

ウォータースクリーンの拡散反射性能に関する研究

環境図形科学研究室

武智 浩二

要旨：本研究はウォータースクリーンにプロジェクターで映像を映し、輝度計と照度計を用いてスクリーン面全体の反射率を導くことでスクリーンの性能を評価したものである。ウォータースクリーンを均等拡散面と仮定し、輝度と照度を測定することで反射率を導く方法と、実験時にスクリーンからの反射光を測定する際に照度計の影の影響を受ける方法と考慮する方法の3つの実験からスクリーン中心部の反射率を求めることを試みた。結果、実験別に得られた結果には誤差が生じたものの、照度計の影の影響を除去する測定方法で得られた結果は、計算から導いた結果と類似するデータを示したことから、この実験方法で得られる反射率の値が最も真値に近いと考えた。次に、中心部と周辺部の輝度を比較することでスクリーン面全体の反射率を導き、映像を鮮明に映すための最適な条件を導くことを試みた。

1. 研究の目的と背景

近年ウォータースクリーンの使用例は増加しており、イベントの催し物として用いられることに加え、防火対策や室内型インテリアとしての需要も拡大している。

本研究以前に、白画像(画素階調値(R,G,B)=(255,255,255))と黒画像(画素階調値(R,G,B)=(0,0,0))の映像をウォータースクリーンに投影し、異なる噴圧と噴量の下で映像の映るウォータースクリーン上のポイントの輝度を測定し、輝度対比を測定し比較することでスクリーンの拡散反射性能を明らかにする研究を行った¹⁾。

本研究は初めにウォータースクリーンを均等拡散面と捉えて、中心部の反射率の導出実験を行った。次に、中心部の反射率の値を絶対値とし、中心部と周辺部の輝度を測定することで周辺部の反射率評価を試みた。

2. ウォータースクリーン中心部の反射率導出実験概要

中心部の反射率を導く実験方は、実験1、実験2、実験3の3通りで、実験1は照度計の影の影響を考慮しない方法、実験2は輝度計を用いる方法、実験3は照度計の影の影響を考慮した方法である。

・実験の概要

- ・スクリーン発生面(図1参照)：ウォータースクリーンを作り出すノズルを地表高2,000mmの位置にスタンドで固定する。噴角は90度で、霧は空气中を飛散するにつれて勢いを失うため噴霧幅は4,000mmとなる。
- ・実験装置概要図(図2、3参照)：プロジェクター(プ

ラスビジョン株式会社「U2-1200」、2,000 ANSIルーメン)により映像を投影し、照度計(KONICA MINOLTA ILLUMINANCE METER T-10)を用い照度を測定した。実験現場は不要な光の影響を避けることと、背景による光の反射の影響を避けることに留意した。

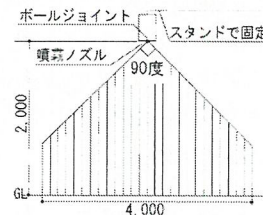


図1 スクリーン発生面 単位 mm

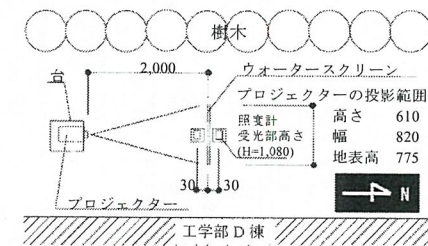


図2 実験1の実験装置概要図 単位 mm

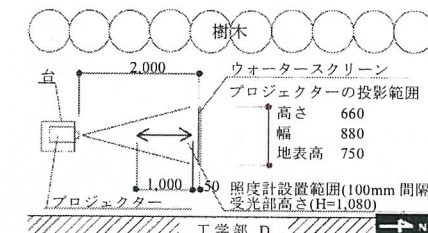


図3 実験2、3の実験装置概要図 単位 mm

・ノズル：山形流量分布(VVPタイプ)((株)いけうち製)と、均等流量分布(VEPタイプ)(同)を用いた。両タイプとも噴角 90 度であり、噴量の違いにより各タイプ 3 種類ずつ使い、例えば「V100」のようにノズルを区別する。「V」は VVP のノズルタイプを表し、「100」は標準圧力(0.3MPa)での噴霧量 10.0ℓ/min を表す。

・実験装置の位置決定

初めに照度計の位置を正確に決定するためにスクリーン手前プロジェクター側の照度 E'_{ff} (図4参照)を測定した。測定照度値は僅かな距離の誤差で大きく値が変動するため、室内で測定した照度を参考にする事で照度計の受光部の距離の実測値の誤差を抑えることとした。図または表中の「水」はウォータースクリーン、「光」はプロジェクターを表している。

