

5.3 街路樹の剪定方法の違いによる暑熱環境の差の検証

(1) 概要

街路樹の剪定方法(いきいき剪定(各樹種の持つ樹形を生かしつつ、一定の大きさに維持する剪定)と強剪定(落ち葉を減らすために、幹や太い枝を切り払い樹形を小さくする剪定))の違いによる暑熱緩和効果の差を確認することを目的として、実測調査を行った結果、いきいき剪定の緑陰の方が、暑熱環境が緩和されていたことを確認した。また、剪定方法の違いによる暑熱緩和効果の差に加えて、樹高、樹冠体積、緑の密度の濃さを変化させた場合の緑陰の濃さや大きさ、WBGT の変化について数値シミュレーションで検証した結果、地面に達する日射強度に依存することがわかった。

(2) 背景と目的

横浜市内には、現在13万本を超える街路樹(歩道並木やその他の高木)がある。街路樹には様々な役割があり、例えば、木陰を作って夏の暑い日差しを遮ったり、葉の蒸散作用によって気温を涼しくしたり、植物の呼吸や、大気汚染物質の葉への吸着によって空気を浄化したりする。さらに、季節の移り変わりを感じさせたり、街並みに彩りを添えて、街に統一感をもたらしたりする。このような良い面がある一方で、秋になると落ち葉を落とすため、市民からの陳情を受けることがある。そのため、落ち葉対策として、幹や太い枝を切り払い樹形を小さくする剪定(以下、「強剪定」という。)を行うことがある。強剪定により、落葉期の落ち葉が減るため、落ち葉清掃などの負担は軽減されるが、樹冠が小さくなる分、緑陰も小さくなるため、歩行者環境の暑さは増大する。また、太く育った枝を切るため、樹木が傷ついて弱ってしまうことがある。さらに、見苦しい樹形や景観になる。

一方で、各樹種のもつ樹形を生かしつつ、一定の大きさに維持する剪定(以下、「いきいき剪定」という。)は、落ち葉清掃などの負担は増大するが、樹冠が大きくなる分、緑陰も大きくなる。このため、日陰の創出により、歩行者環境の暑さを緩和する効果が期待される。そして、建築限界等を考慮する必要はあるが、樹木は健全で良好な育成が可能であり、美しく整えた樹形と並木として統一した景観により、街並みの美観が向上する(図5-3-1)。

	いきいき剪定	強剪定(ぶつ切り)
剪定方法	各樹種の持つ樹形を生かしつつ、一定の大きさに維持する	落ち葉を減らすために、幹や太い枝を切り払い、樹形を小さくする
樹木への影響	建築限界等を考慮する必要があるが、樹木は健全で良好な育成が可能	太く育った枝を切るため樹木が傷ついて弱ってしまうことがある。
景観	美しく整えた樹形と並木として統一した景観により、街並みの美観が向上する	枝葉のバランスが悪く、景観がよくない
写真	<p>↓ 領家 中田さちが丘線 ↑ 上永谷 環状2号線</p>	<p>※街路樹維持管理技術研修、参考資料「落ち葉陳情も改善に向けて」より</p>

図5-3-1 いきいき剪定と強剪定の特徴

今回、横浜市内のいきいき剪定と強剪定がされている通りでの暑熱環境の違いを把握するため、実測調査(2020年度と2021年度の2回)と数値シミュレーションを実施した。

(3) 実測調査1回目(2020年度実施)

ア 調査場所の概要・日時

調査は、横浜市青葉区の桜台公園から中恩田橋にかけて全長 1.4km 弱のケヤキからなる路線を対象路線とし、2020年8月12日(水)の11:00~15:00に実施した。調査対象路線のうち、桜台公園から桂台遊水池の西側までは、道路の両側に住宅や商業施設が立ち並んでいる一方、桂台遊水池の西側から中恩田橋にかけては、住宅のほかに農地も点在している。調査対象路線を図5-3-2に示す。



図5-3-2 調査対象路線

イ 調査地点

街路樹の緑陰による暑熱緩和効果を検証するため、調査対象路線内で、いきいき剪定と強剪定の場所のそれぞれに気象観測地点を図5-3-3のとおり設定した。観測地点①、②、⑤は歩道上の1.5m又は0.3mの高さに観測機器を設置したが、観測地点③、④は測定機器を街路樹の2.5m高さに括りつけて設置した。また、日なたと日陰の暑熱環境の違いを確認するため、日なたでの観測地点⑤として、中恩田橋交差点から南南東方向に約500m離れた場所にも観測機器を設置した。各地点での調査項目を表5-3-1に示す。

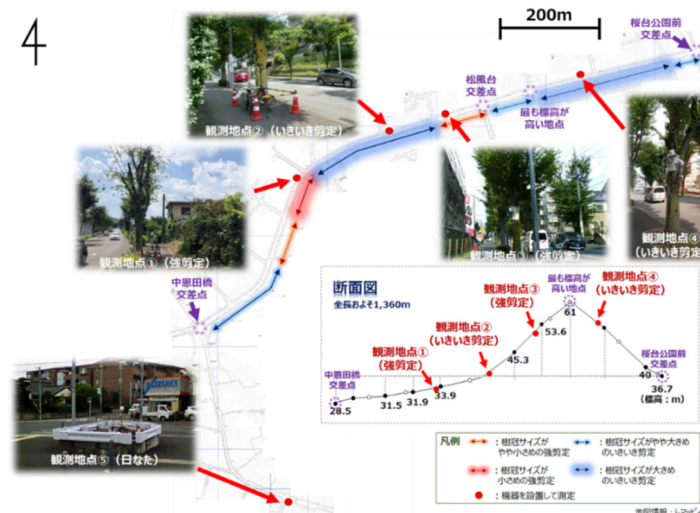


図5-3-3 調査対象路線内の観測地点

表5-3-1 各調査地点における調査項目等

	調査項目と観測機器の設置場所等		
	木に括りつけて設置	歩道上に設置	地表面
観測地点 ①、②、⑤	-	気温、湿度、黒球温度、風向風速、WBGT(暑さ指数)、日射量、赤外放射量	熱(赤外)画像 地表面温度
観測地点 ③、④	気温、湿度、黒球温度、WBGT(暑さ指数)	-	熱(赤外)画像 地表面温度

