

# 夏期沿岸海域における温度成層形成時における底層低温水の冷房利用に関する研究

地域環境計画分野 富永 匡哉

## Abstract

臨海都市の沿岸水域では防波堤等の構造物設置に伴い海水の鉛直混合が阻害され、夏期において表層部に比べ底層部が低温になることが報告されている。夏期の底層低温水を利用した空調システムの導入を想定した場合、熱源の低温化による省エネルギー効果と水域への排熱による顕熱排熱削減効果が期待できる。海水を利用した空調システムの検討は既に行われている例もあるが、夏期に発生する底層低温水を積極的に利用する研究は行われていない。本研究では底層低温水を利用した空調システムの運転性能を試算することを目的とした底層低温水温の推定モデルの構築を行い、既存の気象データを入力とした水深別の海水温度推定が可能となった。次に底層低温水を冷熱源として活用する空調システムシミュレーションでは、大阪市沿岸部3地域において既存の空調システムと比較し、冷房負荷が最大時で100MW規模の商業地区では、63%の省エネルギー効果と日積算値で900MWhの顕熱排熱削減効果を算出した。

## 1 研究の背景と目的

### 1.1 研究背景

近年、都心部では通信機器や事務機器などによる電力需要の伸びに伴い、年間冷房を行う高発熱建物の増加が顕在化している。特に、都市域の大気（気圏と定義）への熱負荷となる顕熱排熱は夏期のヒートアイランド現象を助長し、放置できない深刻な社会問題となっている。

また、臨海都市の沿岸水域（水圏と定義）では、防波堤等の構造物設置に伴う海水の鉛直混合の低下により、温度成層が発生する。H18年度夏季の大阪湾奥の岸壁近傍にて水温計測結果報告<sup>1)</sup>によれば、水深8m程度の海水温度は表層より昼間最大で7℃程度低いという結果を得た。この7℃の海水温度差は冷熱源としてのポテンシャルが大きく、底層低温水の利用価値が高いことを示唆している。

### 1.2 研究目的

海水を利用した空調システムの設計を行う場合、そのシステムの成績係数を算出し、システム全体の消費エネルギーの試算が必要になる。空調システムを構成する冷房機器の特性を大きく左右する冷却水の水温データが重要になる。しかし、底層低温水の水温データは気象データのように時系列で整備されておらず、空調システムシミュレーションの際に活用できる沿岸部海水温の推定モデルは存在しない。

そこで、本研究では大阪湾内での実測データを用いて海水温度推定モデルの同定を行い、冷熱源として使用する海水温度のデータベース構築を行うことを目的とする。また、大阪湾で同定した海水温推定モデルが

他の海域でも適用できるか否かについて検証する。

次に、夏期海水の底層低温水を利用した空調システムの優位性の把握を目的として実際に大阪ベイエリアでの適用効果を試算する。対象区域は大阪湾海岸線から5km以内の地域を選定し、現行の標準的な空調システムと比較し、冷凍機の年間消費電力削減量、対象区域内における顕熱削減量で評価を行う。

## 2 海水温度の調査結果

### 2.1 年間水温データの分析

時系列水温の推定モデル同定を行う上で、海水温度変動の物理的特性を把握する必要がある。年間の海水温度データ分析にあたり、国土交通省近畿地方整備局により提供されている大阪湾水質定点自動観測データ配信システムにより観測された海水温度データを使用した。データ計測地点を図1に示す。海水温度データ計測間隔は1時間で計測水深は1mから12mである。本研究では1mから7mまでのデータを使用して海水温度の変動特性を分析する。

### 2.2 季節変動の特性

図2に水温と気温の変動を示す。3~8月は上昇傾向にあり、9~2月は下降傾向にある。水温の鉛直分布は上昇期に発生し下降期に消滅する。温度成層の発生を水深1mと7mの水温差が2K以上として判断すると、上昇期の温度成層の発生は5月、消滅は9月となる。本研究では夏期沿岸海域で発生する底層低温水の利用を目的としているため、4~9月の水温データを中心に考察する。

### 2.3 変動の要素

図3に日平均気温と水深1mと水深7mの日平均水

温との相関を示す。気温と水温の年間変動を比較すると水温変動には時間的な遅れが生じるものの、期間を限定すると相関があることが分かる。上昇期と下降期に分離した場合は、それぞれの時期で線形関係を仮定できると考えられる。

