

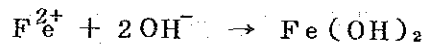
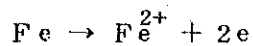
4. 6 プラント材料の腐食への影響

4. 6. 1 含油海水による腐食メカニズム

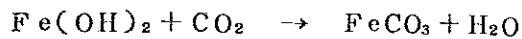
原油中の炭化水素それ自体により金属材料が腐食されることは考えられないが、原油中に水、硫化物塩化物等が存在すると、水単独あるいはこの水に硫化物、塩化物の溶解した溶液によって金属材料が腐食されるようになる。その腐食は上記水または水溶液が材料表面に接触し、油の接触点と水/溶液の接触点との間に局部電池が形成されることによって起こる。

その腐食メカニズムを炭素鋼からなる材料表面に海水中の油滴が付着し、ピッチングが発生する場合を例に述べる³⁴⁾。

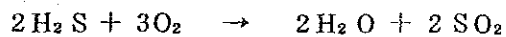
1) アノード反応



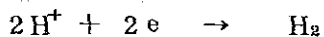
炭酸ガス、硫化水素が存在すると、



さらに酸素が存在すると、



2) カソード反応



酸素が存在すると、



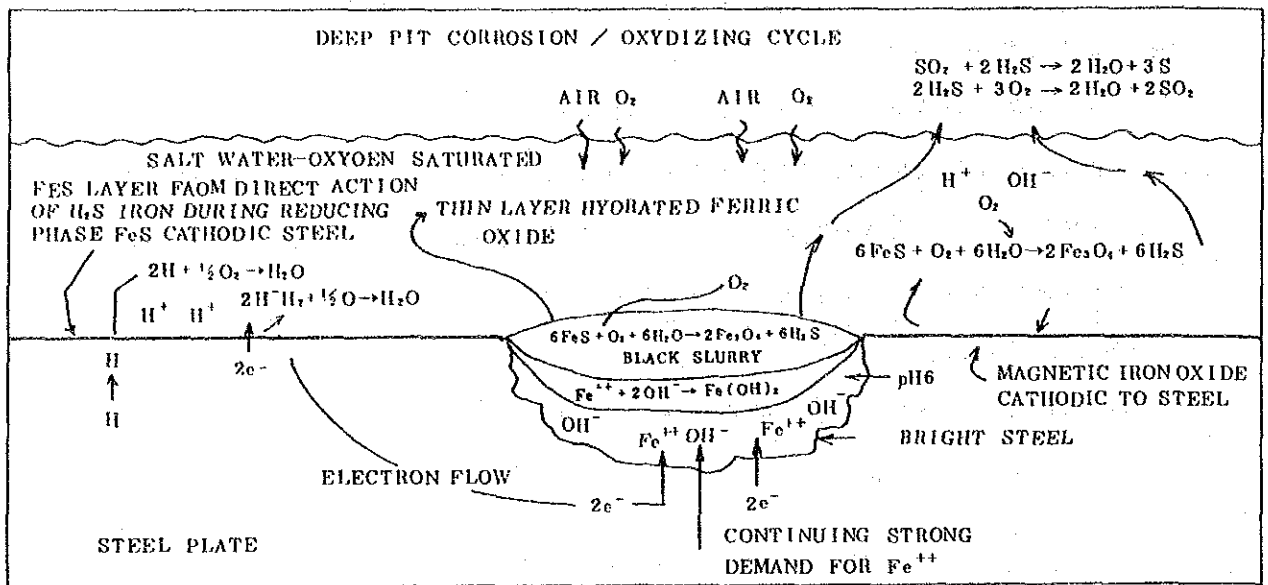


图 4. 6. 1. 孔食発生機構 (酸化雰囲気)

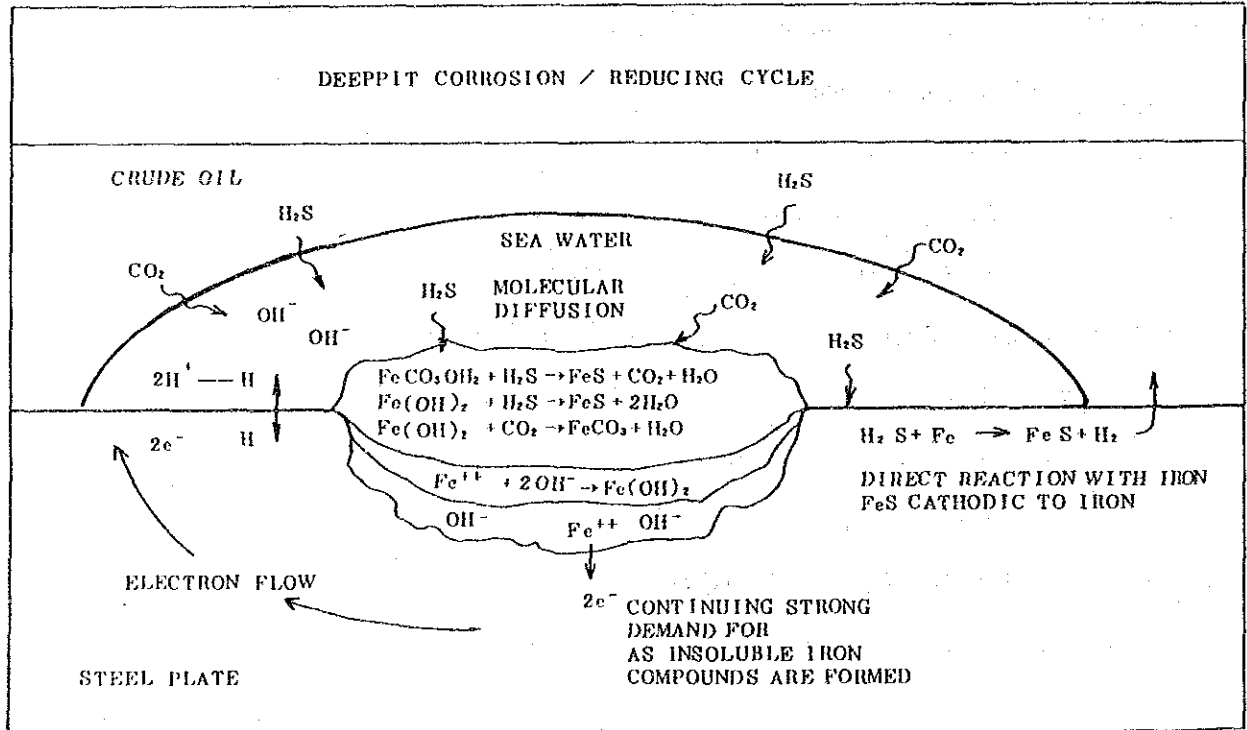


图 4. 6. 2 食発生機構 (還元雰囲気)

以上のような反応により、 Fe_3O_4 生成の場合、ピットは黒色を呈し、さらに Fe_2O_3 になると、赤色に変化するとともにイオウの単体が析出することもある。

図 4.6.1 に硫化水素の他に酸素も存在する酸化雰囲気における腐食メカニズムの模式図を、図 4.6.2 に、硫化水素、炭酸ガスのみで、酸素は存在しない還元雰囲気における模式図を示す。

また、表 4.6.1 に中東原油中に含まれるイオウの含有率を示す。

表 4.6.1 中東産原油のイオウ含有量

原油	硫化水素 (mg/l)	全イオウ (%)	メルカプタン (mg/l)
Iran (4 試料)	Up to 20	1.3-2.0	160-240
Kuwait (2 試料)	Up to 8	2.6-3.7	170-210
Libya	微量	0.18	報告なし
Libya-Fes Sider	300	0.32	報告なし
Saudi Arabia (2 試料)	報告なし	1.7-2.9	13-180
Persian Gulf (Qatar)	Up to 40	0.14-1.25	Up to 4
Abu Dhabi (Adleg)	20 以下	0.74	報告なし
Iraq (Basra)		1.95	報告なし
Dubavy	微量	1.43	Present but not analyzed

4.6.2 含油海水による腐食事例

含油海水環境における淡水化プラントの腐食について取り組んだ調査・研究報告は現時点では見当たらない。したがって、ここでは類似の腐食環境としてバラストとして海水を張水するタンカー油槽の腐食を例にとり、油と海水が混在した環境下における腐食事例を述べる。

ただし、本論にはいる前に原油それ自体による腐食損傷状況を2例紹介しておく。

その一つとして、佐藤ら³⁵⁾は、タンカーの原油タンク内における油圧制御管を対象として銅、銅合金、ニッケル銅合金、ステンレス鋼の2年間の腐食試験を行なっている。

試験に供した金属材料の種類と化学組成を表4.6.2に、試験片の設置場所を図4.6.3に、また暴露時間2年間に得られた腐食試験結果を表4.6.3に示す。

これから次のことがいえる。

- 1) 原油タンクの気相部(甲板裏)は、原油中(タンク底部)に比して各試験片の腐食状況が激しく、スケール付着量が多い。気相部は原油中に比べて、最も差の大きいもので、腐食減量で約3倍、スケール付着量で約5倍となっている。
- 2) 銅、銅合金、ニッケル合金は全面腐食型の腐食を受けており、アルブラック(アルミニウムブラス)、AP1ブロンズ、AP2ブロンズは粒界腐食をともっている。これに対し、18-8ステンレス鋼の腐食は孔食によるものであった。
- 3) 腐食作用が激しかった気相部における試験片の腐食深さは、2年間でアルブラック、AP1ブロンズ及びAP2ブロンズが0.35~0.41mm、10%キュプロニッケル、30%キュプロニッケル並びにニッケル銅合金が0.47~0.61mm、銅及び18-8ステンレス鋼が1.09~1.06mmであった。
- 4) 銅、銅合金、ニッケル銅合金の腐食は、スケールから多量の硫黄分(S)硫化物(Cu₂S)を検出していることから、主に原油中に含有される硫化物の作用によるものとみなされる。
18-8ステンレス鋼は腐食形態が孔食であることから、主に原油中に含有される塩化物や海水の作用によるものと考えられる。
- 5) 応力腐食割れは、応力を付加したアルブラックと18-8ステンレス鋼に生じている。アルブラックは気相中及び原油中のいずれの試験片にも割れを生じていたが、18-8ステンレス鋼は原油中の試験片のみに割れが発生した。

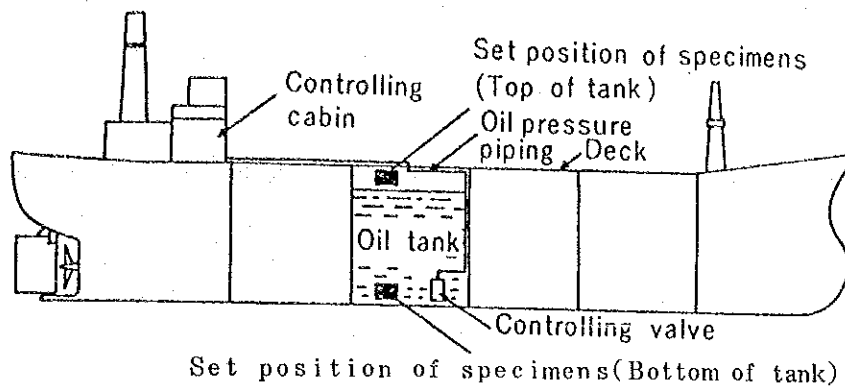


図 4.6.3 試験片の設置場所

表 4.6.2 試験片の化学組成

(wt.%)

Material	Cu	P	Fe	Pb	Zn	Al	Si	As	Ni	Mn	Sn	Cr	C
Deoxidized Copper	99.95	0.018	<0.01	<0.01	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Albrac (Aluminium Brass)	78.15	—	0.01	<0.01	R	2.02	0.25	0.05	—	—	—	—	—
90-10 Cupronickel	R	—	1.45	<0.01	—	—	—	—	9.95	0.70	—	—	—
70-30 Cupronickel	R	—	0.60	<0.01	—	—	—	—	30.50	0.65	—	—	—
Nickel Copper Alloy	31.5	—	1.20	<0.01	—	—	0.11	—	R	0.95	—	—	0.10
AP-1 Bronze	R	—	<0.01	<0.01	—	1.1	0.1	—	—	—	6.1	—	—
AP-1 Bronze	R	—	<0.01	<0.01	—	1.1	0.1	—	—	—	8.0	—	—
18-8 Stainless Steel	—	—	R	—	—	—	—	—	8.90	—	—	18.70	0.04

表 4.6.3 カーゴオイルタンク中での腐蝕試験結果

Position of specimens	Material	Quantity of scale			Weight of corrosion loss			Maximum depth of corrosion pits			
		Range (mg/cm ²)	Median (mg/cm ²)	Ratio of A/B	Range (mg/cm ²)	Median (mg/cm ²)	Ratio of A/B	Range (mm)	Median (mm)	Ratio of A/B	(mm)*
Gas phase (Top of tank) (A)	Deoxidized Copper	101.6, 195.9	148.8	4.8	200.0, 217.2	208.6	3.2	1.03, 1.09	1.09	2.4	1.03
	Albrac	90.7, 96.2	93.4	1.0	121.1, 150.7	140.9	1.1	0.41, 0.40	0.41	1.2	0.37
	90-10 Cupronickel	136.9, 171.0	154.0	2.6	189.1, 201.0	195.1	1.5	0.61, 0.60	0.61	1.2	0.64
	70-30 Cupronickel	70.4~161.6	116.1	2.1	177.6~218.1	196.2	1.6	0.39~0.64	0.47	1.5	0.51
	Nickel Copper Alloy	61.4, 135.5	98.5	2.7	83.4, 116.3	99.8	1.0	0.55, 0.41	0.48	1.7	0.58
	AP-1 Bronze	153.1, 189.6	171.4	2.1	173.9, 199.5	186.7	1.7	0.35, 0.33	0.35	1.3	—
	AP-2 Bronze	92.1~193.7	139.7	2.0	162.8~209.6	184.8	1.7	0.30~0.50	0.41	1.6	—
	18-8 Stainless Steel	145.5, 157.3	151.4	1.9	66.6, 68.5	67.6	1.4	1.02, 1.09	1.06	1.4	0.81
Liquid zone (Bottom of tank) (B)	Deoxidized Copper	26.1, 35.3	31.2	—	60.0, 60.4	60.2	—	0.39, 0.50	0.45	—	—
	Albrac	78.9, 120.4	99.6	—	111.8, 157.4	134.6	—	0.33, 0.35	0.35	—	—
	90-10 Cupronickel	57.3, 60.5	58.9	—	125.3, 135.9	130.6	—	0.47, 0.51	0.49	—	—
	70-30 Cupronickel	41.5~64.1	54.9	—	120.7~128.1	125.1	—	0.26~0.28	0.31	—	—
	Nickel Copper Alloy	29.4, 43.2	36.3	—	95.2, 96.3	95.8	—	0.28	0.28	—	—
	AP-1 Bronze	77.6, 87.7	82.6	—	107.2, 111.0	109.1	—	0.24, 0.27	0.26	—	—
	AP-2 Bronze	60.8~75.7	69.2	—	103.0~117.6	107.5	—	0.24~0.29	0.25	—	—
	18-8 Stainless Steel	76.5, 84.6	80.5	—	48.3, 49.3	48.8	—	0.53, 0.94	0.74	—	—

* Referential data of analogous test by Gilbert,⁴⁾ original data on maximum depth of attack were converted into similar unit to our test data, mm/year.

- 6) 応力腐食割れの主たる腐食因子として、アルブラックについては硫化水素及び酸素の作用、また、18-8ステンレス鋼については塩化物の作用が考えられる。
- 7) 腐食は雰囲気流体と試験片との接触条件によっても大きく影響されることがわかった。すなわち、流動条件を増すことは腐食を著しく促進するようであった。
- 8) 試験片の取り付け台に用いたチタニウムに腐食がみられないことから、チタニウムはこの種の環境において耐食性に極めてすぐれていることが認められた。

さらに、佐藤³⁶⁾は石油精製プラントの水添脱硫装置熱交換器における各種金属材料の実機腐食試験の結果を報告している。

試験に供した金属材料の種類と化学組成を表4.6.4に、試験条件を表4.6.5に、また、本試験によって得られた結果を表4.6.6に示す。これから次のことがいえる。

- 1) 硫化物による腐食は特に銅合金に顕著である。銅合金の中では黄銅系合金の耐食性がかなり大である。
- 2) チタンの耐食性は非常に良好であるが、ある条件では水素を吸収し、脆化する。
- 3) アルミニウム、ステンレス鋼は孔食を発生する。その腐食因子は塩化物の作用と考えられる。

次に本題である海水と油が関与した試験例を述べる。

栄ら³⁷⁾は、タンカー油槽内に各種構造材料から成るスプール試験片を取り付け、430日間の実船試験を行っている。表4.6.7に75種の供試材料を、表4.6.8に試験片を取り付けたタンカー油槽内の位置とタンク条件(試験環境)を、表4.6.9に船載原油の性状をそれぞれ示す。

また、430日後における金属材料の腐食速度を図4.6.4に、塗装試験片の外観調査結果を表4.6.10に、それぞれ示す。

これら試験結果の中から、特殊表面処理材(金属溶射被覆、溶融被覆、電解被覆)を除く供試材料について試験結果をまとめると、次のとおりである。

- 1) 軟鋼、鋳鋼、鋳鉄、低合金鋼の腐食速度は0.06~0.14mm/yで耐食性に大きな差は認められない。

表 4.6.4 試験片の化学組成 (Wt %)

No.	Metals and Alloys (JIS or ASTM Marks)	Cu	P	Al	Si	As	Fe	Pb	Mu	Ni	Zn
1	Deoxidized Copper	99.94	0.01	-	-	-	-	-	-	-	-
2	Aluminium Brass (Albrac BsTF-2)	78.34	-	2.02	0.22	0.06	0.02	Tr	-	-	R
3	70-30 Cupronickel (CNTF-3)	67.65	-	-	-	-	0.71	Tr	0.52	30.09	0.71
4	Aluminium Bronze	91.90	-	6.82	-	-	-	-	-	-	-
		Al	Cu	Fe	Si	Mg	Mn	Zn	Cr		
5	Aluminium Alloy (5052)	R	0.01	0.23	0.06	2.49	Tr	0.03	0.25		
6	Titanium (ST-40)	Ti	N	O	C	H	Fe	Si			
		R	0.01	0.04	0.01	0.01	0.04	0.02			
		Fe	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni		
7	Low Carbon Steel	R	0.06	0.04	0.29	0.014	0.012	-	-		
8	18 Cr Stainless Steel (Type 430)	R	0.03	-	-	-	-	18.09	-		
9	18-8 Stainless Steel (Type 304)	R	0.04	-	-	-	-	18.09	7.96		

表 4.6.5 石油精製プラント用熱交換器中でのテスト条件

Heat exchanger	Fluid	Temp. °C	Pressure, kg/cm ²	Duration of test, hr
A Combined feed heat exchanger	Kerosene or naphtha as charging oil containing combined sulfur	190~230	45	6,480
B Product condenser	Desulphurized oil + excess hydrogen + reactant sulfur (H ₂ S)	170	45	6,480
C Overhead condenser	Gasoline + H ₂ + H ₂ S	100~145	12	19,000

表 4.6.6 腐食試験結果

No	Specimens	Heat Exchanger	Corrosion rate		Degree of loss in tensile tests, %		Depth of pits(X10 μ)
			mg / cm ²	mm / yr	tensile strength	elongation	
1	Deoxidized Copper	A*	—	—	—	—	—
		B*	—	—	—	—	—
		C*	—	—	—	—	—
2	Aluminium Brass (Albrac BsTF-2)	A	25.1	0.04	39	42	—
		B	61.7	0.11	53	50	—
		C	74.0	0.04	54	45	—
3	70-30 Cupronickel(CNTF 3)	A	52.0	0.08	23	42	—
		B*	—	—	—	—	—
		C*	—	—	—	—	—
4	Aluminium Bronze	A*	—	—	—	—	—
		B*	—	—	—	—	—
		C*	—	—	—	—	—
5	Aluminium Alloy(5052)	A	0.3	0.00	10	86	30
		B	38.1	0.19	***	***	30
		C	9.3	0.02	43	85	34
6	Titanium(ST-40)	A	0	0	0	0	—
		B	4.2	0.01	0	34	—
		C	0	0	0	0	—
7	Low Carbon Steel	A	101.3	0.17	***	***	—
		B	60.7	0.10	6	46	—
		C	43.3	0.03	46	19	—
8	18 Cr Stainless Steel (Type 430)	A	4.4	0.01	7	30	35
		B	2.5	0.01	6	0	16
		C	5.6	0.00	5	54	30
9	18-8 Stainless Steel (Type 304)	A	1.4	0.00	17	0	18
		B	51.2	0.09	18	9	20
		C	1.8	0.00	7	21	37

* Specimen was corroded away.