ウ 結果の概要と考察

観測地点①、②、⑤での気温・黒球温度・WBGT・上からの日射量の結果の概要を表5-3-2 に示す。日射の影響を強く受ける黒球温度は、日射量の違いにより、いきいき剪定の緑陰内の方が、強剪定の緑陰内より平均で3℃程度低く、人が日射から受ける熱は和らいでいた。また、気温・湿度・黒球温度から算出される WBGT は、いきいき剪定の緑陰内の方が強剪定よりも平均で 0.4℃低かった。そして、強剪定の緑陰内と比較して、いきいき剪定の緑陰内では、上からの日射量が平均で 45%程度減っており、緑陰の大きさや葉の密度の違いが影響したと考えられる。ただし、既往文献¹⁾や環境科学研究所が調査した他事例(藤棚の日陰下と日なた(2019 年度の別調査での事例)では、晴天時に平均で黒球温度は約 10℃、WBGT は約 2℃の差が見られた。また、日なたでの上からの日射量は、平均で 855W/m²であった。)などと照らし合わせると、今回調査した結果では、剪定方法の違いによる暑熱環境の差はあまり大きくなかった。この原因として、調査日当日は雲が多く雨の降った時間もあるなど、晴れた時間が少なかったためと考えられる(図5-3-4)。

表5-3-2 調査結果の概要

	気温(℃)	黒球温度(℃)	WBGT(℃)	上からの日射量(W/m ²)
いきいき剪定の緑陰内(観測地点②)	36.2	39.3	30.5	112
強剪定の緑陰内(観測地点①)	36.7	42.3	30.9	205
日なた(観測地点⑤)	36.6	46.1	31.6	446

※1:11:00~12:16までの平均値(12:16~15:00は天候不良や緑陰が車道側に移動した影響などにより解析対象から除いた)
 ※2:当日の横浜地方気象台の状況(11、12時の平均値):気温 34.2℃、湿度 63.5%、WBGT 32.8℃(WBGTは実況推定値)
 ※3:気温・黒球温度・WBGTは地上から高さ1.5mで測定・算出した値、日射量は地上から高さ0.3mで測定した値

	11:00	11:20	11:40	12:00	12:20	12:40	13:00	13:20	13:40	14:00	14:20	14:40	15:00
観測地点①(強剪定)													
観測地点②(いきいき剪定)													
観測地点⑤(日なた)		-	-		-	-		-	-		-	-	

図5-3-4 各観測地点での調査当日の天候状況

なお、観測機器を木に括りつけて地上 2.5mの高さで観測を行った、観測地点③、④、⑤での気温・黒球温度・WBGT の結果を表 5-3-3 に示す。

表5-3-3 観測結果の概要

	気温(°C)	黒球温度(°C)	WBGT(°C)
いきいき剪定の緑陰内(観測地点④)	36.5	38.3	30.3
強剪定の緑陰内(観測地点③)	36.6	38.8	30.4
日なた(観測地点⑤)	36.6	46.1	31.6

観測の結果、いきいき剪定と強剪定におけるWBGT等の暑熱環境には、ほとんど差がみられなかった。これは、いきいき剪定と強剪定で樹冠の葉の密度が同程度であったためと考えている(図5-3-5)。



図5-3-5 観測地点③、④の木の写真

エ 2021年度の調査に向けて

2020年度の調査の結果、街路樹の剪定方法の違いによる暑熱環境の差について、強剪定の緑陰内と比べ、いきいき剪定の緑陰内の方がWBGT(暑さ指数)などの体感指標が低く、暑熱が緩和されていたことを確認した。しかしながら、時間変化に伴う影の車道への移動により、測定結果に欠測が生じたうえに、調査日当日の天候不順により、暑熱環境の差が小さくなった可能性があるなどの問題が生じた。そこで、2021年度に以下の事等に注意して調査地点を再選定し、再度、調査を実施し、その調査結果を踏まえたシミュレーションを実施することにした。

(ア) 強剪定といきいき剪定の調査地点の道路の方向を統一する

調査地点①(強剪定)のみ、道路の方向が他の観測地点と異なっており、午後から緑陰が車道方向に延びてしまい、結果を使用できなかった。そのため、強剪定といきいき剪定の条件を同じにして比較できるようにするため、両者が同じ方向にある地点を選定することにした。

(イ) 調査日を複数日設ける

2020年度の調査時には通り雨を観測し、その時間帯を中心に、温度などが一時的に低下した。天候が安定した日に測定をするため、予備日を複数日設けて調査を実施することにした。

(4) 実測調査2回目(2021年度実施)

ア 調査場所の概要・日時

調査は、中田さちが丘線(泉区中田東1丁目～旭区善部町)のうち、戸塚区鳥が丘9付近から泉区領家2丁目付近までの概ね南北方向に約700m弱のケヤキからなる路線を対象路線とし、2021年8月11日(水)の10:00～15:00に実施した。対象路線のうち、戸塚区鳥が丘9～13付近までの通りの両側は戸建て住宅を中心に、戸塚斎場や中層住宅も存在する一方、泉区領家2丁目～4丁目にかけては、商業施設や中層住宅が多くなっている。調査対象路線を図5-3-6に示す。



図5-3-6 調査対象路線

イ 調査地点

調査対象路線内で、いきいき剪定と強剪定の街路樹が同じ樹種及び同じ方角でかつ比較的近くにある地点を選び、それぞれの気象観測地点を図5-3-7のとおり設定した。また、日なたと日陰の暑熱環境の違いを確認するため、日なたでの観測地点として、観測地点⑤と⑩に観測機器を設置した。各地点での調査項目を表5-3-4に示す。なお、今回調査を実施した強剪定の木は、剪定後4.5年程度経過したもので、剪定直後に比べれば樹冠は大きく、葉の密度が高い状態であった。さらに、調査地点は南北道路沿いにあり、午前・午後で緑陰が形成される方向が異なるため、観測地点を午前と午後で変えた。



	剪定方法	観測機器設置状況	観測時間
観測地点①	強剪定	歩道上に設置 (日陰)	AM
観測地点②			PM
観測地点③		街路樹に 括りつけて設置	AM
観測地点④			PM
観測地点⑤	いきいき 剪定	日なたの 歩道上に設置	AM&PM
観測地点⑥		歩道上に設置 (日陰)	AM
観測地点⑦	PM		
観測地点⑧	いきいき 剪定	街路樹に 括りつけて設置	AM
観測地点⑨			PM
観測地点⑩		日なたの 歩道上に設置	AM&PM

