

靖国神社周辺の水蒸気移動に関する実測

辻本研究室

学籍番号 4109632

紅谷 真司

1. 研究背景及び目的

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。

また、神田²⁾や三宅³⁾により幹線道路周辺で実測は行われているが、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。

本研究では、実測データが少なくその影響が明らかで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する。

2. 実験概要

図1に示す靖国神社及び九段坂上交差点周辺で、表1の概要に従って、夏季(8月1日)および冬季(1月17日)に乾湿球温度(アスマン通風乾湿計)、風速(超音波風速計)、交通量(ビデオ撮影)を測定した。夏季の計測結果から、靖国神社の植物蒸散、靖国通りの自動車交通に伴う放熱と水蒸気発生の外気条件への影響を考察し、冬季の測定結果で検証した。

3. 実験結果(夏季)

3.1 気温、絶対湿度

表2は、14:30~19:00までの各点の気温と水蒸気分圧を平均したものである。気温は南側歩道A点から遠ざかるにつれて、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点を比べると、E点の気温が低く、絶対湿度が高くなっているため、蒸散の影響があると考えられる。

図3に北側歩道B点と南側歩道A点の気温差と絶対湿度差と気象庁(東京)の全天日射量を示す。図3より、B点とA点には気温差と絶対湿度差が生じており、全天日射量の低下とともにその差はなくなっていくことがわかる。この差が生じた原因として、自動車交通及び植物蒸散が挙げられる。そこで道路空間と神社空間をモデル化し、それらの影響を考察する。

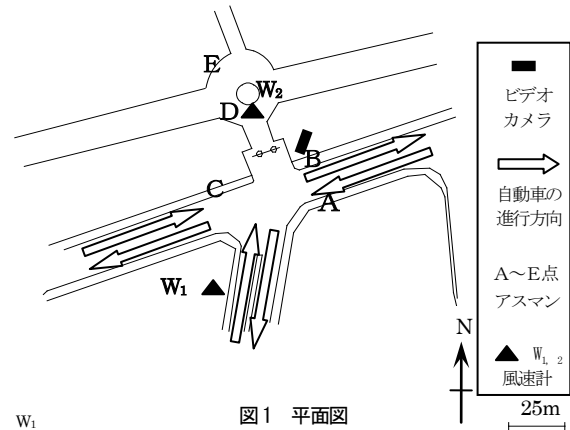


図1 平面図

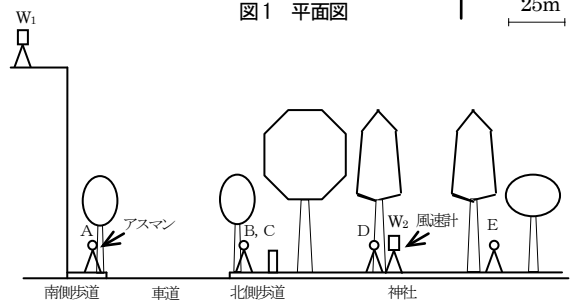


図2 測定点

表1 実験項目

| 日時 | | 天気 | | |
|------------------------|-----------|---|-------|------|
| 2011年8月1日 14:30~19:00 | | 曇り | | |
| 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 |

表2 平均値

| | A | B | C | D | E |
|------------------------------------|------|------|------|------|------|
| 気温[°C] 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 |

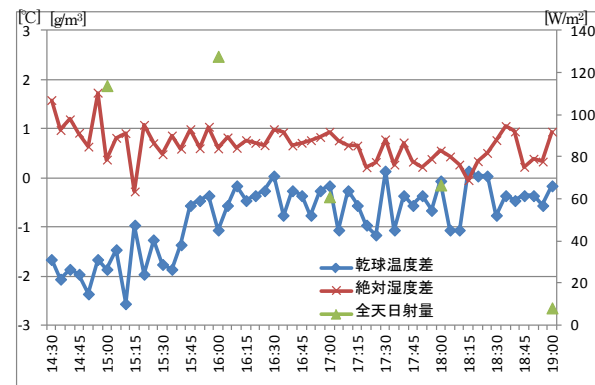


図3 B点—A点

3.2 風速

南側歩道A点から北側歩道B点への風速を図4に示す。全ての時刻において正の値を示しているので、測定期間中、風はA点からB点へ吹いている。14:30～16:00のAB方向の平均風速は0.43m/s、16:00～19:00は0.81m/sであり、16:00前後で風速は約2倍になっている。表2は16:00前後の気温と絶対湿度の平均値を示している。表2より、風速の増加によって、風上A点と風下B点の気温差、絶対湿度差は減少することが分かる。