** Type of the corrosion classified by the model of corrosion by JPI().

*** Specimen unable to do the tensile test due to severe corrosion.

表 4.6.8 試験タンク配置とタンク条件

試験期間中の全航海日数：430day

タンク	No.3 センター	No.5 センター	No.6 ウイング
積荷の種類	原油+バラスト海水 アミン系インヒビター	原油+バラスト海水	原油
防食処理	レスコールW711 投入	Mg 陽極	-
スプールの数	3	6	3
試験片枚数	86枚	144枚	56枚
バラスト張水日数	50 day	63 day	5 day
原油積載量	軽油 20,800t+2,000t	ガソリン 20,065t+1,140t	7,700~10,100t

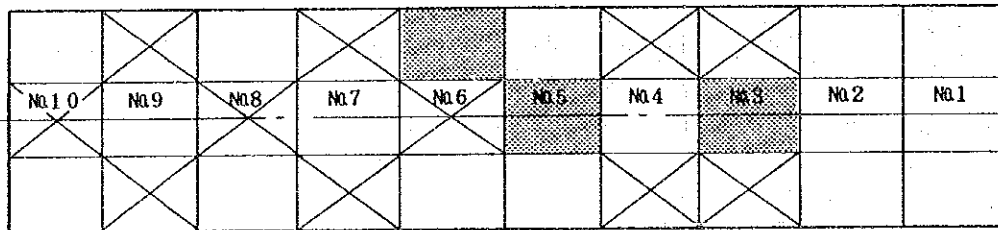


表 4.6.9 舶載原油の性状

項目	名称	アラビア	シリア	イラン	カタール	クェート	ワフラ
比重	°API	34.7	36.9	33.8	40.0	31.6	24.2
引火点	°F	-	50	80	88	-	-
流動点	°F	-	55	-10	<0	-	-20
粘度	100°F、SSU	44	33.8	44.9	36	53.8	167
水分、沈殿物	%	0.2	tr	-	tr	-	-
硫黄分	%	1.56	0.08	1.46	1.91	2.49	3.09
蒸発残渣	%	3.8	2.6	4.5	6.5	-	-
ワックス	%	1.1	-	-	1.1	-	-

腐食度 mm/yr

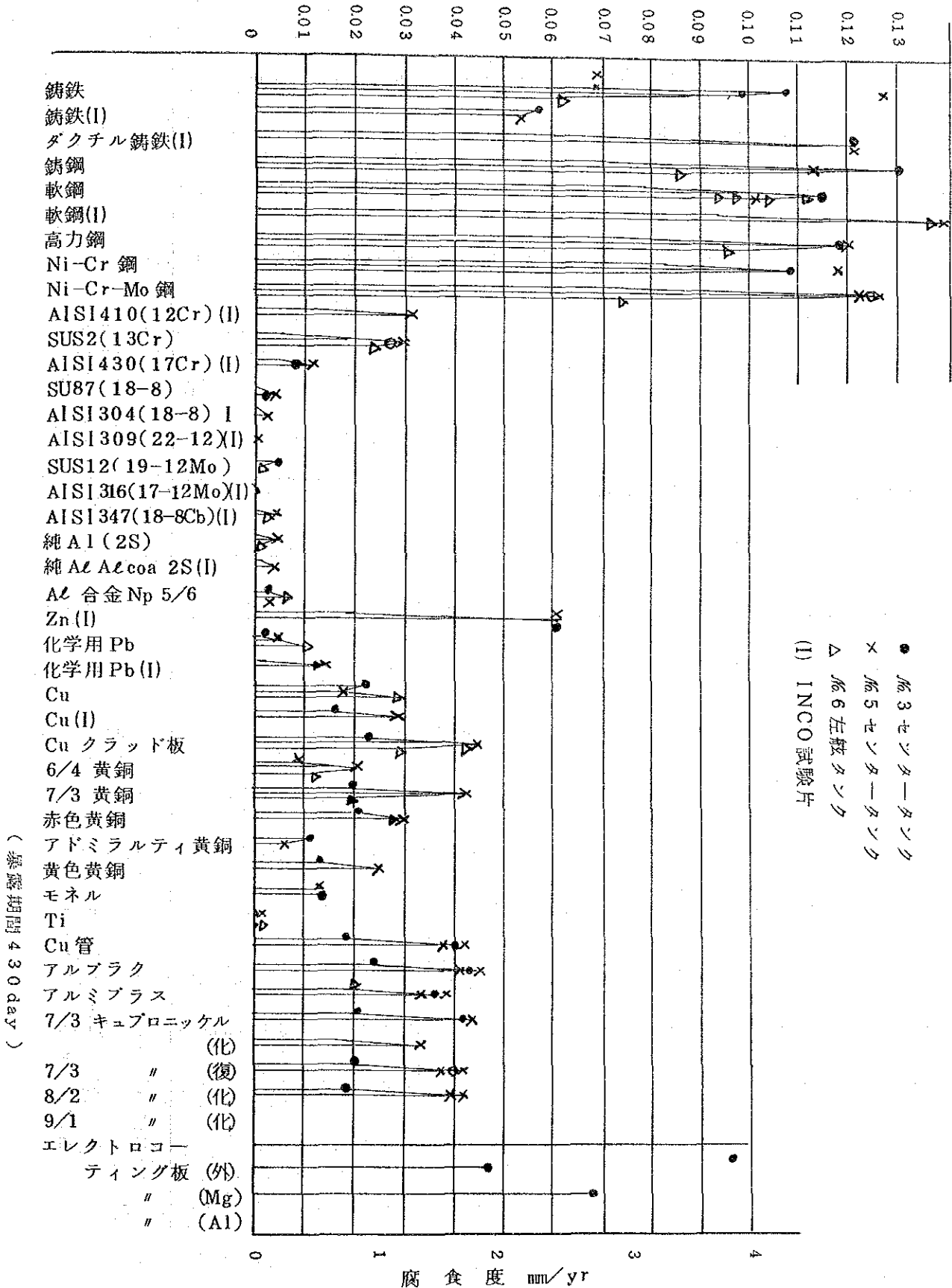


図 4.6.4 供試材料の腐食速度

- 2) マルテンサイト系ステンレス鋼の腐食速度は軟鋼の1/5程度、フェライト系ステンレス鋼では1/10程度で、これらは孔食を伴う全面腐食を呈していた。オーステナイト系ステンレス鋼の腐食量は少なく、良好であったが、鋼種によっては著しい孔食を生じ、粒界腐食に強い347型もその孔食抵抗は小さかった。これらのことからステンレス鋼に関してはタンカー油槽の腐食環境としては、粒界腐食よりも孔食生成に起因する応力腐食作用の方が支配的になるものと推定された。
- 3) 銅及び銅合金、ニッケル合金は強固な黒色硫化銅、硫化ニッケル皮膜に覆われ、硫化物侵食が最大の腐食因子と認められる。モネルメタルも同様であり、中東原油雰囲気ではその耐食性はあまり期待できない。
- 4) その他の非鉄金属ではチタンが最も良好で、アルミニウムはオーステナイト系ステンレス鋼と同程度で、わずかに局部孔食を生ずる傾向がある。(孔食はスパーサーとの接触部に限定されていた)
- 5) 合成樹脂の中では、メラミンプラスチックが不良で他はほぼ良好、また、合成ゴム系ではGR-Sの膨潤が著しく、ネオプレンについても耐油性が不良で、ハイカー系が最良であった。
- 6) 塗膜の中ではポリウレタン樹脂塗料系、サランが卓越しており、次いでビニル系が良好であった。

これに対し従来一般に耐油塗料として用いられているフェノール樹脂系、エポキシ樹脂系などは不良であり、タンカー油槽のような苛酷条件には不十分であることが示された。ジンクリッチペイントも海水、原油交互給載条件では、塗膜変化が甚だしく、コールタールエナメルも今一步耐油性に欠けていた。

榮らと同様にタンカー油槽内にテスト片を取り付け、腐食速度を計測し、これを油槽使用条件で再整理した結果が表4.6.11である。

表4.6.11をベースに日本の高経済性タンカー試設計委員会構造第三分科会(略称HET-S3)はタンカー基準腐食速度を表4.6.12のように決めている。これらの部位の腐食速度は他の部位の2~3倍であるが、この原因としては次のように考えられている。

- 1) 原油は不純物として無機硫黄化合物あるいはチオフェン、メルカプタン類の有機硫黄化合物を含み、また、油田かん水が混入している場合も多く、いずれも局部的な腐食を起こす要因となる。

表 4.6.11 タンカー油槽の腐食速度
(使用条件で再整理)

タンク使用条件	腐食速度 (mm/y)
クリーンバラスト漲水中 ^{*1)}	1.0
ダーテイバラスト漲水中 ^{*2)}	0.3
バラストを揚げて空のまま	0.45
原油をあげて空のまま	0.3
原油搭載中	~0

*1) クリーンカーゴ(ガソリン、軽油等)タンクにバラスト海水を張った場合

*2) ダーテイカーゴ(重油等)タンクにバラスト海水を張った場合

表 4.6.12 タンカーの基準腐食率[HET-S3]

タンクの種類	基準腐食率 (mm/y)
荷油専用タンク	0.14
ダーテイバラストタンク	0.18
クリーンバラストタンク	0.31
バラスト専用タンク	0.71

表 4.6.13 タンク内凝滴水の分析例(%)

Fe	Cu	Mg	S
0.03343	0.04018	0.08175	0.074
H ₂ SO ₄	Na	Cl	NaCl
0.227	1.2135	1.8714	3.0847

2) 日本からの往航時にはバラスト海水を積み、帰航時には原油を積むような使用条件が多いが、このバラスト期間中に受ける腐食が大きい。

重質の石油、重油などでは、空荷になった場合も鋼板面に油の被膜が残留し防食効果があるが、ガソリン、軽質油を積載すると鋼製隔壁から残留油膜を溶解し、陸場された後に、油槽内部表面のガソリンが揮発して清浄鋼面を露出するので、バラスト積みによる腐食が非常に速くなる。

バタワースと呼ばれる温海水洗浄法も、これと同様な作用で腐食を促進する。これらのことから一般にバタワース洗浄を行う又はガソリン、軽油等を積載するクリーンカーゴタンクの方が、重油等を積載するダーティカーゴタンクの場合よりもはるかに腐食度が大となる。

3) バラスト海水を積まないタンクは、日中は直射日光に照らされ70℃以上になる。このために内部の水蒸気が飽和状態となり、これが冷たい内底板や夜間に冷却した金属面に露を結ぶ、しかもこれらの凝滴は壁面に残留している塩類を再溶解し強電解質の濃縮塩水になるため、電池作用によるピッチングを起こし、内底板、ヒーティングコイル、水平補強板などの上面に深い点食を生じる例が多い。

この凝滴（スエット）の化学分析一例を示すと表4.6.13のとおりで、強電解質である上、硫酸分として0.2%（pH 1.5）という強酸性を示していた。

4.6.3 対象プラント材料の含油海水による腐食の可能性

(1) 腐食損傷

4.6.1及び4.6.2を要約すると、次のようになる。

- 1) 原油中の硫化水素により、銅合金、炭素鋼に孔食が生じる。
- 2) チタンの耐食性は非常に良好であるが、ステンレス鋼には塩化物により応力腐食を生じる恐れがある。
- 3) 非金属の中では、エポキシ系、フェノール系、コールタール及び合成ゴム系の劣化が大きい。
- 4) 重質油、重油はそれによって形成される油膜により、全面腐食に対する防食効果がある。

5) 油で自由界面を形成している場合、液相部より気相部の腐食が大きい。

一方、対象プラントの主要構成材料は表 4.6.14 のとおりであるが、この中で漏入油と接触する部位の構成材料は銅合金、有機被覆材及びステンレス鋼である。

ここでステンレス鋼に対する応力腐食割れは油汚染とは関係なく海水を使用するプラントの共通の問題であることから、検討対象から除外して、ほかの材料への影響を上記調査結果をベースに検討する。まず銅合金が硫化水素により腐食損傷を受けることが考えられる。しかしこの事例は油と直接長時間接触している場合であり、この結果を今回の条件、すなわち、油分 1,000 mg/l 以下含有の海水とある限られた期間接触するのみの場合にそのまま適用できるとは言えないと思われる。ただ、海水と油が二層に分離し、かつ滞留している部位、あるいは高濃度の油混入で、その期間が長期にわたる場合は十分腐食損傷の可能性はある。

また非金属として WEST 系 1~6 プラント蒸発室のコーティング材に使用されているエポキシ系コーティング材 (Hempadur) も上記環境条件であれば、材質劣化の恐れが十分ある。

いずれにしても、これまで入手した技術情報のみでは、プラント腐食の傾向は推定できても、適格な評価を出すことはできない。今後系統的な調査研究の要がある。

(2) その他の損傷 (エロージョン等)

油の混入を考えた場合、(1)に示した電気化学的腐食損傷以外に物理的要因によるエロージョンについても一応検討しておく。この場合、キャビテーション・エロージョンについては考慮する必要はなく、油と共に混入した砂あるいはスクリーンで除去できなかった微細なオイルボール等による磨耗を主体とするエロージョンが要検討項目となる。

しかし、これら油と共に混入してくる微細な砂等は取水ポンプ等の吸入口に設置されたストレーナーで除去できるのでプラントのエロージョンの原因になることは考えられない。ただし、ストレーナーの詰りにより、その洗浄頻度が増える等の影響はあると思われる。

表 4.6.14 対象プラントの構成材料

Plant No	WEST No 1~6	EAST No 1~3
Plant Capacity	1 8 0 0 0 m ³ /d	2 2 5 0 0 m ³ /d
Manufacturer	I H I	S I D E M
Main Shell Material	C S	E, 24
Protective Coating	Hempadur F 492	ANKIOL
Special Protection Lining	Stages 1-2: CuNi, clad	Deaerator: SS316L
High Temp. Water boxes	CS + 90/10 Clad	Cu, Al A20
Low Temp. Water Boxes	CS + 90/10 Clad	"
Rejection Section Water Boxes	CS + 90/10 Clad	"
Tubes		
Heat Input Section	70/30	70/30
Heat Recovery Stages -High temp. Low temp.	70/30 Al Brass	70/30 Al Brass 22 A 12
Heat Rejection Stages	70/30	70/30
Ejector Condenser	Ti	Ti
Tubes Sheets	RNB	Cu, Ni 70/30
Tube Support Plates	CS	CS
Demistar	SS	SS
Pipework - Sea Water Supply	Bonna	Bonna
" " " Feed	S S 316L	Coated DC 1
Brine Recycle -High temp. Low temp.	CS + 10/10 Clad CS + Epoxy	Cu Al A20 CS ANKIOL + Ankion
Distillate Vents	SS - 304 SS - 304	SS - 316L SS - 304
Sea Water Supply Headers	Bonna	Bonna
Main Vessel Support Structure	Steel	Steel

CS Carbon Steel
RNB Rolled Naval Brass
70/30 Cu Ni to 66/30/2/2
90/10 Cu Ni

SS
CDI + C

Stainless Steel
Ductile Cast Cement Lined

第 4 章 関 係 参 考 文 献

(1) 引用文献

- 1) D. Mackay : Chemical and Physical Behaviour of Hydrocarbons in Freshwater, "Oil in Freshwater" P. 10 (1986)
Pergamon Press
- 2) H. Roques, et al : Recent Developments in The Treatment of Oily Effluents, Wat. sci. Tech, Vol. 18, P. 91-103 (1986)
- 3) 萩原 一芳ほか : 「流出原油の経時変化に関する研究」第 3 報、環境技術 3 巻 2 号、1974
- 4) B. L. Oostdam : Marine Pollution in Kuwait, The Osean Challenge, Fourth Annual Combined Conf. Marine Tech. Society and Institute of Elect. and Electronics Engineers, P. 445-450, Washington, 6-8 Sept. (1978)
- 5) 近藤 五郎ほか : 流出原油の経時変化に関する研究 (第一報)、環境技術 1 巻 9 号 1972
- 6) 小川 勝 : 海上における油の拡散と性状変化、海上保安大学校、海上防災 46 34, 1985
- 7) 波江 貞弘ほか : 水面上に流出した軽質油膜について、日本船舶機関学会誌、Vol. 13, No. 2. P 156-163 (1978)
- 8) 福田 ほか : 「排出軽質油の識別手法に関する研究」環境保全研究成果集、環境庁海上保安庁警備救難部、昭・55 ~ 57
- 9) 佐野 真ほか : 「流出原油の経時変化に関する研究」第 2 報、環境技術 1 巻 10 号、1972
- 10) 植田 靖夫 : 船舶からの軽油等排油処理対策等の研究
運輸省船舶技術研究所報告書
- 11) 外山 茂樹 : 水中の油滴による壁面の汚れと除去機構、日本海水学会誌、第 38 巻、第 3 号 (1984) P. 148-153
- 12) 玉木 恕乎 : 水中油分による伝熱面の汚れについて、船舶技術研究所、第 21 回講演会予稿集 (48.5)

- 13) Hazelton ほか : Trans. A. I. Ch. E., 40, 1, (1944)
- 14) 化学工学便覧 : P. 223 昭和36年版 丸善
- 15) TEMA : Standards of Tubular Exchanger Manufacturers Association, Thermal Standards, Section, 9 U. S. A.
- 16) M. A. Zaki : Same Special Design Features of Kuwait MSF Plants, Proceedings of the International Congress on Desalination and Water Reuse (1977 Tokyo)
- 17) 小畑健三郎ほか : 液柱塔による真空脱気について、日本海水学会誌、Vol. 29、№5、P 218-227 (1976)
- 18) 佐古 猛ほか : 蒸発法海水淡水化における油分の挙動、化学技術研究所報告、Vol. 81、№1、P 45-49 (1986)
- 19) 中沢 宣明ほか : 海水淡水化蒸発装置における鉱油成分の挙動、日本海水学会、39年会 63.5.25.
- 20) 丹保 憲仁 : 水道とトリハロメタン、P. 6 技報堂出版 (1983)
- 21) C. J. Ptacek ら : Mobility of Dissolved Petroleum-Derived Hydrocarbon In Sand Aquifers, "Oil in Freshwater", P. 195 (1986), Pergamon Press.
- 22) 川崎 健 : 海洋の油汚染、時事通信社 (1985)
- 23) 熊井一馬, 小泉道夫 : 電気化学協会海生生物汚損対策懇談会セミナー 「クロリネーションの過去と現在」予稿集 P. 84 (1986)
- 24) Mahnood Y. Aal and J. P. Riley : The Distribution of Halomethanes in the Coastal Waters of Kuwait, Marine Pollution Bulletin Vol. 17, №9, P. 409-414 (1986)
- 25) N. M. Fayad : Chlorination Byproducts of Arabian Gulf Seawater, Bull. Environ. Contam. Toxcol. 38, P. 475-482 (1987)