図5-3-7 調査対象路線内の調査地点

表5-3-4 各調査地点における調査項目

	設置状況	観測項目
観測地点①、②、⑥、⑦	歩道上、日陰に設置	気温、相対湿度、黒球温度、日射量(上から)、赤外放射量(下から)、風向風速、地表面温度、熱(赤外)画像、WBGT(暑さ指数)
観測地点③、④、⑧、⑨	街路樹に括りつけ設置	気温、相対湿度、黒球温度、WBGT(暑さ指数)
観測地点⑤	日なた(強剪定付近)に設置	気温、相対湿度、黒球温度、日射量(上・下から)、風向風速、地表面温度、熱(赤外)画像、WBGT(暑さ指数)
観測地点⑩	日なた(いきいき剪定付近)に設置	気温、相対湿度、黒球温度、日射量(上・下から)、赤外放射量(上・下から)、風向風速、地表面温度、熱(赤外)画像、WBGT(暑さ指数)

ウ 結果の概要と考察

調査当日は 13:30頃までは継続して晴れていたが、それ以降は晴れと曇りを繰り返し、雲の影と歩道上の緑陰が判別できない時間も見られていた。参考までに、調査日当日の横浜地方気象台による気象データを図 5-3-8 に示す。

	9時	10時	11時	12時	13時	14時	15時
天気							
気温(°C)	30.1	30.9	31.7	32.3	33.1	31.8	31.6
湿度(%)	59	52	52	50	46	51	55
日照時間(h)	0.9	1.0	1.0	1.0	1.0	0.5	0.6
風向	東南東	東南東	南南西	南南東	南南東	南南東	南南東

※横浜地方気象台のデータ

図 5-3-8 調査日当日の天気の推移

横浜地方気象台のデータでは 14:00 から曇となっているが、現地では 13:00 過ぎから雲が出始め、13:30 頃には曇で影が見えなくなった。その後は、雲が多いものの、陽が出る時間もあったが、午前中ほど強い日差しにはならなかった。そのため、午前中(10:00~12:00)のデータを対象に暑熱環境の差を検証した。観測地点①、⑤、⑥での気温・黒球温度・WBGT・上からの日射量の結果の概要を表5-3-5に示す。

表 5-3-5 調査結果の概要(観測地点①、⑤、⑥)

	観測地点	気温(°C)	黒球温度(°C)	WBGT(°C)	上からの日射量(W/m2)
いきいき剪定の緑陰	⑥	32.3	34.5	26.3	81.6
強剪定の緑陰	①	32.8	36.8	26.9	137.0
日なた	⑤	33.8	43.2	28.3	759.8

※1:10:00~12:00までの平均値

※2:当日の横浜地方気象台の状況(10~12時の平均値):気温31.6°C、湿度51%、WBGT28.9°C(WBGTは実況推定値)

※3:気温・黒球温度・WBGTは地上から高さ1.5mで測定・算出した値、日射量は地上から高さ0.3mで測定した値

なお、観測地点⑩では、機器設置場所の直近にある木の緑陰や上部の電線などの影の影響を受けた可能性があるため、参考値扱いとした。そのため、日なたの観測結果は、強剪定付近の日なたに設置した観測地点⑤の結果のみを用いた。また、街路樹の 2.5m の高さに観測機器を括りつけた観測地点③(強剪定の木)と観測地点⑧(いきいき剪定の木)では、WBGT の値等に差はほとんど見られなかった(表 5-3-6)。

表 5-3-6 調査結果の概要(観測地点③、⑤、⑧)

	観測地点	観測高さ(m)	気温(°C)	相対湿度(%)	黒球温度(°C)	WBGT(°C)
いきいき剪定の緑陰	⑧	2.5	32.6	45	34.4	26.4
強剪定の緑陰	③	2.5	32.2	45	35.1	26.3
日なた	⑤	1.5	33.8	41	43.2	28.3

※1:10:00~12:00までの平均値

※2:街路樹に括りつけた観測機器は、10時~12時に5回、目視で緑陰内にあることを確認した。その結果、午前中を通して緑陰内にあると推定した。

この理由としては、観測機器を括りつけた観測地点③の強剪定の木が、観測地点⑧のいきいき剪定の木より樹冠や樹高が小さいものの、強剪定としては枝葉が伸び、葉密度はやや高い状態であったためであると考えている。また、観測地点①の強剪定の木(1.5m高さで観測)と比べて、樹冠・樹高は同程度であったが、葉密度はより高い状態にあったことも原因の一つと考えている。すなわち、いきいき剪定と強剪定の葉密度が同程度で、緑陰の濃さが同じ場合は、緑陰の大きさにかかわらず、緑陰内に観測機器が入っている場合は、木に括りつけた場所の暑熱環境に差はほとんどみられない結果となった。

今回の調査では、剪定方法の違いによって、形成する緑陰の大きさや葉の密度に由来する緑陰の濃さに違いが生じていた。図 5-3-9 に示すように、10:30 頃には強剪定・いきいき剪定のどちらも、歩道幅(幅員約 4m)全体に緑陰が生じていた。しかし、11:30 頃には、強剪定は道幅の半分程度の陰で、歩道にかかる緑陰全体の大きさも小さくなっており、葉密度の薄い部分で形成された緑陰の薄い部分も目立つようになってきた。一方で、同時刻でのいきいき剪定の緑陰は、継続して道幅全体に濃い緑陰を形成していた。



図 5-3-9 緑陰の大きさの経時変化

以上の調査結果より、2021 年度の実測調査では、強剪定の緑陰に比べ、いきいき剪定の緑陰の方が、暑熱環境が緩和されていたことを確認した。いきいき剪定の方が木全体での緑の濃さが濃く、枝葉がより日射を遮るため、暑熱緩和効果が大きく、また、大きな緑陰を形成するため、涼しさを感じられる面積(範囲)が大きくなったと考えられる。

(5) 2021 年度の実測調査に関する数値シミュレーション

ア 数値シミュレーションの計算設定

5.1 章(3)イと同様の方法で、計算を行った。

イ シミュレーションでの樹木の設定方法

街路樹 1 本 1 本の樹高、枝下高、葉面積密度(緑の濃さ)を示すデータは、GIS データには含まれていないことから、実測調査で取得した樹木の基礎情報を基に、次に示す方法でシミュレーションに必要な樹木の配置作業を行った(ア)。本作業には、SI-CAT(気候変動適応技術社会実装プログラム)の技術開発において開発されたツールを使用した。一方、大規模緑地など GIS データで山林と定義されている場所に対しては、(ア)の作業を行わず、典型的な樹木形状として固定値を用いた。

(ア) 樹木の配置作業

a 樹冠の水平位置の設定(図 5-3-10)

- ① 微気象シミュレーションを行う格子位置(原点)を決定し、航空写真から、樹木(樹冠)の輪郭(真上から見た大きさ)を縁取る
- ② ①で定義した 1m 格子の各セル内において、半分以上が樹木(樹冠)である場合、そのセルには、樹冠(緑)があると定義する
- ③ 1 本の樹木として定義する



