

# 水辺建築の形態と水の冷却効果の関係について

芝 輝斗

## 1.はじめに

### 1-1.研究背景と目的

水辺に建つ建築物は古今東西多く存在している。これらの建築物は景観や宗教、レクリエーションなどの理由から水辺に建つことが多い。現代の建築物においては、地球温暖化の影響から、水の冷却効果を期待しているものが多い。例えば、静岡県にあるROKI Grobal Innovation Centerや栃木県にあるOn the waterなどが挙げられる。今後もそのような建築物が増えていくだろう。しかしながら、どのような建築の形態が冷却効果が大きいのか明確に記されている論文や書籍は目にする事ほとんどない。本研究では、建築物の配置や形態と水の冷却効果の関係性とその要因を明らかにすることを目的とする。

### 1-2.既往研究

これまでに、水辺建築物の形態や配置のパターンの分類を行っている研究<sup>1)</sup>があるが、分類分けされたそれぞれのパターンに対して、水の冷却効果を調べておらず、分類わけに留まっており、具体的な数値が示されていない。また、水辺の建築に対し実測を行っている研究<sup>2)</sup>や水面を持つ建築物に対してCFD解析<sup>3)</sup>を行った研究<sup>4)</sup>があるが、それぞれ1つの建築物しか対象としておらず、どのような形態が冷却効果に起因するか理解することはできない。建築物ごとに水の冷却効果を比較している研究はこれまでに見られない。CFD解析と比較して、実測では多くの時間を有するため、様々な建築物の配置や形態を比較するのは困難である。したがって、CFD解析を用いることで多くの建築物の形態や配置パターンを比較することができる。そのようにして建築物の形態や配置と水の冷却効果の間にある関係性を調べることで、今後、水辺に建つ建築物を設計する上で有効な手掛かりとなりうると考えられる。

## 2.解析・実験

### 2-1.解析対象

本研究では、池、川、水盤などのそばに建つ建築物を対象とし、その中でも異なる形態と地域性をもつ7つの建築物を解析対象とした。以下、それぞれの建物に対し、表1のようにSample No.として表記する。各の建築物に対して、風向、風力、建物高さなどのパラ

Sample No.	建物名	地域	相対湿度	屋外気温
1	神奈川県立近代美術館	神奈川	71.0%	31.6℃
2	真言宗本福寺水御堂	淡路	53.5%	34.2℃
3	鈴木大拙館	金沢	53.0%	33.6℃
4	ヒラルディ邸	メキシコシティ	28.0%	27.0℃
5	Hotel Punta Caliza	カンクン (メキシコ)	68.0%	31.0℃
6	松原市民図書館	大阪	48.5%	34.3℃
7	落水荘	ピッツバーグ	45.0%	26.6℃

