

3. 中小規模事業に適用可能な浚渫・圧送技術の調査と抽出

現在、各国で実施されているサンドリサイクル・サンドバイパスに関する技術・システムは、一般的な工法は以下とおりである。

- (1) 船舶に搭載されたポンプ浚渫機（水中ポンプを含む）やグラブ浚渫機（クラムシェルを含む）で浚渫し、土運船（バージ）や配管（パイプライン）で輸送する方法
- (2) 陸上からバックホウで掘削し、ダンプトラックで運搬する方法
- (3) 栈橋やクローラクレーンに取り付けた器具（サンドポンプ）で砂を採取し、配管（パイプライン）でポンプ圧送する方法

現時点までに、オーストラリアやアメリカ合衆国で実施されているサンドリサイクル・サンドバイパスシステムは、砂の輸送量が数万～数十万 m^3 /年に及ぶ大規模なものであり、鳥取県で実施されているサンドリサイクル・サンドバイパスの事業規模に比較して過大なものである。

このため、中小規模の砂搬送に良好な適用性を有し、低コストである浚渫・圧送技術について国内外の技術を調査し抽出した（注：国内事例は別添資料）。

なお、従来から多様に用いられているグラブ（クラムシェルを含む）・バックホウによる浚渫方法並びにダンプトラック・土運船（バージ）による搬送技術については調査の対象外とした。

3.1 浚渫技術

国内外の技術調査を行った結果、適用可能な技術は、以下に分類される。なお、表-3.1 にこれらの分類および技術を比較して示すとともに、以下にその概要を示す。

- (1) 第2章の Noosa Main Beach（ヌーサ メイン ビーチ、オーストラリア）で用いられている Sand Shifter（サンドシフター）
- (2) アメリカ・欧州などで用いられている Sand Ejector（サンドイジェクター）（Eductor（イデュークター）という呼称も使われている）
- (3) 水中ポンプによる方法
- (4) バックホウの付属装置（アタッチメント）として稼働させる方法
- (5) 主として波浪の小さい内水域で用いられている浚渫・空気圧送システム

3.1.1 Sand Shifter(サンドシフター)

Noosa Main Beach（ヌーサ メイン ビーチ、オーストラリア）で適用されている Sand Shifter（第2章、表-2.1、別冊資料参照）は、オーストラリアの Slurry System Marine（スラリー システム マリン）社が開発した技術であり、2012年春より本格稼働している。採取方法・使用機材は以下である。

- (1) 別途設置した給水ポンプで採取した海水を、延長 15m/基の Sand Shifter（砂移動装置）から砂浜下方に噴射して流動化させる。
- (2) システムの一端である漂砂の下手側には小型の Sand Ejector（砂噴射装置）（詳細は 3.1.2 参照）が据え付けられており、砂はパイプライン内へ吸い上げられ輸送される。
- (3) 砂が吸い上げられた部分では砂面は低下し、システム全体が砂浜中に沈降することにより、さらに Sand Shifter の中に砂が集まりやすくなる。
- (4) 延長 15m/基の Sand Shifter を 2 基並行に設置して、1 度に 2,000 m^3 程度の浚渫が可能であり、40,000-80,000 m^3 /年のサンドリサイクルを実現している。
- (5) 砂のスラリー化と輸送には小型の Sand Ejector を用いるが、広範囲の砂を効率的に集める工夫が施されている。
- (6) 現在、夜間電力を活用して自動運転することで低コスト化を図っている。採取部分の設備自身は比較的小さく軽量であるだけでなく、海岸部において大規模な取り付け工事や特殊な施設を必要とせず、採取場所の状況に応じて移設や増設が可能である。

3.1.2 Sand Ejector(サンドイジェクター)

Sand Ejector は、オーストラリア・アメリカ合衆国・欧州において広く利用されている浚渫技術であり、オーストラリアの Tweed 川（ツイード川）におけるサンドバイパスでは、巨大な栈橋に 11 基の Sand Ejector を固定して大規模な浚渫を実施している。また、同国の Nerang 川（ナラン川）においても巨大な栈橋に 10 基の Sand Ejector を固定して大規模な浚渫を実施している。