3. 実験1：照度計の影の影響を考慮しない方法

図2に示す2点の照度計の設置位置から照度を測定した。測定条件をウォータースクリーンの有無とプロジェクターの点灯の有無により図4に示すように分類し、測定方向は図4に示す全7方向である。

プロジェクターにより投影する画像は一面白画像とした。測定回数は「光：無」の場合は5回、「光：有」の場合は20回とした。実験時の噴圧は常時 0.5MPa と設定し、ウォータースクリーンを形成する水量はノズルにより決定され、6種の噴量の下で測定を行った。

・結果

暗室内で測定した E'_{ff} の結果を表1に示す。 E_{ob} 、 E_{or} は周辺の照度影響を測るもので、 E_{br} 、 E_{fb} 、 E_{ff} は周辺照度におけるスクリーンの影響を測るもので、全ノズルで共通の値を示す結果であり表2に示す。

図4-水：有・光：有で測定する E'_{fb} の結果を表3に示す。噴圧 0.5MPa 時の噴量の値は(株)いけうちの1流体ノズル製品カタログ²⁾の値を示す。

・反射率計算

ウォータースクリーンに入射する方向の照度を測定した値を分母、反射する方向の照度を測定した値を分子と考えて導いた計算式は式1となる。分母分子ともに差をとることで周辺光源の影響を取り除きプロジェ

クターの光の影響のみを抽出していることになる。式中の記号は測定した値の平均値を採用しており、図4に示す記号と同様の意味を持つものである。

$$\text{反射率 } \rho = \frac{E'_{fb} - E_{fb}}{E'_{ff} - E_{ff}} \quad \dots \text{式1}$$

・ノズルタイプ別の結果

全6種類の各ノズルの実験結果を式1に代入することでウォータースクリーン中心部の反射率を計算することができ、表4の結果が得られる。また、VVPタイプ3種とVEPタイプ3種のタイプ別に反射率を比較したものを図5のグラフに示す。

4. 実験2：輝度計を用いる方法

「水：無・光：有」でスクリーン中央位置の輝度の測定を行い、次に「水：有・光：無」、「水：無・光：有」でそれぞれ同一箇所の測定を

表1 E'_{ff} の測定結果

	E'_{ff}
平均値(\bar{x})	2186.1
標準偏差	8.65
変動係数	0.0040

表2 全ノズル共通の測定照度結果

全ノズル共通	水：無 光：無		水：有 光：無		
	E_{ob}	E_{or}	E_{br}	E_{fb}	E_{ff}
平均値(\bar{x})	0.180	0.152	0.164	0.180	0.150
標準偏差	0.000	0.004	0.005	0.000	0.000
変動係数	0.000	0.026	0.030	0.000	0.000

表3 E'_{fb} の測定結果

E'_{fb}	山形流量分布			均等流量分布		
	噴圧 0.5MPa 時の噴量(ℓ/min)					
噴圧 0.5MPa 時の噴量(ℓ/min)	3.88	6.46	12.9	7.62	15.1	20.3
平均値(\bar{x})	4.89	5.73	6.75	3.04	4.73	5.06
標準偏差	0.45	0.85	1.04	0.44	0.30	0.30
変動係数	0.092	0.14	0.15	0.14	0.063	0.059

表4 0.5MPa 時の各ノズルの噴量と各ノズルの反射率

ノズル	V30	V50	V100	E59	E117	E157
噴圧 0.5MPa 時の噴量(ℓ/min)	3.88	6.46	12.9	7.62	15.1	20.3
スクリーン中心部の反射率	0.0021	0.0025	0.0030	0.0013	0.0021	0.0023