- 26) 相沢貴子, 鈴木信司: トリハロメタン生成に及ぼす臭素イオンの影響、
真柄泰基 第18回衛生工学研究会討論会講演論文集
P. 247-252 (1981)
- 27) 武政隆夫, 浦野紘平: 水中の有機物質と塩素との反応によるトリハロメタン生成速度(II)、
第16回水質汚濁学会講演集、 P. 61-62 (1982)
- 28) 和田 洋, 浦野紘平: 水中の有機物質と塩素との反応によるトリハロメタン生成速度
水質汚濁学会講演集、 P. 104-105
- 29) 相沢貴子, 長谷川一夫: 塩素処理による有機化合物の全塩素化合物(TOCl)生成特性、
足立幸子, 真柄泰基 水質汚濁研究 Vol. 7. №2 P. 36-45 (1984)
- 30) 名川吉信, 植松喜絵: 化技研報 Vol. 80. P. 245 (1985)
西 未雄
- 31) Hansen : The Composition of Petroleum P. 49-78
- 32) 吉村 廣三 : 油による汚染、水質汚濁研究 Vol. 11. №3. P. 17-21
(1988)
- 33) Mahmood Y Ali', Ph. D. Thesis
Letter from "The Department of Earth Science Oceanography
Laboratories of The University of Liverpool" Professor J.P.
Riley
- 34) C.G. Munger : Deep Pitting Corrosion in Crude Oil Tankers.
Materials Performance, March, P. 17-23 (1976)
- 35) 佐藤 史郎ほか : オイルタンカー船槽内における各種金属材料
—とくに銅合金—の腐食試験、
住友軽金属技報、Vol. 14, №4、P219-229 (1973)
- 36) 佐藤 史郎ほか : 石油精製プラントの水添脱流装置における各種金属材料の
実地腐食試験の結果、
住友軽金属技報、Vol. 6, №2、P111-118 (1965)
- 37) 栄 幸雄ほか : タンカー油槽内における各種構造材料の腐食について
防食技術、Vol. 9, №9、P1-10 ()

- 38) 「伝熱工学資料－復水器」応用－D－a
156－157頁、日本機械学会発行
- 39) 「石油処理ハンドブック」ブランド／ダビットソン著
マックグロウ・ヒル社（米国）1967年
12－52図 12－74頁
- 40) 「熱交換器サイズ決定のための水中油エマルジョンにおける熱伝達の計算」
ミカエル ヴィルツ著
マシーネンマルクト 89（1983）22
- 41) 「発電プラントの設計と経済性に及ぼす復水器管汚れの影響」
P. L. カーレット A. M. イムバグリェッツ
ASME論文 1981 17巻 45－59頁
- 42) 「火力原子力発電必携」昭和60年版
火力原子力発電技術協会 277頁

(2) その他参考文献

- ① M. Lee, et al. : The Use of Dispersants on Viscous Fuel Oils and Water in Crude Oil Emulsions, Proc 1981 Oil Spill Conf. P. 31-35 (1981)
- ② 造水促進センター : 油汚染防止技術開発調査報告書(1985) P. 48
- ③ A.M. Shams El Din : A 600-Day Experiment with Polyphosphate as Anti - Scale Agent In MSF Distillers. Desalination, 61, P. 89-101 (1987)
- ④ 中沢 宣明ほか : 希薄アンモニア塩水の気液平衡関係、
化学技術研究所報告、
Vol. 83, № 5, P 201-205 (1988)
- ⑤ 遣沢 哲夫ほか : 蒸発法海水淡水化における原料海水中的汚濁物質の影響
(第1報)、
蒸発法海水淡水化装置におけるアンモニウムイオンの挙動、
東京工業試験所報告、 Vol. 70, № 11, P 419-425 (1975)
- ⑥ 遣沢 哲夫ほか : 蒸発法海水淡水化における原料海水中的汚濁物質の影響
(第3報)、
蒸発法海水淡水化における装置金属材料の溶出に対する海水中的
アンモニウムイオンの影響、
東京工業試験所報告、 Vol. 70, № 11, P 432-436 (1975)
- ⑦ 遣沢 哲夫ほか : 蒸発法海水淡水化における原料海水中的汚濁物質の影響
(第2報)、
蒸発法海水淡水化におけるフェノール類の挙動、
東京工業試験所報告、 Vol. 70, № 11, P 426-431 (1975)
- ⑧ 白田 利勝ほか : 多段フラッシュ蒸発装置におけるフェノール類の挙動その予測、
東京工業試験所報告、 Vol. 72, № 8, P 330-335 (1977)
- ⑨ 白田 利勝ほか : 海水中的汚染物質の気液平衡関係、
日本海水学会誌、 Vol. 29, № 6, P 232-254 (1976)
- ⑩ 米国環境保護庁 : 飲料水とトリハロメタン制御、 公害対策技術同友会
(1985 刊)
- ⑪ 杉野 邦雄ほか : 塩素処理で生成する有機ハロゲン物質および海とのかかわり、
日本海水学会誌、 Vol. 41, № 3, P. 113-122 (1987)

- ⑫ 浦野 紘平 : トリハロメタンの生成反応、
用水と廃水、 Vol. 23, № 8, P. 19, 24 (1981)
- ⑬ 宗宮 功哉か : トリハロメタン生成能に係わる水質評価と前駆物質の除去、
用水と廃水、 Vol. 23, № 8, P. 53-64 (1981)
- ⑭ B.W. Lykins El : Products Identified at an Alternative Disinfection
Din Pilot Plant, Enviromental Health Perspectives,
Vol. 69, P 119-128 (1986)
- ⑮ M. Thomason : Study of Water Treatment Effects on Organics
Volatiles in Drinking Water, Journal of
Chromatography, 158 P. 437-44 (1978)
- ⑯ Japan Association: Manual, (D) 施設防食、⑰防食法VI、 P 4-5
of Corrosion
Control
- ⑰ 海洋油濁防止装置の性能基準に関する調査研究報告書(社)日本造船研究会
:(その2)昭・58・3
- ⑱ 吉村 廣三 : 海洋の油汚染と分析法、環境と技術、 Vol. 14, № 11 (1987)

第5章 油汚染防止の実施化方策とその評価

執筆者 橋本静雄、今藤 勇、水津 茂、
久保木宏、高橋弘二、松崎憲四郎、
中尾 徹、東野政則、内藤 弦、
石井寿一

第5章 油汚染防止の実施化方策とその評価

5.1 油の拡散に関する数値計算

油汚染防卸の実施化方策として、流出油の検知システム（油汚染モニタリングシステム）や油汚染防卸システムが挙げられる。このうち油汚染モニタリング地点の選定に当たっては、プラント管理者が緊急体制を施することが出来るような時間的余裕を持てる地点に設置する必要があるため、外海から侵入する油の油汚染防卸システムや取水口までの流路や到達時間について十分に把握しなければならない。

したがって、ここでは、ラグーン内に侵入した油が油汚染防卸システムや取水口近傍までに到達する流路や到達時間を推定するために、アブダビ島から Umm Al Nar 周辺海域に至る流況を数値シミュレーション手法を用いて予測し、この流動予測結果を用いて油を粒子に置き換えラグランジェ的に追跡することとする。

これらの結果をもとに、油汚染防卸システムや取水口近傍域までの到達時間や流量を算出することにより、油汚染防卸に必要なモニタリング地点選定や油汚染防卸システムの検討の基礎資料を得ることを目的とする。

なお、数値計算の手順は、図 5.1.1 に示す。

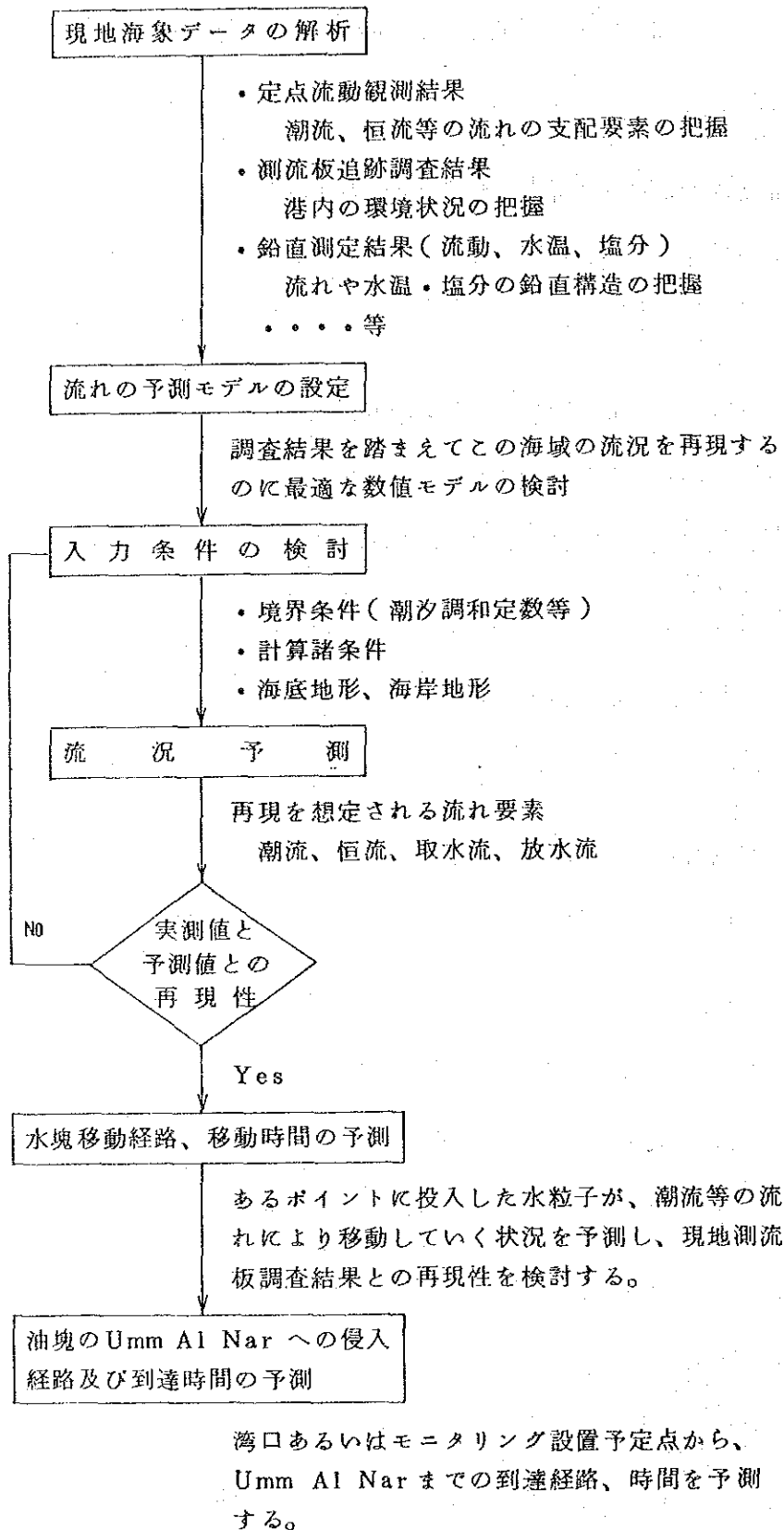


図 5. 1. 1 データ解析、数値計算の手順

(1) 目的

油汚染モニタリングシステムや油汚染防御システムの検討に際しては、流入する油の移動経路や到達時間等の情報が非常に重要である。この油の移動状況を支配するのは、対象海域のアブダビ島周辺域や Umm Al Nar 取水口近傍域の流況である。したがって、ここでは、この流況について現地観測結果に検討を加え、対象海域の流況を再現出来るような予測モデルを選定し、流況予測を実施するものである。

(2) 対象海域の流況

油の流路や到達時間を知る上で最も重要なことは、対象海域の流況を十分に把握し、この海域の流況特性を再現することである。

対象海域の流況について、今回の調査結果を以下のようにまとめた。

1) 潮流成分

ラグーン内の流れは、潮汐の昇降運動によって生ずる潮流が支配的である。この潮流は時々刻々と流速や流向が変化する非定常流れである。流れの変化を見るために、流速の早い水路部に位置する測点 9 で検討してみる。

潮流は約 1 2 時間周期である M_2 潮や S_2 潮、約 2 4 時間周期である K_1 潮や O_1 潮等の様々な分潮の合成流である。特に上述した四つの分潮は主要 4 分潮とよばれこの四つの分潮で、その流れのほとんどを再現することができる。この 4 分潮の変化を図 5.1.2 に示す。

上から 4 分潮の流れ変化を示しており、 $(M_2 + S_2)$ は M_2 潮と S_2 潮との合成流、 $(K_1 + O_1)$ は K_1 潮と O_1 潮との合成流、 $(M_2 + S_2 + K_1 + O_1)$ は主要 4 分潮の合成流を表している。これらの合成流をみると 1 5 日間を 1 周期として変動していることが分かる。一番下段に観測した生データを示すが、主要 4 分潮の合成流と観測値が非常によく類似しているのが分かる。

このように、対象海域の潮流を再現するに当たっては、主要 4 分潮である M_2 潮 S_2 潮、 K_1 潮、 O_1 潮を考慮すれば良いこととなる。

2) アブダビ島沖合

今回の観測では、期間平均流という長い時間スケールの恒流は、ほとんど認められなかった。しかしながら、沖合の測点15では、1988年10月14日～10月20日や1989年2月18日～22日に5cm/s程度の南西流が継続して流れており、沖合での恒流の存在が認められた。

3) ラグーン内での恒流

期間平均流より時間の短い数日間の恒流を見るために、生データを25時間移動平均した結果、数日間の同一方向に流れる5～10cm/sの存在がうかがわれた。この時の風と対比してみると、両者の変化状況は良く類似しており、ラグーン内での数日間の恒流は風により発生していると推察される。

(3) 流れの成因要素の抽出

対象海域の流れは、前述したように非常に卓越した「潮流」と「風による流れ」「沖合での恒流」の合成流であると考えられる。

ここでは、この3要素の成因について検討する。

1) 潮流

潮流は、時間的に変動する潮汐の昇降運動により発生する流れであり、流れの変動周期は潮汐の変動周期に一致する。対象海域のMina Zayed 地点での潮汐の大きさを表5.1.1に示す。

表 5.1.1 Mina Zayed 地点における潮汐調和定数

分 潮	周期(h)	振幅(cm)	遅角(度)
M ₂ 潮 (主太陰半日周潮)	12.42	40.53	26.8
S ₂ 潮 (主太陽半日周潮)	12.00	15.42	83.8
K ₁ 潮 (日月合成日周潮)	23.93	25.64	170.9
O ₁ 潮 (主太陰日周潮)	25.82	20.05	111.8

解析期間：1987年2月～1987年12月

解析方法：最小二乗法による調和分解法

2) 風による流れ(吹送流)

風が吹くことにより、海表面に接線応力が働き、その力が流れへと変化する。特に、閉鎖された内湾では、季節風の連吹や海陸風により湾内に循環流等が発生し、複雑な流れを示す。

対象海域での風と流れの状況を見るために、測点 19 と 23 の潮流以外による流れベクトル(25時間移動平均値)と風ベクトルを図 5.1.3 に示す。

これによると、両者の変化状況は良く類似しており、風による流れの存在がうかがわれる。しかしながら、風から流れへの変換率(風力係数)や流れの方向等は周辺の地形やそこでの水深等により様々であり、複雑な状況を示している。

3) アブダビ島沖合での恒流

まず、言葉の定義について断っておくが風による流れ(吹送流)も一つの恒流系に属するが、ここでの「沖合での恒流」とはアブダビ湾での海流系による恒流と定め、言葉上吹送流と区別する。

アラビア湾での海流についての詳しい資料はないが、アラビア海水路誌(日本の海上保安庁)¹¹⁾によれば、1年の多くの月でホルムズ海峡を通過し偏西流となってアラビア湾内に流入していることは明らかである。アブダビ島沖合では、この偏西流の順流や反流が存在していると言われている。

今回の調査期間中の10月14日～10月20日にかけて5cm/s程度の南西流の存在が認められた。(図 5.1.4, 5.1.5 参照)これが上述した海流系の分流とは断定できないが「恒流」の存在は確認できた。

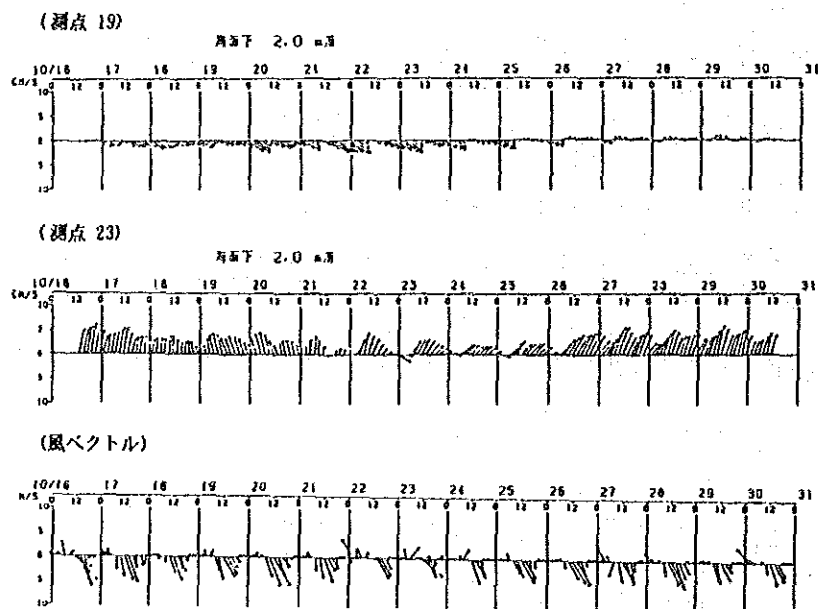


図 5.1.3 流れ(25時間移動平均流)と風との比較(1988年10月調査)

