靖国神社周辺の水蒸気移動に関する実測

東京理科大学大学院工学研究科建築学専攻
辻本研究室
4109632　紅谷　真司

第１章　序論
1.1　研究背景　・・・・6
1.1.1　既往研究　・・・・6
1.1.2　靖国神社の緑地について　・・・・7
1.1.3　千代田区緑の実態調査及び熱分布調査業務報告書の概要　・・・・10
1.2　研究目的　・・・・12

第２章　アスマン通風乾湿計を用いた実測（夏季）
2.1　実測概要　・・・・16
2.1.1　実測項目　・・・・16
2.1.2　実測条件　・・・・16
2.1.3　実測内容　・・・・17
2.1.4　使用器具　・・・・18
2.1.5　測定点について　・・・・19
2.2　各値の算出式　・・・・21
2.2.1　水蒸気分圧の算出式　・・・・21
2.2.2　絶対湿度の算出式　・・・・21
2.2.3　風速の算出式　・・・・23
2.3　実測結果　・・・・24
2.3.1　各測定点の温湿度について　・・・・24
2.3.2　道路及び神社の風向風速について　・・・・26
2.3.3　各測定点の気温差及び絶対湿度差　・・・・28
2.3.4　交通量　・・・・33

第３章　モデルを用いた絶対湿度及び気温変化量について(夏季)
3.1　水蒸気発生源　・・・・36
3.1.1　自動車　・・・・36
3.1.2　人間　・・・・38
3.1.3　緑地　・・・・39
3.1.4　水面　・・・・41

3.2　垂直方向の温湿度分布について　・・・・42
3.2.1　実測内容　・・・・42
3.2.2　実験条件　・・・・42
3.2.3　実験方法　・・・・42
3.2.4　使用器具　・・・・43
3.2.5　実測結果　・・・・44
3.3　自動車排熱による水蒸気移動について　・・・・46
3.4　樹木の蒸散による水蒸気移動について　・・・・48
3.4.1　モデルについて　・・・・48
3.4.2　絶対湿度上昇量の算出　・・・・52
3.5　自動車排熱及び樹木の蒸散による気温変化量について　・・・・56
3.6　分子拡散による水蒸気の移動　・・・・59
3.7　冬季の蒸散量の予測　・・・・60

第４章　アスマン通風乾湿計を用いた実測（冬季）
4.1　実験概要　・・・・64
4.2　実験結果　・・・・65
4.2.1　各測定点の温湿度について　・・・・65
4.2.2　道路及び神社の風向風速について　・・・・66
4.2.3　各測定点の気温差及び絶対湿度差　・・・・68
4.3　自動車排熱による水蒸気移動について　・・・・72
4.4　樹木の蒸散による水蒸気移動について　・・・・74
4.5　自動車排熱及び樹木の蒸散による気温変化量について　・・・・75

第５章　総括　・・・・77

謝辞　・・・・79

付録　・・・・80

第１章　序論

第１章　序論

1.1 研究背景

1.1.1　既往研究

ヒートアイランド現象の原因の１つとして、人工排熱の増加が挙げられる。足永[1)]によると、23 区における夏季日平均の人工排熱(顕熱)の内訳は建物 47%、道路交通 40%、工場 13%となっており、道路交通の影響を無視することはできない。足永はそれぞれの人工排熱を以下①～③のように求めている。(表 1)

①建物

東京都都市計画 GIS データを用いて建物用途及び規模ごとの床面積を 500m メッシュで集計したものに冷熱源機器の導入割合を考慮した排熱原単位を乗じて顕熱と潜熱の時間変動値を得た。地域冷暖房が導入されている地域では、地域で回収した熱量が地冷プラントの熱処理システムを経由して大気等に放熱されるとして人工排熱の計算結果に反映した。

②道路交通

幹線道路の場合、「道路交通センサス(1997 年)」を用いて 500m メッシュ内のセンサス道路延長と車種別時間別交通量調査データを用いて、速度別車種別燃料消費原単位を乗じてエネルギー消費とした。非幹線道路の場合、デジタル道路データ DRM から非幹線道路面積を算出し、東京都報告書「都内自動車交通及び自動車排出ガス量算出調査(平成 4 年 3 月)」を参考としてエネルギー消費量を算出した。

③工場

環境省「大気汚染物質総合調査(1996 年)」により、燃料消費量や煙突高さ等のポイントデータを抽出し、高さごとの排熱データを求めた。電力については「都におけるエネルギー需給構造調査(平成 11 年 3 月)」を参考として排熱量に加算した。

表 1.1　東京 23 区の人工排熱の区別内訳(夏季日平均)

区名称	顕熱				潜熱				全熱の合計
	建物	道路交通	工場	計	建物	道路交通	工場	計	
千代田区	44.6	18.4	2.2	65.2	40.1	1.4	0.4	41.9	107.1
中央区	49.0	19.1	1.4	69.5	18.7	1.4	0.2	20.3	89.8
港区	30.1	14.4	6.5	50.9	18.5	1.1	0.7	20.3	71.2
新宿区	29.6	10.9	2.3	42.8	20.4	0.8	0.4	21.6	64.4
文京区	18.8	11.8	1.4	32.1	4.3	0.9	0.3	5.5	37.6
台東区	28.8	15.5	0.8	45.1	6.4	1.2	0.1	7.7	52.8
墨田区	18.9	14.9	1.3	35.1	3.9	1.1	0.1	5.2	40.3
江東区	10.0	9.6	3.9	23.5	4.0	0.7	0.5	5.2	28.7
品川区	14.6	11.1	19.0	44.7	5.0	0.8	2.3	8.2	52.9
目黒区	13.1	10.6	3.2	26.9	3.5	0.8	0.4	4.7	31.6
大田区	8.7	8.5	4.4	21.6	1.4	0.6	0.6	2.6	24.2
世田谷区	7.3	10.0	1.5	18.8	0.3	0.8	0.2	1.3	20.1
渋谷区	21.9	12.6	0.9	35.4	10.5	1.0	0.1	11.6	47.0
中野区	11.0	9.1	0.4	20.5	1.1	0.7	0.1	1.9	22.4
杉並区	8.4	9.2	1.4	18.9	0.2	0.7	0.2	1.1	20.0
豊島区	21.5	11.6	0.5	33.6	11.8	0.9	0.1	12.8	46.3
北区	10.6	8.6	2.7	21.9	1.2	0.7	0.3	2.2	24.1
荒川区	13.0	9.3	1.9	24.2	1.0	0.7	0.2	1.9	26.1
板橋区	9.8	11.9	5.0	26.8	0.7	0.9	0.5	2.1	28.9
練馬区	6.5	7.7	1.2	15.5	0.4	0.6	0.1	1.2	16.7
足立区	7.2	11.2	4.2	22.6	0.5	0.8	0.6	1.9	24.5
葛飾区	8.1	10.7	5.7	24.6	0.4	0.8	0.5	1.8	26.4
江戸川区	7.7	10.8	2.4	20.9	0.5	0.8	0.3	1.6	22.4
23区	12.7	10.7	3.5	26.9	4.0	0.8	0.4	5.2	32.0

出典：足永靖信　空気調和・衛生工学論文集　No92、空気調和・衛生工学会 2004 年 1 月

表 1.1 より、千代田区の道路交通(顕熱)の値は東京 23 区の中では、中央区に次いで 2 番目となっているので、千代田区の交通量は多いと言える。

また、神田ら [2]の行ったストリートキャニオンにおける実測によると、自動車排熱量(顕熱)は最大 200W/m^2 に及び、一日の総量では日射量を卓越するということが報告されている。自動車排熱量(潜熱)については測定日前日の雨の影響により、正確な測定が行われていない。

三宅ら [3]の行った幹線道路沿いの実測によると、道路沿いの気温が公園内及び低層住宅地の気温に比べ、最大約 4℃高くなっており、道路から遠い測定点の気温が低く、低層住宅地よりも公園内の気温が低いという傾向を示している。以上、いずれの研究も顕熱を主に扱っており、本論が対象とする自動車交通及び公園緑地から発生する水蒸気に関する実測値もしくはその影響については明らかにしていない。

1.1.2　靖国神社の緑地について

靖国神社の敷地は九段北二丁目と九段北三丁目にまたがって所在しており、敷地面積は 93,356m^2 である。「千代田区緑の実態調査及び熱分布調査業務報告書」[4]より、町丁目別の緑被地の面積を表 1.2 に、緑被区分の定義、緑被抽出の定義をそれぞれ表 1.3、図 1.1 に示す。「千代田区緑の実態調査及び熱分布調査業務」の概要については 1.1.3 に示す。表 1.2 より、九段北二丁目、九段北三丁目の樹木地の面積はそれぞれ 26,283m^2、41,393 m^2 である。ここでいう樹木地の面積とは、樹木を真上から見たときに樹木によって覆われた地面の面積のことである。靖国神社の敷地以外に樹木はないものとすると、九段北二丁目と九段北三丁目の樹木地の面積の合計が靖国神社の敷地内に存在する樹木地の面積となる。よってその面積は、67,676 m^2 となる。表 1.2 より、靖国神社の樹木地の面積率は、日比谷公園、千代田、北の丸公園には劣るものの、それら以外の町丁目と比較すると、圧倒的な樹木地の面積率であることがわかる。よって、靖国神社の緑地の密度は高いと言える。

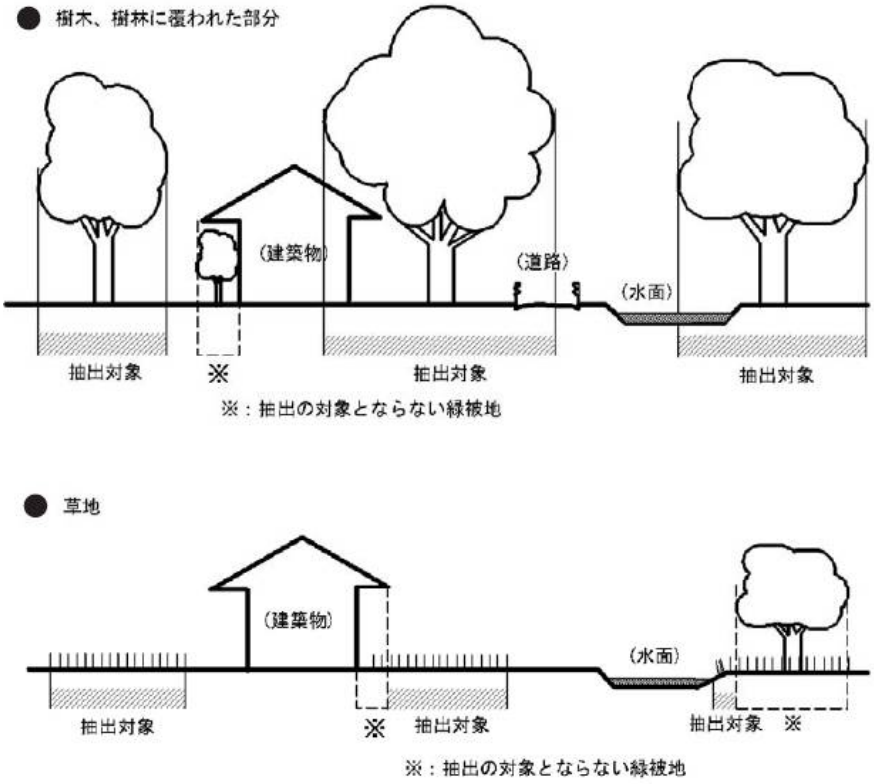
表 1.2　町丁目別緑被地の面積

町丁目別緑被集計表（2）　　上段：面積（㎡）、下段：面積率

	町丁目	面積	緑被地	樹木地	草地	屋上緑化（樹木地）	屋上緑化（草地）	水面
28	四番町	96,700	12,189	10,838	986	69	296	－
		－	12.60%	11.21%	1.02%	0.07%	0.31%	－
29	五番町	86,400	30,759	24,698	5,129	863	69	8,914
		－	35.60%	28.59%	5.94%	1.00%	0.08%	10.32%
30	六番町	118,800	15,122	13,920	580	522	99	－
		－	12.73%	11.72%	0.49%	0.44%	0.08%	－
31	皇居外苑	465,000	186,549	98,722	87,827	－	－	90,363
		－	40.12%	21.23%	18.89%	－	－	19.43%
32	日比谷公園	203,800	123,243	108,503	13,314	－	1,426	3,096
		－	60.47%	53.24%	6.53%	－	0.70%	1.52%
33	千代田	1,423,000	894,373	772,977	121,397	－	－	294,065
		－	62.85%	54.32%	8.53%	－	－	20.67%
34	北の丸公園	419,000	194,121	180,890	13,231	－	－	99,805
		－	46.33%	43.17%	3.16%	－	－	21.32%
35	九段南一丁目	72,200	10,223	8,716	843	233	431	1,460
		－	14.16%	12.07%	1.17%	0.32%	0.60%	2.02%
36	九段南二丁目	76,500	15,765	14,646	981	138	－	143
		－	20.61%	19.15%	1.28%	0.18%	－	0.19%
37	九段南三丁目	34,900	1,746	1,738	－	8	－	－
		－	5.00%	4.98%	－	0.02%	－	－
38	九段南四丁目	57,800	3,125	2,577	－	450	98	－
		－	5.41%	4.46%	－	0.78%	0.17%	－
39	九段北一丁目	84,500	6,035	5,460	－	153	423	－
		－	7.14%	6.46%	－	0.18%	0.50%	－
40	九段北二丁目	75,200	26,526	26,283	138	105	－	－
		－	35.27%	34.95%	0.18%	0.14%	－	－
41	九段北三丁目	102,200	41,520	41,393	－	127	－	445
		－	40.63%	40.50%	－	0.12%	－	0.43%
42	九段北四丁目	95,000	19,028	17,796	1,066	125	41	17,481
		－	20.03%	18.73%	1.12%	0.13%	0.04%	18.40%
43	富士見一丁目	127,200	13,166	10,430	2,299	243	195	－
		－	10.35%	8.20%	1.81%	0.19%	0.15%	－
44	富士見二丁目	226,800	38,838	33,716	4,608	437	77	19,768
		－	17.12%	14.87%	2.03%	0.19%	0.03%	8.72%
45	飯田橋一丁目	43,300	1,575	893	－	589	93	－
		－	3.64%	2.06%	－	1.36%	0.21%	－
46	飯田橋二丁目	52,500	4,538	4,178	186	101	72	582.94
		－	8.64%	7.96%	0.35%	0.19%	0.14%	1.11%
47	飯田橋三丁目	130,700	11,737	8,322	1,196	15	2,205	2,433
		－	8.98%	6.37%	0.91%	0.01%	1.69%	1.86%
48	飯田橋四丁目	45,800	3,974	3,020	809	144	－	247
		－	8.68%	6.59%	1.77%	0.31%	－	0.54%
49	一ツ橋一丁目	49,400	5,235	3,518	689	86	943	999
		－	10.60%	7.12%	1.39%	0.17%	1.91%	2.02%
50	一ツ橋二丁目	93,100	6,128	4,468	236	349	1,075	2,259
		－	6.58%	4.80%	0.25%	0.37%	1.16%	2.43%
51	神田神保町一丁目	136,200	5,710	4,819	111	646	134	－
		－	4.19%	3.54%	0.08%	0.47%	0.10%	－
52	神田神保町二丁目	101,300	2,141	1,913	33	196	－	－
		－	2.11%	1.89%	0.03%	0.19%	－	－
53	神田神保町三丁目	89,900	1,544	1,361	92	91	－	244
		－	1.72%	1.51%	0.10%	0.10%	－	0.27%
54	三崎町一丁目	28,100	1,586	1,392	60	134	－	613
		－	5.64%	4.95%	0.21%	0.48%	－	2.18%

表 1.3　緑被区分と定義

区　　分	定　　義
樹　木　地	樹木、樹林に覆われた土地
草　地	公園や広場などの管理された土地の草本類による緑化地
屋上緑化 （樹木地）	屋上、テラスなどの人工地盤上の樹木地
屋上緑化 （草地）	屋上、テラスなどの人工地盤上の草地
水　面	河川、池、貯水池などの水面



（東京都「緑被率標準調査マニュアル」昭和 63 年 10 月を基にして作成）

図 1.1　緑被抽出の定義

1.1.3　千代田区緑の実態調査及び熱分布調査業務報告書の概要

「千代田区緑の実態調査及び熱分布調査業務報告書」の概要を以下に示す。

① 業務の目的

近年、都市部において建物や道路などがコンクリート等で被覆され、緑地部分の減少や、オフィスビル群の人工排熱の増加などの影響により、温度が上昇するヒートアイランド現象が顕著となり、夏季の熱帯夜、熱中症等の増加による健康被害、集中豪雨災害等が起きている。

そのため、千代田区全域の緑被率と熱分布の実態を平成15年度調査に引き続き調査し、緑被と熱分布の関連性及び土地利用、建物容積等と熱分布の関連性を明らかにすることを目的として調査を実施した。

なお、調査の結果は、「千代田区都市計画マスタープラン」、「千代田区緑の基本計画」及び「千代田区ヒートアイランド対策計画」に基づく各種施策の中で実行していくものとする。

②. 調査対象範囲

調査範囲：千代田区全域（面積11.64km2）

③. 業務期間

平成22年7月26日～平成23年3月31日

④. 業務項目

（A）　航空機センサによる撮影

(1) 地表面熱画像

(2) 地表面可視画像撮影（熱画像と同時撮影）

（B）　緑の実態調査

(1) 緑被率調査

(2) みどり率調査

(3) 屋上緑化調査

(4) 接道緑化調査

（Ａ）航空機センサによる撮影

航空機搭載マルチスペクトルスキャナ（航空機MSS1）を用いて千代田区全域の撮影を行った。熱赤外の撮影では、地表面の状態がわかるように同時に可視画像も撮影した。
撮影緒元については、以下の表に示す。
飛行高度は海抜2,000m（6,500ft）、コース数は３コース。

項　目	摘　要
撮　影　範　囲	千代田区全域（11.64ｋ㎡）
撮　影　時　期	平成22年8月21日
ディジタル計測機器	航空機MSS
取得画像データ	**可視～熱赤外を同時取得**
地上解像度	2.5m程度
地表面温度実測点	25地点

MSS：可視～近赤外～中間赤外～熱赤外（マルチスペクトル）に至る複数の波長帯を観測することが可能なデジタルセンサ

（Ｂ）緑の実態調査

(1) 緑被率調査

最小抽出単位を1m（東京都緑被率標準調査マニュアルの水準Ｉ）として、千代田区内全域の緑被を抽出し、緑被率を把握した。緑被率調査には、水準Ｉの調査が可能で、可視～近赤外域を同時撮影したデジタル画像（高分解能衛星GeoEye-1）を用いた（図1-1）。
緑被の抽出は、近赤外バンドを用いた自動抽出手法とし、目視判読によって樹木地、草地、水面を区分するものとした。
緑被率は、町丁目別に算出し、前回調査結果と経年変化面積の把握を行った。判読結果は緑被分布データとして整備し、地理情報システムで扱えるものとした。

(2) みどり率調査

緑被分布データに、都市計画公園データを追加し、区全域のみどり率を算出した。

(3) 屋上緑化調査

上記で作成した緑被分布データを基に、多方向カメラ画像及び地物高さデータを用いて屋上緑化地を抽出し、面積集計を行った。また、箇所数を調査して面積規模ごとに集計した。

(4) 接道緑化調査

平成18年度から平成21年度までに緑化計画書が提出された敷地について、情報の更新を行った。データの状況によっては、現況調査を行った。

1.2　研究目的

1.1.1 及び 1.1.2 でも述べたように、千代田区は東京 23 区の中でも交通量が多く、靖国神社の緑地の密度は高くなっている。

そこで本研究では、実測データが少なくその影響が明らかではない自動車交通及び公園緑地からの水蒸気発生について、交通量が多く、緑地の密度も高い靖国神社周辺に注目し、その実測を行うことにより、自動車交通及び公園緑地の影響を水蒸気移動の観点から考察し、明らかにすることを目的としている。

参考・引用文献

1)　足永靖信　空気調和・衛生工学論文集 No92　空気調和・衛生工学会 2004.1

2)　神田学　通過交通の影響を含めたストリートキャニオンにおける熱収支の実測　土木学会論文集 1998.2

3)　三宅玲子　都市幹線道路沿いの熱流・熱環境の実測研究　日本建築学会大会学術講演梗概集 2002.8

4)　千代田区　千代田区緑の実態調査及び熱分布調査業務　報告書　2011.3

第２章　アスマン通風乾湿計を用いた実測（夏季）

第２章　アスマン通風乾湿計を用いた実測（夏季）

2.1　実測概要

2.1.1　実測項目

アスマン通風乾湿計を道路沿いに３台、神社境内に２台、超音波風向風速計を神社境内に 1 台、ビル屋上に１台設置し、測定を行う。ビデオカメラを用いて、九段坂上交差点を通過する自動車の撮影を行う。

①乾球温度、湿球温度の測定

自動車排熱により加熱されると考えられる南北歩道上の 3 点と神社内の樹木の蒸散により冷却されると考えられる神社境内の 2 点で、アスマン通風乾湿計を用いて乾球温度及び湿球温度の測定を行い、絶対湿度(水蒸気分圧)を算出し、自動車排熱と樹木の蒸散が各測定点に及ぼす影響を検証する。

②風向、風速の測定

自動車交通及び神社内の樹木からの蒸散により発生する水蒸気は、風向風速の影響を大きく受け移動すると考えられる。ビル屋上で測定した風速をべき乗則により道路空間の風速として扱い、道路と神社の風向風速が、各測定点の気温及び絶対湿度(水蒸気分圧)に与える影響を検証する。

道路と神社の風向風速を測定することにより、測定範囲の空気の流れを検証する。

③交通量の測定

交差点を通過する自動車の台数を測定し、自動車排熱量(顕熱及び潜熱)を算出し、風向風速を考慮して自動車排熱の影響を検証する。

2.1.2　実測条件

日時

８月１日　　14:25～19:00 (曇り)

場所

靖国神社境内、九段坂上交差点周辺歩道

ビル屋上　(図 2.1 の円内部)

器具

アスマン通風乾湿計　５台

超音波風向風速計　２台

PC　２台

延長コード　２本

ビデオカメラ　１台

三脚　７台

図 2.1

2.1.3　実測内容

①乾球温度、湿球温度の測定

アスマン通風乾湿計を図 2.2 に示す南側歩道 A 点、北側歩道 B 点及び C 点、道路から 30m 離れた神社内の D 点、さらに 25m 奥の E 点の計 5 点に地面からの高さ 1500mm として三脚に吊るし、14:25～19:00 まで乾球温度、湿球温度の測定を行った。5 分毎に温度を記録し、記録後に毎回給水を行った。南側歩道 A 点、北側歩道 B 点及び C 点については、車道から 500mm 離れた歩道に設置した。

②風向、風速の測定

図 2.2 に示すビル屋上と神社境内に超音波風向風速計を設置し、14:25～19:00 まで U(東西)、V(南北)、W(鉛直)の 3 方向の風速の測定を行った。ビル屋上の風速計は地面からの高さ 35m、神社境内の風速計の高さは 1500mm とした。どちらの風速計もシリアルデータの出力速度は 4Hz とした。

③交通量の測定

交通量の測定を行うために、図 2.2 に示す位置からビデオカメラを用いて交差点内を通過する自動車を 14:25～19:00 まで撮影した。

表 2.1 実測項目

日時			天気	
2011年8月1日　14:30～19:00			曇り	
測定項目	測定器	測定点高さ	測定間隔	測定点数
乾湿球温度	アスマン通風乾湿計	A～E:1500mm	5分	5
風速	超音波風向風速計	W_1:35m,W_2:1500mm	0.25秒	2
交通量	ビデオカメラ	－	－	1

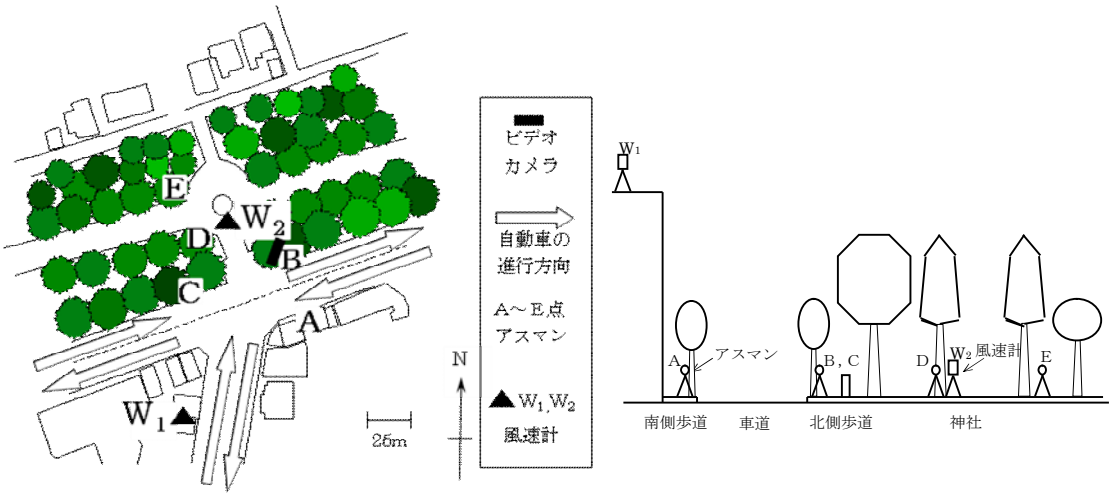


図 2.2 測定点図面

2.1.4　使用器具

実測に使用した測定器具の写真を図 2.3、2.4 に、それぞれの仕様を表 2.2、2.3 に示す。

①アスマン通風乾湿計(株式会社　安藤計器製工所)

