

## 快適な緑化環境のための合理的な計画手法

## Development of Planning Method for Comfortable Greening Environment

高木 賢二      桑原 賢一郎<sup>1)</sup>      田中 重良<sup>1)</sup>      福井 三穂  
下田 志保<sup>2)</sup>      大和田 美以奈<sup>1)</sup>      大野 直<sup>3)</sup>

## 要 約

建物の屋上テラスや外構のオープンスペースの緑化・植栽に対する発注者の要求水準が高まっている。現地観察と現地計測をベースに、日射・風・視環境等の特徴的差異と利用者行動との関係に着目し、植栽がもたらす効果を定量的に記述・蓄積する手法として、①利用行動の観察及び環境計測結果のデータベース化、②樹木モデルを用いた緑陰効果シミュレーション、③日射と風と植栽の関係より生じる環境の簡易計測のプロセスを整備した。

## 目 次

- I. はじめに
- II. 計画手法
- III. 樹木効果シミュレーションの再現精度評価
- IV. おわりに

## I. はじめに

大型複合再開発をはじめとする建築プロジェクトにおいて、建物の屋上テラスや外構のオープンスペースの緑化に対する要求水準が高まっている。環境配慮や景観形成に加えて、ウェルネスや新しいワークスタイルへの対応が不動産価値と関連づけられ、利用者の日常行動に関わる快適性や利便性への配慮や工夫が求められるようになってきている。建物の附属的なものとして捉えられがちであった緑化や植栽についても、その効用や利用者の満足度が期待され、計画の合理性を説明可能にすることが重要となってきた。

本研究は、植栽がもたらす効用を利用者行動との関係から捉えなおし、その関係性から見出された知見やシミュレーション手法等を用いて総合的・多角的な分析・評価を行い、計画を行うことで、その計画の合理性を科学的な根拠に基づいて説明可能なものとするを目的とし、計画を支援するツールの整備を含めた計画手法の開発を試みるものである。

II. 計画手法<sup>1)</sup>

## 1. 概 要

Fig.1は本計画手法の基本的な考え方を示したものである。この考え方に沿って計画支援ツールとそのツールを用いる計画手法を整備することで計画の合理性が説明可能なものとなると考え、開発を進めた。

本手法は、植栽がもたらす快適性と利用者の行動に着目するものであり、Fig.2に示すような利用者とその滞在してい

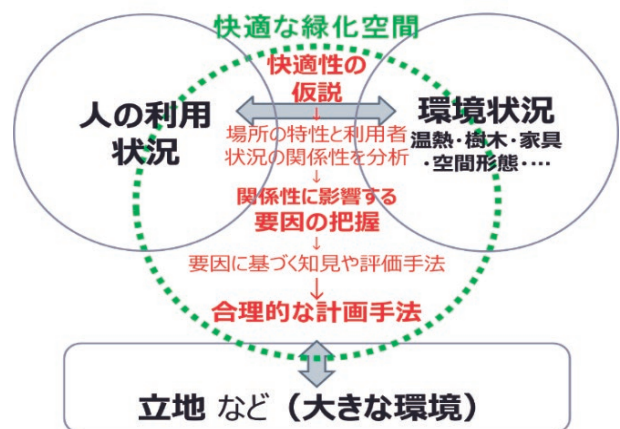


Fig.1 計画手法の基本的な考え方  
(Basic Concept of the Planning Method)

- 1) 建築設計本部      Architectural Design Division
- 2) (株) アルモ設計      ARMO.CO.,LTD
- 3) 環境本部      Environmental Engineering Division

**キーワード** : 緑化空間, 計画手法, 快適性, シミュレーション, 観測, データベース, CFD  
**Keywords** : green space, planning method, comfort, simulation, observation, database, CFD

る環境（その場所の状況）との快適性の関係性を説明する要因を見出すことが重要であると考えた。本開発では、まず仮説を立て、観察や計測を主体とした現地の調査により状況の定量的な把握を行った。