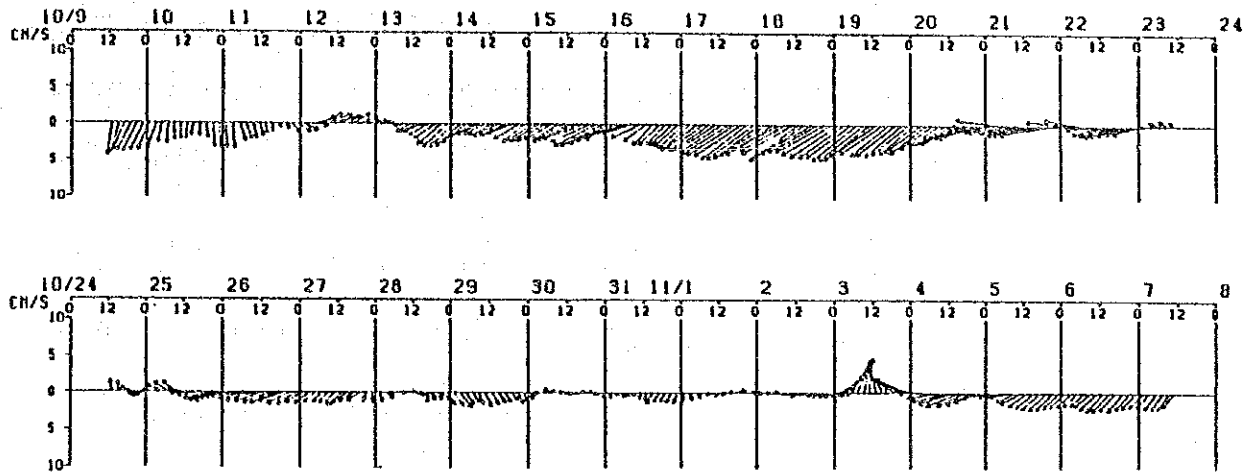


図 5. 1. 4 測点15での 25時間移動平均流 (1988年10月調査)

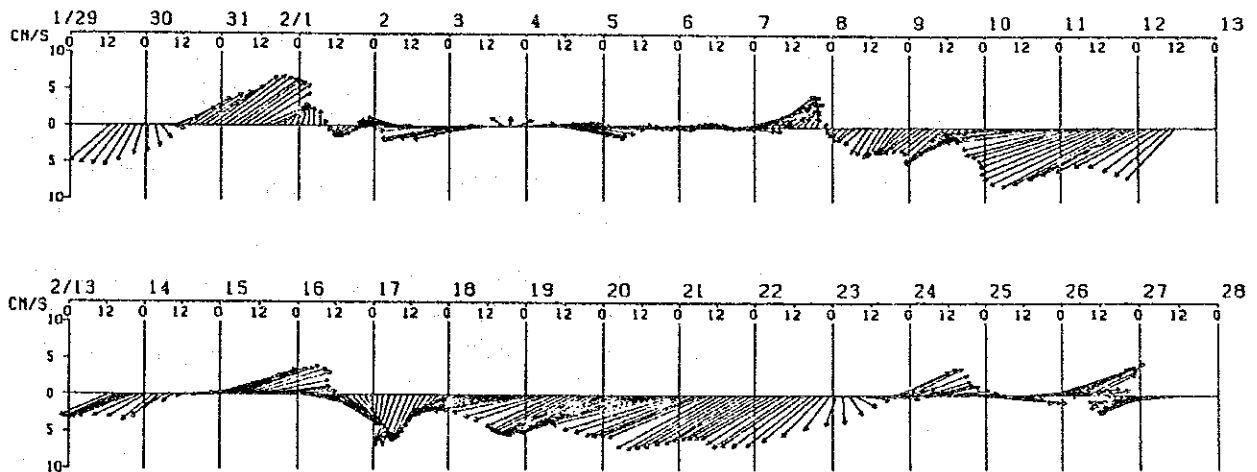


図 5. 1. 5 測点15での 25時間移動平均流 (1989年 2月調査)

(4) 流況予測モデル

前述したように対象海域での流れには、大きく三つの要素がある。その成因外力については「潮汐の昇降運動」「風の接線応力」「沖合での海流成分」と推察されることを示した。流況の再現は、このような成因外力の違い流れを予測することになるが、流れの成因は違うものの、海水に働く圧力、海底・海面摩擦、地形の影響などの諸条件を伴った Navier-Stokes の運動方程式を解くという力学上の問題である。

以下に、Navier-Stokes の運動方程式及び連続方程式を示す。

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} + \frac{\partial[(h+\zeta)u]}{\partial x} + \frac{\partial[(h+\zeta)v]}{\partial y} = 0$$

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} - fv + g \frac{\partial \zeta}{\partial x} + \frac{\tau_x^b - \tau_x^s}{\rho_w(\zeta+h)} - A_h \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) = 0$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + fu + g \frac{\partial \zeta}{\partial y} + \frac{\tau_y^b - \tau_y^s}{\rho_w(\zeta+h)} - A_h \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right) = 0$$

ここに、 u, v : それぞれ x, y 方向の平均流速
 ζ : 水位
 h : 水深
 f : コリオリ係数 ($= 2 \omega \sin \phi$)
 ω : 地球の自転速度
 ϕ : 緯度
 ρ_w : 海水の密度
 τ_x^b, τ_y^b : 海底面での摩擦応力
 τ_x^s, τ_y^s : 海面での剪断応力
 A_h : 水平渦動粘性係数
 g : 重力加速度 である。

海底摩擦応力と海面剪断力はそれぞれ、

$$\tau_x^b = \frac{\rho_w g u \sqrt{u^2 + v^2}}{C^2} - k \tau_x^s$$

$$\tau_y^b = \frac{\rho_w g v \sqrt{u^2 + v^2}}{C^2} - k \tau_y^s$$

$$\tau_x^s = \rho_a C_D W_x \sqrt{W_x^2 + W_y^2}$$

$$\tau_y^s = \rho_a C_D W_y \sqrt{W_x^2 + W_y^2}$$

W_x, W_y : 海面上の風速
 C_D : 海面の抵抗係数
 ρ_a : 空気の密度
 C : Chezy の粗度係数 ($= n^{-1} h^{1/8}$)
 n : マニングの粗度係数
 k : 比例係数

(5)予測ケース

表 5.1.2 に示すケースについて実施する。

表 5.1.2 予 測 ケ ー ス

	項目	内 容	備 考
A-1	潮流	最大大潮期 ($M_2 + S_2 + K_1 + O_1$) 潮	(注1)
A-2		平均大潮期 ($M_2 + S_2$) 潮	
A-3		中潮期 (M_2) 潮	
A-4		小潮期 ($M_2 - S_2$) 潮	
B-1	恒流	南西流 5 cm/s	(注2)
C-1	吹送流	風向 N 風速 5 m/s	(注3)
C-2		風向 NW 風速 5 m/s	
C-3		風向 S 風速 5 m/s	
D-1	取水流	発電所取水量 126.4 m^3/s	(注4)
E-1	放水流	発電所放水量 123.3 m^3/s	(設計値)

(注1)

対象海域の潮流の時間的な変化状況については、前述したように各分潮の合成流であることから、15日を1周期として変動する。ここでは、以下の理由により15日間のなかで、ある潮期を設定して予測を行った。

- ・最大大潮期 主要4分潮による合成潮であり、最も流速が早くなる潮期である。したがって、油塊の移動距離が最も大きい時であり、遠方域のモニタリング地点の選定に重要である。
- ・平均大潮期 半日潮による最大流速期を想定しており、日潮不等が起こらない時の最大油塊移動距離や時間を把握することができる。
- ・中潮期 中潮期は平均潮とも呼ばれ、この海域の平均的な流れ場を表す。他の3ケースはある特異期を狙ったものであるが、中潮期は平均的な流れ場を対象としたものである。
- ・小潮期 15日間のうち最も流速の小さい時期を想定したものである。流速が小さいために、取放水口近傍域では、潮流流速よりも取放水流速が卓越し、これらの人為的負荷による流れの影響が明確となる。

(注2)

アブダビ島沖合の海流系の恒流の設定については、前述したように現地観測結果より南西流れが認められ、その流速の大きさは 5 cm/s である。したがって、この流れを再現することとした。

(注3)

海表面近くを拡散する油の移動については、風による流れを考慮することが非常に重要である。また、この海域では現地観測結果よりこの風による流れが認められた。そこで、風向及び風速の設定は、アブダビ International Airport や Bateen Airport の観測結果（同地点での1984年の風配図を図5.1.6に示す）より得られた卓越風を参考に、さらに対象海域の地形特性を考慮し、油の移動に寄与すると推察される風向を設定した。

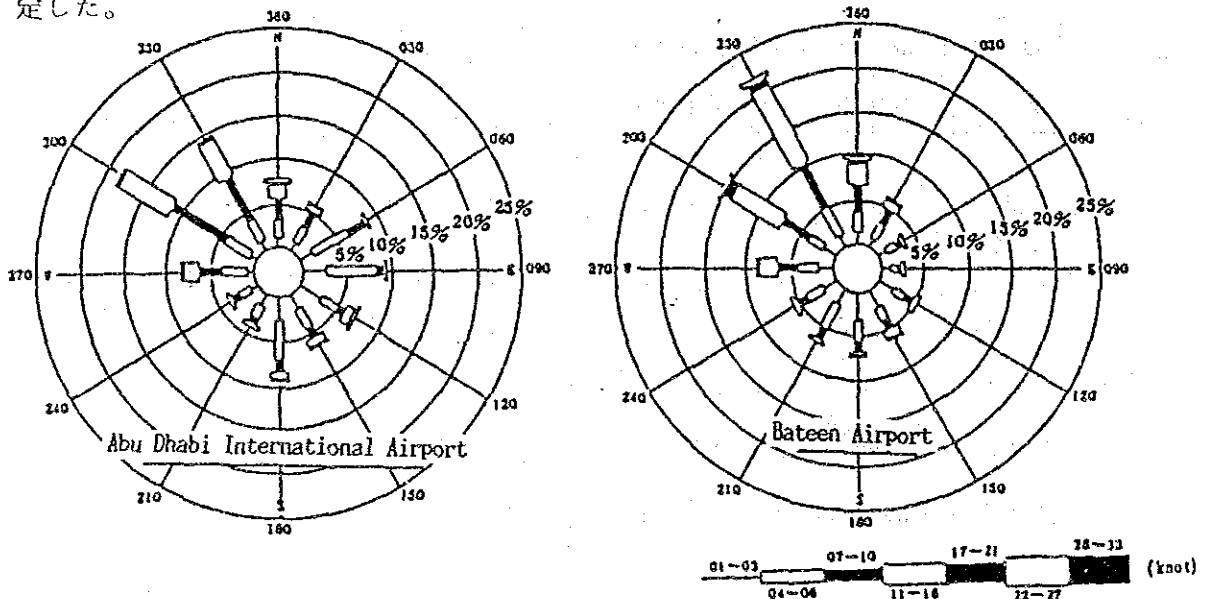


図 5.1.6 対象近傍域での風配図 (1984)

(注4)

以上3つの流れは自然外力による流れであるが、対象海域ではこれらの他に大規模な取放水を行っている。この流れにより油塊が引き込まれたりすることが推察されるためこれらの流れを予測することとした。

なお、取放水量の各設備の内訳を以下に示す。(設計値)

取水設備	
● 取水量	No. 1 220,000 m^3/h
	No. 2 180,000 m^3/h
	No. 3 55,000 m^3/h
<hr/>	
合計	455,000 m^3/h 126.4 m^3/s

放水設備	
● 放水量	No. 1 143,000 m^3/h
	No. 2 178,000 m^3/h
	No. 3 72,000 m^3/h
	No. 4 51,000 m^3/h
<hr/>	
合計	444,000 m^3/h 123.3 m^3/s

(6) 予測対象範囲

予測対象範囲は、対象海域の流況や地形を考慮し、図 5.1.7 に示す範囲である。

なお、範囲の諸元は次の通りである。

- 沿岸方向（北東～南西方向） 22.8 km
- 沖合方向（北西～南東方向） 26.6 km

また、対象海域を 200 m の正方形格子に分割して予測した。

(7) 予測条件

1) 開境界条件

計算領域と海との接している開かれた境界において次のような条件を与えた。

① 潮流予測

開境界で次のような余弦関数で潮汐振動を与えた。

$$\zeta_b = h_{b2} \cos \{ \omega_2 t - (\kappa_2 - \kappa_{m2}) \} + h_{b1} \cos \{ \omega_1 t - (\kappa_1 - \kappa_{m1}) \}$$

- ここに、
 ζ_b : 開境界での潮位 (m)
 添字: 2 ; 半日周潮、1 ; 日周潮
 h_b : 潮汐の振幅を表す調和定数 (m)
 κ : 潮汐の遅角を表す調和定数 (度)
 ω : 潮汐の角速度 (度/時間)
 $\omega_2 = 30.0$
 $\omega_1 = 15.0$
 κ_m : 標準港の潮汐の遅角 (度)
 ここでは、標準港を Mina Zayed とした。
 t : 時間 (時間)

なお、調和定数の h_b と κ の設定は、潮位観測された潮汐調和定数を参考にし、さらに流れの整合性の試行錯誤の結果次のように設定した。

表 5.1.3 開境界条件

ケース	潮期	南西側境界		北東側境界	
		h_b (m)	κ (°)	h_b (m)	κ (°)
A-1	最大大潮	h_{b1} 0.45	κ_1 141.5	h_{b1} 0.45	κ_1 151.5
		h_{b2} 0.64	κ_2 24.5	h_{b2} 0.64	κ_2 29.5
A-2	平均大潮	0.64	24.5	0.64	29.5
A-3	中潮	0.41	24.5	0.41	29.5
A-4	小潮	0.15	24.5	0.15	29.5

なお、沖側境界は、南西側境界と北東側境界との線型補間で求めた。

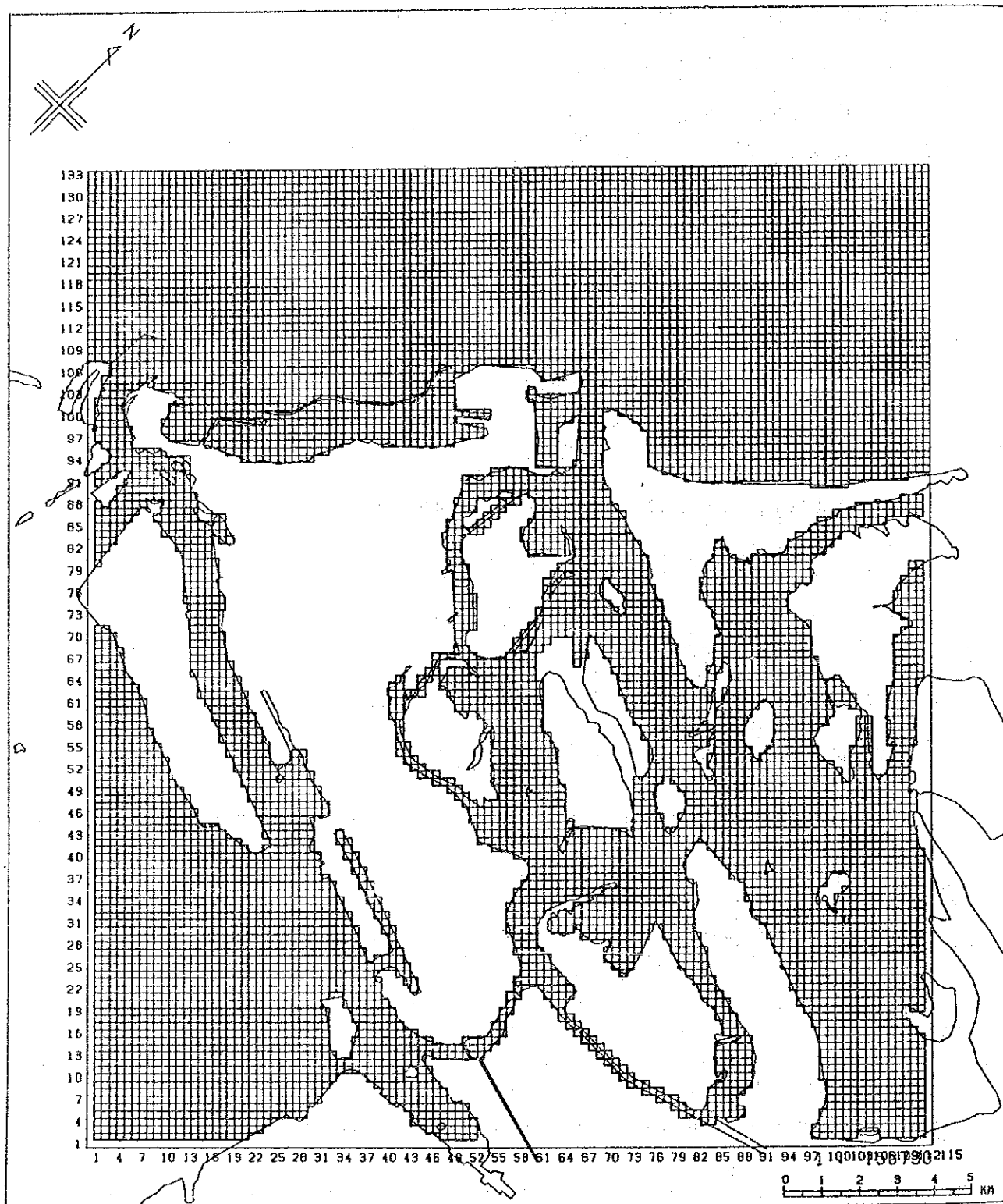


图 5.1.7 计 算 格 子 (200 m × 200 m)

②恒流計算

Mina Zayed から沖合 5 km 地点において、設定された流速（南西 5 cm/s）となるように、水位差を与えた。

③吹送流計算

設定された風向（N, NW, S）で風速を 5 m/s として与えた。

なお、この時の開境界は自由境界とした。

2) 閉境界条件

陸地や防波堤等の港湾構造物を通しての流れはないものとして以下のように取り扱った。

$$\frac{\partial M}{\partial n} = 0, \quad \frac{\partial N}{\partial n} = 0$$

ここで、M, N : それぞれ x, y 方向の線流量

n : その流速方向の法線方向

3) 自然条件

海岸地形や水深の設定は、次に示す資料を用いて行った。

- 日本の海上保安庁水路部発行 海図 No 3170
- WED資料 海図 No 3752, 3713
- WED資料 航空写真

4) 計算諸係数

①水平渦動粘性係数 (A_x, A_y)

水平渦動粘性係数は、海水の乱流運動に伴う運動量の逸散を表し、一般的に $10^4 \sim 10^7 \text{ cm}^2/\text{s}$ とされているものの、その値については明確ではない。したがって、ここでは、流動観測結果から得られた拡散係数を参考にして算定することとした。

対象海域の拡散係数を 図 5.1.8, 5.1.9 に示すが、その値は $1 \times 10^4 \sim 5 \times 10^5 \text{ cm}^2/\text{s}$ となっている。したがって、ここでは、 $A_x = A_y = 5 \times 10^4 \text{ cm}^2/\text{s}$ の等方性とした。

②コリオリ係数 (f)

コリオリ力は、地球自転によるものであり、その係数は次のように表すことができ

る。

$$f = 2 \omega \sin \phi = 6.020 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$$

ここに、 ω : 地球の自転の角速度 ($= 2\pi / (24 \times 3600)$)

ϕ : 対象域の北緯 ($= 24^\circ 27'$)

③ 海底摩擦係数 (γ_b^2)

海底摩擦は海底に働く水平応力であり、数値予測上、長周期波を対象とした海洋の単層流れに対してこの海底摩擦は、水平方向の絶対大きさと運動方向の流速成分に比例する量として取り扱っている。この比例定数が海底摩擦係数であるが、ここでは次のように定義した。

$$\gamma_b^2 = g / c^2$$

ここに、 g : 重力加速度 ($= 9.8 \text{ m/s}^2$)

c : シェジの粗度係数

$$c = n^{-1} \times h^{1/6}$$

n : マニングの粗度係数 ($= 0.026 \text{ m}^{-1/3} \text{ s}^{-1}$)

h : 水深 (m)