同様な大規模施設は、アメリカ合衆国・南アフリカ・日本（静岡県・福田漁港・浅羽海岸サンドバイパスシステムでは 2012/09 から試運転開始）などでも実用化されている。

この技術の中心部分である Ejector ポンプ（噴射装置付ポンプ）は、従来、粉体などをスラリー化して輸送するための技術である。その採取のメカニズムを以下に示す。

- (1) 別途設置した給水ポンプから供給された水は、表-3.1 に示した Ejector 本体の両側部の 2 本の配

管を通過し先端部に送られる。

- (2) うち一方の加圧された海水は、先端部の **Fluidizing Nozzle** (フロイドジング ノズル) (図中①) から下方に噴射され、その周辺の砂を流動化させる。もう一方は、先端部から上方に向けられ、**Nozzle** (ノズル) (図中②) から噴射されて、その周辺の砂を水と勢いよく混合させスラリー化される。
- (3) 噴射された水は、その勢いのまま **Mixing Chamber** (ミキシング チャンバー) (図中③) 方向にスラリーを運び、**Mixing Chamber** 内に吸い込まれて、パイプラインを通過して輸送される。
- (4) 幅広い砂質に対応することができるが、別途比較的大きなポンプ設備が必要であり、エネルギー効率が低い点などの課題もある。
- (5) 陸軍工兵隊の資料によると、**Indian River Inlet** (インディアン リバー インレット、アメリカ合衆国) で利用されている **Sand Ejector** (能力 180m³/ 時間) は、1 基 4ton の重量がある。器具周辺の砂の採取が可能であるが、砂を何箇所にもわたって広範囲に採取するために、クローラークレーンで吊り下げて移動させている。クローラークレーンにより **Sand Ejector** を用いて砂の採取を行うシステムは **Cap Breton** (キャップ ブレトン、フランス) などでも利用されているが、吊下げ重量が大きいため、堅固な足場を確保する必要があり、トラッククレーンでの作業が困難でクレーン本体の組立てや作業時の機械足場の確保など、砂浜において適用する際には課題が多い。

3.1.3 水中サンドポンプ

水中サンドポンプによる浚渫は、広く国内外で実施されている。以下に作業手順や特徴を示す。

- (1) ポンプによって吸い込む海水中に含まれる砂の量としては、10%程度まで輸送することが可能で、砂の性状や量によって、さまざまな機械の選定が可能である。礫などについても、吸引部分にフィルターを追加することによって対応可能である。
- (2) 表-3.1 に示される図は陸軍工兵隊により実施されたものであり、取水ポンプと同時に別途小規模なポンプを取り付け、ジェット水流をポンプの下方に発生させて砂の流動化を図って採取能力を検証したものである。検証によれば、同規模の浚渫を行う場合に、**Sand Ejector** (サンド イジェクター) と同等以上の性能を有している。
- (3) 別途砂を流動化させるポンプが不必要なためエネルギー効率は比較的高く、さらに水中に没しているため騒音についても他の工法よりは軽減できる。**Sand Shifter** (サンド シフター) のような砂を効果的に集める技術と併用することで、小規模ながらエネルギー効率よく砂を採取することが可能である。
- (4) 再生可能エネルギーの利用も容易である反面、砂輸送時には管径の大きな配管が必要なため、移動などの取り扱いには十分注意が必要である。

3.1.4 バックホウ取付型

バックホウに取付ける付属装置(アタッチメント)による浚渫方法は、国内外で多く利用されている。砂の吸い込み方法と輸送方法は水中ポンプによる方法と同じであるが、浚渫場所の状況変化に対する対応が容易であることが利点である。国内においては、既に様々な付属装置が開発されており、海外でも多くの事例がある。