図 2.3　アスマン通風乾湿計写真

表 2.2　アスマン通風乾湿計仕様

温度範囲	-20～50℃
精度	±0.5℃
大きさ･重量	W70×H255×D105mm/1.2kg(本体)

②３成分超音波風速計(CYG-81000　ＲＭヤング社製)

図 2.4　３成分超音波風速計写真

表 2.3　３成分超音波風速計仕様

測定項目	風速	風向	温度
測定範囲	0－40m/s　（精度保証範囲）	水平　0－359．9° 鉛直　±60°	－50～＋50℃
精　　度	±1%rms　±0.05m/s (0～30m/s) ±3%rms　(30～40m/s)	±2°（1～30m/s） ±5°（30～40m/s）	±2℃(0～30 m/s)
分 解 能	0．01m/s	0．1°	0．01°
起動風速	0．01m/s		
サンプル体積	10cmφ＊10cmH		
超音波周波数	245.7KHz		
内部サンプルレート	160Hz		
センサーパス	15cm		
出力レート	4～32Hz		
動作環境	-50～+50℃		
大きさ･重量	568mmH＊321mmφ 1．7kg (CYG-81000)		

2.1.5　測定点について

アスマン通風乾湿計を設置した測定点Ａ～Ｅ点の写真を図 2.5 に、３成分超音波風速計を設置した測定点W_1, W_2の写真を図 2.6 に示す。

Ａ点

Ｂ点

Ｃ点

Ｄ点

Ｅ点

図 2.5 測定点写真（Ａ～Ｅ）

W1点　　W2点

図 2.6 測定点写真(W_1, W_2)

Ａ点、Ｂ点、Ｃ点は靖国通り沿いの歩道に位置しており、Ａ点は南側歩道、Ｂ点及びＣ点は北側歩道の測定点である。これら３点は以下のような予測に基づき設定した。自動車から排出される熱は、風によって運ばれ、周辺に影響を与えると考えられる。そこで車道を挟んだ南北の２点を設けることによって、２点間で発生する自動車排熱と風の関係を明らかにできると考えた。北側歩道にＢ点とＣ点の２点を設けた理由は、道路に対して平行(以下東西方向とする)な２点の値が近くなれば、Ａ点とＢ点の２点間だけではなく、東西方向の広い範囲(ＢＣ間)においては、南北方向でＡＢ間と同様の現象が起こっていると考えることができる。Ｂ点とＣ点については、靖国神社内の植物の蒸散の影響を受けると考えられる。

Ｄ点、Ｅ点は靖国神社内の測定点である。どちらの点も神社内の植物の蒸散の影響を受けると考えられる。Ｅ点よりもＤ点の方が靖国通りに近いので、気温は高くなると予想できる。各点の自動車排熱と緑地の蒸散の影響の予想を表 2.4 に示す。

W_1、W_2は、それぞれビル屋上と神社境内の点である。W_1点の風速を道路の風速として扱う。

表 2.4 自動車と緑地の影響の有無

測定点	A	B	C	D	E
自動車	有	有	有	有	無
緑地	無	有	有	有	有

2.2　各値の算出式

2.2.1 水蒸気分圧の算出式

室内温熱環境測定基準・同解説(日本建築学会)にて、推奨されている式を用いて水蒸気分圧及び飽和水蒸気圧を算出する。水蒸気分圧は SPRUNG の式を用いて求め、飽和水蒸気圧は SONNTAG の式を用いて求める。水蒸気分圧、飽和水蒸気圧の算出式を以下に示す。

水蒸気分圧(SPRUNG の式)

$$e = e_{sw} - A \cdot p(t - t_f)$$

e：水蒸気分圧$[hPa]$
e_{sw}: 湿球温度における飽和水蒸気圧$[hPa]$
A：乾湿計係数$[K^{-1}]$(= 0.000662)
p：大気圧$[hPa]$(= 1013.25)
t：乾球温度[℃]
t_f: 湿球温度[℃]

飽和水蒸気圧(SONNTAG の式)

$$\ln(e_w) = -6096.9385T^{-1} + 21.2409642 - 2.711193 \times 10^{-2}T + 1.673952 \times 10^{-5}T^2 + 2.433502\ln(T)$$

e_w: 飽和水蒸気圧$[hPa]$
T：絶対温度$[K]$

2.2.2　絶対湿度の算出式

①乾燥空気の密度

実際の大気は水蒸気を含んでいるが、ここで扱う標準大気は種々の気体から成る乾燥空気である。標準大気は理想気体であるとすると、次の状態式(2.1.1)が成り立つ。

$$p_a v = RT \qquad (2.1.1)$$

p_a は乾燥空気の圧力[hPa]、v は比体積[m^3/kg]、Rは普遍気体定数＝8314.32J/(kmol･K)、Tは温度[K]である。

乾燥空気の密度を ρ_a、モル質量を M_a とすると、$v = M_a/\rho_a$ であるので、p_a は式(2.1.1)より式(2.1.2)で表される。

$$p_a = \frac{\rho_a}{M_a}RT \qquad (2.1.2)$$

乾燥空気の気体定数をR_aとすると、R_a＝R/M_aであるので、式(2.1.2)は式(2.1.3)となる。

$$p_a = \rho_a R_a T \qquad (2.1.3)$$

ここで、標準気圧 P_0＝1013.15hPa、平均海面における気温の標準値は 288.15K(=15.0℃)、密度の標準値は 1.225 kg/m^3 とする。これらの値及び普遍気体定数Ｒを式(2.1.2)に入れると、乾燥空気のモル質量 M_a は 28.96442kg/kmol となる。また、乾燥空気の気体定数R_aは、R/M_aより 287.05287J/(kg･K)である。

乾燥空気の密度をρ_aは式(2.1.3)より式(2.1.4)となる。

$$\rho_a = \frac{P_a}{R_a T} \qquad (2.1.4)$$

この式(2.1.4)から標準気圧で、0℃における乾燥空気の密度$\rho_{a,0}$を求めると、$\rho_{a,0}$＝1.2923kg/m^{3}になる。標準気圧 P_0、T_0（＝273.15K)、$\rho_{a,0}$より、乾燥空気の気体定数R_a＝P_0/($\rho_{a,0}$･T_0)である。よって、気温 t℃、圧力 p_aのときの乾燥空気の密度ρ_aは次の式(2.1.5)で与えられる。

$$\rho_a = \frac{\rho_{a,0}}{T/T_0}\frac{P_a}{P_0} = \frac{1.2923}{1+0.00366t}\cdot\frac{P_a}{P_0} \quad [kg/m^3] \qquad (2.1.5)$$

②水蒸気の密度

空気の全圧（気圧)が P であり、その中の水蒸気の分圧を e とする。水蒸気を含む空気は、圧力が大きくなければ（数気圧以下)、近似的に理想気体の混合物とみることができる。乾燥空気の分圧 p_aは P－e であるので、乾燥空気の状態式は式(2.2.1)となる。

$$P - e = \rho_a R_a T \qquad (2.2.1)$$

一方、水蒸気の状態式は式(2.2.2)となる

$$ev = RT \qquad (2.2.2)$$

水蒸気のモル質量を M_v、密度をρ_vとすると、比体積 v＝M_v/ρ_vであるので、水蒸気の密度ρ_vは式(2.2.3)となる。

$$\rho_v = \frac{eM_v}{RT} \qquad (2.2.3)$$

水蒸気のモル質量は 18.01528kg/kmol であり、乾燥空気とのモル質量比 M_v/M_aは 0.62198≒0.622 である。R＝M_aR_aであるので、式(2.2.3)にそれぞれ代入すると式(2.2.4)となる。

$$\rho_v = \frac{0.622e}{R_a T} \qquad (2.2.4)$$

乾燥空気の気体定数 $R_a = P_0/(\rho_{a,0} \cdot T_0)$である。よって、温度 t[℃]、水蒸気分圧 e のときの水蒸気の密度 ρ_vは、次の式(2.2.5)で与えられる。

$$\rho_v = \frac{\rho_{a,0}}{T/T_0} \cdot \frac{0.622e}{P_0}$$

$$= \frac{1.2923 \times 1000}{1 + 0.00366t} \cdot \frac{0.622e}{P_0}$$

$$= \frac{804}{1 + 0.00366t} \cdot \frac{e}{P_0} \quad [g/m^3] \qquad (2.2.5)$$

③絶対湿度

絶対湿度とは、空気の単位体積中にある水蒸気の質量である。空気の体積を V、水蒸気の質量を m_vとすると、絶対湿度 d_vを式(2.3.1)で表すことができる。

$$d_v = \frac{m_v}{V} \qquad (2.3.1)$$

これは水蒸気の密度にほかならない。単位は kg/m³、または g/m³ を用いる。式(2.2.5)の水蒸気の密度 ρ_vを d_vに置き換えると、絶対湿度 d_v [g/m³]は式(2.3.2)となる。

$$d_v = \frac{804}{1 + 0.00366t} \cdot \frac{e}{P_0} \quad [g/m^3] \qquad (2.3.2)$$

2.2.3　風速の算出式

W_1点の風速を道路の高さ 1.5m における風速として扱うために、以下のべき乗則を用いる。 z は高度[m]、α はべき指数で高度による風速の変化率を表している。本研究においては、地表面粗度を考慮して、α=0.29 として算出を行った。

$$U_z = U_{10} \times \left(\frac{z}{10}\right)^{\alpha}$$

2.3　実測結果

2.3.1　各測定点の温湿度について

図 2.2 の A～E 点の気温と絶対湿度を図 2.7、図 2.8 にそれぞれ示す。図 2.9 に実測を行った 2011 年 8 月 1 日 14:30～19:00 の気象庁(東京)の 10 分毎の気温、絶対湿度データを示す。絶対湿度については、式(2.3.2)を用いて算出した。

図 2.7 より、南側歩道 A 点の気温が最も高く、神社内奥の E 点の気温が最も低いことがわかる。道路沿いの測定点 A、B、C 点の気温は、神社内の測定点 D、E 点と比べると高い値を示していることから、道路沿いの 3 点は自動車排熱により加熱され、神社内の 2 点は樹木の蒸散により冷却されているため、この差が生じている可能性がある。図 2.8 より、A 点の絶対湿度が最も低くなっている。ここで仮に、道路沿いの 3 点、A、B、C 点が自動車排熱のみの影響を受けているとすると、A 点の気温が最も高いことから A 点が最も加熱されていることになるので、自動車から排出される水蒸気も多くなり絶対湿度も B、C 点に比べると高くなるはずである。しかし、実際はそのようになっておらず、A 点の絶対湿度が最も低くなっている。よって、風等の影響によりこのような現象が起こったと考えられる。風速と気温、絶対湿度の関係については 2.3.2 にて考察する。

表 2.5 に 14:30～19:00 までの各点の気温と絶対湿度の平均を示す。表 2.5 より、以下のことが言える。

・気温は南側歩道Ａ点から神社方向へ遠ざかるにつれて低下していく。

・ともに北側歩道にあるＢ点とＣ点の気温は近い値となっている。

・ともに神社内にあるＤ点とＥ点くらべると、E 点の気温が低く、絶対湿度が高くなっているので、蒸散の影響が考えられる。

・B 点、C 点の絶対湿度は神社内の測定点 D 点、E 点よりも高い。

以上、図 2.7、図 2.8、表 2.5 より得た情報をまとめると、A 点は自動車と樹木の蒸散のどちらの影響も受けておらず、B 点及び C 点は自動車と樹木の蒸散のどちらからも影響を受けており、D 点、E 点は樹木の蒸散のみの影響を受けていると考えることができる。

表 2.5　各点の気温と絶対湿度の平均値

	A	B	C	D	E
気温[℃] 14:30-19:00	28.0	27.2	27.2	26.7	26.3
絶対湿度[g/m^3]14:30-19:00	16.1	16.8	17.2	16.3	16.7

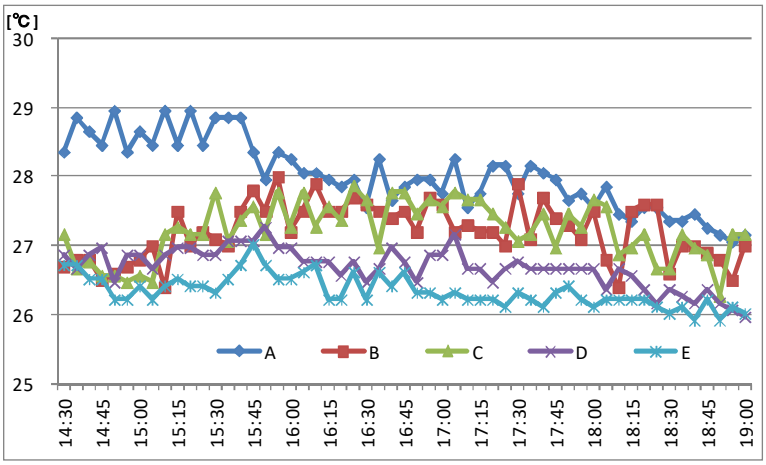


図 2.7　各点の気温

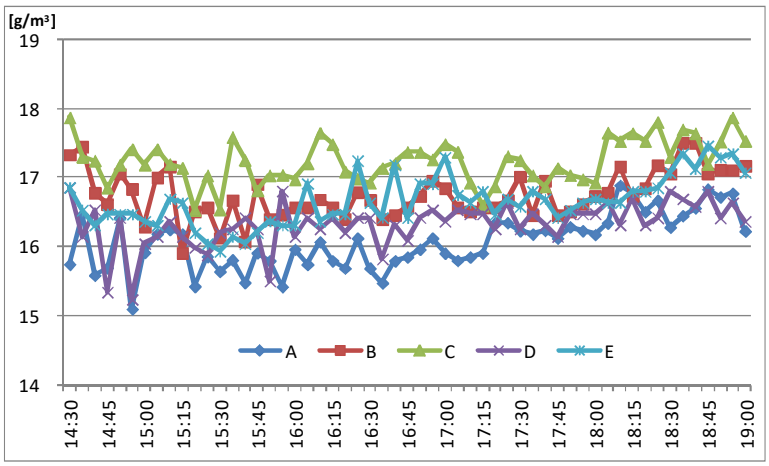


図 2.8　各点の絶対湿度

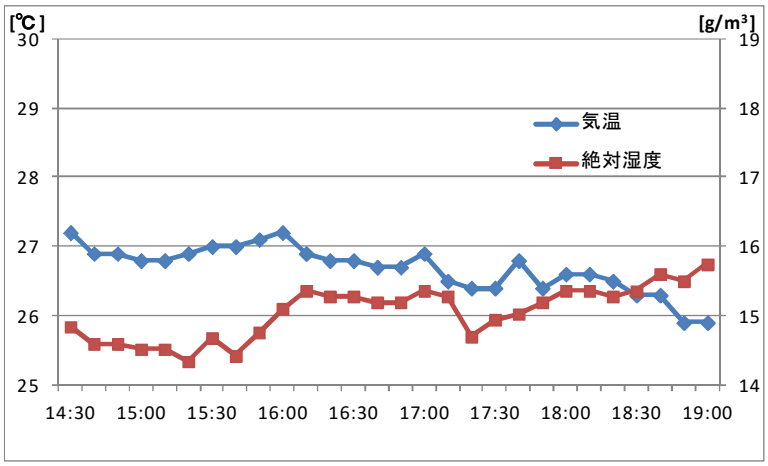


図 2.9　気象庁(東京)

2.3.2　道路及び神社の風向風速について

①道路

W_1の測定値をべき乗則により、靖国神社から道路を隔てた点の高さ 1.5m での風速とした。道路に対して垂直方向(南側歩道 A 点から北側歩道 B 点へ)の風速をＹ、道路に対して平行な方向の風速をＸとして図 2.10 に示す。全ての時刻においてＹは正の値を示しているので、測定期間中、風は南側歩道 A 点から北側歩道 B 点へ吹いている。道路の X 方向の風速は 19:00 に最大値 0.3m/s を示したが、ほぼ－0.2～0.2m/s の範囲内であり、Y 方向の風が支配しているといえる。

表 2.6 16:00 前後の平均値

	A	B	C	D	E
気温[℃] 14:30-16:00	28.6	27.1	27.1	26.9	26.5
気温[℃] 16:00-19:00	27.7	27.3	27.3	26.6	26.3
絶対湿度[g/m3]14:30-16:00	15.8	16.7	17.1	16.1	16.4
絶対湿度[g/m3]16:00-19:00	16.2	16.8	17.3	16.4	16.8

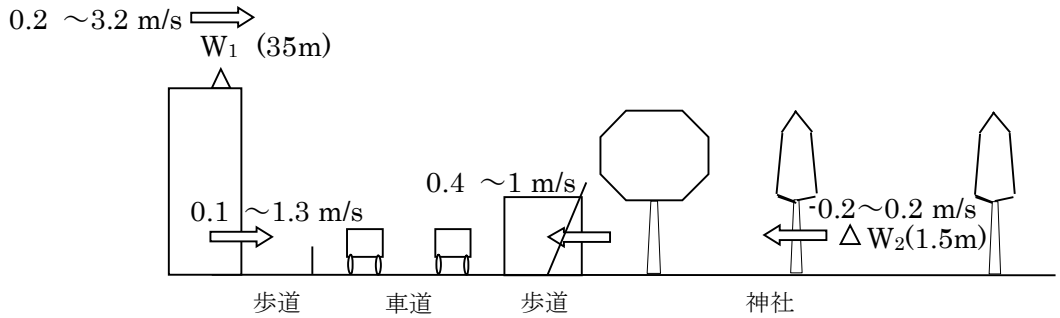
図 2.10 より、16:00 前後の Y 方向の平均風速はそれぞれ、0.42m/s、0.87m/s である。表 2.6 より、道路における Y 方向の風速の増加によって風上 A 点と風下 B 点の気温・絶対湿度差は減少することがわかる。A 点と B 点の絶対湿度の差が生じた原因は、自動車から発生した水蒸気によるものだと考えた。第３章にて、交通量より水蒸気発生量を算出し、モデルを用いて絶対湿度上昇量の算出を行う。

②神社

神社内の風速を図 2.11 に示す。神社内では、Y 方向の風速がほぼ－0.2～0.2m/s の範囲内となっており、道路のＹ方向の風速と比較すると、Y 方向の風速が減少(神社から道路方向への風速が増加)しているといえる。このことから、樹木の蒸散による冷気が道路方向に移動していると考えられる。

③歩道部分の収支について

図 2.12 に道路及び神社内の風配図を示す。道路においては南～南東方向の風が主であり、最多風向は南南東である。この風向きは、靖国通りに対してほぼ垂直である。神社においては東～北東方向の風が主であり、最多風向は東である。靖国神社から道路を隔てた点の高さ 1.5m での風速と比較して、図 2.12 で示すように神社内の風速 W_2が弱いこと、W_1は気象台(科学技術館)での風速データに類似していることから、歩道付近で道路側の流れと神社側からの冷気の流出が押し合っていると考えた。



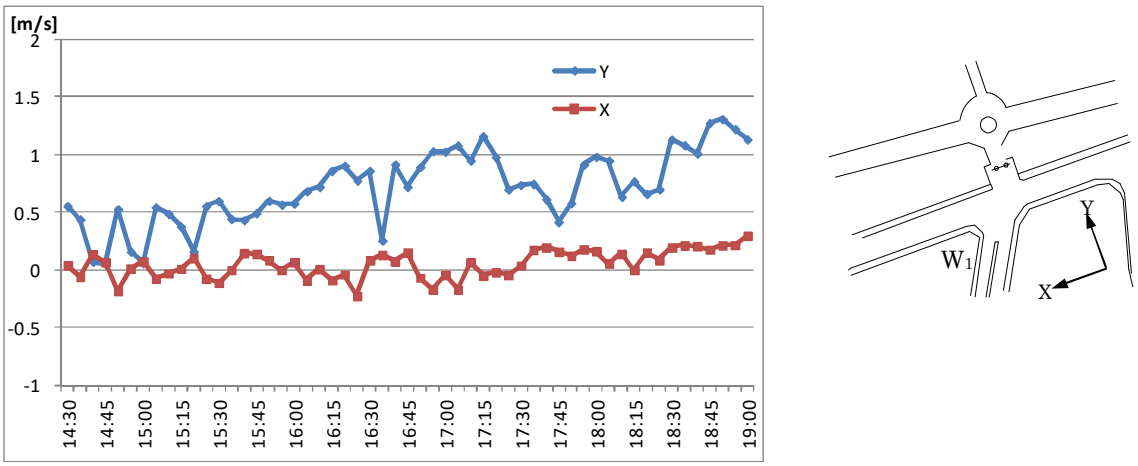


図 2.10　道路の風速(W_1)

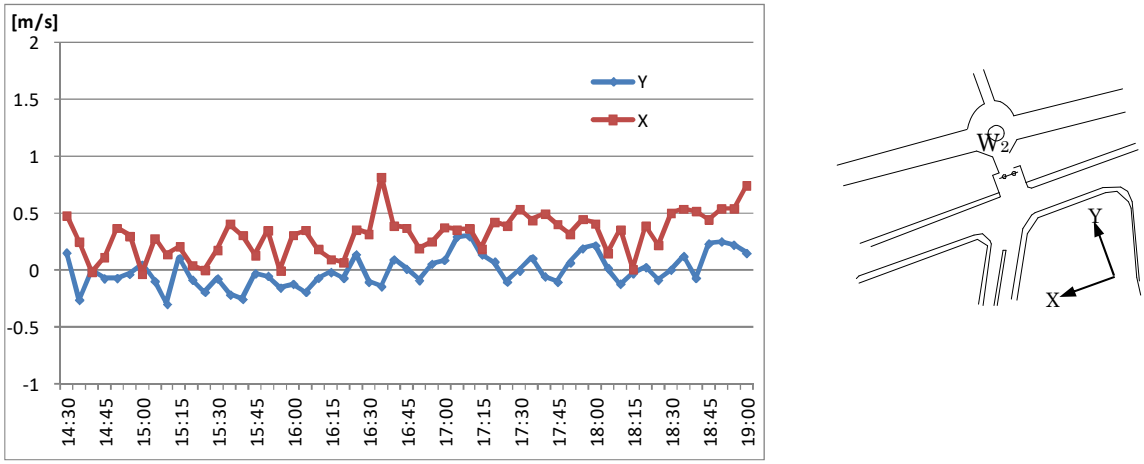


図 2.11　神社内の風速(W_2)

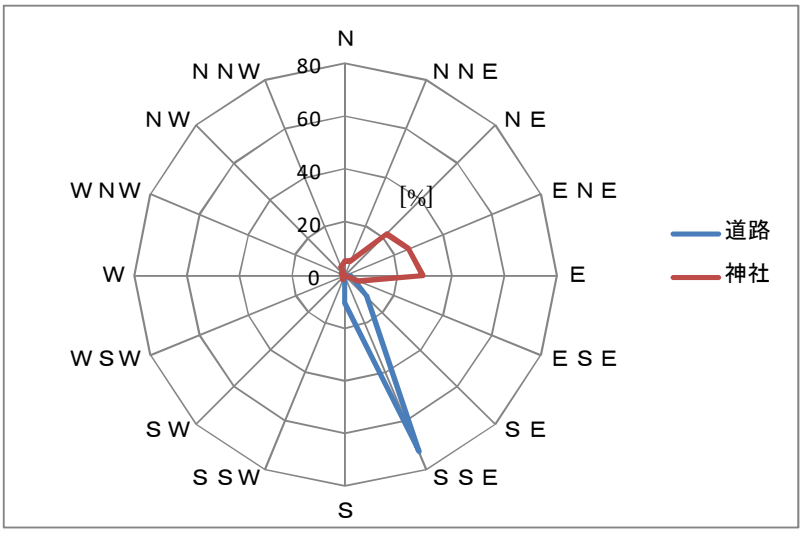


図 2.12　風配図

2.3.3　各測定点の気温差及び絶対湿度差

道路においては、風は南側歩道Ａ点から北側歩道Ｂ点に向かって吹いているので、Ａ点は自動車の排熱の影響を受けていないと考えることができる。そこで、Ａ点の気温と絶対湿度を基準として、Ｂ点～Ｅ点とＡ点の差を求めたものを図 2.13～図 2.16 に示す。

図 2.13 より、Ｂ点の絶対湿度はＡ点よりも高く、Ｂ点の気温はＡ点よりも低くなっており、Ｂ点とＡ点の差は、全天日射量の減少とともに小さくなっていくという傾向を示している。Ｃ点とＡ点の差もＢ点とＡ点の差と同様の傾向を示している。図 2.13 に気象庁(東京)の全天日射量のデータを加えたものを図 2.17 に示す。

