

42 新型流水域油回収装置の模型実験

氷海技術部 成田秀明、*金田成雄、下田春人

1. はじめに

流水中に流出した油は、氷の隙間、上面、下面に流れ込み、大小の氷片と混ざり合う。この状態の油を回収するには、氷と油を分離するプロセスが不可欠である。従来より通常海域で用いられてきた機械的油回収装置のうち付着式以外のものは、水面にゴミ等の固形物が存在すると回収機能が損なわれるので、氷が浮いている海面では殆ど用を為さない。さらに、付着式は低粘度油の回収には向かない。そのため北方圏諸国では、砕けた氷が漂う水面に適する機械的油回収装置の開発に注力して居り、近年2, 3の新形式油回収機が開発されているが、まだ実証試験段階にあるといえる。成田は、北方圏諸国における流水域向け機械的油回収技術の現状を報告すると共に、上昇噴流カーテンを利用した流水域油回収装置のユニークな概念を紹介した(1,2,3)。図1は本着想の作動原理を表している。上昇する噴流カーテンが氷の下の油を追い出し、さらに噴流カーテンは水面に達した後左右に向かう水面流となり油を脇に運ぶ。氷上の油をシャワーが洗い落とす。氷は水面流に垂直に水平移動させることにより、氷と油が分離される。著者らはその後、このアイデアを実証すべく、簡素な「原始モデル」〈アイスクリナー1号〉を製作し、2000年7月船舶技術研究所の氷海船舶試験水槽において模型氷と疑似油を用いて実験を行った。その結果は良好で、ほぼ期待を裏付けた。

本報告では、実験装置と実験結果の概要を紹介し、さらなる技術課題を提示する。

2. 実験装置および実験結果

実験の主目的は、鉛直上向きの水噴流(Water Jet: WJ)ないし気泡噴流(Air Bubbling: AB)のカーテンを用いて氷板下の窪みに滞留する油を水面に向けて追い出すことを試み、この際の2種の噴流カーテンの作用と効果の差異を定性的に調べることで、ならびに、噴流カーテンが作り出す水面流による油と氷片の分離可能性を検証すること、である。実験装置は、2種の噴流発生装置、油回収水路及び排出用ボ

ンプ、これらを支持するアルミフレームと箱形浮体から構成される簡素な構成であり、全て当所で設計・製作した。〈アイスクリナー1号〉の主要目を表1に、形状寸法を図1に、外観を図2に示す。

装置の中枢であるWJおよびABの発生用ノズルパイプは塩ビパイプにドリルで孔を開けて作り、それぞれ、装置の中心線上で水深60cmと85cmに設置した。WJの駆動は氷水槽常設の水中ポンプで行い、流量調節は駆動電圧を制御した。ABの駆動は常設のエアコンプレッサで空気を圧送して行い、空気流量は手動コックで調節した。

噴流カーテンの左右に、これと平行する油回収水路を設けた。油回収水路には水面の油膜を汲み入れるために、複数の堰窓を中央水路に向けて設けた。この堰窓の下縁が静止水面にほぼ一致するように、装置にウェイトを積んで喫水調整した。堰窓が氷片で塞がれるのを防ぐため、窓と平行に4cm離れたところに、静止水面より約1cm沈めて、丸パイプの水よけフェンダーを設けた。油回収水路の後部端には容量50リットル/秒の家庭用水中ポンプを設置し、流れ込んだ油水を汲み上げ、別のオイルブームで囲まれた油水溜まりに排出した。これらのポンプの流量制御は電圧を調整して行った。

噴流の強さの調節は水面流の強さを目視判定しつつ行った。今回は現象を定性的に見ることが主眼のため、流速などは測定していないが、水路中央における表面流れの速さは、発泡スチロールの薄片を流してみたところ毎秒20cm程度であった。また、噴流の強さが各孔位置でむらがあったため、装置の長手方向にわたる水面流れの強さの分布は様でなく、特にABの場合、長手方向に様な気泡噴出がなかなか実現できないため、水面流も不均一性が顕著であったが油膜を回収ダクトに運ぶには特段の支障は無かった。

実験に供した氷は、当所で船舶等の模型実験に常用されている模型氷を用いた。様な平坦氷を、〈アイスクリナー1号〉を設置する以前に製造し、氷水槽の片側に寄せて浮かべ、適宜切断、加工成形、再凍