表1 解析対象基本情報<sup>7)</sup>

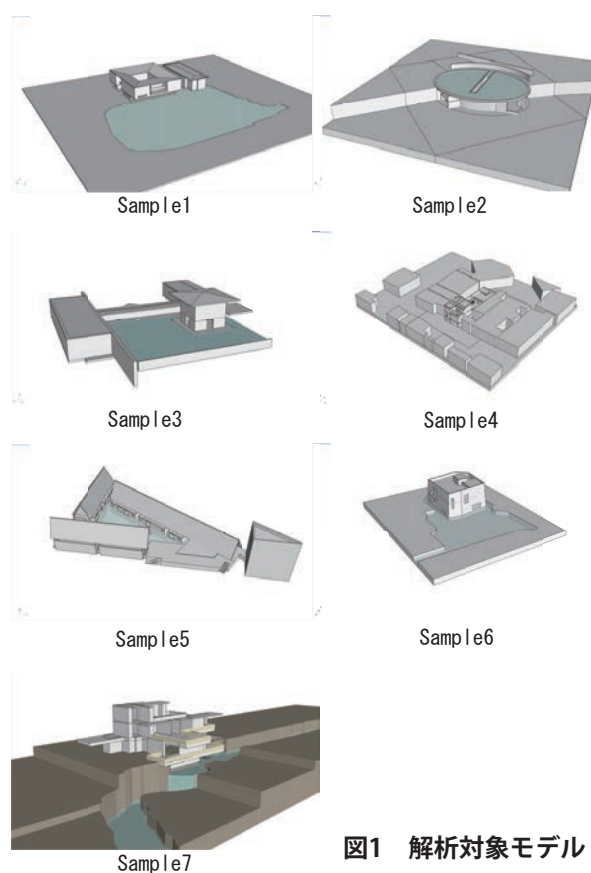


図1 解析対象モデル

メータを変化させ、どのような傾向が見られるかCFD解析を行った。

### 2-2.解析手法

最初に解析対象としている建築物を三次元CADソフト<sup>5)</sup>を用いて図1のようにモデリングを行った。モデリングを行うために書籍<sup>6)</sup>から図面を参照している。水の冷却効果についてCFD解析を行うためには、空気温度、水温、風速、風向、相対湿度、水面における発熱量、蒸発量を与える必要がある。空気温度と相対湿度に関しては、気象データから引用している。建築物が日本にある場合は、気象庁が提供しているCSVデー

タから過去3年分の8月の最高気温と最低湿度の平均値を用いた。ただし、日照時間が3時間以下の日は除いている。建築物が海外にある場合は、epwデータ<sup>8)</sup>から、8月の最高気温と最低湿度の平均値を利用している。水温に関しては、地域ごとにデータがないため基本的に27℃として設定している。<sup>9)</sup>風向風速に関しては、パラメータを変化させている。水面における熱収支と蒸発量は、それぞれ計算で求めているため、計算方法<sup>10)</sup>を以下に示す。<sup>11)</sup>

顕熱フラックス  $Q_H = \rho C_p C_H U (T_s - T_a)$

潜熱フラックス  $Q_E = \rho L C_E U (q_s - q_a)$

水表面温度 $T_s$ [K]に対する空気の飽和比湿

$$q_s = (0.622 \times 6.11 \times 10^{(7.5T_s / (237.3 + T_s))}) / (P - 0.378 \times 6.11 \times 10^{(7.5T_s / (237.3 + T_s))})$$

気温 $T_a$ [K]に対する空気の比湿

$$q_a = (0.622 \times 6.11 \times 10^{(7.5T_a / (237.3 + T_a))} \times H_w) / 100 / (P - 0.378 \times 6.11 \times 10^{(7.5T_a / (237.3 + T_a))} \times H_w) / 100$$

水面温度に対する放射[W/m<sup>2</sup>]

$$L_s = \epsilon_s \sigma T_s^4$$

大気放射[W/m<sup>2</sup>]

$$L_a = \epsilon_a \sigma T_a^4$$

水面における発熱量[W]

$$E = (Q_H - Q_E + L_s - L_a) \times S$$

水面における蒸発量H[g/h]

$$H = 3600 \times 1000 \times S \times (Q_H + Q_E) / (Q_H / Q_E + 1) / L$$

次に、作成したモデリングデータをCFD解析ソフト<sup>12)</sup>に取り込み、気象データをもとに気温、相対湿度を設定する。風速、風向に関しては、パラメータとしているためその都度変化させている。水面における熱収支を再現するために水面に発生エリアという水面と同じ面積の発熱体を設け、その発生エリアに、水表面温度、水面における発熱量、蒸発量を設定することで、水面の蒸発現象を再現した。データをすべて入力し、定常解析<sup>13)</sup>を行った。<sup>14)</sup>本研究では、解析対象のパラメータとして、風向、風速、水面に対する建物の出幅、建物の高さ、地域差の5つとした。

解析終了後、各建物に対して主要な空間に領域を定めその領域内の解析値をCSVデータに書き出し、領域内平均温度を求め、領域内の温度分布をグラフ化する。建物の平面、断面の温度分布図と領域内温度分布を示すグラフをフォーマットにまとめ、領域内平均温度とともにそれぞれの解析結果の比較を行った。本研究では、基本的に領域内の平均温度と屋外空気温度の差で水の冷却効果を評価する。ここでは、この差を平均低下温度と呼ぶことにする。