④ 海面摩擦に係る係数

・ 海面抵抗係数²⁾ $C_D = 0.0026$

・ 比例定数²⁾ $k = 0.25$

・ 空気の密度³⁾ $\rho_a = 0.0012 \text{ g/cm}^3$

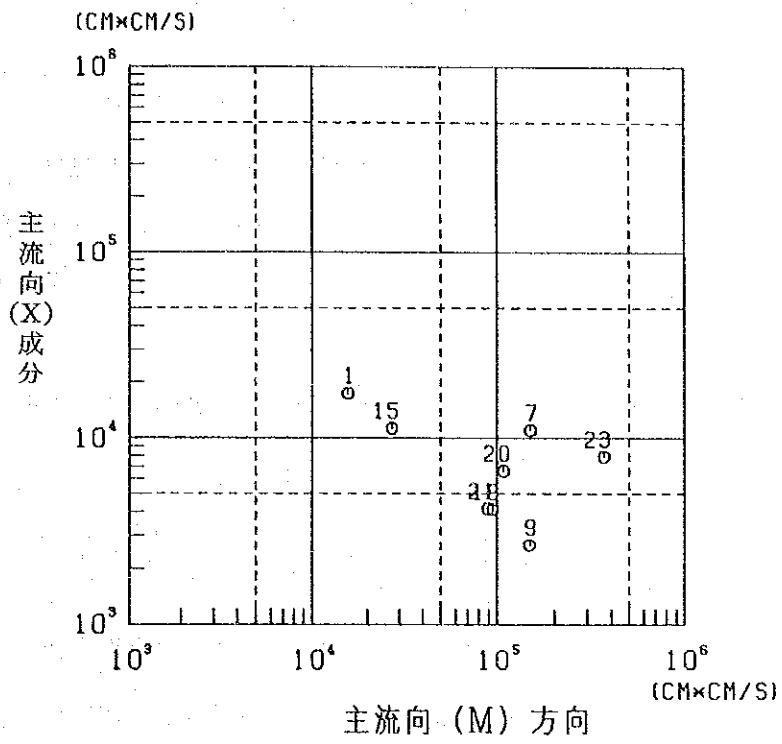


图 5.1.8 扩散系数 (1988年10月观测)

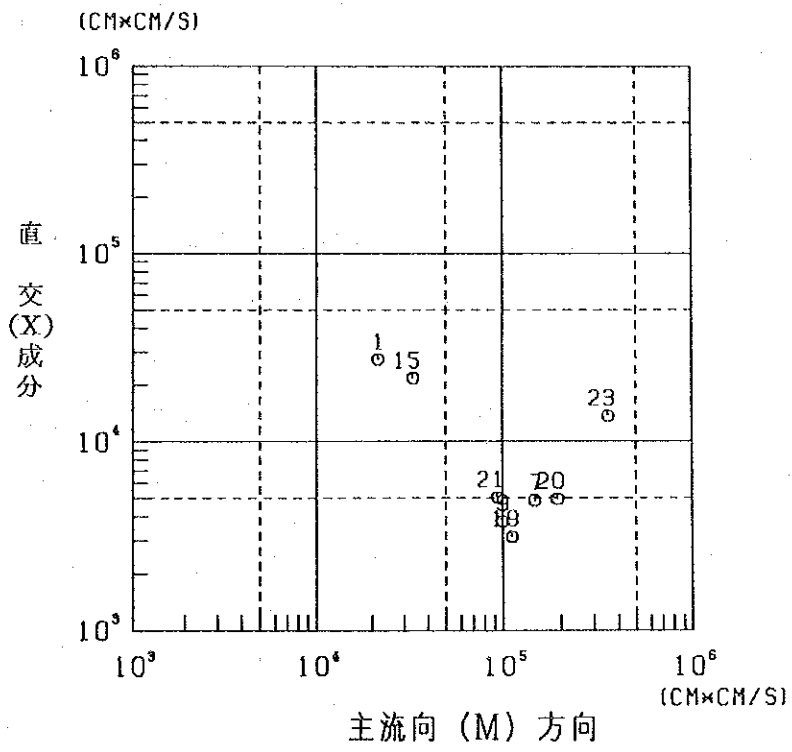


图 5.1.9 扩散系数 (1989年2月观测)

(8) 予測値と実測値との整合性の検討

1) 潮流予測

潮流観測は、図 5.1.10 に示すように合計 8 測点で実施された。この結果を用いて潮流調和定数による潮流楕円と予測値の潮流ホドグラフによる検討

検討に当たっては、潮流楕円とホドグラフの主軸方向により「流れの方向の検証」、主軸流速により「流れの大きさの検証」、潮時により「流れの時間的変化の検証」を捉えることができる。

平均大潮時における実測値の潮流楕円と予測値の潮流ホドグラフの比較図を

図 5.1.11～図 5.1.12 に示す。

また、各測点での主軸方向とその流速値の比較を表 5.1.4 に示す。

これらの結果から、実測した 8 測点のうち測点 23 を除き流向・流速とも予測値と実測値は概ね合致しており、予測モデルの対象海域への適合性や予測条件の妥当性について確認できる。測点 23 は狭い水路内の測点であり、予測の格子幅 200 m では十分に地形が再現できなかつたためと考えられる。

2) 恒流予測

アブダビ島沖合での恒流成分については、設定した「Mina Zayed から沖合 5 km 地点で南西流 5 cm/s」の再現性について示す。

Mina Zayed から沖合 5 km 地点での流速については「流速値 5.2 cm/s」「流向値 225 度」で設定した流速が得られており、予測条件等の妥当性が確認された。

3) 吹送流予測

吹送流の予測については、観測時の風況が限定されたデータであり、想定した風況が対応できなかったために、実測値と予測値との整合の検討が十分にできなかった。しかしながら、本予測に用いた吹送流予測モデルやその条件については、過去に検討された地点での整合が十分なされたものであることから、この結果は妥当であると推察される。

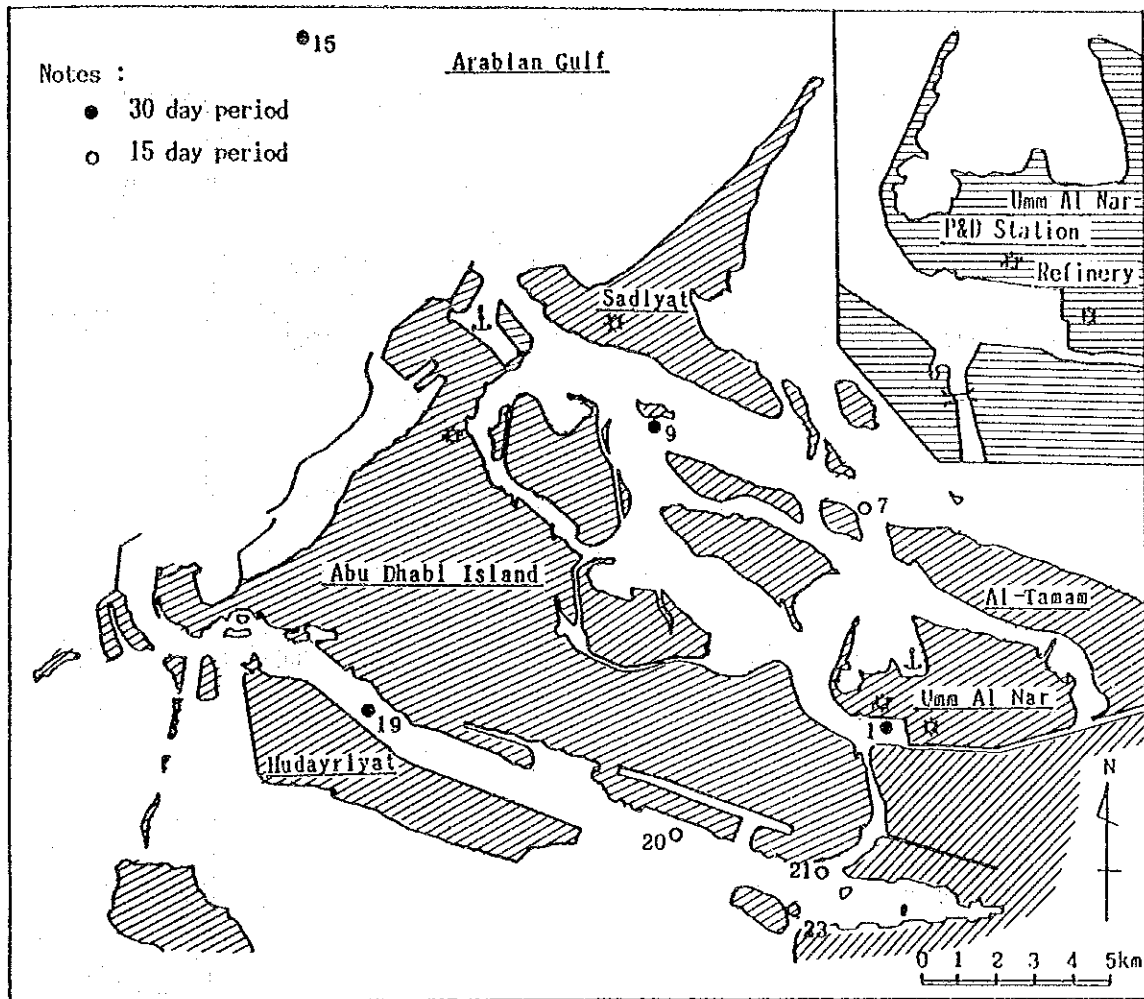
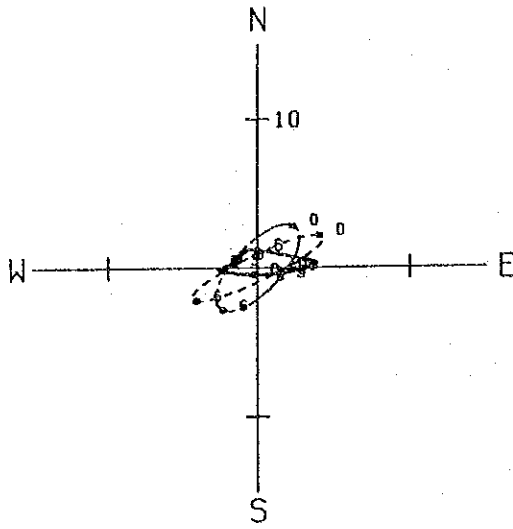
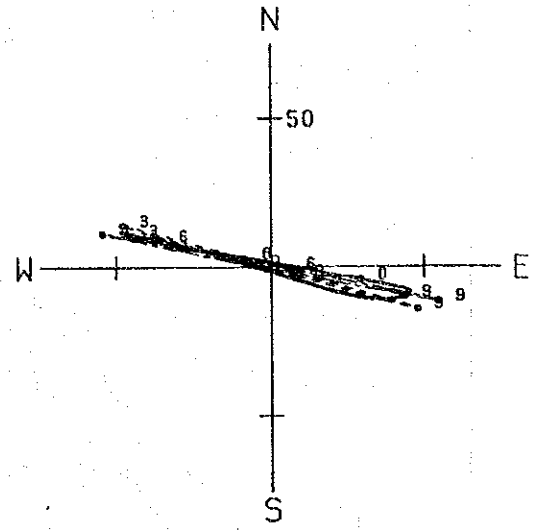


图 5.1.10 定点流況連続観測測点位置

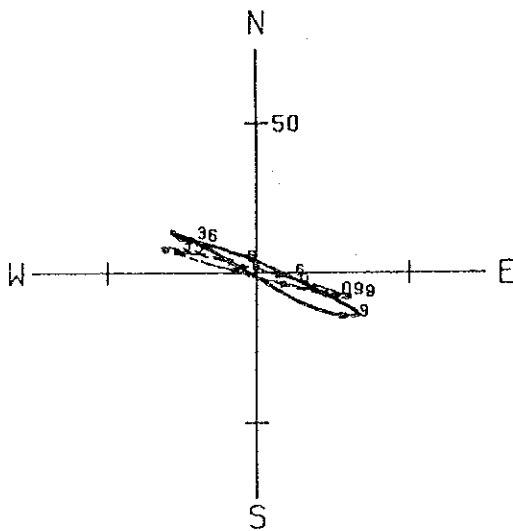
測点 1



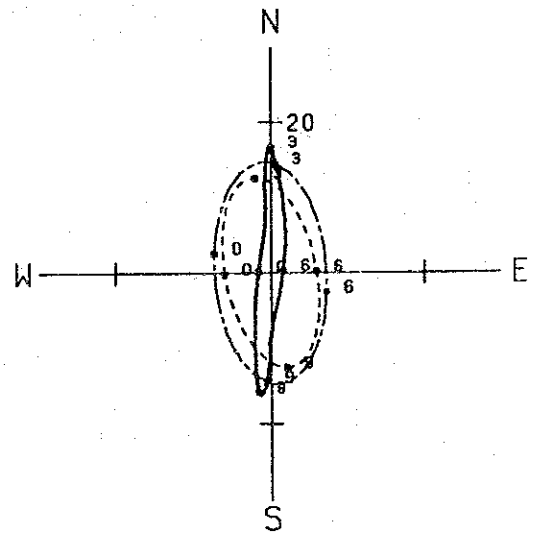
測点 9



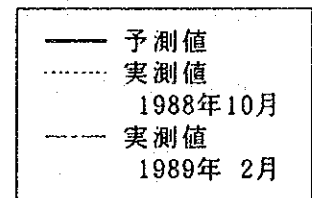
測点 7



測点 15



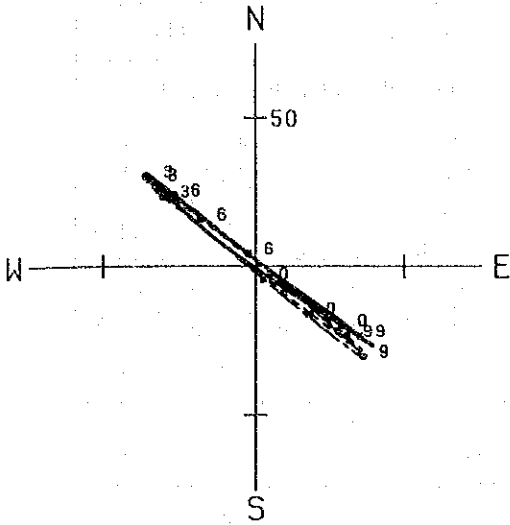
凡例



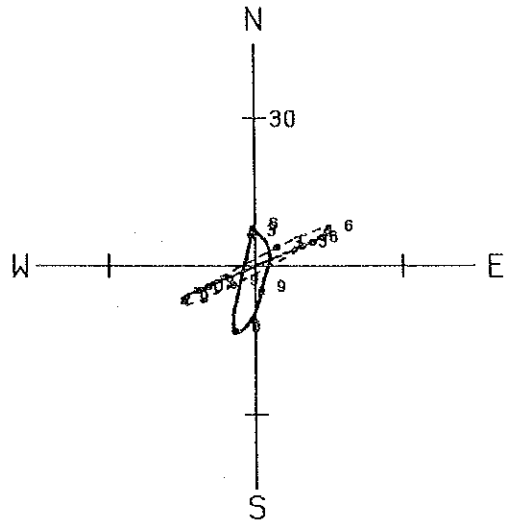
図中の数字：Mina Zayedの高潮時を0時とした時の潮時

図 5. 1. 11 実測値（潮流楕円）と予測値（潮流ホドグラフ）の比較
<平均大潮期>

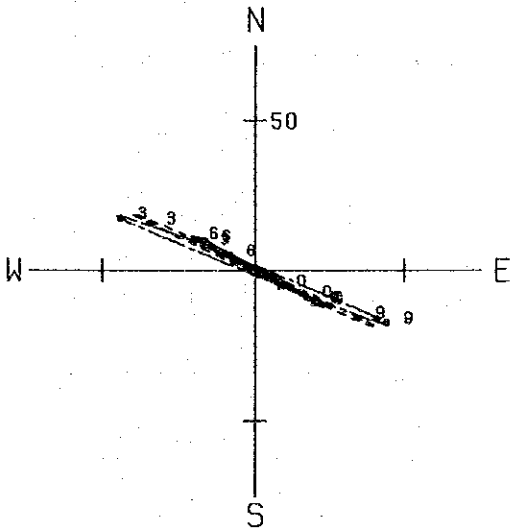
測点 19



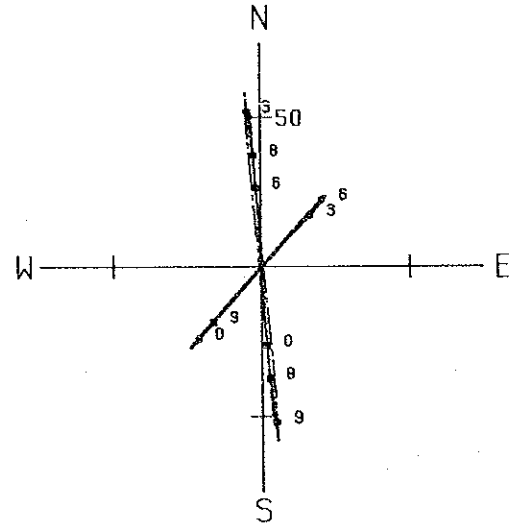
測点 21



測点 20



測点 23



凡例

—	予測値
.....	実測値 1988年10月
---	実測値 1989年2月

図中の数字 : Mina Zayedの高潮時を0時とした時の潮時

図 5.1.12 実測値 (潮流楕円) と予測値 (潮流ホドグラフ) の比較
<平均大潮期>

表 5.1.4 予測値と実測値の比較

		最大大潮期		平均大潮期		中潮期		小潮期	
		主 軸	流 速	主 軸	流 速	主 軸	流 速	主 軸	流 速
1	実測	72 70	6 7	65 54	5 5	60 44	3 3	60 44	1 1
	予測	85	4	85	4	85	3	83	2
7	実測	284 285	58 44	285 284	33 28	286 286	23 20	286 286	12 12
	予測	288	60	293	37	293	28	296	15
9	実測	288 284	89 802	287 284	51 54	287 282	35 35	287 282	18 14
	予測	288	89	284	50	284	39	283	21
15	実測	10 11	29 30	349 347	13 14	346 357	9 9	346 357	5 3
	予測	0	30	359	17	2	12	2	5
19	実測	308 310	86 72	308 311	46 46	308 311	32 31	308 311	18 15
	予測	312	88	304	48	310	39	310	23
20	実測	299 297	58 58	295 296	45 39	296 292	30 33	296 292	16 18
	予測	299	31	297	26	297	20	297	12
21	実測	62 67	28 24	62 67	17 16	63 67	12 11	63 67	6 6
	予測	36	34	16	14	15	11	10	6
23	実測	358 358	99 95	356 357	53 62	357 355	38 38	357 355	22 18
	予測	43	52	41	36	42	29	42	17

(注) ・実測値の上段は 1988 年10月観測値
下段は 1989 年 2月観測値

・単位： 主軸 : 度
流速 : cm/s

5.1.1 アブダビ島周辺の流況

(1) 計算結果

アブダビ島周辺域の流れ結果を以下の図に示す。

表 5.1.5 予測結果の図番一覧

予測項目		図番
潮 流	最大大潮期	図 5.1.14 , 5.1.15
	平均大潮期	図 5.1.16 , 5.1.17
	中潮期	図 5.1.18 , 5.1.19
	小潮期	図 5.1.20 , 5.1.21
恒流(海流系)		図 5.1.22
吹 送 流	風向 N	図 5.1.23
	風向 NW	図 5.1.24
	風向 S	図 5.1.25

