関係

計測日は各供試木で異なっていたが、樹木の蒸散能力を評価するためには環境条件を揃えた上で比較する必要がある。本項では小水面の日蒸発量を表す Makkink 式 [110] を可能蒸発量 (E_{pot}) として用いて、日中 ($R_s > 0$) の積算蒸散量を無次元化した上で比較分析を行った。

$$\lambda E_{pot} = a \frac{s}{s + \gamma} R_s + b \quad (3.4)$$

ここで、 E_{pot} :可能蒸発量 [mm d^{-1}]、 s :飽和水蒸気圧曲線の傾き、 γ :乾湿計定数、 λ :蒸発潜熱、 a & b :地域ごとの経験的定数である (ここでは温帯の標準値 $a = 0.97, b = -0.29$ を用いる [111])。Penman 式の簡易版である式 3.4 は、気温と日射量だけを入力条件とするためにより多くの過去のデータが利用可能であり、多くの標本数を必要とする比較分析

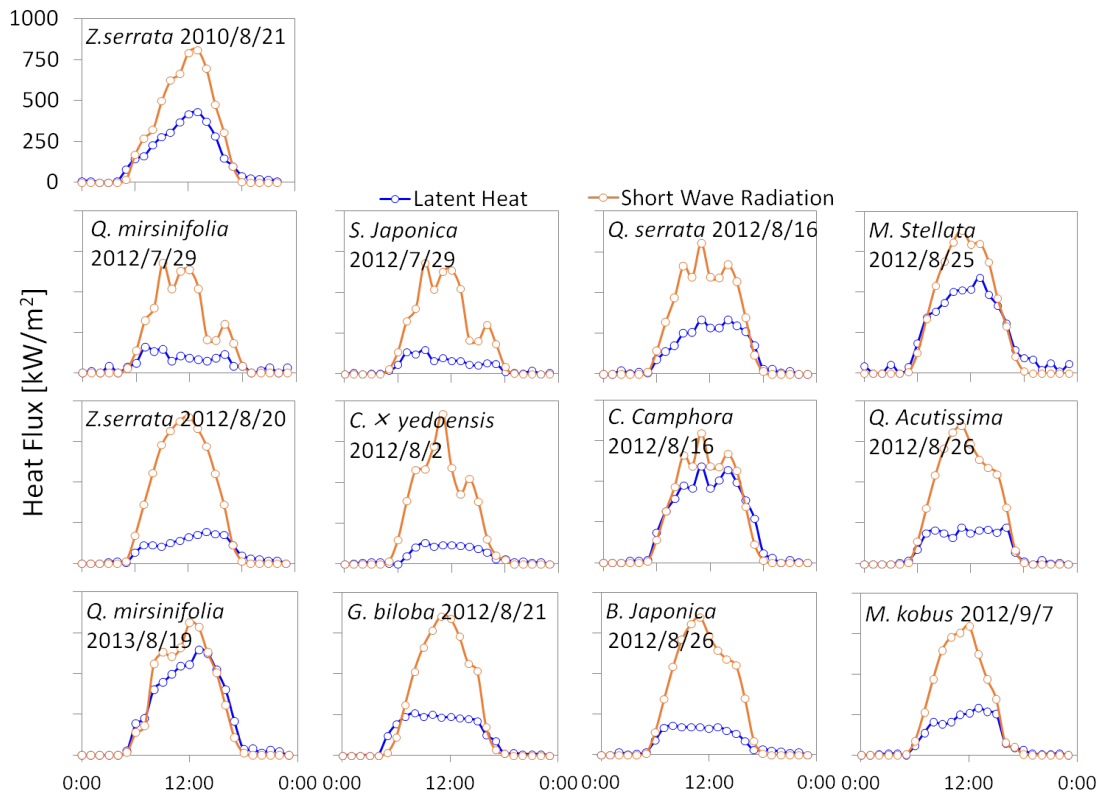


図 3.9 投影面積あたりの潜熱不絡子（蒸散量）。日付は 3.8 と同様。

を行う際の利点大きい。本研究では森林の既往研究との比較のために式 3.4 を用いる。また水文気象学分野では土地（樹冠投影）面積基準で蒸散量を求めることが多いが、本研究ではそれに加えて対象が孤立樹木であることを鑑みて、単木単位の蒸散能力を表すための 1m^2 で基準化した値も算定した（コンテナ占有面積での基準化ともみなせる値である）。ここではそれぞれの可能蒸発量比を E_{cr}/E_{pot} , E_T/E_{pot} と表す。

図 3.10 に夏季晴天・灌水日における供試木の蒸散量計測値から得た E_{cr}/E_{pot} , E_T/E_{pot} の値を示す。蒸散特性に大きな変化があったケヤキ（2010 年と 2012 年）とシラカシ（2012 年と 2013 年）を別個体とみなすと、 E_{cr}/E_{pot} の平均値と標準偏差は 0.62 ± 0.36 ($n=13$, Range: 0.19-1.25) となった。この結果は供試木の平均蒸散量が樹冠投影面積と等しい広さの水面からの蒸発量の 6 割程度であること、投影面積基準では個体によって約 6 倍の蒸散能力の差があることを意味する。水面より小さい値を取るのは気孔制御のためであり、一般に夏季の植生の蒸散が水面蒸発量を超えることは稀であるが、本研究ではシラカシ 2013 年とクスノキがそれぞれ 1.25, 1.20 という値を示した。これは LAD の大きさと、孤立樹木であることによる側面からの日射と移流効果が影響したものと考えられる。

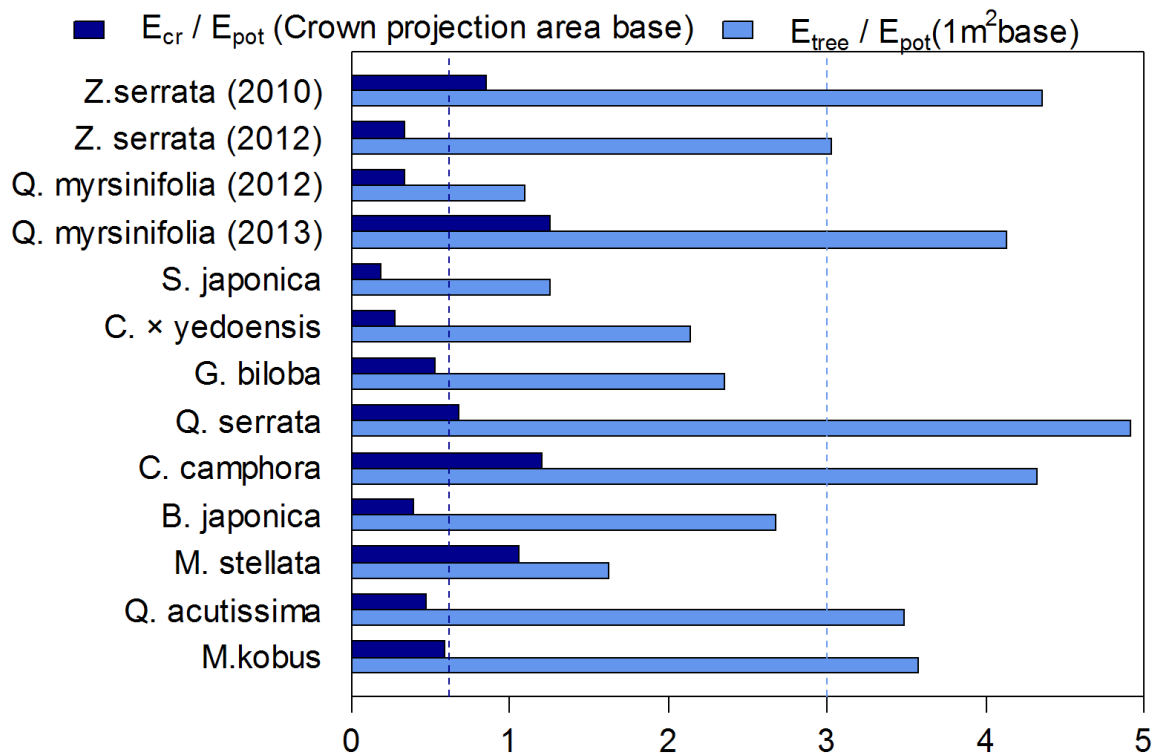


図 3.10 Makkink 式による可能蒸発量に対する可能蒸発量比 (Potential Evaporation Ratio).

温帯広葉樹林との比較

Komatsu (2005) は成長期かつ湿潤期の森林における日中の蒸発散量の文献値を森林の特徴ごとにまとめている [112]. この文献値を基に式 3.4 から温帯広葉樹林の E_{cr}/E_{pot} を計算すると, 0.65 ± 0.13 ($n=14$, Range: 0.46-0.84) であった (図 3.11). 平均値は本研究と有意な差があるとは言えないが, 標準偏差は本研究の方が大きく最大・最小値も本研究の方が広い範囲を取っていた. Komatsu (2005) に引用されている広葉樹林の特徴は幅広く偏りは見られない (例えば LAI 範囲は 3.3-7 である) ため, 本研究で得られた結果との比較から, 以下のような示唆が得られる.

1. 孤立環境 (強い日射と小さな境界層抵抗) とコンテナ植栽 (根系の生長阻害) という条件が樹種あるいは個体に固有の特性を際立たせること.
2. 樹種あるいは個体ごとの最大蒸散能力には大きな差があること.
3. 都市緑化樹木の単木スケールの蒸散量を予測するには森林以上に詳細なモデル・パラメータが要求されること.

図 3.10 からは, コンテナ基準の単木蒸散能力 E_T/E_{pot} は最も小さいシラカシ 2012 年

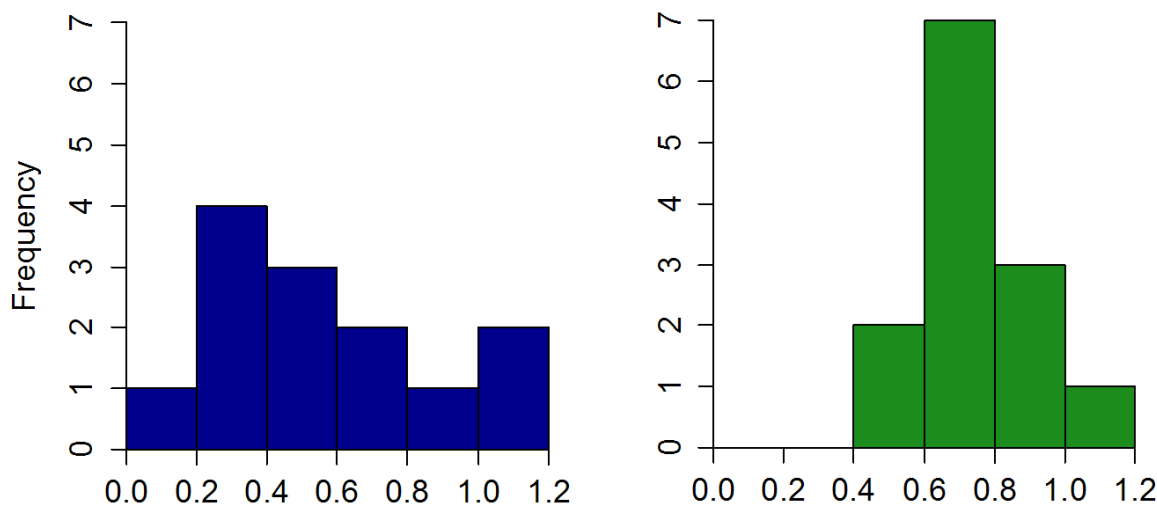


図 3.11 本研究から得られた投影面積基準での可能蒸発量比（左）と Komatsu(2005)による温帯落葉樹審での可能蒸発量比（右）。

が、投影面積基準 E_{cr}/E_{pot} で見るとエゴノキやソメイヨシノよりも大きくなっていることから、投影面積基準での評価には樹冠形態が大きく影響していることが分かる。また、葉面積密度の三次元分布によって吸収放射量は大きく変化するため、空間一様性が高いと考えられる森林との蒸散特性分布の違い（図 3.11）が生じた原因を議論する上では、三次元的な樹冠形態と放射環境を考慮する必要がある。

形態的・生理的特徴と単木蒸散能力の関係

図 3.12 に供試木の形態的・生理的特徴と E_T/E_{pot} の関係を示す。 E_T/E_{pot} の平均値と標準偏差は 3.00 ± 1.26 ($n=13$, Range: 1.09-4.91) となった。単木蒸散量は葉面積と、葉面積は幹の太さとそれぞれ相関があるために、樹冠投影面積や幹直径に伴う蒸散量の増大が期待されたが、本研究では有意な影響は確認されなかった。本研究の供試木程度のサイズ差では投影面積・幹直径の蒸散量への影響は小さく、樹木形状を基に蒸散量を予測するためには、LAI や LAD のような、より高精度な形態情報が必要と考えられる。また個葉計測の既往研究では夏季において落葉樹が常緑樹より蒸散速度が大きい傾向も報告されているが、これも本研究の結果からは確認されなかった。

通水性に影響する道管種の違いに着目すると、太い道管を持つ環孔材樹種であるケヤキ 2010 年・2012 年、コナラ、クヌギは蒸散量が多い傾向が見られた（環孔材平均 3.94, その他 2.57, $p=0.045$ in Welch's t-test). 本研究と類似した傾向を示した既往研究として、Saito et al. (2003) は山梨県内の実験圃場において落葉広葉樹 8 種（うち 3 種はケヤキ, コナラ, コブシ）の個葉の蒸散速度を計測し、ケヤキとコナラの値が最も大きかったことを報告している [113].

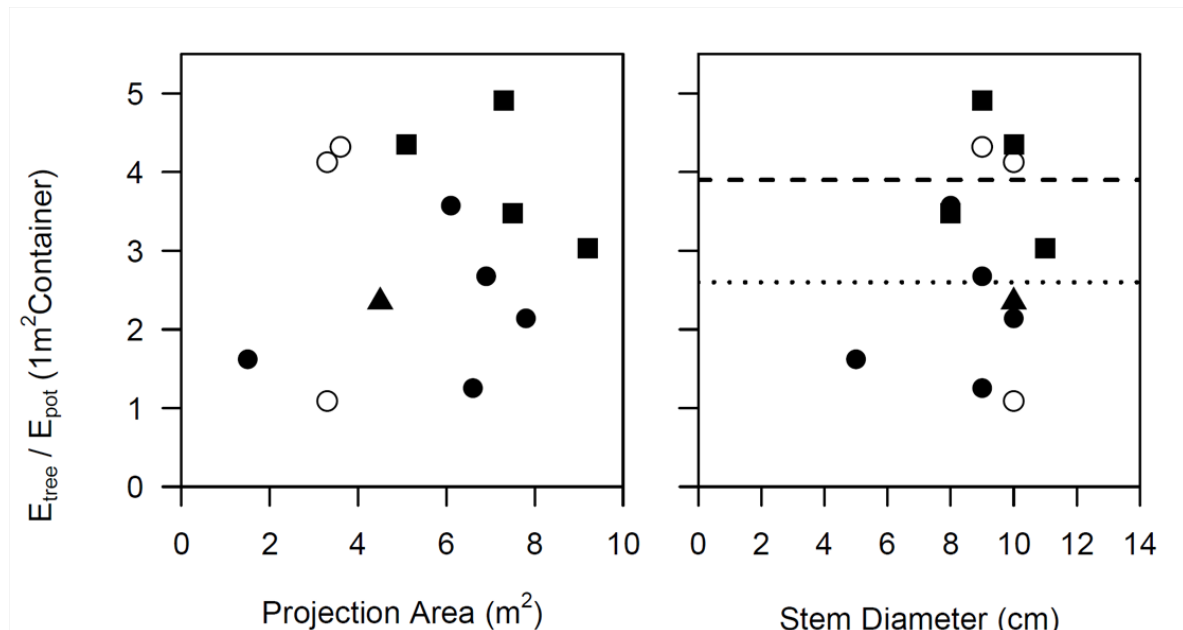


図 3.12 樹木の特徴と蒸散の関係。丸:散孔材，四角:環孔材，三角:仮道管，黒:落葉樹，白:常緑樹である。右図の破線は環孔材平均値，点線はその他の平均値。

ただし本研究の結果から環孔材樹種は一般的に蒸散量が大きいとは断言できない。都市緑化樹木を対象に道管種別の樹液流速を調べた Litvak et al. (2012) は、環孔材樹種は他に比べ乾燥ストレスに敏感な傾向を報告している [57]。本研究の供試木は毎日灌水された条件で生育しており、都市の樹木に比べて乾燥に鈍感な特性を持っていた可能性がある。しかし同時に、十分に灌水されていれば水供給能力に優れる環孔材樹種がより多く蒸散する可能性も考えられる。

3.4.4 実験結果の一般性に関する考察

本研究の供試木の投影面積あたり日蒸散量の範囲は $4.3 \pm 2.5 \text{ mm d}^{-1}$ (Mean \pm S.D., 以下同様) となった。コンテナ植栽の既往研究 [62] と比較して妥当な範囲と考えられるが、建築環境工学分野でしばしば参考とされる CASBEE-HI の作成時において参考値とされた [42]、イチヨウとプラタナスの切断葉の重量変化 (蒸散速度) 計測に基づく推定値 $14.9 \pm 6.4 \text{ mm d}^{-1}$ およびケヤキが芝生の 12 倍以上蒸散するという野島 (1998) の計算結果 [114] に比較して小さな値である。文献 [42] との差異について、まず、切断葉から蒸散速度を推定する手法に関しては、切断葉と自然状態そのままでの計測では放射環境が異なり、葉温と気孔開度はいずれも数分で容易に変化するために蒸散速度も変わる可能

性が高いことから、この手法による推定精度の問題が一因として挙げられる*7。次に、野島 (1998) との差異について、野島 (1998) は供試木のケヤキの葉面積指数 (LAI) を 8.8 と推定しポロメーター計測に基づく個葉の蒸散量予測式から単木蒸散量を求めて芝生と比較している。しかし、LAI 8.8 という値は夏季の一般的な落葉広葉樹の 2 倍近い値であり [112]、更に野島 (1998) は樹冠内の放射伝達計算において、Monsi & Saeki 式 [116] (Beer 則) から計算した各葉群層内の水平面日射量 I の値を葉の吸収日射量とみなして蒸散速度を計算している。

$$I = I_0 \exp(-kF) \quad (3.5)$$

ここで、 I :葉群層内の水平面日射量、 I_0 :キャノピー上の水平面日射量、 k :吸光係数、 F :積算葉面積指数である。

しかし、吸光係数は主に葉の傾きを表すパラメータであり、実際に葉が吸収する日射量は $-dI/dF = kI_0 \exp(-kF) = kI$ となるため、水平面日射量 I よりも小さな値を取る。つまり、野島 (1998) では標準的な広葉樹に比べて大きな葉面積と多大な日射吸収量を想定した計算が行われていたために、本研究より大きな値を取ったものと考えられる。

本研究に類似したサイズ、環境条件 (日積算日射量約 $20\text{MJ m}^{-2}\text{d}^{-1}$ 、孤立環境、湿潤土壌) の地植えの樹木を対象に樹液流計測を行った既往研究として、Green(1993)、Green et al.(2002) がある [117] [118]。日積算値では樹液流速と蒸散速度の時間差の影響が無視できるため、ここでは 1 日以上単位で議論する*8。Green (1993) はニュージーランドの圃場 ($40^{\circ}2'S$, $175^{\circ}4'E$) において、孤立環境にある地植えのクルミ (樹高 3.5m、葉面積 26.4m^2) を対象に夏季の単木の正味放射量の直接計測と樹液流計測を行い、晴天日における日蒸散量が $40\text{kg tree}^{-1} \text{d}^{-1}$ (投影面積あたり約 4.9mm d^{-1}) であったこと、日中の潜熱量が正味放射量の約 $2/3$ であったことを報告している。また Green et al.(2002) は実験圃場 ($41^{\circ}30'S$, $173^{\circ}52'E$) において、 $5\text{m} \times 6\text{m}$ 間隔で列植されたオリーブ (樹高約 4m、葉面積 13.5m^2) を対象に樹液流計測を行い、夏季における蒸散量が最大 175kg

*7 熱帯樹木 10 種の切断葉のガス交換速度変化を調べた Santiago & Mulkey (2003) は、切断後 3 分で 40% に低下したのから 1 時間後も 86.5% を維持していたものまで大きな差があったことを報告しており [115]、樹種の違いについても自然状態とは異なる可能性がある。

*8 Green (1993)、Green et al. (2002) は樹液流法によって蒸散量を推定しているが、以下の理由からデータの信頼性は高いと考えられる。

1. 日単位の推定では樹液流速と蒸散速度の時間差による誤差が無視できる。
2. Green et al. (2002) の供試木であるオリーブについては、重量計による蒸散量計測値を基にセンサーの較正が行われている。
3. Green (1993) では一本の供試木に対して高さ 3 点・長さ 0.5-4.8cm のセンサー 4 種 (計 12 箇所) で計測を行っており、幹内の流速分布が考慮されている。
4. センサー設置のために幹に付けた傷の影響の補正 [45] が行われている。
5. Green (1993)、Green et al. (2002) で用いられているヒートパルス法は (基準温度との差を測る Granier 法と異なり) パルスの移流速度を測る方式であるため日射等の影響を受けにくい。

tree⁻¹ wk⁻¹であったことを報告している。

対象樹種や詳細条件は異なるが、本研究において蒸散量が多く見られた供試木（ケヤキ、コナラ等）は地植えの樹木を対象とした Green (1993), Green et al. (2002) の報告と近い値を取っていたことから、これらの供試木では土壌容積の制限による影響が（ソメイヨシノ、イチヨウ等と比較して）小さかったことが推測される。

3.5 まとめ

大型重量計による単木スケールの蒸散量の計測手法を提案し、孤立環境にあるコンテナ植栽（土壌容積 0.5m³）の樹木 11 種の夏季晴天・灌水日における蒸散量の計測を行い、以下を明らかにした。

- 提案した吊り下げ式計測法が蒸散速度の 1 時間単位の日射応答および気孔の日中低下を確認できる精度を持っていることを示した。高分解能の記録と自己相関を考慮した分析によって、風速 2m s⁻¹ 以下の条件では、最も蒸散量の少ないシラカシ (2012 年) の日中の蒸散速度を相対誤差 (2 標準誤差) 19.8% で、全 10 種の平均では 9.2% で推定できることを示した。
- 供試木の蒸散量の日積算値は約 10-30kg tree⁻¹ となり、3 倍以上の個体差が見られた。単木あたりでの最大蒸散速度はケヤキ (2010 年) とコナラの 3.5kg tree⁻¹ h⁻¹、潜熱量 2.3kW tree⁻¹ であった。また水蒸気拡散コンダクタンスの変化傾向から、この 2 個体は乾燥・光・熱ストレスを比較的受けていなかった可能性が高いことを示した。
- 樹冠投影面積あたりの潜熱のピーク値は過半数の供試木では 300W m⁻² 以下、樹冠投影面積の小さなシラカシ (2013 年)、クスノキ、シデコブシでは 500W m⁻² 以上となり、5 倍以上の個体差が見られた。
- ケヤキは 2010 年から 2012 年で葉面積が 15.4m² から 28.9m² に倍増したが、単位片面葉面積あたりの潜熱量は日中平均 91W m⁻² から 44W m⁻² と 1/2 以下に減少していた。コンテナ植栽では通水性が単木の蒸散速度の支配的要因である可能性を示した。
- シラカシは 2012 年から 2013 年で 3 倍以上の蒸散量の変化が確認された。要因として、2012 年の計測前の配置移動による日射環境の変化の影響が推測された。
- 経年変化後のケヤキとシラカシを別個体とみなした場合、樹冠投影面積あたりの日蒸散量の可能蒸発量との比は 0.62±0.36 (Mean±S.D., n=13) となった。また、既往研究の温帯広葉樹林の値は 0.65±0.13 (n=14) となり、平均値に有意な差はみられなかったが、標準偏差および最大・最小値は本研究の方がより広い範囲を取って

いた。

- 可能蒸発量比と樹木の形態的・生理的特徴の相関からは、樹冠投影面積、生枝下直径、葉齢については有意な影響は確認されなかった。道管種については環孔材樹種の蒸散量が多い可能性が示唆された ($p=0.045$ in Welch's t-test).

第 4 章

蒸散予測を目的とした簡便な Soil-Plant-Atmosphere Continuum モデルの構築

4.1 はじめに

第 2 章では葉面積の増大は必ずしも蒸散量の増大には直結しないこと、第 3 章では環孔材樹種の蒸散量が多い傾向が確認された。第 2・3 章の計測結果はいずれも、土壌容積が制限された都市緑化樹木の蒸散においては通水コンダクタンスが大きな影響力を持っていることを示唆する結果であった。また、第 1 章では、水（潜熱）を利用した熱環境調整において、樹木蒸散と土壌蒸発のいずれが、どれだけ気温低下に寄与しているかが現状では解っていないことを述べた。したがって、蒸散の予測精度を上げる目的からも、その熱的效果を評価する上でも、土壌—植物—大気系 (SPAC) における水・熱の輸送過程を取り扱う必要性がある。

本章では、庭木や街路樹などの都市緑化樹木の蒸散量予測のための SPAC モデルを構築する。森林や農地を対象とした既往研究を概観した後に、都市緑化樹木の蒸散特性の実態および予測に利用可能な情報の種類を踏まえたモデルを提案し、最後に第 2 章で用いたケヤキ供試木の灌水停止実験結果に対してその予測能力を評価する。

本研究における予測能力とは、単に計測結果に対して当てはまりがよい（決定係数が大きい）というだけでなく、入力するパラメータの不確実性に対する鋭敏度も評価に含める。つまり、

- パラメータの数が多。
- 既存のデータが少なくパラメタリゼーションが困難。

などの理由によって不確実性の高いパラメータを用いざるをえないようなモデルは、予測能力が低いとみなす立場を取る。必要最小限のパラメータで、不確実性に左右されにくい頑健なモデルを構築することが本章の目的である。

4.2 既存の蒸散モデルの整理と評価

蒸発モデル

植生フラックス研究で用いられる蒸発散の数値モデルは、大きく2つに分けられる。葉表面での運動量・水蒸気量輸送の相似性を仮定したバルク法 (β 法) [16] と、

$$E = \beta C_e \rho \bar{u} \Delta \bar{q} \quad (4.1)$$

境界層の影響とは別に「表面抵抗 (気孔抵抗)」の影響を加え、電気回路のアナロジーを用いて両者を直列抵抗として繋いだ Penman-Monteith 法 [10] である。

$$E = \Omega E_{eq} + (1 - \Omega) E_i \quad (4.2)$$

$$E_{eq} = \frac{s}{s + \gamma} (R_n - G) \quad (4.3)$$

$$E_i = \frac{\rho c_p g_s D}{\gamma} \quad (4.4)$$

$$\Omega = \frac{s + \gamma}{s + \gamma(1 + g_{bl}/g_s)} \quad (4.5)$$

ここで、 β :蒸発効率^{*1}, C_e :水蒸気のバルク輸送係数, ρ :空気の密度, \bar{u} :参照高度における風速, $\Delta \bar{q}$:2 参照高度の平均比湿差, Ω :剥離率, E_{eq} :平衡蒸発量, E_i :強制蒸発量, s :飽和水蒸気圧曲線の傾き, γ :乾湿計定数, c_p :空気の定圧比熱である。

建築分野や古典的な気象学研究などではしばしば β 法が用いられるが、現代では気象学分野の LSM でもその殆どが Monteith 流の直列抵抗モデルを採用している。 β 法が Penman-Monteith 法ほど有効に機能しない (葉あるいは土壌表面での運動量交換と、蒸発散速度の相似性が成立しない) 理由は、運動量・熱の交換は表面で起こるが、蒸発が起きているのは葉や土壌の空隙内であり、(特に葉の場合は一般的に) 表面部が水蒸気で飽和していないためである。葉の場合、実際に蒸発が起きているのは葉肉細胞の細胞壁面である。この付近では相対湿度で 95–99% 程度の値となり、ほぼ飽和している。しかし葉表面の孔辺細胞付近まで水蒸気が拡散した段階では (葉外の温湿度と気孔開度に依存するが) 湿度は概ね 50% 程度まで低下していることが知られている (Nobel, 2009 [66])。

^{*1} 古典的な水文気象学研究ではしばしば β を定数とみなしていたが、これは多くの研究が日単位以上の時間スケールで議論していたためと思われる。つまり、日単位以上の気候学的な議論を行う上では、孔辺細胞の応答の影響が目立たないため、 β を定数とみなすことに妥当性があったものと考えられる。

本研究では樹木蒸散の時間変化を議論するため、Monteith 流の直列抵抗モデル（式 4.2–4.5）を採用する。

Jarvis 型気孔コンダクタンスモデル

現代の植生フラックス研究では、主に Jarvis (1976) と Ball et al. (1988) の気孔コンダクタンスモデルおよびその派生版が利用されており、それぞれ第 2, 第 3 世代の LSM に採用されている。Ball 型モデルは FvCB 生化学光合成モデル (Farquhar, von Caemmerer & Berry, 1980 [119]) との併用が前提となる。本研究は熱環境予測・灌水計画への応用を目的とした蒸散予測モデルの構築を目的としており、CO₂ フラックスの予測は目的ではないこと、生化学光合成モデルを併せると Ball 型モデルの方がより多くの経験的パラメータを要求するために頑健性が低いと考えられることから、Ball 型モデルの詳細には触れない。

Jarvis 型モデルは以下のように表わされる。

$$g_s = g_{sref} \prod f_i(x_i) \quad (4.6)$$

ここで、 g_{sref} :気孔コンダクタンスの基準値、 $f_i(x_i)$:環境要因 x_i に対する経験的なストレス関数 [-] である。 g_{sref} は Jarvis (1976) 等では最大気孔コンダクタンス g_{smax} が用いられるが [19], 近年では $D=1\text{kPa}$ かつ PAR 飽和条件での値が用いられる場合が多い [92]^{*2}。環境要因 x_i としては、大気 or 葉面飽差 D , PAR, 気温 T_a , 土壌水分量（体積含水率 or 水ポテンシャル）がよく用いられる^{*3}。野外観測では T_a と D を分離することが困難なことから、 T_a は無視される場合も多い。 $f_i(x_i)$ の関数形の一例を図 4.1 に示すが、使われる式は研究者によって様々である。

本研究では $f_i(x_i)$ には Ward et al.(2012) [54] を参考に以下の式を用いた。以下、 β_i は全てフィッティングパラメータである。

$$f_D = 1 - \beta_1 \ln D \quad (4.7)$$

$$f_{PAR} = 1 - \beta_2 \exp\left(\frac{-PAR}{\beta_3}\right) \quad (4.8)$$

^{*2} 全くストレスを受けていない条件における値を表す g_{smax} が現実に観測されることは殆ど無く、外挿された値はしばしば不安定になることから、近年では g_{smax} 方式はあまり使われない。

^{*3} 原理的には、PAR と温度はそれぞれ光合成の際の光化学反応、蛋白質酵素の活性の温度依存性に作用している。光合成によって生じた電位差が K⁺ などのイオン濃度勾配を作り、孔辺細胞の浸透ポテンシャルを変化させることが知られる。 D と土壌水分は孔辺細胞と表皮細胞の水収支に影響し、脱水・水供給によって細胞の膨圧を変化させている。つまり厳密には、化学ポテンシャル（浸透圧 + 膨圧）の形で統合された結果に対して孔辺細胞は応答していると考えられている。式 4.6 において各環境ストレス関数を独立した形で評価しているのは、便宜的なものである。

また、土壌水分ストレス関数には Pammenter & Willigen (1998) [120] を参考に、水ポテンシャル（マトリックポテンシャル）を説明変数としたシグモイド関数を用いた。

$$f_{Hyd} = \frac{1}{1 + \exp(\beta_4(\psi_s - \beta_5))} \quad (4.9)$$

ここで、 β_1 :飽差に対する気孔の敏感度、 $1 - \beta_2$:PAR=0の時の気孔開度、 β_3 :気孔開度が63%となる時のPARの値、 β_4 :土壌マトリックポテンシャルが閾値付近に達した時の気孔の敏感度（シグモイド曲線の傾き）、 β_5 :気孔開度が50%となる時の土壌マトリックポテンシャルの値である。

Jarvis 型モデルは最も古典的なモデルであるために、特に森林ではデータ数が多く (e.g., Granier et al., 2000 [121]), また飽差 D に対する応答 β_1 には植物種を問わない典型的な値が存在することが知られている (Oren et al, 1999b [92]). 一方で土壌水分に関しては一般性が非常に低いことが知られるが、これはサイトによって土壌の種類（水理特性）と根の分布が全く異なることに由来している（図 4.2）。

総じて評価すると、モデルの構造が単純なことから、殆どの植生タイプにおいてパラメータが既知であることから、蒸散の気象条件変化への応答予測だけに関心がある（光合成量や土壌水分への応答に関心がない）場合は優れたモデルとすることができる*4。

BMF 気孔コンダクタンスモデル

BMF モデルは、Buckley, Mott & Farquhar(2003) によって提案された植物生理学分野の最新の気孔コンダクタンスモデルであり、孔辺細胞・表皮細胞の水ポテンシャル構成式、両細胞の力学的釣合い、気孔コンダクタンスと気孔開度の関係式、土壌-表皮細胞間と土壌-孔辺細胞間の定常水輸送式、葉-大気の水蒸気拡散式、そして浸透調節仮説の8つの式から導出された Process-Based Model である [96][122]（導出過程の詳細は付録 B を参照）。

$$g_s = \frac{k_p(\psi_s + \pi_e)}{k_p/\chi\alpha + D} \quad (4.10)$$

*4 g_s モデルの古典である Jarvis 型モデルは、しばしば以下のような指摘・批判を受ける。

- 単なる経験式に過ぎないという指摘 [8].
- 他の複雑なモデルより決定係数が小さくなるという批判。あるいは環境条件の相互作用が表現できないという批判。

しかし以下のような理由から、蒸散の気象条件変化への応答予測だけを目的とする場合において Jarvis 型モデルは優秀であると筆者は考えている。

- どのような g_s モデルでも経験的パラメタリゼーションは避けがたい。古典であるために最も標本数が多い Jarvis 型モデルは、典型的なパラメータが確立されているという点において（少なくとも他のモデルに比べて）信頼性が高い。
- 大量のパラメータを用いた複雑なモデルの決定係数が大きくなることは当然である。また、その大量のパラメータの決め方が経験的な方法に依るとすれば、フィッティングに用いるデータの数や種類が変わらない限り予測能力は改善されない。

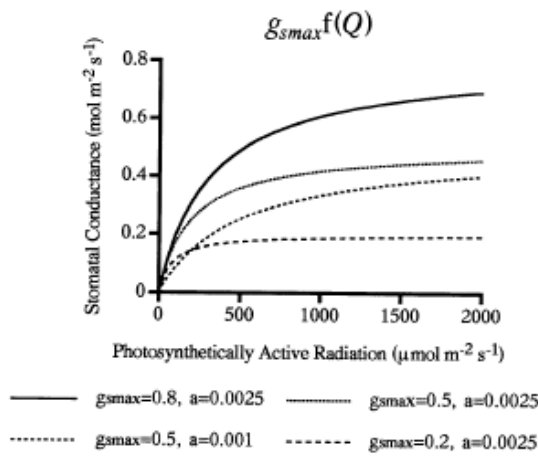


図 1 関数 $g_{smax}f(Q)$
Fig. 1 Partial function $g_{smax}f(Q)$

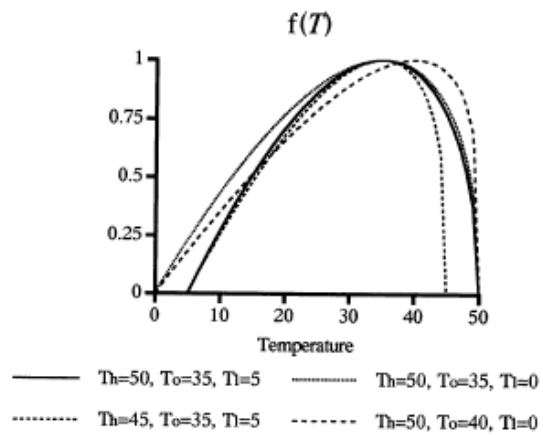


図 2 関数 $f(T)$
Fig. 2 Partial function $f(T)$

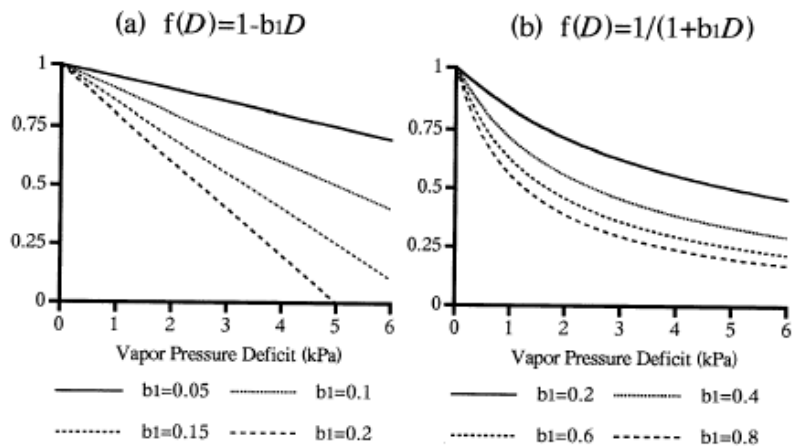


図 4.1 g_s は PAR に対しては飽和型，温度には 2 次関数型やアレニウス関数型，飽差には単調減少型の応答を示すことが知られる (小杉ら, 1994 [123])

ここで， ψ_s : 上流部の水ポテンシャル [MPa (負値)]， π_e : 表皮細胞の浸透圧 [MPa (正值)]， k_p : 植物体の通水コンダクタンス [$\text{mmol m}^2(\text{leaf}) \text{s}^{-1} \text{MPa}^{-1}$]， χ : 膨圧 $\rightarrow g_s$ の変換係数 [$\text{mol m}^{-2}(\text{leaf}) \text{s}^{-1} \text{MPa}^{-1}$]， α : PAR に対する経験的なストレス関数 (本研究では $\alpha = (1 - \beta_2 \exp(-PAR/\beta_3))$ とした) [-] である。

BMF モデルは植物体内の定常水輸送に基づいた g_s モデルである*⁵ (Buckley et al.