3.3 自動車排熱量

南側歩道A点と北側歩道B点の間を5分間に通過した乗用車の台数を図5に示す。14:30の値は14:25～14:30にAB間を通過した乗用車の台数を表している。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であることから、表3の速度20km/h、乗用車9～20時の値を使用し、自動車排熱量(潜熱)を式①により算出する。

$$\text{自動車排熱量 } Q_L \text{ (潜熱) [J(m}\cdot\text{s)]} = \text{自動車排熱係数 [kcal/(km}\cdot\text{台)]} \\ \times \text{通過台数 [台/5min]} \times 0.045 \times 4.2 \times 1000 \div 300 \text{ [sec]} \quad \text{--- ①}$$

3.4 絶対湿度上昇量(自動車)

図6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 W とする。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 Δd_r を算出する。車道空間から $1m \times Vm \times 3m$ の空気が歩道空間に移動し、その中に含まれる水蒸気のみだけ絶対湿度が上昇すると考えた。 Δd_r 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。

$$\Delta d_r = \frac{W}{3 \times V} \quad \text{--- ②}$$

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8に示す。

(1)5分間の平均風速 V を使用し、図6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、時刻を図7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8より、計算値の平均値は $0.06g/m^3$ 、測定値の平均値は $0.68g/m^3$ であることから、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。

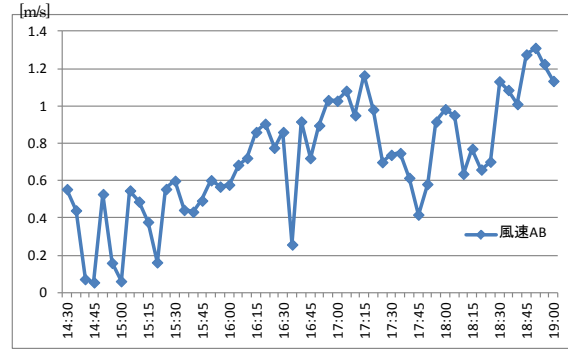


図4 AB方向の風速

表3 16:00前後の平均値

| | A | B | C | D | E |
|-----------------------|------|------|------|------|------|
| 気温[°C] 14:30-16:00 | 28.6 | 27.1 | 27.1 | 26.9 | 26.5 |
| 気温[°C] 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 |

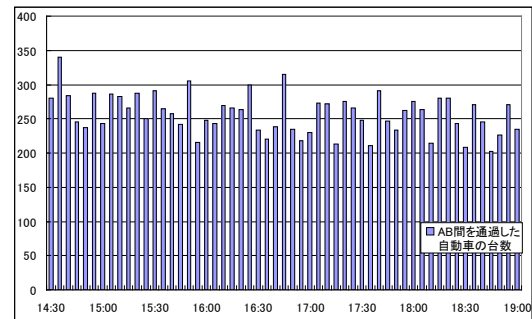
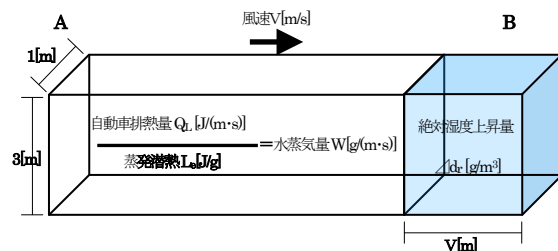


図5 AB間を通過した乗用車の台数

表4 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 |



| | |
|--------------------------|-------------------------------|
| 自動車排熱量 Q_L [J(m・s)] | 蒸発潜熱 L_r [J/g] (=2435、27°C) |
| 風速 V [m/s] | 水蒸気量 W [g(m・s)] |
| 絶対湿度 Δd_r [g/m³] | |

図6 水蒸気移動モデル

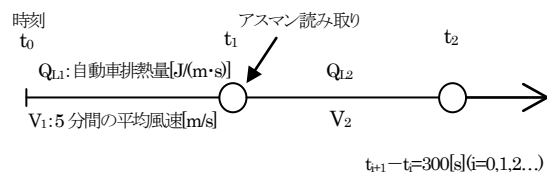


図7 各値の対応関係

3.5 絶対湿度上昇量(緑地)

緑化に関する調査⁴⁾より8月のくもりの単位時間単位面積あたりのイチョウの蒸散量は $0.043\text{g}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ 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9のモデルで緑地から流出する水蒸気量を推定する。図3のA、B間の乾球温度差が緑地からの冷気によると考えると、緑地からの蒸散量は緑地の周辺との温度差に伴う対流で流出する水蒸気量に等しくなる。仮に温度差： 1°C とすると、以下の式を用いて

$$G = \frac{2}{3} \alpha B \sqrt{2g \rho_E (\rho_E - \rho_A)} \left(\frac{H_2}{2}\right)^{3/2} [\text{kg}/\text{s}]$$