図 4、図 5 ではそれぞれ日平均水温と、日積算日射量、日平均風速との相関を表している。共に日単位での変動にはあまり相関がないことが分かる。

### 2.4 一時的な温度成層の消滅

温度成層が一時的に消滅する場合の考察を行う。図 8 から、2010 年の上昇期において温度成層が消滅している期間が 5 回訪れている。水温差が 2K 以下の状態を混合状態と定義すると、混合が生じている時間の直前、あるいは同日に 8m/s 以上の風速を観測していることが分かる。このことから、一時的に生じる混合については風速の影響が大きいことが示唆される。2010 年の風速と水温差データから、6m/s の風速を観測した後 5 時間以内に 56% の割合で混合が発生し、7m/s の風速を観測した後 5 時間以内に 64% の割合で混合が発生している。

本研究では 6m/s 以上の風速が発生した場合を混合発生時間とする。混合が継続する時間のヒストグラムを図 10 に示す。水温差が再生成するまでに要する時間は平均 5 時間であることから、最後に 6m/s 以上の風速が発生した時刻から 5 時間で再生すると定義する。



図 1 水温観測地点(大阪湾)

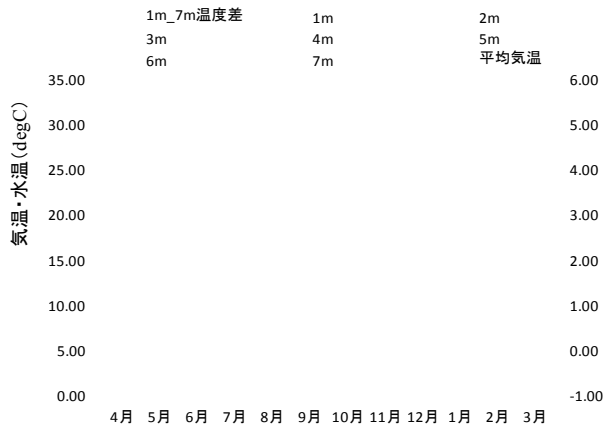


図 2 水温の年変動

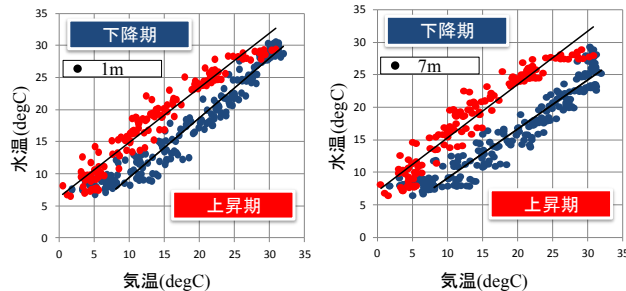


図 3 大阪湾における水温と気温の相関

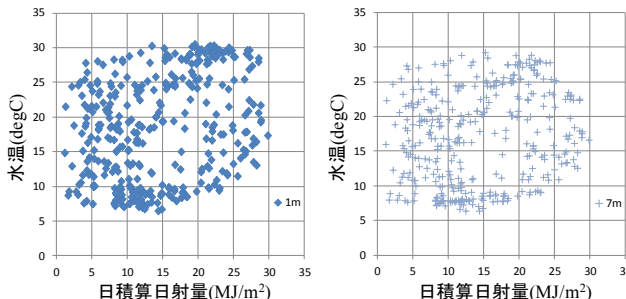


図 4 大阪湾における水温と日射量の相関

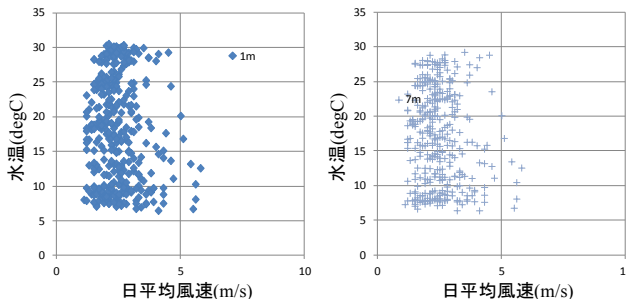


図 5 大阪湾における水温と風速の相関

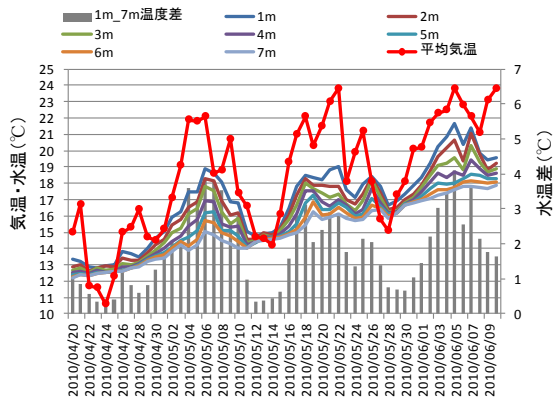


図 6 上昇期の日平均水温変動(2010 年)