図 5-3-10 樹冠の大きさの設定作業

b 樹冠の鉛直位置・見た目の緑の濃さの設定(図 5-3-11)

a で定義された水平方向セルにおいて、写真や現地での調査記録から、1m 格子の鉛直方向セル(ボクセル)毎に「樹高」「枝下高」「見た目の緑の濃さ(3段階:濃い・普通・薄い)」を設定する。



図 5-3-11 樹高・枝下高・緑の濃さの設定作業

ウ 中田さちが丘線での樹木の設定方法

実測調査を行った地点のうち、いきいき剪定の調査を行った街路樹を対象としたシミュレーションを実施した。対象エリアのうち、特に注目している地点における土地利用状況と、街路樹の位置を図 5-3-12 に示す。土地利用と色の関係は以下の通りである。紫色：建物、青色：建物敷地、白色：道路。また、緑の位置が、道路の両脇に植樹されている街路樹の位置である。また図中の赤い格子の9点は、後述の日射強度に関する解析に用いた地点である。

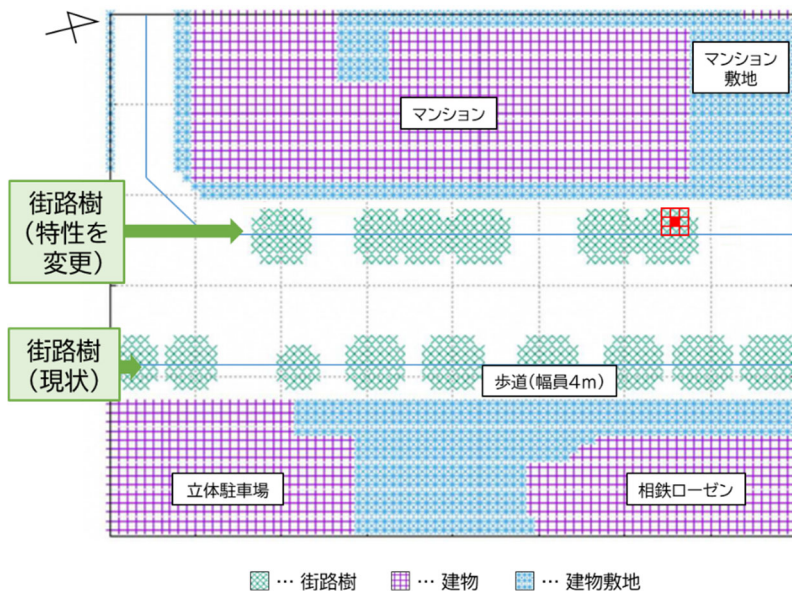


図 5-3-12 土地利用と樹木配置

いきいき剪定と強剪定がなされている通りでの暑熱環境の違いを把握することが、本章での目的である。その把握のために、同じ場所、同じ時刻、同じ気象条件下において、剪定方法を変えることにより、どの程度、暑熱環境に違いが生じるかを、シミュレーションで解析した。具体的には、図 5-3-12 に示されてい

る街路樹のうち、西側に南北に並ぶ6本の街路樹の特性を変え、その結果生じる暑熱環境を解析した。街路樹の特性を表すパラメータとしては、樹冠体積、樹冠の葉の緑の濃さ、樹冠の位置（高さ）がある。本章の目的である剪定方法の差による暑熱環境の違いを把握するためには、樹冠体積と樹冠位置に対する依存を主に解析すれば良い。ここでは、横浜市の街路樹の維持管理を行っている部署（道路局）に相談した上で、現実的な6つの樹冠形状を設置し、各ケースのパラメータをイメージ図とともに図 5-3-13 に示す。シミュレーションの解像度が1mのため、樹冠形状は1辺1mのブロックで表現される。この6ケースでは、葉の緑の濃さ（葉面積密度により設定：詳細は後述）は一定値の $1.93\text{m}^2/\text{m}^3$ である。



図 5-3-13 樹冠体積・樹冠位置依存性解析のための樹冠パラメータ

次に、緑の濃さの依存を解析するために、Case1の樹冠形状に対し、葉面積密度を6種類設定した。各ケースの葉面積密度の値を、相当する葉の写真とともに図 5-3-14 に示す。写真から分かるように、樹種は異なるものの（Case1～3は中田さちが丘線のケヤキに対して、みなと大通りのホルトノキ）、実際の街路樹における葉面積密度の変化の範囲を想定している。

	Case7	Case8	Case9	Case10	Case11	Case12
写真						
葉面積密度	$0.67\text{m}^2/\text{m}^3$	$0.92\text{m}^2/\text{m}^3$	$1.16\text{m}^2/\text{m}^3$	$1.29\text{m}^2/\text{m}^3$	$1.68\text{m}^2/\text{m}^3$	$2.17\text{m}^2/\text{m}^3$
樹高	9 m	9 m	9 m	9 m	9 m	9 m
枝張り	7 m	7 m	7 m	7 m	7 m	7 m
樹冠体積	122m^3	122m^3	122m^3	122m^3	122m^3	122m^3

図 5-3-14 葉の濃さの依存性を解析するための樹冠パラメータ

Case 1~6の樹冠形状のまま、葉面積指数 (LAI、下記「樹木画像に基づく葉面積指数の推定手法」項を参照) を一定としたケースをそれぞれ Case 13~18として6種類設定した(表 5-3-7)。よって、樹冠パラメータを変えた計18種類の樹木に対して、暑熱環境の違いを解析した。

表 5-3-7 LAI を一定としたケース

	Case 13	Case 14	Case 15	Case 16	Case 17	Case 18
葉面積密度(m ² /m ³)	0.67	0.92	1.16	1.29	1.68	2.17
葉面積指数(m ² /m ²)	6.20					
街路樹の形	Case 1と同じ(樹高9m、枝張り7m、樹冠体積122m ³)					