*⁵ 原理的には植物体内の水輸送過程は非定常であるが，非定常性まで考慮した場合，樹木の木部は多孔質材の特性を持つために水分特性曲線と不飽和透水係数のモデル化が必要になる (e.g., Kumagai, 2001 [124])。更にその上，道管径は幹枝の部位によって変化する [51] ため，透水係数の空間分布を定量化する必要も出てくる。しかし，このようなデータは既往研究でもほとんど得られていない。本研究の目的は予測のためのモデルを作ることであるから，ここでは樹木内の水輸送の非定常性は取り扱わない。

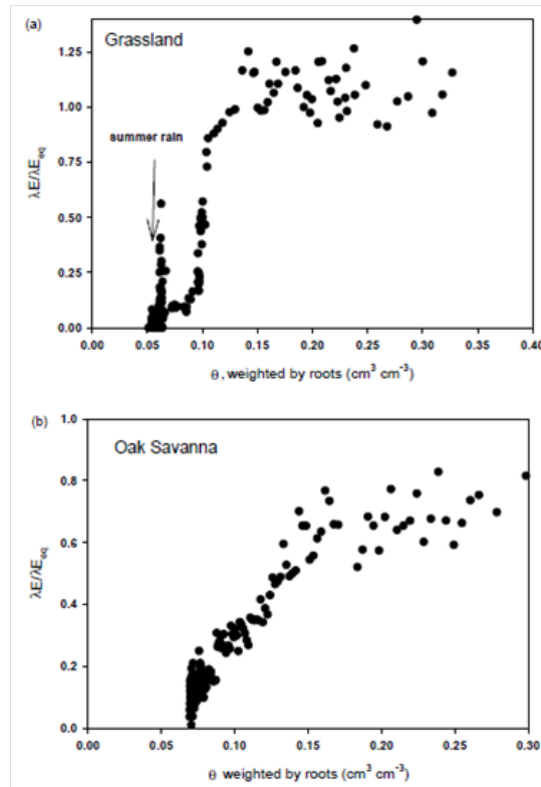


図 4.2 草地・樹木の蒸散量の土壌含水率に対する応答 (Baldocchi et al., 2004 [125]). サイトは同一だが根の浅い草地の方が変化が急激であること、蒸散が停止する含水率は同程度であることが分かる。含水率がある一定の値まで減じた段階で急激に蒸散量が減少するのは、土壌—植物の水輸送過程における主通水抵抗が植物体内から土壌にスイッチしたことの表れである (Sperry et al., 1998 [126]). Jarvis 型モデル (或いは Feddes 型モデルとも呼称される [127]) 経験的ストレス関数としては、シグモイド曲線などが用いられる。

は”Hydromechanical Model”と呼んでいる)。Buckley et al. による一連の研究では土壌は湿潤 ($\psi_s = 0$) な条件だけが取り扱われているが、水・水蒸気の輸送過程を一貫して水ポテンシャルを用いて表現したモデルであるため、一種の SPAC モデル (または SPAC の構築に適したサブモデル) と行うことができる。

本研究では最も古典的な Jarvis 型と、植物生理学分野の最新のモデルである BMF モデルの 2 つを取り扱う。他にも g_s モデルは様々なものが存在しているが、蒸散予測という本研究の目的においては直接的には関係しないため、ここではその他のモデルは取り上げない*6。

*6 その他の g_s モデルについては、例えば Damour et al. (2010) のレビューなどに詳しい [128]。

4.3 都市緑化樹木の蒸散予測を目的とした簡便な SPAC モデルの構築

4.3.1 設計段階で利用可能と想定される情報の整理

予測を行う段階（計測を行っていない段階）で利用できる情報に関して、自然条件と都市緑化樹木の最大の違いは、樹木や樹木の生育環境をデザインする人間が存在しているか否か、という点にあると考えられる。たとえば、森林に生育している樹木について特定の個体同士の位置が入れ替わるという想定には現実味がないと思われるが、造園目的でそうした移植を行うことは現実により得られると思われる。また、自然条件を想定した場合に、実際に計測することなしに任意の樹形を定めてシミュレーションを行うことには、単なる感度分析以上の意味はないと思われるが、都市緑化樹木では剪定によって樹形を操作することが可能である。熱放射環境や CFD シミュレーションを行う際には CAD を用いて任意の樹形の樹木周辺の環境を予測することは既に行われているということを踏まえても、

1. 樹木配置.
2. 樹形.
3. 葉面積.

地上部におけるこれらの情報が蒸散予測を行う際においても既知であるとみなすことは、決して不合理ではないと考えられる。さらに、本研究の第 2・3 章において、街路樹などの都市緑化樹木における通水コンダクタンスと土壌容積の重要性が示唆されたが、幸いなことに、自然条件では実態把握が困難な地下部について、むしろ都市緑化樹木は事前に情報を得ることができると考えられる。つまり、

4. 土壌容積—街路樹・屋上緑化などでは人口地盤の厚さや植栽ますの大きさを決めた人間が存在しているために、土壌容積は既知と想定できる。
5. 土壌水理特性—植栽用に利用される土壌は一般には客土^{*7}であるから、種類は既知と想定できる。土壌の水理特性（不飽和水分移動モデルパラメータ）は水文学分野で大規模なデータセットが存在する (Pedotransfer 関数; e.g., Schaap et al., 2001 [129])。)
6. 根の鉛直分布—植物生態学分野で大規模なデータセットが存在する (e.g., Jackson et al., 1996 [78])。)

*7 外部から持ち込まれた土。

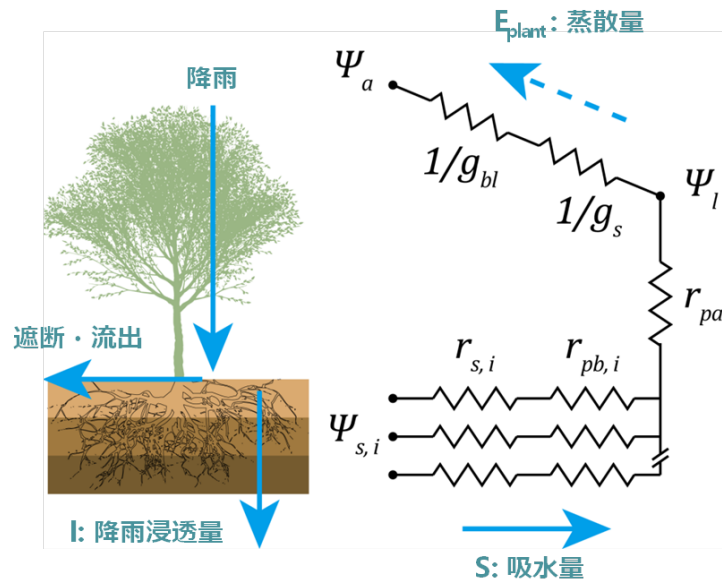


図 4.3 定常 SPAC の抵抗分布と扱われる水文要素.

地下部におけるこれらの情報の利用を前提とした数値モデルを用いることは、新たな計測を要しないためにコストがかからず、また実際に緑化計画を立てる際にも操作可能な項目であるから、決して不合理ではないと考えられる。

4.3.2 BMF モデルの SPAC 化—BMF & Root Contact モデルの提案

BMF モデルは、既往研究においては植物体内の水輸送だけを考慮したモデルであった。本研究ではこれに根の吸水モデルを組合せ、式 4.10 の k_p を以下の土壤-植物の通水コンダクタンス k で置き換えて SPAC 化した (図 4.3)。

$$k = \frac{1}{r_s + r_{pb} + r_{pa}} \quad (4.11)$$

ここで、 r_s, r_{pb}, r_{pa} : 土壤、植物体の地下、地上部の通水抵抗である。これにより、土壤水分の減少による乾燥ストレスの影響を考慮することができる。

生態学・水文学分野において予測目的で一般に使われる根の吸水モデルには以下の 2 つがある*8。

*8 Feddes & Raats (2004) の分類に従うと、ここで挙げた 2 つのモデルは meso スケールモデルに相当する [127]。macro スケールモデルは最大蒸散量に対して経験的なストレス関数をかけ合わせる方法であり、Jarvis 型 g_s モデルの一部 (式 4.9) とみなすことができる。また、細根 1 本ごとの空間分布が既知であるようなモデルを micro モデルと Feddes & Raats は呼んでいるが、本研究の目的にはそぐわないため、ここでは micro モデルは取り扱わない。

Single Root モデル

Single Root モデル (Gardner et al., 1960 [130]; 以下, SR モデル) は, 1 本の根の周りの通水抵抗を放射方向経路で積分して求めたものであり, 植物単体では根長密度 (Root Length Density, 以下 RLD) に応じて根が並列的に接続した形で表現されている (図 4.3). 植物生理生態学の研究で比較的好く使われる吸水モデルである (e.g., Sperry et al., 1998 [126]; Bittelli et al., 2015 [131]).

$$r_s = \frac{\ln(1/R\sqrt{\pi L})}{2\pi L K_s \Delta z} \quad (4.12)$$

ここで, r_s : 土壌の通水抵抗 [$s \text{ cm}^{-1}$], L : RLD [m m^{-3}], R : 細根半径 [mm], K_s : 土壌の透水係数 [cm s^{-1}], Δz : 土層の深さ [cm] である. 細管半径 R は樹木の典型値は約 0.3mm である [78].

Single Root モデルの問題は, RLD という計測困難かつ既存データも少ないパラメータを含んでいる点である.

Root Contact モデル

Herkelrath, Miller & Gardner (1977) によって提案され [132], 神田・日野 (1990) によって改良された [25] Root Contact モデル (以下, RC モデル) は, 土壌含水率が低下した際に, 根表面と土壌水分の接触面積が減少することの効果を表したモデルであり, 以下のように表わせる.

$$\frac{1}{r_s + r_{pb}} = \frac{1}{r_{pb}} \left(\frac{\theta - \theta_{res}}{\theta_{sat}} \right)^{2/3} \quad (4.13)$$

ここで, θ_{sat} : 土壌の空隙率, θ_{res} : 吸水可能な限界含水率である.

式 4.12 では, 根周辺の通水抵抗が放射方向経路で積分されているのに対して, 式 4.13 は根と土壌の界面部だけが抵抗になることを仮定している. そのために原理的には, SR モデル (式 4.12) の方が適用範囲は広い.

しかし, RC モデル (式 4.13) のパラメータを見てみると, θ_{sat} は土壌に固有のものであるから, 土壌の種類が既知であるならば既知のパラメータである. 更に BMF モデル (式 4.10) と組み合わせた場合においては, $-\pi_e$ が植物体の最も下流側にあたる葉の最小ポテンシャルを表しているので, 土壌の水分特性曲線 ($\theta-\psi$ 関数) が既知ならば θ_{res} は π_e から計算可能である. さらに, $k_p = 1/(r_{pa} + r_{pb})$ であるから, RC モデルとの組合せにおいて, BMF モデルを SPAC 化する際に新たに必要なパラメータは, k_p を r_{pa} と r_{pb} に分ける比率だけでよいことがわかる*9.

*9 さらに言えば, 一般的に地上部と地下部の通水抵抗はほぼ等しいことが経験的に知られている [126].

本研究では予測能力の最大化という観点から BMF & RC モデルを提案・推奨する。土壌水理特性が既知であるならば、RC モデルとの組合せにおいては BMF モデルを SPAC 化する際に追加的なパラメーターは殆ど要しない。BMF & RC モデルから構築される SPAC モデル（式 4.10, 4.13）で必要なパラメーターは、 $r_{pa}, r_{pb}, \pi_e, \chi, \beta_1, \beta_2$ の 6 個だけである。これは 10-15 程度のパラメーターが必要であった従来の SPAC モデル（例えば [25] [126]）と比べて半分以下の値である。

根の鉛直分布

第2章では、本研究で用いた 0.5m^3 のコンテナにおいてすら、土壌乾燥時には根の（含水率の）鉛直分布の考慮が必要であることが示された。根の分布は、最も単純な形では以下のような指数関数型の式で表現される^{*10}(Jackson et al., 1996 [78])。

$$F_{root} = 1 - \beta_6^z \quad (4.14)$$

ここで、 F_{root} :根の積算割合 [-], z :地面深さ（鉛直下向き正）[cm] である。

パラメータとして β_6 を加えると、BMF & RC モデルによる SPAC モデルパラメータの数は 7 個になる。

提案モデルの適用限界

以下に、モデルの前提による限界を挙げる。

- 式 4.10 の前提として、水輸送の定常性を仮定している。短い時間での環境変化に対する蒸散応答を議論することには、問題がある可能性がある。第2章での検討からは樹高 6.4m のケヤキにおいても 40 分程度の時間遅れが生じていたことを踏まえ、本研究の対象樹木スケールでは 1 時間以下での応答について議論することは妥当性を欠くと思われる。
- 式 4.13 の前提として、根付近の（サブグリッドスケールでの）土壌内通水抵抗は無視できることを仮定している。この仮定は、砂質土などの乾燥時に透水係数が著しく低下する土壌種では成り立たない可能性があり、この点は今後の検討が必要である。

また、以下に計測データの不足による限界を挙げる。

- 根の水平分布に関するデータが不足しているために、土壌水分が水平方向に分布する条件には適用できない。

^{*10} より複雑な関数としては、例えば Schenk & Jackson (2002) などがある [133]。

- アメダスデータなどを基に蒸散予測を行う上では樹冠による降雨遮断の評価が必要であるが、単木スケールのデータが殆ど存在しない。

4.4 ケヤキ灌水停止実験の概要と土壌水理特性のパラメタリゼーション

4.4.1 検討の目的と実験データの概要

本節と次節では、提案した BMF & RC モデルの予測能力を評価する目的から、第 2 章で扱ったケヤキ供試木の灌水停止実験結果を用いてその再現精度を調べる。一般には、土壌水分ストレス応答の樹種差は大きくない（土壌種（水理特性）の違いの方が重要である）ことが知られている（寺島, 2013）が、これは、土壌水分特性曲線が著しい非線形性を持つために、永久しおれ点以下では水ポテンシャルが変化しても含水率（吸水量）は殆ど増加しないためである。

比較対象としては古典的な Jarvis 型および、BMF & SR モデルを扱う。図 4.4 に 2010 年 8 月下旬における灌水停止実験の結果（単木蒸散量と水ポテンシャル）を示す。この期間は第 2 章で述べた 2010 年の最大無降水継続期間内にあり、常に晴天で日射量などの気象条件は安定していた。したがって、図 4.4 に見られる変化は、ほぼ土壌水分変化の結果によるものと言える。

パラメータを厳密にフィッティングした場合、基本的にどのようなモデルを用いたとしても計測結果を再現すること自体は可能である。本章で評価したいのはモデルの予測能力であるから、ここでは 8 月 22 日と 23 日の計測データを用いて気象条件への応答をフィッティングしたのち、根の分布や土壌水分ストレス応答パラメータは温帯広葉樹の一般的な値を用いた際に、乾燥進行に伴った蒸散量の減少過程が再現できるか否かでモデルを評価した。測器やデータ分析手順の詳細は第 2 章と同様であるため、ここでは割愛する。

4.4.2 不飽和水分移動の数値モデルと透水係数の逆推定

第 2 章の計測結果で示された通り、土壌含水率の鉛直分布の再現性は蒸散量予測に影響しうる。したがって、ここでは土壌内水分移動を Richards 式を用いて計算し、各層からの根の吸水量の総和を蒸散量とした。

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = C \frac{\partial \psi_s}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left[K_s \left(\frac{\partial \psi_s}{\partial z} + 1 \right) \right] + Irr - S \quad (4.15)$$

ここで、 C :比水分容量 ($= d\theta/d\psi_s$) [cm^{-1}], I :浸透量 [cm s^{-1}], S :根の吸水量 [cm s^{-1}] である（鉛直上向き正）。土壌の不飽和透水係数には Mualem (1976) の毛管モデル [134] を用

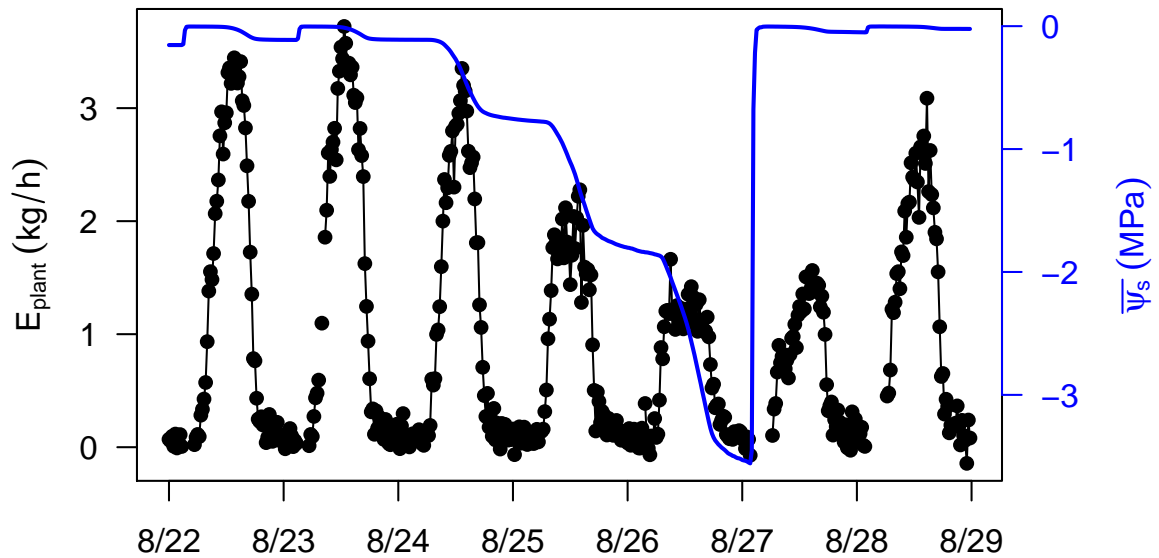


図 4.4 2010 年 8 月のケヤキ灌水停止実験. 圧力水頭は土壌含水率 5 点平均値から計算した.

いた. また本研究では永久しおれ点まで計算するため, 水分特性曲線には van Genuchten モデル [135] の乾燥領域の精度を高めた改良版である, Fayer & Simons (1995) のモデル [136] を用いた. 本研究のケヤキ試験体土壌から得た水分特性曲線を図 4.5 に, 以下にモデル式を示す.

$$K_s = K_{s.sat} S_e^l \left[\frac{\int_0^{S_e} 1/|\psi_s| dS_e}{\int_0^1 1/|\psi_s| dS_e} \right]^2 \quad (4.16)$$

$$S_e = \frac{\theta}{\theta_{sat}} = x\theta_a + (\theta_{sat} - x\theta_a) [1 + |a\psi_s|^n]^{1-1/n} \quad (4.17)$$

$$x = 1 - \frac{\ln(\psi_s)}{\ln(\psi_{max})} \quad (4.18)$$

ここで, $K_{s.sat}$:飽和透水係数 [cm s^{-1}], S_e :有効水分量, ψ_{max} : 10^7 [cm], l, θ_a, n, a :フィッティングパラメータである.

Mualem モデル (式 4.16) のパラメータである飽和透水係数 $K_{s.sat}$ とフィッティングパラメータ l は, ADR センサーによる含水率計測値の変化から逆推定した. 樹木の蒸散が無視できる夜間かつ, 灌水直後で測定誤差の影響が無視できるほど十分な鉛直水移動が生じている場合, 含水率と圧力水頭の時空間的な変化から透水係数を逆推定できる (Instantaneous Profile 法; Watson, 1960 [137]; Kosugi & Inoue, 2002 [138]). ただし前提として, 不飽和水分移動が鉛直 1 次元的な拡散 (式 4.15) で表現できる条件でなければならない.

2010 年夏季における含水率の計測値を図 4.6, 含水率計測値と水分特性曲線から計算した圧力水頭の時間変化を図 4.7 に示す. 図 4.7 を見ると 25cm 深さ地点は常に他の層よ

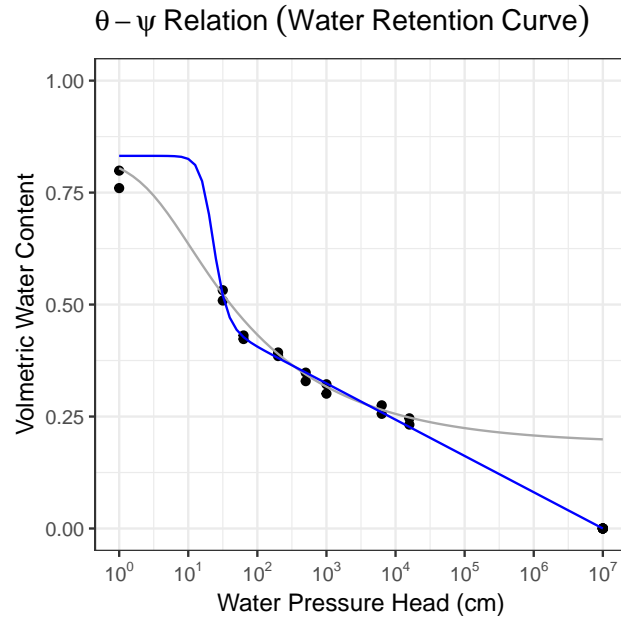


図 4.5 ケヤキ試験体からサンプリングした土壌の水分特性曲線。青線が Fayer モデル。参考のために van Genuchten モデルの推定結果も併せて示すが、残留水分の存在を仮定する van Genuchten モデル（灰線）では乾燥域がうまく表現されていないことが分かる。

りも乾燥しており、35cm 深さ地点も灌水直後において 5, 15, 45cm 深さ地点よりも乾燥していることが分かる。第 2 章で述べたように、実験では土壌表面から灌水していたので、仮に土壌空隙が一様であれば理論上は、灌水直後は上部から順に浸透し Green-Ampt 式 [139] が示すように全ての層で含水率は一様化するはずであり、また重力排水段階では上層部から順に乾燥していくはずである。5, 15, 45cm 深さ地点の含水率変化はほぼ理論通りだが、25, 35cm 深さ地点では異なった振る舞いを示していた。以上から、鉛直 1 次元的な拡散（式 4.15）として表現できるのは、5, 15, 45cm 深さ地点のみと考えられたので、この 3 点の値（3 個分の Control Volume）を使って、以下に示す離散化した Richards 式から透水係数と含水率の関係を得た後、最小二乗法で Mualem モデルパラメータ ($K_{s.sat}, l$) を推定した。

$$\frac{\Delta z_{0-10} (\theta_5^{t+\Delta t} - \theta_5^t)}{2\Delta t} = -\overline{K_{5-15}} \left(\frac{\overline{\psi_5} - \overline{\psi_{15}}}{\Delta z_{5-15}} + 1 \right) + I \quad (4.19)$$

$$\frac{\Delta z_{10-40} (\theta_{15}^{t+\Delta t} - \theta_{15}^t)}{2\Delta t} = \overline{K_{5-15}} \left(\frac{\overline{\psi_5} - \overline{\psi_{15}}}{\Delta z_{5-15}} + 1 \right) - \overline{K_{15-45}} \left(\frac{\overline{\psi_{15}} - \overline{\psi_{45}}}{\Delta z_{15-45}} + 1 \right) \quad (4.20)$$

$$\overline{K_{45}} = Dr \quad (4.21)$$

ここで、 I : 灌水量 [cm s^{-1}], Dr : 排水量 [cm s^{-1}] (2.3.2 項参照) である。Control Volume

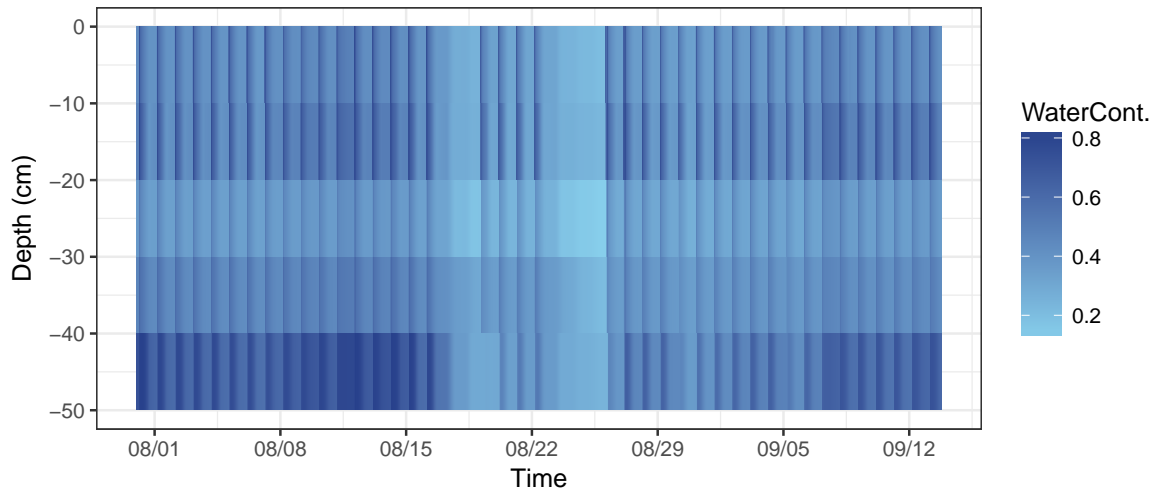


図 4.6 ADR センサーによる含水率計測値 (2010 年).

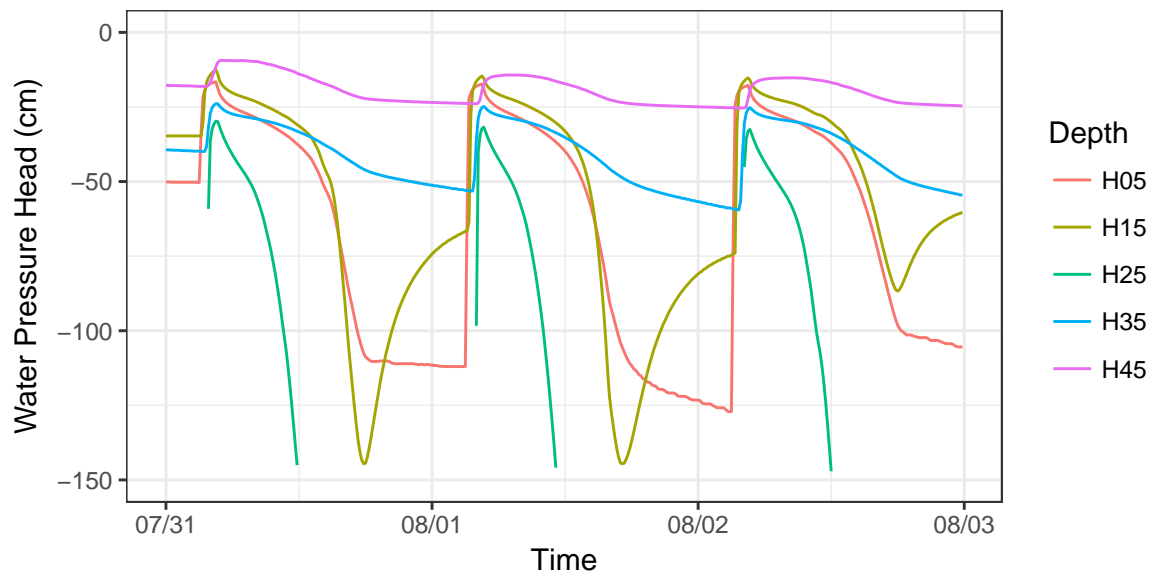


図 4.7 ADR センサーによる含水率計測値 (図 4.6) と水分特性曲線 (図 4.5) から計算した圧力水頭.

界面の透水係数の計算には上流法を用い、下端境界は重力排水を仮定している。含水率計測において記録間隔が 10 分であったため、 $\Delta t = 10[\text{min}]$ であり、上線は時間平均を表す。使用した計測データは図 4.6 の範囲である。

結果を図 4.8-4.10, 表 4.1 に示す。深さ 5-15cm, 15-45cm 間の透水係数は比較的上手く推定することができたが、45cm 地点では値の著しいばらつきが見られた (表 4.1)。原因としては、下端境界の実際の条件とのずれが考えられる。図 2.7 に示したように土壌の下にはコンテナの底が存在しているため、即座に排水されていなかった可能性が高い。こ

表 4.1 Mualem モデルパラメーター推定値 (Mean \pm SE).

深さ	$K_{s,sat} \times 10^{-3} [\text{cm s}^{-1}]$	$l [-]$
5-15	5.4 ± 0.1	3.3 ± 0.7
15-45	3.8 ± 0.2	2.6 ± 0.36
45	0.99 ± 0.01	3.4 ± 1.7

これは図 4.6 において、45cm 地点の含水率が常に高い値を示していたことから伺える。推定された飽和透水係数 $K_{s,sat}$ は、関東ロームの既往研究 [76] と同オーダーであり、また、表層部ほど値が大きくなっている (表 4.1)。森林土壌を対象とした既往研究において、樹木の根が透水係数を高めることが報告されていること [138]、第 2 章で根の吸水量に由来すると考えられる土壌含水率の鉛直分布が確認されたことから判断しても、妥当な結果が得られたと考えられる。

4.5 提案モデルによる灌水停止実験の再現性評価

樹木蒸散モデルの組合せは、以下の 6 種について検討した。

1. Jarvis 型 + 根の分布を無視
2. Jarvis 型 + 指数分布型の根
3. BMF 型 + SR + 根の分布を無視
4. BMF 型 + SR + 指数分布型の根
5. BMF 型 + RC + 根の分布を無視
6. BMF 型 + RC + 指数分布型の根

4.5.1 数値計算条件と樹木モデルパラメータ

数値計算条件および計算に用いた樹木・土壌のパラメータを表 4.2 に示す。有限体積法・完全陰解法で離散化し、Mixed-Form の Richards 式 (Celia, Bouloutas & Zarba, 1990 [140]) を計算した。実験に用いたケヤキ供試木の土壌は断熱カバーで覆われており、1 日を通して温度変化は 1°C 以下であることが確認されたため、計算は等温条件とした。また、本節では土壌水分への応答のみに着目するため、樹冠内放射伝達・乱流輸送は計算しなかった。

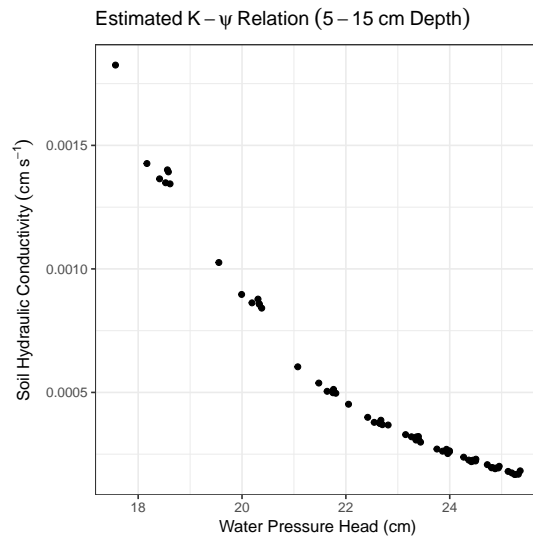


図 4.8 深さ 5-15cm 間の透水係数.