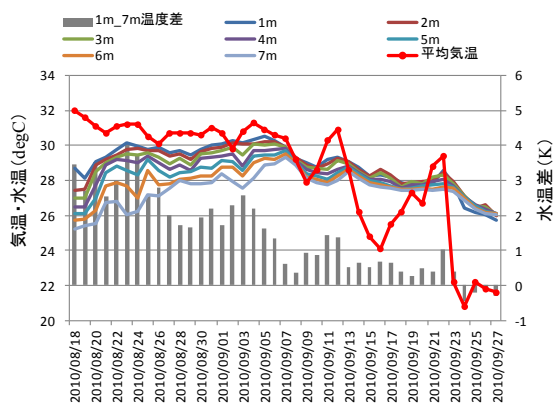


図 7 下降期の日平均水温変動(2010 年)

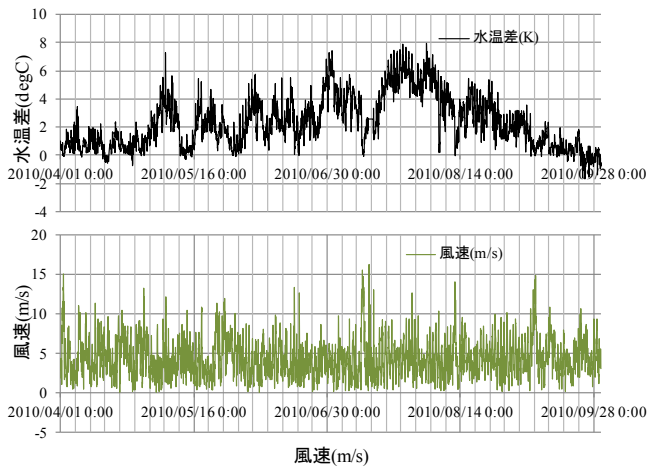


図 8 風速と水温差の時系列比較 (大阪湾波浪観測塔 2010/4/1~9/30)

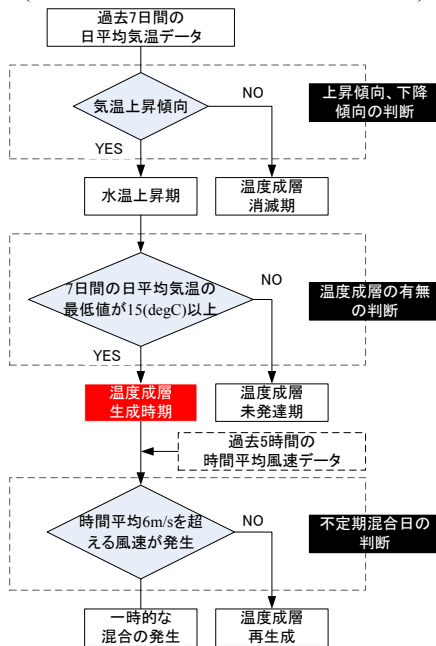


図 9 温度成層生成期の判断フロー

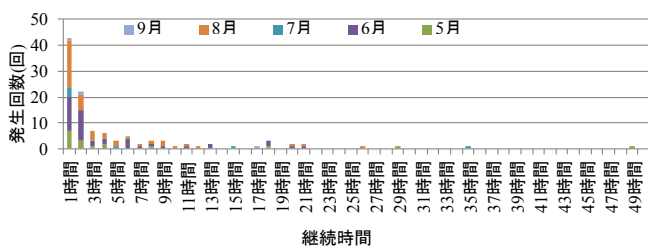


図 10 混合継続時間のヒストグラム

## 2.5 温度成層の発生・消滅

水深 1m と 7m の水温差が安定して 2K 以上になる時期を温度成層期として、発生から消滅について検討する。

図 6, 図 7 から, 水温, 気温共に日平均値が平均 7 日間周期で変動していることが分かる。2010 年の場合 4 月末から 5 月にかけて一度鉛直分布が生じるが, 一時的な気温の低下に伴い消えてしまっている。以上より, 温度成層発生条件として日平均気温が過去 7 日間連続 15(degC)を超えた場合とする。図 7 より温度成層

の消滅については, 気温の上昇傾向がなくなると同時に温度成層が消滅する。

## 2.6 各判定基準のまとめ

本研究における温度成層期の判定フローを図 9 に示す。水温上昇期の判断は気温の上昇期により決定され, 温度成層の発生と消滅も同様に日平均気温から推定できることが明らかになった。さらに, 荒天などによる一時的な海水の鉛直混合が発生する場合の指標として風速の影響が考えられ, 時間平均風速により海水の鉛直混合の発生が推定できる。また, 鉛直混合が発生した後は約 80%の割合で 1 時間後に再生成されるが, 平均的には 5 時間で再生成されることが明らかになった。温度成層再生成の基準も風速によって定めることができた。