エ 樹木画像に基づく葉面積指数の推定手法

MSSG の微気象シミュレーションでは、建物形状を格子点に沿ったボクセルにより表現し、樹冠については、葉の茂り具合を表す葉面積密度(単位体積あたりに含まれる葉の総面積)の3次元空間分布により表現する。樹冠の風の流れを遮る効果、日射を遮蔽・散乱する効果、熱放射の効果、及び樹冠と大気との熱・水蒸気の交換に及ぼす効果等の計算では、葉面積密度がそれらの効果の大きさに関わる重要なパラメータとなる。例えば、樹冠体積内で葉が一様に分布していると仮定すると、樹冠を透過する放射(日射や熱放射)の透過率 $T[-]$ (直達透過率)は、葉面積密度 $a[m^2/m^3]$ 、樹冠体積内の通過距離 $l[m]$ 、及び樹冠内の消散係数 $k_{ext}[-]$ を用いて、 $T=\exp(-k_{ext}al)$ により求められる(Beer-Lambert 則)。MSSG では樹冠の各格子においてこの Beer-Lambert 則が成立していると仮定している。その際、葉の向いている方向がランダムであることを仮定し、 $k_{ext}=0.5$ としている。そこで、この関係式を利用して、樹木の画像から葉面積指数(Leaf Area Index, LAI)の推定を行った。

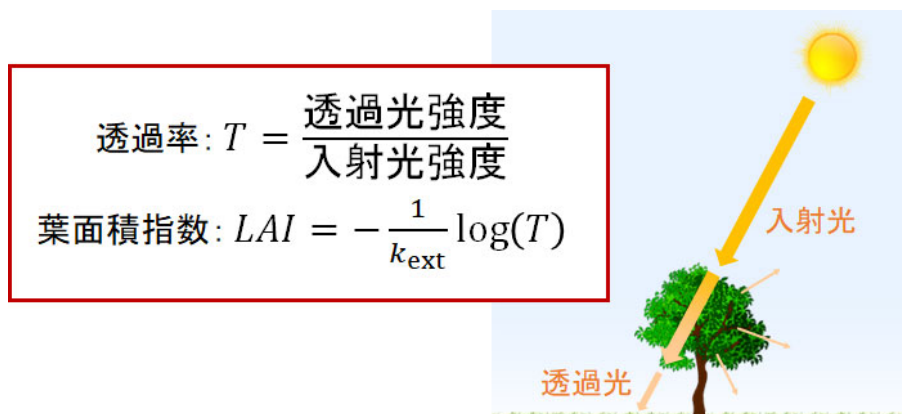


図 5-3-15 樹冠の透過率と LAI の推定式

LAI は葉面積密度を鉛直方向に積分した無次元量として定義される。つまり、樹冠高さを $H [m]$ とすると、 $LAI = \int_0^H a dz$ である。樹冠全体で葉面積密度が一様であれば、樹冠の鉛直幅 $h [m]$ ($=H - H_{bottom}$ 、ただし、 H_{bottom} は樹冠の枝下高さ[m])を用いて、 $LAI = ah$ と表すことができる。したがって、樹冠の鉛直方向の透過率 T が分かれば、 $LAI = -\log(T)/k_{ext}$ により LAI を推定することができ、また、 $a=LAI/h$ により葉面積密度を得ることができる(図 5-3-15)。一般的には、鉛直方向を向いた魚眼レ

レンズによる撮影画像などを用いて同様の手法による LAI の画像推定が行われるが、ここでは画角の狭い通常のデジタルカメラを使い、樹冠下から見上げるように撮影した樹冠画像を用いて簡易的な LAI 推定を行った。

具体的には、まず、樹冠画像を RGB の 3 成分に分解し、晴天日に撮影された樹冠画像において青空が最も明るくなる Blue 成分のみを抽出し、200 を閾値として二値化した(図 5-3-16)。また、画像中の樹冠位置の偏りや他構造物の映り込みを避け、可能な限り樹冠と空だけの判定となるようにマスク処理を施した(図 5-3-17)。その後、空の光が樹木で遮蔽されない割合を画像から算出し、これを透過率 T として上記の数式に基づいた LAI 及び葉面積密度 a の推定を行った。画像処理には、Python3 を用い、jupyter-notebook 上で処理を行った。画像の読み込みには scikit-image、画像の変換、マスク処理、及び解析には Pillow (PIL) 及び NumPy 等のライブラリを利用した。なお、本手法では、あくまで簡易的な LAI の推定を目的としており、精密な計測には全く及ばないものの、目視で確認した葉の「濃さ」とは一定の相関がみられた。一方で、画像のピントが合っていない場合や画像の解像度が著しく低い場合には、異常に大きな LAI が算出されることなども確認されており、高精細な樹冠画像を均一なクオリティで撮影することの重要性も示唆された。

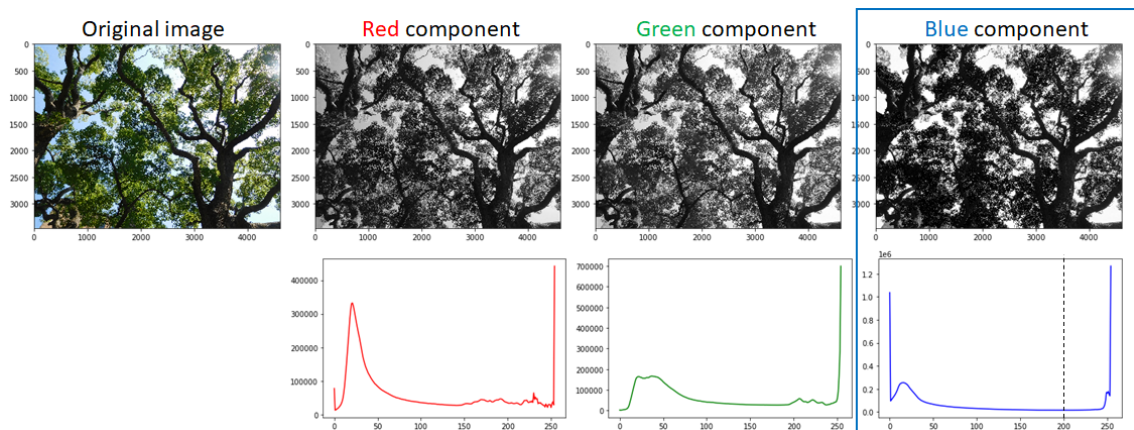


図 5-3-16 樹冠画像の RGB 成分

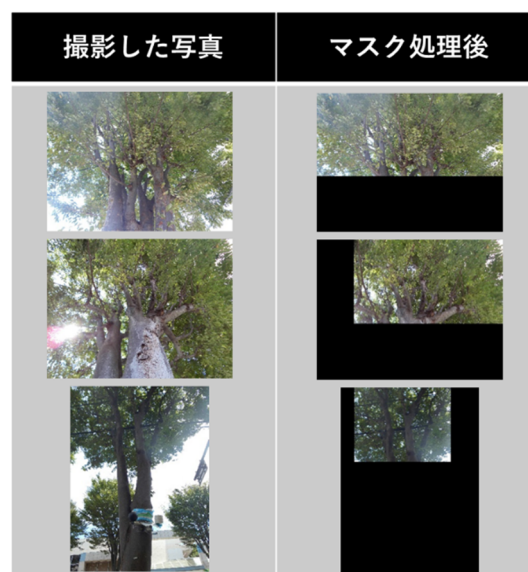


図 5-3-17 マスク処理の例

今回、いきいき剪定領域で撮影した可視画像14枚を用いて LAI を算出した結果、平均値として6.20 m^2/m^2 が得られ、平均葉面積密度に換算し 1.93 m^2/m^3 が得られた。これらの値を以下のシミュレーションの基本値とした。