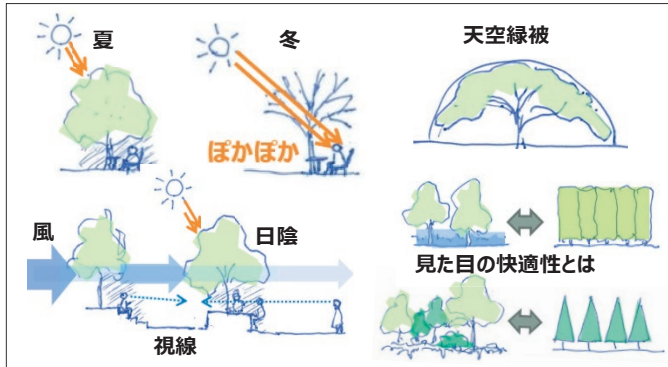


Fig.2 利用者が樹木効果を感じる要因  
(Factors that Make Users Feel the Effects of Trees)

次に、得られたデータを分析し、快適性との関係性を見出し、その関係性に大きな影響を与える要因の把握を行った。さらに、快適性との関係が認められた各要因 (Fig.3) に関して、その相関性を整理し知見として整備することやその要因に基づく評価手法やシミュレーション手法等を整備した。

- ・陽射し(日射), ・風(防風), ・枝下空間
- ・囲われ感, ・木陰, 緑陰(木漏れ日), ・天空緑被率
- ・眺望・景色, ・生物多様性と人の利用, など…

Fig.3 見出された快適性に影響する要因の例  
(Examples of Factors Affecting Comfort Found)

この手順にて検討・整備を進め、  
 a. 要因に基づく知見を集積した「データベース」  
 b. 樹木による温熱環境の評価手法としての「樹木効果シミュレーション」  
 c. 分析の要となる状況の定量的な把握のための調査手法としての「簡易な移動式計測手法」  
 の3つの計画を支援するツールを準備した。

これらのツールは、それぞれ実案件における計画プロセスの中で利用可能なものであり、各プロセスで統一的に活用することを想定している。Fig.4 に示すように3つのツールは一つの分析・評価システムとして、計画・設計サイクルや事業運営サイクルのそれぞれのフェーズにおける計画や現存する緑化空間に関連するニーズの解決に活用可能なものとしており、このシステムを用いて効率的に計画が行える計画手法として開発・整備を行った。

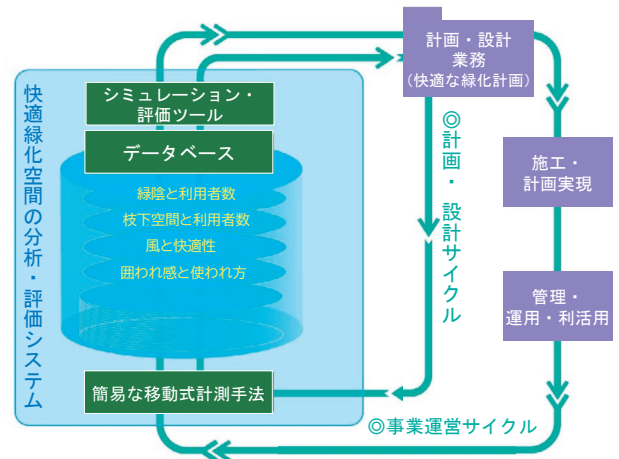


Fig.4 本計画手法・支援ツールの活用イメージ  
(Image of the Use of this Planning Method and Support Tools)

## 2. 計画支援ツール

### (1) データベース (参照可能な知見とエビデンス)

新たな計画を行う際に有用な知見やノウハウを参照可能なデータベースとして整備した。データベースとする知見等は今後も継続して収集・蓄積していくものとし、追加や修正が容易な仕組みとしている。

ここで収集・蓄積した知見等は、緑化空間の快適性と人の行動の関係に着目し、現地の観測等を中心を得たものである。その収集の手順は前述の Fig.1 の本計画手法開発の基本的な考え方に沿った形で行っている。