### 3.解析結果

#### 3-1.結果と分析

(風向) <sup>15)</sup>図2に解析結果をまとめている。Sample6では、最も領域内の平均空気温度が小さくなったのは、ver1の風上に建築物がある時であり、外気温と比べ1.8℃小さくなった。次に領域内平均空気温度が小さくなったのがver2の風上に水面があるときであるが、外気温との差はわずか0.2℃となりほとんど温度低下は見られなかった。その他二つの風向についても同様に、領域内の温度低下は小さかった。

Sample3でも最も領域内平均空気温度が小さくなったのは、建物が風上にあるときである。Sample3の領域のある建物は2面で水面と接しているため建物が風上となる場合がver2,ver3の2方向存在する。それぞれ領域内の平均空気温度が1.3℃、2.2℃低下した。Sample6と同様に、残りの二つの風向ではあまり変化が見られなかった。

(風速) <sup>16)</sup>Sample2は唯一屋根の上に水面がある建物であり、他の建物と傾向が異なっていた。図3を見る

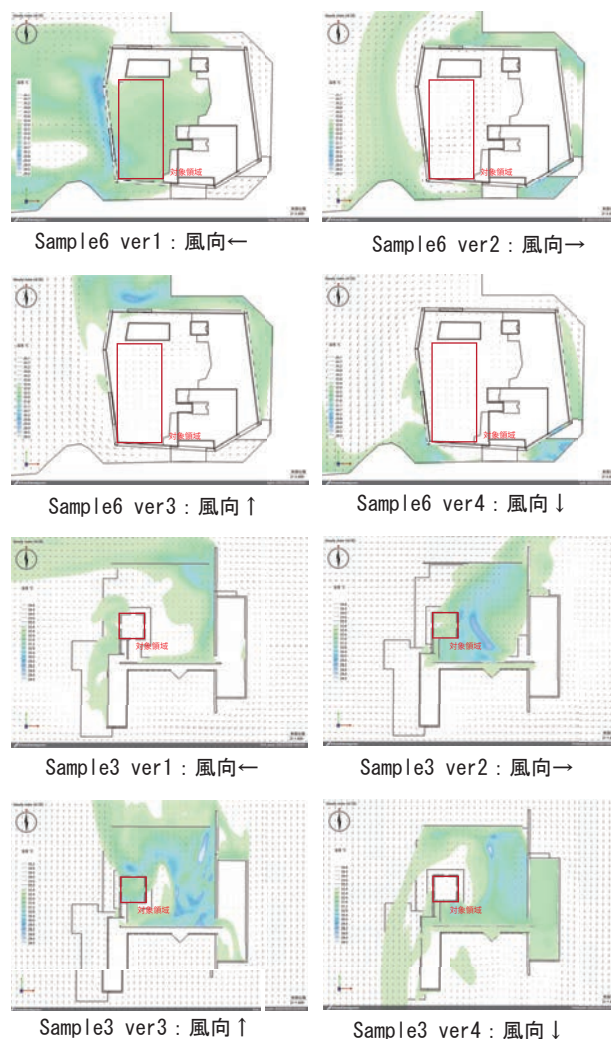


図2 風向による冷却効果の違い



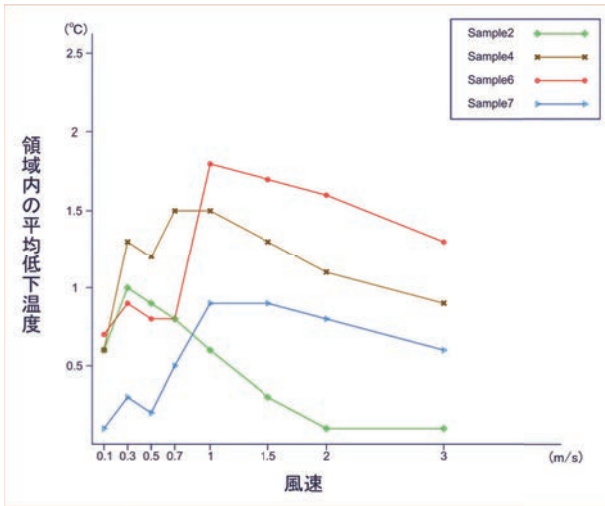


図3 風速の違いによる冷却効果の比較

と、Sample2では風速0.3m/sの時、領域内の低下温度が1℃と最も大きくなった。風速が大きくなるにつれて、徐々に空気温度の低下が見られなくなった。

Sample5、6、7では、最も冷却効果が得られる風向である、領域のある建物が風上に来るように設定している。風速0.1m/sの時では、それぞれ0.6、0.6、0.1℃とあまり空気温度が低下しなかった。その後風速を大きくするにつれ徐々に冷却効果が大きくなり、3つの建物それぞれでおおよそ1.0m/sの時に最も領域内の空気温度が低下した。その時の低下温度は、それぞれ1.5、1.8、0.9℃である。さらに風速大きくすると、大きくするにつれて低下温度が小さくなった。3.0m/sの時、それぞれ、0.9、1.3、0.6℃低下し、0.1m/sの時よりも大きく低下した。