ウ 結果と考察

(ア) 実測調査当日の暑熱環境について

実測調査当日 11:00~12:00 における微気象シミュレーションの結果の一例として、高さ1.5mにおける WBGT の空間分布について、11:00~11:05の平均値を示す(図 5-3-18)。マンションと立体駐車場の間に、ほぼ南北に延びる道路があり、その両脇に街路樹が植樹されている(図 5-3-12)。この時間帯、日光は図の右下方向から射している。街路樹のある場所では、周囲に比べてWBGTが低くなっていることがわかる。また、マンションなど、建物の影の場所においてもWBGTが低くなっている。

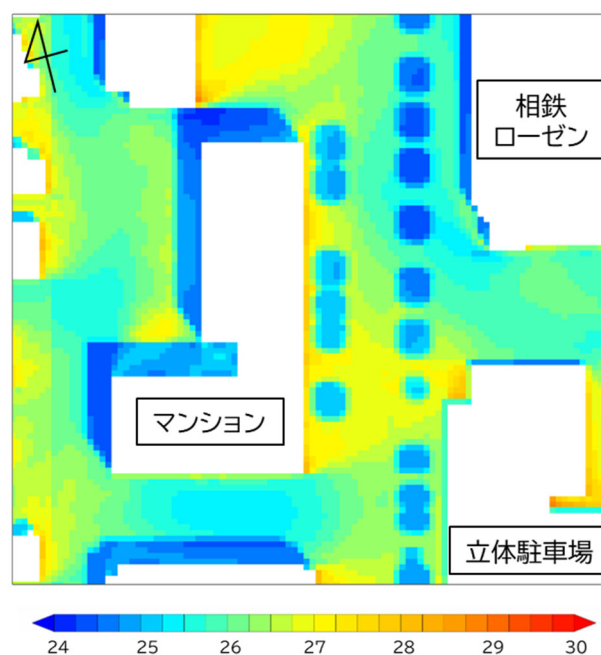


図 5-3-18 シミュレーションの結果例(WBGT)

次に、測定値とシミュレーション結果を比較した図を示す(図 5-3-19)。いきいき剪定の緑陰と日なたにおける 1.5m高さのWBGTの差を比較した。日なたは実測調査を行った観測地点⑩、緑陰は観測地点⑥(図 5-3-7 参照)を選んだ。シミュレーションでは、各測定地点に相当する格子を中心とした9地点の平均値を用いた。測定値においてもシミュレーション結果においても、日なたと木陰のWBGTの差は良い一致を示しており、約1.5~2°Cの差が得られた。

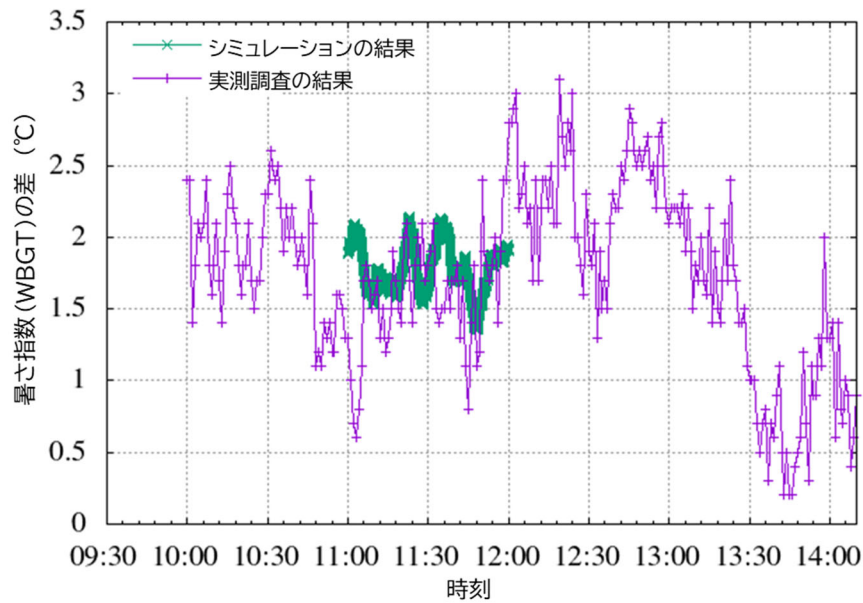


図 5-3-19 測定値とシミュレーションの比較(WBGT)

強剪定といきいき剪定のWBGTの差の分布図を図5-3-20 に示す。具体的には、Case1とCase2における高さ1.5mでのWBGTである。また、図 5-3-19 と異なり、それぞれシミュレーション結果の値の差を比較しているため、空間分布として表示しており、11:00~11:05の平均値を示す。左の図は、図 5-3-18 と同じである。真ん中の図は強剪定の樹形を、対象とする6本の樹冠の位置に設定した場合の結果である。WBGTが低くなっている場所が狭い領域でのみ確認され、街路樹によってWBGTを下げる効果は限定的である。右の図に、両者の差を示す。より赤く示されている領域において、強剪定といきいき剪定の差が大きく生じており、最大で約1.8°Cの差が見られている。