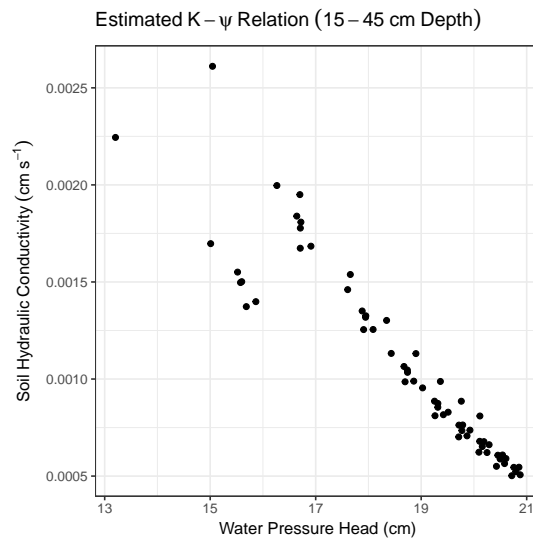


図 4.9 深さ 15-45cm 間の透水係数.

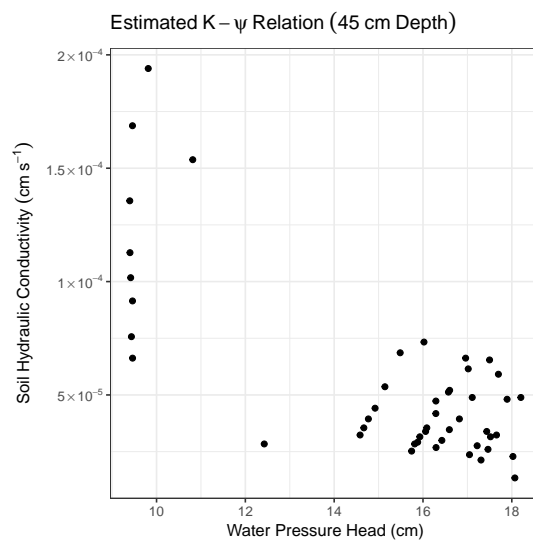


図 4.10 深さ 45cm 地点 (底部) の透水係数.

表 4.2 数値計算条件

離散化手法	有限体積法・完全陰解法
計算領域	50cm ($\Delta z = 1\text{cm}$)
計算時間	4日 ($\Delta t = 10^{-4}\text{-}3600\text{s}$)
Richards 式の解法	Mixed-Form
透水係数の平均化手法	上流法
初期含水率	45% 一様
上端・下端境界	ゼロフラックス・重力排水

表 4.3 主要なモデルパラメータ.

土壌容積	0.5 [m ³]
θ_{sat}	0.83 [-]
θ_a	0.57 [-]
a	0.047 [-]
n	4.87 [-]
k_p	1.6 [$\mu \text{ mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$]
π_e	2.5 [MPa]
$r_{pa} : r_{pb}$	6:4
χ	0.3 [$\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}\text{MPa}^{-1}$]
β_1	0.35 [-]
β_2	0.97 [-]
β_3	544 [$\mu \text{ E m}^{-2}\text{s}^{-1}$]
β_4	6.0 [-]
β_5	1.5 [MPa]
β_6	0.97 [-]

4.5.2 計算結果と考察

結果を図 4.11 に示す。根分布を無視したモデル 1, 3, 5 は、分布を考慮したものに比べ乾燥応答が急激だった。これは r_s (あるいは Jarvis モデルの土壌ストレス関数 ψ_s の非線形性が原因である。つまり、根に空間分布があると根量の多い層から順番に乾燥し、吸水が止まるために非線形性が緩和された結果とみなせる。根の空間分布の影響は、特に 1.

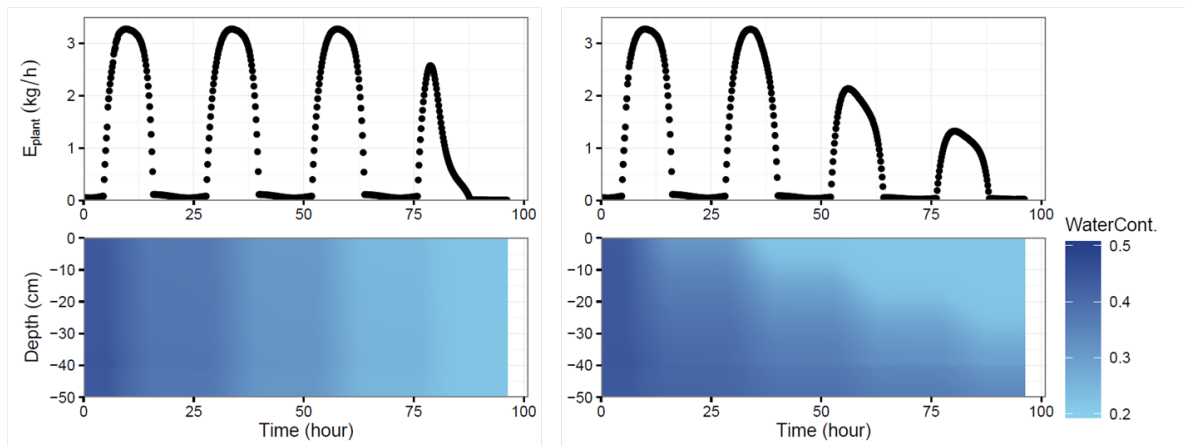


図 4.11 Jarvis 型，根の分布を無視したもの（左）と考慮したもの（右）

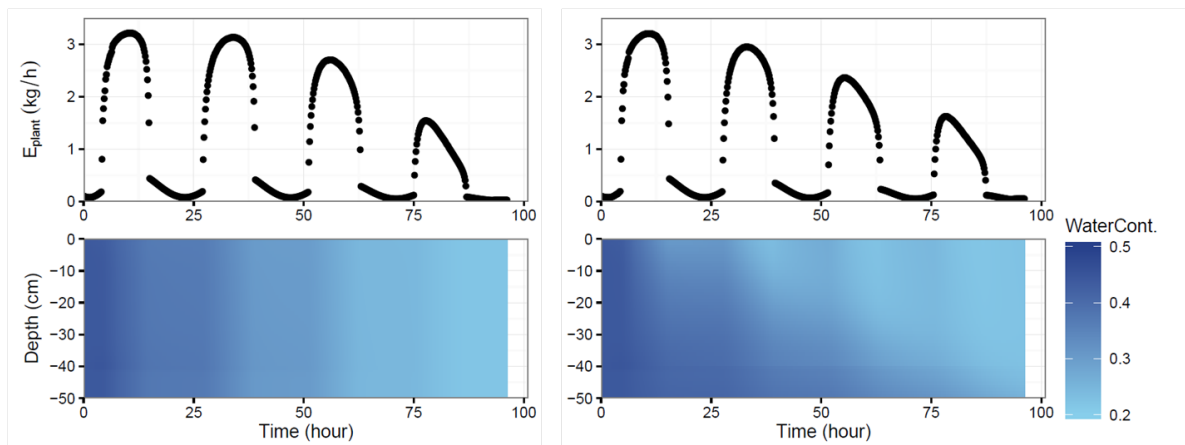


図 4.12 BMF + RC 型，根の分布を無視したもの（左）と考慮したもの（右）

と 2. の間で顕著であった。BMF モデルは土壌・大気の乾燥の相互作用を反映するため、独立性を仮定する Jarvis 型に比べより線形的・節約的な挙動（早い段階から気孔閉鎖）を示した。SR モデルを用いた 3. と 4. は全体的に蒸散量を過小評価した。

4.6 まとめ

本章の検討からは、植栽ます等の狭い土壌に植えられた樹木でも根の鉛直分布の考慮が必要な可能性が高い。特に Jarvis 型は根の分布データに要求される精度がより高く、BMF モデルの方が頑健性に優れると言える。SR モデルの過小評価は、根圏土壌の K_s にバルク土壌の値を用いたことが原因と考えられる。Carminati (2013) は根から分泌される保水性を持った粘液が根圏の K_s を高め、乾燥進行時に蒸散量を維持する効果がある

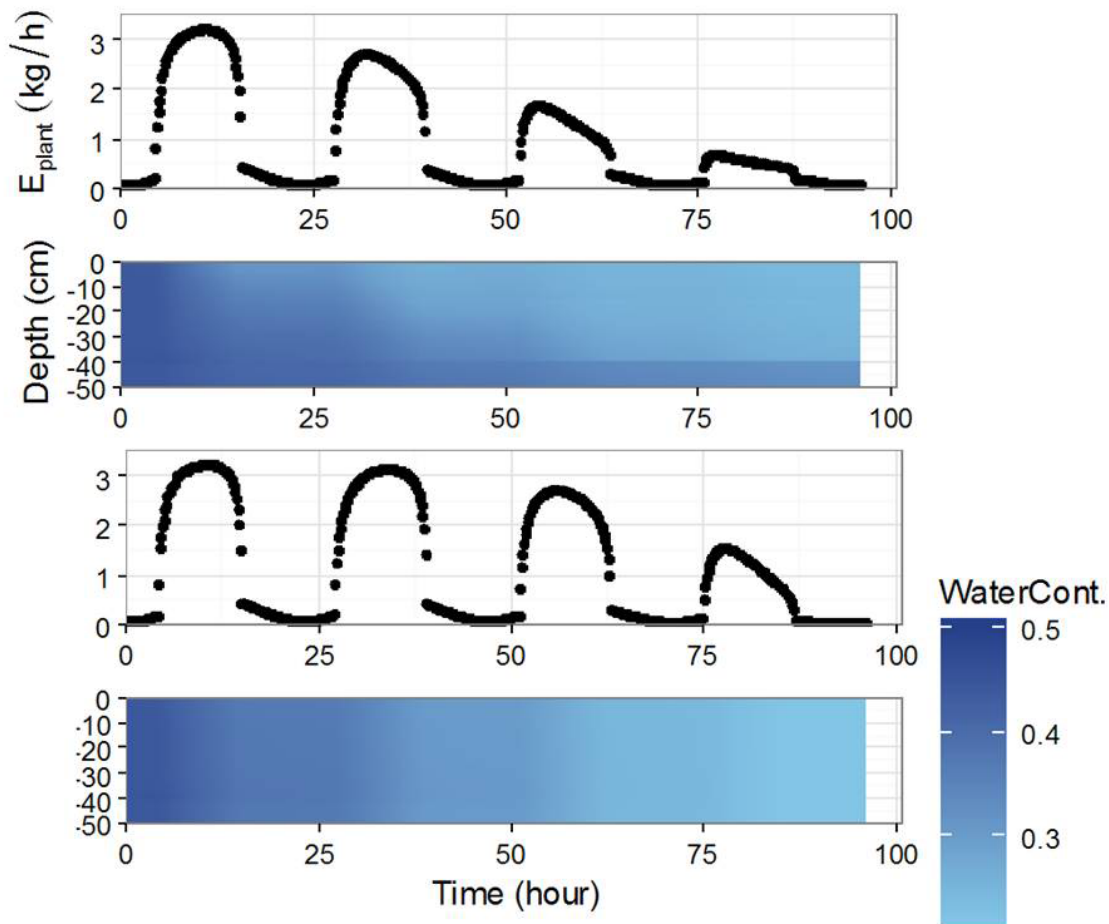


図 4.13 BMF + SR 型, 根の分布を無視したもの (上) と考慮したもの (下)

ことを報告している*¹¹。SR モデルを用いる際には、根圏の K_s が新たに必要となる可能性が示唆される。検討モデルの中では、BMF & RC モデル 5. と 6. が少ないパラメータで良好な結果を得られた。RC モデルの仮定から、本研究で用いた関東ロームのように乾燥時の K_s の低下が顕著でない土壌では BMF & RC モデルが有効と言える。

*¹¹ この粘液は一旦乾燥すると逆に撥水性を示すため、浸潤過程において蒸散量—土壌水分のヒステリシスを生じる原因となることも報告されている

第5章

気孔コンダクタンスパラメータの実用的な定量化方法の提案

5.1 はじめに

本章では、 g_s モデルのパラメータを効率的に定量化するための方法を検討・提案する。第1章で述べたように、 g_s モデルは経験的なパラメタリゼーションに対する依存性が高い。この問題を回避・軽減するためには、前章で検討したようにモデルそのものの頑健性を高めるほかに、計測を効率化することでより多くのデータを集めること容易化するという対策も有効と考えられる。本章では、複数ある g_s モデルパラメータについて、計測の方法に対する依存度と、最終的な予測対象である潜熱フラックスに対する影響力を検討して、将来的な計測・実態把握の助けとなるような知見を得ることを目的とする。具体的には、第2章で言及した既存の単木スケール蒸散量の計測方法である樹液流法を効果的に利用することと、都市緑化樹木において重要となる放射環境の空間分布を考慮することの2点を念頭に置いた検討を行う。なお、パラメタライズする g_s モデルは前章で提案した BMF & RC モデルを用いるが、本章での検討は他の g_s モデル、例えば Jarvis 型や Ball 型のモデルを活用する際にも有用な知見であると考えられる。

5.2 都市熱環境シミュレーションのための気孔コンダクタンスパラメータの実用的な定量化方法

5.2.1 Leuning et al. (2008), Komatsu et al. (2015) のレビュー

蒸発散モデルをいかに効率的にパラメタライズするかという問題は、過去の植生フラックス研究においても常に高い関心が寄せられてきた。その多くは時間的・空間的スケール

において本研究の想定対象とする都市緑化樹木とは隔たりがあるが、本節ではその中でも比較的最近の研究である Leuning et al. (2008) と Komatsu et al. (2015) についてレビューし、本研究においても応用できる点および、新たな考慮が必要と考えられる問題を検討していく。

Leuning et al. (2008) は、植生タイプや気候区分の異なる世界各地の 15 か所のフラックスタワーでの熱フラックス観測結果と MODIS リモートセンシングによる LAI 推定結果を基に、キャノピー・土壌の 2 ソースモデルを用いて、モデルパラメータの相対的重要性を評価している [141]。検討されたパラメータは最大気孔コンダクタンス g_{smax} 、PAR と飽差に対する Jarvis 型モデルパラメータ、PAR と正味放射に対する吸光係数、平衡蒸発量に対する土壌蒸発量の比（可能蒸発量比）の合計 6 つである。空間分解能は km オーダー、時間分解能は日単位、使用したフラックスデータは 2-3 年分である。分析の結果、 g_{smax} と土壌の可能蒸発量比の 2 つさえサイトごとに較正すれば、残りの 4 パラメータは全てのサイトでの平均値を使用したとしても、多くのサイトで十分な精度（観測値に対する $R^2 > 0.8$ ）で潜熱フラックスが予測できたが、疎なサバンナでは精度が低かったと報告している。

Komatsu et al. (2015) は日本のスギ・ヒノキ林 14 サイトでの Granier 法による蒸散量計測結果に対して、強制蒸発を仮定した上で Jarvis 型の気孔コンダクタンスモデル（ストレス変数は日射、飽差、気温の 3 つ）を用い、モデルパラメータ集約可能性を検討している [142]。こちらも時間分解能は日単位である。その結果、幹直径と立木密度について各サイト固有の値を利用すれば、他のパラメータは全て共通のものを用いても、各サイト個別のキャリブレーションを行った場合に比べて予測精度の低下は顕著でない、という結果を報告している。

Leuning et al. (2008) と Komatsu et al. (2015) に共通した結果として、以下のことが言える。

- g_{sref} , LAI, 土壌の可能蒸発量比、辺材面積と立木密度といった、最大蒸発能力を決めるパラメータの相対的重要性は高く、サイトごとの較正を行う価値が高い。
- いずれも群落スケール、日単位スケールの蒸発散から得られた結果である。
- Jarvis 型モデル（植物生理レベル）における気象条件への応答パラメータのサイト差が日蒸散量に与える影響は、少なくとも群落スケールにおいては大きくない。これが各パラメータのばらつきが小さかったことによる結果なのか、各パラメータの日蒸散量に対する感度がそもそも低かった結果なのか、あるいは日単位という時間スケールで平均化されたことによる結果なのかは明らかでない。

本章では、樹木の最大蒸散能力の個体（サイト）差だけを考慮し、環境条件への応答特性を平均化するという Leuning-Komatsu 流のパラメタリゼーション方法（以下、L-K パ

ラメタリゼーション)が, 単木・時間単位の変化を議論する上でも有用であるか否かを明らかにすることを第一の目的とする. 第2章で述べたように樹液流法は時間分解能に劣るという問題を有するが, 日単位の蒸散量は比較的正確に計測可能である. したがってもし仮に L-K パラメタリゼーションが単木・時間単位においても有効であるならば, 樹液流センサーを用いて日蒸散量(最大蒸散能力)を評価し, 時間単位の気象条件変化に対する応答特性については既存の文献値などを利用することによって, 効率的に単木の蒸散特性を把握・評価できるようになる, という可能性が想像できる.

また, 都市緑化樹木において顕在化する可能性の高い問題として, PAR 応答特性をパラメタライズする際の説明変数としてどの指標を用いるか, つまりどの位置で計測された PAR に対してパラメタライズするかによって, 推定されるモデルパラメータが変わり得る(バイアスがかかりうる)という問題が指摘できる. したがって本章の第二の目的として, 単純に水平面で計測された PAR の値と, 地上型 LiDAR の計測から得た LAD 分布と樹冠内の三次元放射伝達モデルを用いて計算した正確な光合成有効放射吸収量(以下, APAR)とそれぞれに対して g_s モデルをフィッティングした際に, パラメータの推定にどれだけのバイアスが生じるのかを検証する.

5.2.2 本研究での Leuning-Komatsu パラメタリゼーションの拡張

本章で使用する BMF モデルは, 土壌が乾燥していない条件では以下のように書ける.

$$g_s = \frac{k_p(\psi_s + \pi_e)}{k_p/\chi\alpha + D} \quad (5.1)$$

$$\alpha = (1 - \beta_1 \exp(PAR/\beta_2)) \quad (5.2)$$

気象条件への環境応答だけに影響するパラメータは, χ, β_1, β_2 の3つであり, 最大蒸散能力を決定するパラメータは k_p, π_e の2つである. 何故ならば, (強制蒸発を仮定して)土壌が湿潤 ($\psi_s = 0$) なときに飽差が非常に大きくなると,

$$E_{max} \sim \lim_{D \rightarrow \infty} g_s D = \lim_{D \rightarrow \infty} \frac{k_p \pi_e}{k_p/\chi\alpha D + 1} = k_p \pi_e \quad (5.3)$$

と書けるからである. ただし一般に, π_e の植物種による違いはそれ程大きくないことが知られる(例えば図 4.2 において, 草地と樹林でも蒸散が止まったときの最小土壌含水率がほぼ等しいことは, 両者の π_e が大きくは異なることを示唆している).

5.3 単木における光合成有効放射吸収量の算出

5.3.1 Voxel Canopy Profiling 法による葉面積密度分布の推定

本研究では, Hosoi & Omasa, 2006 によって提案され [72], 押尾・浅輪 (2016) によって改良された [73], VCP 法によって LAD を推定した. ここではその原理を簡単に述べる.

樹冠を単位体積 (voxel) で分割すると, 各 voxel に含まれる LAD は, 以下のように推定できる [73].

$$LAD = \frac{1}{\Delta H} \frac{\cos(\theta)}{G(\theta)} \sum_{k=1}^N \frac{n_i(k)}{n_i(k) + n_p(k)} \quad (5.4)$$

ここで, ΔH : voxel の高さ, θ : レーザーの天頂角, $G(\theta)$: レーザーに垂直な平面への単位面積の葉の投影面積 (葉面の単位法線ベクトルとレーザー方向の単位ベクトルの内積; 各 voxel の平均的な葉の傾斜角と入射レーザーの平均的な天頂角を用いて計算される), N : voxel 内の層の数, $n_i(k)$: k 層で遮蔽されたレーザーの数, $n_p(k)$: k 層を通過したレーザーの数である.

\sum 以降がレーザーと葉の接触確率 (以下, CF) を表している. 図 5.1 に CF の定義, 図 5.2 に $n_i(k)$, $n_p(k)$ の算出方法を図示する. LAD は葉面積を体積で割った値であるため, 図 5.1 の葉面積と CF の関係を葉面積について解いて, 体積で割ったものが式 5.4 である.

本研究では $n_i(k)$, $n_p(k)$ の算出において, 押尾・浅輪 (2016) によって提案された選択法を用いた. 選択法は 1 本の樹木に対して複数地点 (本研究では東西南北の 4 地点) から LiDAR による計測を行い, 各 voxel について最もレーザー入射率の高かった測定地点から得られた $n_i(k)$, $n_p(k)$ を用いる方法である. 図 5.3 にレーザー入射率の概念を示す. Asawa et al. (2014) では樹高約 6m のケヤキを対象にして, この選択法による LAD 推定結果を刈り取り結果と比較し, 相対誤差 2 割程度で LAD を推定可能であることを示している [71].

$G(\theta)$ はレーザーの天頂角のみの関数となっているが, レーザーの方向に垂直な平面への単位面積の葉の投影面積は, 正確に表すとレーザーの方位角も含まれる.

$$G(\theta, \phi) = \int_0^{2\pi} \int_0^{\pi/2} g(\theta_L) g'(\phi_L) |\mathbf{n}_B \cdot \mathbf{n}_L| d\theta_L d\phi_L \quad (5.5)$$

ϕ : レーザーの方向の天頂角, θ_L : 葉の傾斜角 (葉面の法線ベクトルの天頂角), ϕ_L : 葉面の法線ベクトルの方位角, g : 葉の傾斜角の確率分布関数, g' : 葉の方位角の確率分布関数, \mathbf{n}_B : レーザーの方向の単位ベクトル, \mathbf{n}_L : 葉面の単位法線ベクトルである.

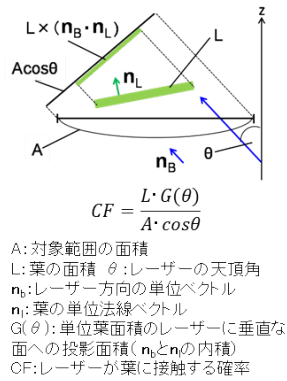


図 5.1 Contact Frequency の定義 [73]

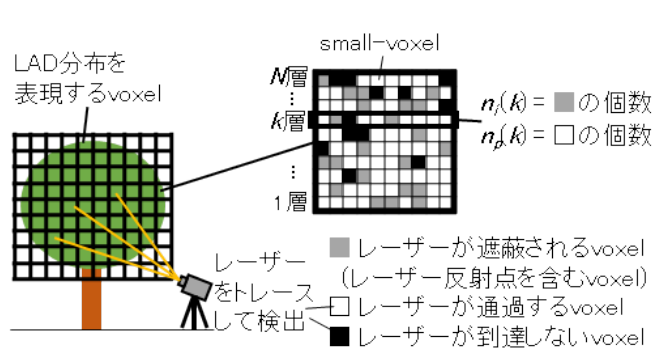


図 5.2 Hosoi et al. (2006) に基づく Voxel Canopy Profiling 法の概念図 [73].

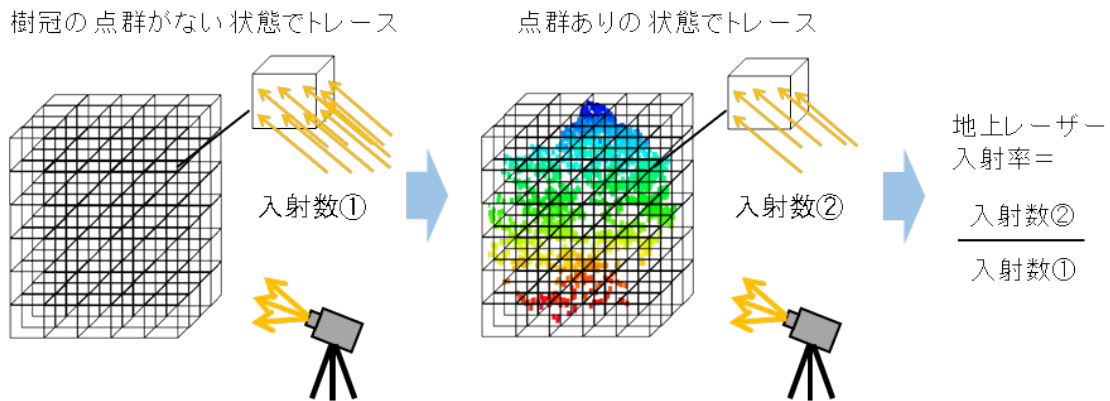


図 5.3 押尾 (2013) によるレーザー入射率の定義 [73].

地上型 LiDAR (VZ-400, RIEGL) の計測は 2012 年 8 月 29 日に行った。第 2 章で取り上げた全ての供試木に対して、各 4 方位、約 5m 離れた位置から計測した。レーザー反射点までの距離の測定精度は 5 mm である。レーザー照射角度の分解能は 0.0005°であり、天頂角と方位角の成分について誤差はほぼないものと見なせる。

5.3.2 植生放射伝達モデル FLiESvox の概要

voxel ベースで LAD を入力し、樹冠による光合成有効放射吸収量 (APAR) を計算するために、Kobayashi & Iwabuchi (2008) による FLiES (Forest Light Environmental Simulator [143]) の voxel 版である FLiESvox を用いた。FLiESvox では任意の LAD 分布に対して、樹冠内の各部位での APAR (および他の波長帯の放射吸収量) を計算できるツールである。voxel サイズは 0.1 m, 0.3 m, 0.5 m, 1.0 m, 2.0 m から選択可能である。枝は放射が透過しない voxel として与えることができ、voxel の内部により小さ

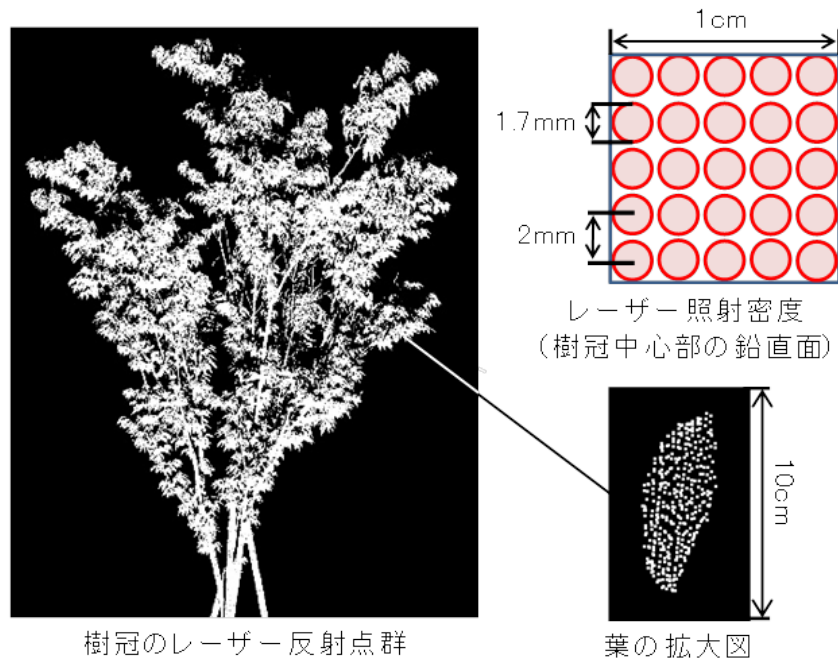


図 5.4 地上型 LiDAR によって計測されたケヤキ供試木.

表 5.1 レーザースキャナー (VZ-400, RIEGL) の仕様

スキャン範囲	鉛直方向 100°(-40 - 60°), 水平方向 360°
角度測定分解能	0.0005°
レーザー波長	1550 nm
レーザービーム径	0.3 mrad (5m の距離で 1.5mm)
測距精度	5 mm
確度	3 mm

な voxel (irregular voxel) として設定することもできる。また, voxel 内の葉の傾きは Bunnik (1978) の葉の傾斜角分布関数 [144] の中から, 極座標球面上一様分布, 水平葉型, 鉛直葉型の 3 種類を選択することができる。

各 voxel の PAR の直達成分の吸収量は, 樹冠内での放射減衰が Lambert-Beer 則 (以下, Beer 則) に従うことを仮定すると以下のように算出される。

$$APAR_{dir}(\theta_s) = I_0 u \frac{G(\theta_s)}{\cos \theta_s} (1 - f_{dif}) \exp(-\sqrt{\mu} \tau(\theta_s, \phi_s)) \quad (5.6)$$

ここで, $APAR_{dir}$:直達 PAR の吸収量 [W m^{-2}], θ_s :太陽天頂角 [$^\circ$], ϕ_s :太陽方位角 [$^\circ$], I_0 :樹冠上端から見た PAR フラックス [W m^{-2}], u :LAD [$\text{m}^2 \text{m}^{-3}$], $G(\theta_s)$:G 関数 [-],

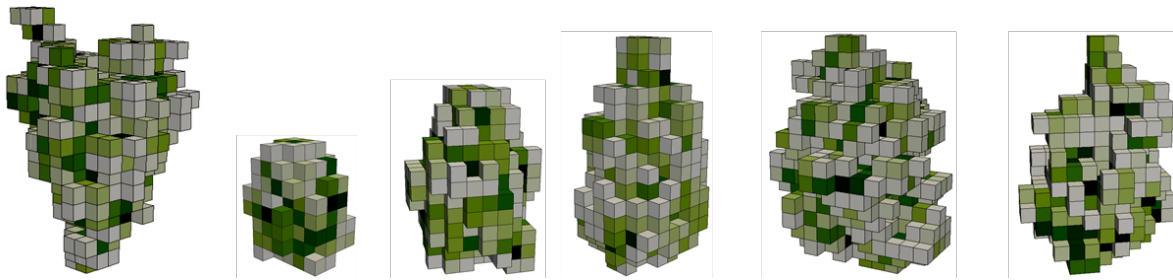


図 5.5 各樹種の LAD 分布推定値. 左から, ケヤキ, シデコブシ, クスノキ, シラカシ, ソメイヨシノ, イチョウである. voxel サイズは全て 30cm である.

f_{dif} : PAR の散乱成分の比率 [-], μ : 葉の PAR 吸収率 [-], τ : 光学的深さ [-] である.

また, PAR の天空成分は, 式 5.6 を半球方向に積分した形で算出される.

$$APAR_{dif} = I_0 u f_{dif} \int_0^{2\pi} \int_0^{\pi/2} \exp(-\sqrt{\mu}\tau(\theta_s, \phi_s)) w(\theta_s, \phi_s) \cos \theta \sin \theta d\theta d\phi \quad (5.7)$$

ここで, w : PAR の天空成分の異方性を表す関数である.

通常の Beer 則とは異なり, 式 5.6, 5.7 では光学的深さ τ に $\sqrt{\mu}$ が乗じられているが, これは樹冠内での透過・散乱の影響を考慮するために Goudriaan (1977) によって提案された経験的補正である [145].

5.3.3 6 樹種の葉面積密度・光合成有効放射吸収量の分布

本研究の第 3 章で扱った 11 樹種の内, ケヤキ (*Zelkova serrata*), シラカシ (*Quercus myrsinifolia*), ソメイヨシノ (*Cerasus x yedoensis*), イチョウ (*Ginkgo biloba*), クスノキ (*Cinnamomum camphora*), シデコブシ (*Magnolia stellata*) の 6 樹種を対象として, LAD と APAR の計算を行った. 各樹種の LAD 分布は前節の VCP 法による推定結果を用いた. 葉面傾斜角は LiDAR 点群データ上で樹冠を上・中・下層に分け, 各層から 30 枚ずつ目視で読み取った結果を基に, 最も近い傾斜角分布を選んだ.

樹種の選定は, 以下のように, 蒸散量と樹冠形状に多様性が出るように選んだ. 樹冠形態について, LAD の三次元分布を図 5.5 に示す.

- 蒸散量の多かったケヤキ (2010 年) とクスノキ
- 蒸散量の少なかったシラカシ (2012 年) とシデコブシ
- ケヤキは樹冠上部に葉が多く, イチョウは下部に葉が多い. クスノキとシデコブシは樹高・投影面積が小さい. ソメイヨシノは投影面積が大きく, 葉が枝周りに集中してついているという形態的特徴がある.

また, シデコブシ以外の 5 種については, 日本の街路樹として数が多いという点も考慮し

た (1 位 : イチョウ, 2 位 : ソメイヨシノ, 3 位 : ケヤキ, 6 位 : クスノキ, 13 位 : シラカシ).

図 5.6, 5.7 にレーザー入射率と式 5.4 によって推定した LAD の分布を展開図として示す. voxel サイズは全て 30cm である. また, 図 5.8 に, 6 樹種における APAR の日変化を示す. 計算対象日は, ケヤキは 2010 年 8 月 21 日, その他の 5 種は第 3 章で蒸散計測を行っていた期間内 (2012 年 7 月 29 日から 8 月 25 日まで) における典型的な晴天・灌水日である. また, 全天日射量の圃場計測値を計算の際の入力条件とした.