(出幅)<sup>17)</sup>Sample1は二階のボリュームが大きく水面に張り出している。この出幅を変化させた。風向は建物が風上、風速1.0m/sとしている。変化していない状態で9000mm張り出している。この時の領域の空気温度は、0.3℃しか低下していない。さらに、張り出してみたが、目立った変化は見られなかった。張りだし距離を小さくしていくと、3000mm張り出したとき最大となった。その時の領域内の低下空気温度は1.3℃である。今度は2階ボリュームを張り出さず、水面に対して後退させると、低下温度が小さくなった。その時の領域内の低下空気温度は0.4℃である。

(高さ)<sup>18)</sup>先程最も温度が低下していたSample1の出幅3000mmの高さを変化させて解析を行った。初期

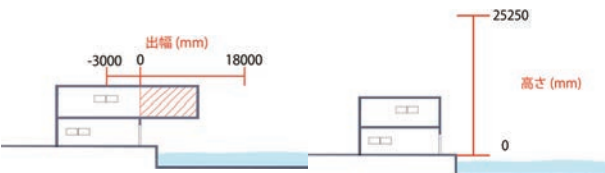
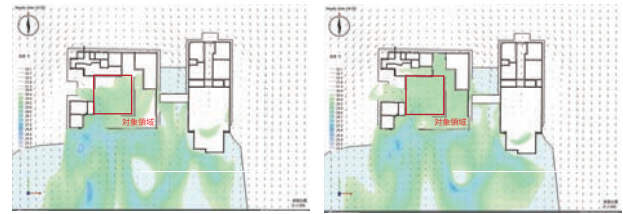


図4 高さとお幅のパラメータ



Sample1 ver5  
風向↓、風速1m/s  
出幅3000mm

Sample1 ver11  
風向↓、風速1m/s  
高さ12750mm

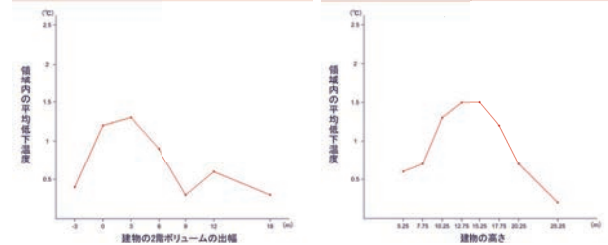


図5 出幅と高さで冷却効果

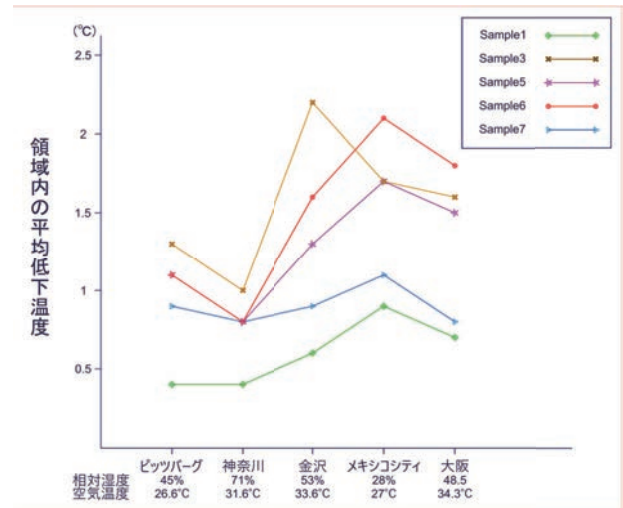


図6 地域データごとの冷却効果の違い

値では10250mmである。これより高さを小さくすると領域内の低下温度が小さくなった。反対に高さを高くしていくと低下温度が大きくなり、12750～15250mmあたりで最大となった。その時の低下温度は1.5℃である。さら高くしていくと低下温度は小さくなった。