#### 【データベース (知見等) の整備の手順】 -

##### a. 仮説の設定:

日常の経験則やこれまでの観察による発見などから想起される仮説を立てる。

##### b. 状況の把握:

前節で示した「簡易な移動式計測手法」により、実際の人の利用状況と緑地空間の環境状況 (空間形態・樹木状況・温熱環境など) を定量的に把握する。

##### c. 仮説の検証 (快適性の要因の見出しと分析):

得られた計測データを基に、人の利用状況と緑地空間環境の関係性を分析し、快適性 (利用度) に影響を与える要因 (特徴的な指標) を見出す。

##### d. データベース化:

前述の「c. 仮説の検証」で見出された要因について、快適性との相関性など得られた知見を整理し、活用可能な形として整備・蓄積 (データベース化) する。

### (2) 樹木効果シミュレーション

新たな計画の初期検討時に計画実現後の樹木の温熱環境的な効果を定量的に予測するためのシミュレーション手法を整備した (Fig.5)。ここで得られるシミュレーション結果

とデータベースで蓄積した知見を併せて活用することにより、さらに合理的な計画が可能となることを目指している。

設計者にも使い易いツールとするため、市販の CFD ソフトを活用し、オリジナルの樹木モデルや計算条件の設定などの独自の方法を用いて予測計算を行っている。樹木の枝下空間の詳細な風環境や日射環境、SET\*など、計画樹木による効果を可視化して検証可能としている。

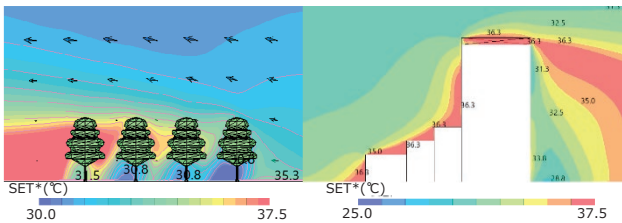


Fig.5 樹木効果シミュレーションの計算例  
(Calculation Example of Tree Effect Simulation)

(3) 簡易な移動式計測手法

現地での観測と計測により、a. の仮説や実案件でのニーズ解決のための検証と分析に直結する各種データを取得する手法を整備した。一つの調査場所においても、時間や計測地点の違いにより、人の状況や環境状況、それらの関係性は変化する。そのため、可能な限り迅速かつ効果的にデータが取れる手法を目指している。

緑化空間の状況、すなわち空間形状や植栽状況とその空間の温熱環境や人の行動などを効果的かつ簡便に把握することを目的として、市販の携帯型温熱環境計測機器や小型サーモカメラ、360度カメラやインターバルカメラ、レーザー距離計等、一般に手に入れ易いものを用いて整備している。Fig.6 に計測状況の例を示す。上段は測定状況、下段は測定結果の例を示す。

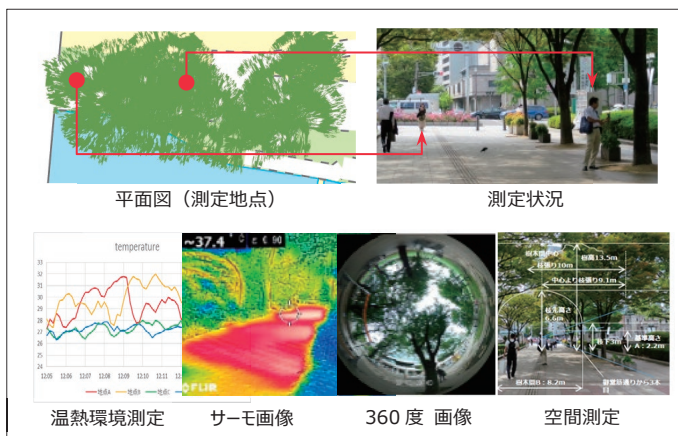


Fig.6 計測状況の例  
(Example of Measurement Situation)

II. 樹木効果シミュレーションの再現精度評価<sup>2)</sup>

前章では、植栽がもたらす効用を利用者行動との関係から総合的・多角的に分析や評価を行い、合理的な説明が可能な外構・建築計画手法について報告した。

本章では、この手法のエビデンスとなる樹木の枝下空間の快適性について、観測と前章で述べた樹木効果シミュレーション手法による評価について報告する。

過去に行った CFD (数値流体解析) シミュレーションでは、樹木直下、特に 1 列に配した並木では周辺の気流の回り込みにより枝下空間の気流が増速する傾向がみられた。通常、樹木は気流を減速させる効果を目的として設置することが多い。一方で、この気流の増速領域を利用できれば枝下空間の夏季の暑熱環境を改善できる。

