

大阪湾奥部の水質環境改善に向けた海水循環技術の取り組みについて

橋本 直暉

近畿地方整備局 大阪港湾・空港整備事務所 工務課（〒552-0007 大阪市港区弁天1丁目2番1-1500号）

大阪湾は、瀬戸内海の東端に位置する閉鎖性海域であり、慢性的な水質汚濁に対して様々な環境改善施策が推進されているところである。特に湾奥部は、海水の停滞性が強く、点在する窪地では夏季及びその前後で貧酸素水塊が発生する状況である。

これらの背景を踏まえ、堺泉北港堺浜をモデルケースとし、酸素が豊富な表層の低密度水を「ポンプ式底層放流装置」で底層に放流することにより発生する循環流で海水交換を行い、底層DO（貧酸素水塊）等の海域環境の改善を図る海水循環技術の実証実験を実施した。

キーワード 海域環境、海水循環、モニタリング、現地実験、貧酸素水塊

1. はじめに

閉鎖性海域において底層水が貧酸素化するメカニズムは以下の通りである。

- ・閉鎖性の強い海域では、春～秋の昇温期に太陽光によって表層水が温められることで密度が低下し、冷たく密度が高い底層水と混合しない状態となる(成層状態)。
- ・底層では、沈降したプランクトンや有機物の分解時に酸素が消費されるが、密度差による成層(密度成層)が発達すると、表層から酸素が供給されず、底層水の貧酸素化が進むものである。(図-1)

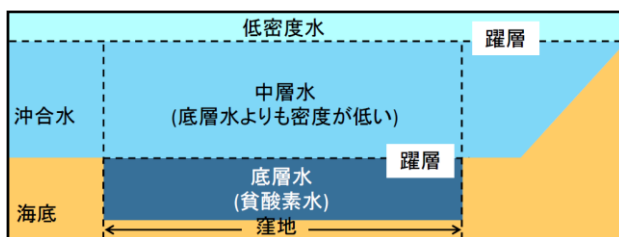


図-1 底層水の貧酸素化

窪地内の貧酸素化の対策としては、空気を底層に送り込み、酸素を供給することで貧酸素化を防止する曝気装置や、窪地を埋め戻す覆砂などの手法がある。しかし、窪地の埋め戻しは、事業を進めるのに多大な時間と費用がかかることや、船舶航行に支障を来すといった問題がある。また、曝気による改善は、閉鎖性水域であるダム湖では実用化しているものの、開放的な海域で実用化し

ている例はない。

このような背景を踏まえ、窪地の貧酸素対策を実用的に実施できる技術として、堺泉北港堺浜にて海水循環技術の現地実証実験を行う。海水循環技術とは、淡水もしくは低塩分で低密度の表層水を窪地の底層に放流し、低密度水が密度差により浮上する力を利用して循環流を発生させ、窪地の貧酸素化を防ぐ技術である。そのメカニズムは、①表層水や下水処理水といった高温・低塩分の密度が軽い水を窪地内へ導水し、②浮力と連行で窪地内の冷たく密度の重い水塊の解消を促進し、③同時に起こる鉛直循環流によって、外部の海水(沖合水)を水平方向に引き込むことで、窪地水と直上水との海水交換を促進し、窪地内の貧酸素水塊を低減する。

海水循環技術のメカニズムについて図-2、図-3に示す。

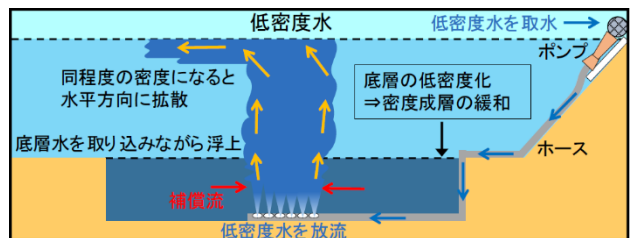


図-2 密度成層が緩和するメカニズム

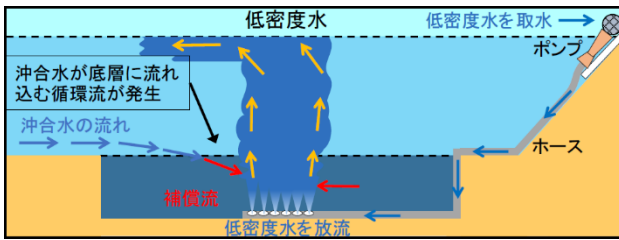


図-3 沖合水が底層へ流入するメカニズム

2. 海水循環技術の利点及び留意点について

本技術（海水循環技術）及びその他の貧酸素対策手法について表-1に示す。

表-1 貧酸素対策の手法

技術名	特徴	イメージ図
本技術	低密度水を高密度な底層水中に放流することで発生する浮力と連行の効果により、密度成層を緩和させ、底層の貧酸素化を防止する。	
曝気装置	底層に空気を直接供給することで、底層の貧酸素化を防止する。	
覆砂	土砂等を使用して、貧酸素水塊が発生しやすい窪地地形を修復することで、底層の貧酸素化を防止する。	
底層取水型循環装置	高密度な底層水を表層に放流することで、底層の貧酸素化を解消する。	