(地域)<sup>19)</sup>特に気象データに地域差があるSample1、3、4、6、7の5つの気象データをそれぞれに当てはめて解析を行った。各地域の気温と相対湿度は表1の通りである。最も低下温度が小さかった地域は神奈川である。反対に最も低下温度が大きくなった地域はメキシコシティとなった。また、Sample3、6のような水面のそばに建つ建物がどの地域においても高い値を示した。Sample1のような水面に対して張り出した形態や、Sample7のような水面の上に建物がある形状は領域内の低下温度が低い値を示した。

## 4. 結び

### 4-1. 総合考察

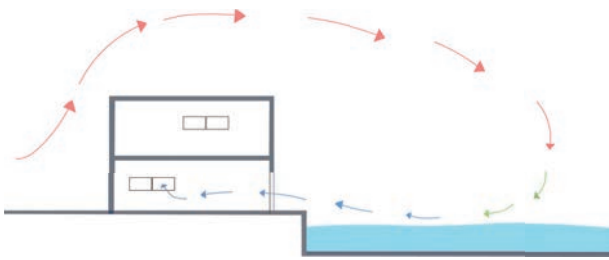


図7 風上が建物にある時の空気の流れ

本研究では、5つのパラメータを設定したことでそれぞれの傾向をつかむことができた。

まず、風向に関しては建物が風上になる方向が冷却効果が最も大きくなる。一見、水面が風上となる方向の方が冷却効果が大きくなると思われがちだが、そのような結果は得られなかった。この理由としては、水面が風上になると障害物がないため、空気が十分に冷却されないからと考えられる。風上に建物がある場合は図7のように、建物が風がぶつかり、風速が弱まり、建物の上を越え、渦巻いて水面を通過して建物が風に入る。結果的に、空気が十分に冷やされて冷却効果が大きくなると考えられる。Sample2の風速を変化させた際に、Sample2のみが0.3m/sの時最も冷却効果があった。Sample2は建物の屋根に水面があり、風を遮る障害物がないからであろう。このことから、冷却効果を十分に得るためには風速が関係してくる。しかしながら、解析結果を見てもわかるように、遅ければよいということでもない。なぜなら、蒸発熱は風速に比例して大きくなるからである。これらのことを踏まえると、図2より風上が建物側にある場合は風速1.0m/sあたりが冷却効果が最も大きくなる。風上が水面側にある場合は風速0.3m/sあたりが冷却効果が最も大きくなる。

次に出幅と建物の高さで空気温度の関係についてである。出幅0～3000mmのときが最も領域内空気温度が低下した。この時、風上に建物があり、上を越えて風が渦巻いて建物が冷却された空気が入る。そのため、出幅を大きくした方が水面の上を通る距離が長くなるように考えられるが、結果はそうではなかった。確かに、水面を通る距離は出幅が大きい方が長くなったが、ある程度距離があるとそれ以上空気が冷やされなくなっていた。これは、出幅が小さいほうが建物内に入った時の風速が大きかったため、より建物全体に冷えた空気が拡散されたため、領域内の温度低下が大きくなったと考えられる。高さに関しては、12.75～15.25mあたりで最大となり、これより高さが小さくなくても、大きくなっても低下温度は小さくなった。12.75までは高さを高くするほど、建物内に入った時

の風速が大きくなり、冷却された温度がより拡散された。17.25より高さを高くすると、水面を通る風速が大きくなり、あまり冷却されていない空気が領域内に入ったため、低下温度が小さくなった。

最後に、地域差では、最も相対湿度が大きい神奈川の気候が最も冷却効果が小さくなり、最も相対湿度が小さいメキシコシティの気候が冷却効果が大きくなったことから相対湿度が大きく影響すると考えられる。また、水面の横に建つSample3、6においては水面との距離が近いので、冷却効果が大きくなった。水面に2階ボリュームが張り出す形態や、Sample1や水面の上に建つSample7では水面との距離があるため、冷却効果が小さくなった。