図 2.15 及び図 2.16 より、神社内のＤ点とＥ点は南側歩道Ａ点よりも 1℃以上気温が低くなっている。Ａ点とＥ点においては、最大で約 3℃の気温差が生じている。この要因として、道路沿いのＡ点は自動車によって加熱され、神社内のＥ点は植物の蒸散によって冷却されていると考えることができる。図 2.13～図 2.16 の全てにおいて、全天日射量の減少とともに気温差がさくなっていくという傾向を示していることから、神社内のＤ点、Ｅ点だけでなく、北側歩道Ｂ点及びＣ点も植物の蒸散による冷却の影響を受けていると言える。

Ｂ点を基準としたときの気温と絶対湿度の差を図 2.18～図 2.20 に、Ｃ点を基準としたときの気温と絶対湿度の差を図 2.21、図 2.22 に、Ｄ点を基準としたときの気温と絶対湿度の差を図 2.23 に示す。

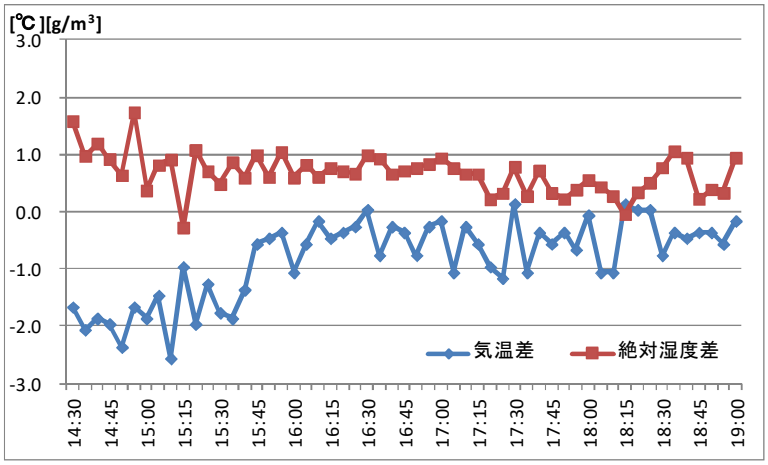


図 2.13　B－A

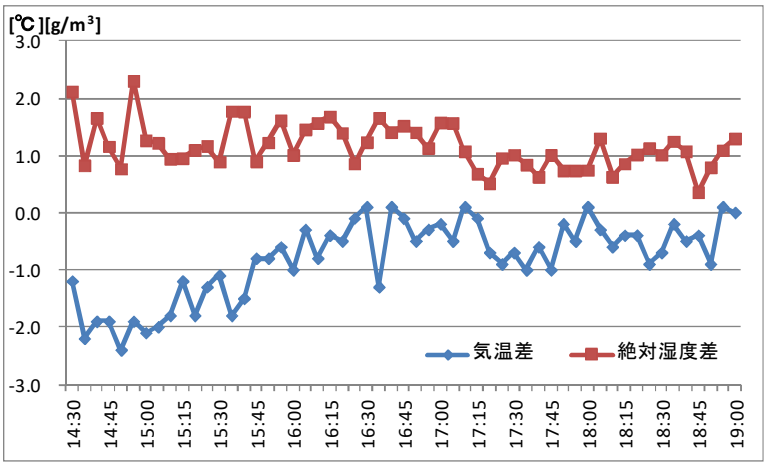


図 2.14　C－A

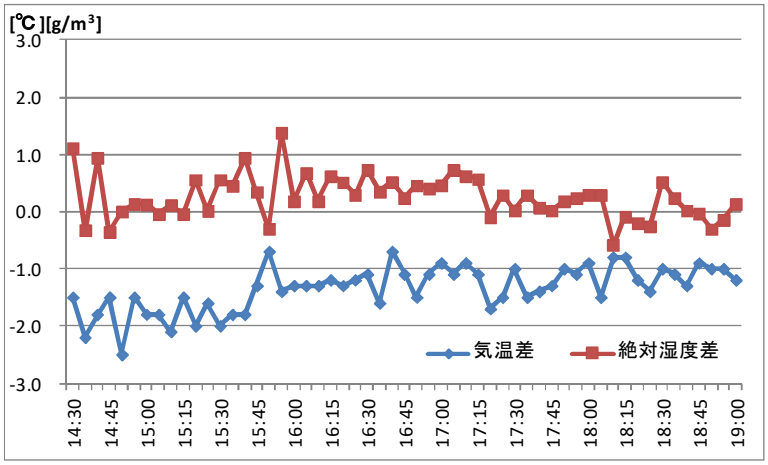


図 2.15　D－A

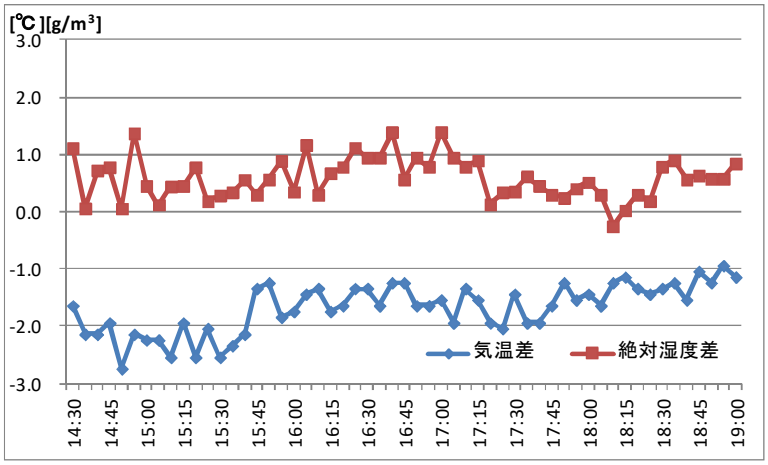


図 2.16　E－A

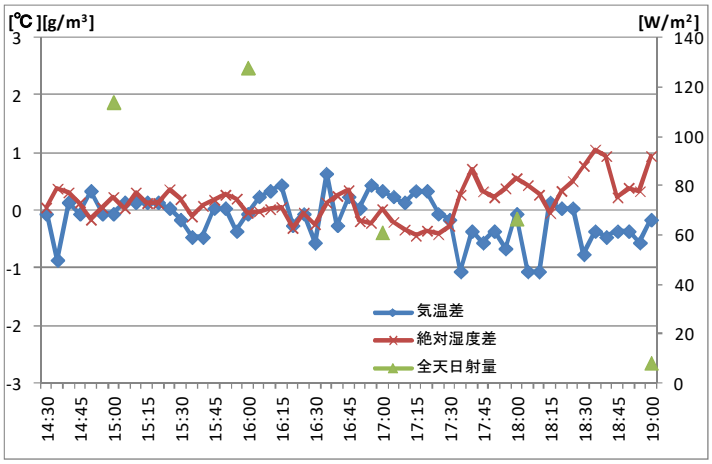


図 2.17　B－Aと全天日射量

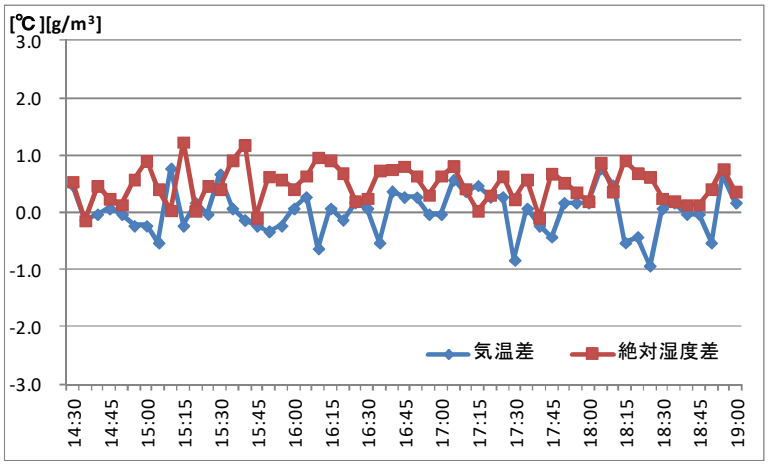


図 2.18　C－B

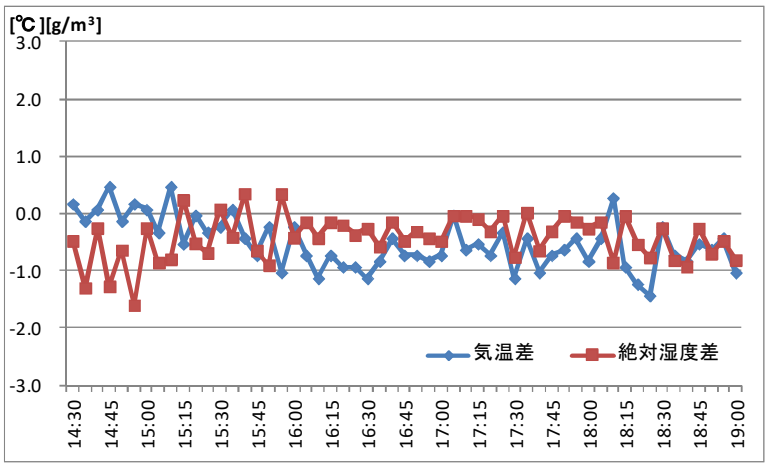


図 2.19　D－B

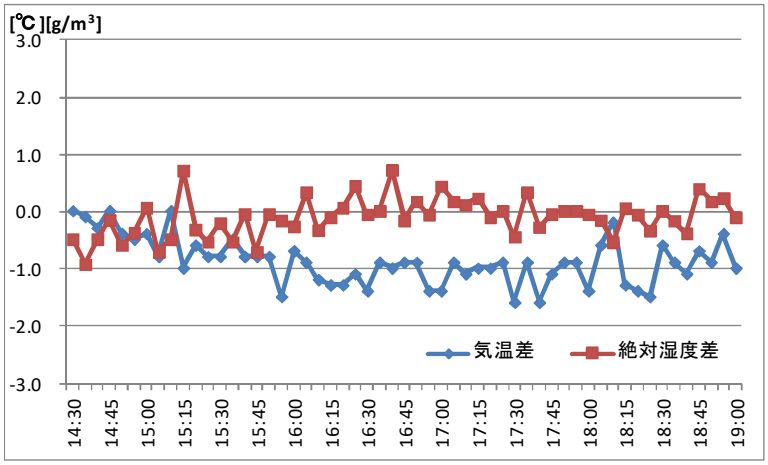


図 2.20　E－B

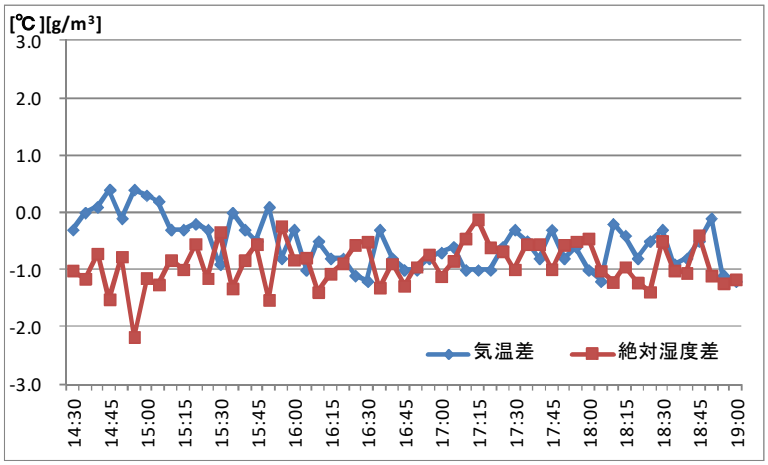


図 2.21　D－C

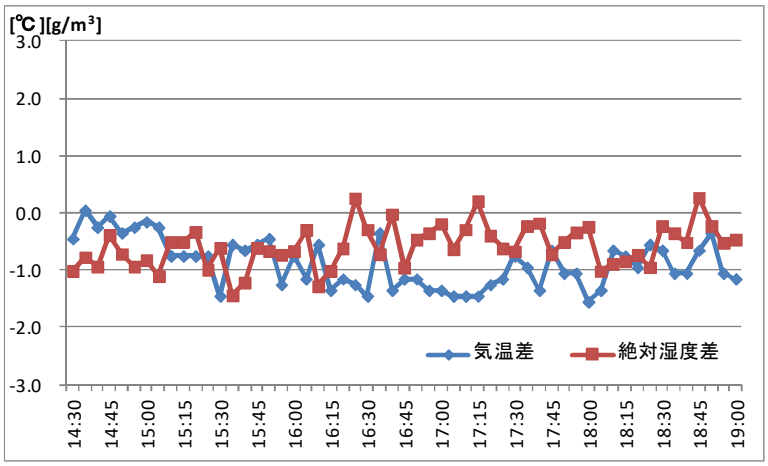


図 2.22　E－C

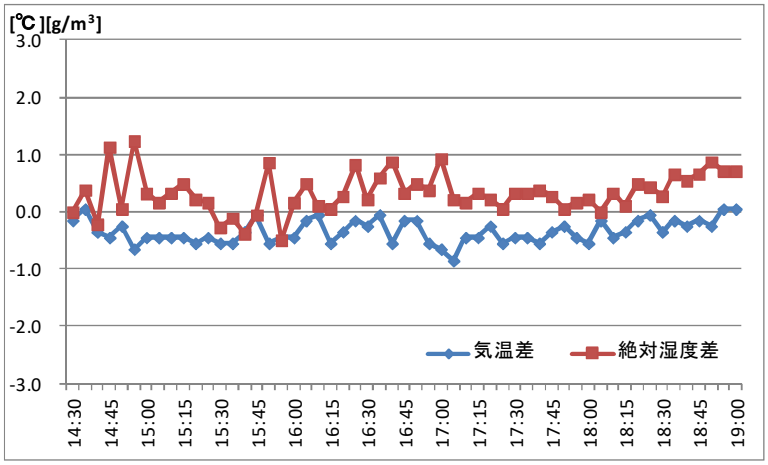


図 2.23　E－D

2.3.4　交通量

図 2.24 に示す①～⑥の車線を通り、5 分間に交差点を通過した自動車の台数を図 2.25 に示す。（14:30 の値は 14:25～14:30 に交差点を通過した自動車の台数）

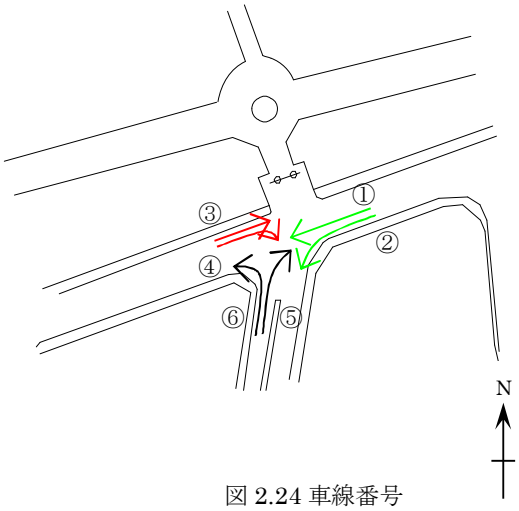


図 2.24 車線番号

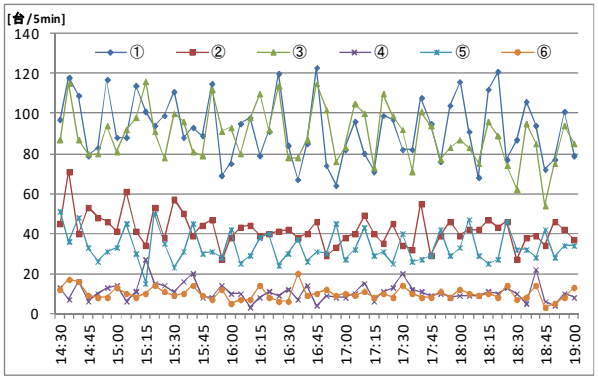


図 2.25 自動車の台数①～⑥(台/5min)

図 2.25 の値は、以下の表 2.7 の車種別・速度別エネルギー係数 [5]より、乗用車の消費エネルギー係数を基準にして、他車種との消費エネルギー係数の比から、他車種を乗用車の台数に換算して測定した。乗用車を基準としたときの消費エネルギー係数比を表 2.8 に示す。バス 1 台で乗用車 3 台、普通貨物車 1 台で乗用車 5 台、バイク 3 台で乗用車 1 台として測定を行った。

表 2.7　車種別・速度別消費エネルギー係数

単位：kcal/(km・台)

速度km/h	乗用車		バス		小型貨物		普通貨物	
	9-20時	21-8時	9-20時	21-8時	9-20時	21-8時	9-20時	21-8時
10	1,568	1,452	4,276	3,963	1,362	1,262	5,667	5,252
20	1,044	968	3,283	3,042	1,084	1,005	4,769	4,420
30	835	774	2,768	2,566	915	849	4,055	3,759
40	720	666	2,441	2,262	800	742	3,518	3,261
50	652	603	2,242	2,078	726	673	3,159	2,927
60	617	572	2,151	1,994	690	639	2,975	2,757
70	610	566	2,161	2,003	689	638	2,967	2,749

表 2.8　消費エネルギー係数

車種	乗用車を基準としたときの消費エネルギー係数比
バス	3
小型貨物	1
普通貨物	5
バイク	1/3

参考文献

5)国土交通省・環境省　平成 15 年度都市における人工排熱抑制によるヒートアイランド対策調査報告書 2004.3

第３章　モデルを用いた絶対湿度及び気温変化量について（夏季）

第３章　モデルを用いた絶対湿度及び気温変化量について(夏季)

3.1　水蒸気発生源

九段坂上交差点の周辺において水蒸気発生源として考えられるものを以下①～④に示す。それぞれから発生する単位時間・単位面積あたりの水蒸気量の概算を行い、周囲へ及ぼす影響を比較する。

①自動車

②植物

③人間

④その他(地面、水面)

3.1.1　自動車

1)ガソリンの燃焼式からの算出

表 3.1 に示すガソリンの燃焼式より、ガソリン燃焼時に発生する水蒸気量を推定することができる。$C_8H_{15.5}$ 1kg が燃焼したときに、発生する H_2O の質量は 1.25kg である。蒸発潜熱を 585kcal/kg(20℃)とすると、732kcal の潜熱が発生する。これは燃焼熱の 7%にあたり、最大値である。

ガソリンの燃焼式より、水蒸気はガソリンの質量の 1.25 倍発生することがわかる。自動車の燃費を仮定し、自動車 1 台から発生する水蒸気量を算出する。燃費を 10km/L とすると、自動車 1 台が 1km 走ったときに消費する燃料は 0.1L/km となる。このとき発生する水蒸気量は、ガソリンの比重を 0.75 として計算すると 94g/km(=0.094g/m)となる。

自動車の速度を 20km/h(=5.6m/s)とすると、1 秒間に 5.6m 進むので、自動車 1 台あたり単位時間に 0.094×5.6=0.52g/台･s の水蒸気を排出する。この値の道路長さ 1m あたりでは 0.52÷5.6=0.094g/台･m･s の水蒸気を排出する。この方法によって算出した水蒸気発生量は、速度に関係なく燃費に依存する。

九段坂上交差点を通過した自動車の台数の平均値は時間帯によらず 280 台/5min である。よって、靖国通りの長さ 1m で単位時間あたり 0.088g/m･s の水蒸気を排出する。

$C_nH_m + (n+m/4)O_2 \rightarrow nCO_2 + m/2H_2O + H_u$

H_u：燃焼熱(10430kcal/kg) , n=8, m=15.5

表 3.1 ガソリンの燃焼式

燃焼式	$C_8H_{15.5}$	$+11.875O_2$	→	$8CO_2$	$+ 7.75H_2O$	$+ H_u$
分子量	111.5	32		44	18	燃焼熱[kcal/kg]
物質量	1	11.875		8	7.75	10430
質量[g]	111.5	380		352	139.5	蒸発潜熱(20℃)
質量比	1.00	3.41		3.16	1.25	[kcal/kg] 585

2)自動車排熱量からの算出

表 2.7 の車種別・速度別エネルギー係数より、自動車排熱量の算出を行う。東京 23 区内の道路における混雑時の平均旅行速度※は18.8km/h[6]であることから、表2.7の速度20km/h、乗用車 9－20 時の値を使用する。AB 間を通過した自動車の台数を図 3.2 に示す。AB 間を通過した自動車の台数とは、図 2.24 の車線番号①,②,③,⑤を通った自動車の台数の合計であり、図 2.23 の①,②,③,⑤を合計した値である。

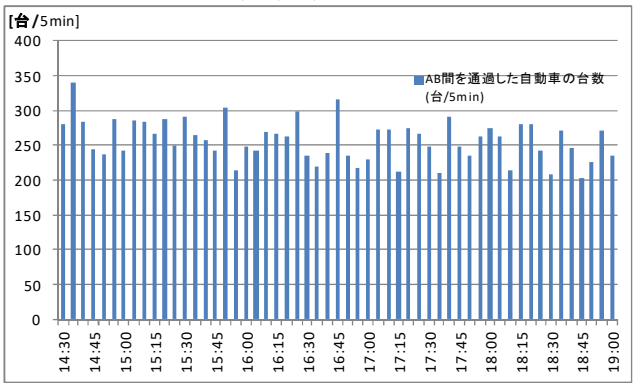


図 3.2　AB 間を通過した自動車の台数

表 2.7 の車種別・速度別消費エネルギー係数は高位発熱量を基準としている。

高位発熱量とは、燃焼ガス中の生成水蒸気が凝縮したときに得られる凝縮潜熱を含めた発熱量のことであり，凝縮潜熱を含まない発熱量は低位発熱量という。日本エネルギー経済研究所 [7]によると、ガソリン燃焼時における（低位発熱量）／（高位発熱量）の比は 0.955 なので、水蒸気の凝縮潜熱は高位発熱量の 4.5%になる。以上より、自動車排熱量(顕熱及び潜熱)を次式によりそれぞれ求めることができる。求めた値を図 3.3 に示す。この潜熱の平均値 170J/m･s を蒸発潜熱 2345J/g で除すると、0.072 g/m･s となる。ガソリンの燃焼式から求めた値と大差はないため、モデルにおいてはこの値を使用する。

自動車排熱量 Q_S（顕熱）　[J/(m･s)]

＝ 自動車排熱係数[kcal/(km・台)]×通過台数[台/5min]×0.955×4.2÷300[s]

自動車排熱量 Q_L（潜熱）　[J/(m･s)]

＝ 自動車排熱係数[kcal/(km・台)]×通過台数[台/5min]×0.045×4.2÷300[s]

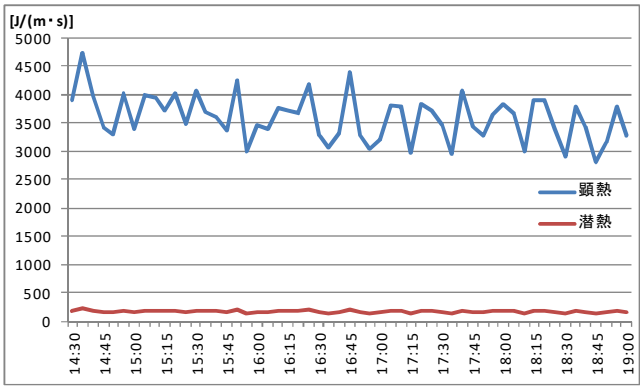


図 3.3　AB 間を通過した自動車の排熱

3.1.2　人間

表 3.2 より、室温 26℃、4.8km/h(=1.3m/s)で歩いている人間 1 人あたりから単位時間に 281g/人･h(=0.078g/人･s)の水蒸気が発生する。この値の歩道長さ 1m では 0.078÷1.3=0.059 g/人･m･s の水蒸気が発生する。この値を用いて、九段坂上交差点周辺の歩行者の人数から、水蒸気発生量を算出する。

図 3.4 に示す九段坂上交差点を撮影した映像より、南側歩道 A 点及び北側歩道 B 点の脇を通過した歩行者の人数をそれぞれ測定した。5 分間に通過した歩行者の人数の最大値を以下に示す。南側と北側を比較すると、南側歩道の歩行者が多く最大値は 100 人/5min である。それぞれの最大値の合計 140 人/5min(=0.47 人/s)である。このとき靖国通りの長さ 1m で単位時間あたり 0.028g/m･s の水蒸気が発生する。

南側歩道 A：歩行者　多(最大値 100 人/5min)
北側歩道 B：歩行者　少(最大値 40 人/5min)

表 3.2　人体からの水蒸気発生量

種別	項目	発生量			
人体	室温	20℃	24℃	26℃	
	椅座・安静	31	46	66	g/h
	事務作業	59	60	104	g/h
	歩行 4.8km/h	192	238	281	g/h
	重作業	310	353	385	g/h
	就寝中	45～	55～	67	g/h