本技術（海水循環技術）の利点としては、①曝気装置と比較して非常に小さな電力で導水量を確保することができる。

- ・曝気装置：送気量＝約107 m³/日/kW
 - ・本技術（海水循環技術）：導水量＝約5,500 m³/日/kW
- 曝気装置の送気量と比較すると、約50倍の導水量を確保することが可能である。

※堺浜での実証実験時の消費電力は2.2kW(導水量12,000m³/日)

②覆砂による貧酸素水塊の解消に比べて、費用が安価である。

③連行の効果により、導水量以上の循環流を発生させることができ、広範囲に改善効果が現れる。

- ・曝気装置の場合：水平方向の循環流が発生しないため、

効果は放流口周辺に限られる。

・底層取水型循環装置の場合：高密度の底層水を表層に放流すると、その大部分は底層まで沈降するため、いわゆるショートサーキットとなってしまう、効果は放流口周辺に限られる。

・本技術（海水循環技術）の場合：淡水または低密度の表層水を底層に放流すると、表層水は周辺の底層水を連行しつつ上昇し、同程度の密度の層に到達すると周辺海域へ拡散されるため、広い範囲の海水を引き込むことが可能である。

④装置稼働終了後においても水質改善効果が残存する。堺浜における現地実証実験において、装置稼働終了後も密度成層の緩和効果が持続し、貧酸素水塊の解消が早まったことが確認された。

海水循環技術における水質改善効果の発現が期待出来る海域には特性があり（表-2）、条件に沿って本技術を適用することで、より効果を得られると考えられる。また、本技術の導入する際の留意点として、周辺海域への影響及びその対策について表-3に示す。

表-2 本技術による水質改善効果が期待できる海域の特性

海域の特性
①導入海域の周辺に導水可能な淡水が存在している。あるいは、表層水の塩分濃度が低い。 (∵密度差による浮上・連行を発生させるため)
②導入海域の地形が窪地状である。 (∵底層水の停滞性が強く表層水と底層水の密度差が大きい)
③周辺海域下層（引き込む水）のDO濃度が高い。 (∵底層へ供給できるDO濃度が高くなる)
④対象となる海域の閉鎖性が強い。 (∵循環流を発生させることにより底層水の滞留時間を短縮できる。)
【備考】
・(1)を満たしていない場合は適用できない。
・(1)を満たしていても、(2)～(4)を全て満たしていない場合、効果発現が難しい。

表-3 本技術の導入による周辺海域への影響

影響	対策
●底層水と中層水間の密度成層が緩和することで、窪地中層も貧酸素化し、貧酸素水塊厚が拡大してしまう可能性がある。	●シミュレーションを用いた予測計算により確認 ●付着生物の生息水深を確認し、貧酸素水塊拡大による影響の有無を確認
●淡水を放流する場合、表層水よりも密度が軽いため、底層の栄養塩類や還元物質が表層まで巻き上がる可能性がある。	●放流水が急激に浮上しないように放流方法を調整(ただし、浮力が弱すぎると貧酸素水塊厚が拡大する)
●導入海域内に浮泥が存在している場合、海底面直上で放流すると、浮泥が巻き上がる可能性がある。	●事前調査において浮泥厚を確認し、浮泥より上で放水する
●下水処理場などの処理水を利用する場合、処理水の水質や滞留時間によっては対象海域の水質が悪化する可能性がある。	●資料収集等により処理水の水質状況を事前に把握し、対象海域に放流しても問題ないことを確認

3. 実証実験について

現地実証実験は堺泉北港堺浜（図-4）にて、2015年から2017年の3カ年実施した。堺泉北港堺浜は、水域内（対象海域1.5×0.5km）が深い窪地形状となっており、冬に形成された冷たく重い水塊が、密度成層ができる春

から秋にかけて底層に滞留し続け、毎年、長期間貧酸素化している。一級河川大和川の河口に位置するため、水域内の表層水が大和川の影響で低塩分となっており、表層水を低密度水として利用できる環境である。

