湿生植物群落内への水の循環による浅水開水面の水温上昇抑制

辻 盛生 *1)

1) 小岩井農牧株式会社

摘要: 湿生植物による屋上緑化を行う際に、併せて創出する需要が考えられる浅水の開水面では、夏期晴天時の温度上昇が懸念される。湿生植物群落内は温度上昇抑制効果が高いことから、群落内に水を循環させることで水面部の温度上昇を抑える効果が期待できる。水路上に湿生植物を植栽した範囲と水面の範囲を設け、水を循環させて温度をモニタリングした結果、循環させない開水面に比べ、循環させた水面部の温度は最大で 3.0～4.8℃低かった。**キーワード:** 開水面、温度上昇抑制、湿生植物群落、屋上緑化、アゼスゲ

1. はじめに

湿生植物による屋上緑化は、温度上昇抑制効果が高く⁵⁾、浅く水を貯留した状態で育成させることによって荷重を抑えた設計が可能である。また、排水層を必要とする陸生植物と異なり、灌水した水は確実に貯留できるメリットがある。さらに、耐荷重に合わせた雨水の貯留が可能であることから、蒸発散量が多い湿生植物を用いても、雨水を活用し、上水の使用量が少ないシステムを構築可能である。

湿生植物によって屋上緑化を行うにあたり、全面を湿生植物によって被覆するだけでなく、一部分に開水面を設ける需要も考えられる。開水面を設けることによって、景観的に変化をつけることや、飛翔性生物の生息空間の創出が可能²⁾になり、湿生植物を用いた屋上緑化に、より高い付加価値をつけることにつながるものと考えられる。しかしながら、一般的な屋上設計の地震時用積載荷重である 60 kg/m²³⁾を満たすためには、満水時の水深を 5 cm 程度に抑える必要がある。水面を設けた場合も同様であり、直射日光の当たる条件では容易に高温になることが予想される。岩手県における実測値では、開水面の水温は 35℃を超えて 40℃近い高温になると報告されている⁴⁾。都心の屋上においてはさらに高温になることが予想される。

ところで、開水面において、ボウフラ等の不快害虫の発生を抑えるためには、メダカやヤゴによる捕食が対策として有効である。メダカを例に挙げると、水温 20℃～28℃が生息

において適温であり、高温側の生息限界は 38℃～40℃とされる¹⁾。このことから、浅水の開水面において、これら生物の生息環境を整えるためには、過度の水温上昇を抑制する必要がある。

本報告では、温度上昇抑制効果が高い湿生植物群落内に、開水面で暖められた水を循環させることで水温上昇を抑制することが可能と考え、検証を行った。

2. 試験方法

試験は 2008 年、2009 年の夏期に実施した。水温が年間を

写真-1 試験区の状況

写真-2 使用した薄層アゼスゲマット

* 連絡先著者: E-mail : tsuji@koiwai.co.jp 〒020-0507 岩手県岩手郡雫石町丸谷地 36-1

図-1 試験区の配置(○数字は温度計設置箇所を示す)

通して最も高くなると考えられる梅雨明け後の高温期を対象とした。試験区は2008年7月8日に設営した(写真-1)。厚さ約1cmのヤシ繊維にアゼスグ(*Carex thunbergii* Steud.)を植栽し、約1年間育成したマット状の植物を用いた(写真-2)。試験区を作成した際には既に地下茎からの多数の発芽が見られ、群落状に生育していた。試験区設営時の自然草高は約75cmであった。

試験区は、岩手県雫石町に位置するビニルハウス内に設けた。ビニルハウスの側面は、地面から約0.4~1.2mの範囲で開放した。試験区は、高さ約15cmのプラスチックボックスの上に厚さ約2.5cmの板を敷き、周囲を高さ10cmの板で囲った上でその内部にポリエチレン系のシート(ブルーシート #3000)で遮水して作成した。さらに、植栽した範囲には、植栽部基部への直射日光の影響を回避するため、高さ30cmまで板で周囲を囲んだ(図-1の太線部分)。

幅30cm、長さ480cmの部分的に開水面を設けた水路(以下「循環区」)2区と、対照として幅30cm長さ240cmの全体を植栽した全植区、幅30cm長さ120cmの水面区を設置した。なお、全植区、水面区において循環は行っていない。2008年の循環区は、1/2の240cmの延長で植栽した区(1/2植栽区)と、3/4の360cmの延長で植栽した区(3/4植栽区)の2通り設定した。2009年の循環水路は、3/4植栽区のみを用いた。図-1の(P)の位置に小型ポンプ(プティオ社 VM-1)を設置し、向かい側の植栽部の端部にホースで導水して水を循環させた。水量はバルブを使用して調整した。2008年8月4日から8月11日まで1L/分(1L期間)、8月12日以降は2L/分(2L期間)、2009年は2L/分の水量とした。