また, ここで示した判断基準は伊勢湾など他海域にも適用も可能であることを確認した。

## 3 海水温度推定モデル

### 3.1 成分分離の手法

海水温度は地球の自転と公転に関わって変動しているため, 一定の周期性を持つ。本研究では, 海水温度変動を確定成分と確率成分に分離し, 確定成分として各種周期をもった変動を表現し, 残差を確率成分として表現する。吉田<sup>2)</sup>は気温のモデル化において日周成分を近似的に確定的なものとして分離する方法を提案している。過去のデータより平均的日周成分を推定し, 確定的周期成分として分離する方法である。

### 3.2 確定成分のモデル化

本研究では 5 月から 8 月に限定した季節変動と平均的日周期成分を確定成分としてモデル化する。モデル化のフローを図 11 に示す。季節変動については前章で得られた日平均水温と気温の線形関係から, 線形重回帰分析によるモデル化を行う。分離の手順として, まず季節的な変動成分をモデル化し, 次に, 平均的日周期成分をモデル化する。

### 3.3 季節成分のモデル化

ここでは, 2010/5/28 から 2010/7/2 の南港 ATC における実測データを使用する。実測データを図 12 に示す。水深別の日平均水温を推定する際, 重回帰分析に用いる説明変数として, 日平均気温, 日積算日射量, 日平均風速とし, 遅れ時間は過去 7 日前までの値を検討する。重回帰分析の一般式を式(3.4)に示す。

モデルの評価指標として, AIC(赤池情報量規準), RMSE(平均二乗誤差),  $R^2$ (決定係数)を用いる。評価式を式(3.2), (3.3)に示す。評価の手順は 21 種類の説明変数の全組み合わせの中から AIC が最良のものを選択し, AIC の値が同等の場合は自由度調整済決定係数にて比

較を行う。

### 3.4 平均的日周成分のモデル化

前節の重回帰分析にて日平均水温を推定し、実測値から引くことにより、季節成分を分離した。日平均値の推定値を図 13 に示す。分離後の海水温データ全 36 日分を各時刻で平均し、代表的な 1 日の日変動を生成する。これを平均的日周期成分と定義する。式(3.5)から(3.9)より得られた日周期成分をフーリエ級数近似により近似式を作成する。日周期成分の水深別変動を図 14 に示す。日周期成分の推定モデルは推定値と実測値の RMSE にて評価を行う。

モデル化の結果を表 2 に示す。水深 1m では気象条件の影響を受けやすく、時刻変動が日別で大きく異なるため、変動のピーク値を表現できていない。その他の水深に関してはそもそも日変動が小さいことから、平均的日周成分の推定で問題はないが、水深 1m における水温の時刻変動に関しては、気象条件での補正を試みる。

### 3.5 気温による振幅補正

ここでは気温変動の振幅による水深 1m における水温変動の振幅の補正を試みる。

計算方法を式(3.10)から(3.12)に示す。これにより計算された気温振幅を基準化振幅とする。基準化気温振幅による補正の効果を含めた全水深における推定精度は RMSE で 0.1(degC)向上した。補正前と補正後を図 16 に示す。

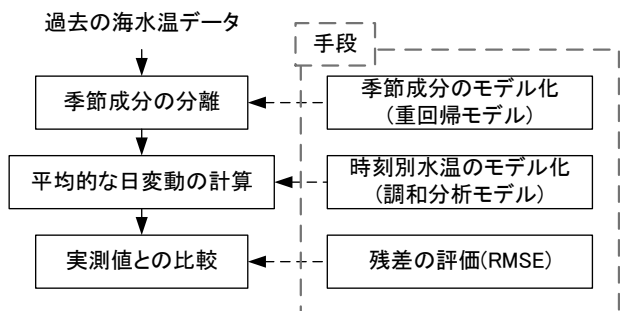


図 11 海水温度推定モデル同定フロー(確定成分)

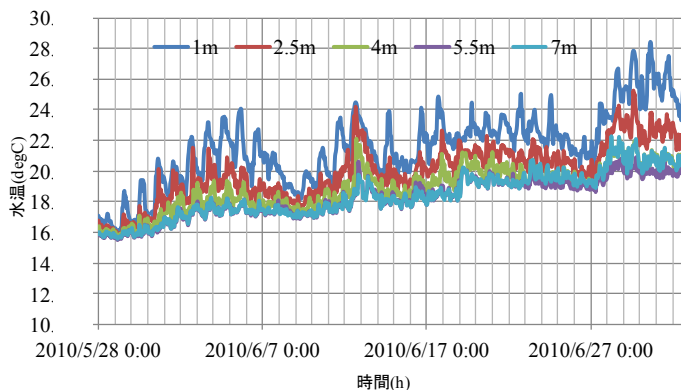


図 12 実測データ(2010/5/28~7/2)