(2) 流況のまとめ

対象海域の流況を支配している「潮流成分」「恒流(海流系)成分」「吹送流」及び「取放水流」の各成分の予測を行った結果以下のようにまとめることができる。

1) 潮流成分

① 流速の大きさ

ラグーン入口部の最大流速は、最大大潮期で1～1.5 m/s、平均大潮期には約1 m/sの高流速となる。これは、広大なるラグーン内への水塊の流出入口となっているためであると推察される。この流速値について概略値を算出してみることとする。

ある断面での海水の流出入量Qは、断面内の水容積変化 $S \times dh/dt$ に等しいことから次式で表わされる。

$$Q = S \times \frac{dh}{dt} = S \times \frac{\pi \zeta}{T} \cos \frac{2\pi}{T}$$

ここに、 ζ : 潮位差 T : 潮汐振幅 h : 水位
S : 断面内の水表面積

ここで、
 $\zeta = 1.1 \text{ m}$ (平均大潮期)
 $T = 12 \times 3,600 = 43,200 \text{ sec}$ (12 時間周期を対象)
 $\pi = 3.14$ (円周率)
 $S = 60 \sim 80 \times 10^6 \text{ m}^2$ (ラグーン入口内の水容積であるが、この入口部を通しての影響水域が不明確であるため、概略値である。)

したがって、最大流速時の流量は $Q = 4,800 \sim 6,400 \text{ m}^3 / \text{s}$ となる。
 また入口部の断面積は約 $5,500 \text{ m}^2$ であるから、最強時の概略流速は、
 $(4,800 \sim 6,400) / 5,500 = 0.87 \sim 1.16 \text{ m} / \text{s}$ となる。

このように、予測値と概略流速とは概ね合致しており、入口部の流速はそのラグーン内と外海との海水交換量に起因していると推察される。

② 海水の流出入状況

対象海域への海水の流出入口は、Mina Zayed と Khalidiya (Mina Zayed の南西約 12 km) の二つの開口部と考えられる。これから流入した海水の通り道やその遡上位置は、その時の潮期により左右されるが、概略図 5.1.13 のようになる。

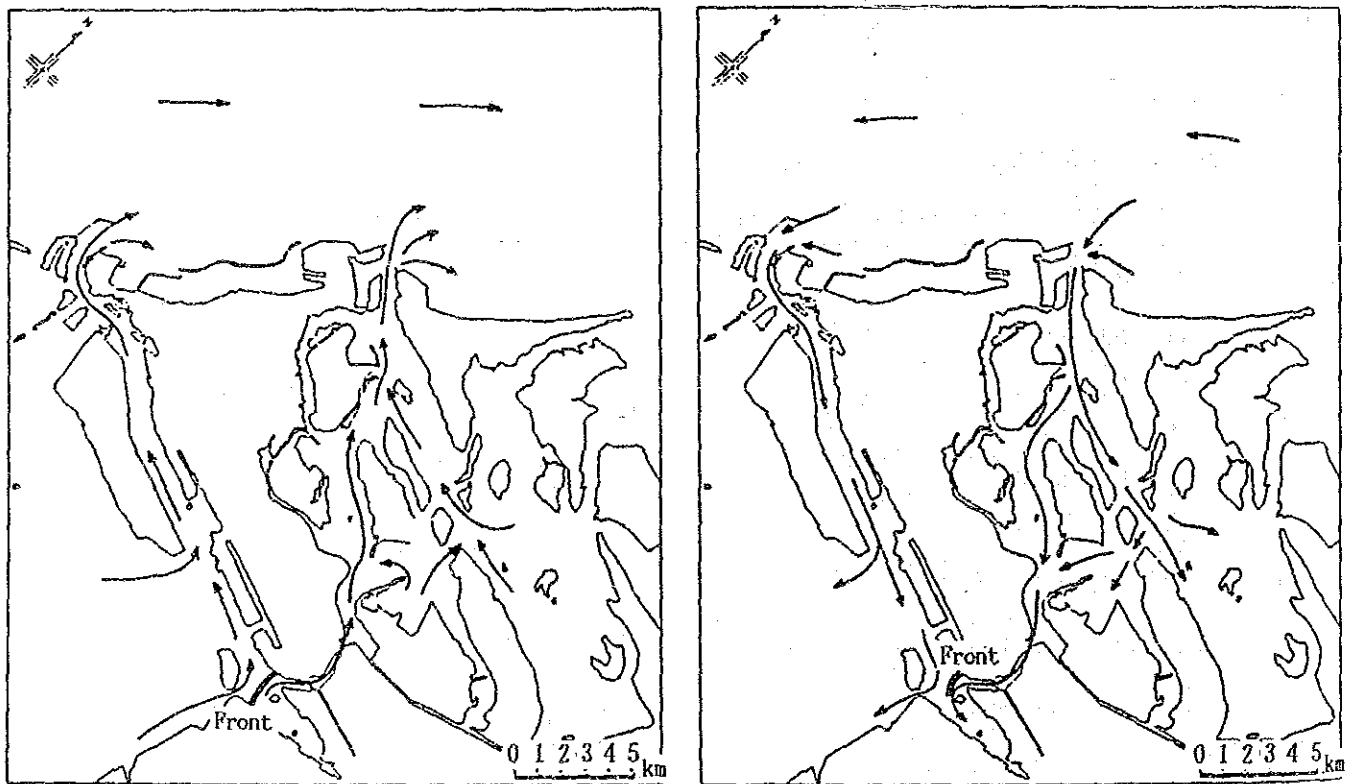


図 5.1.13 海水の流出入状況

アブダビ島周辺の流況予測結果をまとめると次のようになる。

- Khalidiya から流入した海水は、アブダビ島の最南端沖付近が最遡上位置と推察される。

● Mina Zayed から流入した海水は、Baghal 水路を南東方向に遡上するものと、Ashu-oom Assamaliyah～アブダビ島北側の水路を遡上するものに分かれる。

2) 恒流成分

アブダビ島沖合における海流系の恒流として、南西流を想定したが、この恒流成分がラグーン内の流況に及ぼす影響はほとんど認められない。

3) 吹送流成分

風の連吹による吹送流を3種類の風向(N, NW, S)について予測を行ったが、対象海域の地形の複雑さを反映して、流況も地形性渦流が非常に発達する結果となった。

また、風向きと流向の関係は、水深の深い所で風向に対して順風となりその反流が浅海域で生ずるという一般的な様相を示している。なお、予測が単層モデルであったため水平循環流が強調されている。

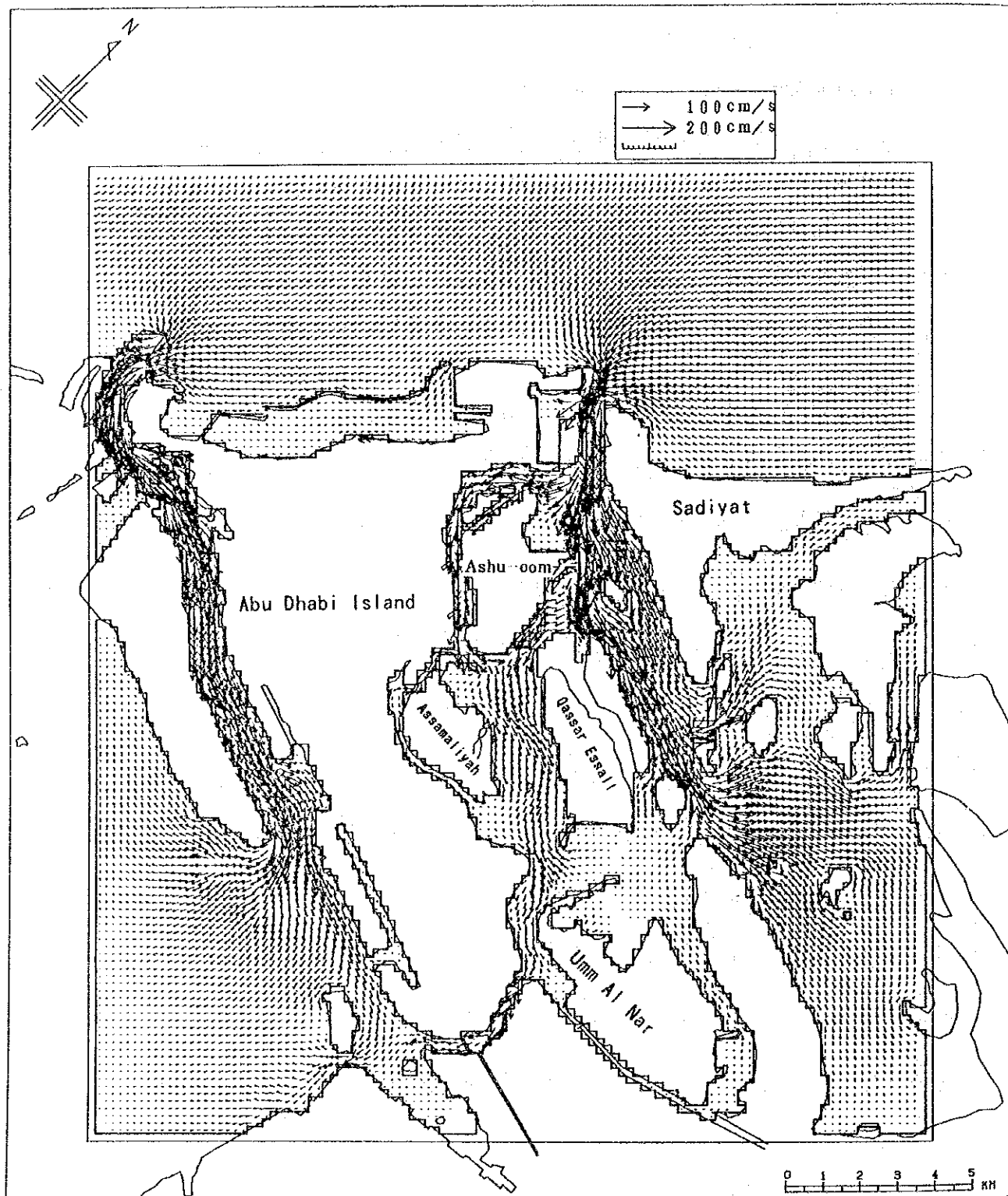


図 5.1.14 最大大潮期流速ベクトル (上げ潮最強時)

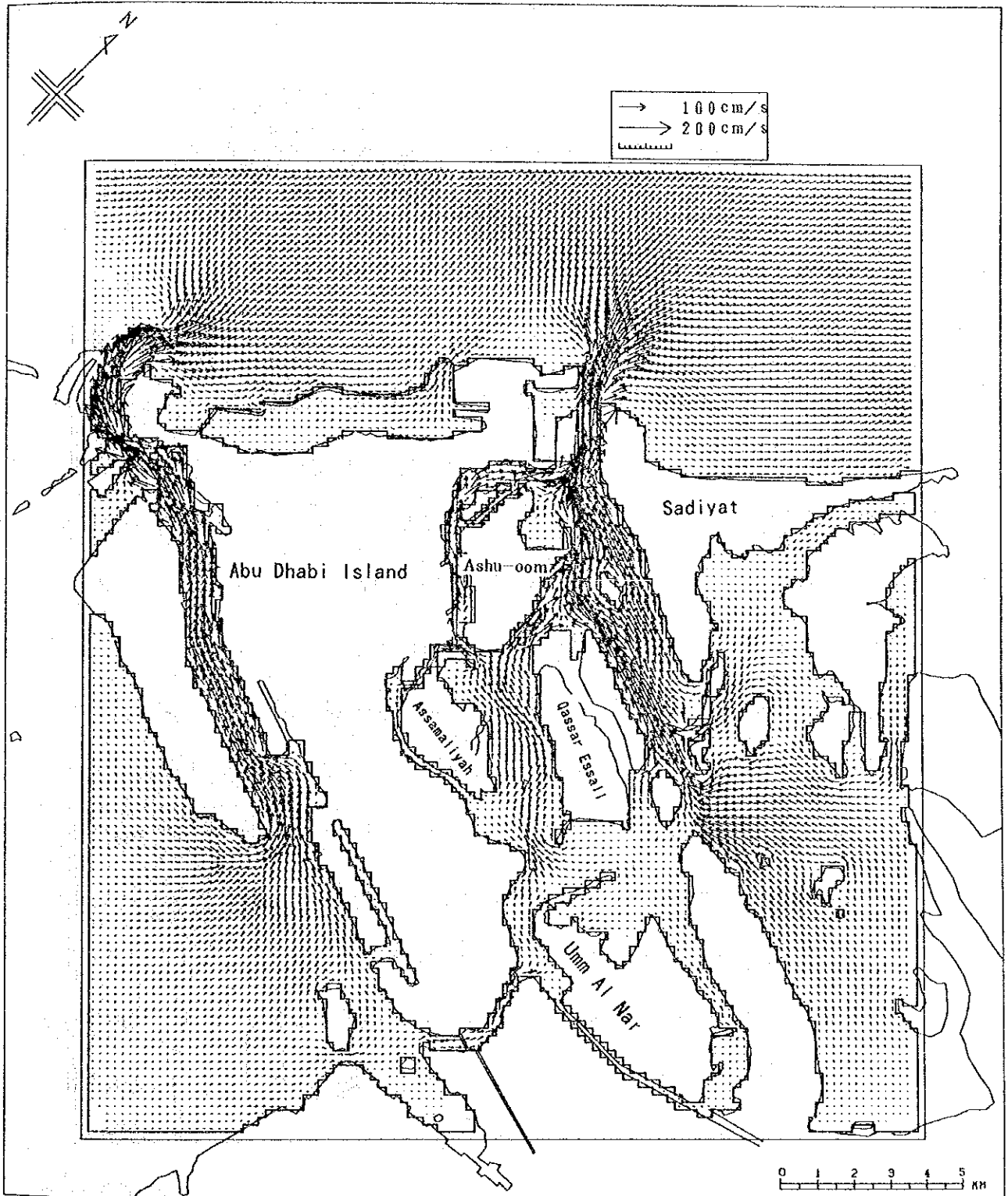


図 5.1.15 最大大潮期流速ベクトル（下げ潮最強時）

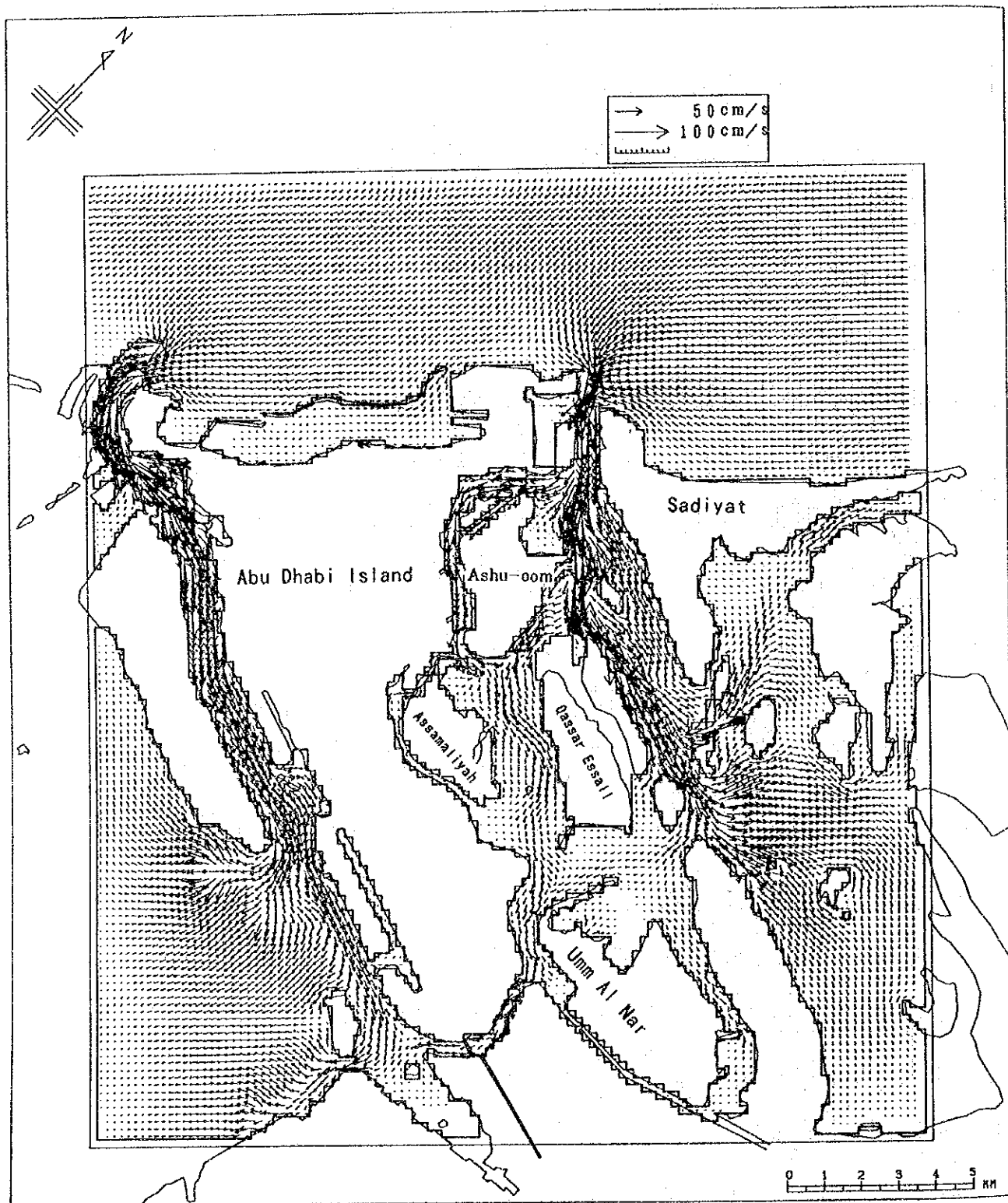


図 5. 1. 16 平均大潮期流速ベクトル（上げ潮最強時）

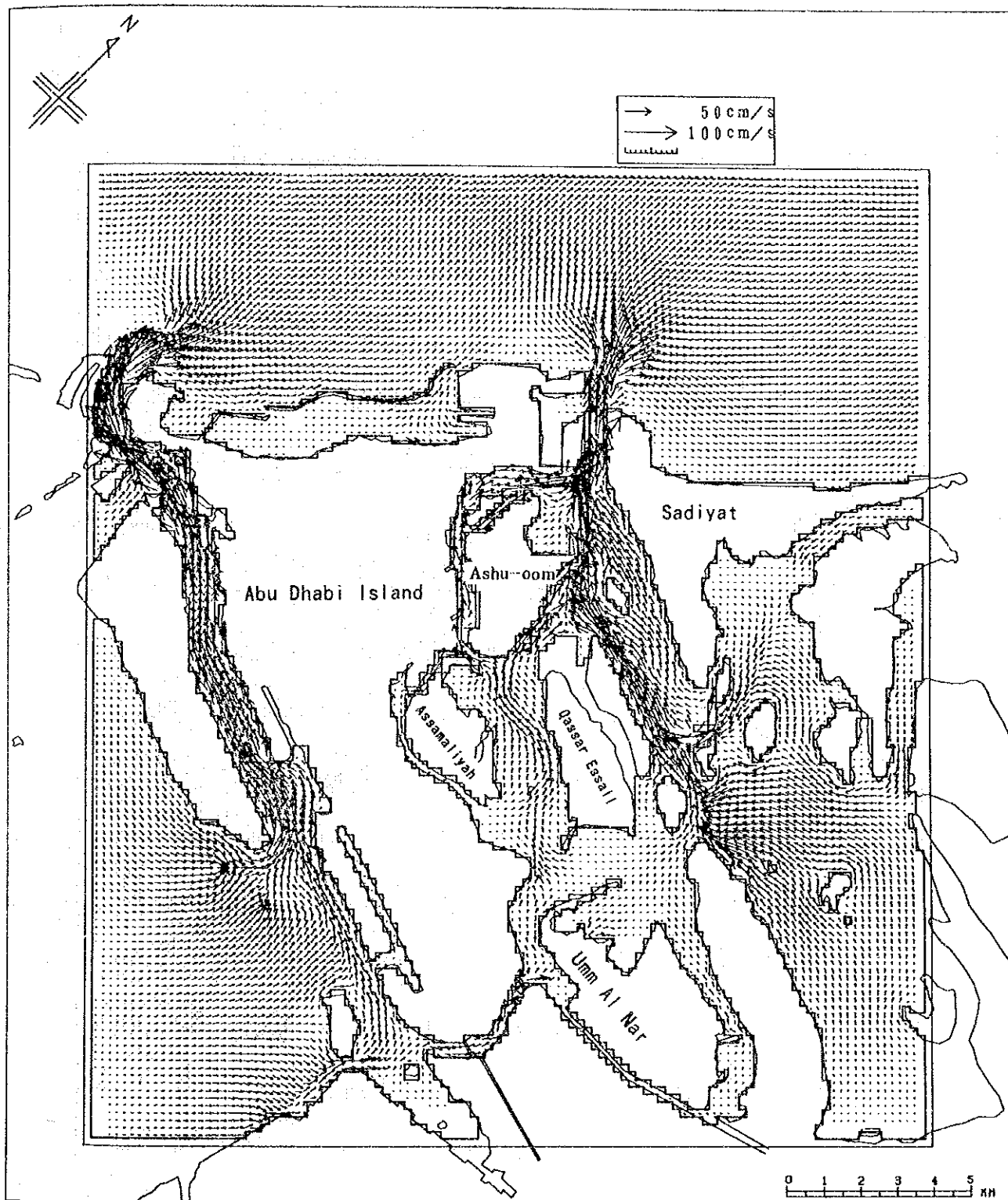


図 5. 1. 17 平均大潮期流速ベクトル (下げ潮最強時)