緑地外へ流出する水蒸気量は約 19.6 g/kg (DA) となり、緑地の中(モデルの左右に冷気が流出するとして)約 400m になり、整合しない。また、対流により起こる風速の $H=1.5\text{m}$ での値は下式で計算できる。

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

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。北側歩道B点の絶対湿度上昇量 Δd_B を自動車排熱による絶対湿度上昇量 Δd_r と神社内の植物の蒸散による絶対湿度上昇量 Δd_s 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10に示す。

$$\Delta d_B = \frac{\Delta d_r + \Delta d_s}{2} \quad [\text{g}/\text{m}^3]$$

図10より、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、木々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冬季の測定をすることにより、この仮説を検証する。

3.6 分子拡散による水蒸気の移動

水蒸気は、水蒸気圧でも移動する。この量の大小を検証するため、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。単位面積を単位時間に通過する水蒸気の質量を④式により算出する。求めた値を図11に示す。

$$w = -D \frac{\rho_B - \rho_A}{18} \quad \text{————— ④}$$

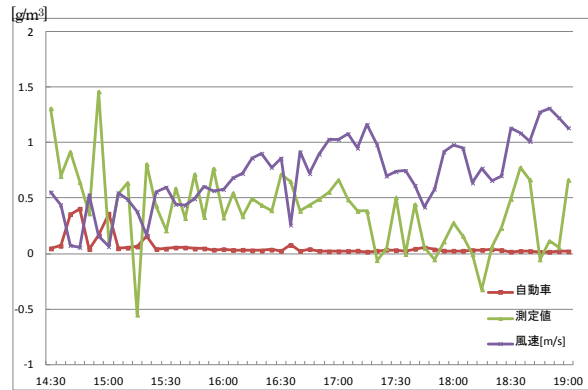


図8 測定値と計算値(絶対湿度)

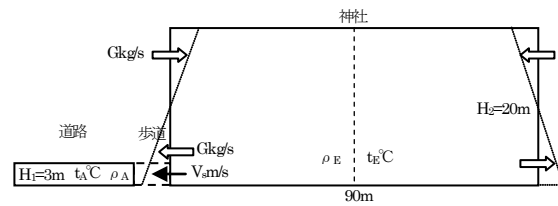


図9 靖国緑地の断面モデル

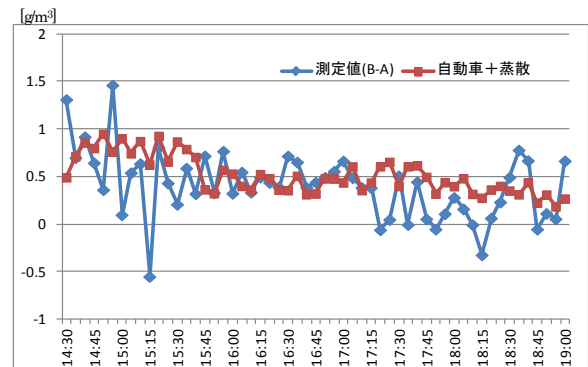


図10 測定値と計算値(絶対湿度)

w: 単位面積を単位時間に通過する水蒸気の質量 $[\text{g}/(\text{m}^2\cdot\text{s})]$
 D: 拡散係数 $[\text{m}^2/\text{s}] (=0.26 \times 10^{-4})$
 ρ_A : A点の絶対湿度 $[\text{g}/\text{m}^3]$
 ρ_B : B点の絶対湿度 $[\text{g}/\text{m}^3]$

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11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 $0.02\text{g}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ 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。

3.7 気温変化量

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6のモデルの自動車排熱量 Q_s (潜熱)を自動車排熱量 Q_s (顕熱)に換え、自動車排熱によるB点のエンタルピー上昇量 ΔE_B [J/kg(DA)]を式(7)、(8)より算出する。

$$\text{自動車排熱量 } Q_s \text{ (顕熱) [J/(m}\cdot\text{s)]} = \text{自動車排熱係数 [kcal/(km}\cdot\text{台)]} \\ \times \text{通過台数 [台/5min]} \times 0.955 \times 4.2 \times 1000 \div 300 \text{ [sec]} \dots (7)$$

$$\Delta E_B = \frac{Q_s \text{ [J/m}\cdot\text{s]} \times 1}{3 \text{ m} \times V \text{ [m]} \times \rho \text{ [kg/m}^3\text{]}} \dots (8)$$