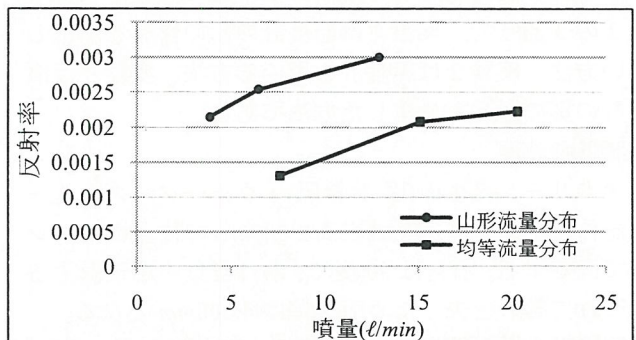


図5 タイプ別スクリーン中心部の反射率の比較

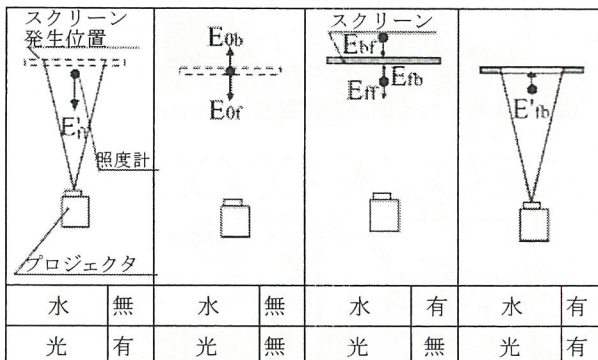


図4 条件別照度計測定方向

行った。測定回数は、「光：無」の場合は3回、「光：有」の場合は10回とした。測定の際は、背景物からの反射の影響を受けないように背景が天空となる位置で測定を行い、プロジェクターからの光の反射のみによる輝度を求めた。ウォータースクリーンを均等拡散面と仮定すれば、「光束発散度=π×輝度」となるため、ここで得られた輝度から光束発散度を求めることが可能となる。

また、別途暗室内で、プロジェクターから距離2,000mmの位置に受光部をプロジェクター側に向けた照度計を設置し、測定を10回行いプロジェクター放光部から2,000mmの位置における照度を求めた。

・結果

測定結果を表5に示す。また、暗室内でプロジェクター放光部から2,000mmの位置における照度を10回測定し得られた照度の測定結果を表6に示す。

・反射率の推定

スクリーンに照射するプロジェクターの光の反射光による光束発散度を求めるため、輝度(水：有、光：有)と輝度(水：有、光：無)の差を取ると、反射光による輝度=2.775-0.237=2.538cd/m²となる。スクリーンを拡散面と仮定すると、光束発散度=π×輝度であるため、反射光による光束発散度=3.14×2.538=7.969(rlx)となる。表6より得られるスクリーン位置での照度1953.1(lx)を用いると反射率は以下の計算より求める。

$$\text{反射率} = 7.969 / 1953.1 = 0.00408$$

5. 実験3：照度計の影の影響を考慮した方法

実験1は、照度計をウォータースクリーン側に向けて測定した場合、スクリーン中心部には照度計の影が落ちるため、測定される照度の値は照度計が存在しない場合の光束発散度に比べて小さくなると考えられる。そこで、ウォータースクリーン中心部とプロジェクターの放光部を結ぶ線上に三脚に固定した照度計を設置

表5 スクリーン中央の輝度(cd/m²)

	水：無 光：無	水：有 光：無	水：有 光：有
測定結果	0.14	0.23	3.08
	0.15	0.24	2.53
	0.14	0.24	2.78
			2.43
		1.92	2.03
		2.84	3.69
		3.42	3.03
平均値 cd/m ²	0.143	0.237	2.775
標準偏差	0.00471	0.00471	0.537
変動係数	0.0329	0.0199	0.193

表6 暗室内照度

測定回数 10回 単位(lx)	1968
	1945
	1959
	1954
	1955
	1958
	1950
	1946
	1946
	1950
平均値(lx)	1953.1
標準偏差	7.2
変動係数	0.004

し、スクリーンからの距離が50mmの位置から100mm間隔で照度計を移動し、1,050mmの位置まで11点で測定を行い、照度計の影の影響を除くことを試みた。

三脚の重心に重りを取り付け、ウォータースクリーン中心部とプロジェクター放光部を結ぶ線を地面に投影した位置に張ったロープに沿って移動し、ロープ上の100mm間隔の印に合わせて測定位置を決定した。ただしこの方法では、照度計の角度を厳密に揃えることが困難であるため、誤差を平均化するために1つの測定位置で2回測定することとし、50mmの位置から1,050mmの位置まで11点測定を行うことを5回繰り返して最終的に全点で10回測定を行った。