結等を行って試験片を作成した。氷試験片の形態は図2に示すように、平坦氷板（A.大、B.小）、C.四角窪み付き氷板、D.縁付きの四角窪み付き氷板、E.不定形窪み付き氷板、F.波状凹凸を持つ氷板、およびG.砕け氷、の7種類とした。

当所氷海水槽には強制換気装置が無いので、揮発性、麻酔毒性のある原油等は使えない。そこで低粘度および高粘度それぞれ1種類の機械用潤滑油を代用した。これら疑似油は視認性を良くするため、顔料で赤く着色した。0℃における疑似油の比重は0.899と0.891、粘度の値は90と8228mPa·secである。氷板下に油を流出させるため、低粘度油の撒布にはロートと透明ビニールチューブを、高粘度油の撒布には柄杓を用いた。

2種の噴流カーテン、7種の氷試験片、2種の疑似油を種々組み合わせて実験し観察を行った。室温および水槽水温度は-2℃および0℃に保った。氷試験片は水面に浮かべた四角の木枠（ランチャー）の中に浮かべ、氷板の間や下方に油を流入させ、ランチャーを装置の入口に結合してから仕切を開き、氷板と油をゆっくりと水路中央に向けて押しやり、実験観察を行った。水上及び水中からの2台のビデオカメラにより現象を記録した。氷試験片が水中カメラの視野に入る瞬間、噴流カーテンを作動させ、録画をスタートさせた。実験の間、長柄の熊手を用いて適宜氷試験片の移動ないし位置保持を行った。

3. 観察結果

全般的所見を言えば、水面流の発生に関しては、WJとABの間に大きな違いは感じられなかった。一旦中央水路に浮かんだ油膜は、氷板の間隙を通過して左右に向かう水面流に乗り、やがて両側の油回収ダクトに流入した（写真2参照）。予想通り高粘度油は流動性が低く、堰窓に付着しやすく、回収時間が余計に掛かった。

噴流カーテンを用いて氷板下の窪みに溜まった油を追い出す試みは概ね成功であった。ただし、強すぎる噴流は、油を攪乱し、細かな油滴として水中に散乱させる弊がある。また、WJとABの作用には以下のような顕著な差異が認められた。全般的にWJよりもABのほうが物理的理由から、効率的でより有望と判定された。図4参照。

3.1 WJの作用

噴流が氷板下の窪みに溜まった油を直撃すれば、油が追い出され散乱しつつ激しい勢いで飛び出す。細かくされた油滴は浮上しにくく水中を乱舞する。

（低粘度の油は細かな油滴になりやすい。）半端な水流の当たり方では、油の掃き出しはうまくゆかない：油は窪みの隅に残り、少しずつ水の流れに引っ張られて糸のように流出する。WJの流れは氷底に当たってから水平方向に流れるが、氷板の側縁角を周り込めず、この外側に明瞭な死水域を形成する。この死水域に油が滞留するが、氷板を移動・回転させれば淀みを解消させることが出来る。

3.2 ABの作用

気泡は浮力により上昇し、氷板の底面に達したのち底面に密着しつつ流れ、水面に抜ける。気泡は水や油よりも圧倒的に比重が小さいため氷板下の窪みを占領し、水や油を追い出す。穏やかに気泡流を作用させると、空気が徐々に窪みにたまり、一杯になると油が一体のまま押し出されて、周囲の流れにのって流出する。ABを強烈に作用させると、油の飛散がおこるが、WJが直撃するときほど、油滴の散乱は激しくない。気泡は氷板の側縁角をぴったり回って水面に達するので、死水域はWJの場合より規模が小さくはるかに出来にくい。

以下に実験時およびビデオ録画観察より得た現象の有様を、氷試験片形状ごとに述べる。

3.3 A & B：平坦氷板（大、小）

厚さ40mm、一辺の長さ60cmおよび30cmの大、小矩形氷板を作成した。ランチャーに氷板と疑似油1リットルを入れ、これを<アイスクリーマー1号>に順次送り込み、噴流をスタートした。氷板が前後に接近すると左右に向かう水面流が遮られるので油膜が流れないが、氷板同士の前後に間隔をとって順に装置内を通せば、油はその隙間を通過して左右の油回収水路へ流れ込む。氷板の大小による差はない。低粘度油は速やかに、高粘度油はゆっくりと回収される。油は平らな氷板の上面にも下面にも溜まらず、水面に集まる。本ケースではWJとABの効果には顕著な差は見られない。写真1参照。