そこで、実際の樹木を対象に観測とシミュレーションを行い、樹木直下の枝下空間の環境を把握するとともに、シミュレーションの再現精度を確認した。

1. 再現精度評価のための観測

(1) 観測方法

観測場所は神代植物公園 街路樹モデル園 (東京都調布市) で行い、観測は 2018 年 10 月 9 日～11 日の間に行った。観測装置は大型観測装置を 2 か所、小型観測装置を 5 か所設置した。(Fig.7)

大型観測装置では超音波風速計、温度湿度計、グローブ (黒球) 温度計、小型観測装置ではケストレル社製のヒートストレストラッカで、風向・風速、温湿度、グローブ温度を観測



Fig.7 観測概要  
(Observation Summary)

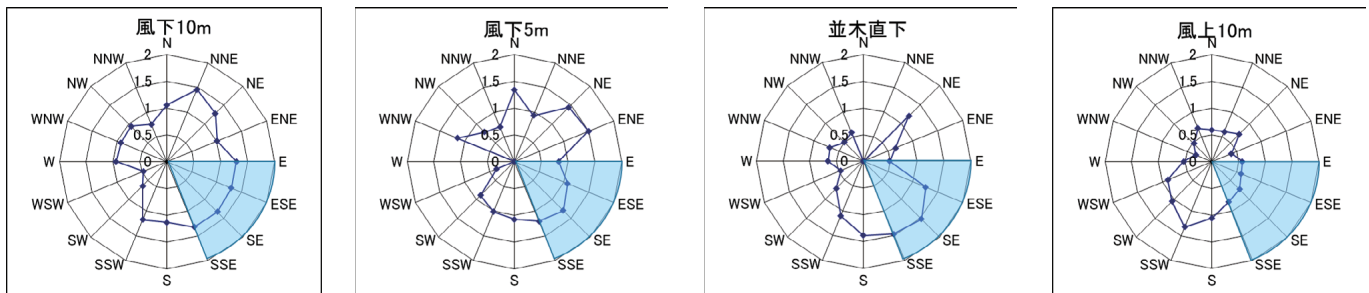


Fig.8 観測結果 (風向別平均風速)  
(Observation Results ; Average Wind Speed by Wind Direction)

した。風速、温度及びグローブ温度から放射温度 (MRT) を推定した。測定したグローブ温度から放射温度を推定した。放射温度は以下のような関係<sup>3)</sup>から求めた。

$$\sigma \times MRT^4 = hm \times (Tg - Ta) + \sigma \times Tg^4 \dots \dots (1)$$

ここで、 $hm$  : 熱伝達率 (W/mK)

$$hm = \frac{\lambda}{r} Nu, \quad Nu = 2 + 0.6 \times Pr^{\frac{1}{3}} \times Re^{\frac{1}{2}} \dots \dots (2)$$

$Ta$  : 大気温度 (K),  $Tg$  : グローブ温度 (K),  $\lambda$  : 空気熱伝導率 (W/mK),  $r$  : グローブ半径 (m),  $Nu$  : ヌセルト数 (-),  $Pr$  : プラントル数 (空気=0.7),  $Re$  : レイノルズ数 ( $=r \times U/\nu$ ),  $\nu$  : 空気動粘度 ( $=1.52 \times 10^{-5} \text{m}^2/\text{s}$ )  $U$  : 風速 (m/s)  
 $\sigma$  : ステファン・ボルツマン係数 ( $=5.67 \times 10^{-8} \text{W/m}^2\text{K}^4$ )

(2) 観測結果

Fig.8 に風向別平均風速を示す。並木に直行する方向 (E~SSE) の風向では、樹木直下の風速が大きくなるのが確認できる。樹木より風上側での風速は低下し、樹木直下では風速が増加する。樹木より風下5mでは風速が若干低下し、樹木より風下10mで再び風速が回復して増加する。

Table 1 に気温、湿度、グローブ温度、風速の平均値を示す。この平均値は樹木の列に直行する E~SSE の風向時の平均値を示す。樹木直下では枝下への気流の回り込みのため風速が大きい。樹木直下は日射遮蔽の影響でグローブ温度が低い。これらの観測値から SET\* (clo 値 0.5, 代謝量 1.2Met) を算