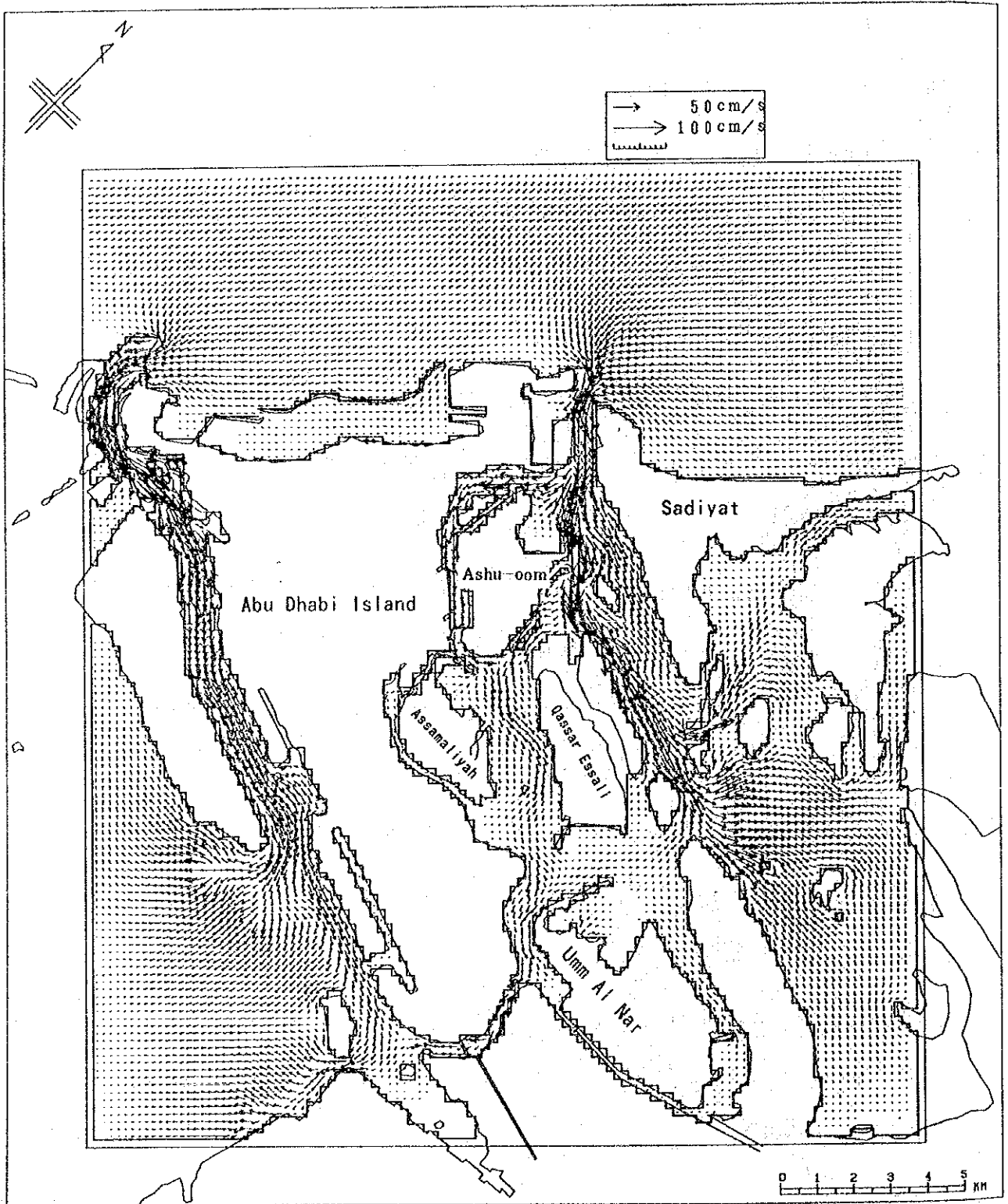


図 5.1.18 中潮期流速ベクトル (上げ潮最強時)

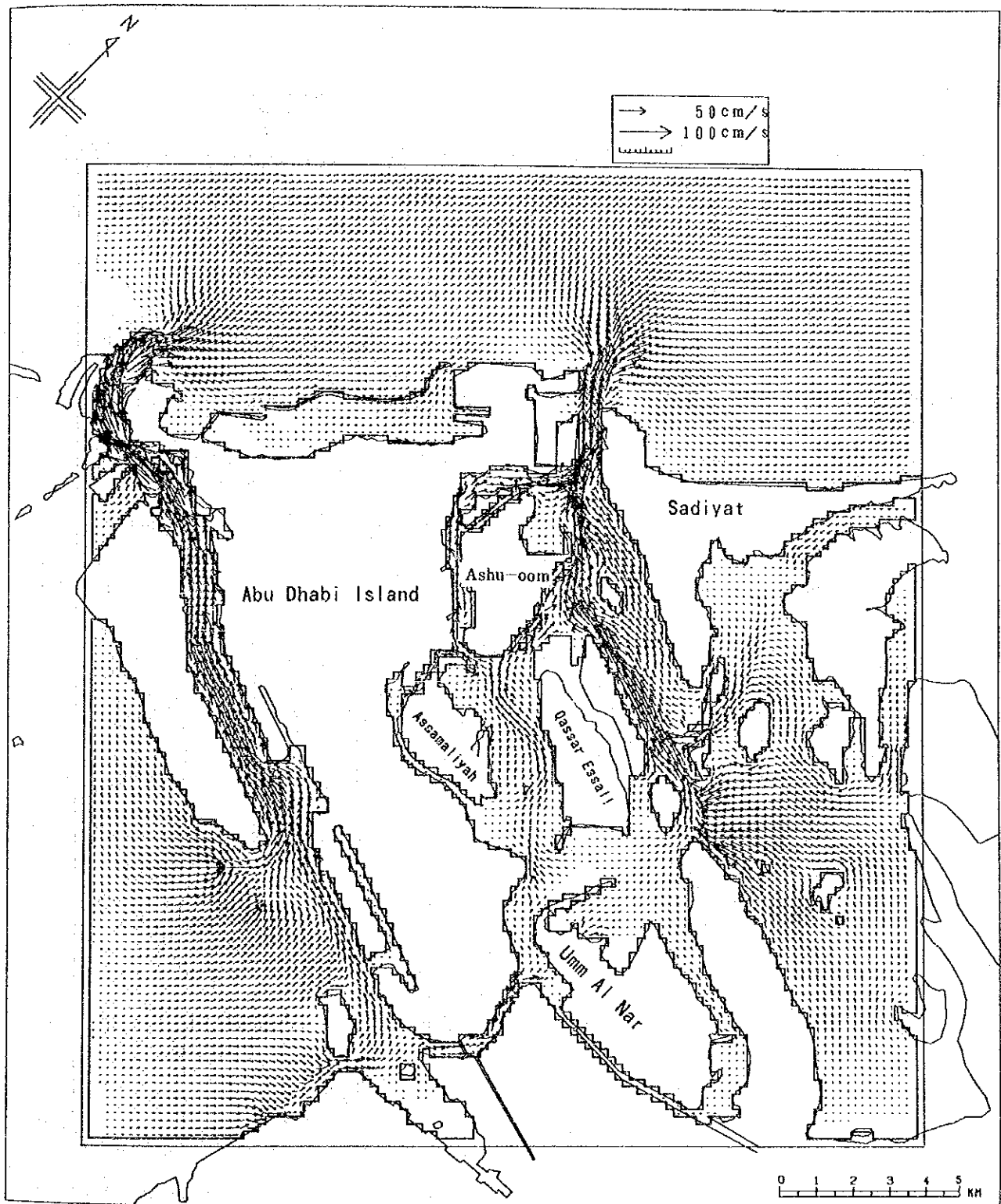


図 5.1.19 中潮期流速ベクトル (下げ潮最強時)