3.4 C：四角の窪み付き氷板

厚さ40mm、一辺30cmの矩形氷板を2枚重ね、下方の氷板には中央に15cm四方の穴をあけ

て再凍結した。この穴に油を満し噴流を作用させ油の運動を観測した。観測された現象は、前記3.1及び3.2の通りである。

3.5 D：縁付きの四角の窪み付き氷板

厚さ約50mm、一辺60cmの四角形氷板の中央に、中心に15cm四方のマドを開けた一辺30cmの氷板を重ねて凍結して作った。実験はCと同様に実施し、概ねこれと同様の現象が観測された。ここで特筆すべき事は、WJの場合、一旦窪みから追い出された油が窪みを取り囲む塀の外側の凹部

(死水域)に移動し滞留を続けることである。氷試験片を移動させ、WJをこの部分に直接作用させるとこれを解消できるが、これには余分な時間が必要で、追い出された行く手に死水域があれば、油はまたそこに移動して残留する。ABの場合は、死水域は出来にくいので油の滞留も少ない。いずれにせよ、氷試験片に対する噴流の当たり方に応じて、氷底コーナー部に多少の死水領域が出来るが、氷板を動かして噴流の当たり方を変え、死水域を減少ないし油の滞留を解消する事は可能である。

3.6 E：不定形窪み付き氷板

厚さ60mm、一辺60cmの氷板2枚を重ねて凍結し、下面に、鑿や熱湯により、複雑な窪みを形成した。この場合もほぼCとDで述べたことが当てはまる。その他、窪みの入口が狭く中が広がっている場合、WJによる油の追い出しは一層困難になる。深い窪みの奥の油を追い出すには、強い水流で窪みを直撃する必要があるが、狙い打ちは容易ではない。直撃できても、大量の油滴を水中に飛散させる結果になる。しかし、ABを用いれば入り込んだ空気が油を押し下げて置換するので、油がまとまって窪みから出る。ただし、窪みが空気の抜け道を持っているときは、この効果は期待できない。

3.7 F：波状凹凸氷板

こぶし大の砕氷片を密集させて水面で再凍結し、山と谷の落差が2cm程度の三次元不規則波状の表面を持つ氷板を作り、これを一辺60cmの矩形に切り、上下反転して実験に用いた。WJの場合、流れが直接当たれば油が排除されるが、凸部の陰には残留する。氷板の側面に追い出された油は、ここで流れが淀むため滞留する。氷板を強制的に回転すると漸く油は氷板を離れ回収水路に吸い込まれる。AB

の場合、気泡が次第に窪みを満し完全に油を置換する。油は気泡により排除され、流れに乗り氷板の側縁を回って水面に向かう。氷板の側縁では、WJの場合よりも水流の淀みが生じにくい。それは気泡が油を追い掛けるようにここに達するためである。

3.8 G：砕氷

平坦水での実験により、氷板を前後間隔を開けて装置を通過させれば、油氷の分離および油の回収は容易であることが明らかになった。砕氷片に、同じやり方を適用すれば必ずうまく行く筈である。これをわざわざ実施するのは、いかにも芸がないので、砕氷片をまとめて洗滌することを試みた。写真2に示すように、握り拳2、3個分の大きさに砕いた多数の氷片を、底の抜けた金網(15mm六角メッシュ)の囲いに1層(100%)ないし1.5層(150%)となるように密集させ投入し、その中央部水面下に油を1リットル程度投入し、噴流を作用させた。噴流スタート直後、若干の油は囲いの外に追い出されるが、囲いの側面に押しつけられた氷片が水面流を堰き止め、油が囲い込まれる状態になる。そのため、この実験は見かけ上は不成功となった。しかしながら、この囲いの幅がもっと狭かったとしたら、成功したかも知れない。何故なら、砕氷片の全てが噴流に直接洗われ、上下左右に揺すられるので、油は水の隙間を通り抜け、かごの外に追い出されるであろうと考えられるからである。