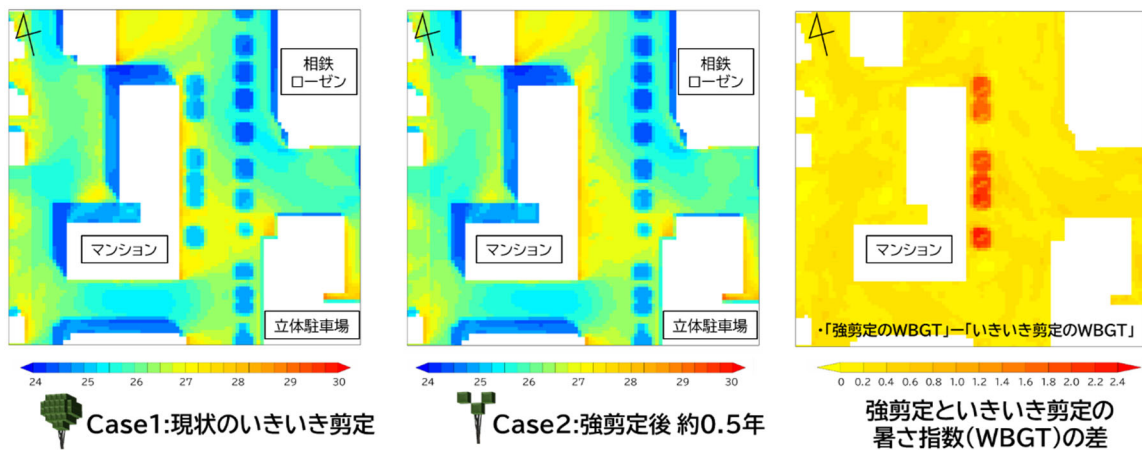


図 5-3-20 測定値とシミュレーションの比較(WBGT)

次に、WBGT の出現頻度分布を図5-3-21 に示す。具体的には、図 5-3-12 の赤い格子9点において WBGT の5分平均値を求め、11:00~12:00 についてヒストグラムを Case1~3に対してプロットした。いきいき剪定 (Case1) に比べ強剪定後約 0.5 年 (Case2) では、WBGT の分布が高くなっていることから、暑熱環境が明らかに悪化している。平均値として約1.5°Cの差があり、WBGT の5段

階のランクの幅が概ね3°Cであることから、ランク幅の半分程度の暑熱環境の差が生じることが分かる。その後、4年経過した Case3においても、暑熱環境が十分に回復していないことが分かる。

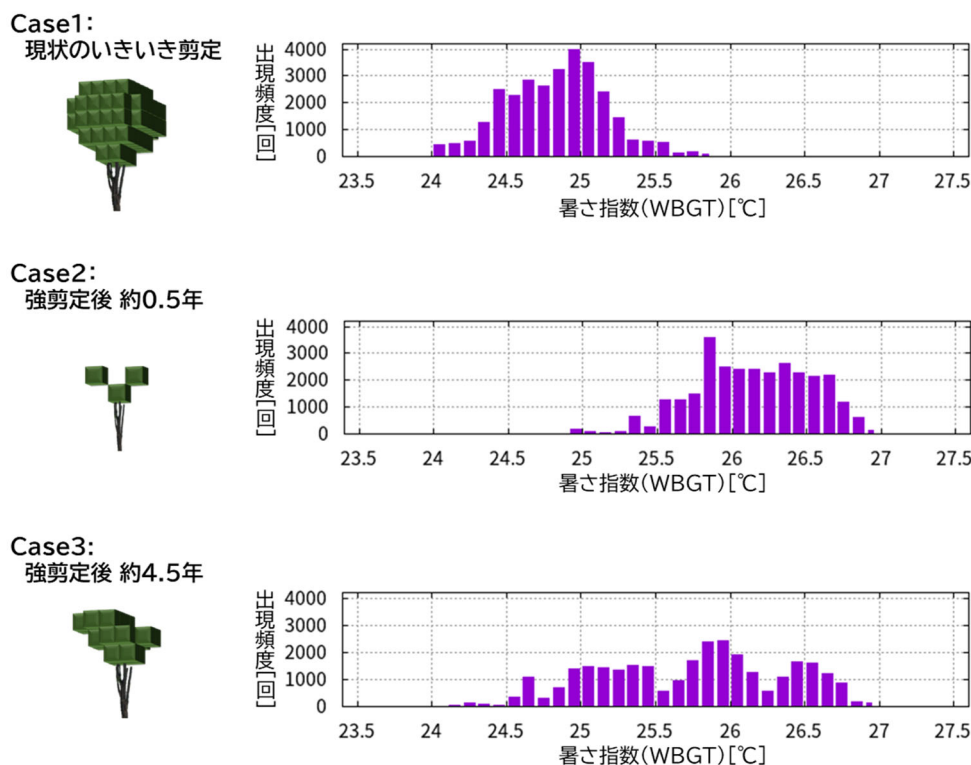


図5-3-21 WBGT の出現頻度分布

(1) WBGTと地表面での日射強度

今回のシミュレーションでは、同じ気象条件においてWBGTを比較した。そこで、WBGTに与える影響を、気象以外の他の物理変数で評価することを試みた。乾球温度、湿球温度、黒球温度が関与することから、12:00 における地表面での日射強度を取り上げた。各樹冠パラメータを考慮した18のケースにおいて、樹冠下の地面に届く日射強度(9格子データの平均値、図 5-3-12 参照)との関係を図 5-3-22 に示す。ケースにより、樹冠に関する各パラメータ値は異なるが、WBGT は、日射強度と良い相関を示した。図の中では2つのデータセットをプロットしている。主に考察した日にちの2021年8月11日を紫色で示す。また、赤色にて2022年6月30日(6月に横浜地方気象台で猛暑日と観測された日)の同時刻における計算結果を示す。太陽高度や気象条件が異なるため WBGT や日射強度が異なるが、どちらの日においても、WBGT は、地表面での日射強度と良い相関を示した。

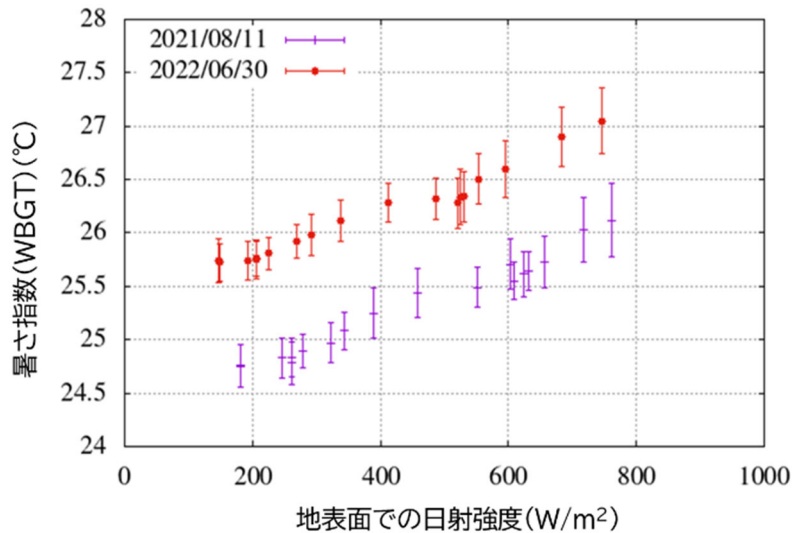


図5-3-22 地表面での日射強度に対するWBGT

これら18ケースを、個々のケースに分けて解析した結果を示す。具体的には、図 5-3-22 を Case 1～6と Case7～12の樹冠に対するプロットに分ける。図 5-3-23 左に Case 1～6を、図 5-3-23 右に Case7～12を示す。左図においては、概して、樹冠体積が増加するとWBGTが下がる。まず、Case 1～3のいきいき剪定と強剪定の違いに注目すると、図 5-3-21 のヒストグラムに見られたように、WBGT の差が明らかであり、平均値として約1.5°Cの差が生じている。次に、Case 1と4の比較から、樹冠位置を上下に2m変更した場合、WBGT に差はほとんど生じないことが分かる。葉面積密度を変更させた Case7～12 の右図の傾向から、街路樹で想定される葉面積密度の変化の範囲においては、約0.5°Cの差が生じている。ただし、強剪定といきいき剪定との剪定方法の差によって生じる WBGT の差に比べて変動幅は小さい。