水は、水量の減少が最も早かった全植区の水位が植生基盤(約1cm厚)の表面に近くなった際に、各区の水位が約5cmになるように追加した。水を追加する時間は、原則として夕方17時以降とすることで、当日の最高温度や翌日の温度への影響を最小限に抑えた。追加した水量と水深の増加量から、単位水深当たりの水量を換算した。

水温測定は、遮水シート下に温度センサー(エスベックミックス社 RT-30S、測定精度 $\pm 0.3^{\circ}\text{C}$)を設置し、10分間隔で測定した。循環区内の温度計設置位置を図-1中に○数字で示した。植栽部に位置する温度計は、1/2植栽区では①~③、3/4植栽区では①~④である。全植区、水面区においては、区画中央部の遮水シート下に温度センサーを設置した。なお、3/4

表-1 各期間の最高温度及び日積算日射量

		最高温度平均値($^{\circ}\text{C}$)		最高気温		日積算日射量 平均値 ($\text{MJ}/\text{m}^2/\text{日}$)
		循環水路区内 最高値	対照区 最低値	水面区	全植区	
1L期間	3/4植栽区	35.8	34.4	37.5	30.8	37.2
	1/2植栽区	36.3	34.5			
2L期間	3/4植栽区	31.7	30.1	34.8	27.1	33.5
	1/2植栽区	32.9	31.4			
	3/4植栽区(2009)	33.5	31.7			

植栽区における④の温度計は、2008年は植栽の下に入り込んでいたが、2009年の設定では若干水面側にずれていた。気温は、ビニルハウス内の約1.2mの高さに、日除けを取り付けた同様の温度センサーを設置して測定した。

2009年は、各区において水位を測定した。土壌水分計(Onset社 S-SMB-M005)を応用し、水槽の角の部分に直射日光が当たらないように水面に対して垂直に立てて設置、10分間隔で測定した。別途、土壌水分計の出力値と水位の相関を取り、出力値を水深に換算した。

日射量は、日射計(Onset社 S-LIB-M003)をビニルハウス外に約1.5mの高さに設置し、5分間隔で測定した。日積算日射量が $15 \text{ MJ}/\text{m}^2$ 以上の日を晴天とした。

温度、日射量、水位共に、1時間間隔で平均値を算出し、データとして用いた。

3. 結果および考察

3.1 夏期晴天時の最高温度

それぞれの条件における各区の温度および日射量測定値の平均を表-1に示した。晴天日に該当し、データの欠損等がなかった日数は、1L期間においては2日($n=2$)、2L期間においては2008年が7日($n=7$)、2009年は7日($n=7$)であった。最高気温平均値は、1L期間が 37.2°C 、2L期間が 33.5°C であった。日積算日射量の平均値は、1L期間が $24.4 \text{ MJ}/\text{m}^2/\text{日}$ 、2L期間が2008年は $18.5 \text{ MJ}/\text{m}^2/\text{日}$ 、2009年は $19.0 \text{ MJ}/\text{m}^2/\text{日}$ であった。

水面区の最高温度平均値と最高気温平均値を比較すると、1L期間、2L期間共に水面区の方が $0.3\sim 1.3^{\circ}\text{C}$ 高くなった。浅い水面の温度は、気温よりも若干高くなるといえる。

全植区と水面区の最高温度平均値を比較すると、全植区が水面区に対し1L期間で 6.7°C 、2L期間においては2008年が 7.7°C 、2009年が 7.3°C 低くなった。したがって、本試験の条件では、植物によって覆うことで水温を 7°C 程度下げることが可能になるといえる。なお、同じアゼスグを用いた先行研究⁴⁾においては、開水面区に対して全面植栽した区は約 12°C 低かった。どちらも遮水シート下の温度であるが、先行研究の植生基盤は、8cmの厚さがあったのに対し、今回用いた試験では約1cmと薄かったこと、試験区の幅が狭く、周囲の気温や日射の影響を受けやすかったことからこの差が現れたものと考えられる。

循環水路内の温度は、各時期共に開水面に循環水が入り込む部分(3/4植栽区は④、1/2植栽区は③)が最も低く(最低

図-2 夏期晴天時の温度の推移

値), 水が開水面を通り植栽部分に入り込む部分(①)が最も高かった(最高値)。循環水路の最低値と水面区との差は, 1 L 期間の 3/4 植栽区が 3.1 °C, 1/2 植栽区が 3.0 °C, 2 L 期間の 2008 年 3/4 植栽区が 4.7 °C, 1/2 植栽区が 3.4 °C, 2 L 期間の 2009 年は 4.8 °C 低くなった。すなわち, 循環水量が多く, 植栽範囲が広い方が温度が低い傾向が見られた。