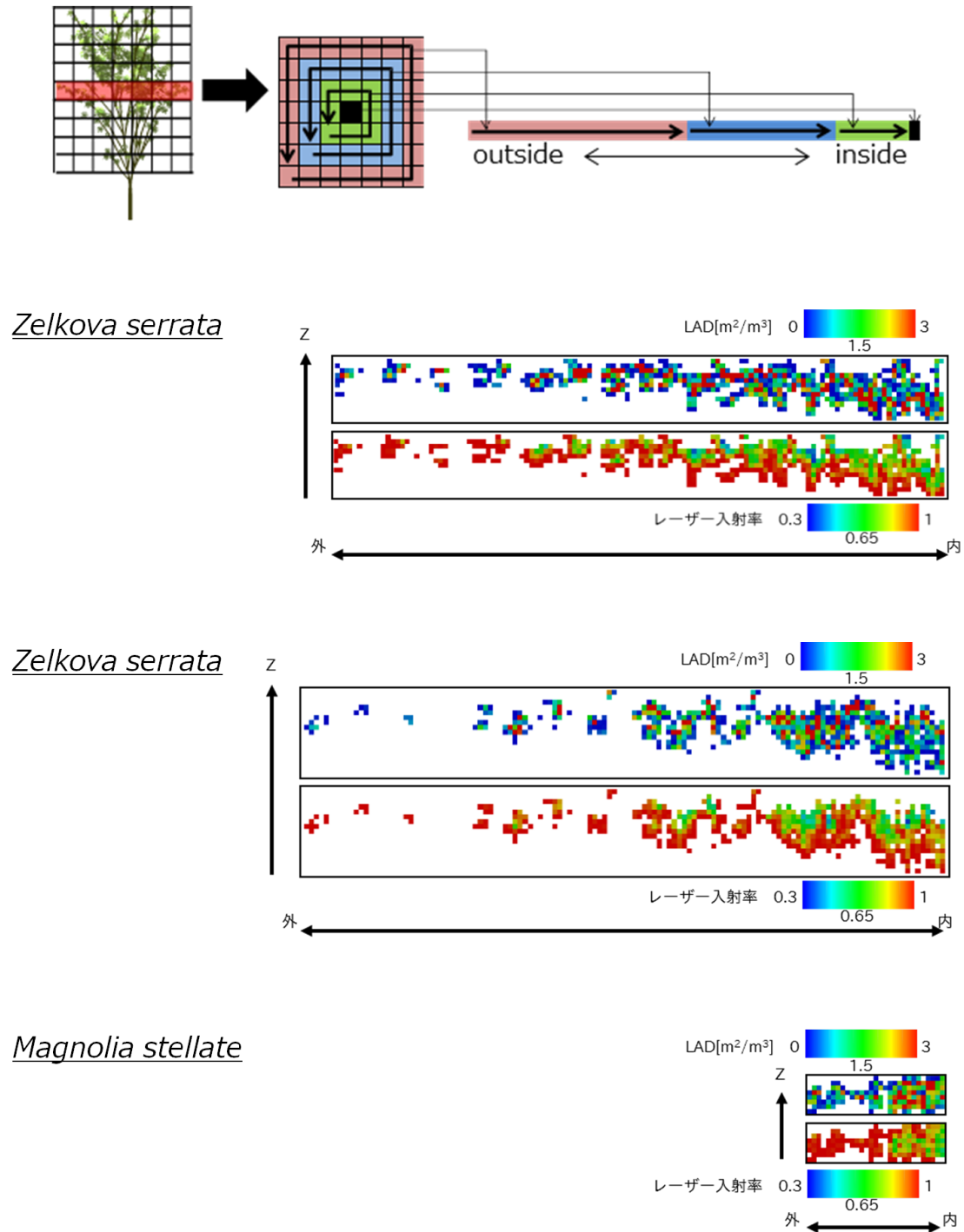


図 5.6 レーザー入射率と LAD 分布推定値. 上から順に, 検証用に刈り取りに使用したケヤキ, 蒸散計測対象のケヤキ, シデコブシである.

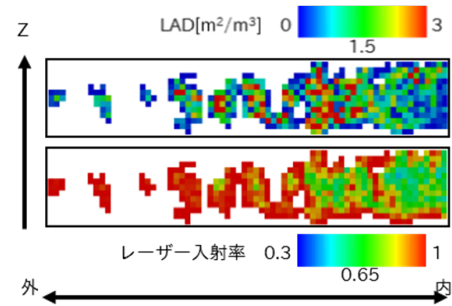
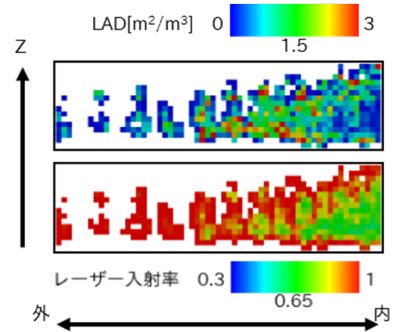
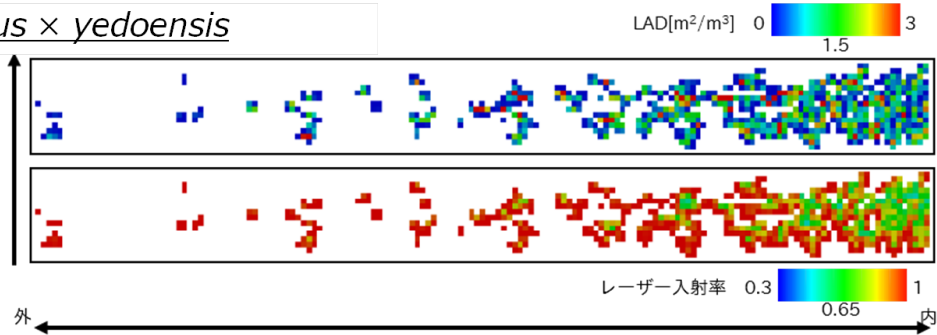
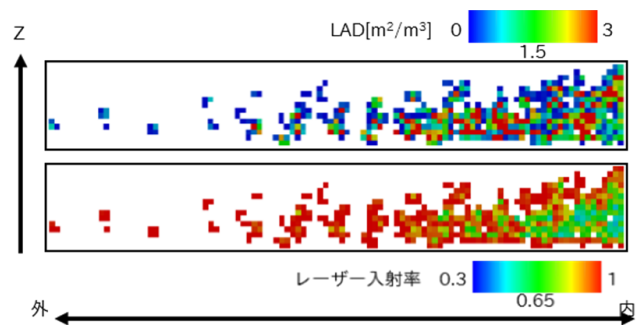
Cinnamomum camphora*Quercus myrsinifolia**Cerasus × yedoensis**Ginkgo biloba*

図 5.7 図 5.6 と同様。上から順に、クスノキ、シラカシ、ソメイヨシノ、イチョウである。

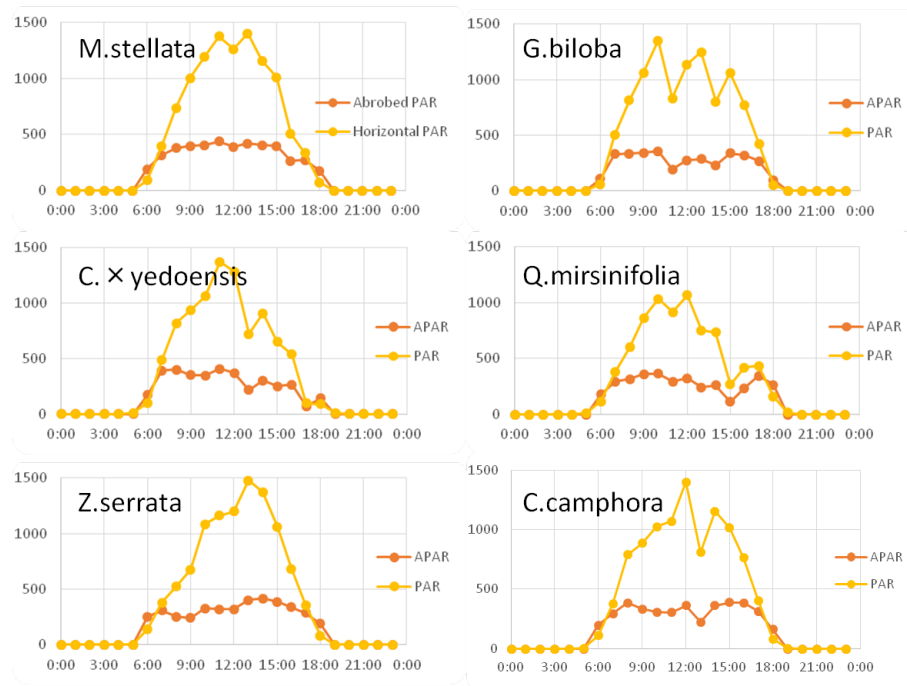


図 5.8 6 樹種の単位葉面積あたりの平均 APAR と水平面での計測値. 単位は $\mu\text{mol m}^{-2}(\text{leaf or ground}) \text{s}^{-1}$ である.

各供試木の APAR の値は、日の出直後や日没前を除き、水平面で計測された PAR の値に比較して小さな値となった。これは主に葉の傾斜と相互非陰の結果と考えられ、正午においても $500\mu\text{mol m}^{-2}(\text{leaf}) \text{s}^{-1}$ 程度の値であり、孤立条件では日中の APAR はほとんど横ばいになっている。

図 5.9 に正午における樹冠内の単位体積当たりの APAR 空間分布を示す。南面上部での吸収量が大きめだが、葉が少ない樹冠の外側ではあまり吸収されず、樹冠形状によっては内部まで PAR が侵入していることがわかる。

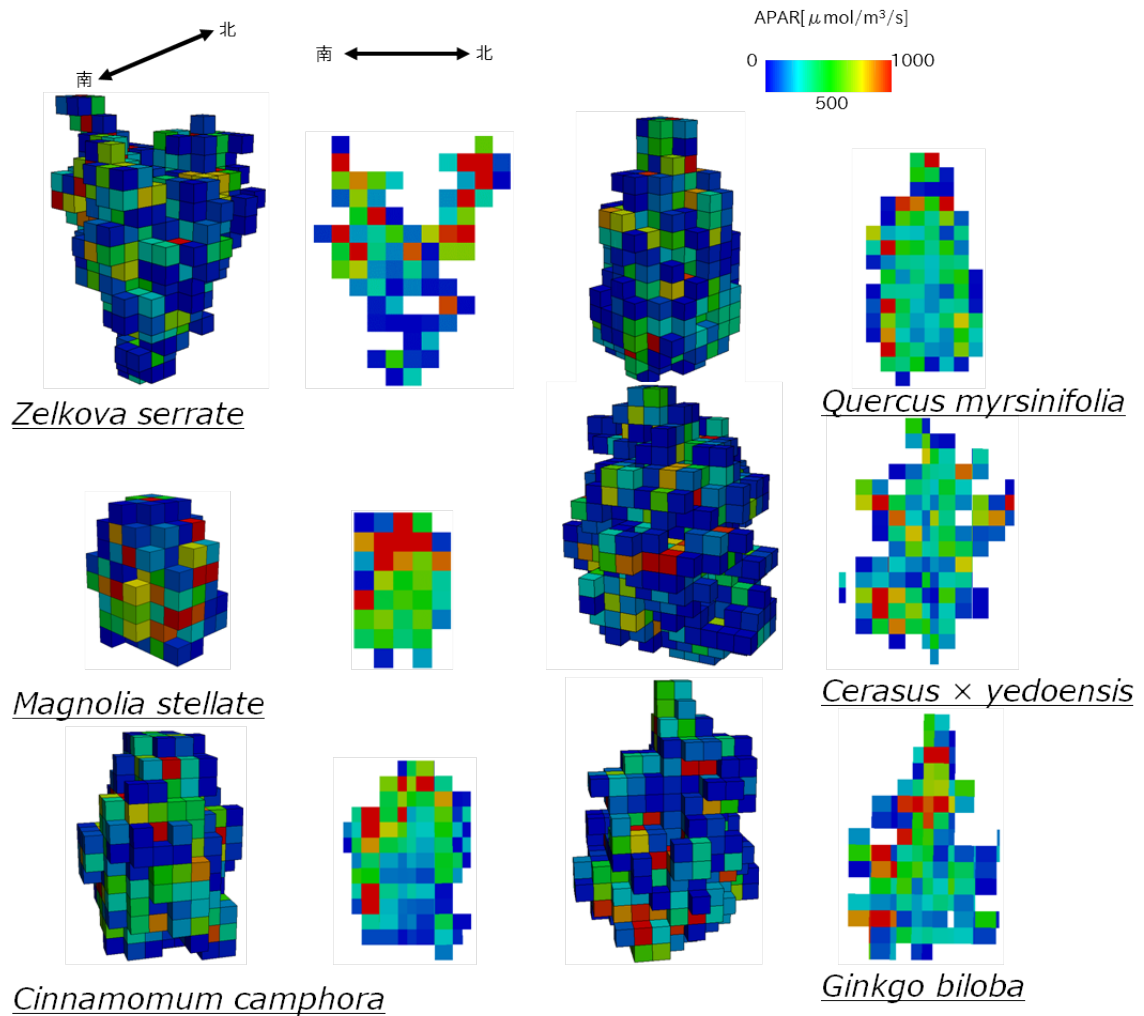


図 5.9 6 樹種の APAR 分布計算値. 図 5.8 の正午における空間分布.

5.4 パラメタリゼーション方法の違いが蒸散予測に与える影響の分析

図 5.8 に示された通り，樹冠形状を考慮した場合としない場合（水平面の計測値）では，一日の間の時間変化パターンに非常に大きな違いが生じる．ここでは樹冠形状を考慮した APAR と水平面での計測値の 2 種類の放射環境指標の違いが， g_s モデルのパラメタリゼーションにおいてどの程度の影響を持つかを検証する．また本章冒頭で述べた通り，単木・時間スケールでの L-K パラメタリゼーションの有効性の検討も行う．したがって本

節では、以下の4つのパラメタリゼーション方法による蒸散量予測結果を比較した*1。

1. Full モデル—全ての g_s パラメーターについて、各供試木に固有の値を用いる。最も正確で最もコストの高いモデル。
2. Minimal モデル—最大蒸散能力を表すパラメーターのみ各供試木固有の値を用い、気象条件への応答特性は6樹種分の平均値を用いる。
3. Null モデル—全ての g_s パラメーターについて6樹種分の平均値を用いる。
4. Flat モデル—パラメタライズの際には水平面での PAR 計測値を用い、蒸散量予測の段階では APAR を用いたモデル。

Flat モデルで蒸散予測する際に APAR を用いるのは、建築分野の都市熱環境シミュレーションでは放射環境の3次元分布を考慮することが一般的なためである。

図 5.10 に、上述の4種のパラメタリゼーション方法による蒸散量予測結果を、また表 5.2 に各供試木固有の g_s モデルパラメーターと総葉面積を示す。図 5.10 の結果から、Minimal モデルはケヤキ (Z.s) において最大で約 1kg h^{-1} 、日平均では約 0.6kg h^{-1} の誤差を生じていたが、他の5樹種に対する誤差は 0.5kg h^{-1} 以下という結果になった。Null モデルや Flat モデルはケヤキ以外の樹種においても 1kg h^{-1} 以上の誤差を生じていた。

シデコブシ (M.s) において全てのモデルで誤差が小さいのは、この供試木の葉面積が小さかったためである (表 5.2)。ケヤキで誤差が大きかったことは Full モデルを含めた全てのモデルで共通であり、時間変化パターンが再現できていない。一因としては葉面飽差による乾燥ストレスが再現されていないことが影響していた可能性が挙げられる。

図 5.11 に、Full, Minimal, Null モデルによって計算された気孔コンダクタンスの差異を示す。Minimal モデルは Null モデルに比べて誤差が小さいこと及び、Full モデルとの差が主に朝と夕方に生じていたことが分かる。蒸散予測 (図 5.10) においては朝や夕方でも Full モデルと Minimal モデルの誤差が小さかったことの原因として、蒸発の駆動力となる飽差が小さかったことが挙げられる。したがって、PAR への応答特性を平均化した Minimal モデルでは放射環境の変化が大きな朝夕において正確なコンダクタンス予測はできないが、蒸散量の予測だけが目的であり、コンダクタンスの値そのものの予測は目的でない場合においては、Minimal モデル (L-K パラメタリゼーション) は有効と考えられる。

*1 なお、本節の第一目的はパラメタリゼーション方法間の違いの検討であるために放射計算は PAR に対してのみ行った。したがって葉温・葉面飽差の正確な予測は出来ておらず、推定された g_s パラメータにもバイアスが生じている。正確な g_s パラメータの算出は今後の課題とする。

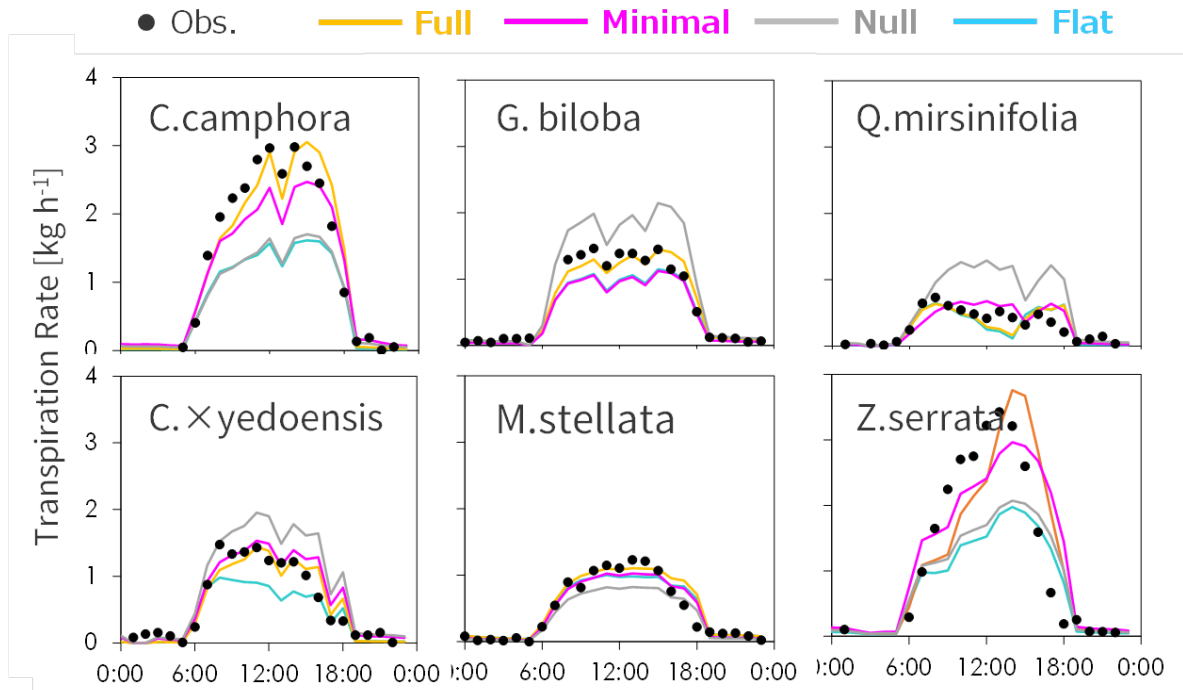


図 5.10 4 種のパラメタリゼーション方法の比較結果.

表 5.2 6 樹種固有の g_s パラメータ推定結果. 表中の値は放射環境の指標として樹冠の三次元性を考慮した APAR を用いて求めたものである.

	Leaf Area (m ²)	k	π_e	χ	β_1	β_2
クスノキ (<i>C.c</i>)	14.4	2.77	2.5	0.15	0.98	188
ソメイヨシノ (<i>C.× y</i>)	16.2	0.10	0.98	0.1	0.983	303
イチョウ (<i>G.b</i>)	18.8	0.94	1.4	0.11	0.88	135
シデコブシ (<i>Q.s</i>)	6.2	2.31	1.6	0.13	0.88	175
シラカシ (<i>Q.m</i>)	11.6	0.95	1.5	0.05	0.98	82.4
ケヤキ (<i>Z. s</i>)	16.7	2.72	2.0	0.16	0.93	400

5.5 まとめ

計測・実態把握を効率化するためのパラメタリゼーション方法として、最大蒸散量を決めるパラメータだけ個体ごとの値を用いて環境条件への応答を平均化する、Leuning et al. (2008), Komatsu et al. (2015) の方法を検討した。この方法は既往研究において日単位・群落スケールでは有効性が確認されていたが、本章の検討によって、単木スケール・

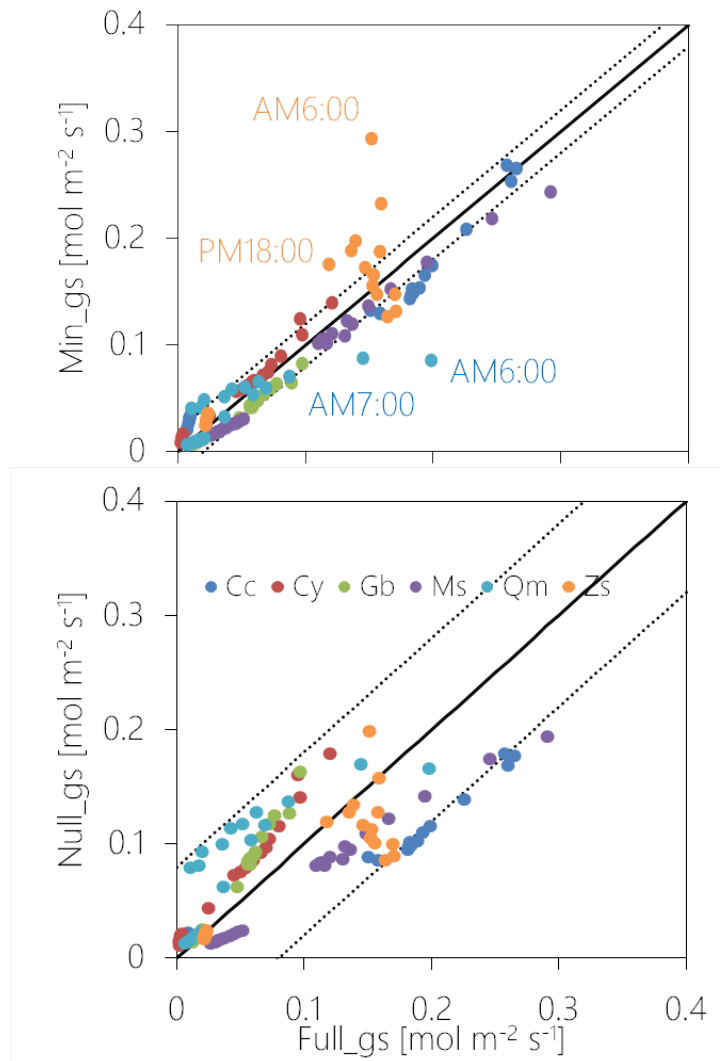


図 5.11 Full, Minimal, Null モデルによって計算された気孔コンダクタンス。

時間変化を議論する上でも有用である可能性が高いことが示された。

また、放射環境の三次元性を無視することが気孔コンダクタンスモデルパラメータの推定に与えるバイアスについての検討からは、水平面で計測された放射量に対して気孔コンダクタンスモデルパラメータをフィッティングすることが、蒸散量の大幅な過小評価につながることを示した。

今後、都市緑化樹木などの蒸散量を計測する上では、樹冠形状の計測と共に樹液流法などによる日蒸散量の計測を優先して行うことで、効率的な実態把握が可能になると考えられる。

本研究では放射環境の比較において、最も簡単な場合である水平面の値と、可能な限り実際の樹冠に近い三次元 LAD 分布を再現した吸収量での計算を行ったが、工学的実用性

の観点からは、より中間的な方法、たとえば LAD の分布は考慮せずに回転楕円体などで樹形を近似し、LAD を一様した場合などの場合において、気孔コンダクタンスモデルパラメータにどの程度の誤差が生じるのかを検討することも有用と考えられる。

本章の第一目的はパラメタリゼーション方法間の違いの検討であるために、放射計算は PAR に対してのみ行った。したがって葉温・葉面飽差の正確な予測は出来ておらず、推定された g_s パラメータにもバイアスが生じている。各パラメータを植物生理学分野の既往研究と比較し、その平均や分散を議論することは、特に応用上は重要と考えられるが、正確な g_s パラメータの算出は今後の課題とする。

第6章

蒸発散による緑化空間の熱環境緩和効果の予測評価

6.1 はじめに

本章では、前章までに把握・構築した都市緑化樹木の蒸散モデルと植物生理パラメータ（気孔コンダクタンスパラメータ）を利用して、都市緑化樹木の蒸発散による熱環境緩和効果を予測評価する。ここで対象とする都市緑化樹木とは、前章までに扱ってきたものと同様に、街路樹や庭木、屋上緑化樹木を想定した、土壌容積に制限のある環境で生育した個体である。また、予測期間は夏季における数か月程度の範囲内での短期予測であり、樹木の生長や枯死、フェノロジー（生物現象としての気孔コンダクタンスパラメータや葉面積の変化）といった現象は取り扱わない。

人間の熱的快適性を評価する上では、放射環境と気流環境の2つが環境物理要素の中では特に重要であることは古くからよく知られている (Parsons, 2003 [146])—あるいは日常的に体感しているが、ここではその詳細な取扱い^{*1}、あるいは要素間の比較^{*2}は行わない。本章で行う予測評価の目的は、「水（蒸発散）を活用した緑化空間を設計したいと考えた際に、どのような材料・空間構成が効果的であるかを明らかにすること」である。より具体的には、第2・3章で得られた蒸散データを基にした場合において、つまり「樹高5-6m程度の街路樹や庭木の蒸発散によってどの程度気温を改善できる可能性があるのか」を定量的に明らかにすることである。

したがって予測対象となる熱環境要素は、第一に緑化空間（樹木と土壌）における熱・水収支であり、第二に、その熱・水収支の結果から決まる樹木周辺の気温分布である。放

^{*1} 例えば数10cmスケールの三次元的な空間分布や秒単位での風の変動など。

^{*2} SET*などの総合指標において風と放射と水のいずれが重要か？といった議論、あるいはこれらの要素間での費用対効果の議論など。

射と気流は、蒸発散量の決定要因のひとつとして、あるいはどのような条件において蒸発散の温度上昇抑制効果が活かせる可能性が高いかを議論する上での検討要素のひとつとして取り扱う。

6.2 ヒートアイランド緩和と微気候改善における蒸発散の活用方法

本章においては、熱環境の評価指標として主に気温を用いる。その理由は、第一にはそれが指標として体感的に最もわかりやすいからであり、第二には都市緑地のヒートアイランド緩和（蒸発散量の増大）という観点からは優れた研究が既に存在しており（e.g., 神田・日野, 1990; 成田ら, 2006）、どのような空間がよいかわかっていないためである。そして今一つの理由は、ローカルな気温の上昇を抑制するという観点においては、必ずしも蒸発散量が多ければ多いほど良いとは言えないと考えられるために、そのような観点から緑化空間の良し悪しを評価するためには熱・水収支の評価だけでは不十分と考えられるためである。

建築環境工学分野では一般的に、都市スケールでのヒートアイランド現象をいかに抑制・緩和するかという問題と、ローカルな範囲内（例えば街区スケール、地上高さ 1.5m など）における快適性をいかに高めるかという問題は、ある程度別種の問題として検討されてきた（緩和/適応策）。このことは特に、放射環境と気流環境の評価においては、明確に認識されていると思われる*³。一方で、蒸発散の活用については、緩和策と適応策の違いは必ずしも明確には認識されていなかったように思われる。たとえば、日射が完全に遮蔽されていたとすると、蒸発散は殆ど起こらないが、表面温度や気温も増大しない、という事実を踏まえると、蒸発散量を増やすことがローカルな熱環境を改善する上でも最善であるとは必ずしも言えないと考えられる。

樹木周辺での気温低下を報告した研究は数多くあるが、それがどのような原因によって生じたのかは、研究者の間でも意見の相違がある。原因として挙げられるものには、

- 樹木の蒸散効果.
- 樹木の日射遮蔽によって日陰面からの顕熱フラックスが抑制された効果.
- 土壌面からの蒸発による効果.

などがある*⁴。

*³ 例えば、フラクタル日よけは都市の気温を下げないが、そもそも気温を下げることは意図していない、と明確に述べられている（酒井, 2013 [147]）。

*⁴ あるいは放射環境の違いによる体感温度の変化でしかないという指摘、放射環境の違いによる温度計の誤差に過ぎない可能性も否定しきれないという指摘もしばしばなされる。

上述のような問題について、要因ごとの影響を個別に分離して検討するためには、通常、数値シミュレーションが有効である。しかし、熱環境の予測評価という目的においては、土壌—植物—大気系（SPAC）のシミュレーションが行われることは少なかった。理由の一つとして、植物に関するパラメータの取扱いが分かっていなかったこと、またもう一つの理由として、放射・気流・土壌（多孔質材中の熱水分移動）の3要素が、それぞれ単独でも数値計算負荷が高いということが指摘できる。大規模緑地や芝生などを対象にした鉛直一次元モデルであれば全ての要素を扱った研究も少なくないが、（建築分野の熱環境評価に利用できるような）詳細な空間分解能を持たせようとする問題が顕在化する。SPACのシミュレーションは生物学・地球物理学分野を中心に研究されてきたが、SPACの全ての要素について三次元かつ非定常で計算した例は、筆者の知る限りでは存在しない*5。

6.3 SPAC による熱環境シミュレーションの概要

6.3.1 検討の目的と計算条件

前節の考察から、蒸発散を活かした緑化空間の設計指針としては、少なくとも

- ヒートアイランド緩和が目的なのか、ローカルな気温低下が目的なのか。
- どれくらいの頻度で灌水が可能なのか。
- 日射遮蔽はどの程度まで徹底できるか。
- 周辺の風通しはどのようなようであるか。

という項目に応じて多様な形をとり得る可能性があると言える。

SPACによる熱・水収支予測を建築熱環境評価に応用する際に、数値計算の段階で生じる問題の一つとして、水収支と植物の乾燥ストレスを議論しようとする（空間分布はそれほど重要にならないが）数日程度に渡る計算が必要になり、緑化空間の熱環境を議論しようとする詳細な空間分解能が必要になる、という点が挙げられる。

本章においては、時間変化を議論するための計算と、空間変化を議論するための計算は分離して扱う。つまり、鉛直一次元のキャノピーモデルで熱・水収支の非定常計算を行い（6.4節）、その結果に基づいて樹木から発生する顕熱フラックスを決め、樹木周辺の2次元気温分布を定常計算する（6.5節）方法を取り、連成計算は行わない*6。

*5 時空間的な分解能が比較的高い既往研究 (e.g., NEO-SPAM: 神田・日野 [25]; CANOAK-FLiES: Kobayashi & Baldocchi [148]; MAESPA: Duursma & Medlyn [149]; RAFLES: Bohrer & Katul [150]) においても、放射・気流・土壌のいずれかの要素は、研究目的に応じて大胆にパラメータライズするか、定常性などを前提に簡略化している。

*6 この点に関しては今後の課題である。

6.3.2 SPAC の熱・水輸送の基礎方程式と数値モデル

樹木蒸散は第4章の検討を踏まえ、Penman-Monteith式(式4.2-4.5)の気孔コンダクタンスとしてBMF & RCモデル(式4.10, 4.13, 4.14)、葉面境界層コンダクタンスとして楕円板の実験式(式3.2)を用いて表現した。顕熱の葉面境界層コンダクタンス(対流熱伝達率)も同様である。

また、樹冠内の放射伝達計算は第5章で用いたFLiESvoxと同様、Goudriaan(1977)の波長帯別補正を加えたBeer則(式5.6, 式5.7)を用い、各葉群層について日向葉・日陰葉別に熱収支計算を行った。ただし本章では放射伝達は鉛直一次元で取り扱った。葉面傾斜角分布は球面分布とした($G=0.5$)。

ここでは、樹冠内の乱流輸送と、土壌内の熱・水・水蒸気輸送の取扱いについて簡単に説明する。

土壌内の熱・水・水蒸気輸送

通常、水収支上は土壌内での水蒸気移動が問題とされることは少ないが、熱輸送に対しては非常に強い影響力を持つことが知られる。湿潤な土壌では高温部で蒸発・低温部で凝縮することで熱輸送を担うとされる。また、土壌(多孔質材)は乾燥した際には空隙率の高さによる熱伝導率の低さから高温化しやすくなるという性質を持っている。本研究では、各Control Volume中での気相—液相の局所平衡性を仮定した上でRichards式、エネルギー方程式、理想気体の状態方程式を連立して解くPhilip & de Vries(1957)、Campbell et al.(1994)と同様の方法を用いた[151]

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left[(K_s + K_v) \left(\frac{\partial \psi_s}{\partial z} + 1 \right) - D_v h s \frac{\partial T}{\partial z} \right] - S \quad (6.1)$$

$$C' \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left[-\lambda' \frac{\partial T}{\partial z} - \lambda D_v h c_v' \frac{M_w}{RT} \frac{\partial \psi_s}{\partial z} \right] \quad (6.2)$$

ここで、 K_v :水蒸気の透水係数、 D_v :土壌中の水蒸気拡散係数、 h :相対湿度、 s :飽和水蒸気圧曲線の傾き、 C' :土壌粒子と水の合計比熱、 λ' :三相合計の熱伝導率、 c_v' :飽和水蒸気濃度、 M_w :水のモル質量、 R :気体定数である。式6.1は式4.15に対して水蒸気の透水係数 K_v と温度勾配による水蒸気輸送項が加わったものであり、式6.2は通常の熱伝導式に水ポテンシャル勾配による水蒸気移動に伴う熱輸送項が加わり、比熱と熱伝導率が含水率の関数になったものである。

土壌水理特性は、第4章と同様にMualem(1976)とFayer & Simons(1995)の閉形式モデルを用いた(式4.16,4.17)。熱伝導率 λ' にはCampbell et al.(1994)の三相モデル

を用いた (式形略). Campbell モデルは半経験式であるが, 土壌中の粘土割合でパラメタライズされているため, 水分特性曲線が既知であれば追加的なパラメータは不要である.

数値計算では, 有限体積法・完全陰解法で離散化した上で, 式 6.1, 6.2 を逐次的に解き, 樹木蒸散・葉の熱収支と併せて収束計算した*7. 下端境界 (深さ 50cm) は重力排水・温度既知 (26°C) とした.

樹冠内の乱流輸送

6.4 節のキャノピー計算では中立条件を仮定して, K 理論 (勾配拡散近似) と Watanabe & Kondo (1990) の混合距離モデル (0 方程式) を用いた [153].

$$0 = -K_t \frac{d\bar{u}}{dz} + S_u \quad (6.3)$$

$$K_t = l(z)^2 \left| \frac{d\bar{u}}{dz} \right| \quad (6.4)$$

$$l(z) = \begin{cases} \left\{ \begin{aligned} &k \int_0^z \left\{ r \exp \left[- \int_0^r \mu(z-t) dt \right] \mu(z-r) \right\} dr \\ &+ kz \exp \left[- \int_0^z \mu(z-t) dt \right], \\ &\text{where } \left| \frac{dl}{dz} \right| \leq k \end{aligned} \right. & (z \leq h) \\ \left\{ \begin{aligned} &k \int_0^h \left\{ r \exp \left[- \int_0^r \mu(h-t) dt \right] \mu(h-r) \right\} dr \\ &+ kh \exp \left[- \int_0^h \mu(h-t) dt \right] \end{aligned} \right. & (z > h) \end{cases} \quad (6.5)$$

$$S_u = -C_d a \bar{u}^2 \quad (6.6)$$

ここで, u : 水平風速 [m s^{-1}], K_t : 乱流拡散係数 (運動量・熱・水蒸気で共通) [$\text{m}^2 \text{s}^{-1}$], l : 混合距離 [m], k : カルマン定数, C_d : 抵抗係数 [-], a : LAD [$\text{m}^3 \text{m}^{-2}$], $\mu(z) = C_d a(z)/2k^2$ である. 抵抗係数は標準的な値として 0.2 と設定した (Katul et al., 2004 [155]).

K 理論は地上付近の風速の再現性が低いことが知られるが, キャノピー・上空間の熱・物質・運動量フラックスを予測する上では他のモデルに劣らないことも知られ, またモデルとして単純である (Watanabe, 1993 [156]). 特に Watanabe & Kondo (1990) の混合距離モデルは高度と LAD が既知ならば, 抵抗係数以外のパラメータを要しないという利点がある.