各年度の調査概要については表-4、表-5、調査区分の主な役割については表-6に示す。

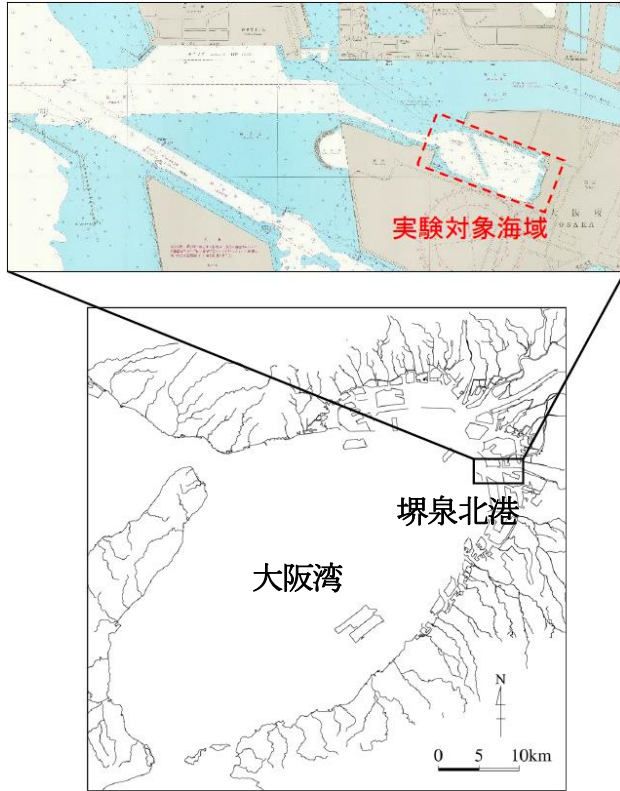


図-4 調査場所

表-4 各年度の調査概要①

調査区分	調査項目	調査地点数
連続調査	水温、塩分	1点
水質調査①	水温、塩分、濁度、DO、クロロフィル蛍光強度、pH	18点 (pHのみ1点)
水質調査②	COD、T-N、NO ₂ -N、NO ₃ -N、NH ₄ -N、T-P、PO ₄ -P、Chl.a 硫化物	4点
プリーム調査	水温、塩分	1点

表-5 各年度の調査概要②

調査年	調査目的	装置稼働時期	導水量
2015年	効果検証のため事前モニタリング調査 効果検証のため事前モニタリング調査	非稼働	—
2016年	装置稼働による水質改善効果の確認	7月～9月	約12,000m ³ /日
2017年	装置稼働による水質改善効果の確認 水質改善効果の確認	5月～7月	約12,000m ³ /日

表-6 現地環境調査毎の主な役割

調査区分	主な役割
プリーム調査	装置の稼働開始時において、低密度水が窪地内に導水されて、窪地内の冷水を連行して中層へ浮上していることを確認する。また、浮上水塊が表層付近まで浮上していないことを確認する。
連続調査	調査期間中の窪地内の密度(水温・塩分)を連続計測し、装置非稼働時(平成27年度の事前調査時)との比較を行うことで、低密度水の導水によって窪地内の冷たく重い溜まり水の解消が促進される効果を検証する。
水質調査①	調査期間中の密度とDOの空間分布を計測し、装置非稼働時(平成27年度の事前調査時)との比較を行うことで、低密度水の導水で窪地内の冷たく重い溜まり水の解消が促進される効果と、窪地内の無酸素水塊の存在期間の短縮効果を検証する。
水質調査②	低密度水の導水期間中において窒素・リン・硫化物濃度等を採水分析し、窪地内の高濃度の窒素・リンや硫化物が表層付近に浮上していないことを検証する。

4. 本技術の効果について

これまでの実証実験より、本技術の効果を確認する。例として水温の図を用いる。

<鉛直縦断分布の比較>

・図-5の2017年の7月上旬をみると実験装置を稼働していない年と比べて、窪地底層水と水深10mとの水温差が小さくなっており水温成層が緩和されていた。図-6の通り、2016年の9月上旬の調査においても、2015年の同時期と比較すると同様の傾向がみられた。(密度成層の緩和)

・図-7の2016年及び2017年の10月下旬の調査では、窪地内の水温成層が解消していた。2016年ではSt. 11(窪地内最深点)付近では水温成層が残っていたが、2017年では、St. 11付近も含めて水温成層が解消された。(貧酸素水塊の解消)

<連続観測結果の比較>

図-8に水深10m以深の水温変化を示す。

・2016年の調査結果では、8月6日に放流口位置を下げた頃から、底上2m、1mでの昇温が大きくみられた。放流口を下げたことにより、底層に導入した低密度水による窪地内冷水の連行・浮上が大きく生じるようになったことによるものだと考えられる。