### <季節成分>

$$S_e = \sum_{j=1}^n (\hat{y}(j) - y(j))^2 \quad (3.1)$$

$$AIC = n(\log(2\pi \frac{S_e}{n}) + 1) + 2(p + 2) \quad (3.2)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{j=1}^n (\hat{y}(j) - y(j))^2} \quad (3.3)$$

$S_e$ : 残差平方和  $AIC$ : 赤池情報量規準  
 $n$ : データ数(36)  $p$ : 説明変数の数

$$\overline{\theta_{wd\_z}} = \sum_{j=0}^k a_j x_{ij} + \varepsilon_i \quad (3.4)$$

$\overline{\theta_{wd\_z}}$ : 日平均水温[degC]  $a$ : 気象要素パラメータ  $\varepsilon$ : 誤差項  
 $x$ : 説明変数  $j$ : 離散データ時刻  $i$ : 気象要素

### <日周成分>

$$\overline{\theta(j)_{w\_z}} = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n \theta_{w\_z}(k, j) \quad (3.5)$$

$$T_{w\_z}(t) \approx \overline{\theta_{wd\_z}} + \sum_{f=0}^{\infty} \{X_f \cos \frac{\pi}{12} ft + Y_f \sin \frac{\pi}{12} ft\} \quad (3.6)$$

$$\overline{\theta_{w\_z}} = \sum_{j=0}^{23} \frac{\theta_{w\_z}(j)}{24} \quad (3.7)$$

$$X_f = \frac{1}{12} \sum_{j=0}^{23} \theta_{w\_z}(j) \cos \frac{\pi}{12} fj \quad (3.8)$$

$$Y_f = \frac{1}{12} \sum_{j=0}^{23} \theta_{w\_z}(j) \sin \frac{\pi}{12} fj \quad (3.9)$$

$$\theta_{w\_z} = A_{wd} \sum_{f=0}^{\infty} \{X_f \cos \frac{\pi}{12} ft + Y_f \sin \frac{\pi}{12} ft\} \quad (3.10)$$

$$A_{wd} = (1 + \phi \frac{A_{ad} - \overline{A_{ad}}}{A_{ad}}) \quad (3.11)$$

$$A_{ad} = \frac{\theta_{a\_max} - \theta_{a\_min}}{2} \quad (3.12)$$

$\overline{\theta(j)_{w\_z}}$ : 深度  $z$  における時刻  $j$  の期間平均[日]  $n$ : 期間日数[日]  
 $\theta_{w\_z}$ : 日周成分[degC]  $A_{ad}$ : 気温振幅[degC]  $A_{wd}$ : 水温振幅[degC]  
 $\theta_{a\_min}$ : 日最高気温[degC]  $\theta_{a\_max}$ : 日最低気温[degC]  $\phi$ : 補正係数  
 $T_{w\_z}(t)$ : 推定水温