*7 キャノピー計算 (6.4 節) では熱・水蒸気の乱流輸送も含めて収束計算した. また, 葉温変化によるキャノピー内長波授受については相対的な影響が小さいことを確認し, 直前のタイムステップの値をそのまま用いた.

6.5節の2次元分布計算では葉の影響を補正した Green (1992) の $k-\epsilon$ モデル (2方程式) を用いて, 連続の式, Navier-Stokes 式, エネルギー方程式, 乱流エネルギーと消散率の輸送方程式を解いた (非圧縮・Boussinesq 近似).

$$\frac{\partial u_j}{\partial x_j} = 0 \quad (6.7)$$

$$\frac{\partial}{\partial x_j} (\overline{u_j u_i}) = \nu_{eff} \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\frac{\partial \overline{u_i}}{\partial x_j} + \frac{\partial \overline{u_j}}{\partial x_i} \right) - \frac{1}{\rho} \frac{\partial \overline{p}}{\partial x_i} + g_i \beta (\overline{T} - T_{ref}) + S_u \quad (6.8)$$

$$\frac{\partial}{\partial x_j} (\overline{u_j T}) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\left(\frac{\nu}{Pr} + \frac{\nu_t}{Pr_t} \right) \frac{\partial \overline{T}}{\partial x_j} \right) + S_h \quad (6.9)$$

$$\frac{\partial}{\partial x_j} (\overline{u_j k}) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\left(\nu + \frac{\nu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right) + P_k - \epsilon + G_k + S_k \quad (6.10)$$

$$\frac{\partial}{\partial x_j} (\overline{u_j \epsilon}) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\left(\nu + \frac{\nu_t}{\sigma_\epsilon} \right) \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} \right) + \frac{\epsilon}{k} (C_1 P_k + C_3 G_k) - C_2 \frac{\epsilon^2}{k} + S_\epsilon \quad (6.11)$$

ここで, u_j : j 方向の平均風速, T : 温度, k : 乱流エネルギー, ϵ : 消散率, ν_{eff} : 実効動粘性係数 ($\nu + C_\mu k^2/\epsilon$), ρ : 空気の密度, p : 圧力, g_i : 重力加速度, β 体膨張率, Pr_t : 乱流プラントル数, P_k, G_k : 平均流と浮力による乱流エネルギーの生成項, $\sigma_k, \sigma_\epsilon, C_1, C_2, C_3$: モデル定数 (ここでは標準 $k-\epsilon$ [157] と Viollet (1987) [158]) に準じた) である.

式 6.8-6.11 の右辺最終項が, 樹木 (葉) の効果を表す. S_h は葉から出た顕熱フラックス [W m^{-3}] である. その他は Green (1992), Katul et al. (2004) に倣い, 以下の式を用いた. 式 6.12, 6.13 では, 葉が受けた平均流は wake として小さなスケールに分解されるため, 葉は正味では k の消散に寄与しているとの発想からモデル化されている.

$$S_k = C_d a (\beta_p \overline{u}^3 - \beta_d \overline{u} k) \quad (6.12)$$

$$S_\epsilon = C_d a \left[C_4 \beta_p \frac{\epsilon}{k} \overline{u}^3 - C_5 \beta_d \overline{u} \epsilon \right] \quad (6.13)$$

なお, モデル係数は Green (1992) の値をそのまま用いた*8.

数値計算では有限体積法・スタガード格子によって空間離散化し, SIMPLE 法 [159] を用いて解いた. 固体面境界については, 6.4節のキャノピー計算では粗度長 ($Z_m=0.01\text{m}$) を与え, 6.5節では対数則壁関数を用いて計算した (式形略).

*8 抵抗係数を含め, モデルパラメータ設定の適切さは条件によりけりであるが, 本研究では風速の再現そのものは直接の目的ではないため, 特に調整は行わなかった.

6.4 土壌水分量変化が熱フラックス・温度に及ぼす影響

目的と計算条件

本節では、第3章の樹木蒸散能力の比較において最も蒸散能力の高い個体であったケヤキ（2010年）と、最も低い個体であったシラカシ（2012年）の気孔コンダクタンスパラメータ（第5章参照）を用いて、樹木の蒸散特性（水消費）の違いが、地上部・地下部の温度環境にどの程度影響を与えるのかを、5日分の非定常熱・水収支計算によって把握する。

2010年当時のケヤキ供試木のLAIは2であったが、葉面積の変化が蒸散量と日射遮蔽を介して温度分布に与える影響を把握するため、仮想的にLAI=6の条件での計算も行った。シラカシも同様に、LAI=2 or 6で計算した。LAI=6という値は、密に植わった落葉広葉樹林の典型的な値である。つまり、本節では2種の葉面積指数（LAI）と、2種の気孔コンダクタンスパラメータ（ケヤキ・シラカシ）の2×2パターンについて議論する。

気象条件は夏季晴天日を想定し、正午における全天日射量 900 W m^{-2} ・高さ 19.2m 地点の風速 2.5m、飽和水蒸気圧は1日を通して 2.8kPa で一定とした。土壌の初期含水率は45%（土壌乾燥による気孔閉鎖が始まっていない状態）とした。

本節の計算は鉛直一次元計算であるために樹冠形状の詳細は再現していないが、広葉樹の高木を想定し（特にケヤキにおいて典型的とされる）樹冠上部にLADが集中した形に設定した（図6.1）。樹高は6.4mで（シラカシも含め）一定とした。土壌の水理特性や根の分布も第4章の検討で扱った条件と同様で、2010年当時のケヤキの条件（深さ50cm, 容積 0.5m^3 ）に合わせた。

メッシュサイズは地上部が50cm厚で全40層、地下部は最小メッシュが1cmの全5層で空間離散化した。土壌下端部は深さ50cm地点で重力排水、 26°C の等温条件とした。タイムステップは不飽和水分移動の計算の都合上、第4章と同様に可変式とした。

結果と考察

図6.2-6.5に結果を示す。

まずはLAI=2のケヤキの結果（図6.2）について、正午における大気上端境界部（高さ約3H）での気温は 35°C と設定したが、樹冠高さ6.4m付近の気温は境界値よりも約 1°C 高く、地面付近では 40°C を超えていることが分かる。土壌温度は表層部1-2cm程度での範囲で急激な勾配を示した。これは既往研究（e.g., Campbell et al., 1994）でも指摘されている通り、土壌の熱伝導率の低さによるものである。1日目から3日目までは温度分布にはほとんど違いが見られなかったが、4日目に入ると、急激に地面付近で温度が上昇していた。この時（4日目の正午）、土壌表層部の含水率は10%以下、相対湿度で40%程

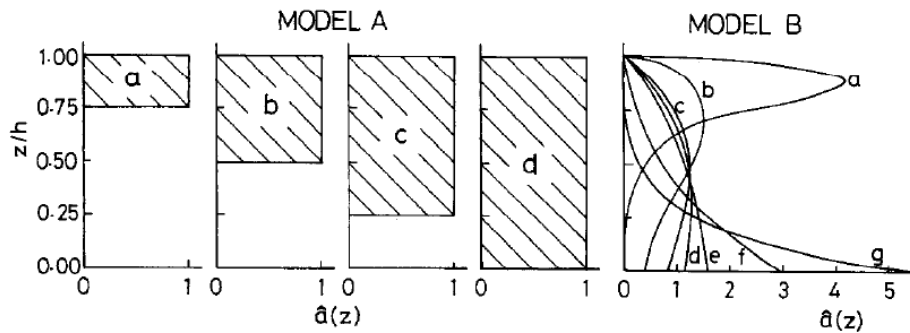


図 6.1 高木の LAD プロファイルの例 (Kondo & Akashi, 1975 [160]). 本章では広葉樹を想定し、MODEL B Type a の分布とした。

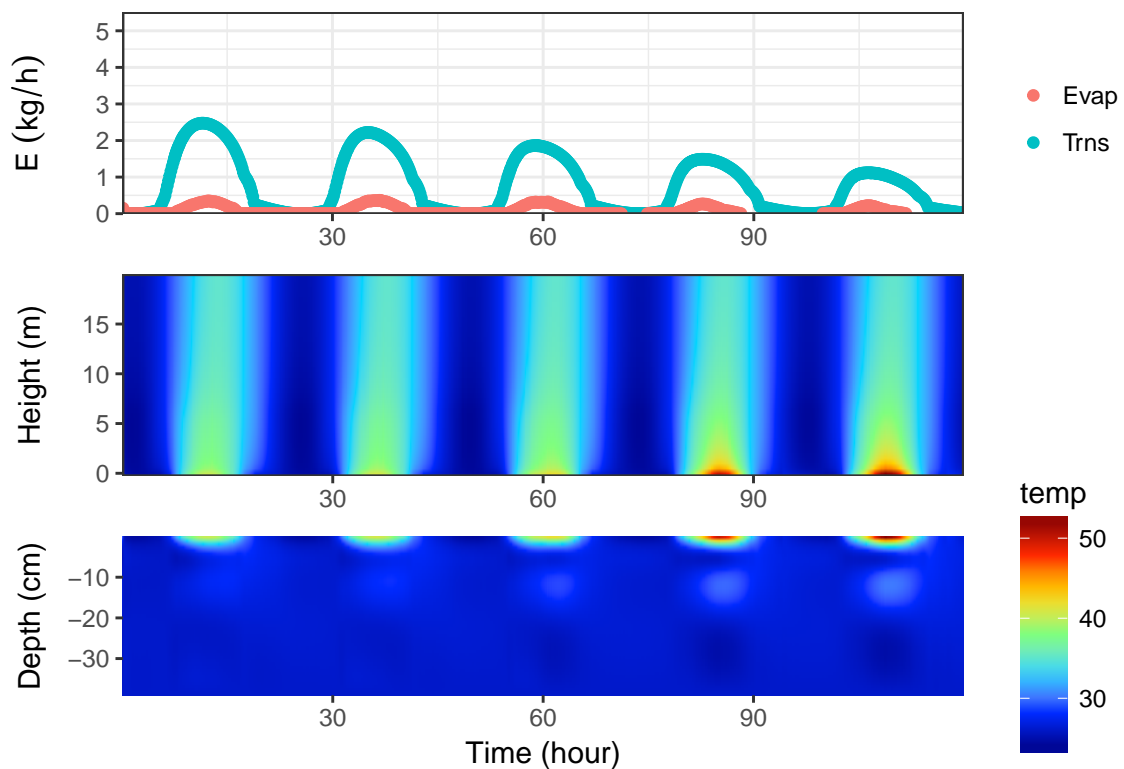


図 6.2 樹木一本当たりの蒸発散量，地上部気温，土壌内温度の時空間変化．LAI=2，ケヤキ（2010 年）の気孔コンダクタンスパラメータを用いた計算結果．樹高 6.4m，土壌面積 1m^2 ，容積 0.5m^3 の条件．

度となっていた．土壌蒸発量は樹木蒸散量に比べて 1 オーダー小さかったために変化が見えづらいが，5 日目の蒸発量は 1 日目と比べると 60% 程度まで減少している．

次に LAI=2 のシラカシの結果（図 6.3）について，図 6.2 と比べると，蒸散量が半分にも満たないにもかかわらず，気温は大きくは変わらず，さらに 4 日目以降の昇温が見られない結果となった．一日目の正午における地上 1.5m 高さの気温は，LAI=2 のケヤキの結

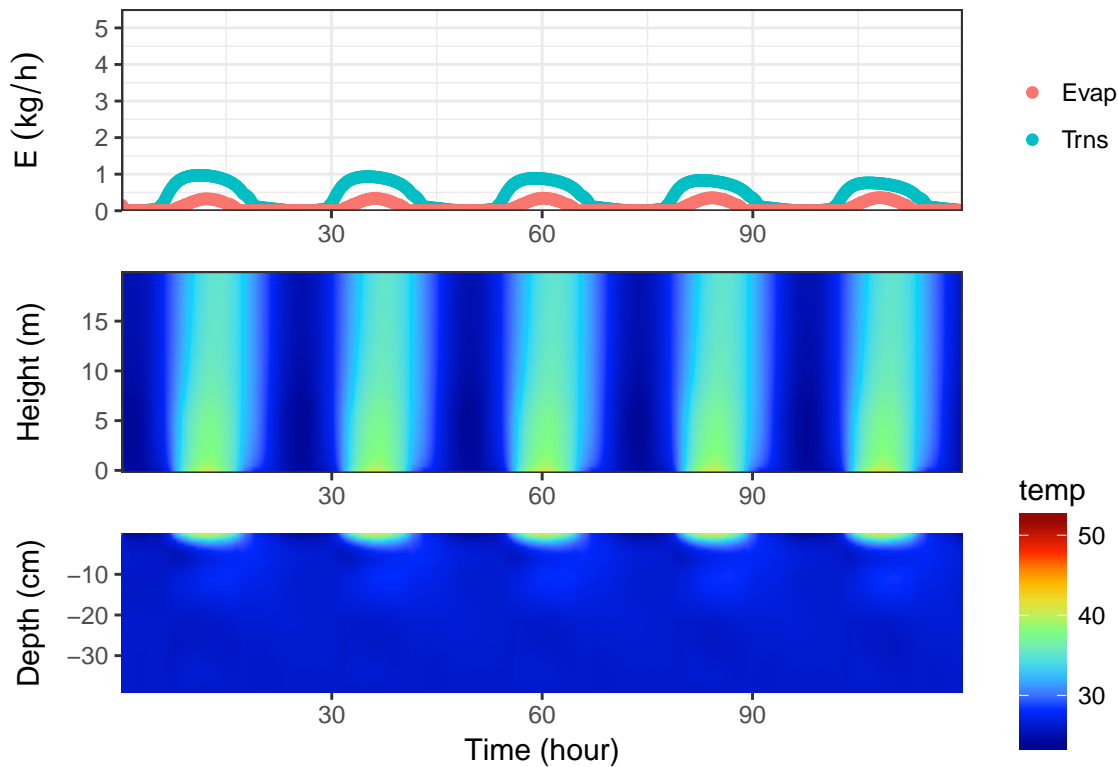


図 6.3 樹木一本当たりの蒸発散量，地上部気温，土壌内温度の時空間変化．LAI=2，シラカシ（2012 年）の気孔コンダクタンスパラメータを用いた計算結果．

果（図 6.2）においては 37.85°C であり，LAI=2 のシラカシの結果（図 6.3）においては 38.00°C であったため，蒸散の効果が多くなかったわけではないが，効果は限定的であった．一方で，5 日目において，正午における地上 1.5m 高さの気温は，LAI=2 のケヤキの結果（図 6.2）においては 41.73°C であり，LAI=2 のシラカシの結果（図 6.3）においては 38.27°C であった．LAI=2 のシラカシにおいて，表層土壌の相対湿度は 5 日目の正午においても 99% を維持していた．

いずれのパターンでも，一次元キャノピーモデルでは樹冠・土壌とも，発生した顕熱の大半が上向きに輸送されるために，生活高さの気温には樹冠よりも土壌の影響が顕著になった結果である．図 6.4 に，ケヤキとシラカシの 5 日目における土壌熱収支の日変化を示す．蒸散量が多いために土壌が乾燥して土壌からの顕熱量が増加したケヤキと，蒸散量が少なかったために土壌が湿潤状態を保ち土壌からの顕熱量が小さかったシラカシの対比的な結果になっている．ケヤキ供試木とシラカシ供試木ではケヤキの方が 2 倍以上の蒸散量があり，したがってヒートアイランド緩和効果としてはケヤキの方が 2 倍以上良いと評価できるが，ローカルな気温を下げたいと考える場合においては，むしろ蒸散量が少ないシラカシの方が優れている可能性さえありうることを示唆する結果と言える．

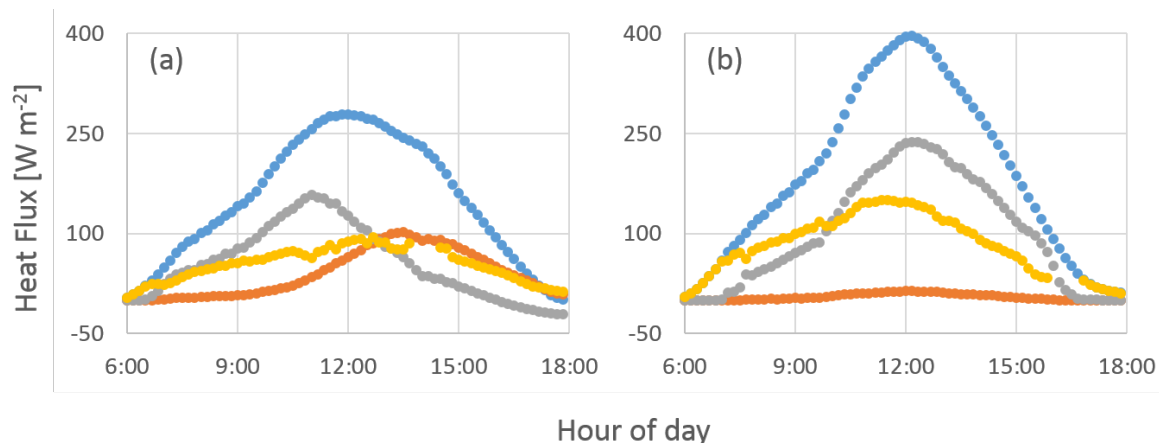


図 6.4 図 6.2, 6.3 の 5 日目における土壌熱収支の日変化. (a) ケヤキ (2010 年), (b) シラカシ (2012 年) の気孔コンダクタンスパラメータ. 青: 正味放射量, 灰: 潜熱量, 橙: 顕熱量, 黄: 熱伝導量である.

次に, LAI=6 のケヤキとシラカシの結果 (図 6.5-6.6) について, 両者では蒸散量が 5 倍以上異なっているが, どちらの条件においても気温は 5 日間を通して低く保たれていた. LAI=6 のケヤキ (図 6.5) では, 5 日目の正午において土壌含水率は 10% 以下だったが, 表面温度が低く保たれていたために相対湿度は 70% 程度の値を維持していた. 一日目の正午における地上 1.5m 高さの気温は, LAI=6 のケヤキの結果 (図 6.2) においては 36.97°C であり, LAI=6 のシラカシの結果 (図 6.3) においては 37.45°C であった. LAI が 2 から 6 に増加したことで, ケヤキ—シラカシ間の一日目における蒸散量の差は増加しているため, 一日目の正午において気温差が開いたことは妥当な結果と考えられる. また, LAI=2 の条件と比較すると, 昇温した時間帯の幅が狭くなっていることが分かる.

これらの結果は, ローカルな気温を下げるという目的においては, 第一に日射遮蔽の効果が非常に大きいこと, また, LAI=6 という密なキャノピーでなくとも, 日射遮蔽と土壌蒸発を組み合わせることで昇温を抑制することが可能であることを示している. 更に, 葉面積が多くない都市緑化樹木 (あるいは十分な緑化空間の面積が取れないために十分に日射遮蔽ができない条件) において, 蒸散量を増すことは必ずしもローカルな熱環境を改善することにはつながらず, 適切な維持管理^{*9}が不足していた場合においては, むしろ悪影響をもたらすことさえある, ということを示していると言える.

*9 頻繁な灌水や, 十分な容積の土壌をあらかじめ確保しておくことなど.

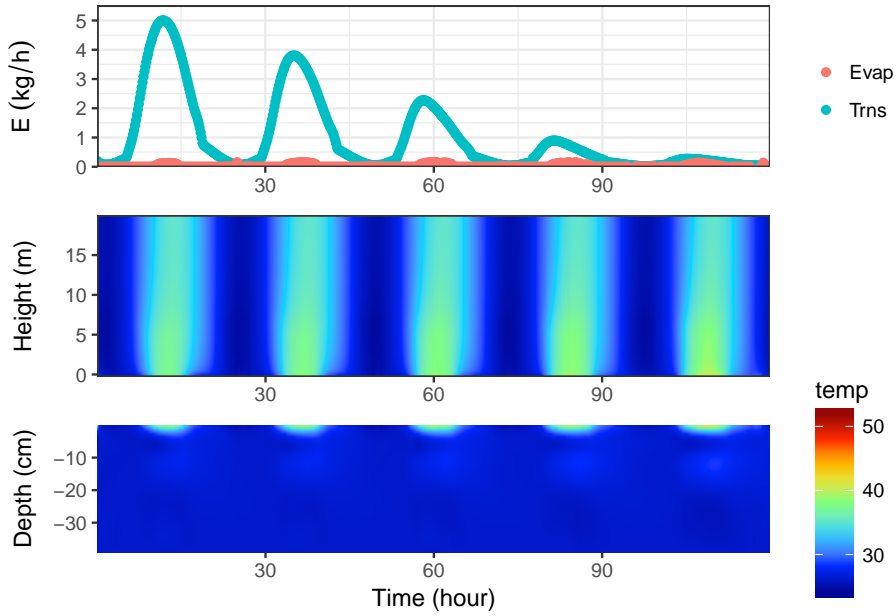


図 6.5 樹木一本当たりの蒸発散量，地上部気温，土壌内温度の時空間変化．LAI=6，ケヤキ（2010 年）の気孔コンダクタンスパラメータを用いた計算結果．

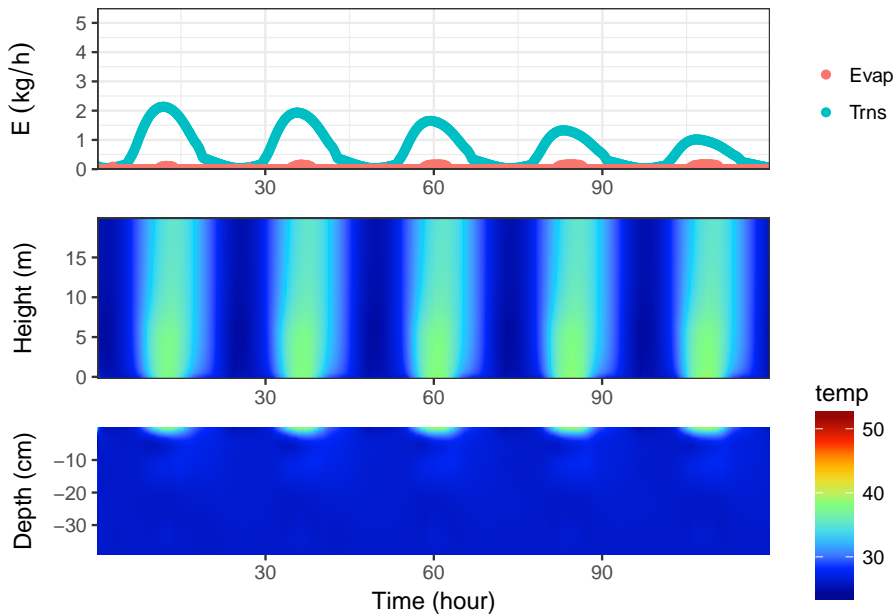


図 6.6 同上．仮想的に LAI=6 としてシラカシ（2012 年）の気孔コンダクタンスパラメータを用いた計算結果．

6.5 周辺地物による気流環境の変化が緑化空間の熱環境に及ぼす影響

目的と計算条件

最後に、孤立環境や水平一様ではなく周辺地物が存在する条件において、LAI=2 程度の樹木の蒸散量の変化が気温に対してどの程度影響しうる可能性があるかを検討した。ここでは街路樹と街路沿いの建物を想定した2次元ステップ流れを扱い、灌水不足による樹木乾燥ストレスの有無（蒸散の多寡）が建物付近の街路の気温にどの程度影響しうるかを検討した。

ステップ流れを扱う理由は、遮蔽物のない条件で樹木1, 2本程度が蒸散していても気温にほとんど影響を与えないことは既往研究からの類推、あるいは前節の検証から容易に想像がついたためである。ここでは機械工学分野でいう所のヒートスポット、あるいは気象学分野でいう所の Topographic Amplitude（盆地や谷状地形において地表面熱収支の結果が増幅されて現れる事）を意図して、現実の都市であり得る範囲の形態かつ樹木蒸散の影響が最大限現れるような条件として選んだ。樹冠は建物想定物体の風下側に位置し、循環流が樹冠由来の熱をその場に留めるような状況を意図して配置した。

キャノピー計算 (LAI=2 のケヤキ; 図 6.2) での一日目の正午における顕熱量は 2.77kW tree^{-1} 、潜熱量は 1.65kW tree^{-1} であった。また熱・水収支計算を10日間続けた結果、土壌水分が枯渇した段階ではすべての熱が顕熱として放出される形に変わった（結果略）。本節ではこの結果をもとに、ケヤキ並木に対する土壌水分の乾燥ストレスが街路の気温に及ぼす影響を評価した。

対象樹木サイズはケヤキ供試木を想定し、高さ 6.4m, LAI=2 の樹木を設置した。計算領域は奥行 128m × 高さ 32m (20H × 5H)、また評価対象となる地面付近の奥行 40m × 高さ 20m の範囲のメッシュサイズは 50cm とした。ここでの目的は、樹木蒸散の効果が地形効果によって増幅された条件において最大でどの程度影響があるかを定量的に把握することであるため、樹木以外は等温計算として評価した。流入風速は 6.4m 高さで 1m s^{-1} の冪乗則（冪指数 0.2）、大気上端・流出側境界で二階微分ゼロとした。

結果と考察

図 6.7 には湿潤時を想定した条件、図 6.8 には乾燥時を想定した結果（湿潤時での顕熱+潜熱相当の熱量が樹木から放出された結果）を示す。

熱の流れは意図した通りに、建物状物体の近傍風下の領域に循環する結果が得られた。熱だまりとなった領域中の 1.5m 高さにおいて、両ケース間では最大で約 0.15°C 、蒸散量

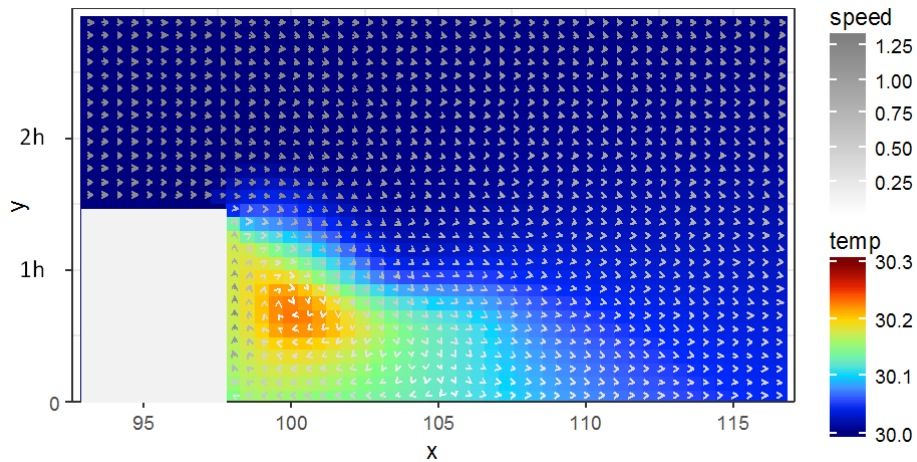


図 6.7 湿潤時のケヤキ (LAI=2) から出た顕熱 (2.77kW tree^{-1}) による気温変化とその地形増幅効果.

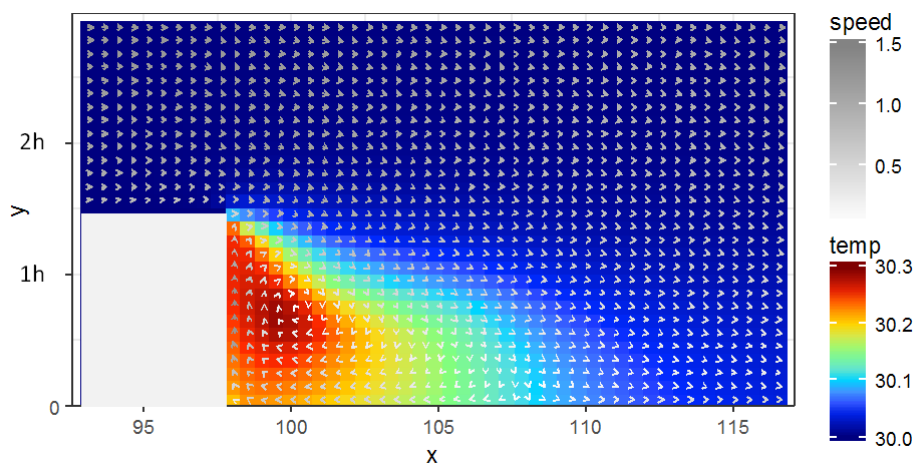


図 6.8 乾燥時のケヤキ (LAI=2) から出た顕熱 (4.42kW tree^{-1}) による気温変化とその地形増幅効果.

の差に相当する気温差が生じていた. 約 0.15°C の違いは日常的な感覚からは大きいとは言いが、前節ではエリア全域の緑化を仮定したキャノピー計算においてすら気温差が最大で 0.5°C 程度だったことを考えると、十分大きな値ともいえる.

これらの結果からは、より一般的な知見として、熱が溜まるような（拡散が遅れるような）条件の場所—例えばストリートキャニオンや中庭などにおいては、樹木の蒸散量を維持・確保できるよう務める価値が高いと言えるものと考えられる.

6.6 まとめ

本章では前章までの内容を踏まえ、SPACの数値シミュレーションを利用して蒸散・蒸発の熱的效果を検討した。その結果、キャノピースケールの分析からは、(本研究で計測した供試木の範囲内での)樹種あるいは個体の生理特性の違いによって*¹⁰、生活高さ(1.5m)において最大で0.5°C程度の気温差が生じることが分かった。また、蒸散・蒸発と日射遮蔽が気温に与える影響力を計算によって示し、灌水などによる維持管理の重要性と、必ずしも蒸散量を増やさずとも温度低下が図れることを示した。

更に、周辺地物の影響を加味した計算からは、樹冠を通過して加熱された空気が留まるような空間条件においては蒸散量の重要性が増すこと、LAI=2程度の樹木でも最大で気温に0.3°C、土壤の乾燥ストレスを想定した蒸散量の差によって0.15°C程度の変化が生じることを示した。

本章の検討は改善すべき点が数多くあるが、各設計の基本的なアイディアは示すことが出来たと考える。

*¹⁰ ただし LAI が 2 から 6 に増大しても生理特性は変化しないという仮想的な条件において。

第7章

結論

7.1 本研究の総括

本論文は「都市熱環境予測のための樹木の蒸散特性の計量化と数値モデル化」と題し、以下の7章から構成されている。

第1章「序論」では、ヒートアイランド現象の一因とされる潜熱量の減少が都市熱環境に与える影響を論じた上で、庭木や街路樹、屋上緑化などに代表される孤立環境にあり土壌容積の小さな都市特有の緑化樹木の蒸散を研究対象として定めている。現状の課題として、緑化空間設計・灌水計画において必要となる単木スケールでの緑化樹木の蒸散量の定量的実態が明らかでない点および、蒸散の生理的制御を表現するパラメータである気孔コンダクタンスの予測方法が確立されていない点を指摘するとともに、樹木の熱環境調整効果を評価する上では、蒸散に加えて土壌蒸発と放射環境が気温に与える影響を併せて評価することの必要性を述べた上で、研究目的と論文構成を示した。

第2章「長期的なケヤキの水収支計測に基づく単木の蒸散特性の把握」では、土壌容積の小さい孤立樹木において、どのような環境物理的・生物的要因が蒸散量を決定しているかを把握することを目的として、様々な気象・着葉条件を含んだ長期的なケヤキ供試木の水収支計測結果を分析した。まず、ライシメータ法による高木の蒸散計測の課題であった風圧や降雨によるノイズの問題を解決するために、時系列解析を利用したデータ品質管理方法を提案し、1時間以下の分解能での定量的評価を実現した。孤立樹木では葉面境界層抵抗の影響が小さいために飽差の影響が卓越すること、経年変化による葉面積の増加が日蒸散量を増大させていなかったことを明らかにし、街路樹のような土壌容積の小さな条件では樹木の水供給能力が蒸散量を制限している可能性が高いことを考察した。

第3章「複数樹種の計測に基づく単木蒸散能力と形態的・生理的特徴の関係分析」では、樹木の形態的・生理的特徴のうち、蒸散予測に利用可能な情報を分類するために、土壌容積を統一した上で、晴天・灌水条件での全11種の供試木の単木蒸散能力を分析した。

まず、短期間での複数個体の蒸散計測を実現するために、手動で操作・着脱可能な吊り下げ式重量計を提案し、時系列解析を用いてこの重量計が1時間単位の蒸散量を十分な精度で推定できることを示した。更に、可能蒸発量比の分析から、供試木のサイズの範囲においては樹冠投影面積や幹直径などの簡易な形態的特徴の明確な影響が見られなかったこと、太い道管径を持つ環孔材樹種の蒸散能力が他に比べて有意に大きかったことを明らかにした。

第4章「蒸散予測を目的とした簡便な Soil-Plant-Atmosphere Continuum モデルの構築」では、緑化樹木の熱・水収支特性を予測可能で、かつ省パラメータな土壌-植物-大気系 (SPAC) モデルを構築するため、既存の複数のサブモデルを組合せ、予測能力を比較検討した。まず、街路樹や屋上緑化への適用を想定した場合には土壌容積・土壌種が既知とみなせること、根の鉛直分布と土壌水理特性は既往研究で大規模なデータベースが整備されている点に着目し、これらの情報の利用を前提とした実用的なモデルとして、植物体内の水理的・生化学的過程に基づく気孔コンダクタンスモデルと土壌-根の接触界面の効果を予測する根の吸水モデルの組合せを提案し、従来の SPAC モデルと比較してパラメータ数を半減出来ることを示した。更に、第2章で用いたケヤキ供試木を対象とした灌水停止実験の再現シミュレーションを行い、提案モデルは、気象予測のために簡略化されていた従来の経験的モデルに比べて入力パラメータの不確実性に対する依存度が低く、頑健性に優れることを明らかにした。

第5章「気孔コンダクタンスパラメータの実用的な定量化方法の提案」では、経験的校正が必要な気孔コンダクタンスを効率的に定量化する方法を提案した。まず、気孔コンダクタンスパラメータが最大蒸散能力と気象条件への応答特性に分離できることを示し、最大蒸散能力は日単位の蒸散計測から推定可能である点、気象応答特性に関しては都市特有の問題である放射環境の三次元性の影響が緑化樹木では顕著となる点を考察した。第2・3章で蒸散計測した供試木を対象に、葉面積密度分布の計測結果に基づく樹冠放射伝達シミュレーションを行い、4種のパラメタリゼーション方法の比較を行った結果、最大蒸散能力と樹冠形態を個体ごとに校正すれば、気象応答特性の個体差は平均化しても蒸散予測への影響は限定的であることを明らかにした。