（出典:「建築技術」1990 年 8 月別冊）

図 3.4　九段坂上交差点

表 3.3 に自動車及び人間の水蒸気発生量を示す。1 台(人)から道路長さ 1m あたり単位時間に発生する水蒸気量で両者を比較すると、自動車は人間の約 1.5 倍の水蒸気を排出している。交通量と歩行者の人数の測定値を用いて算出を行った、靖国通りにおける道路長手方向長さ 1m で単位時間に発生する水蒸気量で比較すると、自動車は人間の約 3 倍の水蒸気を排出している。以上のことから、実測を行った九段坂上交差点周辺においては、人間から発生する水蒸気の量は自動車から排出される水蒸気の量の 1/3 以下であるため、測定値に影響を及ぼすことはないと考えた。

表 3.3　自動車、人間の水蒸気発生量

水蒸気発生源（速度）	1台(人)から道路長さ1mあたり単位時間に発生する水蒸気量 [g/台(人)･m･s]	通過量 [台(人)/s]	靖国通りにおける道路長手方向長さ1mで単位時間に発生する水蒸気量 [g/m･s]
自動車（20km/h）	0.094	0.93	0.088
人間（歩行4.8km/h）	0.059	0.47	0.028

3.1.3　緑地

緑地の面積と蒸散量より、靖国神社内から発生する水蒸気の量を概算する。

1)緑地の面積

1.1.2 で述べた通り、靖国神社の敷地面積は 93,356m²、樹木地の面積は 67,676 m² である。神社内の緑地面積比(樹木地の面積／敷地面積)は 0.72 となる。

2)蒸散量

緑化に関する調査報告 [8]より、8～10 月の晴れ及びくもりのときに、イチョウが 1 日に蒸散する量を以下の表 3.4 に示す。表 3.4 より、くもりのときの蒸散量は晴れのときの約 60%であることがわかる。表 3.4 では、胸高直径 39.1cm が最大となっているが、靖国神社内のイチョウ(14 本)の胸高直径を測定したところ約 80cm であった。胸高直径と一日当たりの蒸散量の両対数グラフを作成し、胸高直径 80 cm における蒸散量を推定する。図 3.5 より、８月曇りの胸高直径 80 cm における蒸散量は 426kg/本･day と推定できる。

胸高直径と樹冠面積についても両対数グラフを用いると、胸高直径 80 cm における樹冠面積は 66m² と推定できる。

８月曇りの胸高直径 80cm のイチョウの 1 日・単位面積当たりの蒸散量は

$$\frac{426[\mathrm{kg}/(\text{本}\cdot\mathrm{day})]}{66[m^2]}\times 1000 = 6452[g/(m^2\cdot\ \mathrm{day})]$$

となる。夜間は蒸散が起きていないものとして、蒸散が起きている時間帯は日の出から日没までと考えた。国立天文台 [9]より、2011 年８月の日の出から日の入りまでの時間の月平均は、13 時間 30 分(48600[s])である。

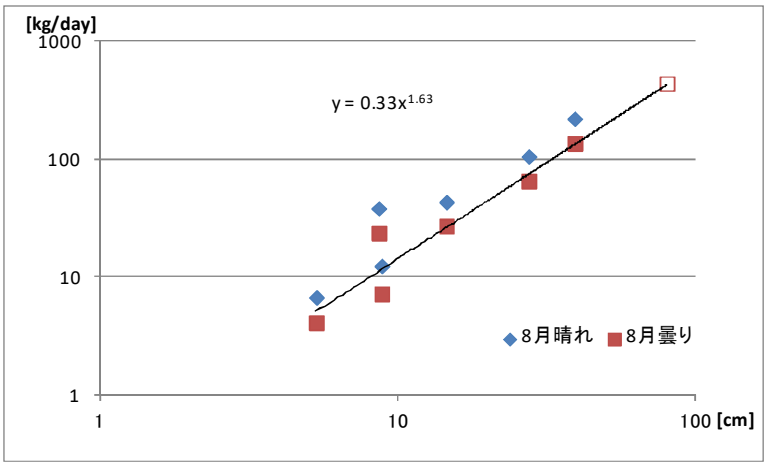
８月曇りの胸高直径 80cm のイチョウの単位時間・単位面積当たりの平均蒸散量は

$$\frac{6452[g/(m^2\cdot\ \mathrm{day})]}{48600[s]} = 0.133[g/(m^2\cdot\ \mathrm{s})]$$

となる。この値に神社内の緑地面積比 0.72 を乗じると、神社内における単位時間・単位面積あたりの平均蒸散量は 0.096 g/m²･s となる。

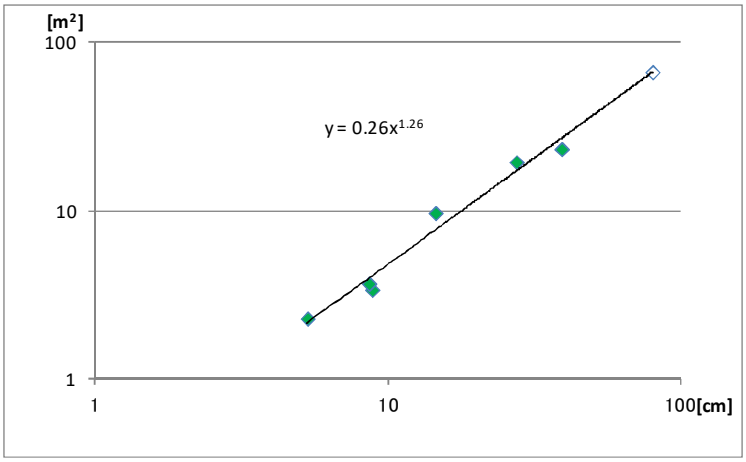
表 3.4　一日あたりのイチョウの蒸散量

調査区	胸高直径 (cm)	樹冠面積 (m^2)	晴れ(kg/本・day)			曇り(kg/本・day)		
			8月	9月	10月	8月	9月	10月
都庁前	39.1	23.2	220	187	63	136	110	34
若林	27.4	19.4	105	93	18	65	57	11
越中島	14.5	9.7	43	46	7	27	28	4
日比谷公園	8.8	3.4	12.4	14.5	1.3	7.2	8.6	0.8
等々力	8.6	3.7	38.1	41.5	6	23.6	25.7	3.7
越中島	5.3	2.3	6.7	4.3	0.3	4.1	2.6	0.2



胸高直径 [cm]	8月曇り [kg/本・day]
39.1	136
27.4	65
14.5	27
8.8	7.2
8.6	23.6
5.3	4.1
80	426

図 3.5　胸高直径－蒸散量(両対数グラフ)



胸高直径 [cm]	樹冠面積 [m^2]
39.1	23.2
27.4	19.4
14.5	9.7
8.8	3.4
8.6	3.7
5.3	2.3
80	66

図 3.6　胸高直径－樹冠面積(両対数グラフ)

3.1.4　その他(水面、地面)

その他、地面などからの蒸発量のオーダーを検討する。上限として、水面の蒸発量が考えられる。表 3.5 に示す気象庁地上気象観測統計値[10] 2001 年 8 月(東京)のデータより、水面からの一日の蒸発量は 2.8～4.8kg/m²･day(0.032～0.056g/m²･s)で、樹木による量を越えることは無い。

緑化に関する調査報告より、8 月中旬乾燥期における土壌深さ別の土壌含水量を表 3.6 に示す。表 3.6 より、深さ 20cm、10cm の含水量を 53.8%、46.9%とすると、深さ 0cm における土壌含水量は 40%であると考えることができる。よって、地面の表面の 40%が水であると考え、水面の蒸発量より、地面の蒸発量は 0.012～0.024g/m²･s と推定できる。地面の蒸発量は、樹木の蒸散量の 1/4 以下であるため、本研究においては地面からの蒸発量を除外した。

表 3.5　2001 年 8 月（東京）蒸発量等

観測日	蒸発量 当日翌日	天気概況		全天日射	日照時間	平均風速
						（風程）
	9h-9h mm	昼(06～18時)	夜(18～翌日06時)	MJ/㎡	h	m/s
8/2	2.8	曇	曇	10.7	—	4
3	3	曇 後 晴	晴 後 薄曇	15	5.1	2.5
4	4.8	曇	曇	14.4	4.7	3.2
5	3.5	曇	曇	6.4	0.1	3.5
10	3.1	曇 後一時 晴	曇	12.3	2.1	2.2
15	3.3	曇 後時々 晴	曇 一時 晴	13.6	2.1	3.1
16	4.8	曇 後 晴	曇 一時 晴	19.1	6	3
19	3.7	晴 後 曇	晴 後 薄曇	17.4	6.7	3.6
24	3.5	曇 一時 晴	曇	13.2	2.8	2.9
25	3.2	曇 後 晴	晴 後 曇	16.2	6.2	2.2

表 3.6　深さ別土壌含水量

土壌深さ cm	含水量　%
0～10	46.9
10～20	53.8

3.2　垂直方向の温湿度分布について

3.2.1　実測内容

目的

幹線道路沿いで熱環境測定を行い、垂直方向の温度及び湿度分布を知ることを目的とする。

実験項目

アスマン通風乾湿計を 2 台、おんどとりを 6 台設置し、温度、湿度の測定を行った。

3.2.2　実測条件

器具

おんどとり　6 台

アスマン通風乾湿計　2 台

ポール　2 本

三脚　2 台

場所

靖国神社周辺　（図 3.7 の円内部）

日時

11 月 4 日（金）　　15:00～25:00

図 3.7

3.2.3　実測方法

アスマン通風乾湿計とおんどとりの設置位置を図 3.8 に示す。図 3.8 のＡ、Ｂと図 2.2 のＡ、Ｂは同じ測定箇所である。

アスマン通風乾湿計を図 3.8 に示す南側歩道Ａ点、北側歩道Ｂ点の地面からの高さ 1500mm、車道からの距離 500mm に各 1 台（計 2 台）設置し、15:20～16:40 まで測定を行った。5 分毎に乾球温度と湿球温度を記録し、記録後に毎回給水を行った。

おんどとりを北側歩道Ａ点、南側歩道Ｂ点の各 3 点（3000mm, 2250mm, 1500mm, ）計 6 点に設置し、15:10～25:00 まで測定を行った。おんどとりの記録間隔は 10 秒とした。

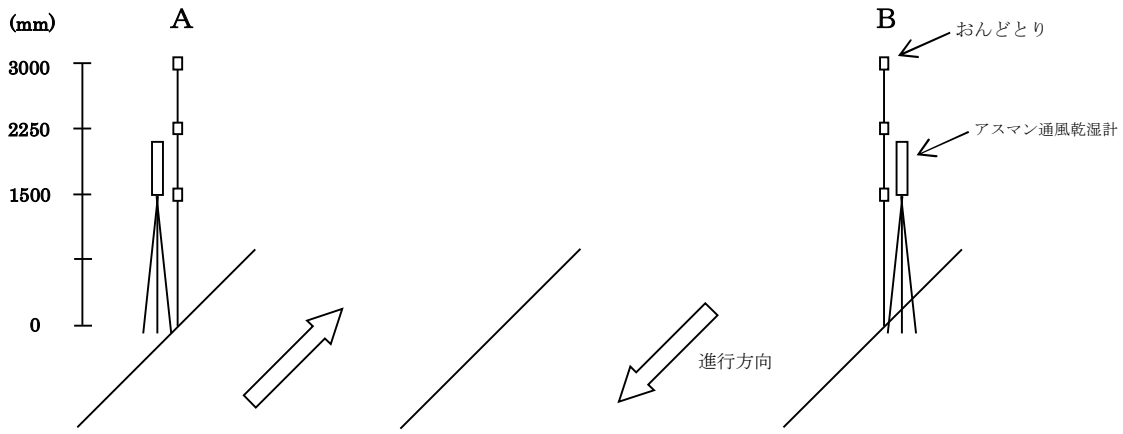


図 3.8 測定点

3.2.4　使用器具

実測に使用した測定器具の写真を図 3.9、3.10 に、それぞれの仕様を表 3.7、3.8 に示す。

電子式温湿度計(おんどとり Jr)

図 3.9　おんどとり Jr 写真

表 3.7　おんどとり Jr 仕様

取扱会社	株式会社　テイアンドデイ	
製品番号	Thermo Recorder RTR-53	
測定チャンネル	温度	湿度
外付け温湿度センサー	0～55℃	10～95%RH
測定精度	平均±0.3℃	±5%RH(25℃50%RH時)
測定・表示分解能	0.1℃	1%
センサ仕様	サーミスタ	高分子湿度センサー
記録容量	8000データ×2チャンネル	
本体寸法	高さ62×幅47×奥行き19mm	
動作環境	-30℃～80℃	

②アスマン通風乾湿計(株式会社　安藤計器製工所)

図 3.10　アスマン通風乾湿計写真

表 3.8　アスマン通風乾湿計仕様

温度範囲	-20～50℃
精度	±0.5℃
大きさ・重量	W70×H255×D105mm/1.2kg(本体)

3.2.5　実測結果

①温度とりＡ点

温度とりを用いて測定した南側歩道Ａ点(3000,2250,1500mm)計３点の気温と絶対湿度を以下の図 3.11、図 3.12 に示す。絶対湿度は垂直方向にわずかな差があるが、0.1g/m³程度であるため、高さ３ｍまでは気温、絶対湿度ともに垂直方向に差は生じないと言える。

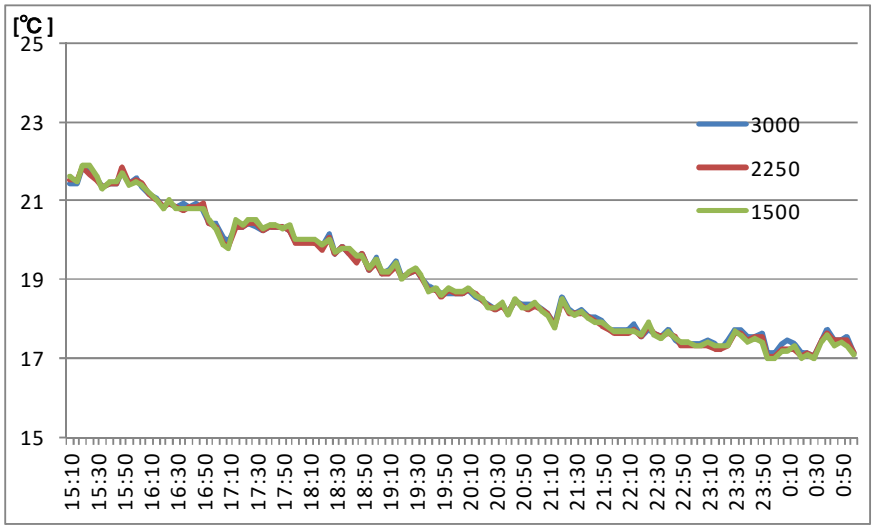


図 3.11　Ａ点の気温

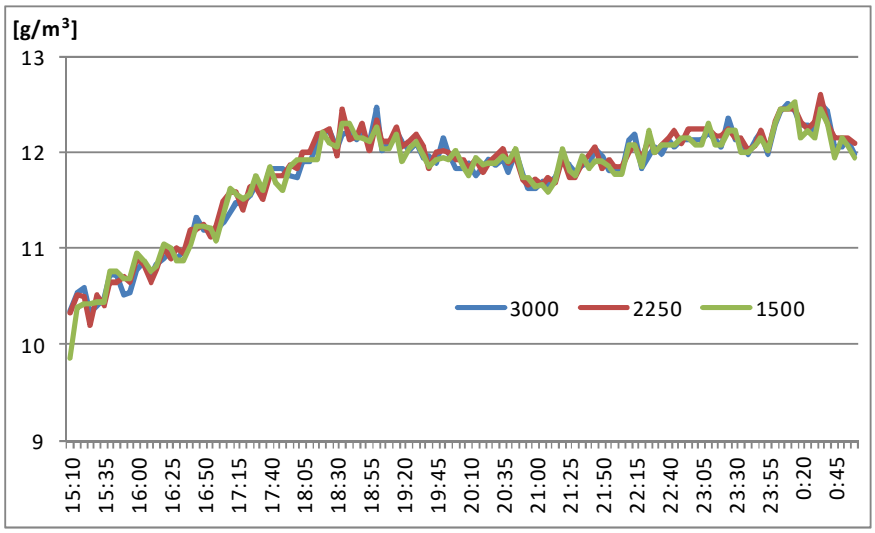


図 3.12　Ａ点の絶対湿度

②温度とりＢ点

温度とりを用いて測定した北側歩道Ｂ点(3000,2250,1500mm)計３点の気温と絶対湿度を以下の図 3.13、図 3.14 に示す。絶対湿度は垂直方向にわずかな差があるが、0.1g/m³程度であるため、高さ３m までは気温、絶対湿度ともに垂直方向に差は生じないと言える。よって、Ａ点とＢ点において高さ３mまでは気温、絶対湿度ともに垂直方向に差は生じないことから、道路空間のモデルの高さを３mとして、絶対湿度及び気温変化量の算出を行う。

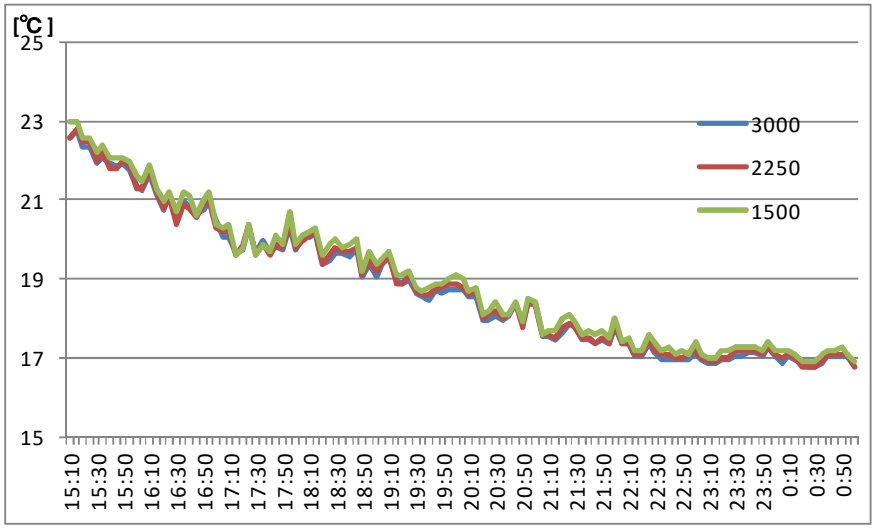


図 3.13　Ｂ点の気温

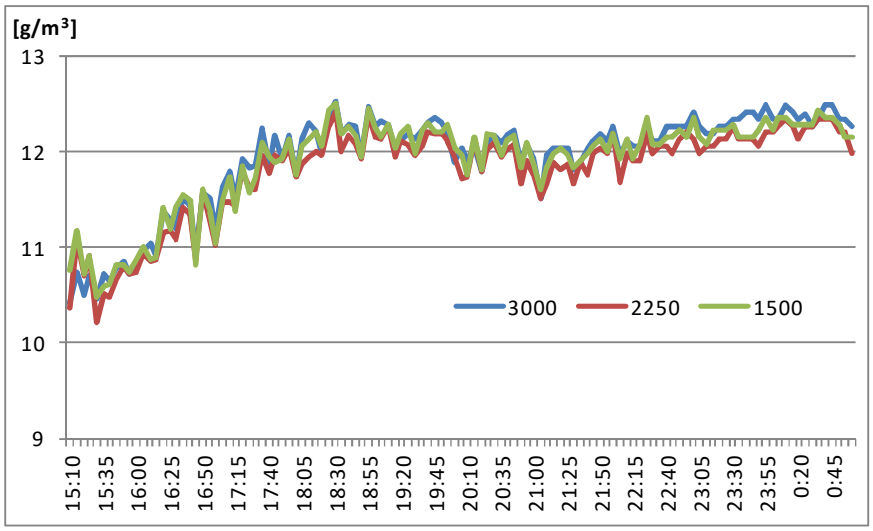


図 3.14　Ｂ点の絶対湿度

3.3　自動車排熱による水蒸気移動について

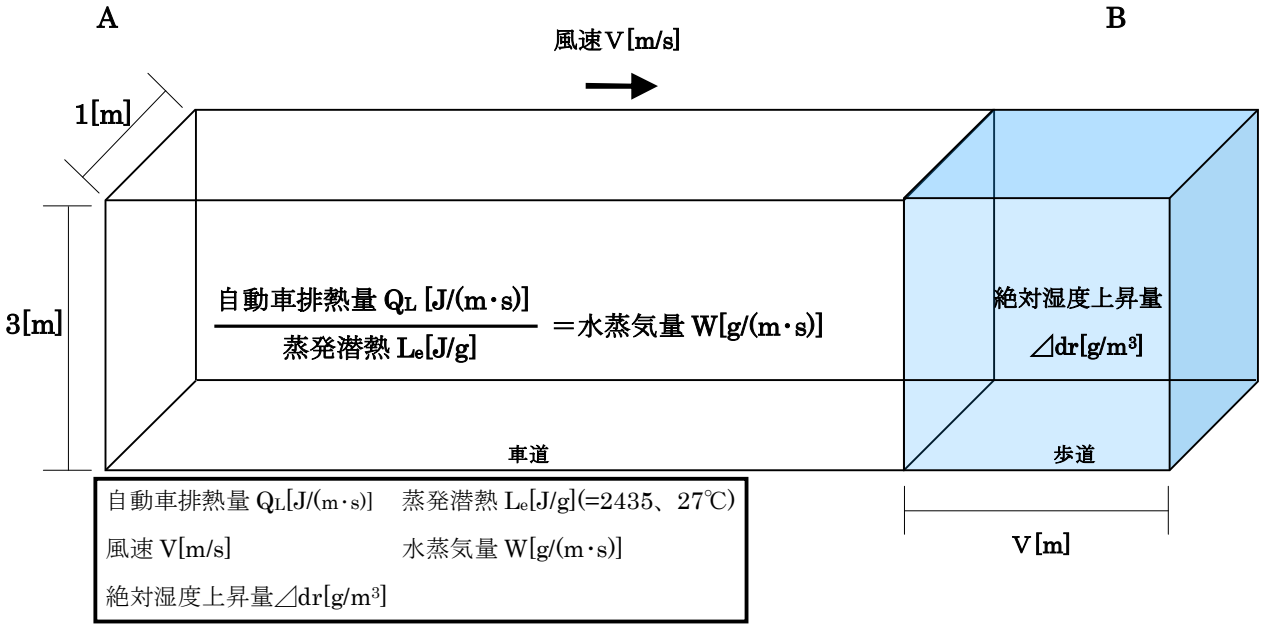


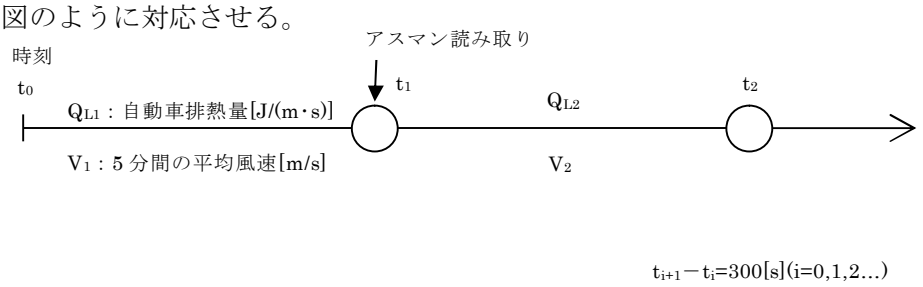
図 3.15　水蒸気移動モデル

図 3.15 のモデルを用いて、自動車排熱による絶対湿度の上昇量を算出する。単位時間あたり道路長さあたりの自動車排熱量 Q_L (潜熱)を蒸発潜熱で除したものを車道空間内における単位長さあたりの水蒸気量とし、図 3.16 に示す。その値を高さ 3m、風速 V で除することにより、絶対湿度上昇量⊿dr を算出する。車道空間から 1m×Vm×3m の空気が歩道空間に移動し、その中に含まれる水蒸気の分だけ絶対湿度が上昇すると考えた。⊿dr が正のときは B 点の絶対湿度が上昇することを意味し、負のときは A 点の絶対湿度が上昇することを意味する。

$$\triangle d_r = \frac{W}{3 \times \mathrm{V}}$$

自動車排熱量 Q_L を 5 分毎の交通量測定値に応じた値とし、アスマンの測定値との比較を行う。以下①、②により求めた値を図 3.17 に示す。

①5 分間の平均風速Ｖを使用し、図 3.15 のモデルを用いて求めたものを「自動車」とする。アスマン読み取り前、5 分間の風速が測定値に影響すると考え、自動車排熱量、風速、時刻を下図のように対応させる。



②アスマンの測定値より求めたＢ点とＡ点の絶対湿度の差を「測定値」とする。

図 3.16 より、交通量がほぼ一定であるため、自動車からの水蒸気発生量も一定であり、その平均値は 0.07g/m･s である。水蒸気発生量が一定なので、周辺の絶対湿度上昇量は風の影響を大きく受ける。