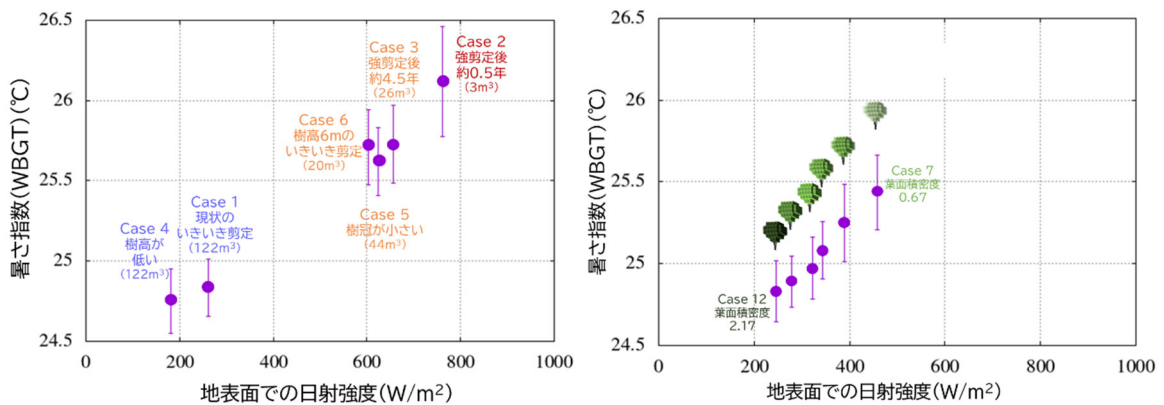


図 5-3-23 地表面での日射強度に対するWBGT (Case 1～6(左)、Case7～12(右))

(6) まとめ

実測調査においても、シミュレーションの解析においても、地面に到達する日射の有無や強度がその場の暑熱環境に大きく影響していることが示された。結果に関する樹冠特性と暑さ指数との関係の概念図を図 5-3-24 に示す。樹冠体積を横軸、緑の濃さを縦軸にとると、本章の結果から相対的な WBGT 及びこれに対応する地面に届く日射強度は、左下が高く右上が低くなること分かる(赤線から青線)。緑を薄くせ

ざるをえない場合には、樹冠を広く設けること（横軸の値を大きくすること）で、樹冠体積を大きくできない場合には、緑を濃くすること（縦軸の値を大きくすること）で、それぞれ WBGT が下がる。すなわち、暑熱環境の改善を図ることができる。このように WBGT を考慮しながら実際の剪定を行う事が今後、期待される。

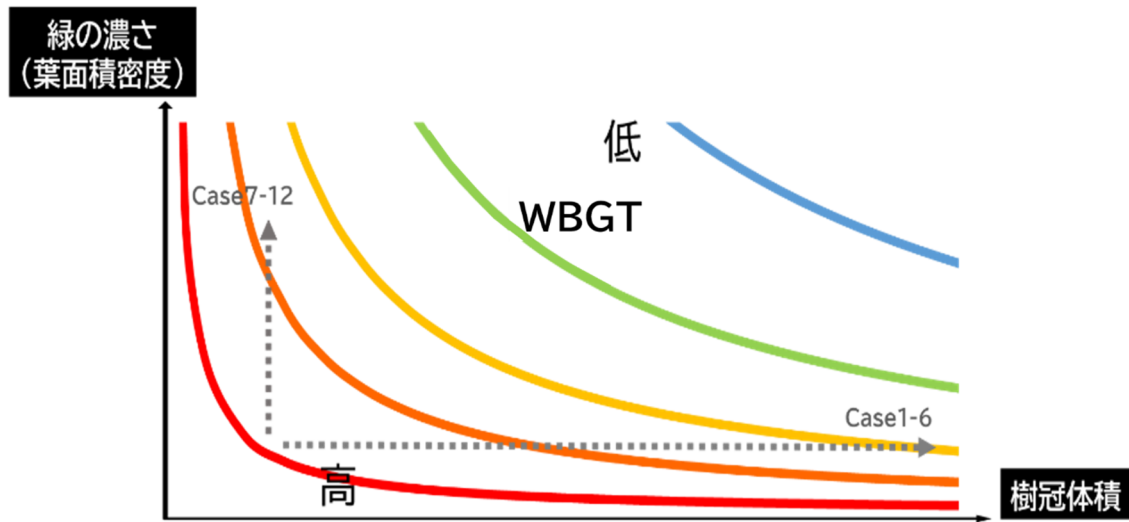


図 5-3-24 樹冠特性と暑さ指数の関係 (概念図)

本共同研究の相乗効果として以下の点が挙げられる。実測調査では、いきいき剪定と強剪定の2種類の樹冠特性に対して、地表面での日射の強度が異なり、暑熱環境に差が生じる事を示した。このことは図5-3-22 のシミュレーション結果内で、各剪定に相当する2点において、その差を示したことに対応する。しかし正確には、実測調査では全く同じ場所で、剪定方法の違いによる差を比較することはできない。一方、実測調査の結果や樹冠特性の情報を加味したシミュレーションを実施することにより、種々な樹冠特性に対して WBGT の違いを検証した。実測調査を行った Case1 のいきいき剪定と Case3 の強剪定後約 4.5 年後の 2 点間の内挿のみならず、その外側での WBGT の分布を明らかにし、図 5-3-24 の全体像を得た。局所的な検証からより一般的な検証につながったと考えられる。

(7) 参考文献

- 1) 岡野通明・萩野裕章・高梨聡・鈴木順, 暑熱シェルターとしての緑陰の有効性, 関東森林研究, 66-1(2015),97