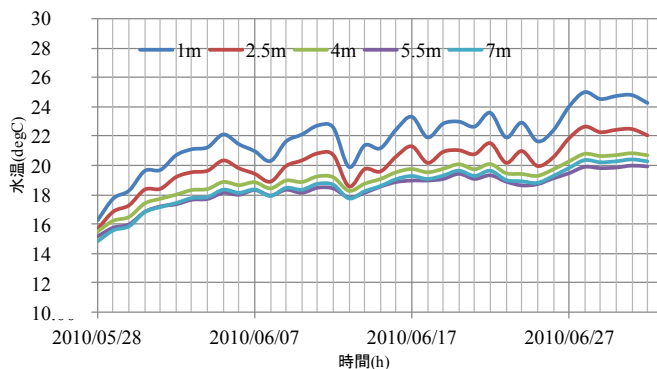


図 13 日平均水温の推定値

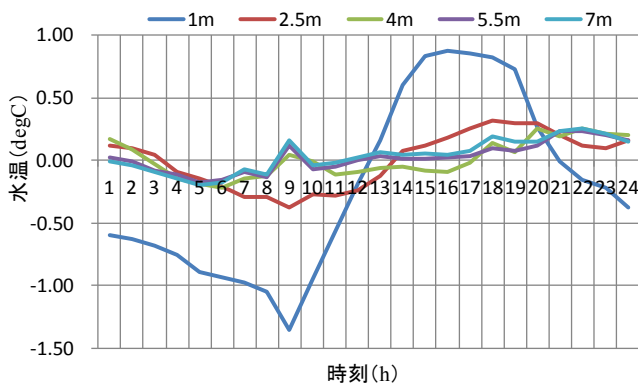


図 14 平均的日周期成分の水深別変動



図 15 平均的日周期成分分離後

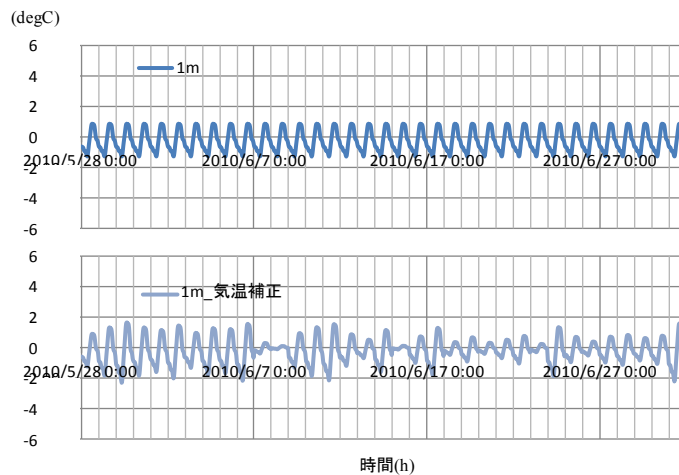


図 16 基準化気温による補正  
(上 気温補正前 下 気温補正後)

表 2 モデル同定結果

成分分類		海水温度 1m	海水温度 2.5m	海水温度 4m	海水温度 5.5m	海水温度 7m	
確定成分	年周期成分	温度成層形成時期と仮定し、季節成分に統合。温度成層形成にデータを使用					
	季節成分	温度成層形成時期における日平均値の温度上昇傾向を重回帰モデルにより近似					
	説明変数 (気象要素)	気温	1日前	1日前	1日前	1日前	1日前
		日射量	なし	なし	1日前	1日前	1日前
		風速	なし	なし	なし	なし	なし
	モデル評価		AIC				
	決定係数(調整済)		0.835	0.834	0.851	0.867	0.815
	確率成分	日周期成分	期間内の時刻別データを平均化し、代表的な一日の変動を決め正弦波で近似				
		項数	1	1	0	0	1
		RMSE(degC)	1.167	0.579	0.423	0.308	0.354
気温補正( $\phi$ )		1.270	-	-	-	-	
RMSE(degC)		1.110	-	-	-	-	
確率成分	ARモデル	AR(7)	AR(18)	AR(5)	AR(29)	AR(25)	
	残差	0.186	0.184	0.092	0.000	0.074	

### 3.6 確率成分のモデル化

残差のモデル化を行う。気温補正を行った 1m のデータを含め各水深での残差を AR モデルによりモデル化した。表 2 における AR モデルの()の数字は過去にさかのぼるデータの個数を表している。

### 3.7 最終的な推定誤差

モデルのパラメータを表 1、一覧表を表 2 に示す。4m 以下の水深ではほぼ日平均値からの変動がないことから、水深が深くなるほど RMSE は小さい。

水深 1m の日周期成分は当日の気温の振幅による補正により RMSE が改善された。

海水温度推定モデルの確定成分のみでの RMSE は 1m で 1.17(degC), 2.5m で 0.58(degC), 4m で 0.42(degC), 5.5m で 0.31(degC), 7m で 0.35(degC)となった。また、確率成分を含めた RMSE は 1m で 0.19, 2.5m で 0.18, 4m で 0.09, 5.5m で 0.00, 7m で 0.07 となった。

次節における空調システムシミュレーションでは確率成分まで計算した推定水温データを使用する。

表 1 モデルの変数と係数

水深	季節成分			日周期成分	
	前日平均気温	前日積算日射量	定数項	$X_f$	$Y_f$
1m	0.68	-	6.03	-0.11	-0.91
2.5m	0.53	-	7.62	0.16	-0.24
4m	0.41	-0.03	10.04	-	-
5.5m	0.37	-0.04	10.42	-	-
7m	0.43	-0.03	9.03	0.04	-0.14



## 4 海水を利用した空調システムシミュレーション

### 4.1 海水取水温度への変換

前章で同定したモデルにより推定した水深別海水温度を推定し、大阪湾の潮汐変動<sup>3)</sup>で取水位置における水温に変換し、データベースを作成した。これを元に空調システムシミュレーションを行う。