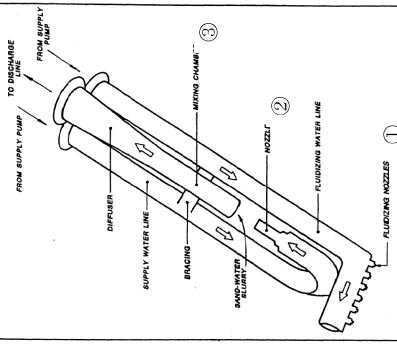
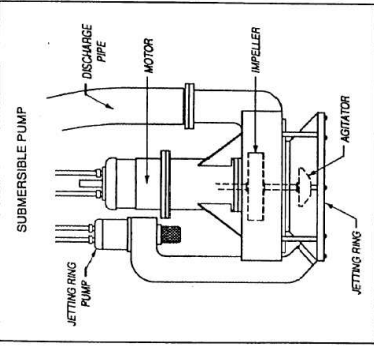

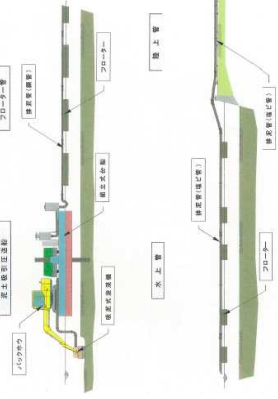
また、用途に合わせて、電機・油圧・圧搾空気などのエネルギーを活用することができる(一般的には電気)。作業時の機械足場の確保が重要であるとともに、バックホウのエンジンによる騒音など十分注意が必要である。

3.1.5 浚渫・空気圧送システム

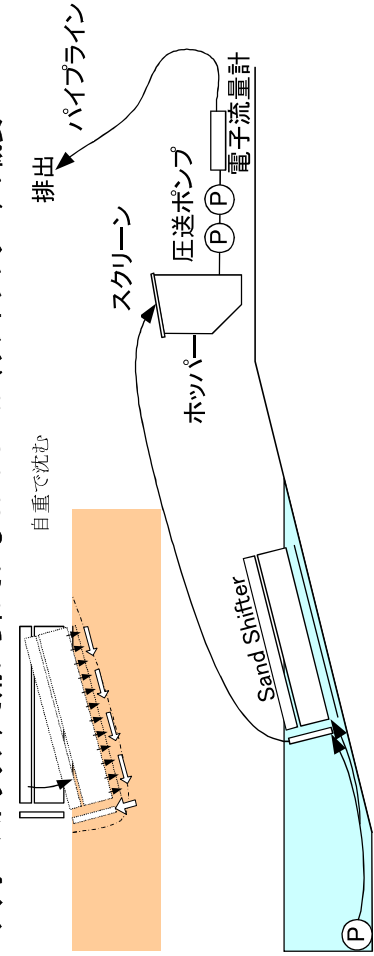
浚渫・空気圧送システムは、国内外の多くの内水面において実績がある工法である。砂の採取部分は、これまで説明したポンプやバックホウ付属装置(アタッチメント)による浚渫方法並びにグラブ(クラムシェルを含む)による浚渫方法であり、浚渫した砂に圧縮機(コンプレッサー)で圧縮した空気を混合させ、配管を通して排出先まで砂を圧送する一連の方法である。

この方法は、内水面や港湾内で波浪の小さい水域での活用は可能であるが、サンドリサイクル・サンドバイパスを行うような水域では、砕波帯内での船体の保持が難しい。圧縮機(コンプレッサー)の運転並びに排出先での空気噴出による騒音など十分注意が必要である。