#### 4-2.今後の展望

本研究では、パラメータを風向、風速、建物の出幅、建物の高さ、地域性として、一定の傾向をつかむことができた。しかしながら、水面の面積や開口率など、冷却効果に影響するパラメータは他にも存在すると考えられるので、それらを変化させることでどのように空気温度が変化するか調べる価値があるだろう。また、本研究では冷却効果を調べるため、空気温度で評価したが、快適性には湿度も起因するため、空気温度と相対湿度を考慮した不快指数で評価することも必要と考えられる。

#### 注

1. 野村隆太・宇野求「寒冷地の水辺空間における建築形態に関する研究」、日本建築学会大会学術講演梗概集、2013年8月
2. 中山哲士・水出喜太郎「水盤を有する建築物の環境調整効果に関する研究」日本建築学会中国支部研究報告集 第36巻、平成25年3月
3. Computational Fluid Dynamicsの略。流体解析を行う。
4. 会田悟史・絵内正道・羽山広文・森太郎「冷却流水面を有する屋内公開空地のCFD解析に関する研究」日本建築学会大会学術講演梗概集、2004年3月
5. Robert McNeel & Associatesが開発したRhinoを使用している。
6. 新建築、新建築社、pp.236、1992年7月号  
新建築、新建築社、pp.62-67、2012年9月号  
新建築、新建築社、pp.138-143、2022年5月号  
世界建築設計図集3、同朋社、pp.10-17、1984年  
大河内学・廣澤秀真・明治大学大河内研究室、ルイス・バラガン空間の読解、朝国社、pp.140-141、2015年
7. 地域とは気象データに用いた地域である。
8. EnergyPlus weather Dataの略。気象データ。
9. ピッツバーグの屋外気温が小さいため、水温を20℃に設定している。
10. 計算式は以下の書籍を参考にしている  
村上周三、ヴァナキュラー建築の居住環境性能、慶應義塾大学出版会、2008年  
近藤純正、水環境の気象学、朝倉書店、1994年<sup>3</sup>  
浦野良美・中村洋、建築環境工学、森北出版株式会社、1996年
11.  $Q_H$ : 顕熱フラックス[W/kg・K]、 $Q_E$ : 潜熱フラックス[W/m<sup>2</sup>]、 $\rho$ : 大気密度 [kg/m<sup>3</sup>]、 $C_p$ : 大気の定圧比熱1005[J/m<sup>2</sup>]、 $C_H$ : バルク輸送係数 $1.2 \times 10^{-3}$ 、 $U$ : 風速 [m/s]、 $T_s$ : 水面温度[°C]、 $T_a$ : 屋外空気温度[°C]、 $L$ : 単位質量の水に対する蒸発熱 $2460 \times 10^3$ [J/kg]、 $q_s$ : 水面温度に対する空気の飽和比湿、 $q_a$ : 気温に対する空気の比湿、 $P$ : 水面気圧 $1.01325 \times 10^5$ [hPa]、 $H_a$ : 相対湿度[%]、 $L_w$ : 水面温度に対する放射[W/m<sup>2</sup>]、 $L_a$ : 大気放射[W/m<sup>2</sup>]、 $\epsilon_s$ : 水面の長波放射に対する射出率0.96、 $\sigma$ : ステファンボルツマン定数 $5.67 \times 10^{-8}$ [W/m<sup>2</sup>・K<sup>4</sup>]、 $S$ : 水面の面積[m<sup>2</sup>]、 $E$ : 水面における発熱量[W]、 $H$ : 水面の蒸発量[g/h]
12. 株式会社アドバンスドナレッジ研究所が開発するFlowDesignerを用いた。
13. 定常状態を求める解析。
14. 乱流モデルk- $\epsilon$ を用いた。
15. 風速はすべて1.0m/s
16. Sample2の風向は開口部が風下、Sample5、6、7は解析領域のある建物が風上
- 17-19. 風速1.0m/s、風向は建物が風上