第6章「蒸発散による緑化空間の熱環境の予測評価」では、日射・樹木蒸散・土壌蒸発の相互作用を考慮した上で各要因が緑化空間における熱・水収支と気温に与える影響を評価することを目的として、提案モデルとパラメータを導入した SPAC シミュレーションを用いた予測評価を行った。その結果、日射遮蔽が不十分な条件下で樹木蒸散によって土壌水分が減少した場合には、土壌の高温化によって生活高さの気温が上昇しうることを示し、灌水計画と熱環境を同時に検討することの重要性を論じた。また、気孔コンダクタンスパラメータの差異によって樹冠付近の気温が1℃以上変化する予測結果に基づき、樹冠を通過した空気が滞留するような空間配置では蒸散の影響が孤立樹木に比べて増大するこ

とを示した。

7.2 今後の課題

7.2.1 計測方法・実態把握に関して

計測対象・モデルパラメータの一般性

本研究では前提として、土壌容積 0.5m^3 、樹高約 5m の緑化樹木の熱・水収支を研究対象としており、また、化学環境上の問題がないことを想定していた。したがって、巨木や公園樹木などの土壌に制約がない対象、あるいは、土壌塩・貧栄養・大気汚染物質 (SO_x や O_3) の影響、排気ガスなどに由来する高 CO_2 濃度条件への応答は、現実の都市緑化樹木の蒸散において重要な影響要因ではあるが、本研究の対象とはしていなかった。

建築・都市熱環境の予測評価への応用上は、樹高 10m 以上の高木の扱いが重要と思われる。樹高増大によって気孔コンダクタンスが低下するという森林水文学分野の知見 [106] [112] を踏まえると、本研究で得られた単位葉面積あたりのパラメータをそのまま適用した場合には、蒸散量を過大評価する可能性が高いと考えられる。ただし、樹高増大の影響はメカニズムが未解明であるため、この外挿の妥当性は、実測で明らかにされるまでは慎重な判断が必要である。

この問題を明らかにする上では更なる計測が必要である。第 5 章での検討から将来的には樹液流法の活用が有用な可能性が高いと述べたが、時間分解能の問題以外にも、木部構造ごとの較正や外部環境の熱的な外乱の影響の軽減などの問題をどのように扱うべきか、都市緑化樹木への応用において考慮すべき課題は多い。この点が改善されない限りは森林と同じような状況でしか適用できないことになってしまい、結局のところ森林と同じようなデータしか得られない、ということになってしまうように思われる。この問題を解決する上では建築分野だけでなく森林水文学分野の専門家と共同して調査研究を行う必要がある。蒸散に限らず、複雑狭小な都市環境における熱や物質フラックスの計測方法を確立することは、必要性も課題も多いと言える。

同時に、どこまで都市特有の問題として検証する必要があるのか、何に應用することを意図しているのかという議論に関しては、分野内の研究者との意思疎通や、ある程度の合意が必要なのではないかと感じられる。生物が相手である以上は完全に同じ個体は存在しないため、細かい違いを指摘しだすときりがなく、という状況に陥りかねないからである。

樹冠形態と吸収放射量、蒸散量の関係については議論の余地が多く残されている。2.4 節ではケヤキ供試木の葉面積が増大していたにも関わらず蒸散量が増大していなかったこ

とを示したが、前述の通り、これには葉の相互被陰が影響していた可能性が考えられる。また、3.4節で示した、温帯広葉樹林と比較した際の単木蒸散能力のバラつきの大きさについても、樹種ごとの樹冠形状・放射環境の違いが影響していた可能性が高い。これらの結果については、吸収放射量と気孔コンダクタンスパラメータがそれぞれの程度影響していたかについて、LiDAR計測結果を基に分析を行うことで、定量的により確からしい分析が可能と考えられる。更に、5.5節でも述べた通り、第5章では放射計算を簡略化しているために、推定された g_s パラメータにもバイアスが生じている。本研究で得られたモデルパラメータを植物生理学分野の既往研究と比較し、その平均や分散を議論することは、特に応用上は重要と考えられるが、正確な g_s パラメータの算出は今後の課題とする。

第6章では、LAIと気孔コンダクタンスパラメータを独立なものとして扱っていたが、第2章でのケヤキの蒸散が通水過程において制限されていたという考察が正しかったとすれば、土壌容積の制限された都市緑化樹木においては、両者は独立ではない可能性が高いと言える。本研究中では十分に検討できていなかったが、BMFモデルでは単木スケールでの通水コンダクタンス（葉面積×単位葉面積あたりの通水コンダクタンス k ）が一定となるように計算することも可能である。第2章でのケヤキ蒸散特性の経年変化について、単木スケールでの通水コンダクタンスを保存することで各年の蒸散特性が再現可能であるかの検証も、今後ぜひ行っていきたい。

遮断蒸発

本論文中では取り上げなかったものの、高木による緑化空間の水収支・潜熱フラックスを議論する上で重要な現象として、降雨遮断 (*interception*) と遮断蒸発 (*wet canopy evaporation*) がある。密な温帯樹林において遮断損失量（林外雨量 - 樹冠通過雨量）は林外雨量の30-40%にも達するという報告も存在するため [16]、降雨中・直後の遮断蒸発が高木周辺の熱環境に与える影響や、降雨後数日程度の土壌水分量・蒸発散量を議論する上でも重要性は高いと考えられる。遮断の程度によって緑化空間の熱環境の時系列変化—遮断蒸発によって降雨直後に一気に低温化するか、蒸発散 (*dry canopy evaporation*) によって継続的に温度上昇を抑制するか—が大きく異なる可能性が高いと考えられるためである。土壌蒸発が生活高さの気温に与える影響の大きさは第6章で示した通りである。また、新宿御苑周辺で気温・熱フラックス観測を行った成田ら (2004) は、夜間に降雨があった翌日の午前中において、樹林地-市街地間の気温差が最大となっていたことを報告している [196]。

しかし、降雨遮断においては、樹冠の三次元形態、樹皮の濡れやすさ、雨滴の大きさ、風向・風速など、計測・モデルのいずれにおいても取り扱いが困難な要因が多いために、予測以前に実態把握の段階で未解決の課題が多いことが指摘されている (Crockford &

Richardson, 2000 [197]). 筆者の知る限りでは、温帯広葉樹林を対象にした降雨遮断の研究は包括的な知見が得られているとは言い難く、また特に疎な樹林地や孤立樹木を対象とした研究は計測の難しさからか、ごく小数しか存在していない (e.g., David et al., 2006 [198]). 例えば熱帯林に関しては、蔵治・田中 (2003) が 73 サイト・106 の計測事例を基に包括的な議論を行っているが [199], 筆者の知る限りでは、数十サイトもの温帯樹林の計測結果をレビューした研究は存在していないため、温帯樹林における遮断割合の平均・分散がどの程度であるかも現状ではわかっていないものと思われる。温帯樹林を対象とした降雨遮断の計測事例そのものは決して少なくないので、既存の文献を総括するだけでも研究価値があるのではないかと思われる。また、疎な樹林地や孤立樹木を対象とした研究に関しては、面的な計測と CFD シミュレーションの併用が有効な可能性が高いと思われる。森林水文学分野の既往研究では、風向・風速が降雨に与える影響の取り扱いは比較的簡素なものが多いこと [198], 雨滴が樹木に当たった後の飛沫が風で輸送されることによる系外流出量が遮断損失の 50% 程度を占めうるという指摘があること (Saito et al., 2013 [200]) が理由である。

7.2.2 数値シミュレーションに関して

SPAC シミュレーションについて言えば、蒸散効果を熱環境シミュレーションに反映させたいという意見・要望は学会などで耳にすることがしばしばあったので、(実際にどの程度の効果が期待できるかは別の問題であるが) 本研究で得られた知見を一般の建築熱環境シミュレーションソフト等で利用しやすい形に反映させていくことも検討する価値はあると考えられる。第 6 章の一次元キャノピーモデルでは、樹冠・土壌とも、発生した顕熱の大半が上向きに輸送されるために、生活高さの気温には樹冠よりも土壌の影響が顕著になっていたが、三次元的な輸送では、周辺地物によって影響力は変わりうる。具体的な寸法を指定した緑化空間設計を行うためには、本研究で得られたモデルやパラメータを、建築環境工学分野で用いられている放射環境シミュレーターや CFD に組み込む必要がある。

また、保水性舗装や建築壁内の湿気移動解析などへの応用の可能性を考えると、多孔質材 (土壌) の数値モデル・計算方法を建築環境工学分野の数値シミュレーションに導入することにも価値があると思われる。建築環境工学分野では多孔質材は計算コストが高いという認識がもたれ、しばしば極端な簡略化がなされることもあるが、水文・土壌物理学分野で確立されている計算手法 (e.g., Celia et al, 1990 [140]) の利用によってそうした問題が解決できる可能性はあると考えられる。特に、街区スケールでの熱環境シミュレーションに土壌水分予測を組み込むことが可能であるか、あるいは、 β 法などの既存のモデルの形式に単純化していくことが必要となるかは、今後検討する必要がある。

水収支予測の問題、つまり自然降雨のみでどれだけの蒸散量が期待できるのか、逆に自然降雨だけで最大蒸散量を達成しようと考えた場合にはどの程度の土壌容積が必要なのか、といった問題に関しては、まず第一に都市緑化樹木の遮断蒸発量を定量化することが必要であり、また、予測の上では、Princeton 大学の Rodriguez-Iturbe グループの行っている確率降雨モデルを用いた方法 [83] やそれに類した方法の将来性が有望と思われる。これは蒸散に限った話ではないが、屋外環境を予測する上で最も困難な点は、境界条件やモデルパラメータの変化や不確実性を如何に予測に組み込むかという点であると思われる。アンサンブル予測に類した技術が、都市の物理環境予測にも必要だと個人的には感じている。気象学分野のアンサンブル予測は、その多くが初期値設定に関わる問題を扱っているが、建築環境工学分野では時間変化よりも境界条件やモデルパラメータの方に依存した問題が多いと思われる。この点においても、分野特有の技術を確立していくことが必要である。

放射環境や気流環境の予測を行う場合、現状では LAD の分布を（各研究者が妥当と思う範囲で）任意に決めているが、本当にその環境において樹木がそれ程成長できるのか、という疑問は、自分が設定する場合でも、他の研究者の研究を見ているときであっても常に頭をよぎる。都市緑化樹木に関する研究の現状を考えるといささか性急ではあると思うが、この疑問に答える一つの方法が、樹木の成長予測モデルである。個人的には、建築物の高寿命化が要求される昨今では、30年、40年先の都市環境の予測に関する技術には需要があるのではないかと考えている。樹木成長が予測可能であれば、熱環境に限らずとも、美観上・計画上においてもメリットは大きい。地球物理学・生物学分野の研究者の間では Dynamic Global Vegetation モデルと呼ばれる、生長や枯死の問題を取り込んだモデルが気象予測にも応用され始めている（第4世代 LSM; Sato et al., 2015 [201]）。その多くが窒素循環などの生態系モデルを基本にしていることを考えると都市緑化にそのまま応用することは出来ないが、例えば本研究においてもケヤキやシラカシの経年変化に示されたように、植物の振る舞いは、周辺物理環境に応じた植物の振る舞いの合理性を仮定する（例えば、植物は光合成量の最大化と蒸散量の最小化を達成するように振る舞っていると仮定する）ことで予測可能な場合がある（West et al., 1997 [202]; Lin et al., 2015 [203]）。水・光・炭素を取り扱った生物物理モデル (e.g., Pearcy et al., 2005 [204]; Kubo & Kohyama, 2005 [205]) を作り、周辺建物の日陰による光環境の制約や土壌容積の制約から成長限界量を予測することも可能なのではないかと想像する。

参考文献

- [1] Alexander C. (著), 平田翰那 (訳). 1977. パタン・ランゲージ. 鹿島出版会: 東京.
- [2] Norman J. 2013. Fifty Years of Study of S-P-A Systems: Past Limitations and a Future Direction. *Procedia Environmental Sciences*, 19.
- [3] Olgyay V. 1963. *Design with Climate: Bioclimatic Approach to Architectural Regionalism*. Princeton University Press: New Jersey.
- [4] 日本建築学会 (編). 2007. 建築設計資料集成 [環境]. 丸善: 東京.
- [5] Lohr V., Pearson-Mims C., Tarnai J., Dillman D. 2004. How urban residents rate and rank the benefits and problems associated with trees in cities. *Journal of Arboriculture*, 30(1): 28-35.
- [6] 建築環境・省エネルギー機構. CASBEE 建築環境総合性能評価システム. Available online at: http://www.ibec.or.jp/CASBEE/cas_hi.htm. 2016年12月28日参照.
- [7] Campbell G., Norman J. (著), 久米 篤, 大槻恭一, 熊谷朝臣, 小川滋 (監訳). 2010. 生物環境物理学の基礎, 第2版. 森北出版: 東京.
- [8] 渡辺 力. 1999. 植生微気候モデルの現状と課題. *ながれ*, 18: 94-100.
- [9] Raupach M. 2001. Combination theory and equilibrium evaporation. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 127: 1149-1181.
- [10] Kumagai T. 2011. Transpiration in Forest Ecosystems. In: *Forest Hydrology and Biogeochemistry*, 389-406. Springer: Berlin.
- [11] Monteith J., Unsworth M. 2013. *Principles of Environmental Physics*, 4th edn. Academic Press: Cambridge.
- [12] Jones H., Vaughan R. (著), 久米 篤, 大政 謙次 (監訳). 2013. 植生のリモートセンシング. 森北出版: 東京.
- [13] Pitman A. 2003. The evolution of, and revolution in, land surface schemes designed for climate models. *International Journal of Climatology*, 23(5): 479-510.
- [14] 小松 光. 2005. 森林の特性と蒸発散量. *日本森林学会誌*, 87(2): 170-185.
- [15] Arya P. 2001. *Introduction to Micrometeorology*, 2nd edn. Academic Press:

- Cambridge.
- [16] Leverenz J., Deans J., Ford E., Jarvis P., Milne R., Whitehead D. 1982. Systematic spatial variation of stomatal conductance in a Sitka Spruce plantation. *Journal of Applied Ecology*, 19: 835-851.
- [17] Brutsaert W. (著), 杉田 倫明 (監訳). 2008. 水文学. 共立出版: 東京.
- [18] Jarvis P., McNaughton K. 1986. Stomatal control of transpiration: scaling up from leaf to region. *Advances in Ecological Research*, 15: 1-49.
- [19] Hirai M., Satkashita T., Kitagawa H., Tsuyuki T., Hosaka M., Oh'izumi M. 2007. Development and Validation of a New Land Surface Model for JMA's Operational Global Model Using the CEOP Observation Dataset. *Journal of the Meteorological Society of Japan*, 85A: 1-24.
- [20] Jarvis P. 1976. The interpretation of the variations in leaf water potential and stomatal conductance found in canopies in the field. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 273: 593-610.
- [21] Ball J., Woodrow I., Berry J. 1987. A model predicting stomatal conductance and its contribution to the control of photosynthesis under different environmental conditions. In: *Progress in Photosynthesis Research*, 4: 221-224. Martinus-Nijhoff Publishers: Leiden.
- [22] 近藤 純正. 近藤純正ホームページ, K121 空間広さと気温—「日だまり効果」のまとめ. Available online at: <http://www.asahi-net.or.jp/~rk7j-kndu/kenkyu/ke121.html>. 2016年12月28日参照.
- [23] 小松 光, 熊谷 朝臣, 堀田 紀文. 2007. 林内の気温鉛直分布が蒸散・光合成に与える影響. *九州大学演習林報告*, 88: 1-19.
- [24] 大上 博基. 2003. 水田の蒸発散・光合成特性と水利用効率に関する研究 (2). *水文・水資源学会誌*, 16(4): 389-407.
- [25] 田中 賢治, 中村 忠則, 椎葉 充晴, 池淵 周一. 2000. 陸面過程モデルにおける土壌水分量の役割. *水工学論文集*, 44: 157-162.
- [26] 神田 学, 日野 幹夫. 1990. 大気—植生—土壌系モデル (NEO SPAM) による数値シミュレーション (2). *水文・水資源学会誌*, 3(3): 37-55.
- [27] 成田 健一, 萩島 理, 谷本 潤, 高野 武将. 2006. 都市域における樹木の蒸散特性: オアシス効果に関する野外実験. *日本建築学会環境系論文集*, 608: 59-66.
- [28] Baldocchi D. 2012. *Flux Letter*, 5(1).
- [29] Oke T. 1987. *Boundary Layer Climates*, 2nd edn. Routledge: London.
- [30] Kanda M. 2007. Progress in Urban Meteorology: A Review. *Journal of the Meteorological Society of Japan*, 85B: 363-383.

-
- [31] Mackay D., Ewers B., Loranty M., Kruger E. 2010. On the representativeness of plot size and location for scaling transpiration from trees to a stand. *Journal of Geophysical Research*, 115(G02016)
- [32] Schulze E., Kelliher F., Korner C., Lloyd J., Leuning R. 1994. Relationships among Maximum Stomatal Conductance, Ecosystem Surface Conductance, Carbon Assimilation Rate, and Plant Nitrogen Nutrition: A Global Ecology Scaling Exercise. *Annual Review of Ecology and Systematics*, 25(1): 629-662.
- [33] Ching F. 2014. *Building Construction Illustrated*, 5th edn. John Wiley & Sons: Hoboken.
- [34] Dee C. 2001. *Form and Fabric in Landscape Architecture: A visual introduction*. Spon Press: New York.
- [35] 種生物学会. 2003. *光と水と植物のかたち*. 文一総合出版: 東京.
- [36] Spronken-Smith R., Oke T., Lowry W. 2000. Advection and the surface energy balance across and irrigated urban park. *International Journal of Climatology*, 20: 1033-1047.
- [37] Moriwaki R., Kanda M. 2004. Seasonal and diurnal fluxes of radiation, heat, water vapor, and carbon dioxide over a suburban area. *Journal of Applied Meteorology*, 43: 1700-1710.
- [38] Kjellgren R., Clark J. 1993. Growth and water relations of *Liquidambar styraciflua* L. in an urban park and plaza. *Trees*, 7: 195-201
- [39] Cregg B. 1995. Plant moisture stress of green ash trees in contrasting urban sites. *Journal of Arboriculture*, 21: 271-276.
- [40] McCarthy H., Pataki D. 2010. Drivers of variability in water use of native and non-native urban trees in the greater Los Angeles area. *Urban Ecosystems*, 13: 393-414.
- [41] Osone Y., Kawarasaki S, Ishida A, Kikuchi S, Shimizu A, Yazaki K, Aikawa S, Yamaguchi M, Izuta T, Matsumoto G. 2014. Responses of gas-exchange rates and water relations to annual fluctuations of weather in three species of urban street trees. *Tree Physiology*, 34: 1056-1068.
- [42] Kagotani Y., Nishida K., Kiyomizu T., Sasaki K., Kume A., Hanba Y. 2015. Photosynthetic responses to soil water stress in summer in two Japanese urban landscape tree species (*Ginkgo biloba* and *Prunus yedoensis*): effects of pruning mulch and irrigation management. *Trees*, 30: 697-708
- [43] 手代木 純, 輿水 肇. 2011. CASBEE-HI 作成過程における緑の環境改善効果をめぐる論点. *ランドスケープ研究*, 74(5): 721-726.

- [44] Mcdermitt D. 1990. Sources of error in the estimation of stomatal conductance and transpiration from porometer data. *Hortscience*, 25: 1538-1548.
- [45] Granier A. 1987. Evaluation of transpiration in a Douglas-fir stand by means of sap flow measurements. *Tree Physiology*, 3: 309-320.
- [46] Swanson R., Whitfield D. 1981. A numerical analysis of heat pulse velocity theory and practice. *Journal of Experimental Botany*, 32: 221-239.
- [47] Oren R., Phillips N., Ewers B., Pataki D., Megonigal J. 1999a. Sap-flux-scaled transpiration responses to light, vapor pressure deficit, and leaf area reduction in a flooded *Taxodium distichum* forest. *Tree Physiology*, 19: 337-347.
- [48] Lu P., Urban L., Zhao P. 2004. Granier's thermal dissipation probe (TDP) method for measuring sap flow in trees: theory and practice. *Acta Botanica Sinica*, 46: 631-646.
- [49] Clearwater M., Meinzer F., Andrade J., Goldstein G., Holbrook N. 1999. Potential errors in measurement of nonuniform sap flow using heat dissipation probes. *Tree Physiology*, 19 (10): 681-687.
- [50] Steppe K., De Pauw D., Doody T., Teskey R. 2010. A comparison of sap flux density using thermal dissipation, heat pulse velocity and heat field deformation methods. *Agricultural and Forest Meteorology*, 150(7-8): 1046-1056.
- [51] Wullschlegel S., Childs K., King A., Hanson P. 2011. A model of heat transfer in sapwood and implications for sap flux density measurements using thermal dissipation probes. *Tree Physiology*, 31: 669-679.
- [52] Tyree M., Zimmermann M. (著), 内海 泰弘, 古賀 信也, 梅林 利弘 (監訳). 2012. 植物の木部構造と水移動様式, 第2版. 丸善: 東京.
- [53] Saugier B., Granier A., Pontailler J., Dufrene E., Baldocchi D. 1997. Transpiration of a boreal pine forest measured by branch bag, sap flow and micrometeorological methods. *Tree Physiology*, 17: 511-519.
- [54] Kumagai T., Aoki S., Otsuki K., Utsumi Y. 2009. Impact of stem water storage on diurnal estimates of whole-tree transpiration and canopy conductance from sap flow measurements in Japanese cedar and Japanese cypress trees. *Hydrological Processes* 23: 2335-2344.
- [55] Ward E., Oren R., Bell D., Clark J., McCarthy H., Kim H., Domec J. 2012. The effect of elevated CO₂ and nitrogen fertilization on stomatal conductance estimated from 11 years of scaled sap flux measurements at Duke FACE. *Tree Physiology*, 33 (2): 135-151
- [56] Pataki D., McCarthy H., Litvak E., Pincetl S. 2011. Transpiration of urban

- forests in the Los Angeles metropolitan area. *Ecological Applications*, 21: 661-677.
- [57] Litvak E., McCarthy H., Pataki D. 2011. Water relations of coast redwood planted in the semi-arid climate of southern California. *Plant, Cell and Environment*, 34: 1384-1400.
- [58] Litvak E., McCarthy H., Pataki D. 2012. Transpiration sensitivity of urban trees in a semi-arid climate is constrained by xylem vulnerability to cavitation. *Tree Physiology*, 32: 373-388.
- [59] Peters E., McFadden J., Montgomery R. 2010. Biological and environmental controls on tree transpiration in a suburban landscape. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, 115: G04006.
- [60] Chen L., Zhang Z., Li Z., Tang J., Caldwell P., Zhang W. 2011. Biophysical control of whole tree transpiration under an urban environment in Northern China. *Journal of Hydrology*, 402: 388-400.
- [61] Chen L., Zhang Z., Ewers B. 2012. Urban tree species show the same hydraulic response to vapor pressure deficit across varying tree size and environmental conditions. *PLoS ONE*, 7: 20-24.
- [62] Edwards W. 1986. Precision weighing lysimetry for trees, using a simplified tared-balance design. *Tree Physiology*, 1: 127-144.
- [63] 吉田 弘, 端野 道夫. 1999. 大型ウェイングラインメータによる林木蒸散量計測の試み. *水工学論文集*, 43: 67-72.
- [64] Ben-Gal A., Kool D., Agam N., van Halsema G., Yermiyahu U., Yafe A., Presnova E., Erel R., Majdopa A., Ziporic I., Segala E., Rüggerd S., Zimmermann U., Cohene Y., Alchanatise V., Dag A. 2010. Whole-tree water balance and indicators for short-term drought stress in non-bearing “Barnea” olives. *Agricultural Water Management*, 98(1): 124-133.
- [65] Lorite I., Santos C., Teti L., Fereres E. 2012. Design and construction of a large weighing lysimeter in an almond orchard. *Spanish Journal of Agricultural Research*, 10: 238-250.
- [66] Press W., Teukolsky S., Vetterling W., Flannery B. 1996. *Numerical Recipes: The Art of Scientific Computing*. Cambridge University Press: Cambridge.
- [67] Nobel P. 2009. *Physicochemical and Environmental Plant Physiology*, 4th edn. Academic Press: Cambridge.
- [68] AINEX ホームページ. Available online at: http://www.ai-nex.co.jp/LeafPorometer_SC-1.html. 2016 年 12 月 28 日参照.

- [69] 熊谷 朝臣. 熊谷朝臣ホームページ. Available online at: <http://tomo-kumagai.eco.coocan.jp/granier1.htm>. 2013 年参照.
- [70] 浅輪 貴史, 梅干野 晁, 清水克哉, 久保田 光政. 2012. 大型重量計を用いた単木樹木の蒸散量の計測法とその精度確認. 日本緑化工学会誌, 38: 67-72.
- [71] 浅輪 貴史, 梅干野 晁, 清水 克哉, 久保田 光政. 2014a. 大型重量計を用いた夏季におけるケヤキ単木の蒸散特性の分析. 日本緑化工学会誌, 39: 534-541.
- [72] Asawa T., Hoyano A., Oshio H., Honda Y., Shimizu K., Kubota M. 2014. Terrestrial LiDAR-based estimation of the leaf area density distribution of an individual tree and verification of its accuracy. Proceedings of International Symposium on Remote Sensing. (Electronic Proceedings)
- [73] Hosoi F., Omasa K. 2006. Voxel-based 3-D modeling of individual trees for estimating leaf area density using high-resolution portable scanning Lidar. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 44: 3610-3618.
- [74] 押尾 晴樹, 浅輪 貴史. 2016. 地上型レーザースカナを用いた単木の葉面積密度分布推定におけるビームの入射状況と風の影響を考慮した精度検証. 日本リモートセンシング学会誌, 36(5): 545-554.
- [75] Umabayashi T., Utsumi Y., Koga S., Inoue S., Matsumura J., Oda K., Fujikawa S., Arakawa K., Otsuki K. 2010. Xylem water-conducting patterns of 34 broadleaved evergreen trees in southern Japan. *Trees*, 24:571-583
- [76] 開発 一郎, 田中 正, 岡橋 生幸. 1981. 関東ロームの水分特性. 地理学評論, 54: 266-271.
- [77] 成岡 市, 岩田 幸吉, 駒村 正治. 関東ローム下層土における粗孔隙の透水, 通気および排水機能. 農業土木学会論文集, 208: 63-71.
- [78] 国土交通省大臣官房技術調査課. 2005. 国土交通省土木工事積算基準 平成 17 年度版. 建設物価調査会: 東京.
- [79] Jackson R., Canadell J., Ehleringer J., Mooney H., Sala O., Schulze E. 1996. A global analysis of root distributions for terrestrial biomes. *Oecologia*, 108(3): 389-411.
- [80] R Development Core Team. 2016. R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing: Vienna. Available online at: <http://www.R-project.org>.
- [81] von Storch H., Zwiers F. 1999. Statistical Analysis in Climate Research. Cambridge University Press: Cambridge.
- [82] Trenberth K. 1984. Some effects of finite sample size and persistence on meteorological statistics. part I: autocorrelations. *Monthly Weather Review*, 112:

- 2359-2368.
- [83] Vico G., Manzoni S., Palmroth S., Katul G. 2011. Effects of stomatal delays on the economics of leaf gas exchange under intermittent light regimes. *New Phytologist*, 192: 640-652.
- [84] Rodriguez-Iturbe I., Porporato A. 2007. *Ecohydrology of Water-Controlled Ecosystems: Soil Moisture and Plant Dynamics*. Cambridge University Press: Cambridge.
- [85] Japan Meteorological Agency. 2010. Japan hit by the hottest summer in more than 100 years. Available online at:
http://ds.data.jma.go.jp/tcc/tcc/news/press_20100910.pdf.
2016年12月28日参照.
- [86] Japan Meteorological Agency. 2012. Ranking of running days without rain at Tokyo. Available online at:
http://www.jma-net.go.jp/tokyo/sub_index/kiroku/kiroku/data/21.htm.
2016年12月28日参照.
- [87] Kosugi Y., Takahashi S., Tanaka H., Oshkubo S., Tani M., Yano M., Katayama T. 2007. Evapotranspiration over a Japanese cypress forest. I. Eddy covariance fluxes and surface conductance characteristics for 3 years. *Journal of Hydrology*, 337: 269-283.
- [88] Kumagai T., Tateishi M., Shimizu T., Otsuki K. 2008. Transpiration and canopy conductance at two slope positions in a Japanese cedar forest watershed. *Agricultural and Forest Meteorology*, 148: 1444-1455.
- [89] Zhang L., Dawes W., Walker G. 2001. Response of mean annual evapotranspiration to vegetation changes at catchment scale. *Water Resources Research*, 37: 701-708.
- [90] Feddes R., Hoff H., Bruen M, Dawson T., Rosnay P., Dirmeyer P., Jackson R., Kabat P., Kleidon A., Lilly A., Pitman A. 2001. Modeling root water uptake in hydrological and climat models. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 82: 2797-2809.
- [91] Gilman E., Masters F. 2010. Effect of tree size, root pruning, and production method on root growth and lateral stability of Quercos Virginia. *Arboriculture & Urban Forestry*, 36: 281-291.
- [92] 小松 光. 2003. 森林群落内で計測される剥離率の値. *水文・水資源学会誌*, 4: 423-438.
- [93] Oren R., Sperry J., Katul G., Pataki D., Ewers B., Phillips N., Schafer K. 1999b. Survey and synthesis of intra- and interspecific variation in stomatal sensitivity

- to vapour pressure deficit. *Plant, Cell and Environment*, 22: 1515-1526.
- [94] Pereira A., Green S., Nova N. 2007. Sap flow, leaf area, net radiation and the Priestley-Taylor formula for irrigated orchards and isolated trees. *Agricultural Water Management*, 92: 48-52.
- [95] Priestley C., Taylor R. 1972. On the assessment of surface heat flux and evaporation using large-scale parameters. *Monthly Weather Review*, 100: 81-92.
- [96] Sellers P. 1985. Canopy reflectance, photosynthesis and transpiration. *International Journal of Remote Sensing*, 6: 1335-1372.
- [97] Buckley T., Mott K., Farquhar G. 2003. A hydro-mechanical and biochemical model of stomatal conductance. *Plant, Cell and Environment*, 26(10): 1767-1785.
- [98] Penman H. 1948. Natural Evaporation from Open Water, Bare Soil and Grass. *Proceedings of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 193(1032): 120-145.
- [99] Huber B. 1928. Weitere quantitative Untersuchungen über das Wasserleitungssystem der Pflanzen. *Jahrb. Wiss. Bot.*, 67: 877-959.
- [100] Shinozaki K., Yoda K., Hozumi K., Kira T. 1964. A quantitative analysis of plant form—The pipe model theory 1. Basic analysis. *日本生態学会誌*, 14(3): 97-105.
- [101] Schuepp P. 1993. Leaf boundary layers. *New Phytologist*, 125: 477-507.
- [102] Vogel S. 2009. Leaves in the lowest and highest winds: temperature, force and shape. *New Phytologist*, 183(1): 13-26.
- [103] Maes W., Steppe K. 2012. Estimating evapotranspiration and drought stress with ground-based thermal remote sensing in agriculture: a review. *Journal of Experimental Botany*, 63(13): 4671-4712.
- [104] Defraeye T., Verboven P., Ho Q., Nicolai B. 2013. Convective heat and mass exchange predictions at leaf surfaces: Applications, methods and perspectives. *Computers and Electronics in Agriculture*, 96: 180-201.
- [105] Chabot B., Hicks D. 1982. The ecology of leaf life spans. *Annual Review of Ecology and Systematics*, 13. 229-259.
- [106] Kikuzawa K. 1991. A Cost-Benefit Analysis of Leaf Habit and Leaf Longevity of Trees and Their Geographical Pattern. *The American Society of Naturalists*, 138(5): 1250-1263
- [107] Novick K., Oren R., Stoy P., Juang J. Y., Siqueira M., Katul G. 2009. The relationship between reference canopy conductance and simplified hydraulic ar-

- chitecture. *Advances in Water Resources*, 32(6), 809-819.
- [108] 鍋嶋 絵里, 石井 弘明. 2008. 樹高成長の制限とそのメカニズム. *日本森林学会誌*, 90(6), 420-430
- [109] McCulloh K., Sperry J., Lachenbruch B., Meinzer F., Reich P., Voelker S. 2010. Moving water well: Comparing hydraulic efficiency in twigs and trunks of coniferous, ring-porous, and diffuseporous saplings from temperate and tropical forests. *New Phytologist*, 186(2), 439-450.
- [110] Reich P., Walters M., Ellsworth D. 1997. From tropics to tundra: Global convergence in plant functioning. *Ecology*, 94: 13730-13734.
- [111] Makkink G. 1957. Ekzameno de la formula de Penman. *Netherlands Journal of Agricultural Science*, 5: 290-305.
- [112] 諸泉 利嗣, 小村 拓也, 三浦 武志. 2009. Makkink 式による可能蒸発量の推定精度. *水文・水資源学会誌*, 22(6): 479-483
- [113] Komatsu H. 2005. Forest categorization according to dry-canopy evaporation rates in the growing season: comparison of the Priestley-Taylor coefficient values from various observation sites. *Hydrological Processes*, 19(19): 3873-3896.
- [114] Saito T., Tanaka T., Tanabe H., Matsumoto Y., Morikawa Y. 2003. Variations in transpiration rate and leaf cell turgor maintenance in saplings of deciduous broad-leaved tree species common in cool temperate forests in Japan. *Tree Physiology*, 23(1), 59-66.
- [115] 野島 義照. 1998. 都市における植生からの蒸散による夏季の温熱環境改善力に関する研究. 京都大学博士論文, 145.
- [116] Santiago L., Mulkey S. 2003. A test for gas exchange measurements on excised canopy branches of ten tropical tree species. *Photosynthetica*, 41(3): 343-347.
- [117] Monsi M., Saeki T. Über den Lichtfaktor in den Pflanzengesellschaften und seine Bedeutung für die Stoffproduktion. *Japanese Journal of Botany*, 14: 22-52.
- [118] Green S. 1993. Radiation balance, transpiration and photosynthesis of an isolated tree. *Agricultural and Forest Meteorology*, 64(3-4), 201-221.
- [119] Green S., Clothier B., Caspari H., Neal S. 2002. Root-zone processes, tree water use and equitable allocation of irrigation water to olives. *Transaction, American Geophysical Union*, 129: 337-345.
- [120] Farquhar G., von Caemmerer S., Berry J. 1980. A biochemical model of photosynthetic CO₂ assimilation in leaves of C₃ species. *Planta*, 149(1): 78-90.
- [121] Pammenter N., Willigen C. 1998. A mathematical and statistical analysis of the curves illustrating vulnerability of xylem to cavitation. *Tree Physiology*, 18(1):

- 589-593.
- [122] Granier A., Loustau D., Breda N. 2000. A generic model of forest canopy conductance dependent on climate, soil water availability and leaf area index. *Annals of Forest Science*, 57(8): 755-765.
- [123] Buckley T., Turnbull T., Adams M. 2012. Simple models for stomatal conductance derived from a process model: cross-validation against sap flux data. *Plant, Cell and Environment*, 35(9): 1647-62.
- [124] 小杉 緑子, 小橋 澄治, 柴田 晶三. 数種常緑広葉樹における気孔コンダクタンスのモデル化. *日本緑化工学会誌*, 20(3): 158-167.
- [125] Kumagai T. 2001. Modeling water transpiration and storage in sapwood - model development and validation. *Agricultural and Forest Meteorology*, 109: 105-115.
- [126] Baldocchi D., Xu L., Kiang N. 2004. How plant functional-type, weather, seasonal drought, and soil physical properties alter water and energy fluxes of an oak-grass savanna and an annual grassland. *Agricultural and Forest Meteorology*, 123(1-2): 13-39.
- [127] Sperry J., Adler F., Campbell G., Comstock J. 1998. Limitation of plant water use by rhizosphere and xylem conductance: results from a model. *Plant, Cell and Environment*, 21(4): 347-359.
- [128] Feddes R., Raats P. 2004. Parameterizing the soil - water - plant root system. In: *Unsaturated-Zone Modeling; Progress, Challenges and Applications*. Springer: Berlin.
- [129] Damour G., Simonneau T., Cochard H., Urban L. 2010. An overview of models of stomatal conductance at the leaf level. *Plant, Cell and Environment*, 33(9): 1419-1438.
- [130] Schaap M., Leij F., van Genuchten M. 2001. ROSETTA: a computer program for estimating soil hydraulic parameters with hierarchical pedotransfer functions. *Journal of Hydrology*, 251: 163-176.
- [131] Gardner W. 1960. Dynamic aspects of water availability to plants. *Annual Review of Plant Physiology*, 16: 323-342.
- [132] Bittelli M., Campbell G., Tomei F. 2015. *Soil Physics with Python*. Oxford University Press: Oxford.
- [133] Herkelrath W, Miller E, Gardner W. 1977. Water uptake by plant: II. The root contact model. *Soil Science Society of America Journal*, 41(6), 1039-1043.
- [134] Schenk H., Jackson R. 2002. The global biogeography of roots. *Functional Monographs*, 72(3): 311-328.