図 3.17 より、風が弱いとき(0m/s に近いとき)に絶対湿度上昇量は大きく振れているが、風速 0.5m/s 以上のときは僅かである。計算値(自動車)の平均値は 0.06g/m³、測定値(B－A)の平均値は 0.68 g/m³ で、誤差(⊿d_r－測定値)が－0.62 g/m³ あることから、自動車排熱による絶対湿度上昇量はわずかであり、他の要因によって南側歩道 A 点と北側歩道 B 点の差が生じていると考えられる。

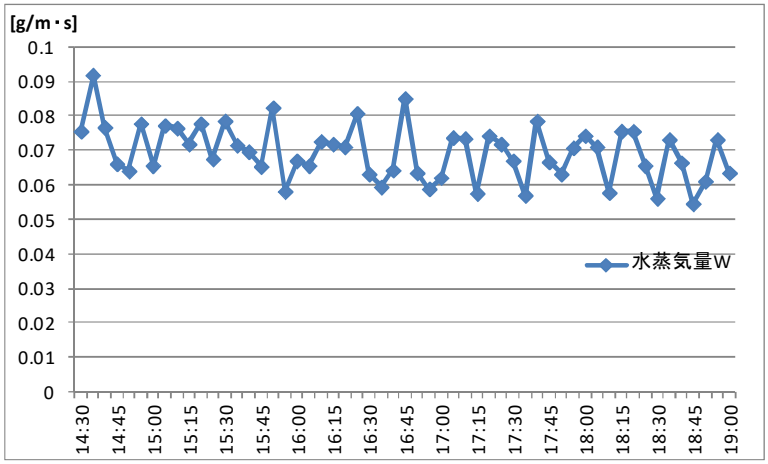


図 3.16　水蒸気量 W

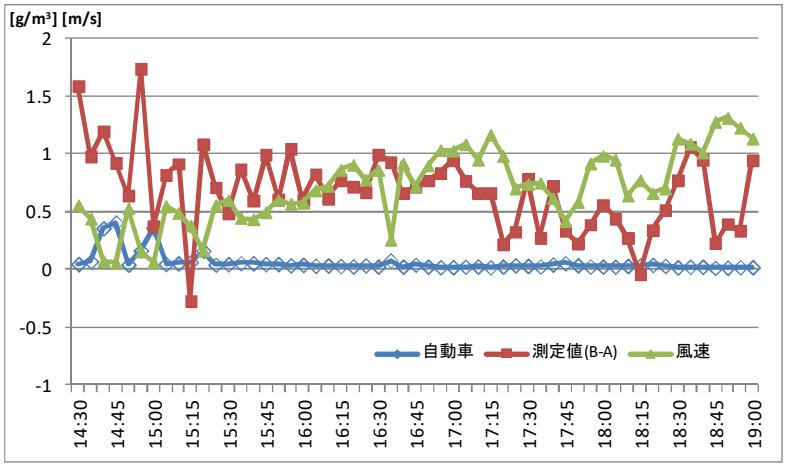


図 3.17　測定値と計算値(絶対湿度)

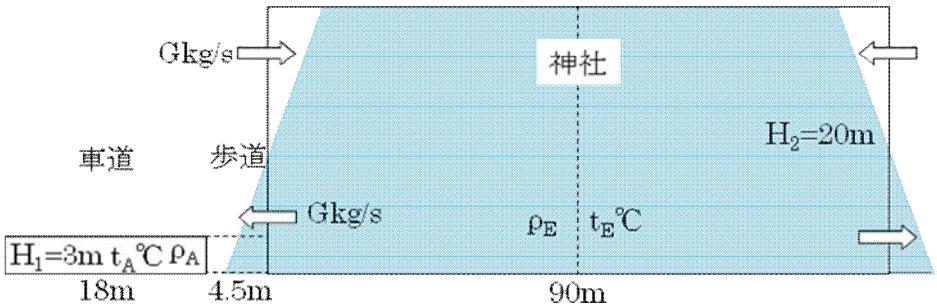
表 3.9　絶対湿度上昇量の平均値

	⊿dr	測定値(B-A)	誤差
平均値[g/m³]	0.06	0.68	−0.62

3.4　樹木の蒸散による水蒸気移動について

3.4.1　モデルについて

神社内では樹木の蒸散により、冷やされた空気が道路に流出するため、神社と道路における空気の流れは図 3.18 の矢印のようになると想定される。樹木の蒸散により冷やされた空気は下向きに移動することから、モデルの高さは神社内のイチョウの木の高さに設定し、神社空間上部はふさがっていると考え、２室間の空気の移動としてとらえた。図 3.19 のようになることも考えられるが、神社空間上部からの下向き風速が必ずしも大きくはないと考え、図 3.18 のモデルを用いて流出する水蒸気量の算出を行う。神社空間から単位時間あたりに流出(流入)する空気の量 G を①～③より導出する。



幅Ｂ[m](=1)　重力加速度 g[m/s²]	Ａ点,Ｅ点の空気密度 $\rho_{A,E}$[kg/m³]
高さ 1.5m の風速 V_s[m/s]	Ａ点,Ｅ点の気温 $t_{A,E}$[℃]
道路空間の高さ H_1[m]	神社空間の高さ H_2[m]

図 3.18　靖国神社の断面モデル

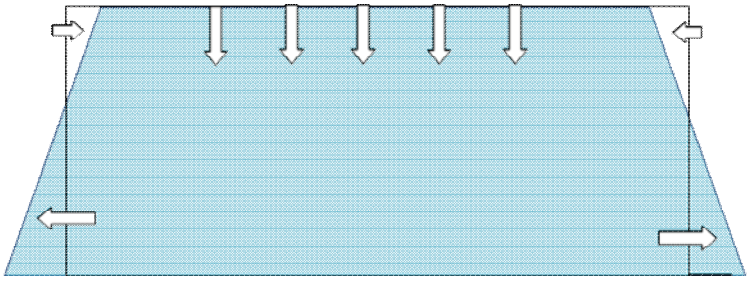


図 3.19　靖国神社の断面モデル 2

①ベルヌーイ(Bernoulli)の式

気体の流動解析においては、単位体積の流体のエネルギー保存を表すベルヌーイの式を基本として用いる。完全流体の定常的流れの中に１つの流線・流管を考えると、式(3.1)が成立する。

$$\frac{1}{2}\rho v_1^2 + P_1 + \rho gZ_1 = \frac{1}{2}\rho v_2^2 + P_2 + \rho gZ_2 \qquad (3.1)$$

ρ：空気密度 [kg/m³]

v：流速 [m/s]

P：高さ Z での絶対圧力 [Pa]

g：重力加速度 [m/s²]

図 3.20　ベルヌーイの定理

②オリフィス流れ

開口の両側に圧力差があると、これを通る空気の流れが生ずる。壁の厚さに対して断面積の大きい開口では、これをオリフィス流れと呼ぶ。この現象は図のように考えられる。開口Ａから噴出する空気の流れは縮流を生じ、流管断面積はＡ’となる。開口(流量)係数α＝Ａ’/Ａを考えると、流量m[kg/s]は式(3.2)となる。

$$m = (\alpha A)\rho v \qquad (3.2)$$

ベルヌーイの式より、式(3.3)が成立する。

$$P_1 = P_2 + \frac{1}{2}\rho v^2 \qquad (3.3)$$

図 3.21　オリフィス流れ

開口の前後差圧⊿Ｐ＝Ｐ1－Ｐ2 を用いると、mは式(3.4)のように書き換えることができる。

$$m = \alpha A\sqrt{2\rho \triangle P} \qquad (3.4)$$

③２室間の空気移動量

静止空気で満たされた２室１，２が接しているものとする。これら両室の高さＺにおける室内圧力Ｐ1、Ｐ2は、式(3.1)を用いて以下のように表される。

$$P_1 + \rho gZ_1 = P_{01} \qquad (3.5)$$
$$P_2 + \rho gZ_2 = P_{02}$$

Ｐ0は基準高さにおける圧力で、添え字1,2はそれぞれ１室、２室を示す。するとこの２室間の圧力差⊿Ｐは式(3.6)となる。

$$\triangle P = P_1 - P_2 = (P_{01} - P_{02}) - (\rho_1 - \rho_2)gZ \qquad (3.6)$$

ここで、両室の圧力が等しくなる中性帯の高さZnは式(3.7)となる。

$$Z_n = \frac{P_{01} - P_{02}}{(\rho_1 - \rho_2)g} \qquad (3.7)$$

この中性帯を基準高さとして測った高さｈの点の圧力差⊿P_hは式(3.8)となる。

$$\triangle P_h = |\rho_1 - \rho_2| gh \qquad (3.8)$$

図 3.22　圧力差と中性帯

開口の幅をＢとし $\rho_1 > \rho_2$ のとき、中性帯より上部にある高さＨの所までの間で 2 から 1 への流れの量mは、微少区間 dh の流れの積分を考えて、式(3.9)となる。

$$
\begin{aligned}
m &= \int_0^H \alpha A_h \sqrt{2\rho_2 \triangle P}\, dh \\
&= \alpha B \sqrt{2\rho_2(\rho_1 - \rho_2)g} \int_0^H h^{1/2} dh \\
&= \frac{2}{3} \alpha B \sqrt{2g\rho_2(\rho_1 - \rho_2)} H^{3/2} \qquad (3.9)
\end{aligned}
$$

α =0.7,B=1m,g=9.8m/s

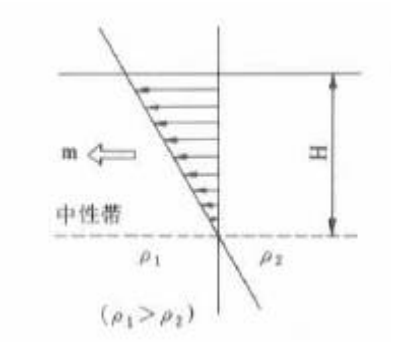


図 3.23　温度差がある場合の流れ

3.4.2　絶対湿度上昇量の算出

南側歩道Ａ点と道路から 55m 離れた靖国神社内にある E 点の温度差は最大で約２℃である。そこで、神社内外に温度差が生じたときに、神社内から流出する水蒸気量を算出する。

3.1.3 で求めた神社内における単位時間・単位面積当たりの蒸散量は0.096 g/m²・s である。この値を参考値に、靖国神社緑地が縦長であることを利用し、実際の樹木高さなどを考慮した図 3.18 のモデルで緑地から流出する水蒸気量を推定する。

神社部分の緑地を、図 3.24 のように高さ 20m、歩道からの奥行き 90m、歩道方向には無限の空間にモデル化して考え、この部分が樹木からの蒸散で温度が均一に下がり、周辺部分の空気と対流で入れ替わるとする。

道路(28℃)と神社(27℃)の気温差が 1℃のとき、神社から空間の片側へ流出する空気の量 G は式(3.9)より、単位幅あたり 4.5kg/s である。湿り空気線図より、等エンタルピーにおいて温度差が１℃生じたときの絶対湿度の差は 0.4g/kg(DA)である。

よって、神社から流出する空気に含まれる余剰水蒸気量(周辺空気より絶対湿度が高い分で供給される水蒸気量)は S＝4.5×0.4=1.8g/s となる。この余剰水蒸気量を発生させるのに必要な緑地面積は 1.8g/s÷0.096 g/m²・s＝19m² となり、神社内緑地で賄うことができる。

次に道路(28℃)と神社(26℃)の気温差が 2℃のときの余剰水蒸気量は 5[g/s]である。この余剰水蒸気量を発生させるのに必要な緑地面積は 52m² となり、神社内の緑地面積をやや上回る。道路(28℃)と神社(26.2℃)の気温差が 1.8℃のとき、余剰水蒸気量は 4.3g/s となり、神社内緑地の蒸散量 0.096 g/m²・s×45m²＝4.3g/s と釣り合う。以上のことから、靖国神社内の樹木は蒸散によって、周辺道路よりも最大約 2℃気温を下げることが可能であると言える。

日射量と余剰水蒸気量について考えていく。蒸発潜熱を 2345J/g(27℃)とすると、図 3.24 の余剰水蒸気量を発生させるために必要な熱量(日射量)は 1.8×2345＝4221Wである。気象庁(東京)のデータより、2011 年 8 月 1 日の 14:30～19:00 の全天日射量の最大値は 120W/m² である。4221÷120＝35m² となり、大きな差はないため整合していると考えられる。モデルの半分の面積 45m² を下回っていることから、実際はより強い日射を受け、蒸散はさらに起きており、余剰水蒸気量も大きな値を示すことになる。モデルとつりあうときの神社内外の気温は 26.8℃、28℃のときである。以上のことから、少なくとも神社内外に 1℃気温差を生じさせることは可能であるといえる。

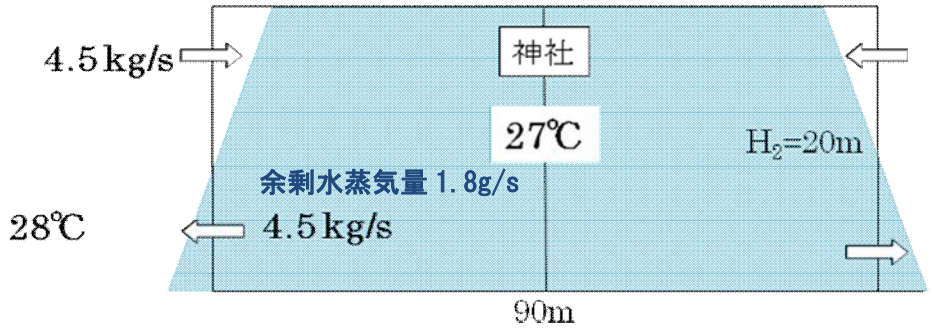


図 3.24　温度差 1℃のとき余剰水蒸気量

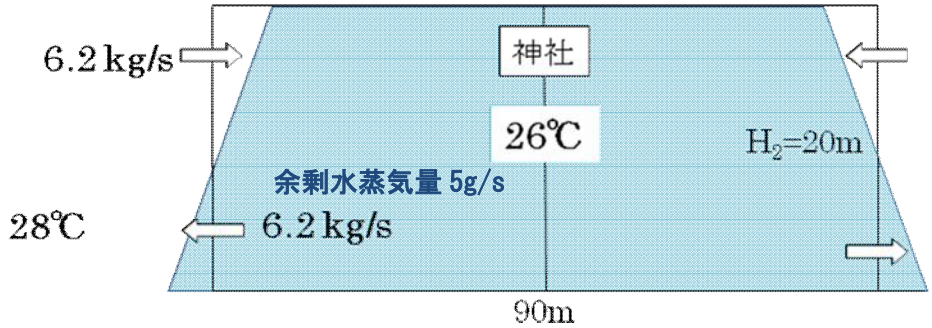


図 3.25　温度差 2℃のときの余剰水蒸気量

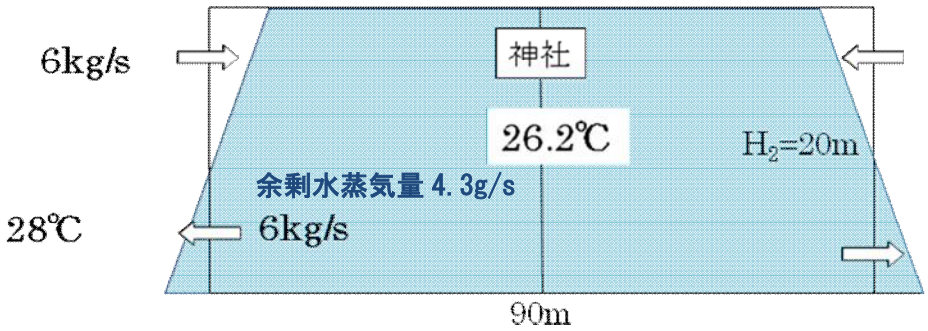


図 3.26　温度差 1.8℃のときの余剰水蒸気量

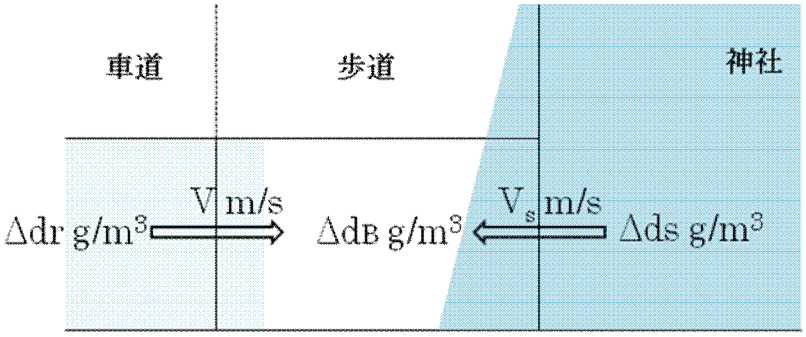


図 3.27　歩道空間の絶対湿度上昇量

蒸散による絶対湿度上昇量⊿ds はＡ点と E 点の気温差より、以下のように求める。

$$\triangle d_s[g/m^3] = 0.5[g/(m^3 \cdot ℃)] \times (t_A - t_E)$$

神社と歩道空間の高さ 1.5m における圧力 P_s は、中性帯からの距離を Hm とすると、以下のように求めることができる。

$$P_s[N/m^2] = |\rho_E - \rho_A| gH$$

よって、中性帯はモデルの高さ 10m にできるので、高さ 1.5m における風速 Vs は以下のようになる。

$$V_s[m/s] = \sqrt{\frac{2|\rho_E - \rho_A| g \times 8.5}{\rho}}$$

測定期間中、風は南側歩道 A 点から北側歩道 B 点に吹いていたので、A 点は交通排熱の影響を受けておらず､B 点は交通排熱と靖国神社敷地内に存在する木々の蒸散の影響を受け、絶対湿度が上昇したと考えることができる。よって北側歩道 B 点と南側歩道 A 点の絶対湿度差(B－A)を交通排熱と蒸散によるものであるとする。

自動車排熱による絶対湿度上昇量⊿d_r と神社内の植物の蒸散による絶対湿度上昇量⊿d_s は、歩道空間内で均一に混ざりあうものと考える。北側歩道Ｂ点の絶対湿度上昇量⊿d_B を自動車排熱による絶対湿度上昇量⊿d_r と神社内の植物の蒸散による絶対湿度上昇量⊿d_s をそれぞれの空間の風速比を用いて以下のように算出する。算出した値と北側歩道Ｂ点と南側歩道Ａ点の絶対湿度差を図 3.29 に示す。

$$\triangle d_B = \frac{V}{V + V_S} \triangle d_r + \frac{V_S}{V + V_S} \triangle d_s$$

図 3.29, 表 3.10 より、自動車から排出される水蒸気に植物の蒸散量を加えた絶対湿度上昇量⊿d_Bの平均値は 0.53g/m³、測定値(B－A)の平均値は 0.68 g/m³ である。自動車から排出される水蒸気のみを考慮した場合の計算値と測定値の誤差(⊿d_r－測定値)－0.62 g/m³ に比べると、誤差(⊿d_B－測定値)は少なくなり、計算値と測定値は近い値となった。よって、北側歩道 B 点の絶対湿度が南側歩道 A 点よりも高くなった主な原因は、植物の蒸散によるものである可能性が高い。蒸散量の少ない時期の測定をすることにより、この仮説を検証する。

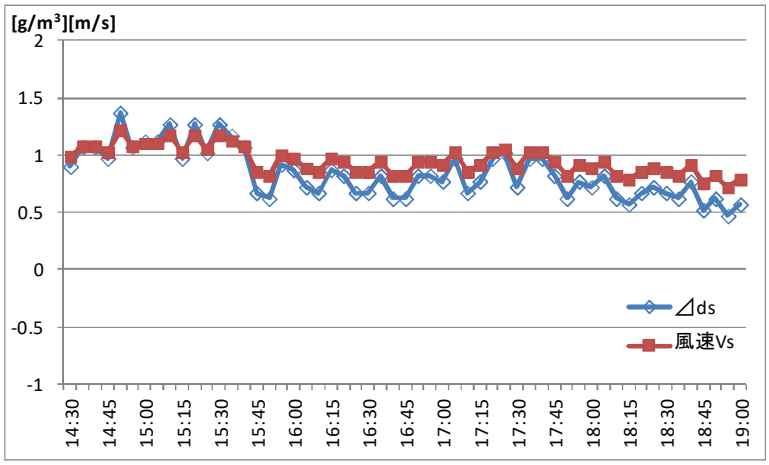


図 3.28　植物の蒸散による絶対湿度上昇量

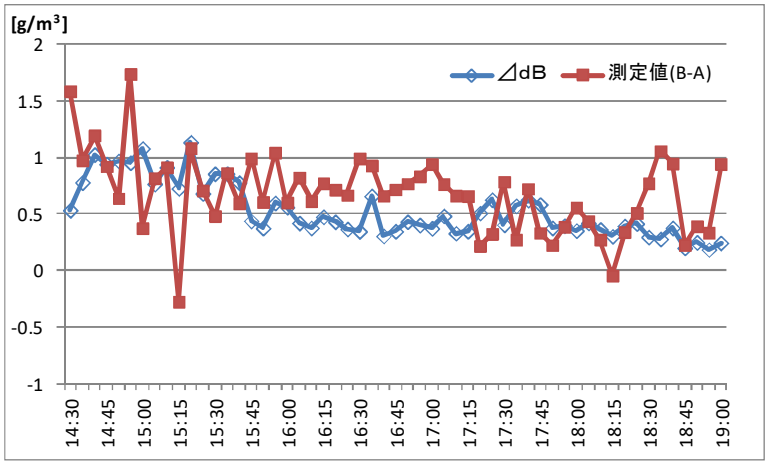


図 3.29　測定値と計算値(絶対湿度)

表 3.10　絶対湿度上昇量の平均値

	⊿dB	測定値(B-A)	誤差
平均値[g/m³]	0.53	0.68	-0.15

3.5　自動車排熱及び樹木の蒸散による気温変化量について

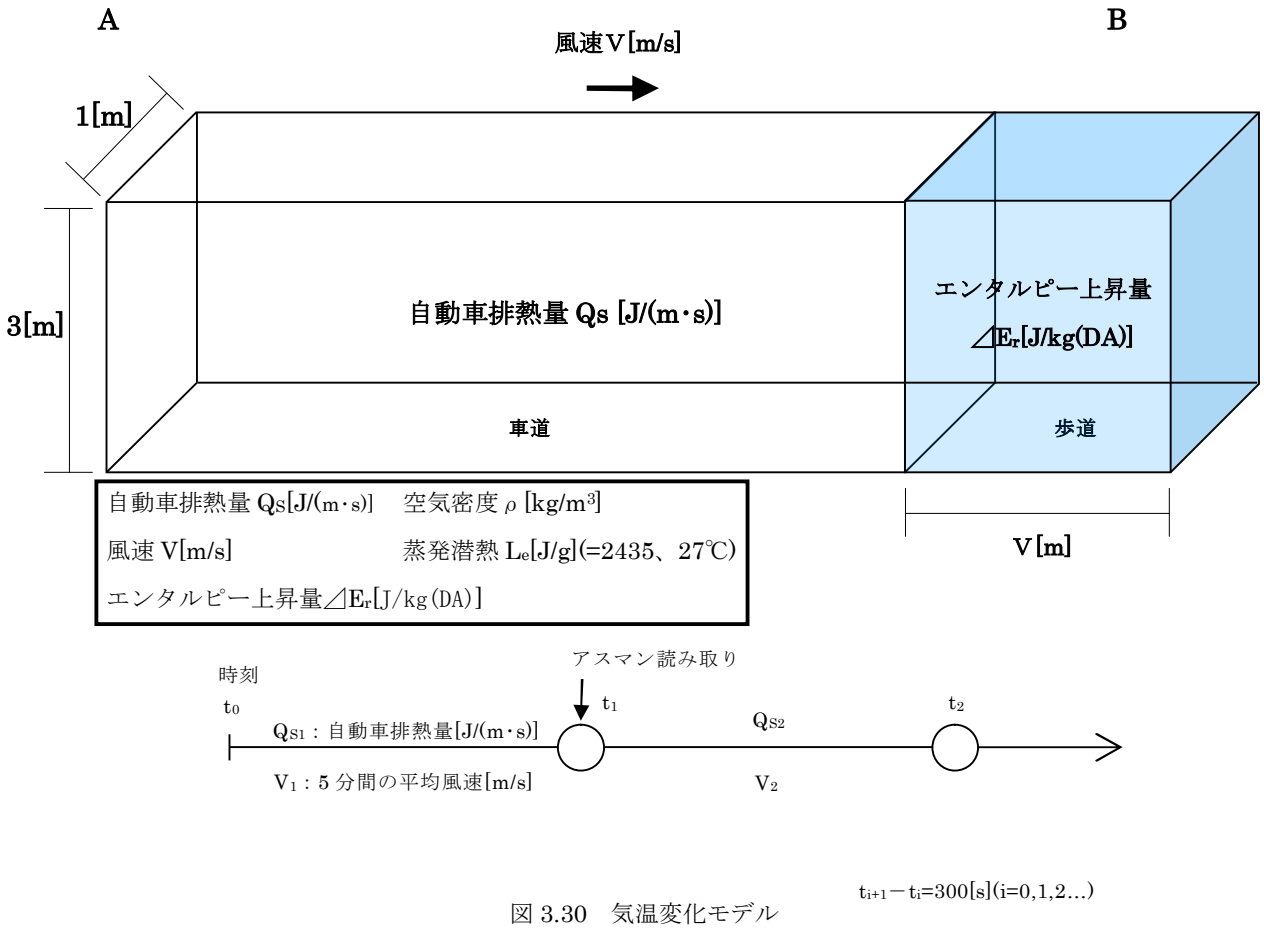


図 3.30　気温変化モデル

北側歩道Ｂ点は自動車顕熱による加熱と植物蒸散による冷却の影響を受けていると考えられる。図 3.15 のモデルの自動車排熱量 Q_L（潜熱）を自動車排熱量 Q_S（顕熱）に換えた図 3.30 のモデルを用いて、自動車排熱によるＢ点のエンタルピー上昇量⊿E_rJ/kg(DA)を以下の式より算出する。自動車排熱量、風速、時刻の対応関係は図 3.15 のモデルと同様、図 3.30 の通りである。

$$\triangle E_r[J/kg(DA)] = \frac{Q_S[J/m\cdot s]}{3[\mathrm{m}]\times \mathrm{V}[m]} \times \frac{1}{\rho[kg/m^3]}$$