4. 考 察

水面下より放たれたカーテン状の小気泡は周囲の水を引き込みながら上昇する。気泡は上昇と共に体積を増し、浮力もこれに比例して増加するので、この二相流ブルーム(plume)は上昇と共に益々勢いを増し水面到達時に最大の運動エネルギーを獲得する。水面に於いて、流れは分岐し水平方向に向きを変えるので、強い水面流れが発生する。また一方、氷板の底面に達した気泡は「水が低きに従って流れる」のとは上下逆転したかたちで、氷板の底面の「高きに従って」流れる。そして、途中に窪みがあれば、空気より重い水や油を排除してそれを満す。このように比重の差により窪みに溜まっている油を追い出すことが原理的に可能である。ゆえに充分な量の気泡を氷板下にむらなく供給できれば、油が滞留で

きる窪みが空気で満たされるため、必然的に油は水面に集まる。気泡供給を穏やかに行えば、油を散乱せずに氷板の下から掃き出すことができる。

一方、水中から上向きに放たれた水噴流は周囲の水に運動量を奪われる結果、水面に近づくほど断面積を増し流速が減じる。水噴流の運動エネルギーは噴出時に与えられるのみで、流れるにつれ内部摩擦等により次第にブルームの勢いが減衰する。氷板の下面に達すると向きを変え、大体は下面に沿う流れとなり、流速は益々減じる。水噴流が油に直接当たるときには、油を押し流すが、直接当たらない流れのエネルギーは空費される。さて、氷板下面に凹凸があれば、流れは凹部の中にはあまり影響を及ぼさずその上を通過する。凸部を乗り越えとき流れは剥離して乱れたり、凸部の陰に死水域を作る。特に、氷板の底面に沿う流れが氷板の側縁角を過ぎるとき、明瞭な死水域が側縁に沿ってでき、ここに油が溜まるといつまでも動かない。また、水は油よりも重いので、比重差により窪みに溜まった油を排除する作用はない。それゆえ、水噴流を用いて氷板の下にある油を掃き出すには、氷板下面を端から端まで噴流で徹底的にスウィープする必要がある。しかも、その際流速を大きくすると油を油滴にして水中に散乱させてしまう弊が大きい。

以上の議論により、氷板下の窪みに滞留する油の掃き出しには、WJよりもABのほうが全体として効果的であると結論できる。ただし、この結論は水噴流は全くダメと言っているのではなく、例えば、氷板にしっかり張り付いてしまった高粘度油を剥がし除去するにはWJのほうが適当であろう。実用上は、最終的なコストパフォーマンスが良ければ良いので、二者択一ではなく併用も可能であろうし、配置も異なれば良い。このあたりを見極めるための実証的研究はこれからである。

5. まとめ

水ジェットまたは気泡による上昇流を利用して流水中に流れた油を流水と分離して回収する装置の原始モデル〈アイスリーナー1号〉を紹介し、これを用いた水槽実験の結果を述べ、2種の噴流の効果とその作用の違いを説明した。今回のモデルは想定している現実の1/5から1/10程度であるが、この実験

で観測された現象は、現実においても完全相似ではないがよく似たかたちで起きるであろうと著者らは推測する。ここでは、低粘度油と高粘度油、数種の形を持つ氷板を使用して効果を確認したので、この回収装置はかなりの現実性があると考えられる。

まず、上昇噴流カーテンが誘起する水面流を利用して、油を氷と別の方向に導き、分離できることが確かめられた。この際、水面流による油の輸送が阻害されないよう、氷板は適当な前後間隔を空けて次々に噴流カーテン上を通過させる必要がある。氷板の側縁角にできる死水域に油が溜まる場合は、噴流上で氷板を回転・移動させれば油を切り離す事が出来る。ABを用いれば死水域は生じにくい。

つぎに、氷板下の油の掃きだしのため、WJとABの2種の噴流カーテンの作用効果の違いを観察した。その結果、ABの方が以下の理由でWJより優れていることが映像的に検証でき、また簡単な物理法則に照らしてその作用を理解できた。

1) 油も気泡も水より軽いので、氷板の下では、両者ともに氷板表面に沿ってより高いほうに移動しようとする性質がある。それゆえ、氷板下の油を掃き出すために気泡を用いるのは合理的である。

2) 気泡は非常に軽いので確実に窪みに溜まった油をまとめて追い出す。WJは油に直接当たれば、油を動かすが、流れが強いと油を油滴にして散乱させやすい。

3) WJによる流れは氷板表面の凹凸や角があると、剥離して渦や死水域を生じ、これが油の散乱や滞留を引き起こす。これは油が回収しにくくなることを示す。一方、気泡は氷板表面に沿って流れ、氷板の側縁角も回り込むので、死水域を作りにくい。