-
- [135] Mualem Y. 1976. A new model for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated porous media. *Water Resources Research*, 12(3): 513-522
- [136] van Genuchten M. 1980. A Closed-form Equation for Predicting the Hydraulic Conductivity of Unsaturated Soils¹. *Soil Science Society of America Journal*, 44(5): 892-898.
- [137] Fayer M., Simmons C. 1995. Modified soil water retention functions for all matric suctions. *Water Resources Research*, 31(5): 1233-1238.
- [138] Watson K. 1966. An instantaneous profile method for determining the hydraulic conductivity of unsaturated porous materials. *Water Resources Research*, 2(4): 709-715.
- [139] Kosugi K., Inoue M. 2001. Estimation of hydraulic properties of vertically heterogeneous forest soil from transient matric pressure data. *Water Resources Research*, 38(12): 18-58.
- [140] Green W., Ampt G. 1911. Studies on soil physics: I. The flow of air and water through soils. *Journal of Agricultural Science*, 4: 1-24.
- [141] Celia M., Bouloutas E., Zarba R. 1990. A general mass-conservative numerical solution for the unsaturated flow equation. *Water Resources Research*, 26(7): 1483-1496.
- [142] Leuning R., Zhang Y., Rajaud A., Cleugh H., Tu K. 2008. A simple surface conductance model to estimate regional evaporation using MODIS leaf area index and the Penman-Monteith equation. *Water Resources Research*, 44(10), W10419.
- [143] Komatsu H., Shinohara Y., Kumagai T., Kume T., Tsuruta K., Xiang Y., Otsuki K. 2014. A model relating transpiration for Japanese cedar and cypress plantations with stand structure. *Forest Ecology and Management*, 334: 301-312.
- [144] Kobayashi H., Iwabuchi H. 2008. A coupled 1-D atmosphere and 3-D canopy radiative transfer model for canopy reflectance, light environment, and photosynthesis simulation in a heterogeneous landscape. *Remote Sensing of Environment*, 112(1): 173-185.
- [145] Bunnik N. 1978. The multispectral reflectance of shortwave radiation by agricultural crops in relation with their morphological and optical properties. *Mededelingen Landbouwhogeschool: Wageningen*.
- [146] Goudriaan J. 1978. *Crop and micrometeorology: a simulation study*. Pudoc: Wageningen.

- [147] K. Parsons. 2003. *Human Thermal Environments*, 2nd edn. Taylor & Francis: London.
- [148] 酒井 敏. 2013. 都市を冷やすフラクタル日除け—面白くなくちゃ科学じゃない—. 気象ブックス 37. 成山堂書店: 東京.
- [149] Kobayashi H., Baldocchi D., Ryu Y., Chen Q., Ma S., Osuna J., Ustin S. 2012. Modeling energy and carbon fluxes in a heterogeneous oak woodland: A three-dimensional approach. *Agricultural and Forest Meteorology*, 152(1): 83-100.
- [150] Duursma R., Medlyn B. 2012. MAESPA: A model to study interactions between water limitation, environmental drivers and vegetation function at tree and stand levels, with an example application to CO₂ & drought interactions. *Geoscientific Model Development*, 5(4): 919-940.
- [151] Bohrer G., Katul G., Walko R., Avissar R. 2009. Exploring the effects of microscale structural heterogeneity of forest canopies using large-eddy simulations. *Boundary-Layer Meteorology*, 132(3): 351-382.
- [152] Philip J., de Vries D. 1957. Moisture movement in porous materials under temperature gradients. *Transactions, American Geophysical Union*, 38(2): 222-232.
- [153] Bittelli M., Ventura F., Campbell G., Snyder R., Gallegati F., Pisa P. 2008. Coupling of heat, water vapor, and liquid water fluxes to compute evaporation in bare soils. *Journal of Hydrology*, 362(3-4): 191-205.
- [154] Watanabe T., Kondo J. 1990. The Influence of Canopy Structure and Density upon the Mixing Length within and above Vegetation. *Journal of the Meteorological Society of Japan*, 68(2): 227-235.
- [155] Green S. 1992. Modelling Turbulent Air Flow in a Stand of Widely-Spaced Trees. *The Phoenix Journal of Computational Fluid Dynamics & its Applications*, 5: 294-312.
- [156] Katul G., Mahrt L., Poggi D., Sanz C. 2004. ONE- and TWO-Equation Models for Canopy Turbulence. *Boundary-Layer Meteorology*, 113(1): 81-109.
- [157] Watanabe T. 1993. The Bulk Transfer Coefficients over a Vegetated Surface Based on K-theory and a 2nd-Order Closure Model. *Journal of the Meteorological Society of Japan, Ser. II*, 71(1): 33-42.
- [158] Launder B., Spalding D. 1974. The numerical computation of turbulent flows. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 3(2): 269-289.
- [159] Viollet P. 1987. The modelling of turbulent recirculating flows for the purpose of reactor thermal-hydraulic analysis. *Nuclear Engineering and Design*, 99: 365-377.

-
- [160] Patankar S. (著), 水谷幸夫, 香月正司 (監訳). 1984. コンピュータによる熱移動と流れの数値解析, . 森北出版: 東京.
- [161] Kondo J., Akashi S. 1976. Numerical studies on the two-dimensional flow in horizontally homogeneous canopy layers. *Boundary-Layer Meteorology*, 10(3): 255-272.
- [162] Schulze E., Lange O., Buschbom U., Kappen L., Evenari M. 1972. Stomatal responses to changes in humidity in plants growing in the desert. *Planta*, 108(3): 259-270.
- [163] Monteith J. 1995. A reinterpretation of stomatal responses to humidity. *Plant, Cell and Environment*, 18(4): 357-364.
- [164] Sperry J., Love D. 2015. What plant hydraulics can tell us about responses to climate-change droughts. *New Phytologist*, 207(1): 14-27.
- [165] Eamus D., Taylor D., Macinnis-Ng C., Shanahan S., De Siva L. 2008. Comparing model predictions and experimental data for the response of stomatal conductance and guard cell turgor to manipulations of cuticular conductance, leaf-to-air vapour pressure difference and temperature: feedback mechanisms are able to account for all observations. *Plant, Cell and Environment*, 31(3): 269-277.
- [166] Buckley T. 2005. The control of stomata by water balance. *New Phytologist*, 168(2): 275 - 292.
- [167] Duursma R., Barton C., Lin Y., Medlyn B., Eamus D., Tissue D., Ellsworth D., McMurtrie R. 2014. The peaked response of transpiration rate to vapour pressure deficit in field conditions can be explained by the temperature optimum of photosynthesis. *Agricultural and Forest Meteorology*, 189-190: 2-10.
- [168] Sperry J., Love D. 2015. What plant hydraulics can tell us about responses to climate-change droughts. *New Phytologist*, 207(1): 14-27.
- [169] Bonan G., Williams M., Fisher R., Oleson K. 2014. Modeling stomatal conductance in the earth system: Linking leaf water-use efficiency and water transport along the soil-plant-atmosphere continuum. *Geoscientific Model Development*, 7(5): 2193 - 2222.
- [170] Mott K., Paruhurst D. 1991. Stomatal responses to humidity in air and helox. *Plant, Cell and Environment*, 14(5): 509-515.
- [171] Meinzer F. 2003. Functional convergence in plant responses to the environment. *Oecologia*, 134(1): 1-11.
- [172] 寺島 一郎. 2013. 植物の生態—生理機能を中心に—. 裳華房: 東京.

- [173] 彦坂 幸毅. 2014. 光合成の生理生態学講座, 第二版. Available online at: <http://hostgk3.biology.tohoku.ac.jp/Hikosaka/photosyn-home.html>. 2017 年 1 月 27 日参照.
- [174] Cochard H., Delzon S. 2013. Hydraulic failure and repair are not routine in trees. *Annals of Forest Science*, 70(7): 659-661.
- [175] Meinzer F., Grantz D. 1990. Stomatal and hydraulic conductance in growing sugarcane: stomatal adjustment to water transport capacity. *Plant, Cell and Environment*, 13(4): 383-388.
- [176] ShangWei S., WeiLun Y., XinLi X., XiaoDong L., SenKun C. 2009. Effects of different pruning intensity on microclimate growth and yield of crops in agroforestry systems. *Journal of Beijing Forestry University*, 31(1): 25-30.
- [177] Qiu C., Ethier G., Pepin S., Xu Q., Gosselin A., Desjardins Y. 2016. Hydraulic and photosynthetic compensation versus fruit yield of red raspberry following partial leaf defoliation. *Scientia Horticulturae*, 213: 66-75.
- [178] Pataki D., Oren R., Phillips N. 1998. Responses of sap flux and stomatal conductance of *Pinus taeda* L. trees to stepwise reductions in leaf area. *Journal of Experimental Botany*, 49(322): 871-878.
- [179] Pinkard E. 2003. Physiological and growth responses related to pattern and severity of green pruning in young *Eucalyptus globulus*. *Forest Ecology and Management*, 182(1): 231-245.
- [180] Quentin A., O'Grady A., Beadle C., Worledge D., Pinkard E. 2011. Responses of transpiration and canopy conductance to partial defoliation of *Eucalyptus globulus* trees. *Agricultural and Forest Meteorology*, 151(3): 356-364.
- [181] Quentin A., O'Grady A., Beadle C., Mohammed C., Pinkard E. 2012. Interactive effects of water supply and defoliation on photosynthesis, plant water status and growth of *Eucalyptus globulus* Labill. *Tree Physiology*, 32(8): 958-967.
- [182] Forrester D., Collopy J., Beadle C., Warren C., Baker T. 2012. Effect of thinning, pruning and nitrogen fertiliser application on transpiration, photosynthesis and water-use efficiency in a young *Eucalyptus nitens* plantation. *Forest Ecology and Management*, 266: 286-300.
- [183] Alcorn P., Forrester D., Thomas D., James R., Smith R., Nicotra A., Bauhus J. 2013. Changes in Whole-Tree Water Use Following Live-Crown Pruning in Young Plantation-Grown *Eucalyptus pilularis* and *Eucalyptus cloeziana*. *Forests*, 4(1): 106-121.
- [184] Damascos M., Ronquim C., Prado C. 2005. Gas exchange and plant growth

- after defoliation on *Leandra lacunosa*, a cerrado woody species with continuous leaf production. *Brazilian Archives of Biology and Technology*, 48(6): 967-974.
- [185] Schäfer K., Renninger H., Clark K., Medvigy D. 2014. Hydrological responses to defoliation and drought of an upland oak/pine forest. *Hydrological Processes*, 28(25): 6113-6123.
- [186] Whitehead D., Jarvis P. 1981. Coniferous forests and plantations. In: *Water deficits and plant growth*, 49-152. Academic Press: New York.
- [187] <https://www.ffpri.affrc.go.jp/kys/research/kankou/kysmr/documents/mr15.pdf>
- [188] Chalker-Scott L. 2015. Horticultural Myths, Maintaining Trees and Shrubs, The Myth of Top-Pruning Transplanted Material. Available online at: <https://puyallup.wsu.edu/lcs/>. 2017年1月27日参照.
- [189] Ewers B., Oren R., Kim H., Bohrer G., Lai C. 2007. Effects of hydraulic architecture and spatial variation in light on mean stomatal conductance of tree branches and crowns. *Plant, Cell and Environment*, 30(4): 483-496.
- [190] Chuine I., Morin X., Bugmann H. 2010. Warming, Photoperiods, and Tree Phenology. *Science*, 329(5989).
- [191] 久米 篤. 2011. フェノロジー観測を気候変動バイオセンサーとして考える. フェノロジー研究, 46: 30-32.
- [192] 気象庁. 1996. 新しいサクラの開花予想. 気象庁解説資料, 24.
- [193] Laube J., Sparks T., Estrella N., Menzel A. 2014. Does humidity trigger tree phenology? Proposal for an air humidity based framework for bud development in spring. *New Phytologist*, 202(2): 350-355.
- [194] Wegner L. 2014. Root pressure and beyond: energetically uphill water transport into xylem vessels? *Journal of Experimental Botany*, 65(2): 381-393.
- [195] Sakurai-Ishikawa J., Murai-Hatano M., Hayashi H., Ahamed A., Fukushi K., Matsumoto T., Kitagawa Y. 2011. Transpiration from shoots triggers diurnal changes in root aquaporin expression. *Plant, Cell & Environment*, 34(7): 1150-1163.
- [196] Laur J., Hacke U. 2013. Transpirational demand affects aquaporin expression in poplar roots. *Journal of Experimental Botany*, 64(8): 2283-2293.
- [197] 成田 健一, 三上 岳彦, 菅原 広史, 本條 毅, 木村 圭司, 桑田 直也. 2004. 新宿御苑におけるクールアイランドと冷気のにじみ出し現象. *地理学評論*, 77(6): 403-420.
- [198] Crockford R., Richardson D. 2000. Partitioning of rainfall into throughfall, stem-flow and interception: effect of forest type, ground cover and climate. *Hydrological Processes*, 14(16-17): 2903-2920.

- [199] David T., Gash J., Valente F., Pereira J., Ferreira M., David J. 2006. Rainfall interception by an isolated evergreen oak tree in a Mediterranean savannah. *Hydrological Processes*, 20(13): 2713-2726.
- [200] 蔵治 光一郎, 田中 延亮. 2003. 世界の熱帯林における樹冠遮断研究. *日本森林学会誌*, 85(1): 18-28.
- [201] Saito T., Matsuda H., Komatsu M., Xiang Y., Takahashi A., Shinohara Y., Otsuki K. 2013. Forest canopy interception loss exceeds wet canopy evaporation in Japanese cypress (Hinoki) and Japanese cedar (Sugi) plantations. *Journal of Hydrology*, 507: 287-299.
- [202] Sato H., Ito A., Ito A., Ise T., Kato, E. 2015. Current status and future of land surface models. *Soil Science and Plant Nutrition*, 61(1): 34-47.
- [203] West G., Brown J., Enquist, B. 1997. A general model for the origin of allometric scaling laws in biology. *Science*, 276(5309): 122-126.
- [204] Lin Y., Medlyn B., Duursma R., Prentice I., Atkin O., Barton C., Bennie J., Bosc A., Broadmeadow M., Cernusak L., Angelis P., Drake J., Eamus D., Ellsworth D., Freeman M., Ghannoum G., Gimeno T., Han Q., Hikosaka K., Hutley L., Kelly J., Kikuzawa K., Kolari P., Koyama K., Limousin J., Linderson M., Lów M., Macinins-Ng C., Martin-StPaul N., Meir P., Mikkelsen T., Mitchell P., Nippert J., Onoda Y., de Beeck M., de Dios V., Rey A., Rogers A., Rowland L., Setterfield S., Sun W., Tarvainen L., Tausz-Posch S., Tissue D., Uddling J., Wallin G., Warren J., Wingate L., Zaragoza-Castells J. 2015. Optimal stomatal behaviour around the world. *Nature Climate Change*, 5(5): 459-464.
- [205] Pearcy R., Muraoka H., Valladares F. 2005. Crown architecture in sun and shade environments: Assessing function and trade-offs with a three-dimensional simulation model. *New Phytologist*, 166(3): 791-800.
- [206] Kubo T., Kohyama T. 2005. Abies population dynamics simulated using a functional-structural tree model. *Ecological Research*, 20(3): 255 - 269.
- [207] 田崎 晴明. 2000. 熱力学 現代的な視点から. 培風館: 東京.
- [208] Franks P., Cowan I., Farquhar G. 1998. A study of stomatal mechanics using the cell pressure probe. *Plant, Cell & Environment*, 21: 94-100.
- [209] Pieruschka R., Huber G., Berry J. 2010. Control of transpiration by radiation. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 107: 13372-13377.
- [210] 木下 俊則. 日本植物生理学会ホームページ, みんなのひろば, 解説・エッセイ, 気孔の働きと開閉の仕組み. Available online at:

<https://jspp.org/hiroba/essay/kinoshita.html>. 2017 年 1 月 15 日参照.

- [211] Comstock J., Mencuccini M. 1998. Control of stomatal conductance by leaf water potential in *Hymenoclea salsola* (T. & G.), a desert subshrub. *Plant, Cell & Environment*, 21: 1029-1038.

後記

続・今後の課題

本研究では十分には触れることができなかつたが、実際の設計に活かすという観点での課題として、研究者の立場から出来ることとしては、灌水計画の問題を考える価値は高いと思われる。学会や勉強会の場で造園実務に関わる方たちの話を伺う機会がしばしばあったが、その都度に、蒸散量が多い方が良いと思っているのは熱環境工学の研究者くらいではないか、と感じられた。勿論筆者自身が蒸散が不要だとまで感じたわけではないが、研究者間での常識と実務者の認識との間にかなりのギャップがあるように感じられたことは確かである。最小限のコストで最大限の環境緩和効果を得る方法を考える価値はあると思われる。

最後に研究者以外の立場として意見を述べるならば、単に不快でないというだけでなく、どのような緑化空間が“良い”か、という問題を真剣に議論するならば、熱の問題だけに限定するのではなく、造園・意匠あるいは計画的な観点が必要と信じる。緑化の熱的効果に関する研究を進める上でも、将来的には、単に熱的快適性を追及するだけでなく、現実的な設計上の制約の中での最善を検討するという観点が必要であると感じる。また、研究を進める中で、極論を言えば100の論文を書くよりも、実際に“良さ”を体感出来るような実作を通して良さを伝えること、あるいは発見していくことが有効なのではないかという印象も持つこともあった。学術研究の成果を社会に還元しようとした場合、一般には何らかのルールを形式をとる場合（例えば緑被率の規制）が多いように思われるが、個人的な意見では、何かを規制する方向性では最悪の状況を回避することは可能であっても、ポジティブな価値を生むことには繋がらないのではないかと感じている。研究以外の方法によっても、現実の問題を解決していく可能性を考え、実行していきたいと個人的には考えている。

謝辞

本論文の執筆にあたって、学術研究の面白さを伝えて下さった方々、専門知識・技術を提供して下さいました方々、日常生活を支えて下さった方々の全てに感謝いたします。

東京工業大学 准教授 浅輪貴史先生には、修士課程からの5年間に渡り、物事の論理的な捉え方・自分の考えを人に伝える術を教えていただき、また、留学と国際会議での発表の機会、そして本論文の研究題材を与えていただきました。特に博士後期課程では自分の思うままに—適宜軌道修正していただきつつ—研究を進めていましたが、研究を始めたばかりの何も出来なかった頃を思い返すと、自分の土台として、先生から教わった考え方・方法論が在ったからこそ研究を進めることが出来たのだと思います。修士進学時点では研究者になるつもりなど全く無かった私に対して、まず第一に、研究の面白さを伝えて下さったのは浅輪先生でした。心より感謝申し上げます。

国立環境研究所 特別研究員 押尾晴樹氏とは、私が浅輪研究室に入って以来、浅輪研樹木班として殆ど常に一緒に研究をさせていただきました。本論文第5章の内容は、押尾さんと、海洋研究開発機構 主任研究員 兼 東京工業大学 特任准教授 小林秀樹先生、そして当時大学院生であった、株式会社パスコ 杉山裕武氏の協力がなければ、決して実現出来るものではありませんでした。地球惑星科学科で学び、「もっと地に足の着いた仕事をしたい」と考えられていたという押尾さんと、建築学科で学び、「建築ももっと理屈でやれる部分があるんじゃないか」と考えていた私が偶々同時期に浅輪研究室に所属していたことが、本研究の成果を生んだものと思っています。研究において論理面では決して妥協しない姿勢は、押尾さんから学ばせていただきました。

トヨタ自動車バイオ・緑化研究所 清水克哉氏とダイトウテクノグリーン株式会社 久保田光政氏には、本研究第2・3章の圃場計測に際して、数々のご協力をいただきました。

本論文の審査にあたり、東京工業大学 教授 田村哲郎先生、木内豪先生、神田学先生、同准教授 大風翼先生、同特任准教授 小林秀樹先生には、研究の完成度を高め、また更なる研究課題を考える上で、非常に貴重なご助言をいただきました。本論文の中で解決できなかった課題は数多くありますが、先生方のご助言を指針・励みとして、本研究の内容を深化させていきたいと考えています。

東京工業大学 名誉教授 兼 放送大学 教授 梅干野晁先生には修士課程での副指導教員として、東京工業大学 准教授 湯浅和博先生には学士課程での指導教員として、大変お世話になりました。また、東京工業大学 名誉教授 藤井修二先生、同教授 中村芳樹先生、同准教授 鍵直樹先生には、EEゼミにおいて数多くのご助言をいただきました。EEゼミでの発表は、専門の異なる相手に自分の仕事をわかりやすく伝えることを真剣に考える機会として、非常に重要な経験でした。

佐賀大学 准教授 中大窪千晶先生には、学会等でご一緒する機会があるごとに、建築分野の研究者としての在り方についてご助言をいただきました。熊本大学 助教 高田真人先生には、修士課程において研究の方法と伝え方についてご助言いただき、また、住宅緑化の設計・数値シミュレーションを行った際にも、懇切丁寧なご指導をいただきました。私自身も博士後期課程進学以降は後輩の指導に当たる機会も増えましたが、私にとっては、高田さんの姿がメンターとしての模範となっています。

浅輪研究室秘書 薄葉千景氏には、常日頃から温かいお心遣いをいただき、また、レクリエーションや事務手続きの都度大変お世話になりました。研究室の同輩・後輩、特に研究上でも関わりが深かった山下広人氏、杉山裕武氏、石丸智貴氏、竹本拓矢氏と日々の苦楽を共にできたおかげで、博士後期課程での研究生活を愉快地に過ごせたものと思います。そして両親、姉と祖父には博士後期課程進学を認めていただき、経済的にも精神的にも支えていただきました。心より感謝申し上げます。

「巨人の肩の上に乗る」という言葉がありますが、本研究も多くの「巨人」の肩をお借りすることで、私一人では到底及ばなかったであろう成果を得ることが出来ました。地球物理学も生物学も正式な教育を受けていない私のような未熟者が本論文を執筆できたのは、参考文献として取り上げた論文類に加え、多くの方々が善意による教育活動や、Web 上での情報公開を行ってくださっていたお陰と言えます。この場でお礼を申し上げます。Decagon 社 Dr. Gaylon Campbell 先生には、「生物環境物理学の基礎」と「パソコンで学ぶ土の物理学」という2冊の教科書を通して大変お世話になりました。この2冊がなければ、本論文を執筆することができなかつただけでなく、環境科学の面白さを殆ど理解することが出来なかつたように思います。九州大学 教授 久米篤先生には、「光と水と植物のかたち」「生物環境物理学の基礎」「植物生態生理学 (W. Larcher 著)」「植生のリモートセンシング」といった極めて重要な文献を翻訳・執筆していただき、大変お世話になりました。京都大学 特定准教授 小松光先生には数多くの論文・総説を通して、また、国立環境研究所 竹中明夫氏には Web ページを通して、森林水文学・植物生態学分野の専門知識だけでなく、環境科学と社会の関係の在り方を学ばせていただきました。Duke 大学 Prof. Gabriel Katul 先生、京都大学 教授 小杉緑子先生、名古屋大学 准教授 熊谷朝臣先生には森林水文学について、California 大学 Barkley 校 Prof. Dennis Baldocchi 先生、東北大学 名誉教授 近藤純正先生には接地気象学について、同教授 彦坂幸毅先生、Western Sydney 大学 Dr. Remko Duursma 先生には植物生理生態学について、北海道大学 教授 見延庄士郎先生には大気海洋の力学・データ解析について、同助教 久保拓弥先生には生態学と統計科学について、Web 上で公開していただいた膨大な講義資料やサンプルプログラムを通して、各学問領域の最新の知見と面白さを教えていただきました。残念ながら殆どの方とはお会いする機会に恵まれませんでした。いつの日か、学会等の場で直接お礼を申し上げたいと存じます。

既発表論文等

審査付論文

1. 清野友規, 浅輪貴史, 梅干野晁, 清水克哉 (2015) 都市緑化樹木を対象とした大型重量計による単木蒸散量の計測と樹木の形態的・生理的特徴に基づく分析, 日本建築学会環境系論文集, 第80巻, 713号 (第3章)
2. Takashi Asawa, Tomoki Kiyono, Akira Hoyano: Continuous measurement of whole-tree water balance for studying urban tree transpiration: from minutes to years, *Hydrological Processes* (投稿中, 第2章)
3. Tomoki Kiyono, Takashi Asawa: Parsimonious SPAC model to predict water and energy balance, *Hydrological Processes* (投稿予定, 第4章)
4. Tomoki Kiyono, Takashi Asawa, Haruki Oshio: Evaluation of simple parameterization for whole-tree transpiration using 3-D radiation transfer simulation, *Tree Physiology* (投稿予定, 第5章)

国際会議

全文審査付プロシーディング

1. Takashi Asawa, Tomoki Kiyono (2014) Microclimatic effects of individual trees with their transpiration, 3rd International Conference on Countermeasures to Urban Heat Island Proceedings, 1362-1372, Venice, Italy (口頭発表)
2. Takashi Asawa, Tomoki Kiyono (2014) Comparison of Whole-Tree Transpiration among Urban Tree Species Using a Novel Weighing Lysimeter, PLEA 2014, Ahmedabad, India (口頭発表)

アブストラクト審査付

1. Takashi Asawa, Tomoki Kiyono (2014) Quantification of whole-tree transpiration for urban tree species using a novel weighing lysimeter, 7th Japanese-German Meeting on Urban Climatology, Hannover, Germany (口頭発表)
2. Tomoki Kiyono, Takashi Asawa, Hoyano Akira and Shimizu Katsuya (2015) Weighing whole tree transpiration rate of urban trees and analysis of trees morpho-physiological effects, 9th International Conference on Urban Climate, Toulouse, France (口頭発表)

学会発表

1. 清野友規, 浅輪貴史, 梅干野晁, 清水克哉 (2013) ケヤキ単木の重量計測に基づいた蒸散モデルの検証, 日本ヒートアイランド学会全国大会, A-27, 長野 (ポスター発表)
2. 清野友規, 浅輪貴史, 梅干野晁, 清水克哉 (2013) 都市緑化を対象とした単木樹の熱・水収支特性の計量化と数値モデル化 その9 単木の重量計測に基づいた蒸散モデルの検証, 日本建築学会大会学術講演梗概集, D-1, 739-740, 愛知 (口頭発表)
3. 清野友規, 浅輪貴史, 梅干野晁, 清水克哉 (2014) 重量計測に基づく単木蒸散量の種間差の分析, 日本ヒートアイランド学会全国大会, A-36, 佐賀 (ポスター発表) (ベストポスター賞)
4. 石丸智貴, 浅輪貴史, 清野友規, 清水克哉 (2014) 熱画像を用いた樹木の対流熱伝達率の算出手法, 日本ヒートアイランド学会全国大会, A-37, 佐賀 (ポスター発表)
5. 浅輪貴史・清野友規 (2014) 都市緑化を対象とした単木樹の熱・水収支特性の計量化と数値モデル化 その10 樹種別の蒸散量の比較分析とデータベース化, 日本建築学会大会学術講演梗概集, D-1, 873-874, 神戸 (口頭発表)
6. 清野友規, 浅輪貴史 (2014) 都市緑化を対象とした単木樹の熱・水収支特性の計量化と数値モデル化 その11 気象条件に対する水蒸気拡散コンダクタンスのモデル化, 日本建築学会大会学術講演梗概集, D-1, 875-876, 神戸 (口頭発表)
7. 石丸智貴・浅輪貴史・押尾晴樹・清野友規 (2014) 都市緑化を対象とした単木樹の熱・水収支特性の計量化と数値モデル化 その12 熱画像を用いた複数樹種の対流熱伝達率の算出, 日本建築学会大会学術講演梗概集, D-1, 877-878, 神戸 (口頭発表)
8. 清野友規 (2014) 大型重量計による単木蒸散量の計測と樹木の形態・生理的特徴に基づく分析, 公益財団法人 都市緑化機構 特殊緑化に関する研究者発表会講演要旨, 29-32, 東京 (口頭発表)
9. 清野友規, 浅輪貴史 (2015) 都市熱環境評価のための単木蒸散量の重量計測, 日本農業気象学会全国大会講演要旨, 85, 茨城 (口頭発表)
10. 清野友規, 浅輪貴史, 押尾晴樹 (2015) 複数樹種の三次元形態に基づく気孔コンダクタンスパラメータの算定と一般化, 日本ヒートアイランド学会全国大会, A-43, 埼玉 (ポスター発表)
11. 石丸智貴・浅輪貴史・押尾晴樹・清野友規 (2015) 都市緑化を対象とした単木樹の熱・水収支特性の計量化と数値モデル化 その13 レーザースキャニングによる複数樹種の三次元形態の取得, 日本建築学会大会学術講演梗概集, D-1, 737-738,

神奈川（口頭発表）（優秀発表賞）

12. 清野友規，浅輪貴史（2015）都市緑化を対象とした単木樹の熱・水収支特性の計量化と数値モデル化 その14 単木の蒸散予測における気孔コンダクタンスパラメータの一般化，日本建築学会大会学術講演梗概集，D-1，739-740，神奈川（口頭発表）（優秀発表賞）
13. 清野友規，浅輪貴史（2016）樹木蒸散量に対する土壌水分の影響予測を目的とした簡便な SPAC モデルの検討・提案，日本農業気象学会全国大会講演要旨，136，岡山（ポスター発表）
14. 清野友規，浅輪貴史（2016）都市緑化を対象とした単木樹の熱・水収支特性の計量化と数値モデル化 その15 蒸散への土壌水分の影響予測のための簡便な SPAC モデルの提案，日本建築学会大会学術講演梗概集，D-1，955-956，福岡（口頭発表）（優秀発表賞）

受賞

1. ベストポスター賞，日本ヒートアイランド学会，2014年7月
2. 若手優秀発表賞，日本建築学会環境工学委員会，2015年11月
3. 若手優秀発表賞，日本建築学会環境工学委員会，2017年1月

研究助成

1. 平成26年度調査研究助成，公益財団法人 都市緑化機構，2014年9月

その他の業績

1. 浅輪貴史・清野友規（2015）三次元レーザースキャナと濾紙蒸発法を用いた建物外表面における対流熱伝達率分布の可視化 その3 小学校校舎を対象にした大規模実測，日本建築学会大会学術講演梗概集，D-1，619-620，神奈川（口頭発表）
2. 浅輪貴史・清野友規（2015）建物壁面の対流熱伝達率はどのように分布しているのか？ レーザースキャニングと濾紙蒸発法の併用に依る多点計測，日本ヒートアイランド学会全国大会，A-25，埼玉（ポスター発表）
3. 押尾晴樹・浅輪貴史・清野友規・石丸智貴（2016）航空機 LiDAR を用いた都市空間における樹木の三次元情報の計量化 その8 街路樹から生じる夜間冷気の暑熱緩和効果の解析，日本リモートセンシング学会，P25，千葉（ポスター発表）

-
4. 竹本拓矢・浅輪貴史・押尾晴樹・清野友規（2016）都市緑化を対象とした単木樹の熱・水収支特性の計量化と数値モデル化 その16 樹冠の三次元形態を考慮した樹木の夜間冷気生成に関する数値解析，日本建築学会大会学術講演梗概集，D-1，957-958，福岡（口頭発表）（優秀発表賞）

付録 A

樹木の環境適応に関する考察とレビュー

本付録では、第2・3章の計測において、蒸散量に大きな影響を与えていたことが確認されたものの定量化できなかった現象について、将来的な研究の糸口となることを期待して、関連しうる要因を考察し、既往研究をレビューする。ここで取り上げる現象は、いずれも生物学的な環境適応の結果であった可能性が高いと考えられるが、

- 定量的な議論を行う上で必要な項目（光合成速度、根の伸長など）の計測を本研究では行っていなかった。
- 植物生理生態学分野においても常識とは言い難い、あるいは未解明の要因が影響していた可能性がある。

といった理由から、論理的・系統的な考察というよりも、不確実性の高い推論・可能性の列挙とならざるをえないため、各章での考察とは分離して本付録において議論する。

ケヤキ蒸散量の経年変化(1)—剪定（外因性の葉面積変化）が蒸散に与える影響。

第2章において、2010年当時のケヤキ供試木が、高温・乾燥条件において2011年以降よりも多量の蒸散を行っていた可能性を示した（表2.2, 図2.13）。2011年以降で特に顕著であった、飽差に対する蒸散量の飽和型の応答は、一般には水供給速度の限界と解釈される（Oren et al., 1999b [92]）。しかし水供給だけの問題であれば、単純には各年のピーク蒸散量は等しくなると考えられ、「何故2010年において蒸散量が多かったのか？」という疑問が残る。この間接的な説明として、「何故2012年で蒸散量が減ったのか？」と問題を捉え直すと、*apparent feedforward responses* と呼ばれる現象によって部分的に説明ができる。

飽差が小さな範囲では、飽差の増大に対して蒸散量は飽和的に増大するが、飽差が非

常に大きくなると、気孔コンダクタンスの減少の影響が勝り蒸散量も減少することがしばしば報告される (e.g., Shulze et al., 1972 [161]; Monteith, 1995 [162]). この現象は飽差の増大に対する孔辺細胞の単純な feedback 応答^{*1}のみでは説明ができないことから、"feedforward" 応答と呼ばれる。 *apparent feedforward responses* を引き起こす原因には諸説あるが、代表的なものは以下の3つである。なお、以下の3仮説は互いに矛盾するものではないため、すべて正しい可能性もある。

1. クチクラ蒸散^{*2}への気孔応答説—高温・乾燥条件では葉のクチクラ層からの蒸発が無視できなくなり、孔辺細胞はクチクラ蒸散によって増大した水ストレスを感知してより厳しく気孔を閉鎖する (Farquhar, 1978 [163]; Eamus et al., 2008 [164]).
2. 水理的制限説—乾燥条件では土壌—葉の通水経路内でキャビテーション (気泡; 図 A.1) が発生し、エンボリズム (塞栓症) を引き起こすために通水コンダクタンス・蒸散量が減少する (Oren et al., 1999b [92]; Buckley et al., 2005 [165]).
3. 光合成制限説—高温条件では、酵素の失活・呼吸量の増加によって光合成速度が低下し、気孔閉鎖・蒸散量の減少が起こることから、野外で観測される *apparent feedforward responses* は飽差—温度の相関によって生じた擬似相関の可能性があると (Duursma et al., 2014 [166]).