自動車排熱によるＢ点の温度変化量⊿t_r を⊿E_r を用いて以下のように算出する。求めた値を図 3.31 に示す。図 3.31 より、自動車排熱によって１～２℃程度の気温が上昇することがわかる。

$$\triangle t_r = \frac{\triangle E_r}{1006[J/(kg\cdot ℃)]}$$

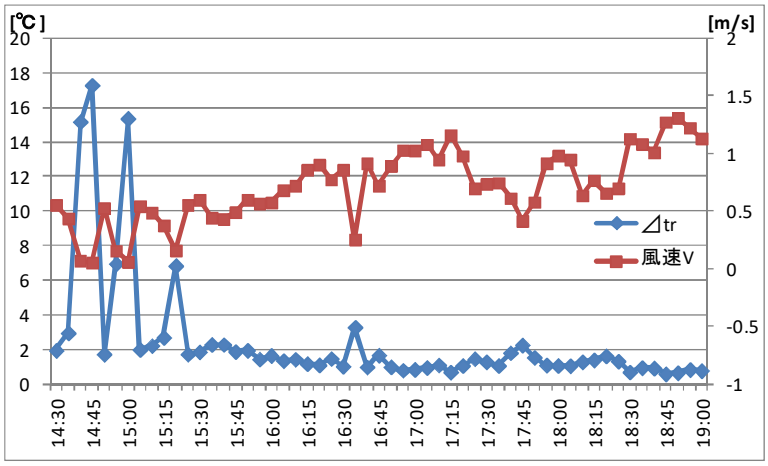


図 3.31　自動車排熱による気温変化量

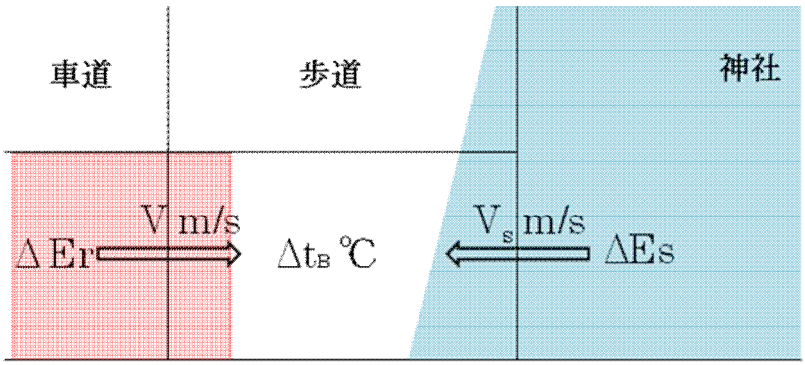


図 3.32　歩道空間の気温変化量

次に神社内からは植物蒸散による絶対湿度上昇量⊿d_s分だけ、冷却されると考え、その植物蒸散によるエンタルピー変化量⊿Es を以下の式より求める。自動車の排熱と植物の蒸散の影響を受けていないＡ点を基準としたときのＢ点の気温変化量⊿t_Bを水蒸気と同様に、それぞれの風速比を用いて以下の式より算出する。気温変化量⊿t_Sを図 3.33 に、気温変化量⊿t_BとＢ点とＡ点の気温差(B-A)を図 3.34 に示す。

$$\triangle E_s = (\triangle d_S \times 蒸発潜熱 L_e \times \frac{1}{\rho})$$

$$\triangle t_S = \frac{\triangle E_S}{1006[J/(kg \cdot ℃)]}$$

$$\triangle t_B = \left(\frac{V}{V+V_s} \triangle E_r - \frac{V_s}{V+V_s} \triangle E_S \right) \div 1006[J/(kg \cdot ℃)]$$

図 3.33 より、植物の蒸散によって、気温は 1~2.5℃下がるといえる。

図 3.34, 表 3.11 より、B 点の気温変化量⊿t_B と測定値(B 点と A 点の気温差)の平均値はそれぞれ−0.39℃、−0.82℃となり、植物の蒸散による冷却が自動車の排熱による加熱を上回っていると言える。表 3.11 の 16:00 前後の⊿t_B と測定値の平均値を見ると、計算値と測定値の誤差(⊿t_B−測定値)は、14:30～16:00 では 0.75℃、16:00 ～19:00 では 0.28℃となっており、16:00 以前の誤差は大きくなっている。この要因として、風速 V が 0.6m/s 以下である 14:30～16:00 の範囲では、自動車排熱による加熱が起きていないため、誤差が大きくなったものと思われる。

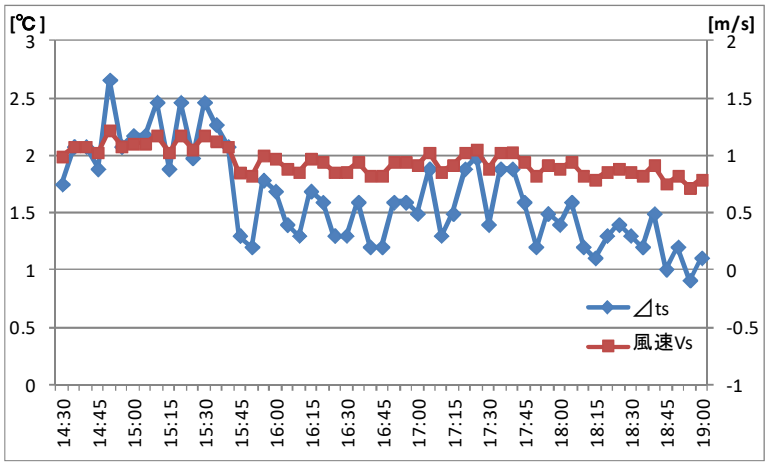


図 3. 33　植物の蒸散による気温変化量

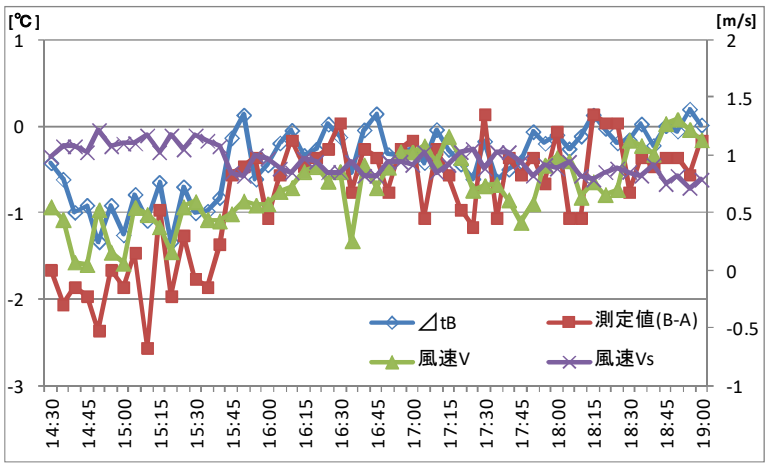


図 3. 34　測定値と計算値（気温変化量）

表 3. 11　気温変化量の平均値

時刻	平均値[℃]		
	⊿tB	測定値(B−A)	誤差
14:30～19:00	−0.39	−0.82	0.43
14:30～16:00	−0.78	−1.53	0.75
16:00～19:00	−0.19	−0.47	0.27

3.6　分子拡散による水蒸気の移動

1)フィックの拡散の法則

混合媒質中に密度の勾配があると、その密度勾配に沿って物質の移動が起きる。空気中において水蒸気の密度(絶対湿度 g/m³)が場所によって異なると、密度が均一になるように水蒸気が移動する。拡散が定常的に行われているとすると、フィックの拡散の法則により、物質の密度勾配が図のように X 軸方向にあるとき、これに垂直な平面の単位面積を単位時間に通過する物質の質量 w は式①で与えられる。

$$w = -D\frac{d\rho_v}{dx} \qquad \text{——①}$$

w：単位面積を単位時間に通過する物質の質量[g/(m²･s)]

D：拡散係数[m²/s]

ρ_v：物質の密度[g/m³]

x：距離[m]

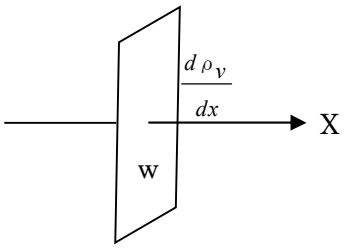


図 3.35　密度勾配による物質の移動

2)測定空間内における水蒸気の移動

南側歩道 A 点と北側歩道 B 点間における水蒸気の移動量をフィックの拡散の法則を用いて算出する。B 点の絶対湿度と A 点の絶対湿度の差を道路幅 18m で除することにより、測定点 AB 間の絶対湿度勾配を求め、拡散係数 D を乗じることにより、単位面積を単位時間に通過する水蒸気の質量を算出する。式②により求めた値を図 3.37 に示す。

$$w = -D\frac{\rho_B - \rho_A}{18} \qquad \text{——②}$$

w：単位面積を単位時間に通過する水蒸気の質量[g/(m²･s)]

D：拡散係数[m²/s](=0.26×10⁻⁴)

ρ_A：A 点の絶対湿度[g/m³]

ρ_B：B 点の絶対湿度[g/m³]

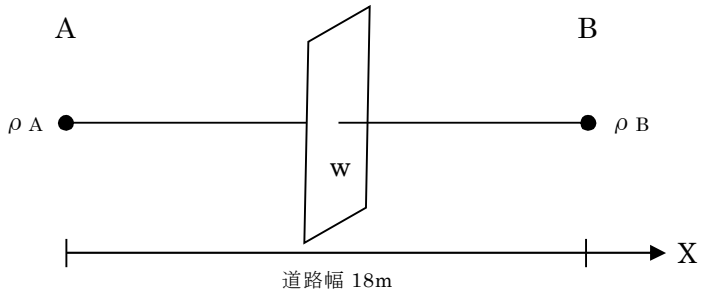


図 3.36　絶対湿度勾配による水蒸気の移動

単位面積を単位時間に通過する水蒸気の質量 w が、正のときは A 点から B 点へ、負のときは B 点から A 点へ水蒸気が移動することを意味している。図 3.37 より、w は負の値が多いことから水蒸気は B 点から A 点へ移動するといえるが、水蒸気量は 10^{-6} のオーダーで AB 間を通過した自動車から発生する水蒸気量 0.02g/(m²･s)に比べても、僅かなので、絶対湿度勾配による水蒸気拡散は無視できる。

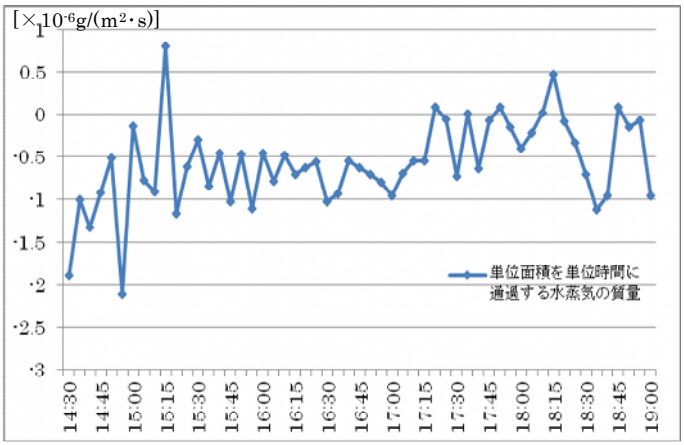


図 3.37　絶対湿度勾配による水蒸気の移動量

3.7　冬季の蒸散量の予測

冬季は、植物の蒸散量が減少するため、神社内と歩道の測定点における絶対湿度の差は夏季ほど生じないと考えられる。冬季実測を行った 1 月の蒸散量の情報は得られなかったため、1 月の蒸散量は 10 月よりも低いので、10 月の蒸散量を上限とすることが出来る。3.1.3 と同様に両体数グラフを用いて 10 月晴れの胸高直径 80cm のイチョウの蒸散量を求めると 167kg/本･day となる。この値は 8 月曇りのときの 1/3 であること、葉が落ち緑地の密度が大きく低下していることからも、1 月晴れの蒸散量は 8 月曇りのときの 1/3 以下であるといえる。

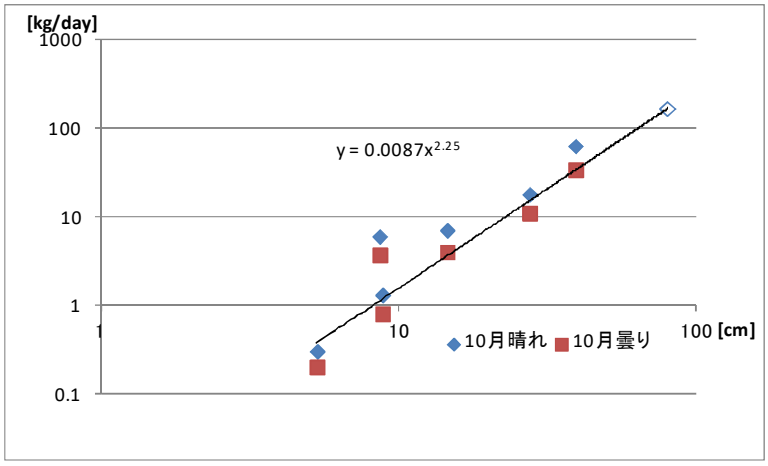


図 3. 34　胸高直径－蒸散量(両対数グラフ)

参考文献

6)　東京都建設局　http://www.kensetsu.metro.tokyo.jp/douro/gaiyo/01.html

7)　日本エネルギー経済研究所　http://home.hiroshima-u.ac.jp/er/Rene_ET_SS1.html

8)　東京都建設局公園緑地部　緑化に関する調査報告(その４)　東京都建設局公園緑地部

9)　国立天文台　日の出入り　http://eco.mtk.nao.ac.jp/koyomi/dni/2011/hdni13113.html

10)　気象庁　地上気象観測統計値　1999 年～2004 年（極値、平年値）　（財）気象業務支援センター

11)　上田政文　温度と蒸発　基礎から計測技術まで　コロナ社

※旅行速度とは（移動）に要した時間で、信号待ちや交通渋滞による停止を含む。

第４章　アスマン通風乾湿計を用いた実測（冬季）

第４章　アスマン通風乾湿計を用いた実測（冬季）

4.1　実験概要

2012 年 1 月 17 日に靖国神社及び九段坂上交差点周辺で、夏季と同様の実験を表 4.1 の概要に従って測定を行った。

夏季とは､測定時間と天気が異なっている｡夏季の測定時間は 14:30～19:00 であったが、冬季は 15:30～18:30 である。夏季の天気は曇りであったが、冬季は晴れである。

また、冬季はイチョウ及びサクラの葉が散ったため植物の蒸散量が大幅に減少していると考えられる。葉が残っている木は図 4.1 に示す通りである。靖国通りに最も近い木の葉が残っていることから、北側歩道の測定点Ｂ点及びＣ点は、夏季に比べるとわずかではあるが、植物の蒸散の影響を受ける可能性がある。

表 4.1 実測項目

日時			天気	
2012年1月17日　15:30～18:30			晴れ	
測定項目	測定器	測定点高さ	測定間隔	測定点数
乾湿球温度	アスマン通風乾湿計	A～E:1500mm	5分	5
風速	超音波風向風速計	W_1:35m,W_2:1500mm	0.25秒	2
交通量	ビデオカメラ	－	－	1

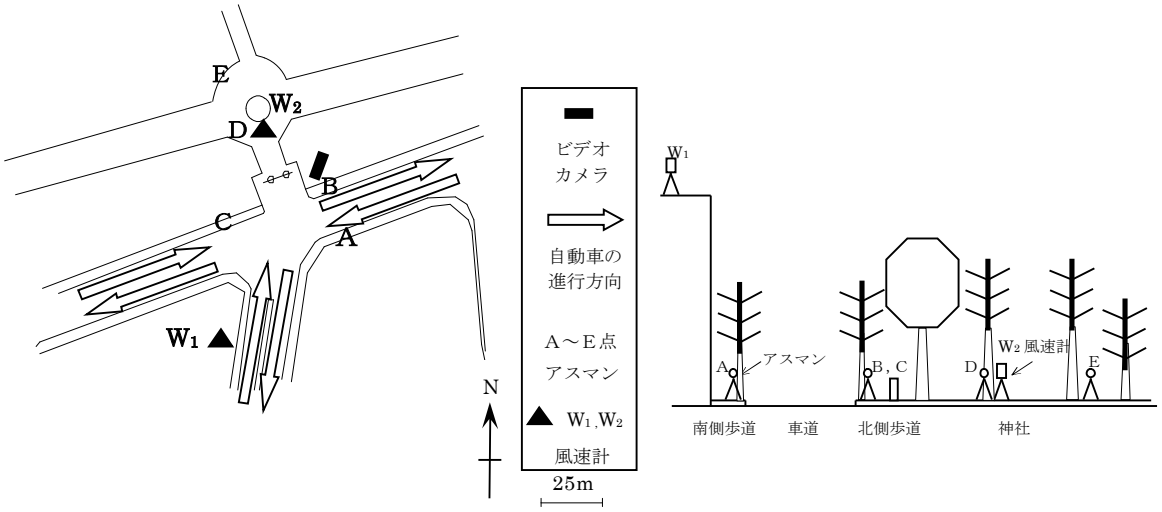


図 4.1 測定点図面

4.2　実測結果

4.2.1　各測定点の温湿度について

A～E 点の気温と絶対湿度を図 4.2、図 4.3 にそれぞれ示す。図 4.2 より、神社内のD点及びE点に比べて、道路沿いの測定点A～C点の気温が約 0.5℃高くなっていることがわかる。図 4.3 より、神社内奥のE点の絶対湿度が最も高くなっているが、A～E点の絶対湿度に夏季ほど大きな差はないことがわかる。

表 4.2 に各点の気温と絶対湿度の平均値を示す。以上のことから、植物の蒸散は夏季ほど起きておらず、道路沿いの測定点が自動車によって加熱されていると考えることができる。

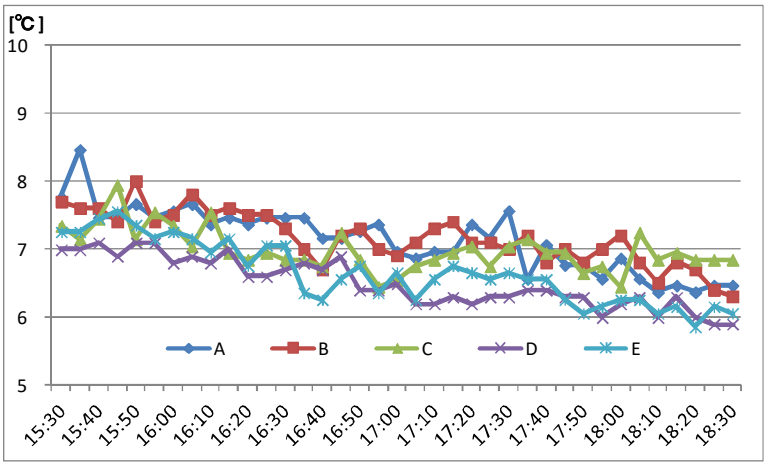


図 4.2　各点の気温

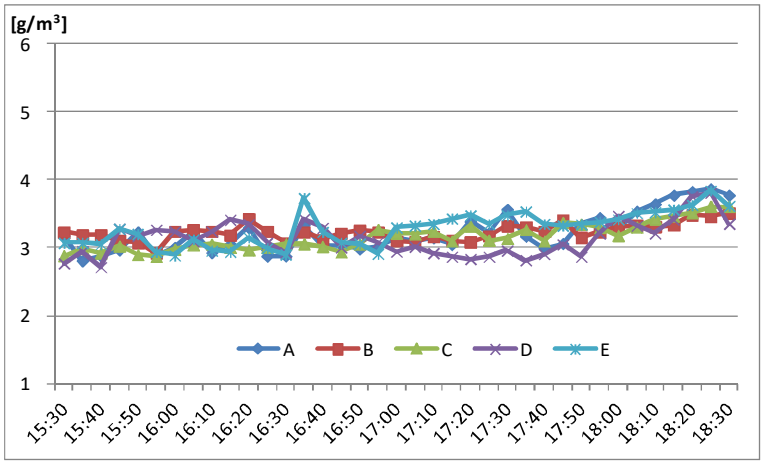


図 4.3　各点の絶対湿度

表 4.2　各点の気温及び絶対湿度の平均値

	A	B	C	D	E
気温[℃] 15:30-18:30	7.1	7.2	7.0	6.5	6.6
絶対湿度[g/m^3]15:30-18:30	3.2	3.2	3.2	3.1	3.3

4.2.2　道路及び神社内の風向風速について

①道路

道路の風速を図 4.4 に示す。道路のＹ方向の風速は、15:50 以降の値がほぼ正の値となっているので、南側歩道Ａ点から北側歩道Ｂ点に向かって吹いている。Ｙ方向については夏季と同様の向きに吹いているが、Ｙ方向の平均風速は 0.22m/s であり、Ｘ方向の平均風速は 0.68m/s であることから、Ｘ方向の風が支配していると言える。

②神社

神社内の風速を図 4.5 に示す。神社内の風速もＸ方向の風が支配していると言えるが、Ｙ方向の風速がほぼ 0m/s となっており、道路とは異なっている。緑地の蒸散による冷気が道路側に流出している可能性がある。

③風配図

図 4.6 に道路及び神社内の風配図を示す。道路においては東南東～北東方向の風が主であり、最多風向は東である。神社においては東南東～東北東方向の風が主であり、最多風向は東北東である。夏季と同様に、神社内の風速 W_2 が弱いこと、W_1 は気象台(科学技術館)での風速データに類似していることから、歩道付近で道路側の流れと神社側からの冷気の流出が押し合っていると考えることができる。夏季ほど道路と神社の風配図に差は表れていない。神社内の樹木の蒸散量が減少したためだと考えられる。

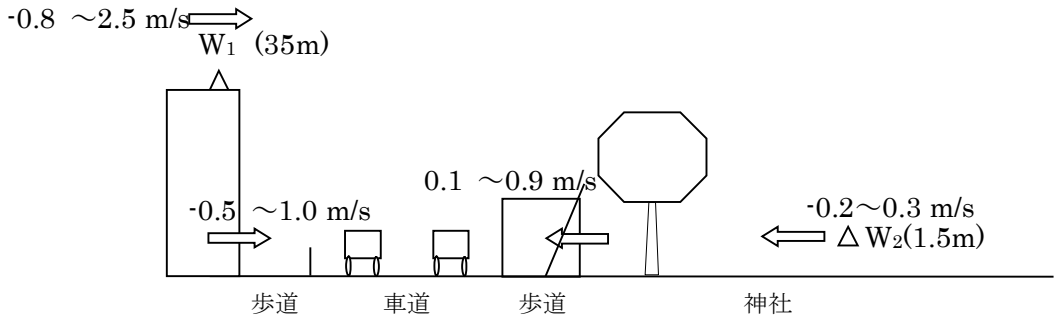
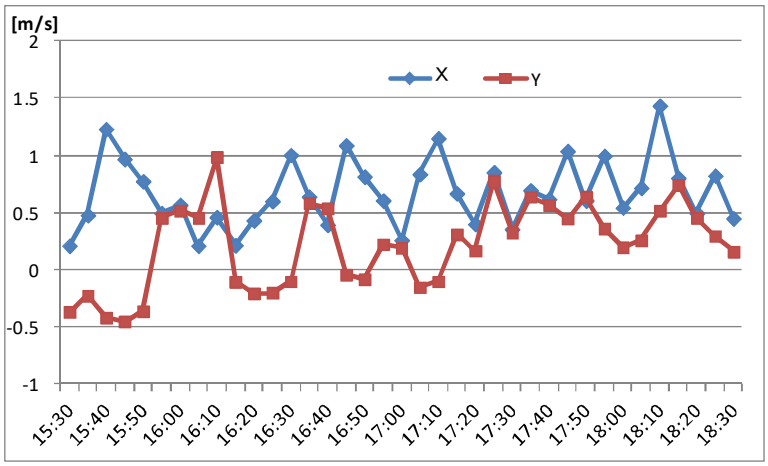