### 4.2 冷房負荷算定

08年四宮<sup>4)</sup>らはエネルギー供給量に基づく空調排熱量を算出している。本研究では対象とする地区の選定を行うため、四宮らの空調排熱原単位を用いて500mメッシュごとの冷房負荷と顕熱、潜熱別の排熱量を計算した。

### 4.3 導入地区の選定

本空調システムの導入地区の抽出方法として、熱負荷密度<sup>5)</sup>を用いる。本研究では海水を低温熱源として利用した地域冷暖房を検討するため、海岸線からの距離を考慮し、上述のメッシュごとに冷房負荷を算出し、各冷房負荷が25MWを超えるメッシュを導入地区と定義し、さらに隣り合うメッシュの冷房負荷の合計が25MW以上の地区も導入地区とする。基準値の設定方法としては、全国の地域冷暖房プラントの標準的な規模を計算し、そのピークタイムの規模とした。ここでは規模が25MWの地区B、100MWの地区Cを選定し、基準値以下の規模として15MWの地区Aを選定した。各地区の概要を表3に示す。

### 4.4 システム概要

大阪市域にて海水を利用した空調システムの導入シミュレーションを行い、省エネルギー効果と顕熱排熱量の削減効果と試算する。

システムの構成として、海水と冷却水の熱交換プラントと冷凍機から冷水を供給する冷凍機プラントの2つの種類のプラントにより構成された空調システムを検討する。海岸線付近に熱交換プラントを設置し、そこから遠隔に立地する対象メッシュへと配管を敷設し、ポンプを用いて冷却水を搬送する。プラントの位置関係とメッシュごとの冷房負荷の分布を図17に示す。

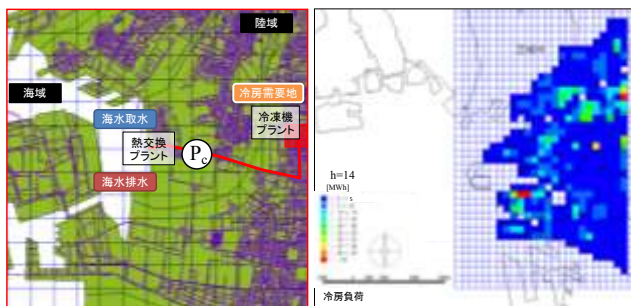


図17 システム概要と冷房負荷分布図

表3 各地区の概要と計算条件

規模	最大流量	圧力損失	摩擦損失	距離	取水	排水	COP	SCOP	主な用途
記号	$G_{cool}$	$\Delta P_2$	$P_f$	$l$	$\theta$	$\theta$	COPs	SCOPs	-
単位	m <sup>3</sup> /min	m	Pa/m	m	°C	°C	-	-	-
15MW(A)	37.87	36.72	30.00	3000.00	20.18	26.32	7.68	6.37	倉庫等
25MW(B)	82.57	30.60		2500.00	20.31	25.45	7.87	6.73	集合住宅
100MW(C)	293.01	3.67		300.00	20.48	26.01	7.59	7.32	商業施設
規模	実揚程	損失水頭	ポンプ効率	軸動力	消費電力	冷房負荷	排熱量	全消費電力量	日積算排熱量
記号	$L$	$H$	$\eta$	$E$	$E_p$	$Q_{se}$	$Q_{set}$	$E_{set}$	$E_{set}$
単位	m	m	-	kW	MW	MW	MW	MW	MWh/day
15MW(A)	6000.00	36.72	0.75	296.12	0.31	12.88	15.55	2.02	163.00
25MW(B)	5000.00	30.60	0.80	502.12	0.53	28.09	29.96	4.17	541.00
100MW(C)	600.00	3.67	0.89	192.94	0.20	99.68	110.08	13.61	1112.00

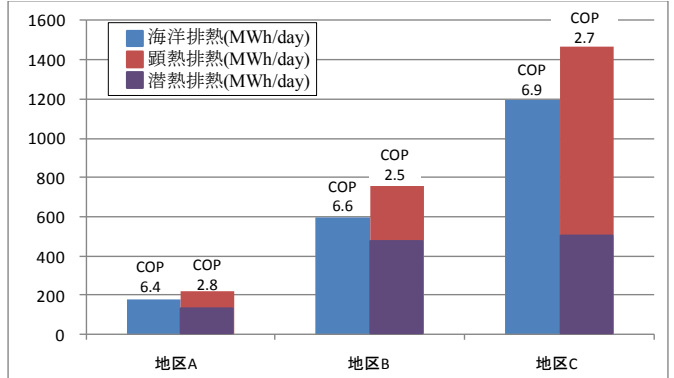


図18 削減効果と成績係数

(左 海水利用システム 右 現行システム)