3.2 夏期晴天時の温度変化

各期間の夏期晴天時の温度変化を見たものが図-2 である。ここでは, 晴天日の中でも積算日射量が大きく, 水の追加による温度の影響が無い日を取り上げた。なお, 日積算日射量は, 2008 年 8 月 7 日が 25.7 MJ/m², 9 月 8 日が 21.4 MJ/m², 2009 年 8 月 12 日が 19.1 MJ/m² であった。

各区共に, 全植区と水面区では最高温度で 7 °C 程度の差が見られた。既往の研究⁴⁾⁵⁾に比べ, 全植区の温度の日変動が大きい傾向が見られた。1 L 期間における循環区内温度の最低値, 最高値共に水面区に近い温度で推移し, 日中の全植区との温度差は大きい傾向が見られた。2 L 期間においては, 水面区と全植区の間あたりを推移する傾向が見られ, 2/3 植栽区の温度が低い傾向が見られた。2008 年の 2 L 期間である 9 月 8 日は気温が低めであり, 最高気温は 30.7 °C であったが, 1 L 期間の 8 月 7 日の最高気温は 35.3 °C であった。2009 年の 2 L 期間の 8 月 12 日の最高気温は 1 L 期間と同等の 35.9 °C であったが, 2008 年に近い温度の推移が追認できた。

1 L 期間においては, 循環水量が少ないことから植栽範囲に入ってから水温が低下し, 循環最低温度が全植区に近づくことが予想されたが, ここでは高めに推移した。全植区は,

図-3 夏期晴天時の循環水路内最高温度

表-2 循環水路内植栽部分の温度低下範囲の近似直線の傾き

期間	近似直線の傾き	相関係数(r)
3/4 1L	-4.25	0.98
3/4 2L	-4.26	0.97
1/2 1L	-7.29	0.99
1/2 2L	-6.19	0.99
3/4 2L 2009	-2.91	0.95

植物の地上部によって直射日光が遮られることから, 水温の上昇が抑えられることで, 最高温度が低くなったものと考えられる。一方, 循環区の開水面で温められた水は, 湿生植物植栽部を通しても温度低下には限界があるといえる。

3.3 夏期晴天時の循環水路内最高温度

各条件における循環水路内各測点の最高温度平均値を示したものが図-3 である。1/2 植栽区の植栽範囲である①～③, 2/3 植栽区の植栽範囲である①～④の間においては, 流下方向に向けて温度は低下した。2009 年の 3/4 植栽区において, ③の温度が④とほとんど同じであったが, これは温度センサーの位置が 2008 年に比べて若干水面側にずれていたことが原因として考えられる。

1 L 期間においては, 1/2 植栽区, 3/4 植栽区共に, 植栽範囲では, 最高温度平均値に差が見られなかった。2 L 期間では, 3/4 植栽区の方が 1 °C 程度低く推移する傾向が見られた。

植栽区域内の温度低下速度を示す近似直線の傾きを表-2 に示した。近似直線は, 縦軸に温度(°C), 横軸に距離(m)をとって求めた。傾きの絶対値が大きい方が温度低下速度が大きいことを示す。温度低下速度は, 1/2 植栽区の方が大きい傾向が見られた。なお, 2009 年の 3/4 植栽区の傾きの絶対値が小さいが, 前述の通り④の温度センサーの設置位置が影響したものと考えられる。

図-2 において循環区内最低温度が最大になる時は, ほぼ気温と同じかあるいは少し高い値となっていることから, 植栽部を流下するにしたがって水温は下がっていくものの, 周辺の気温との差が小さくなることで, 2/3 植栽区の温度低下速度が頭打ちになったものと考えられる。

また, 3/4 植栽区と 1/2 植栽区における④の温度差は, 1 L 期間では約 0.5 °C, 2 L 期間では約 1.2 °C であった。1 L 期間においては, 3/4 植栽区の温度が⑤から①に移動するまでに

図-4 開水面と循環水路内各測点の最高温度平均値の差

表-3 2009年各区の日消費水量と蒸発散潜熱

	全植区	2/3植栽	水面区
平均蒸発散水量(L/㎡/日)	9.5	7.8	3.4
蒸発散潜熱(MJ/㎡/日)	23.0	18.9	8.2

上昇することによって 1/2 植栽区に近づいた。一方、2 L 期間の①の温度は、3/4 植栽区において 1/2 植栽区の水温に近づくほど上昇せず、その差を植栽部分に流入した後も維持したまま温度が低下した。その結果、2 L 期間において 1/2 植栽区と 3/4 植栽区の間に温度差が生じたものと考えられる。