出した。樹木直下と代表点で SET\* は 3.7°C 程度低下しており、枝下空間の暑熱環境改善が確認できた。

2. 樹木効果シミュレーション

(1) シミュレーション方法

次に樹木による風・温熱環境の変化の詳細を検討するとともにシミュレーションの解析精度を確認することを目的として、観測の状況を再現したシミュレーションを行った。シミュレーションは CFD を用いて風速、温度、日射・輻射を計算し、それらに基づいて SET\* を計算した。

CFD の計算プログラムは FlowDesigner2019 を用い、非定常解析を行った。日射計算の条件として 10 月 10 日 08:00 ~ 16:00 の間の太陽高度で計算を行った。計算領域に流入する風向・風速はこの期間の気象庁データ (AMeDAS 東京) から東南東の風 6m/s@30m とした。シミュレーションは、観測場所での樹木形状・配置を再現したモデルを用いて行った。(Fig.9)

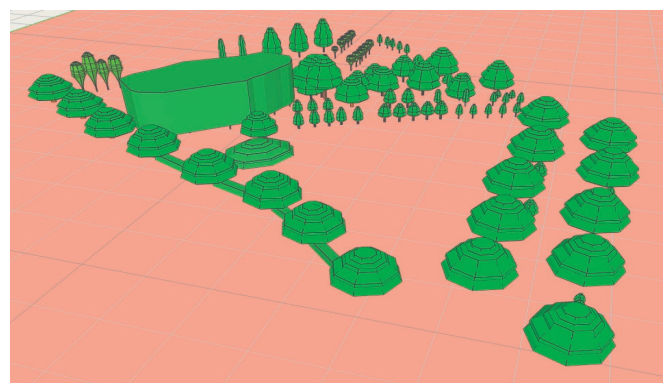


Fig.9 計算モデル  
(Calculation Models)

Table 1 観測結果 (平均値)  
(Observation Result ; Average Value)

	代表点	風下10m	風下5m	直下	風上10m
気温(°C)	28.1	26.0	25.9	25.7	26.8
グローブ温度(°C)	37.1	36.0	33.7	30.8	34.9
湿度(%)	50.1	56.3	54.9	56.7	51.4
風速(m/s)	1.33	1.32	1.23	1.47	0.76
SET*	26.6	25.1	24.4	22.9	26.3

(2) シミュレーション結果

Fig.10 に風速方向の SET\* の分布を示す。樹木直下の枝下空間は日射遮蔽と風速の増加により SET\* が低下し暑熱環境が緩和されるが、樹木の風下側では並木の遮風効果により SET\* が上昇する。

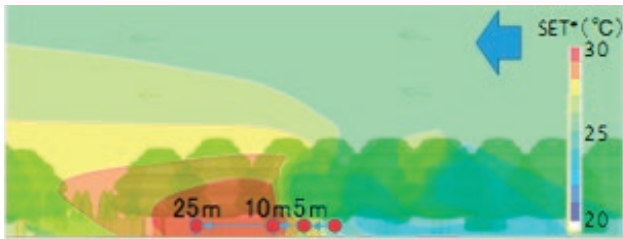


Fig.10 シミュレーション結果 (SET\*)  
(Simulation Results; SET\*)

Fig.11 に風速の観測とシミュレーションの比較を示す。凡そ±0.2m/s 程度でシミュレーションは観測を再現しているが、樹木周辺(風上 10m~風下 5m)で風速を過大評価している。これは対象領域の周辺建物を考慮していないため、流入側の

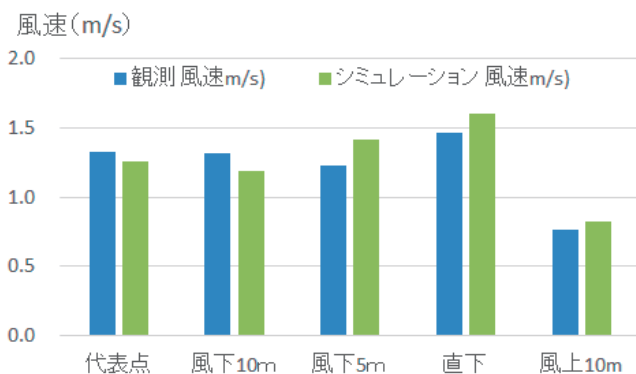


Fig.11 観測とシミュレーションの比較 (風速)  
(Comparison between Observation and Simulation; Wind Speed)