今後の研究課題としては、装置の実用化を視野に入れて、噴流の性質および噴流配置の最適化等を研究すべきであろう。噴流は、今回用いたもの以外にエア・ウォータージェットがある。これは水ジェットの中に気泡を注入したもので、水量、空気量、気泡径を制御してブルームの性質を大幅に制御できると考えられる。また、今回は噴流源は只の一条としたが、効果的な洗滌を実現するには、噴流源の個数を複数化したり、油を狙って移動させたり、噴流の幅を大きくしたり等々、試行と工夫とにより改良・開発して行くことになろう。

参考文献

1) 流氷域での油回収技術について、成田秀明、
第74回船舶技術研究所研究発表会講演集、
pp.401-404, 2000

2) " Oil Spill Response in Ice Infested Waters ",
J.E.McHale, D.F. Dickins and N.W. Glover,
in Proc. Of the 2nd Ice Scour & Arctic Marine
Pipelines Workshop, 2000, Mombetsu

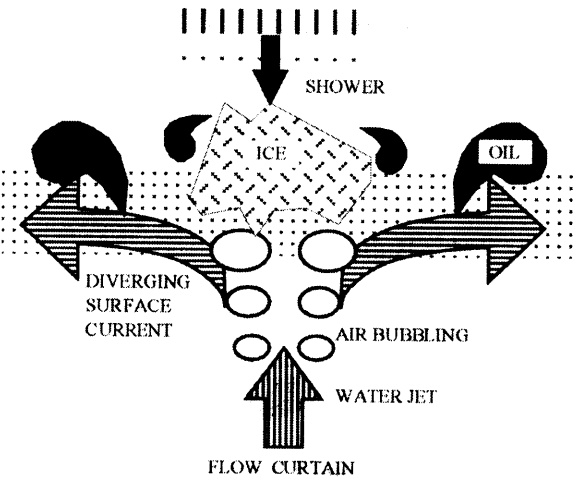


図1 上昇噴流カーテンの作用原理

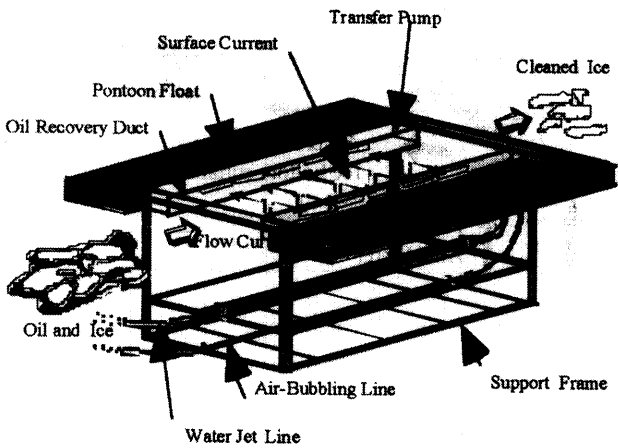


図2 実験装置外観

3) Proceedings of International Oil & Ice Workshop,
2000, in CD, 2000, Anchorage Alaska