乾燥条件でのキャビテーションの発生、高温条件での光合成速度低下は広く一般に知られた現象であり、単木・群落スケールの蒸散量に影響しうることも認められている^{*3}。クチクラ蒸散も一般に知られた現象ではあるが、これが単木スケールでどの程度の量になるかを測定した既往研究は筆者の知る範囲では存在しない。上記の仮説を本研究のケヤキ供試木の条件に当てはめて考えると、以下のようになる。

1. クチクラ説—葉面積が (2010 年比で) 倍増していた 2012 年においては影響があった可能性がある。ただし、2011 年の時点では葉面積は 2010 年と大きくは違わなかった (図 A.2) ため、2011 年の蒸散特性変化の説明が付かない。
2. 水理説—同上。2012 年において単位葉面積あたりの通水コンダクタンスが低下し

^{*1} 孔辺細胞は水蒸気濃度そのものを検知しているわけではないことが知られる (Mott & Parkhurst, 1991 [169]). したがって正確には、蒸散量の増大、または、孔辺細胞 and/or 隣接する表皮細胞の浸透圧 and/or 膨圧の変化に対する feedback 応答である。

^{*2} 葉の表皮にはクチクラ (cuticle) と呼ばれる防水層があるが、防水は完全ではなく漏出がある。これがクチクラ蒸散と呼ばれる。値が小さいので水文気象研究では通常は無視される。

^{*3} キャビテーションについては Tyree & Zimmermann (2002) のテキストおよび、Utah 大学の J. Sperry のグループの成果、例えば Sperry & Love (2015) のレビュー [167] を参照。また、NCAR の最新の LSM (Community Land Model ver.4.5) にはキャビテーション効果を含めた SPAC モデルが採用されている (Bonan et al., 2014 [168]). 光合成・気孔コンダクタンスと温度変化の関係は、(第 2 世代以降の LSM の標準モデルでもある) FvCB 生化学光合成モデル [119] と Ball-Berry-Leuning [20] モデルによって自然に予測される結果である。

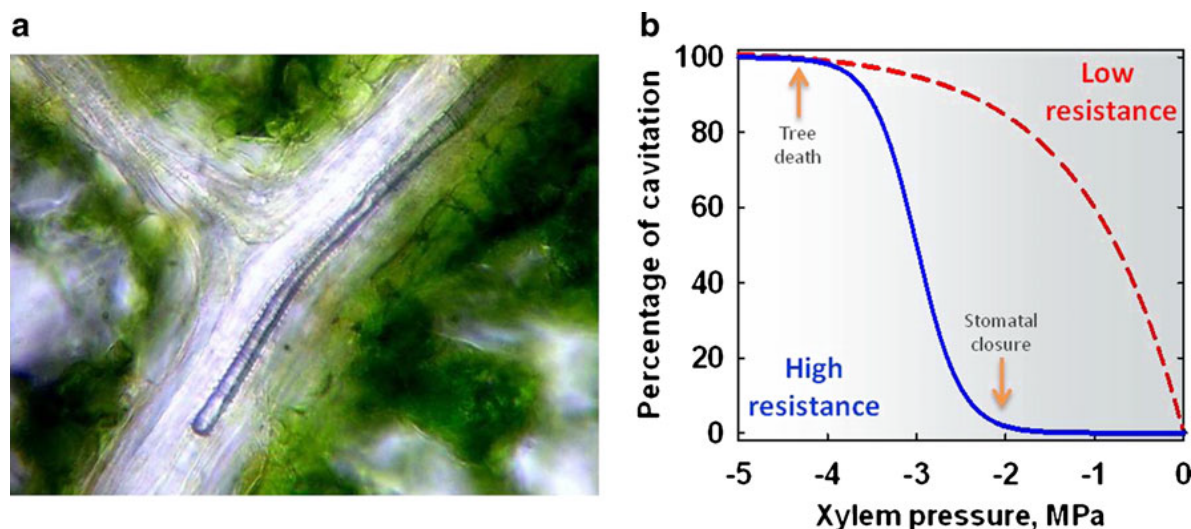


図 A.1 (a) カシの葉脈中に発生したキャビテーションの光学顕微鏡写真, (b) 木部水ポテンシャルとキャビテーション発生率（通水コンダクタンス減少率）の関係 (Cochard & Delzon, 2013 [173]).

ていたという第2章での考察が正しく、かつケヤキ供試木の主通水抵抗が枝末端や葉内だった（末端部でキャビテーション・エンボリズムが発生していた）場合には、影響があった可能性がある。ただし、2011年の蒸散特性変化の説明が付かない。

3. 光合成説—同上。ケヤキ供試木において”*functional convergence*”（後述）が生じていた場合は、影響があった可能性がある。2010年時点で単位葉面積あたりの通水コンダクタンスが大きかったとすれば、単位葉面積あたりの光合成能力（Rubisco^{*4}量）も大きかった可能性が高く、Rubisco量が多いほど光飽和（高温）条件での光合成速度・気孔コンダクタンスが増大するためである。ただし、この仮説でも2011年の蒸散特性変化は説明が付かない。

functional convergence とは、光合成能力と通水コンダクタンスの（比例的）関係における生態学的な合理化仮説である (Meinzer, 2003 [170])。つまり、CO₂ 固定を担う Rubisco の量と、より多くの CO₂ を取り込むために必要な気孔開度を維持するための通水コンダクタンスは比例的な関係にあるという仮説・経験的事実である^{*5}。

夏季日中のキャビテーションの発生や *functional convergence* は様々な植物種で一

^{*4} リブローズ 1,5-ビスリン酸カルボキシラーゼ/オキシゲナーゼ。RUBP（リブローズ 1,5-ビスリン酸）への CO₂ 固定（および酸化反応）を触媒するタンパク質酵素。

^{*5} Rubisco も水輸送機関（根・木部）も炭素や窒素を消費して形成されるものであり、どちらか一方だけが低い状態は「宝の持ち腐れ」になってしまうことから、両者を比例的に成長させることが植物にとって最も合理的な判断である事がわかる。なお、こうした現象は植物の様々な部位・現象で確認される。種生物学会, 2003 [34]; 寺島, 2013 [171]; 彦坂, 2014 [172]などを参照。



図 A.2 本研究のケヤキ供試木 (2011 年 9 月).

般的に見られる現象であるため、本研究のケヤキ供試木の経年変化について *apparent feedforward responses* が関係していた可能性は十分にあると考えられる。しかし上述の通り、それを立証するデータは得られていない（非常に多くの仮定を含む）上に、計測された経年変化パターンの全てを説明できるわけでもない。これらの現象が、都市緑化樹木の単木蒸散量にどの程度影響しうるか、あるいは剪定と単木蒸散量の関係にどのように影響するかを明らかにするためには、蒸散量だけでなく、光合成量や通水コンダクタンスと併せた新たな計測・実験が必要である。

外因性の葉面積変化が植物に与える影響は、光合成量・成長量については比較的古くから研究されてきたが、蒸散量については 90 年代以降から本格的に調査されるようになった*6。しかし、都市緑化樹木の蒸散に関しては、筆者の知る限りでは剪定の影響を調査した研究は存在していない*7。森林や農場における既往研究の目的は、概ね以下のように分

*6 恐らくは、樹液流法の確立と、Whitehead & Jarvis (1981) のレビュー [185] を契機に水供給と蒸散・光合成の関係が注目されるようになったことが原因と思われる。

*7 実験開始時点での本研究がそうであったように、造園・林学分野では「葉の剪定によって蒸散量が減るため、移植時の樹木への負担を減らすことができる」という通念がある (e.g., 森林総合研究所, 1991 [186]). ただし、この種の剪定に否定的な立場の造園専門家もいる (e.g., Chalker-Scott, 2015 [187]).

類できる。

- 剪定によってガス交換効率を高め果実収穫量を増すことを目的とした農業気象学研究 (Meinzer et al., 1990; Sun et al., 2009; Qiu et al., 2016 [174]-[176]).
- 間伐・剪定による水資源管理を目的とした森林水文学研究 (Pataki, Oren & Philips, 1998; Pinkard, 2003; Quentin et al., 2011, 2012; Forrester et al., 2012; Alcorn et al., 2013 [177]-[182]).
- 虫害・竜巻などによる被害把握を目的とした生態学研究 (Oren et al., 1999a; Damascos et al., 2005; Schäfer et al., 2014 [46][183][184]).
- Free-Air CO₂ Enrichment (FACE) などの施肥によって葉面積を増大させて根/葉面積比を人為的に変えた, 植物水分生理・気候変動予測に関する研究*⁸.

植物種や気象条件, 葉の減少量は各研究で異なるが, 大半の研究において単位葉面積あたりの通水コンダクタンス増大による葉面積減少の補償効果が確認されている. 結論をまとめると, 個体スケールでの蒸散量は剪定前の数 10% 減少したという報告 [175][182][184] から, (段階的に葉面積を減らしたところ) 半減に至るまでの段階ではほぼ完全に補償されたとする報告 [177] まである. また, 剪定の影響は数ヶ月程度で失われる場合が多いようである.

苗木を対象にポロメーター計測を行った Damascos et al. (2005) において, 樹冠の上半分と下半分のいずれを剪定するかによって結果が変化すると報告されていること [183] は興味深い. Damascos et al. (2005) では個体スケールの蒸散量は計測されていなかったが, 下半分を選定した場合は幹・根の成長量 (乾燥重量の増加量) が増大し, 上半分を選定した場合にはより多くの葉が作られたことが報告されている. この結果は明らかに, 剪定の影響を受けて, 植物が光合成・蒸散の資源配分バランスを調整 (*allocation*) したことを示している.

一般に, 光合成・蒸散量を議論する上では樹冠内日射環境の考慮が重要であるが, 外因性の葉面積変化の影響を議論した既往研究では, シュート単位 [176] や鉛直次元モデル (Ewers et al., 2007 [188]) での評価に限定されており, 高木の樹冠内の部位ごとの PAR 吸収量と単木スケールの光合成・蒸散量の関係を議論した研究は少ない. 本研究では, 第 5 章での LAD 分布計算では 2010 年時点でのケヤキ供試木の結果のみ使用していたが, LiDAR 計測は 2012 年の夏季においても行っていた. LAD の空間分布 (葉の相互被陰) の考慮によって, 樹冠内の各部位でどの程度の蒸散が行われていたか (単木蒸散量に有効な日向の葉面積が 2010-2012 年でどの程度変化していたか) の把握や, 仮想的に剪定を行った場合にどのような変化が予想されるかについて, 今後分析を行う価値はあると思わ

*⁸ この種類の既往研究は数が多い. やや古い, 小池 [34], pp.119-138 に日本語解説がある.

れる。

ケヤキ蒸散量の経年変化 (2)—春期 (展葉期) の蒸散量

第 2 章において、春期におけるケヤキ供試木の日蒸散量 E_T が、2011 年では 4 月上旬から徐々に増大していたのに対し、2011 年では 4 月下旬から 5 月上旬の範囲で急激に増大しており、変化パターンが年ごとに大きく異なっていたことを示した (図 2.10)。この原因としては、2011 年では 4 月下旬から 5 月上旬に雨天・曇天日が多かったために気温・飽差の上昇が緩やかであったことが一因として挙げられるが、ケヤキ供試木の蒸散特性も異なっていた可能性が高い*⁹。通年で評価した場合、2011-2012 年の蒸散特性は大きくは違わなかったことを考えると (図 2.13)、2011、2012 年の 4-5 月の蒸散特性の違いは、展葉時期の違いによるものであった可能性があると考えられる。

一般には、展葉時期などの植物季節 (フェノロジー) は主に気温、光周期、凍結によって制御されていると考えられている。特に展葉時期に関しては気温の影響が強いと考えられており (Chuine, Morin & Bugmann, 2010 [189])、既往研究での展葉時期の予測は、積算温度と日度 (degree-day) の関係に基づく経験式に基づくものが大半である*¹⁰*¹¹。しかし、本研究のケヤキ供試木の結果 (図 2.10) を見ると、2011 年 4 月の平均気温は 12.2°C で、2012 年の平均気温は 13.1°C であり、温度条件に大きな差があったとは言い難い。2011-2012 年で大きく変化した要因として、葉面積が挙げられることから (図 2.6, 図 A.2)、葉面積変化およびそれに伴う個葉単位での水ストレスの増大がフェノロジーに影響していた可能性が想像される。

関連しうる既往研究としては、Laube et al. (2014) が、数種落葉樹の展葉前の切り枝を用いたチャンバー実験を行い、相対湿度 40% or 90% で養生させた標本群を比較したところ、より強い水ストレスを受けていた湿度 40% 標本群の方が、最大で 13 日、展葉時期が遅れたことを報告している [192]。この結果は、本研究の 2011-2012 年の蒸散量変化パターンを説明しうるものと言える。つまり、2012 年では葉面積が増大したために個葉単位での水ストレスが増大し、展葉時期が遅れ、気温・飽差が大きな 5 月になってから蒸散が始まったために、日蒸散量の変化が急激になったものと解釈できる。なお、Laube et al. (2014) によれば湿度がフェノロジーに与える影響を調べた研究は 1979 年以降存在していなかったとされ、現在でも湿度 (水ストレス) の影響に関する研究の数は非常に少ない。

*⁹ 例えば、2011 年 5 月 2 日では $R_s=24.5\text{MJ m}^{-2}\text{d}^{-1}$, $E_T=12.5\text{kg tree}^{-1}$ であったのに対して、2012 年 5 月 1 日では $R_s=18.4\text{MJ m}^{-2}\text{d}^{-1}$, $E_T=23.3\text{kg tree}^{-1}$ であった。

*¹⁰ 植物がどのような生理メカニズムで温度や光周期を検出しているか、また、各要因の相互作用については未解明の部分が多い。2010 年代に入ってから、草本類に関しては、温度変化と植物の生理的状態、遺伝子発現の関係が明らかになりつつあるが、高木に関しては殆どわかっていない (久米, 2011 [190])。

*¹¹ なお、1996-2009 年まで気象庁が行っていた桜の開花予想もこの方法に依っていた [191]

水ストレスがフェノロジーに影響するメカニズムは不明であるが、一つの可能性としては、アクアポリン^{*12}による根の膜浸透率（根圧）の変化が挙げられる。通常、日中の植物体内の水輸送は蒸散による毛管力、つまり、葉の蒸発面の表面張力により生じた駆動力が葉から根までの連続した水柱を伝わることによるアポプラスト輸送が大半と考えられているが（凝集—張力説）、蒸散量が小さな幾つかの条件では、浸透圧を駆動力とする根圧が水輸送を担っていることが知られる (Wagner, 2014 [193])^{*13}。根の通水コンダクタンスが環境条件に依って数倍程度変化しうることは従来から知られていたが [51]、比較的最近になって、蒸散をトリガーとして根のアクアポリンと通水コンダクタンスが大きく日変化することが発見されている (Sakurai-Ishikawa et al, 2011 [194]; Laur & Hacke, 2013 [195])。

シラカシ蒸散量の経年変化—光環境と蒸散量の関係

第3章において、シラカシ供試木の単木蒸散量が2012-2013年で3倍近く増大していたことを示し、また、その原因として、生育場所の光環境変化によって光合成能力が増大していた可能性を指摘した。

日射環境変化への適応による蒸散能力の変化については、植物生理生態学分野でも幾つかの既往研究がある。日向・日陰で生育した同一樹種の個体間では、樹種の耐陰性にも依存するが、小さくて数10%程度、大きくて（本研究と同様）2-3倍程度の最大気孔コンダクタンスの差が報告されている (e.g., Hanba et al., 2002)。光環境変化に対する適応性（葉や根の可塑性）には大きな種間差が報告されていることから、日射環境が急変した際の過渡的段階では、蒸散予測には最大で2-3倍程度の誤差が生じる可能性があると言える。

^{*12} Aquaporin; 水分子を選択的に輸送する、細胞膜上のタンパク質チャネル。

^{*13} ヘチマ水や春先のメイプルシロップの溢泌などの現象は根圧によるものとされる。

付録 B

BMF モデルの導出

本付録では、まず、本研究の第 4 章以降で用いた BMF 気孔コンダクタンスモデル [96] [122] の導出過程を解説する。筆者の確認した範囲では、2017 年現在においては、Buckley, Mott & Farquhar 達の研究グループ以外はこのモデルを用いておらず、日本語解説文も存在しないため、読者の理解を助ける上で価値があると考えたためである。また、モデルパラメータの一般性を議論する上で、モデルの詳細を理解する必要があるためでもある。

BMF モデルは 8 つの生物物理過程を表す方程式から導出された Process-Based Model である。以下の説明は主に Buckley T. 2005. Tansley Review—The control of stomata by water balance. *New Phytologist*. [165] に基づく。導出の際に置かれた仮定は太字で記す。なお、クチクラ蒸散に関する Buckley (2005) の議論は省略する。

孔辺細胞，表皮細胞の水ポテンシャル

細胞中には各種の無機イオンをはじめとする種々の溶質が溶けているため、水は周辺（細胞間隙）から細胞内に浸透していく。しかし、植物細胞は弾性を持つ細胞壁に囲まれているため、細胞が膨らむにつれて細胞壁が押し返す力が強まり、膨潤しようとする力（膨圧）と細胞壁が膨潤を抑える力（壁圧）が釣り合った段階で細胞の体積変化は止まる。定常状態における、孔辺細胞とそれに隣接した葉の表皮細胞の水ポテンシャル^{*1}は以下のように表せる^{*2}。

$$P_g = \psi_g + \pi_g \quad (\text{B.1})$$

$$P_e = \psi_e + \pi_e \quad (\text{B.2})$$

^{*1} 標準状態の純水を基準とした際の、水の部分モル体積あたりの Gibbs 自由エネルギーの変化量。植物と水ポテンシャルの関わりについては Nobel (2009) [66] や Rodriguez-Iturbe & Porporato (2007) [83] を参照。より基礎的には田崎 (2000) [206] などの熱力学の教科書を参照。

^{*2} ここでは簡単のために重力ポテンシャルは無視しているが、必要に応じて式 B.1, B.2 に加算すればよい。

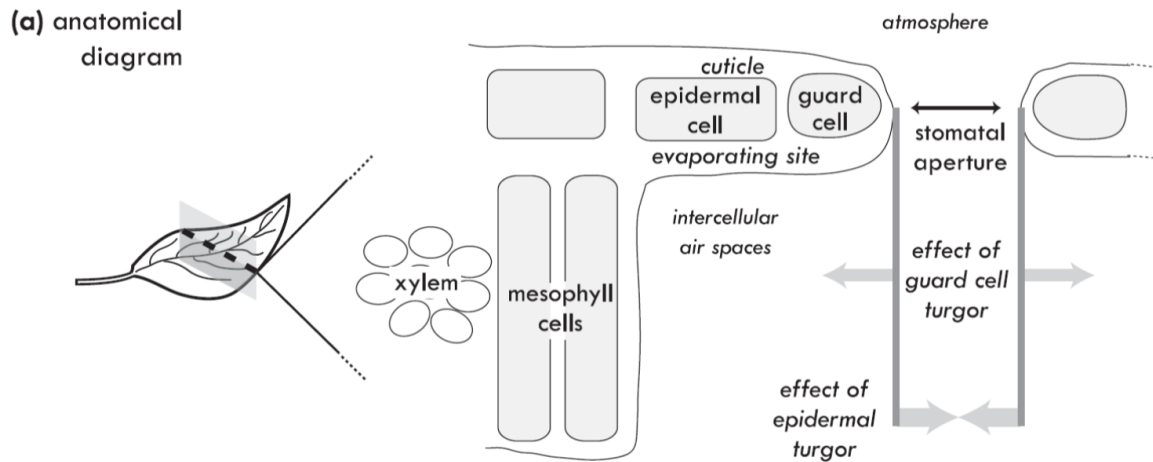


図 B.1 葉の解剖学的模式図 (Buckley, 2005 [165])

ここで, ψ :水ポテンシャル (負値), P :膨圧 (細胞外向きを正とする), π :浸透圧 (正值), 下付き文字 g, e は孔辺細胞 (guard cell), 表皮細胞 (epidermal cell) の意, 単位はすべて [MPa] である. 図 B.1 に Buckley (2005) による解剖学的模式図を表す.

気孔開度に対する孔辺細胞・表皮細胞の力学的釣り合い

$$a = c(P_g - \hat{m}P_e) \quad (\text{B.3})$$

ここで, a :気孔開度 [-], c :圧力→気孔開度の変換係数 [MPa^{-1}], \hat{m} :は表皮細胞の孔辺細胞に対する力学的優位性を保証する係数であり, $\hat{m} = 1 + M$, $M > 0$ とする. ここでは $a \propto (P_g - \hat{m}P_e)$ を仮定している. \hat{m} が 1 以上となっていることは, 同じ膨圧で表皮細胞と孔辺細胞が押し合った場合には必ず表皮細胞が押し勝つことを意味している. これは, 水を吸って膨潤・収縮することで気孔を開閉するという孔辺細胞の機能的要請から, 孔辺細胞の表皮細胞側細胞壁が薄く変形しやすくなっている (ならなければならない) ことに起因する. 細胞間の力学的釣合を単純な線形モデル (式 B.3) で表現したことは Buckley et al. による第一次近似であるが, 表皮細胞の力学的優位性そのものは実験的にもよく知られた事実である (e.g., Franks et al., 1998 [207]).

気孔コンダクタンスと気孔開度の関係

$$g = \frac{\chi}{c} a \quad (\text{B.4})$$

ここで, g :気孔コンダクタンス [$\text{mol m}^{-2}(\text{leaf}) \text{s}^{-1} \text{MPa}^{-1}$], χ :膨圧-気孔コンダクタンス

の変換係数 [$\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}\text{MPa}^{-1}$] である。ここでは $g \propto a$ を仮定している*3。一般に、気孔の幅は数 μm 程度であるのに対して気孔間の距離は百 μm 程度であるため、周辺の気孔からの水蒸気の移流が蒸発速度を減少させることはない（オアシス効果が働いている）[66]。

根—表皮細胞間，根—孔辺細胞間の水移動

一定の温度・圧力の環境において示量的な自由度が生じたとき、熱力学的な系は化学ポテンシャルが最小となる平衡状態に向かって自発的に進行する。植物体内では水は不飽和状態で存在しており、水分フラックスは水ポテンシャル勾配に比例する形で表現できる（拡張 Buckingham-Darcy 則）。

$$E_{s-e} = \frac{\psi_s - \psi_e}{R_{s-e}} \quad (\text{B.5})$$

$$E_{s-g} = \frac{\psi_s - \psi_g}{R_{s-e} + R_{e-g}} \quad (\text{B.6})$$

ここで、 E :蒸散流束 [$\text{mol m}^{-2}(\text{leaf}) \text{s}^{-1}\text{MPa}^{-1}$], R :通水抵抗 [$\text{m}^2(\text{leaf}) \text{s MPa mmol}^{-1}$], 下付き文字の s は水の source（根あるいは葉内の上流部位）を表す。 g, e は (1)(2) 式と同様である。

葉—大気への水蒸気拡散

$$E_{l-a} = g(e_l - e_a) \sim gD \quad (\text{B.7})$$

ここで、 e :水蒸気濃度、 D :飽差 (saturation deficit) [kPa kPa^{-1}], 下付き文字 l は葉、 a は大気を表す。単位はいずれも [mmol mol^{-1}] である。ここでは葉面境界層抵抗の影響は無視できる（強制蒸発）と仮定している*4。後年、この点は Buckley et al. によっても改良が検討されている。

まず、式 B.3, B.4 から、

$$g = \chi(P_g - \hat{m}P_e)$$

である。植物体内での水移動の定常性を仮定 ($E_{s-e} = E_{e-g} = E_{l-a}$) し*5、上式に式

*3 式 B.4 は自明のようにも思えるが、植物生理学分野の最新の研究では、水蒸気は葉内の平衡蒸発で “押し出される” 形で輸送されていることを示唆する (PAR と葉面飽差を一定に保ったまま放射エネルギー吸収量を増やすと、気孔コンダクタンスと蒸散速度が増大する) 実験結果も存在しており (Pieruschka, Huber & Berry, 2010 [208]), メカニズムが完全に解明されているわけではない。

*4 この仮定の妥当性については本論 2.4.3 項および 3.4.2 項を参照。

*5 この仮定の妥当性については本論第 2 章および 4.2 節を参照。

B.1, B.2, B.5, B.6 を代入すると、以下ようになる。

$$\begin{aligned} g &= \chi[\psi_s - (R_{s-e} + R_{e-g})E + \pi_g - \hat{m}(\psi_s - R_{s-e}E + \pi_e)] \\ &= \chi[-M(\psi_s + \pi_e) + (\pi_g - \pi_e) + (MR_{s-e} - R_{e-g})E] \end{aligned} \quad (\text{B.8})$$

式 B.7 と式 B.8 からは、

$$g = \chi \frac{-M(\psi_s + \pi_e) - (\pi_g - \pi_e)}{1 - \chi(MR_{s-e} - R_{e-g})D}$$

という幾分複雑な式が得られるが、もし仮に、 $\pi_g - \pi_e = BP_e$ と仮定（浸透調節仮説; **Osmotic Regulation Hypothesis**）できるとすると、最終的な結果は非常に簡潔な表現となる（ B は比例定数）。

浸透調節仮説

$$\pi_g - \pi_e = BP_e \quad (\text{B.9})$$

浸透調節仮説は、膨圧変化に対する気孔コンダクタンスの非定常応答に関する実験的事実から導かれた仮説である。図 B.2 に Buckley (2005) による浸透調節仮説の概念図を示す。

プレッシャープローブやプレッシャーチャンバーなどを利用して膨圧を強制的に変化させた場合、気孔コンダクタンスは一旦”間違った”方向に変化し、数分から数十分程度経った後、”正しい”方向に変化することが知られている（図 B.3; *transient "wrong-way" response* & *steady-state "right-way" response*）。

供給水圧の増大によって孔辺細胞と表皮細胞が同様に膨潤した（あるいは蒸散量の増大によって両細胞が同様に脱水された）場合、表皮細胞の力学的優位性（式 B.3）のために、表皮細胞が押し（引き）勝ち、気孔が閉じた（開いた）状態となってしまう（図 B.3 における圧力変化直後の状態）。このことは、水理的要因の影響だけで気孔が制御されるような場合においては、湿潤時に気孔が閉じ、水不足の条件で気孔が開く—植物の立場からすると”間違った”気孔応答を引き起こすこと、さらには、水理的・受動的な制御だけでは”間違った”状態のまま気孔開度が維持されてしまうことを意味している。この”間違った”状態が数分から数十分程度経った後に”正しい”方向に変化する（図 B.3）という事実は、植物が何らかの（水理的な要因以外の）能動的制御を行っていることを示唆している。

Buckley et al. は、この現象を説明する仮説として、孔辺—表皮細胞間の浸透圧勾配が、表皮細胞の膨圧に依存して能動的に調整されると考えた（浸透調節仮説; 式 B.9）。気孔が開いた状態の孔辺細胞には閉じた状態の数倍濃度の K^+ が蓄積していることや、 K^+ の蓄積により浸透圧が上昇し、水が取り込まれて孔辺細胞の体積が増加することは一般に認められた事実である（cf., 日本植物生理学会 [209]; より専門的には Nobel, 2009 [66] を参

(c) flows and influences
underlying Equation 6

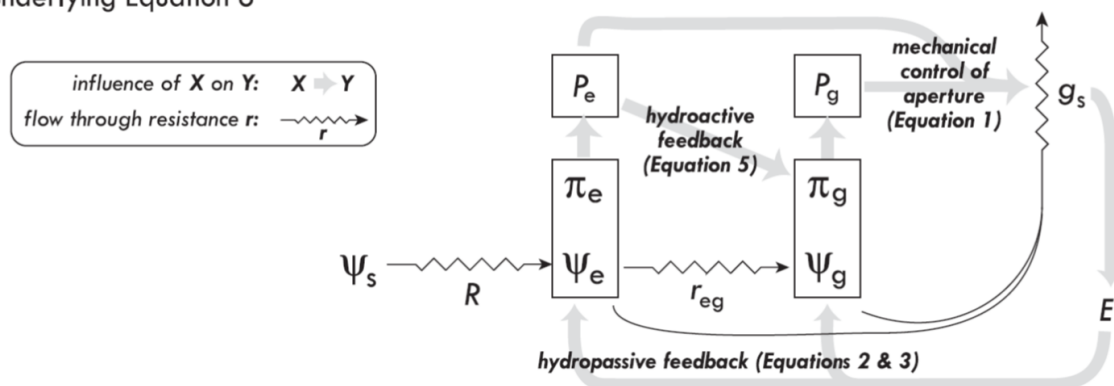


図 B.2 水ポテンシャル・浸透調節仮説の模式図 (Buckley, 2005 [165]). 図中の各式の内容は, Equation 1 が式 B.3, Equation 2,3 が式 B.1, B.2, Equation 5 が式 B.9 に対応する.

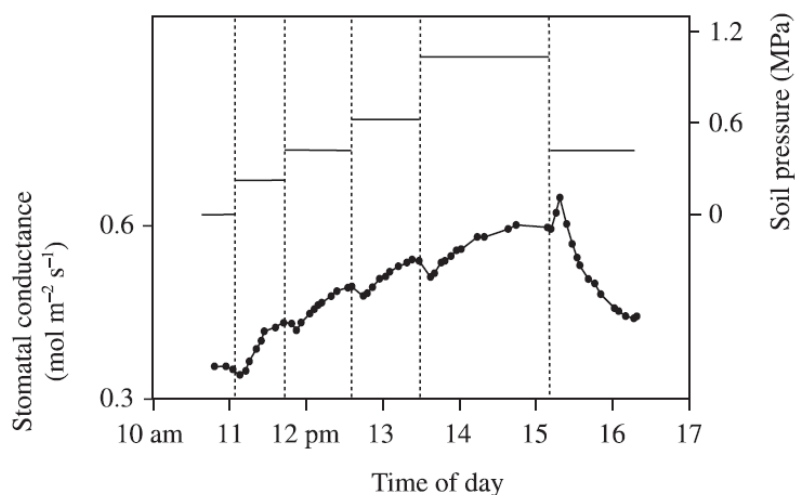


図 B.3 圧力変化に対する気孔コンダクタンスの非定常応答 (Comstock & Mencicci, 1998 [210]). この実験ではチャンバーを用いて土壤に正圧をかけることで, 土壤—葉のポテンシャル勾配を増大させて (下から水を押し出して) いる. 圧力が増した直後は気孔コンダクタンスが一旦低下していること, また, 逆に土壤圧力を低下させた場合も”間違った”非定常応答と”正しい”定常応答を示していることがわかる.

照). 「表皮細胞の膨圧変化をトリガーとする」浸透調節は現状では仮説段階であるが, 圧力変化に対する気孔コンダクタンスの非定常応答を説明する最も有力な^{*6}仮説とすることができる.

*6 少なくとも他のモデルより矛盾があからさまでない.

式 B.8, B.9 から, 以下の式が得られる.

$$g = \chi[-M(\psi_s + \pi_e) + BP_e + (MR_{s-e} - R_{e-g})E]$$

上式に式 B.2, B.5 を代入し, $\alpha = B - M$ と置く (α は比例定数) と, 以下のようになる.

$$\begin{aligned} g &= \chi[-M(\psi_s + \pi_e) + B(\psi_e + \pi_e) + (MR_{s-e} - R_{e-g})E] \\ &= \chi[-M(\psi_s + \pi_e) + B(\psi_s - R_{s-e}E + \pi_e) + (MR_{s-e} - R_{e-g})E] \\ &= \chi[\alpha(\psi_s + \pi_e) + (-\alpha R_{s-e} - R_{e-g})E] \end{aligned}$$

上式と式 B.7 から,

$$g = \chi \frac{\alpha(\psi_s + \pi_e)}{1 + \chi(\alpha R_{s-e} + R_{e-g})D}$$

最後に, $R_{e-g} \ll R_{s-e}$ と仮定すると, BMF モデルが完成する ($k_p = 1/R_{s-e}$).

$$g = \chi \frac{\alpha(\psi_s + \pi_e)}{1 + \chi\alpha R_{s-e}D} = \frac{k_p(\psi_s + \pi_e)}{k_p/\chi\alpha + D} \quad (\text{B.10})$$

表皮細胞—孔辺細胞間には細胞壁二枚分の隔たりしか無いため, $R_{e-g} \ll R_{s-e}$ という仮定は不合理ではないと考えられる (少なくとも現時点では両細胞間に大きな通水抵抗が存在するという実験事実は報告されていない).