・2017年の調査結果では、装置稼働直後から窪地水の昇温が大きくなり、鉛直方向の水温差が2015年と比べて小さくなった。装置撤去後の底上2m、1mでの昇温が小さくなったことから、窪地水の昇温の変化は、底層に導入した上層水が窪地水を連行・浮上したことによるものと考えられる。

・水温の鉛直混合に着目すると、2016年では、10月中旬から鉛直混合が起り始め、10月21日には鉛直的にほぼ均一化し、水温が24℃程度となった。一方、2017年では、9月上旬に鉛直混合が起り始め、10月24日には水温が鉛直的にほぼ均一化し、水温が23℃程度となった。

<St. 11(窪地最深点)の鉛直水温比較>

図-9にSt. 11(窪地最深箇所)における水温の鉛直プロファイルを示す。

・春季(2015年6月2日、2017年6月1日)をみると、2017年は、実験装置の稼働により、2015年に比べて水温差が小

さく水温成層が発達しなかった。

・夏季(2015年8月1日, 2016年8月2日, 2017年7月31日)をみると, 2016年は, 放流位置を下げる前であったため, 実験装置による効果が確認されず水温成層が発達していたが, 2017年は, 実験装置の稼働により, 2015年及び2016年に比べると水温差が小さく, 水温成層が発達しなかった。

・秋季(2015年9月4日, 2016年9月28日, 2017年9月4日)をみると, 2016年は装置稼働により水温成層が緩和されているが, 2017年では, 昇温期の途中で装置を止めたため, 水温差が大きくなり水温成層が発達した。

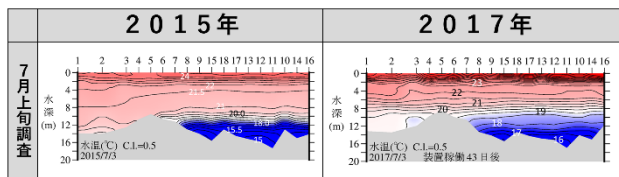


図-5 水温鉛直縦断分布図(7月上旬)

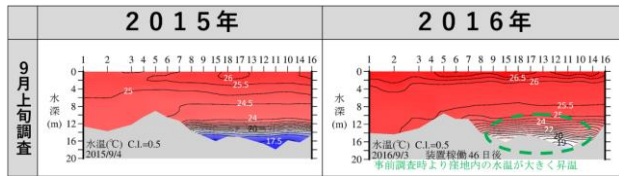


図-6 水温鉛直縦断分布図(9月上旬)

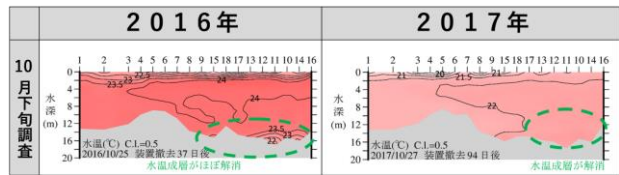


図-7 水温鉛直縦断分布図(10月下旬)

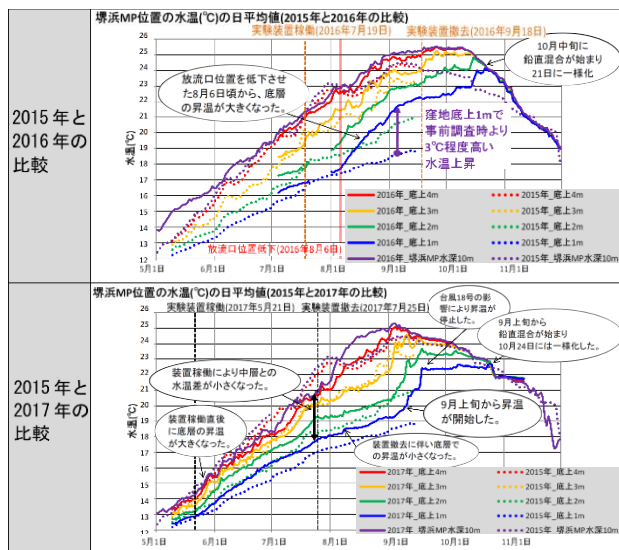
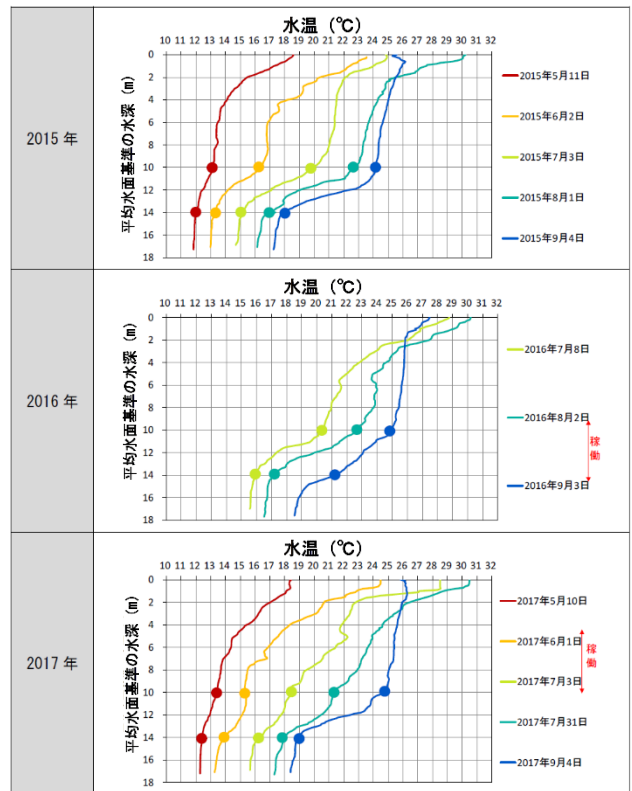