図 4.7　歩道部分の収支



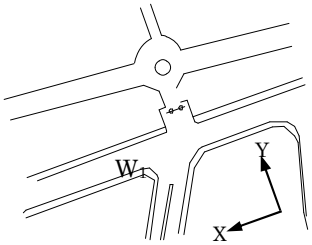
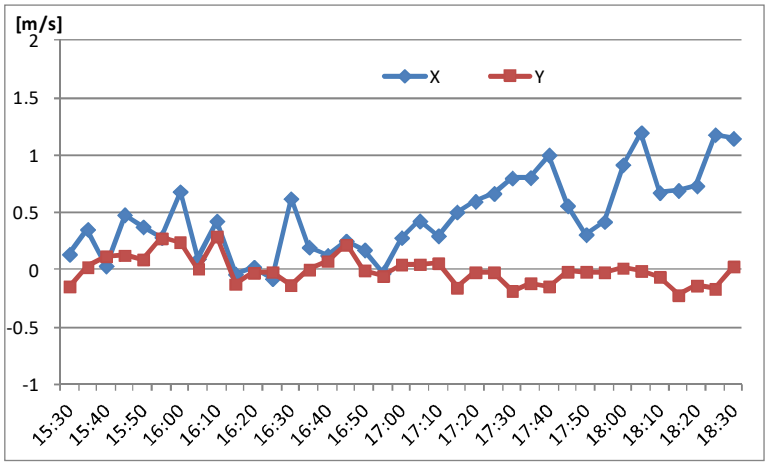


図 4.4　道路の風速（W_1）



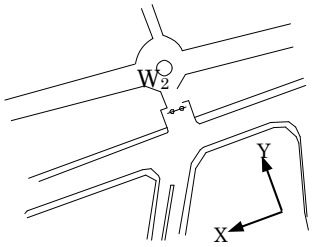


図 4.5　神社内の風速（W_2）

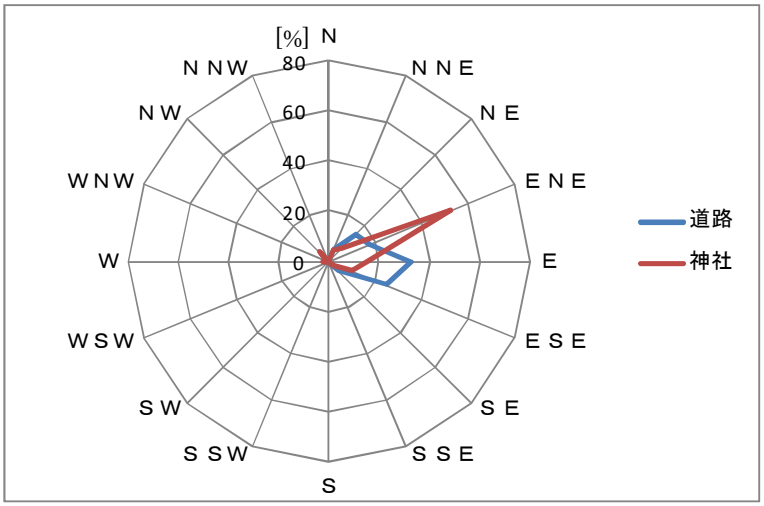


図 4.6　風配図

4.2.3　各測定点の気温差及び絶対湿度差

各測定点の気温差及び絶対湿度差を図 4.7～図 4.16 に示す。道路沿いのＡ点、Ｂ点、Ｃ点の間には大きな差は見られない。また、神社内のＤ点とＥ点の間にも大きな差は見られない。図 4.7～図 4.16 の全てにおいて絶対湿度の差はほぼ±0.5g/m³ 以内に収まっている。等エンタルピーにおいて、温度差が 1℃あるときの絶対湿度の差は 0.5g/m³ なので、植物の蒸散によって緑地と道路の気温差は 1℃以上生じることはないといえる。よって、道路と神社の気温差が 1℃以上ある場合は、自動車の排熱による加熱の影響が大きいと考えられる。

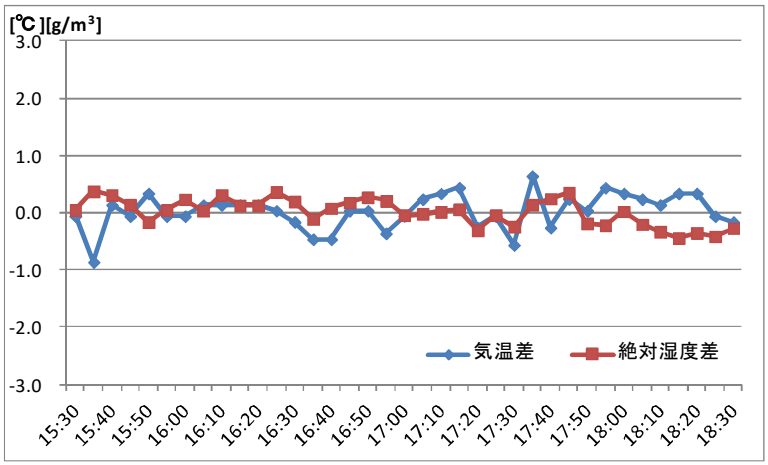


図 4.7　B－A

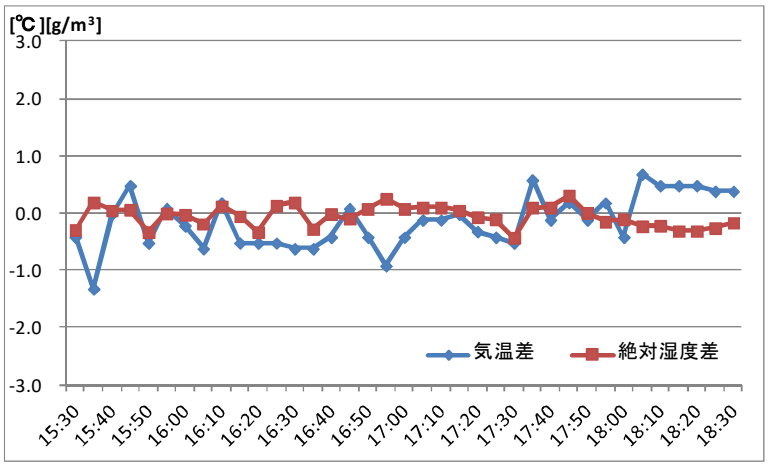


図 4.8　C－A

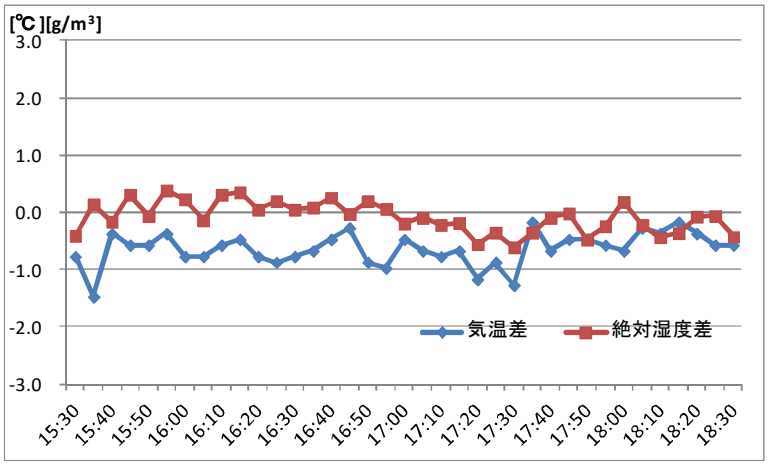


図 4.9　D－A

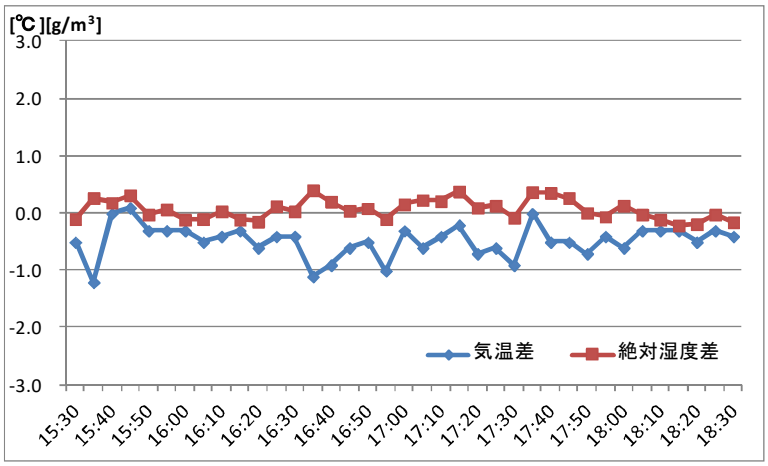


図 4.10　E－A

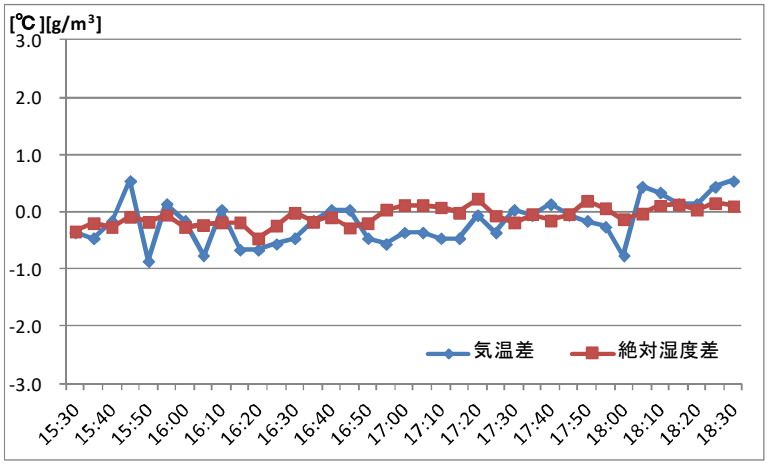


図 4.11　C－B

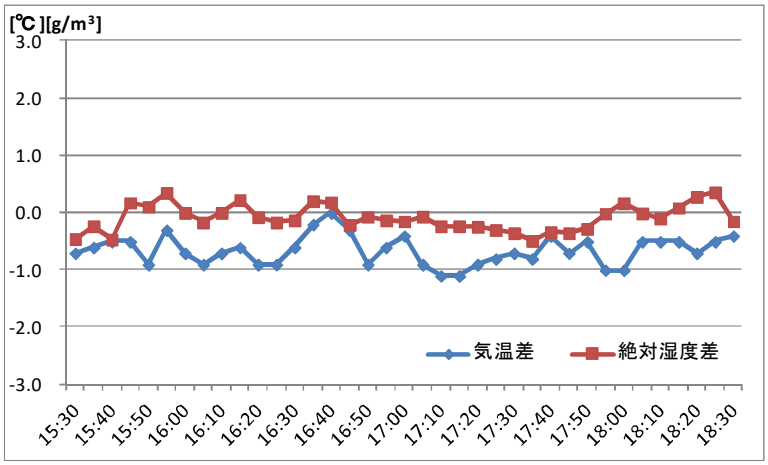


図 4.12　D－B

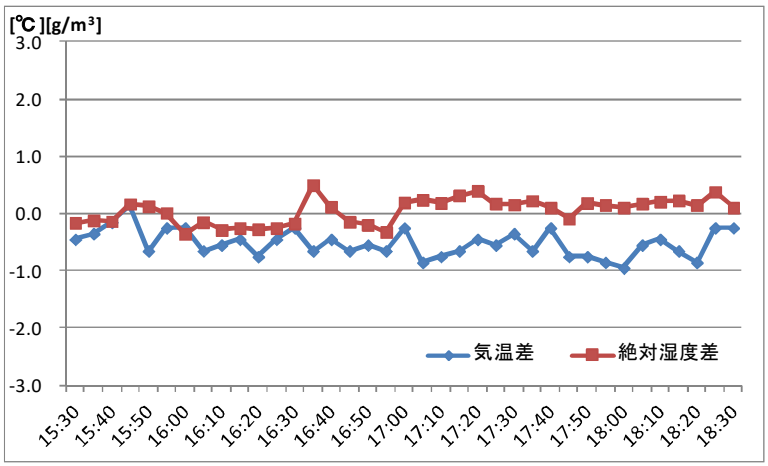


図 4.13　E－B

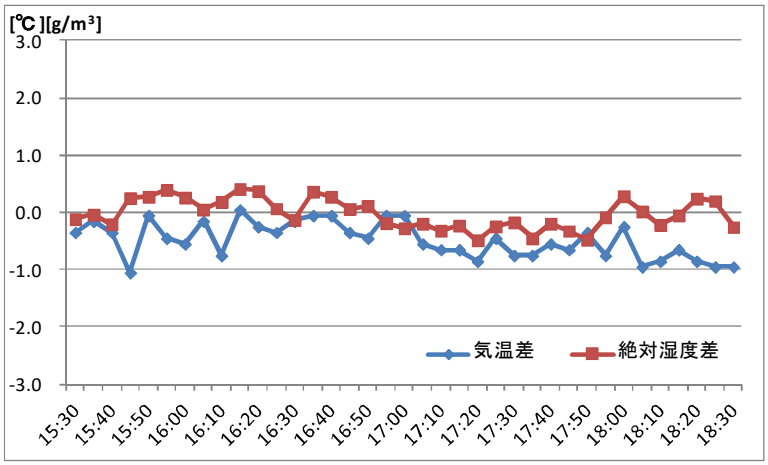


図 4.14　D－C

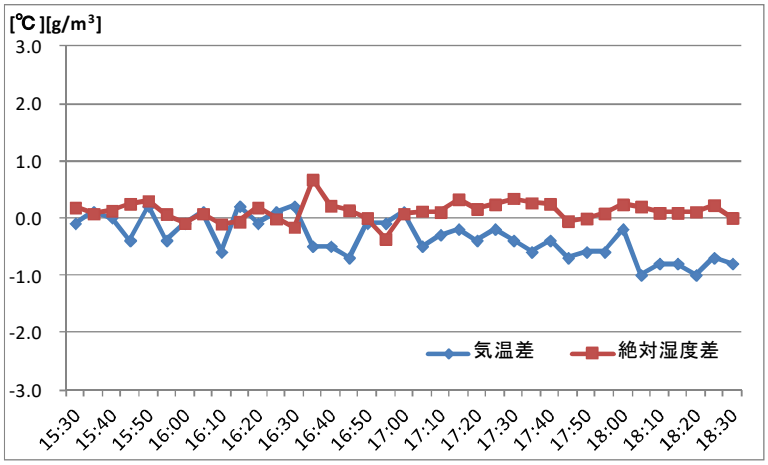


図 4.15　E－C

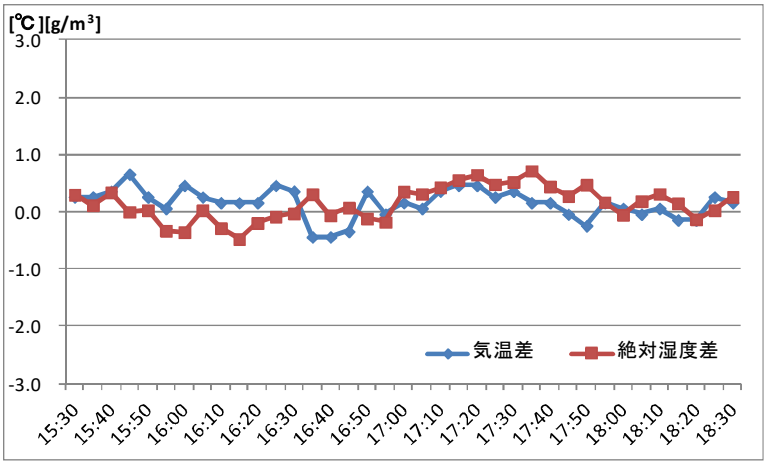


図 4.16　E－D

4.3　自動車排熱による水蒸気移動について

図 4.17 に示す①～⑥の車線を通り、5 分間に交差点を通過した自動車の台数を図 4.18 に示す。南側歩道Ａ点と北側歩道Ｂ点の間を通過した自動車の台数を図 4.19 に示す。図 4.19 より、５分間にＡＢ間を通過する自動車の台数は約 250 台/5min となっており、自動車排熱はほぼ一定であるといえる。図 4.20 に自動車排熱量(顕熱及び潜熱)を示す。この潜熱の値を水の蒸発潜熱で除して算出した水蒸気量 W を図 4.21 に示す。水蒸気量 W は単位長さ単位時間あたり 0.06～0.08g/m･s である。

図 3.15 のモデルを用いて、夏季と同様に自動車排熱による絶対湿度上昇量を算出する。算出した値とＢ点とＡ点の絶対湿度の差、風速を図 4.22 に示す。図 4.22 より、自動車から排出される水蒸気による絶対湿度上昇量はほぼ一定であるのに対して、Ｂ点とＡ点の絶対湿度差は変動していることから、Ｂ点とＡ点の絶対湿度差は、自動車から排出される水蒸気によるものではないといえる。

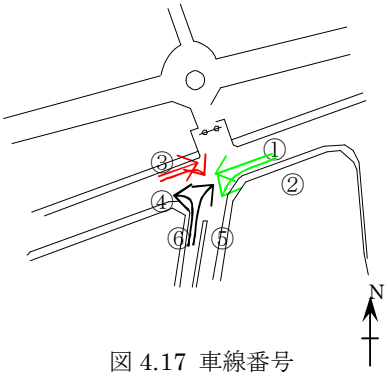


図 4.17 車線番号

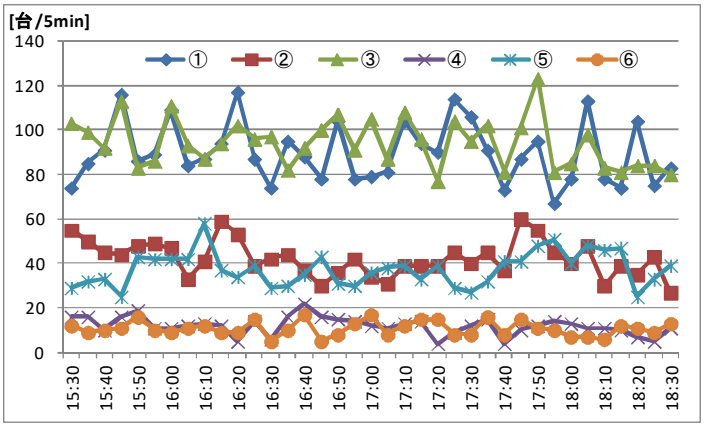


図 4. 18　交通量

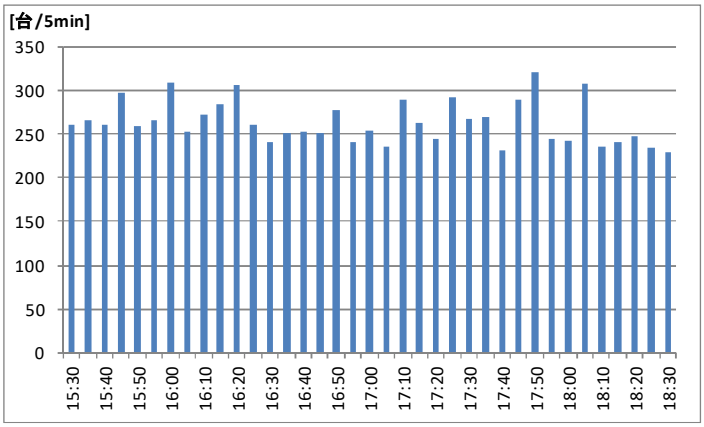


図 4. 19　ＡＢ間を通過した自動車の台数

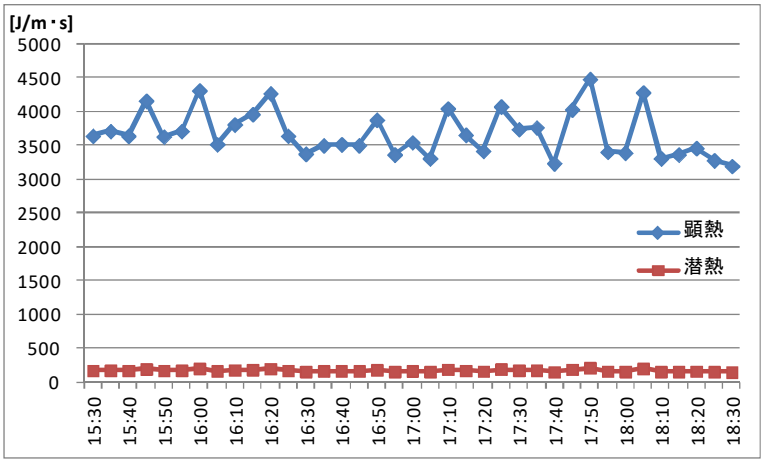


図 4.20　自動車排熱量

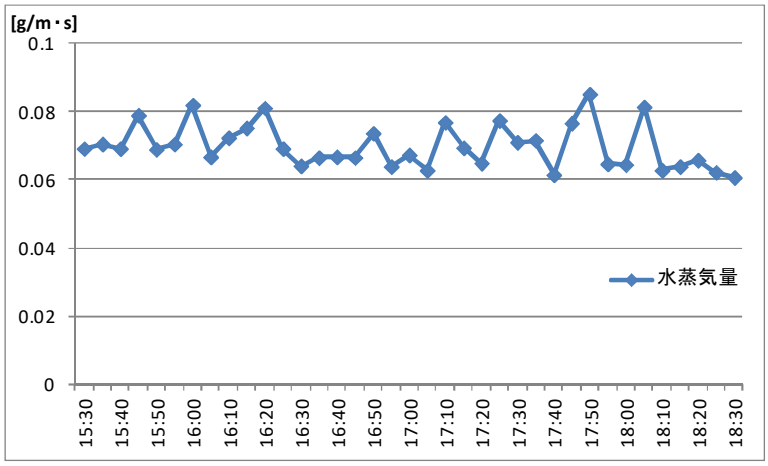


図 4.21　水蒸気量w

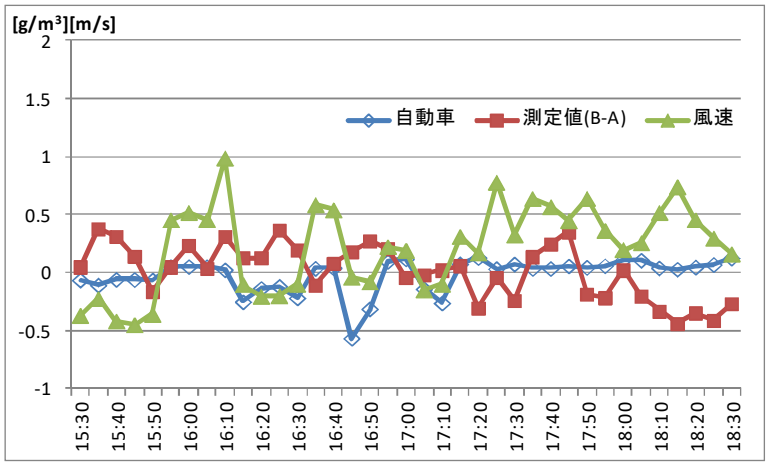


図 4.22　測定値と計算値(絶対湿度)

4.4　樹木の蒸散による水蒸気移動について

Ｂ点の絶対湿度がＡ点よりもわずかに高いので、図 3.18 のモデルを用いて、夏季と同様に以下の式より絶対湿度上昇量の算出を行った。実測当日の日の入り時刻(日没)は 16:52 である。算出した値とＢ点とＡ点の絶対湿度差を図 4.24 に示す。18:00 までは、測定開始直後を除き、概ね近い値を示している。冬季は夏季に比べると植物自体の蒸散量は減少するが、冬季の実測を行った日の全天日射量は夏季の３倍であることも影響し、日射のある時間帯は植物の蒸散によって、絶対湿度の差が生じていると言える。

$$\Delta d_B = \frac{V}{V + V_S}\Delta d_r + \frac{V_S}{V + V_S}\Delta d_s$$

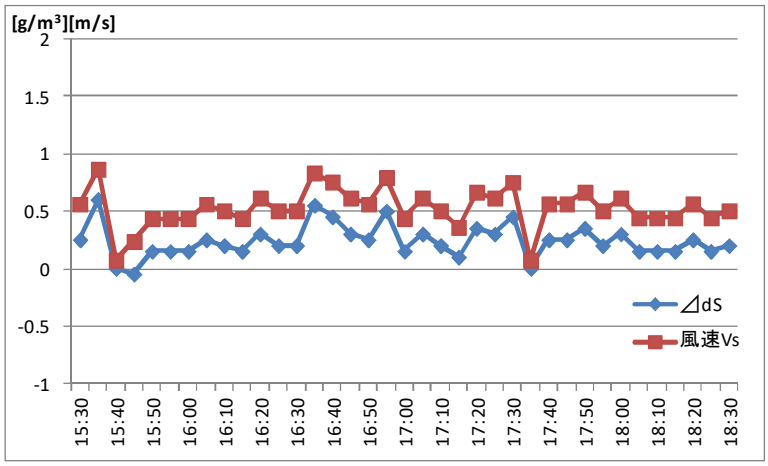


図 4. 23　植物の蒸散による絶対湿度上昇量

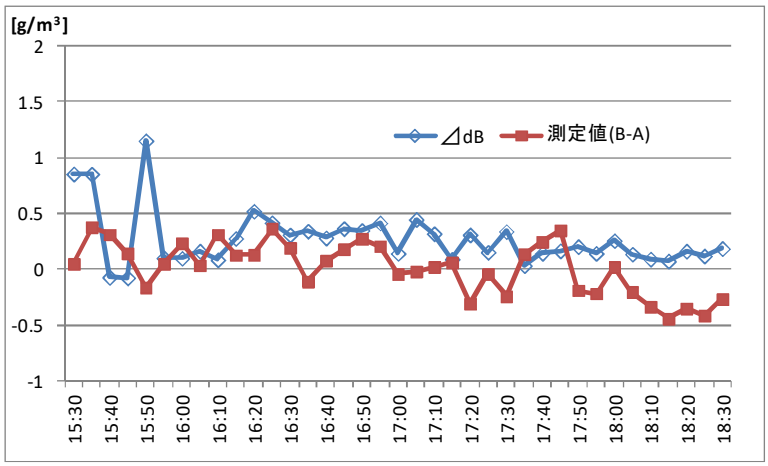


図 4. 24　測定値と計算値(絶対湿度)