神社内からは植物蒸散による絶対湿度上昇量 Δd_s 分、冷却されると考える。A点を基準としたときのB点の気温変化量 Δt_B を式(9)より算出する。気温変化量 Δt_B とB点とA点の気温差(B-A)を図11に示す

$$\Delta t_B = \left(\Delta E_B - (\Delta d_s \times \text{蒸散熱} \quad L_e \times \frac{1}{\rho}) \right) \div 106 \text{ [J/(kg}\cdot\text{°C)]} \dots (9)$$

風速0.2m/s以下の場合を除けば、概ね測定値と計算値は近い値を示しているため、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言える。

4. 実験結果(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15:30~18:30まで行った。

4.2 気温、水蒸気分圧

表4は、15:30~18:30までの各点の気温と水蒸気分圧を平均したものである。A~E点の水蒸気分圧はほぼ等しく、道路沿いのA~C点の気温が神社内のD、E点に比べて高いことから、神社内の樹木の蒸散は起きておらず、道路沿いの点が自動車により加熱されていると考えることができる。

4.3 絶対湿度上昇量(自動車及び緑地)

図6及び図9のモデルを用いて求めた絶対湿度上昇量 Δd_B と北側歩道B点と南側歩道A点の絶対湿度差(B-A)を図13に示す。

5. 総括

靖国神社周辺の水蒸気は植物蒸散によるものが大きいと考えられるが、今回行ったモデル化では水蒸気移動を明らかにすることはできなかった。

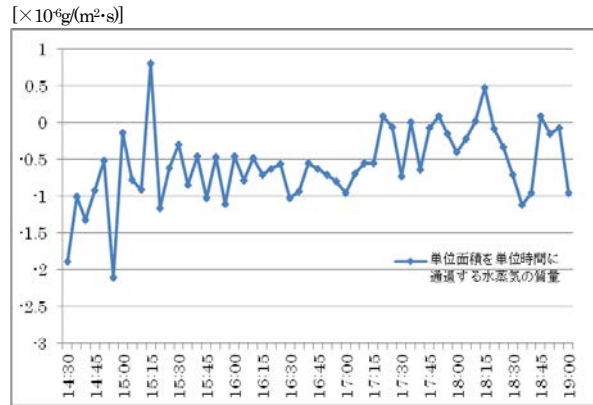


図11 絶対湿度勾配による水蒸気の移動量

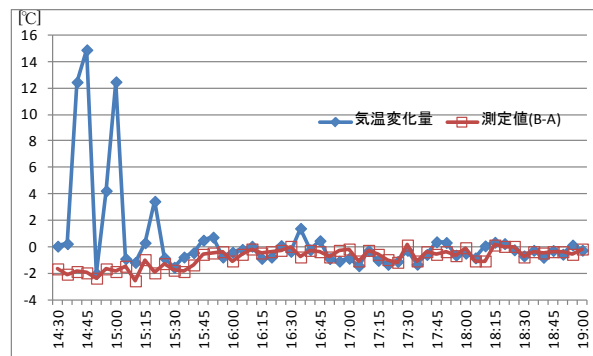


図12 測定値と計算値(気温変化量)

表5 平均値

| | A | B | C | D | E |
|------------------------|-----|-----|-----|-----|-----|
| 気温[°C] 15:30~18:30 | 7.1 | 7.2 | 7.0 | 6.5 | 6.6 |
| 絶対湿度[g/m³] 15:30~18:30 | 3.2 | 3.2 | 3.2 | 3.1 | 3.3 |

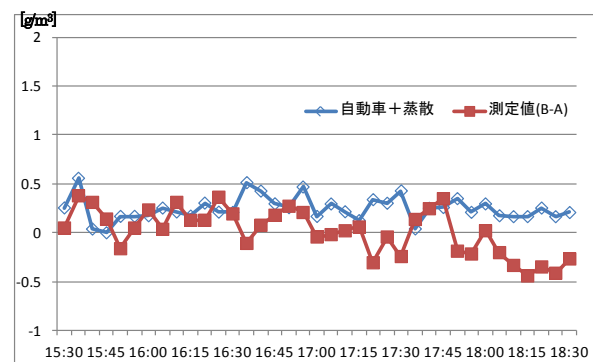


図13 測定値と計算値(絶対湿度)

参考文献

- 1) 足永靖信 空気調和・衛生工学論文集 No29 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) 上田政文 温度と蒸発 基礎から計測技術まで コロナ社
- 5) 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