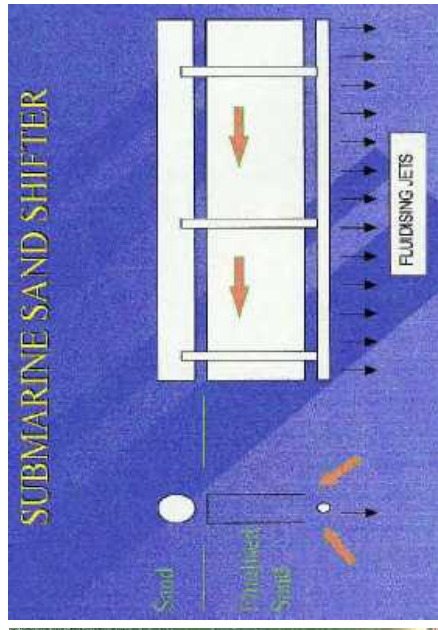
表-3.1 砂採取技術の比較

採取技術	Sand Shifter	Sand Ejector	水中サンドポンプ	バックホウ取付型	浚渫・空気圧送システム
特徴	<ul style="list-style-type: none"> ポンプで加圧された水により、砂浜の砂を流動化させて終端部のEjectorにより採取、圧送する。(Ejectorは右欄参照)。 全長15mのシステムで、1回の運転で周囲の2,000m³の砂を集めることができる。 Noosa 海岸では、180m³/hrの浚渫を実現している。 採取時にできた穴に、波浪の作用により砂を集めて再圧送する。 ※ 補図図-1、補図図-2 参照	<ul style="list-style-type: none"> 高速で水を吹き込むことで周辺の砂などを配管内に取り込み圧送する。粉体などをスラリー化して圧送するために用いられる。 下の図は、陸軍工兵隊が開発したRiver Inletで利用するために開発されたもので、下部にジェット水を噴出し、砂を流動化させるノズルが付いている。 例：Indian River Inletで使われているもので、長さ6m、配管10インチ、重量4t、415m³/hr。 	<ul style="list-style-type: none"> サンドポンプにより、海水と同時に砂を吸い上げる。海水くみ上げ量の、10%程度の砂の吸い上げが可能。 異物混入などにも対応できる。土量に下によりポンプ選定が容易である。 下の図は、陸軍工兵隊が実験したもの(日本製)で150kwのサブポンプに別途5kw程度のポンプを取り付け、吸い上げ部から下方にジェット水を放出して砂の流動化を図ったもの。 例：配管10インチ、150kwポンプ、重量約3.6t、574m³/hr。 	<ul style="list-style-type: none"> バックホウにアダッチメントとして取り付けたポンプで、砂を吸い圧送する方法。 掘削する砂の種類(へドロ〜礫)、圧送距離、動力(油圧、圧搾空気、電気)などにより、さまざまな方法が、世界中で開発されている(日本製が最も多様な製品がある)。 NETIS 登録された技術などもある。 	<ul style="list-style-type: none"> 台船上に据え付けた浚渫装置で掘削した砂を、空気で圧送する。 浚渫方法は、対応砂の性状によって選択することができ、一般にバックホウなどの先端に取り付ける。 閉鎖水域や港湾内での浚渫に主に利用されている。 砂分が多い場合には、海水を土量の2～3倍送る必要がある。
図または写真					
メリット	<ul style="list-style-type: none"> 小さなシステムで広範囲の砂を採取できる(1回稼働2,000m³)。 小まめな移動の必要がない。 騒音が軽微である。 再生可能エネルギーが利用可能。 	<ul style="list-style-type: none"> 幅広い砂の性状に対処可能。 多少の礫などもくみ上げ可能。 技術が成熟している。 再生可能エネルギーが利用可能。 	<ul style="list-style-type: none"> 輸送する砂の量、輸送距離によって多様なポンプから大きさを選べる。 エネルギー効率がいい。 振動騒音は少ない。 再生可能エネルギーが利用しやすい。 	<ul style="list-style-type: none"> 比較的大きなポンプを自由な場所・角度で据付することができる。 機器の移動が簡単。 小まめな掘削が可能。 	<ul style="list-style-type: none"> 船上にすべての機器があるため、移動時の調整が容易である。 大土量を長距離圧送できる。
デメリット	<ul style="list-style-type: none"> エネルギー効率は悪い。 別途高速・高圧の水を発生させるポンプが必要となる。 技術が成熟していない。 	<ul style="list-style-type: none"> エネルギー効率が悪い。 重量が比較的大きい。 大量の砂移動には移動が必要。 別途高速・高圧の水を発生させるポンプが必要となる。 	<ul style="list-style-type: none"> 比較的必要なメンテナンス頻度が高い。 	<ul style="list-style-type: none"> 作業地盤の確保が必要であるが、泥上車などを活用すれば比較対応は可能。 バックホウの騒音が課題。 再生可能エネルギーの活用が難しい。 	<ul style="list-style-type: none"> 砕波帯内では、船体の安定が難しい。 コンプレッサーの運転並びに排出先の空気噴出による騒音が課題 船上の機器を利用するため、再生可能エネルギーの活用が難しい。
総合	○	△	○	△	△