4.5　気温変化量

夏季と同様の方法により、気温変化量を算出した。自動車のみの場合を図 4.25 に、自動車と樹木の蒸散の影響を考慮したものを図 4.26 に示す。図 4.25 より、風速Ｖが-0.5~0.5m/s と風が弱いため、自動車による気温変化量は大きく変動している。17:15 以降は風が安定してきているため、気温変化量も安定している。図 4.26 より、算出した値と測定値には大きな差がある。夏季よりも、風向のばらつきが大きかったため差が生じたと考えられる。16:30 より前においては、値が異なっているが、16:30 以降の計算値と測定値の波形は似ているといえる。

$$\triangle t_B = \left(\frac{V}{V+V_s} \triangle E_r - \frac{V_s}{V+V_s} \triangle E_S \right) \div 1006[J/(kg \cdot ℃)]$$

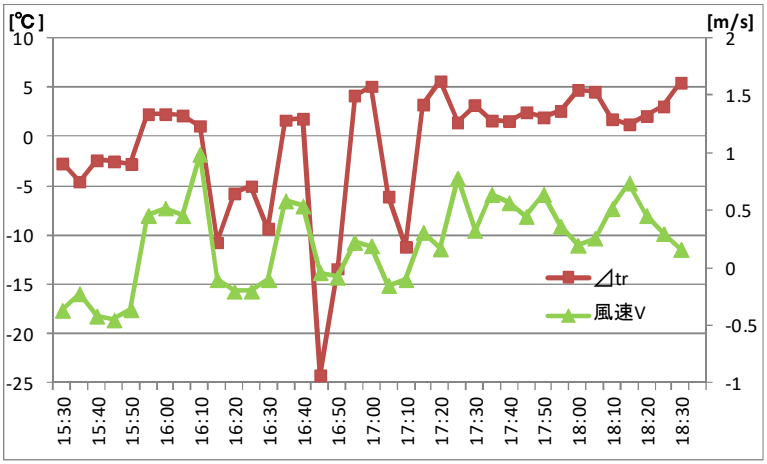


図 4. 25　気温変化量(自動車のみ)

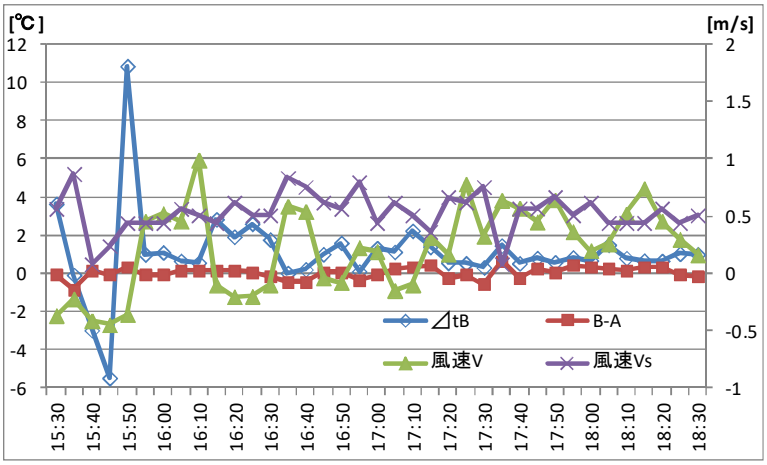


図 4. 26　気温変化量(自動車、蒸散)

第５章　総括

第 5 章　総括

自動車から排出される水蒸気(潜熱)は風の影響を大きく受け、周辺の絶対湿度を上昇させるがその値は、靖国神社のような緑地の密度が高い場所における蒸散量と比較すると圧倒的に少ない値を示す。よって、靖国神社周辺においては植物の蒸散によって発生する水蒸気が周辺の絶対湿度を上昇させると言える。

自動車から排出される顕熱は、植物の蒸散量に匹敵する加熱量を持っている。今回、実測を行った靖国神社周辺は、東京 23 区の中でも植物の蒸散による冷却量が大きいため、相殺される形となったが、交通量が多く、周囲に樹木等の緑地が少ない地域においては、自動車の排熱による加熱の影響は無視できない。本研究では、実測期間が短くデータが乏しいため、水蒸気移動についての考察が予測の域を出るのは困難である。より多くの測定点を設け長期間測定することができれば、靖国神社周辺の熱環境を明らかにすることができるかもしれない。

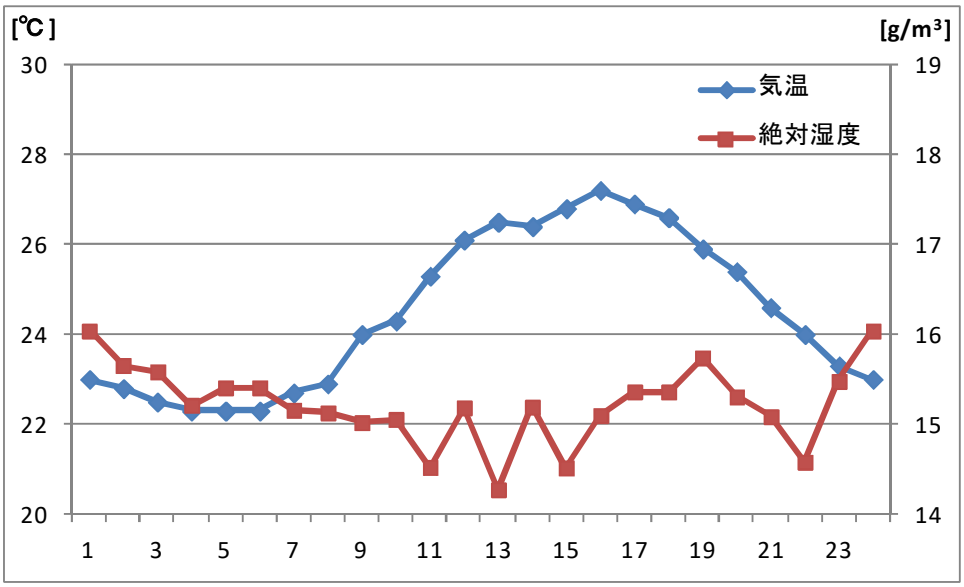
謝辞

本論文を作成するにあたりましては、東京理科大学辻本誠教授には、大変ご迷惑をお掛け致しました。
靖国神社の管理課の皆様、クリマテック株式会社棚橋様、研究にご協力いただき誠にありがとうございました。
院生の皆様とは、たくさんアレを買い集め、やっと手にした銀色の球体によって有意義な学生生活を送ることができました。私が果たすことのできなかったもう一つの夢は、君たちに託します。いつか、研究室を訪れたときにソレがあることを期待しています。

至らぬところは多数ございますが、ここまでこぎつけることができたことに協力していただいた皆様には感謝しております。

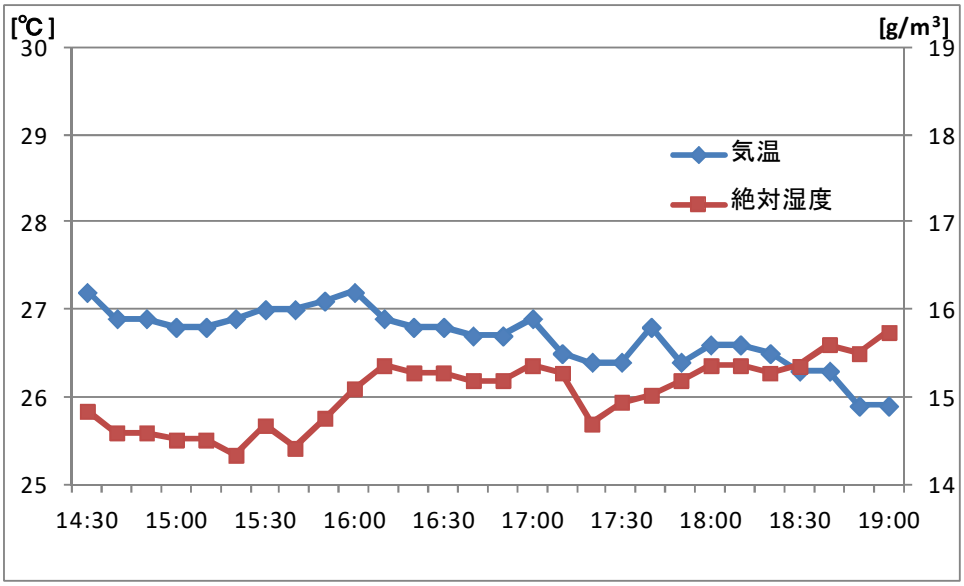
社会がこんなに甘いところではないことは、重々承知いたしております。辻本研にはだいぶ長く居座ってしまったので、今後誰かがこの分野を開拓していってくれることに期待を込めてこの辺で

付録



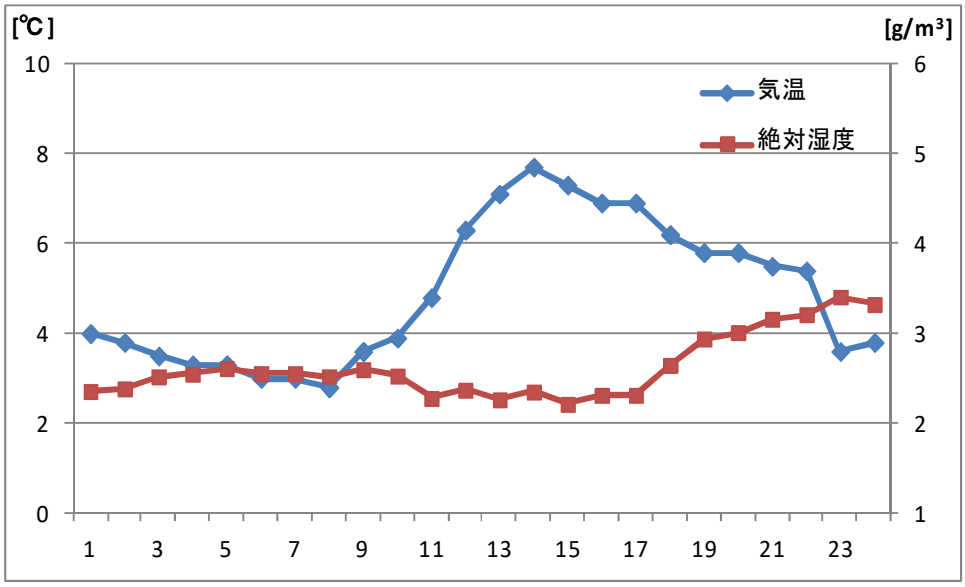
東京　2011年8月1日　**（1時間ごとの値）　一覧**

時	気圧(hPa)		降水量 (mm)	気温 (℃)	絶対湿度 (g/m³)	風向・風速(m/s)		日照時間 (h)	全天日射量 (MJ/㎡)	天気
	現地	海面				風速	風向			
1	1006.8	1011	--	23	16.0	2.1	北北東			
2	1006.7	1010.9	--	22.8	15.7	1.4	北北東			
3	1006.7	1010.9	--	22.5	15.6	2.7	北東			◎
4	1007.1	1011.3	--	22.3	15.2	2.9	東北東			
5	1007.2	1011.4	--	22.3	15.4	2.4	北東	0	0.02	
6	1007.7	1011.9	--	22.3	15.4	1.7	東	0	0.04	◎
7	1007.9	1012.1	--	22.7	15.2	2.1	北東	0	0.25	
8	1008.3	1012.5	--	22.9	15.1	2	北東	0	0.57	
9	1008.6	1012.8	--	24	15.0	2.3	北北東	0	0.95	◎
10	1008.7	1012.9	--	24.3	15.1	2.3	東北東	0	0.86	
11	1008.6	1012.8	--	25.3	14.5	2.2	東	0	1.83	
12	1008.4	1012.6	--	26.1	15.2	2.7	東	0.2	1.96	◎
13	1008.3	1012.5	--	26.5	14.3	1.6	東北東	0.1	1.56	
14	1008.3	1012.5	--	26.4	15.2	1.3	南南西	0	0.4	
15	1008	1012.2	--	26.8	14.5	1.3	南東	0	0.41	◎
16	1007.5	1011.6	0	27.2	15.1	3.1	東南東	0	0.46	
17	1007.8	1012	--	26.9	15.4	3	東南東	0	0.22	
18	1008.3	1012.5	--	26.6	15.4	3	南東	0	0.24	◎
19	1008.7	1012.9	--	25.9	15.7	4.4	東南東	0	0.03	
20	1009.6	1013.8	--	25.4	15.3	2.7	南東		0.01	
21	1010.3	1014.5	--	24.6	15.1	3.8	南東			◎
22	1010.4	1014.6	--	24	14.6	3.1	東			
23	1010.2	1014.4	--	23.3	15.5	2.7	東			
24	1010.1	1014.3	--	23	16.0	3	東北東			



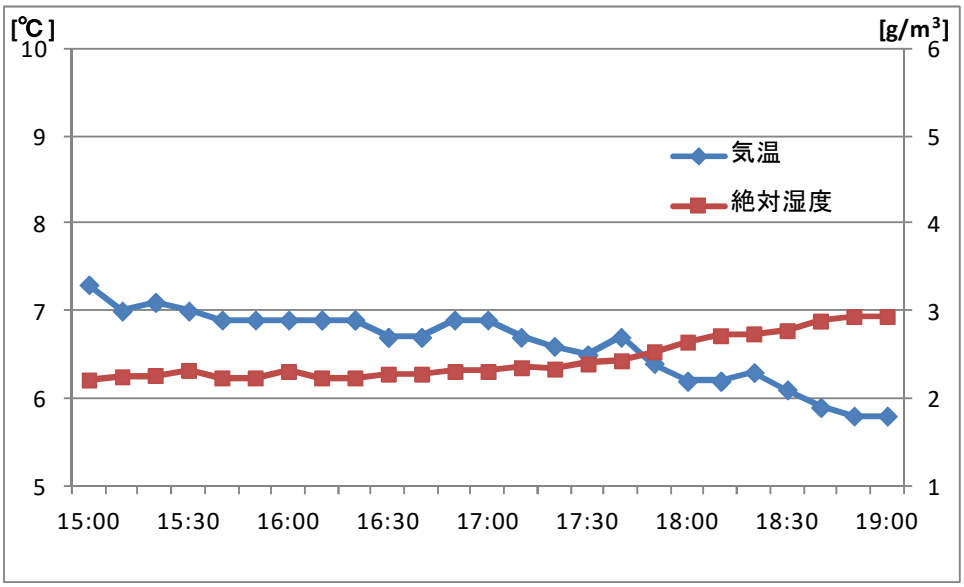
東京　2011年8月1日　（10分ごとの値）　一覧

時	気圧(hPa)		降水量 (mm)	気温 (℃)	絶対湿度 (g/m³)	風向・風速(m/s)		日照時間 (分)
	現地	海面				平均	風向	
14:30	1008.1	1012.2	−	27.2	14.8	1.5	東南東	0
14:40	1008.1	1012.3	−	26.9	14.6	1.1	東南東	0
14:50	1008.1	1012.3	−	26.9	14.6	1.5	南東	0
15:00	1008	1012.2	−	26.8	14.5	1.3	南東	0
15:10	1007.9	1012.1	−	26.8	14.5	1.9	南東	0
15:20	1007.8	1012	0	26.9	14.3	1.7	南東	0
15:30	1007.7	1011.8	−	27	14.7	2.2	南東	0
15:40	1007.5	1011.6	−	27	14.4	1.4	南東	0
15:50	1007.5	1011.6	−	27.1	14.8	2.1	東	0
16:00	1007.5	1011.6	−	27.2	15.1	3.1	東南東	0
16:10	1007.5	1011.6	−	26.9	15.4	2.7	南東	0
16:20	1007.6	1011.8	−	26.8	15.3	2.4	南東	0
16:30	1007.6	1011.8	−	26.8	15.3	2.4	東	0
16:40	1007.7	1011.9	−	26.7	15.2	3.5	東	0
16:50	1007.8	1012	−	26.7	15.2	3.1	南東	0
17:00	1007.8	1012	−	26.9	15.4	3	東南東	0
17:10	1007.9	1012.1	−	26.5	15.3	3.6	南東	0
17:20	1007.9	1012.1	−	26.4	14.7	3.9	南東	0
17:30	1008	1012.2	−	26.4	14.9	2.7	東南東	0
17:40	1008.1	1012.3	−	26.8	15.0	3	東	0
17:50	1008.1	1012.3	−	26.4	15.2	2.6	東北東	0
18:00	1008.3	1012.5	−	26.6	15.4	3	南東	0
18:10	1008.4	1012.6	−	26.6	15.4	1.7	南南東	0
18:20	1008.4	1012.6	−	26.5	15.3	2.4	東南東	0
18:30	1008.4	1012.6	−	26.3	15.4	3.8	南東	0
18:40	1008.6	1012.8	−	26.3	15.6	4.1	南東	0
18:50	1008.7	1012.9	−	25.9	15.5	5	南東	0
19:00	1008.7	1012.9	−	25.9	15.7	4.4	東南東	



東京　2012年1月17日　**（1時間ごとの値）　一覧**

時	気圧(hPa)		降水量(mm)	気温(℃)	絶対湿度	風向・風速(m/s)		日照時間	全天日射量	天気
	現地	海面			(g/m³)	風速	風向	(h)	(MJ/m²)	
1	1012.9	1017.5	--	4	2.4	2.3	北北東			
2	1012.8	1017.4	--	3.8	2.4	3.6	北東			
3	1012.4	1017	--	3.5	2.5	3.7	北東			◎
4	1012.7	1017.3	--	3.3	2.5	2.2	北北東			
5	1013	1017.6	--	3.3	2.6	2.6	北北東			
6	1013.6	1018.2	--	3	2.6	3	北北東			◎
7	1014.4	1019	--	3	2.6	3.8	北東	0	0.01	
8	1015.1	1019.7	--	2.8	2.5	3.4	北北東	0	0.06	
9	1015.8	1020.4	--	3.6	2.6	3.8	北東	0	0.43	◎
10	1015.8	1020.4	--	3.9	2.5	2.5	北北東	0.2	0.77	
11	1015	1019.5	--	4.8	2.3	2.2	北北西	0.9	1.73	
12	1014.2	1018.7	--	6.3	2.4	2.8	北北西	1	2.09	○
13	1013.6	1018.1	--	7.1	2.3	3.3	北北東	1	2.03	
14	1013.4	1017.9	--	7.7	2.4	2.5	北	1	1.76	
15	1013.8	1018.3	--	7.3	2.2	3.4	北東	1	1.32	○
16	1014.5	1019	--	6.9	2.3	2.3	東南東	1	0.68	
17	1015	1019.5	--	6.9	2.3	2.2	東	0.2	0.08	
18	1015.8	1020.3	--	6.2	2.6	2.3	東		0.01	◐
19	1016.5	1021	--	5.8	2.9	3	東			
20	1017	1021.5	--	5.8	3.0	2.9	東			
21	1017.1	1021.6	--	5.5	3.2	1.3	東北東			◐
22	1017.5	1022	--	5.4	3.2	1	東南東			
23	1017.6	1022.2	--	3.6	3.4	1.1	南南西			
24	1017.7	1022.3	--	3.8	3.3	2.7	西北西			



東京　2012年1月17日　**（10分ごとの値）　一覧**

時	気圧(hPa)		降水量 (mm)	気温 (℃)	絶対湿度 (g/m³)	風向・風速(m/s)		日照時間 (分)
	現地	海面				平均	風向	
15:00	1013.8	1018.3	−	7.3	2.2	3.4	北東	10
15:10	1013.9	1018.4	−	7	2.2	2.6	北北東	10
15:20	1014	1018.5	−	7.1	2.3	1.4	東北東	10
15:30	1014.3	1018.8	−	7	2.3	1.5	北北東	10
15:40	1014.3	1018.8	−	6.9	2.2	1.8	北東	10
15:50	1014.4	1018.9	−	6.9	2.2	1.7	北東	10
16:00	1014.5	1019	−	6.9	2.3	2.3	東南東	10
16:10	1014.7	1019.2	−	6.9	2.2	2	南東	9
16:20	1014.9	1019.4	−	6.9	2.2	1.9	北東	1
16:30	1014.9	1019.4	−	6.7	2.3	1.2	東北東	0
16:40	1015	1019.5	−	6.7	2.3	1.6	東南東	0
16:50	1015	1019.5	−	6.9	2.3	1.3	東北東	0
17:00	1015	1019.5	−	6.9	2.3	2.2	東	
17:10	1015	1019.5	−	6.7	2.4	2.5	東北東	
17:20	1015.1	1019.6	−	6.6	2.3	1.7	東	
17:30	1015.2	1019.7	−	6.5	2.4	2.3	東南東	
17:40	1015.6	1020.1	−	6.7	2.4	2.5	東南東	
17:50	1015.7	1020.2	−	6.4	2.5	2.2	東	
18:00	1015.8	1020.3	−	6.2	2.6	2.3	東	
18:10	1015.9	1020.4	−	6.2	2.7	2.6	東	
18:20	1016	1020.5	−	6.3	2.7	2	東南東	
18:30	1016.1	1020.6	−	6.1	2.8	1.9	東	
18:40	1016.1	1020.6	−	5.9	2.9	3.4	東南東	
18:50	1016.4	1020.9	−	5.8	2.9	3	東	
19:00	1016.5	1021	−	5.8	2.9	3	東	

国立天文台　　東京

年月日	出	方位[°]	南中	高度[°]	入り	方位[°]
2011/8/1	4:48	66.7	11:47	72.5	18:46	293.1
2011/8/2	4:49	67.1	11:47	72.2	18:45	292.8
2011/8/3	4:50	67.4	11:47	72	18:44	292.4
2011/8/4	4:51	67.7	11:47	71.7	18:43	292.1
2011/8/5	4:51	68	11:47	71.4	18:42	291.8
2011/8/6	4:52	68.4	11:47	71.2	18:41	291.4
2011/8/7	4:53	68.7	11:47	70.9	18:40	291.1
2011/8/8	4:54	69.1	11:47	70.6	18:39	290.7
2011/8/9	4:55	69.4	11:47	70.3	18:38	290.3
2011/8/10	4:55	69.8	11:47	70	18:37	290
2011/8/11	4:56	70.2	11:46	69.7	18:36	289.6
2011/8/12	4:57	70.5	11:46	69.4	18:35	289.2
2011/8/13	4:58	70.9	11:46	69.1	18:34	288.9
2011/8/14	4:58	71.3	11:46	68.8	18:33	288.5
2011/8/15	4:59	71.7	11:46	68.5	18:32	288.1
2011/8/16	5:00	72.1	11:45	68.2	18:30	287.7
2011/8/17	5:01	72.5	11:45	67.9	18:29	287.3
2011/8/18	5:02	72.9	11:45	67.6	18:28	286.9
2011/8/19	5:02	73.3	11:45	67.3	18:27	286.5
2011/8/20	5:03	73.7	11:45	66.9	18:25	286.1
2011/8/21	5:04	74.1	11:44	66.6	18:24	285.7
2011/8/22	5:05	74.5	11:44	66.3	18:23	285.3
2011/8/23	5:05	74.9	11:44	65.9	18:22	284.8
2011/8/24	5:06	75.4	11:44	65.6	18:20	284.4
2011/8/25	5:07	75.8	11:43	65.3	18:19	284
2011/8/26	5:08	76.2	11:43	64.9	18:18	283.6
2011/8/27	5:09	76.6	11:43	64.6	18:16	283.1
2011/8/28	5:09	77.1	11:42	64.2	18:15	282.7
2011/8/29	5:10	77.5	11:42	63.9	18:14	282.2
2011/8/30	5:11	78	11:42	63.5	18:12	281.8
2011/8/31	5:12	78.4	11:42	63.2	18:11	281.4