・結果

測定結果については、図6のグラフに示す。この値は、5回の測定の平均値である。実測値は、距離が小さくなるにつれて照度が増大し、距離150mmをピークに照度が減少に転じている。照度に影響を与えているのは、照度計位置におけるスクリーン上のプロジェクターの光が当たっている部分の立体角投射率C_{反射光}と照度計が遮蔽する影の立体角投射率C_影であり、距離が小さくなるにつれてC_{反射光}が大きくなるために照度は高くなるが、一定以上近づくとC_影が支配的になり、照度が下がると考えられる。C_{反射光}とC_影はスクリーンと照度計の大きさや位置により計算することが可能である。スクリーンの光束発散度を一定値Mとする時、照度計位置における照度の値は、(C_{反射光}-C_影)×Mで求めることができる。50mmから1,050mmまでの11の地点において計算した「C_{反射光}」、「C_影」、「C_{反射光}-C_影」の値で得られた立体角投射率を用い、スクリーン面におけるMの値を小数点以下第一位で変化させて照度(C_{反射光}-C_影)×Mの値を求め、11の地点の実測値と計算値を用い、残差平方和を求めたところ、光束発散度11.0(rlx)の場合に最小となった。光束発散度11.0(rlx)とした場合の計算値と実測値を図6に示し、光束発散度を11.0(rlx)とすると、スクリーンの反射率は以下の計算式より求めることができる。

$$\text{反射率} = 11.0 / 1953.1 = 0.00563$$

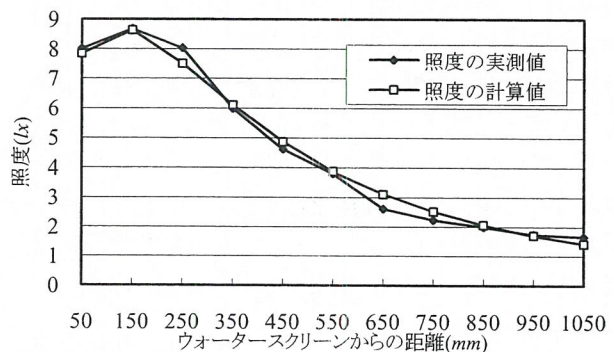


図6 照度の実測値と光束発散度を11.0(rlx)とした場合の照度の計算値

表7 ボリュームの影響調査実験の結果

距離(mm)	水平位置変化				鉛直高さ変化		
	0	100	200	300	450	750	900
輝度平均値(cd/m ²)	2.09	2.32	2.17	2.33	2.09	1.91	2.03
標準偏差	0.16	0.09	0.11	0.09	0.16	0.09	0.13
変動係数	0.08	0.04	0.05	0.04	0.08	0.05	0.06
背景輝度除去値(cd/m ²)	2.05	2.28	2.14	2.29	2.05	1.86	1.96

6. 測定法別の測定結果の考察

3通りの実験結果に差異が生じることは、スクリーンが均等拡散反射をしていないことが原因と考えられる。照度計の影の影響を除去する方法もスクリーンを均等拡散反射するものと仮定しているが、現時点の推定方法の中では一番真値に近いものと考えた。

ウォータースクリーンの中心部の反射率は照度計の影の影響を除去することで導いた0.00563とした。

7. スクリーンのボリュームの影響測定実験

ウォータースクリーンのボリュームが輝度測定値に影響を与えているかどうかを検討する。

・実験方法

実験時投影する画像は一面白画像である。スクリーン上の測定点の位置は中心部の220mm上方に設定した。スクリーンと輝度計の距離は1,950mmとし、水平位置変化では輝度計の測定部を地表高さ450mmに固定して、スクリーン正面の位置からの距離が0mm、100mm、200mm、300mmの位置に移動させて測定を試みた。鉛直高さ変化では、輝度計を測定点の正面に固定し輝度計の測定部の地表高さを450mm、750mm、900mmと変化させた。用いたノズルはV100である。