【補足図-1】 Noosa Main Beach (ヌーサ メイン ビーチ、オーストラリア) で用いられている Sand Shifter (サンドシフター) の概要



稼動状況図



土砂取り込みのメカニズム



吐き出し部



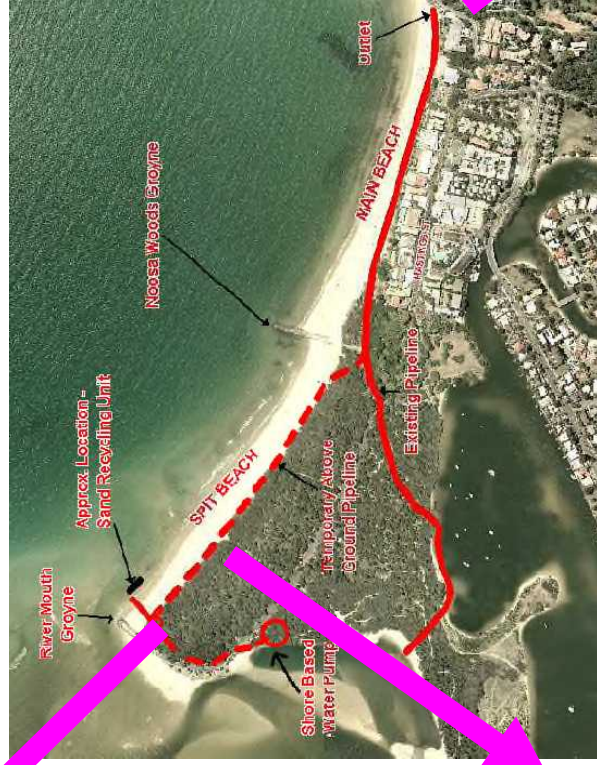
サンドシフター



土砂取り込み部の拡大



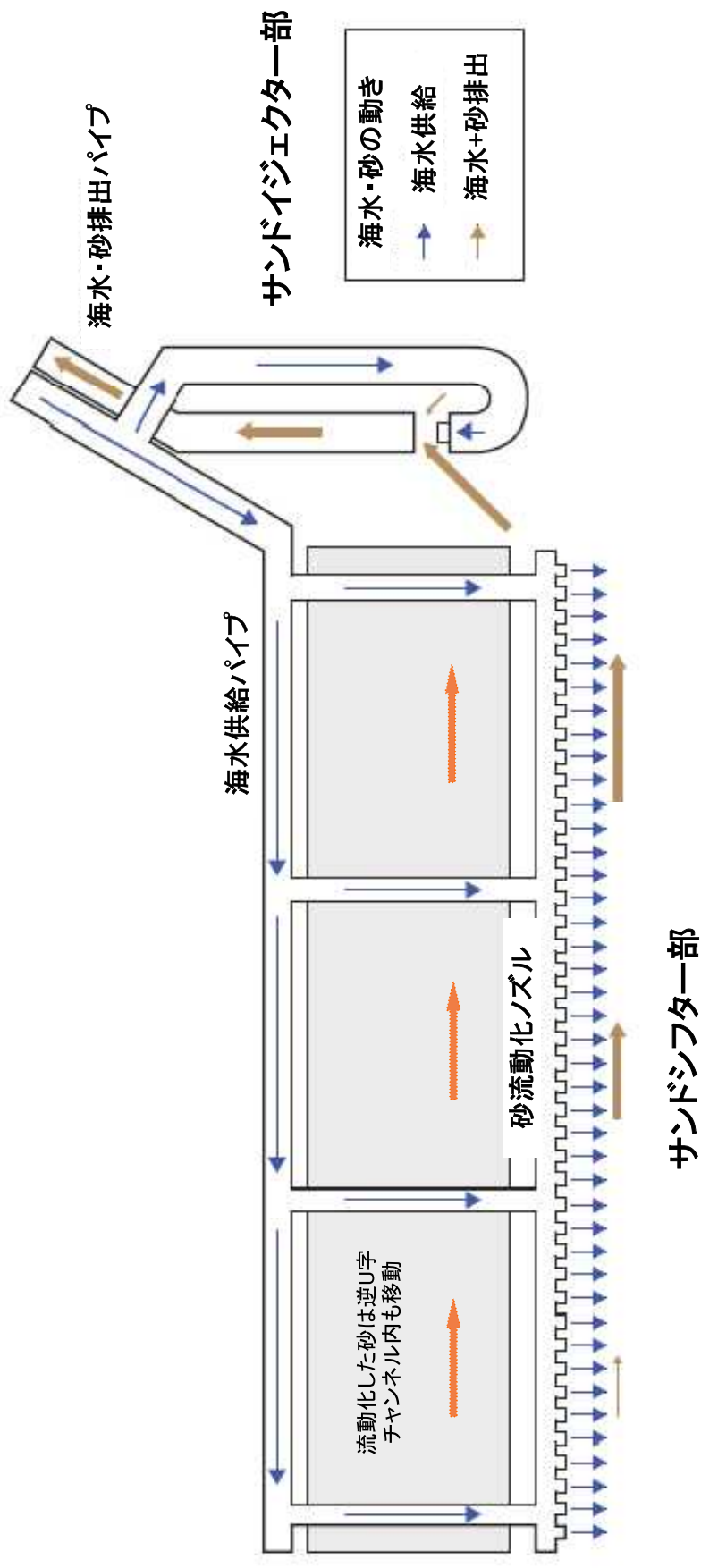
ホッパー 圧送ポンプ



Noosa 海岸での配置

概要：土砂の取り込み部分は、Sand Ejector を応用。周辺の砂を集める部分に工夫が施されている。集積部分でジェット水流を放出して広範囲の土砂を集める。1 回の稼動で、2000m³ 程度の砂を集めることができる。
 新エネルギーを活用。PC で自動制御し、187.5m³/時間 程度処理可能。
 運転：サンディフター 18m (サンドエジェクター付き) 海水くみ上げポンプ
 構成：サンディフター (280kw) 圧送ポンプ (280kw)
 ホッパー (混入物除去スクリーン付き)

【補足図-2】 Noosa Main Beach(ヌーサメインビーチ、オーストラリア)で用いられている Sand Shifter(サンドシフター)の概要



縦断面によるサンドシフター機能説明図

3.2 圧送技術

砂の輸送技術について、前節の海外並びに国内技術を対象に調査した。現在、一般的に利用されている砂輸送技術のうち、再生可能エネルギーを活用することに重点を置くため、ポンプによるスラリー輸送並びに空気圧送に関して表-3.2 に整理して示した。