3.4 夏期晴天時の開水面区と各測点の温度差

水面区の最高温度平均値と各測点の最高温度平均値との差を示したものが図-4 である。1 L 期間は全体的に水面区との温度差が小さい傾向が見られた。1 L 期間で水面区との温度差が大きかったのは、1/2 植栽区が③の 3.0 °C、3/4 植栽区が④の 3.1 °C であり、植栽面積による差はほとんど見られなかった。2 L 期間の水面区との温度差は、1/2 植栽区が③の 3.4 °C、2008 年の 3/4 植栽区が④の 4.8 °C であり、植栽面積による温度差は 1.4 °C であった。したがって、循環速度を上げて植栽面積を増やすことで、温度は低くなるといえる。なお、2009 年の 3/4 植栽区の水面区との温度差は、2008 年の 3/4 植栽区よりは小さかったものの、2008 年 1/2 植栽区より大きくなった。

以上の結果から、水が植物植栽区を通過することによる開水面の温度上昇抑制を有効に発揮させるためには、一定の植栽面積と循環速度が必要といえる。今回の例では、2 L 期間の 3/4 植栽区において、開水面区との温度差が大きくなる傾向が見られた。試験区の幅や基盤厚による影響は残るが、2 L 期間の 3/4 植栽区は、実面積で 1.08 m² 植栽、0.36 m² の開水面であったことから、1.85 L/m²/min の水量を循環させ、開水面の面積を植栽面積の 1/4 程度とすることで再現可能と考えられる。

3.5 消費水量および蒸発散潜熱

2009 年においては、モニタリングした水位から消費水量を算出した。晴天日で、データ欠損が無かった 5 日間(n=5)の消費水量を表-3 に示した。全植区の消費水量が最も多く 9.5 L/m²/日であった。これは、同じアゼスグ蒸発散量の既往の値

である 11 L/m²/日⁴⁾より若干低い値であった。

全植区の日積算蒸発散潜熱は 23.0 MJ/m²/日であった。ここで対象とした 5 日間の日積算日射量は 19.3 MJ/m²/日であったことから、日射量を上回る蒸発散潜熱が発生したことになる。一方、水面区の日積算蒸発散潜熱は 8.2 MJ/m²/日と低く、直射日光が当たる開水面において容易に水温が上昇する要因と考えられる。2/3 植栽区においては、開水面で温められた水温は、潜熱発生量の多い植栽区を通ることによって下がるものの、循環区内の最高温度と最低温度の差は 1.8 °C とその下げ幅は小さかった。全植区においても水温は上昇していることから、蒸発散潜熱の多くは周囲の空気の温度を下げることに使われたものと考えられる。

4. おわりに

全期間における開水面区の最高温度は 40.2 °C (8月5日 14 時 00~14 時 10 分) であり、メダカの致死温度とされる 38 °C を上回った。2 L 期間の 3/4 植栽区の平均最高温度は、開水面区の平均最高温度よりも 4.8 °C 低くなったことから、メダカの生育を可能にするためには少なくともこの条件と同等以上の植栽面積と循環速度が必要と考えられる。したがって、薄層の条件で開水面を設ける際には、単に水面を設けただけでは生物の生育空間として十分な条件にはならない。より多くの生物に生息可能な温度条件を整えることで、屋上空間に飛翔性の生物を誘致することが可能になり、特定の生物の大量発生を抑えるだけでなく、人と自然との距離を縮めることが可能になると考える。

本試験は、岩手県雫石町のビニルハウス内で実施したものであり、植栽幅が狭い水路状の試験区であることから、都心の面的な広がりのある屋上緑化に直接応用できるものではない。しかしながら、湿生植物と水循環の組み合わせで開水面の過度の温度上昇抑制が可能となることが示唆された。今後は、熱暑が予想される地域において、まとまった面積を対照としてその効果を検証する必要がある。

引用文献

- 1) 片根得光 (2005) 日本のメダカを飼おう！一育て方とふやし方、誠文堂新光社、pp.26-28.
- 2) 橋大介・薬師寺圭・中村健二 (2004) 東京都内に初めて造られたシミズ屋上ビオトープについて、清水建設研究報告, 80.
- 3) 橋大介 (2005) 屋上緑化と建物の設計、建物緑化編集委員会編、屋上・建物緑化辞典、産調出版、pp.86-88.
- 4) 辻盛生・斉藤友彦・入月利徳・軍司俊道 (2007) 屋上緑化での利用を想定したアゼスグの蒸散量と温度上昇抑制効果、日本緑化工学会誌, 33 (2) : 359-368.
- 5) 辻盛生・平塚明・佐野嘉彦・鈴木周 (2008) アゼスグの屋上緑化への応用と温度上昇抑制効果の評価、日本緑化工学会誌, 34 (3) : 375-383.

(2010. 7. 24 受理)