### 4.5 削減効果の算定

底層低温海水を利用する地域熱供給システムのシステムシミュレーションモデルを構築し、規模の異なる3地区を事例として削減効果の計算を行った。排熱量とシステムCOPを図18に示す。都市大気への顕熱排熱は、それぞれの地区で現状と比べると日積算値が60MWh、250MWh、900MWh削減されとともに、海水排熱量はエネルギー効率の向上により排熱量の絶対値も削減される結果を得た。

## 5 結論

重回帰分析と調和分析を組み合わせることにより、水深別の海水温度推定モデルを構築した。

海水を利用した空調システムを導入した場合、既存の空調システムと比較し、成績係数の改善による省エネルギー効果を得、海洋への排熱による顕熱排熱削減効果を得た。冷房負荷規模が最大時で100MWの規模の地域ではシステムCOP向上による63%の省エネルギー効果と、日積算値で900MWhの顕熱排熱削減によるヒートアイランド対策効果を試算した。

### 参考文献

- 1) 港湾海域の貧酸素水塊--大阪湾沿岸一斉水質調査結果(2004年8月2日) 瀬戸内海 (42), 31-36, 2005 瀬戸内海環境保全協会
- 2) 吉田治典, 寺井俊夫: 熱負荷計算用気象データのモデル化(気温の日周期成分についての検討). 日本建築学会大会計画系論文報告集. 第391号. 昭和63年9月
- 3) 気象庁 HP: URL: <http://www.jma.go.jp/jma/menu/report.html>
- 4) 四宮徳章, 西村伸也, 伊與田浩志: ヒートアイランドに関する都市空調システムの検討-エネルギー供給に基づく空調排熱の時空間特性の予測, 空気調和・衛生工学会論文集, 138, pp.29-38(2008).
- 5) 佐土原聡: 日本建築学会計画系論文集 第510号 61-67 1998年8月 日本全国の地域冷暖房導入可能性と地球環境保全効果に関する調査研究

## 修士論文公聴会 質疑と応答

質疑

矢持教授

質問(1)：7日間の決定理由

回答：大阪湾波浪観測塔における2010年、2011年の気温・水温データと伊勢湾湾奥部における気温・水温データから閾値と判断した。

質問(2)：大阪湾での解析は塩分解析も必要ではないのか。

回答：現段階では、空著システムシミュレーションに利用する簡易なモデルを想定していたため、塩分濃度に関して考慮していないが、他の港湾部でも使用できるように一般化するために再度検討の必要があると考えている。今後の課題として挙げる。

質問(3)：潮位での解析も必要ではないのか。

回答：潮位については相関関数を使用して、モデルのパラメータとしての可能性を検討したが影響が小さかったため、パラメータとしては挙げていない。しかし、前問同様にモデルの一般化を検討するために再度検討する。

質問(4)：気象観測の場所による影響はないのか。

回答：大阪の場合、海上の観測データが理想的であるが、計算のしやすさ、入力データの入手のしやすさから考えて、大阪管区気象データで推定できるモデルを検討している。ただし、本研究では、風速に関しては観測点のデータを使用している。

質問：内部港湾と外部港湾の関係は？

回答(5)：本研究では温度成層の発生する海域を対象としたモデル化を行っているため、内部港湾と外部港湾の関係に関しては示していない。しかし、外洋との関わりの少ない港湾部では温度成層が発生している可能性が示唆されている

鍋島講師

質問(1)：深ければ日周成分がなくなるのではないのか。

質問(2)：7mの周期性1はどう解釈すべきか？

回答：例外を除いては水深が深くなるほど日周成分は必要なくなるが、7mの地点では様子が違っている。

7mの場合、潮汐変動が関係している可能性が考えられ、潮汐の変動の中で同じ周波数を持っているものも存在することより、今後再度潮汐との関連性を検討する必要がある、

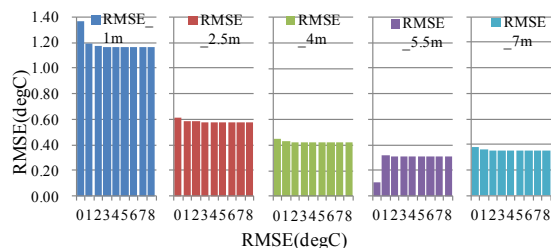


図 19 水深別の RMSE

質問(3)：RMSE がどれくらい変わるのか？

回答：RMSE を図 1 に示す。f=0 は日周成分によるモデル化を行っていない場合の RMSE を意味する。1m を除いては日周成分の変動を加味する必要がない可能性がある。RMSE により、補正の必要性の検討を考える必要がある。

回答：潮汐変動の影響が示唆され、表層部分と底層部分では影響する因子を変えて検討する必要がある。