なお、ダンプトラック・土運船（バージ）・ベルトコンベアなどの化石燃料等を動力源にする輸送方法については、対象外とした。

以下に示されている「スラリーのポンプ圧送」並びに「空気圧送」については、現在、国内外で最も行われている砂の圧送方法である。

3.2.1 スラリーのポンプ圧送

スラリーのポンプ圧送は、ポンプにより水を圧送する際に 10%程度の砂を混ぜて送る方法である。配管内に砂が堆積して閉塞しないように、管内での砂の限界沈殿流速以上の流速で送る必要がある。

長距離の管路を圧送する際の砂は沈殿して閉塞しやすい特徴があり、シールドトンネルなどで圧送する場合には、気泡などを加えて安定化させて圧送し、排出側では消泡効果などのある添加剤を投入して分離する施設を設置するのが一般的である。

ただし、サンドリサイクル・サンドバイパスでは、海岸部へ砂を直接排出させる可能性が高いため、この方法は利用できない。

ポンプ能力は摩擦損失水頭と曲がりや形状変化などの損失水頭で算出することができる。ポンプで長距離圧送することには非常に大きな水頭を持たせる必要があり、運転停止時はもちろんのこと、停電時・電圧の変動時など圧力・流速が急激に変動した場合、配管内で真空部などが発生して衝撃的な逆流が発生してポンプが破壊されることがある。また、現在市販されているポンプで圧送するには、確保できる揚程と流量より、1,000m 程度ごとに中継（中継ポンプ）が必要である。