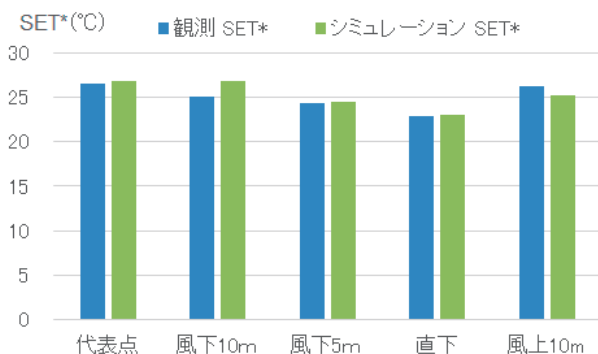


Fig. 12 観測とシミュレーションの比較 (SET\*)  
(Comparison between Observation and Simulation; SET\*)

再現性が不十分であるためと考えられる。

Fig.12 に SET\* の観測とシミュレーションの比較を示す。SET\* の再現性がよく、±1.5°C 程度で一致していた。樹木直下の枝下空間の暑熱緩和効果 (= 樹木直下 - 代表点) は、観測で -3.7°C、シミュレーションで -3.8°C であり、樹木の枝下空間の快適性向上が明らかになった。

Ⅲ. おわりに

今回、計画支援ツールを整備し活用して計画することで、その計画の合理性を説明可能とする計画手法の開発・整備を試みた。

また、樹木の温熱環境への影響に関する観測とシミュレーションを行った。観測では樹木の枝下空間の環境変化について定量的に把握し、並木直下の暑熱緩和効果により SET\* が 3.7°C 程度低下することが分かった。

さらに、シミュレーションは SET\* で ±1.5°C 程度という実案件でも適用可能な精度で観測結果を再現できた。

今後、実案件での活用とともにデータベースの更なる拡充、シミュレーション手法の利便性向上 (時間の短縮や設定の簡素化)、新たな快適性の評価軸による評価手法の整備 (画像分析による快適性の評価) 等を視野に入れ、本計画手法の充実・整備・活用を進めていきたい。

謝 辞

本研究にあたっては公益財団法人東京都公園協会 神代植物公園サービスセンター (真山係長、仲辻係長) に多大なご協力を頂きました。ここに厚く御礼申し上げます。

参考文献

- 1) 桑原賢一郎; 快適な緑化環境のための合理的な計画手法 (その1) - 植栽がもたらす快適性と利用者行動の関係への着目 -, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 2020.9, pp.997-998.
- 2) 高木賢二ほか; 快適な緑化環境のための合理的な計画手法 (その2) - 観測とシミュレーション伊予津樹木の枝した空間の快適性評価 -, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 2020.9, pp.999-1000.
- 3) 近藤宏二ほか; 建物周辺屋外環境の温熱環境設計手法の開発 その2 大学キャンパスの実測値に基づく評価, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 2007.8, pp.979-980.

## Development of Planning Method for Comfortable Greening Environment

*Kenji Takagi, Kenichiro Kuwahara<sup>1)</sup>, Shigeyoshi Tanaka<sup>1)</sup>, Miho Fukui,  
Shiho Shimoda<sup>2)</sup>, Miina Oowada<sup>1)</sup> and Tadashi Ohno<sup>3)</sup>*

There is a growing demand from clients for greening and planting on rooftop terraces of buildings and in open spaces of exterior structures. On the basis of field observations and measurements, we developed a method for quantitatively describing and collecting the effects of planting by focusing on the relationship between user behavior and characteristic differences in solar radiation, wind, and the visual environment, including (1) simple measurement of an environment caused by the relationship between solar radiation, wind, and planting, (2) simulation of the effects of shade using a tree model, and (3) observation of user behavior and the creation of a database of environmental measurement results.