「水：有・光：無」で、各測定位置から測定点の背景輝度を3回測定し、その後「水：有・光：有」で各測定位置から測定点の輝度を10回測定する。

・結果と考察

測定点の輝度測定結果をまとめた表を表7に示す。表中の背景輝度除去値は各測定点輝度の平均値から各々の背景輝度の平均値の差を取った値である。

中心から距離が離れると輝度値は高くなる傾向が示されていることから、ウォータースクリーンのボリュームは関わっていると考えられる。

8. スクリーン面全体の反射率の考察

流量分布の違いがスクリーンに与える影響を検討するため、V100とE157を用いて検討を行った。

・実験方法

測定点は図7に示すスクリーン中心部を含む円区画

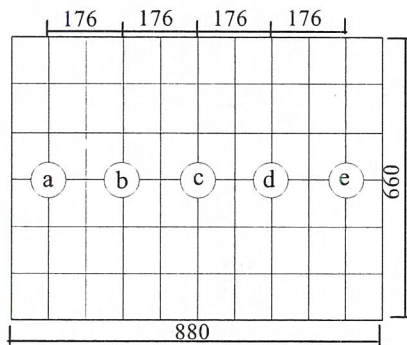


図7 測定点の位置関係 単位 mm

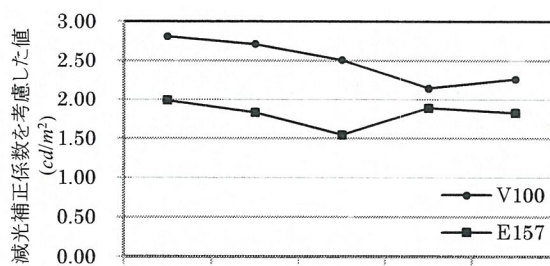


図8 ノズルタイプ別の水平位置関係の輝度測定結果

表8 プロジェクターの減光補正係数

a	b	c	d	e
1.16	1.04	1	1.04	1.16

表9 V100の水平位置関係の反射率

	a	b	c	d	e
V100	0.00631	0.00609	0.00563	0.00482	0.00508

a, b, c, d, eとした。中心cからの距離はa, eは352mm、b, dは176mmとなる。輝度計の測定部の高さを450mmに固定し、スクリーンから1,950mm離れた各測定点の正面の位置から測定を行った。

実験は、「水：有・光：無」で各測定位置から測定点の背景輝度を3回測定した。その後、「水：有・光：有」で各測定位置から測定点の輝度を10回測定し、ノズルを取り換え同様に実験を行った。

・結果と考察

測定値の平均値から背景の平均値の差を取り、プロジェクターの影響を考慮した値を図8のグラフに示す。別日に暗室内でプロジェクターの照射に減光が生じるならば補正を加え、中心部と均等になるようにするため減光補正係数を導いた。測定点aからeに対応する補正係数を表8に示し、V100の中心部の反射率0.00563を用い他の測定点の反射率を計算した結果を表9に示す。グラフから読み取れることは、ノズルタイプによる特徴が見られないこと、VVPタイプの方がVEPタイプに比べ高い輝度値を示すこと、全体的に左側の輝度値と反射率が高くなることである。

9. 今後の課題

本実験は角度を一定に固定した輝度計を測定点の正面に移動して測定を行っており、結果に影響を与えるのはウォータースクリーン反射特性だと考えられる。中心部、周辺部の反射特性を精緻に検討することでスクリーン面全体の評価ができると思う。

謝辞

本研究を進めるに当たり株式会社いけうちの水野毅男氏の技術的協力を得た。ここに記して謝意を表す。

参考文献

- 1) 武智浩二、鈴木広隆、ウォータースクリーンを用いた表現に関する研究 その1 拡散反射性能の評価、日本建築学会大会学術講演梗概集 D-1、pp.439-440(2009)
- 2) (株)いけうち：1 流体ノズル製品カタログ

討 議 等

◆討議[梅宮典子先生]

実験現場の風の影響はあるか。ウォータースクリーンの左側が反射率の高い結果となったが、原因は分かるか。

◆回答：ウォータースクリーンは風の影響を受けてスクリーンが波打つ形状となり、測定値の誤差が大きくなるため、実験日は風の影響のない日を選んでいる。また、左側が反射率の高い結果となったことは、阪和線の駅の明るさの影響を受けているためだと考え、実験装置を逆に設置して実験を試みたが、逆にしても左側の反射率が高いという結果は変わらなかった。現段階では原因は不明である。

◆討議[中尾正喜先生、西岡真稔先生]

水の粒径や密度は分かっているか。一般的に噴量が高くなれば粒径や密度は高くなると考えられるが、それと反射率には関連付けた結果を得ているか。

◆回答：粒径や密度は具体的に分かっていない。噴量はノズルや噴圧によって定まることは分かっているが、噴量と粒径と密度に関すること分らない。

◆討議[中尾正喜先生、西岡真稔先生]

粒径や密度を明らかにしてから反射率を評価する方がよいのではないか。

◆回答：今後の課題と考えている。最終的には映像を鮮やかに映すための粒径と、屋外使用時に風の影響を受けない粒径を考慮することが必要と考える。

◆討議[遠藤徹先生]

実際に屋外で用いるときは風があつて当然の空間と思うが、それについてどう考えるか。

◆回答：例えばイベントなどでウォータースクリーンを用いるときは、規模の大きい装置を用いたり、複数のノズルを等間隔で配置したりしていることから、風の影響を受けないスクリーンを発生させることは可能と考える。本研究は基本となる反射性能を導くものであり、応用はできると考える。