図-8 水深10m以深の水温変化



●はそれぞれ湾口最深部水深(水深10m)と放流水深(水深14m)を示している。

図-9 St. 11(窪地最深箇所)における水温の鉛直プロファイル

本技術の導入によって水循環技術の導入により期待できる水質改善効果は表-7に, 水質改善効果の波及フローは図-10に示すとおりである。

表-7 本技術により期待できる水質改善効果

期待できる水質改善効果	水質改善効果により引き起こされる現象
(1)密度成層の緩和	●貧酸素水塊の解消 (∵底層水と沖合水の密度差が解消されることで底層まで沖合水が流入し酸素を供給できるため)
(2)貧酸素水塊の解消	●底生生物の生育 ●底質からの硫化物・栄養塩等の溶出を抑制 ●青潮の発生防止
(3)底質由来の還元物質・栄養塩等の溶出の抑制	●有機汚濁の抑制 (∵底質由来の栄養塩等を利用した一次生産量が低下し、沈降・堆積する有機物量が減少するため) ●底質環境の改善
(4)青潮の発生防止	●親水性の向上 (∵貧酸素水塊に多く含まれている硫化水素が表層まで到達しなくなるため) ●生物への影響の防止
(5)栄養塩の中層拡散	●沖合への栄養塩の供給 (∵中層は有酸素層ではないため、一次生産により栄養塩が消費されることがないため)

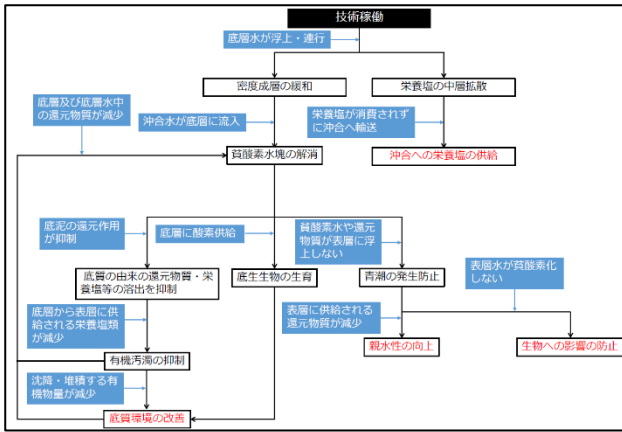


図-10 本技術による水質改善効果の波及フロー

5. おわりに

循環流の稼働力を強めるため、水温差のみではなく塩分差を用いた今回の実証実験では、消費電力2.2kw（導水量12,000m³）と小さいながら、周辺海域から高DO水を引き込むことで、導水量以上の循環流を発生させることになり、広範囲で密度成層の緩和や貧酸素水塊の低減等といった水質改善効果が現れることが確認された。本技術の効果が期待できる海域の特性に合わせて活用することにより、費用面でも優れたコストパフォーマンスを発揮することから、大阪湾全体における水質改善事業を効果的・効率的に進める際の1つの技術として活用し、水質環境改善に寄与していきたい。

参考文献：

春山 哲彦（2017年）「海水循環技術と現地実験について」

巻末：

今回の論文は、従前の所属先(神戸港湾技術調査事務所)における所掌内容を課題として、報告したものである。