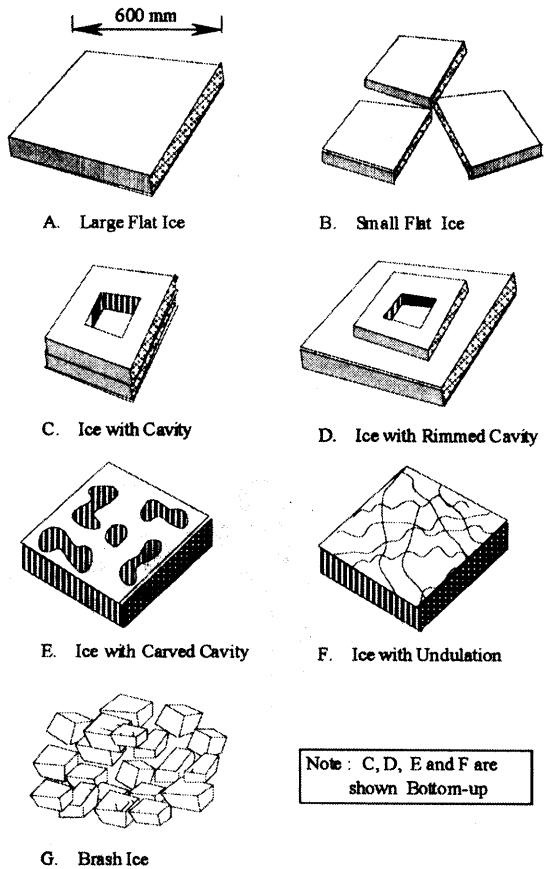


図3 試験氷片の形状

表1 実験装置の主要目

Length Overall	3,200 mm
Breadth Overall	2,600 mm
Depth of Pontoon	200 mm
Length of Corridor	2,300 mm
Breadth of Corridor	800 mm
Depth of Water Pipe	600 mm
Depth of Air Pipe	850 mm
Water-Jet Pump Capacity	Max. 220 ltr/min
Duct Bailing Pump Capacity	Max. 60 ltr/min



写真1 平坦氷片の洗滌

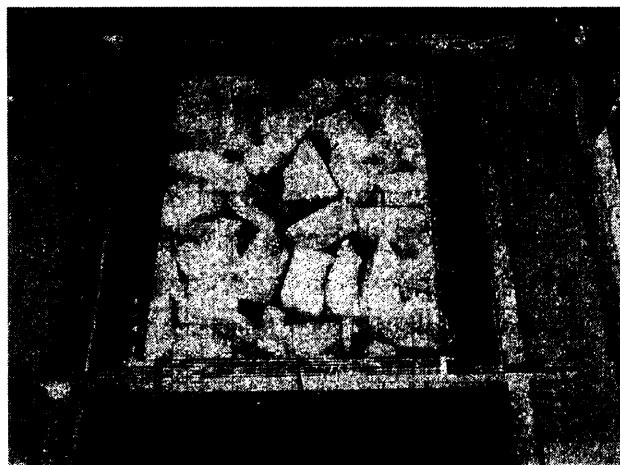


写真2 砕氷片の洗滌

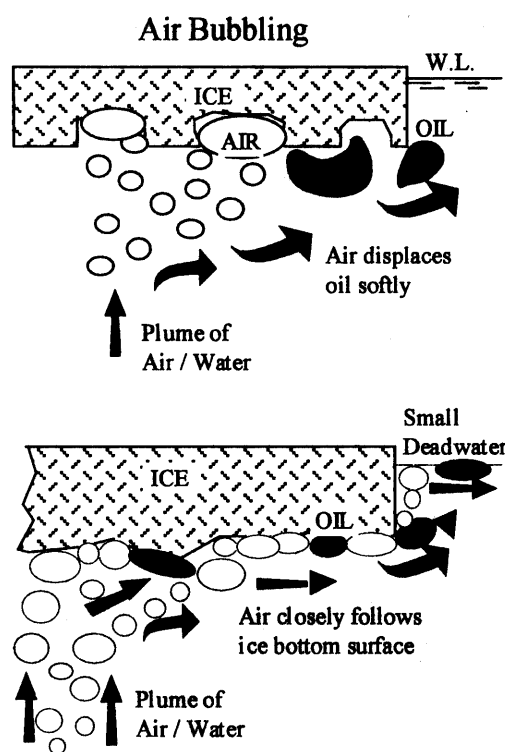
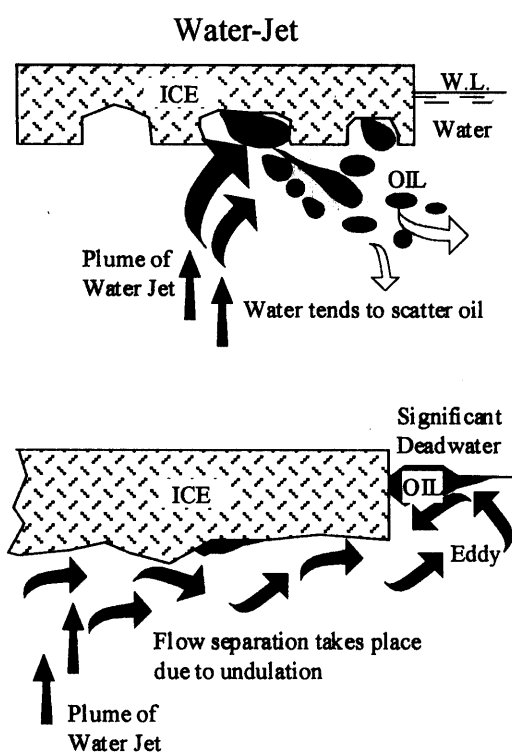


図4 WJとABの作用の違い