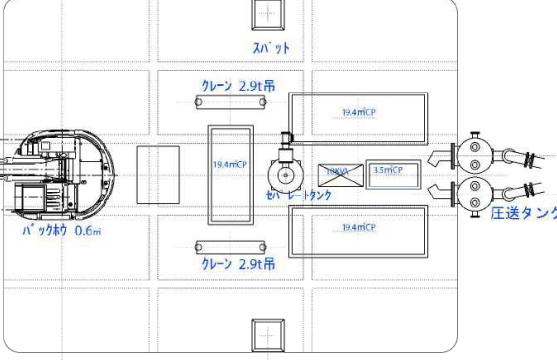
大規模なサンドリサイクル・サンドバイパスシステムでは、浚渫技術で説明した Ejector（イジェクター）を用いて非常に高圧力で圧送する技術が採用されている。これもポンプ圧送の一部として考えることができるが、非常に大きな電力が必要となる。オーストラリアの Noosa Main Beach（ヌーサメインビーチ）の場合には、1.3km の圧送に 280kw の動力を必要としているが、自動運転を実現している。現在、スラリーの長距離圧送時には様々な自動制御などの技術が開発されているので、これらの新しい技術を取り入れた制御を取り入れることが重要である。

3.2.2 空気圧送

空気圧送は、砂輸送時に圧縮機（コンプレッサー）から高圧圧縮空気を配管に送り込む方法で、従来から浚渫砂の圧送に利用されている。スラリーポンプによる圧送と同様に、砂は配管を閉塞する可能性が高いが、砂の 2~3 倍程度の加水をして含水比を上げることで圧送が可能である。

これまで、砂を 2km 以上の圧送した実績が報告されている。課題としては、排出部分で砂と水と同時に空気が噴出するために騒音が発生すること、圧縮機（コンプレッサー）など比較的大きな機械設備が必要であるとともに、騒音が発生することなどである。

表-3.2 砂圧送技術の比較

輸送技術	スラリーポンプ圧送	空気圧送
特徴	<ul style="list-style-type: none"> 大量の海水に砂を混ぜ、ポンプにより圧送する方法。 スラリーポンプとは、異物の圧送が可能なようなインペラなどに対処が施されたポンプ。 海水の10%程度の砂輸送が可能。 サンドポンプによる揚程計算は簡易。 電圧変動、起動・停止時の圧力変動への対応が必要。 	<ul style="list-style-type: none"> 砂輸送の際に、高圧空気を同時に注入することによって圧送する方法。 通常、作業台船上に機器を設置して、浚渫した砂をそのまま圧送するが、陸上に設置することも可能。 砂を送るには加水が必要。この時、砂1：水2～3。 高圧空気のためコンプレッサーが必要。
概要	<ul style="list-style-type: none"> パイプラインの閉塞を防ぐため、砂の限界沈殿流速(VL)以上の流速を与える必要がある。 $VL=1.3\sqrt{2gD(\gamma_s-\gamma_w)/\gamma_w}$、D：管径、$\gamma_s, \gamma_w$：砂、水の密度。 管径、流量、圧送距離、そのほかの損失水頭をもとに、揚程計算を行う。 	 <ul style="list-style-type: none"> 上図は浚渫砂の圧送のため、台船上に組み立てられたものである。大型コンプレッサーのほか圧送タンク、圧搾空気と砂を混ぜて送り込む装置が必要。 船上でなくても、地上でも設置が十分可能。
メリット	<ul style="list-style-type: none"> 電力による安定的輸送が可能。 再生可能エネルギーが活用可能。 	<ul style="list-style-type: none"> 砂分が多いと圧送するのが難しくなるが、海水を混ぜることで2km程度の圧送が可能。
デメリット	<ul style="list-style-type: none"> 長距離の輸送には、中継ポンプが必要(1km程度が限界か)。 長距離圧送では、停電対策が重要。 急な停止時にサージングによって機械、配管を破壊する可能性がある。 	<ul style="list-style-type: none"> コンプレッサーの稼働時の騒音。 再生可能エネルギーの活用が難しい。
総合	○	△