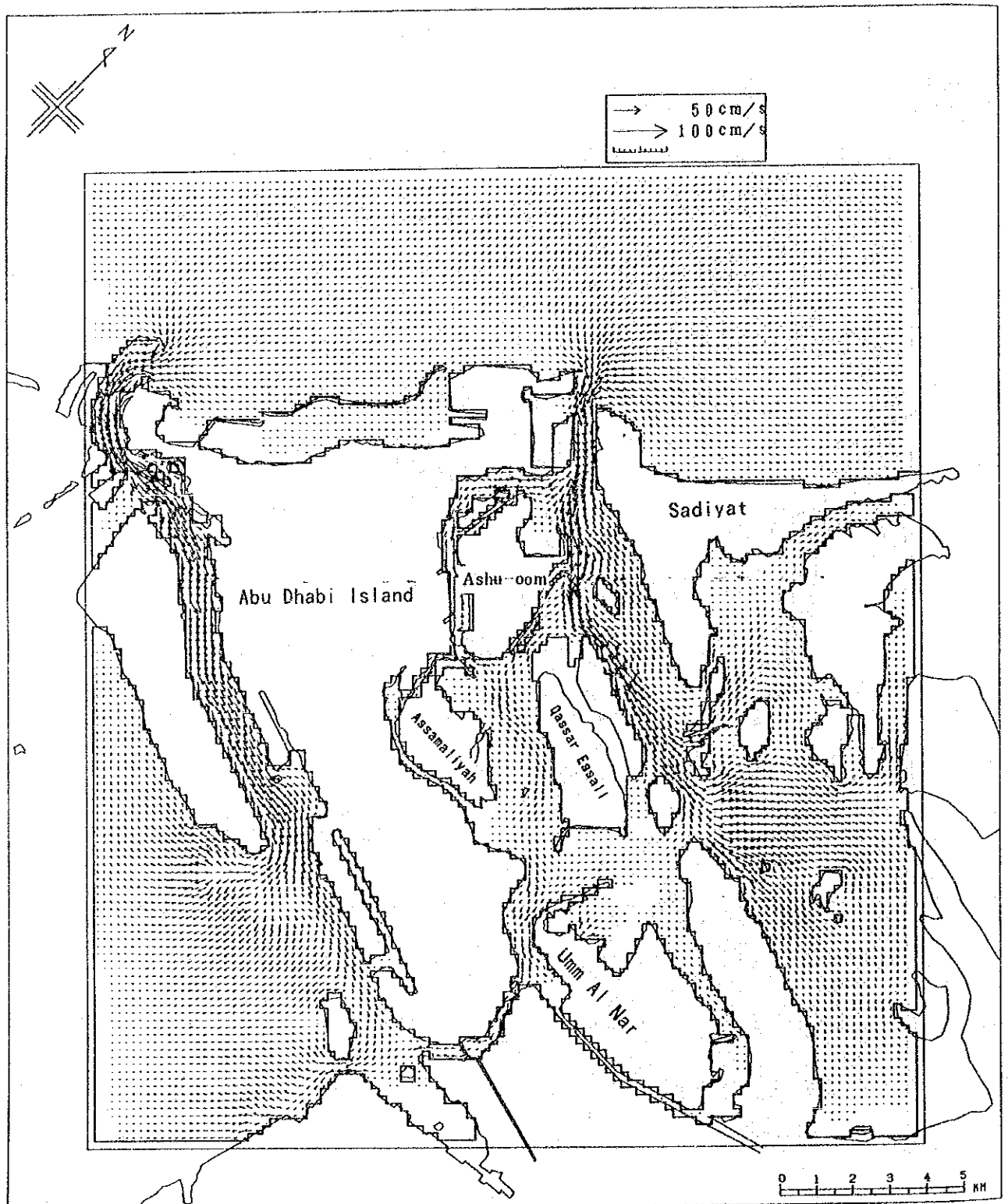


図 5. 1. 20 小潮期流速ベクトル（上げ潮最強時）

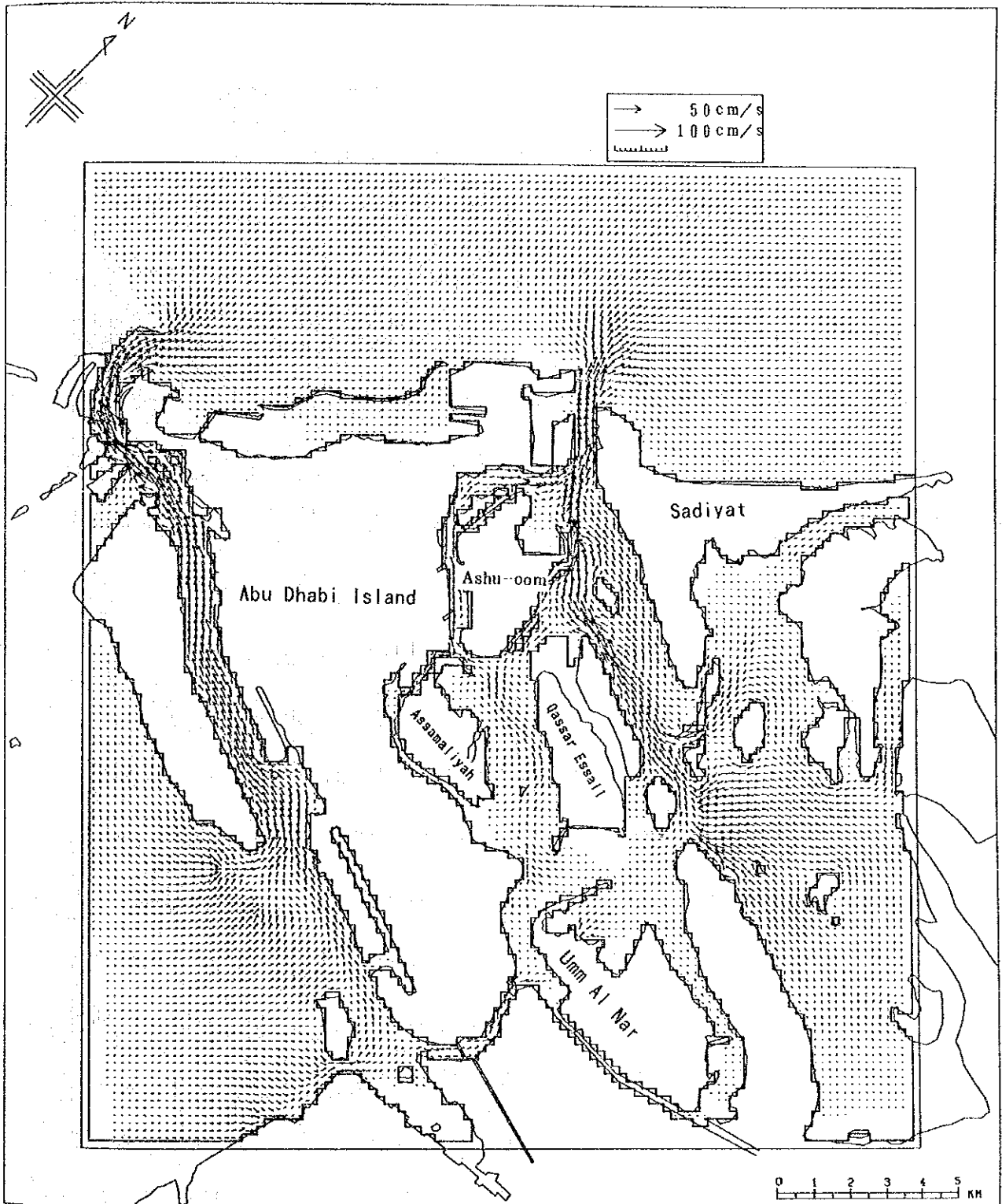


図 5. 1. 21 小潮期流速ベクトル（下げ潮最強時）

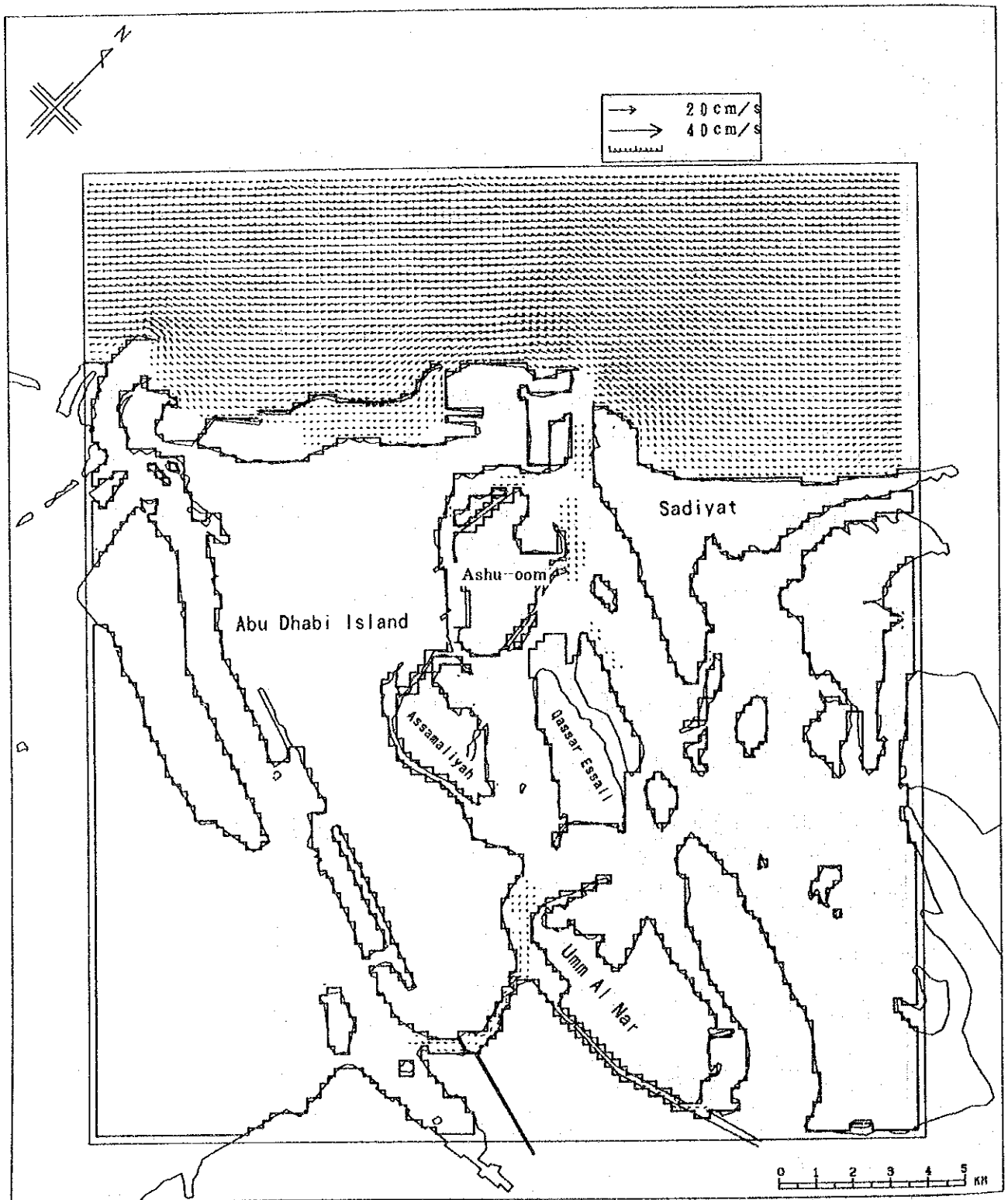


図 5. 1. 22 恒流（海流系）ベクトル

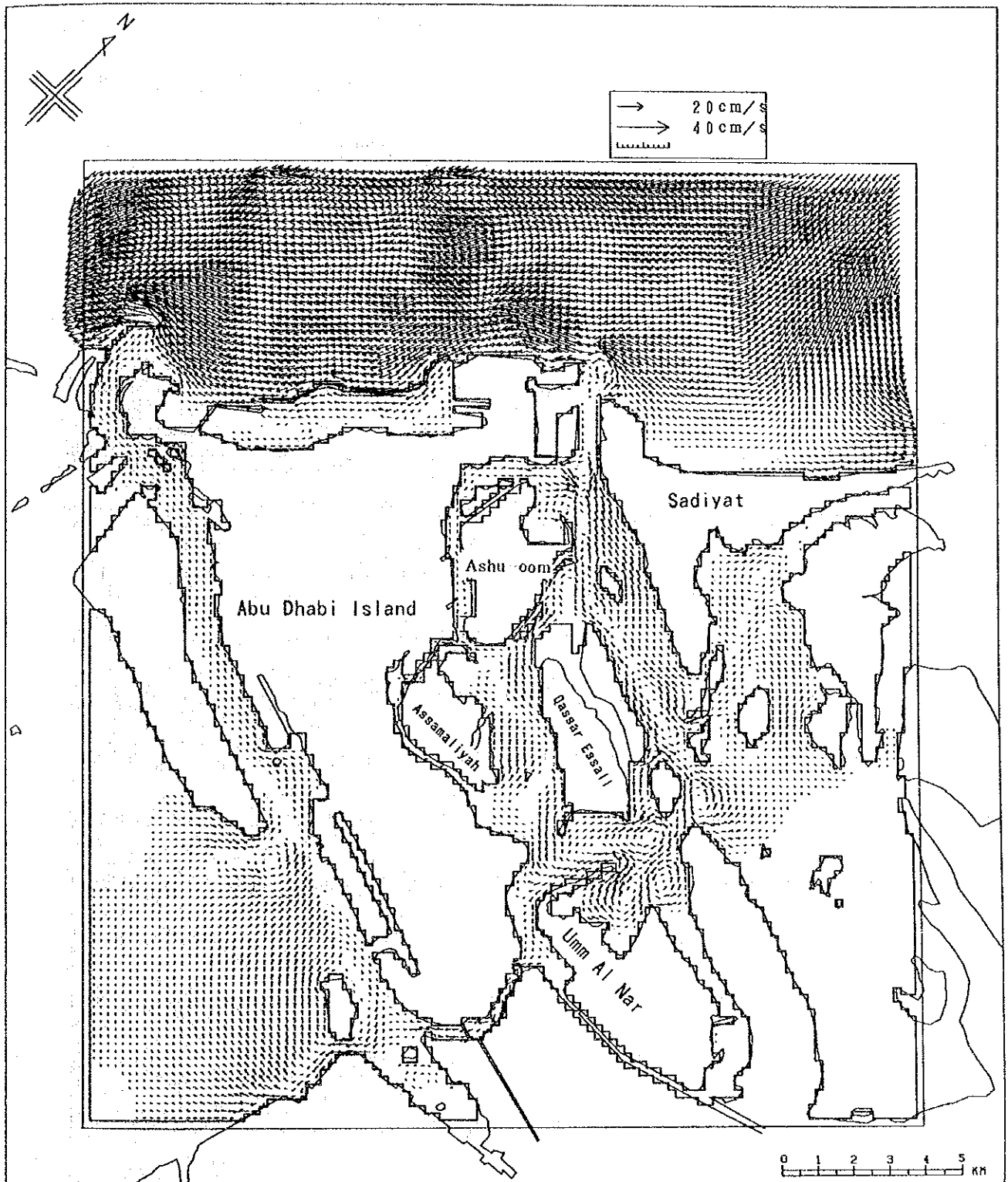


図 5. 1. 23 吹送流ベクトル (風向: N)

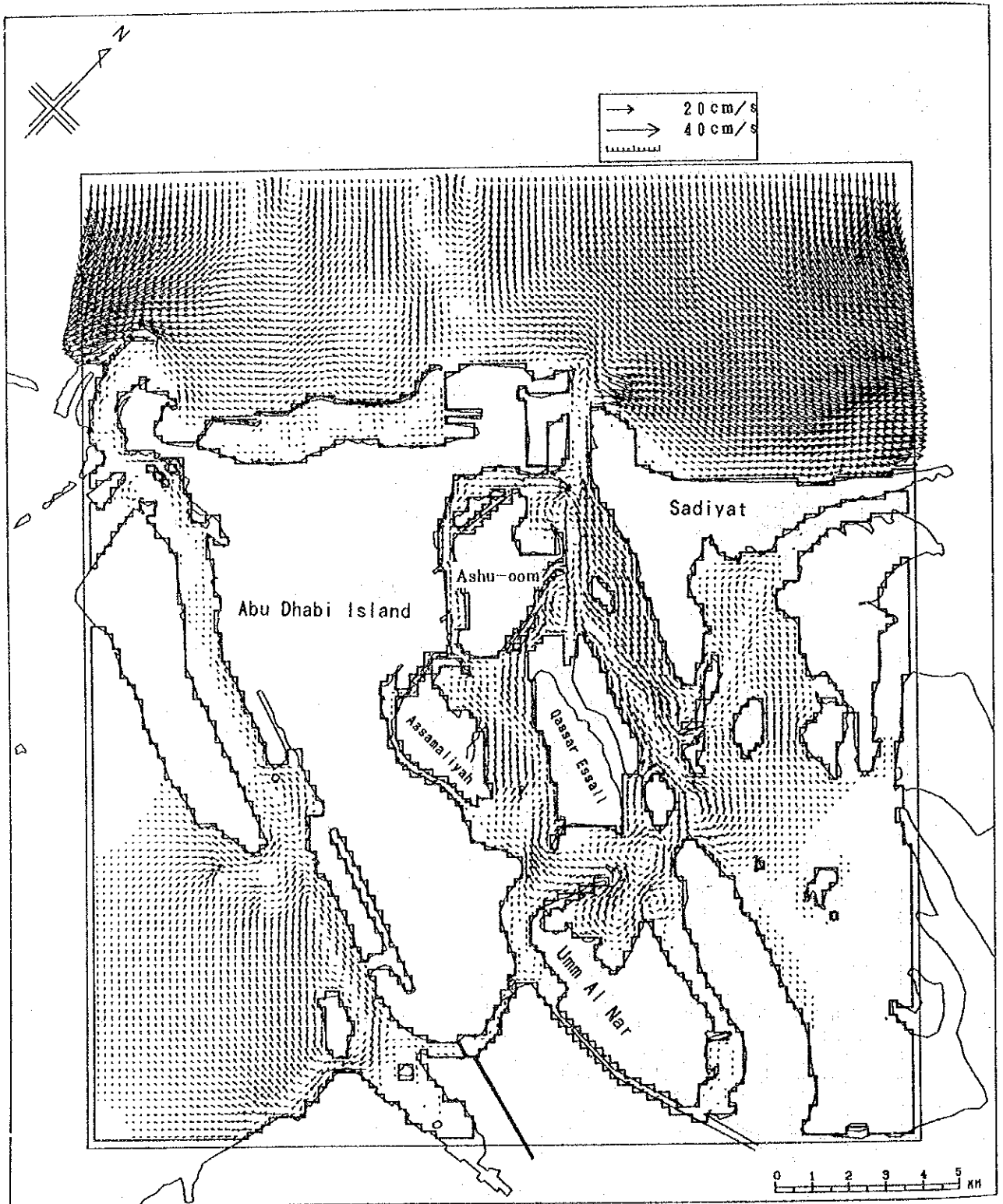


図 5. 1. 24 吹送流ベクトル (風向: NW)

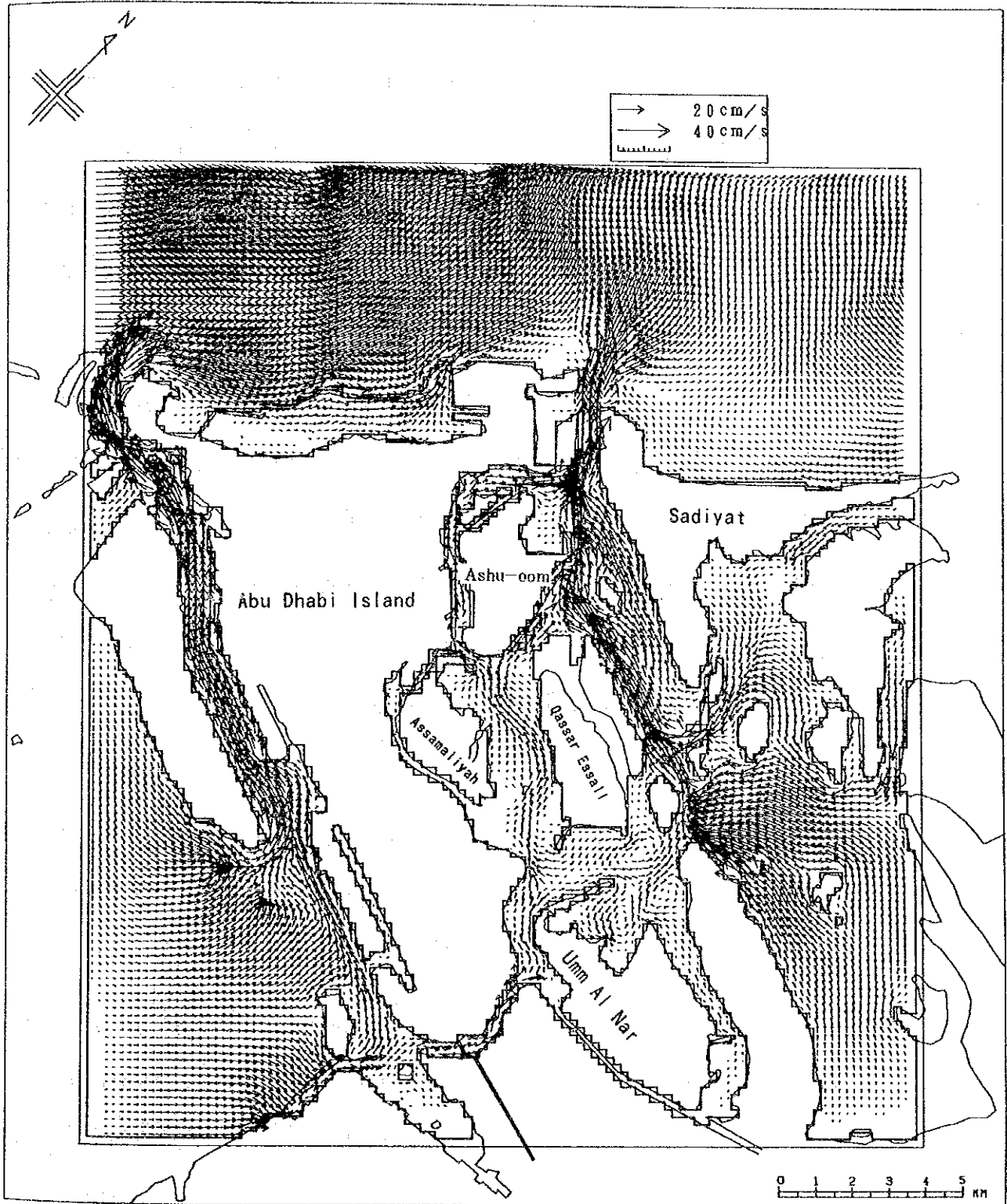


図 5. 1. 25 吹送流ベクトル (風向: S)

5.1.2 Umm Al Nar 取水口近傍域の流況

(1) 計算結果

取水口近傍の流況予測結果は表 5.1.6 に示す。

表 5.1.6 予測結果の図番一覧

予測項目		図番
潮 流	最大大潮期	図 5.1.26, 5.1.27
	平均大潮期	図 5.1.28, 5.1.29
	中潮期	図 5.1.30, 5.1.31
	小潮期	図 5.1.32, 5.1.33
恒流 (海流系)		———
吹 送 流	風向 N	図 5.1.34
	風向 NW	図 5.1.35
	風向 S	図 5.1.36
取 放 水 流	取水流	図 5.1.37
	放水流	図 5.1.38
	取放水合成	図 5.1.39

(2) 流況のまとめ

流れの各成分の予測を行った結果以下のようにまとめることができる。

1) 潮流成分

① 流速の大きさ

取水口近傍域は、Mina Zayedからの流出入水塊の影響を受けている海域である。その流速は、取水口極近傍域での流速は数 cm/s に低減するものの、外の水路と接している所では最大大潮期で 20～30 cm/s の流速を有している。

② 流水の流出入状況

Mina Zayedから流入した海水は、Baghal水路を南東方向に遡上するものと Ashu-oom～Assamaliyah～アブダビ島北側の水路を遡上するものに分かれる。

しかし、放水口近傍域に接近する水塊は後者の経路を通ったものと考えられる。

2) 恒流成分

アラビア湾における海流系の恒流成分のラグーンへの影響はほとんどない。

3) 吹送流成分

取水口近傍域には、北寄りの風の場合には北の方から海岸に沿って水塊が移動し、

南寄りの風の時はその反対の方から水塊移動となる。

したがって、上述したように潮流からみると Khalidiya から流入した海水については、そのほとんどが取水口近傍域には影響を与えなかったが、吹送流の働きにより南側からの海水の侵入も認められる場合もある。

4) 取放水成分

毎秒 120 m³にも及ぶ海水の取水と放水の流れを予測したが、その影響域は近傍域に限られているものの、取放水設備がラグーン奥部に比較的近く位置するため、放出された海水が再循環していることが推察される。

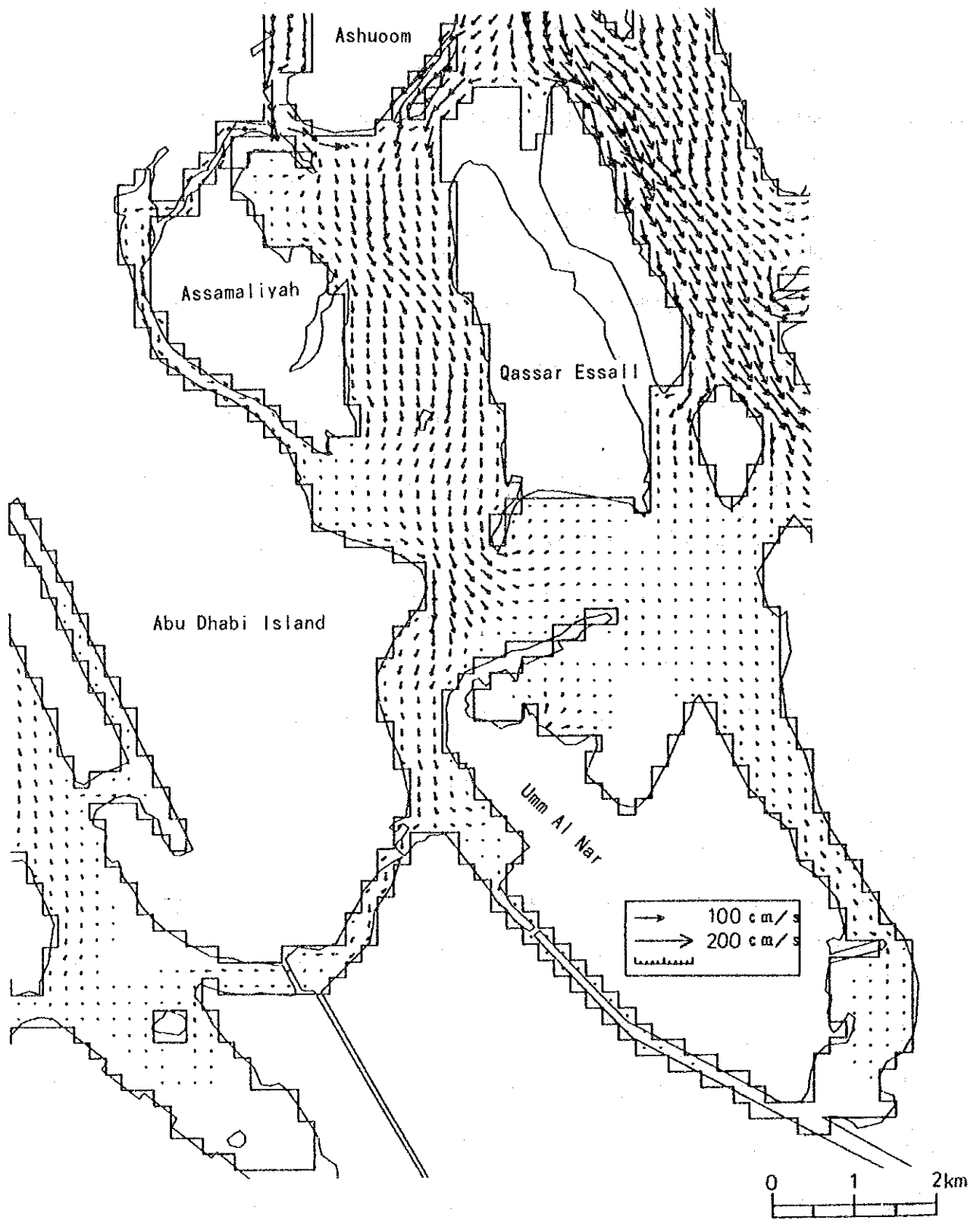


图 5. 1. 26 取水口近傍域流況（最大大潮期、上げ潮最強時）

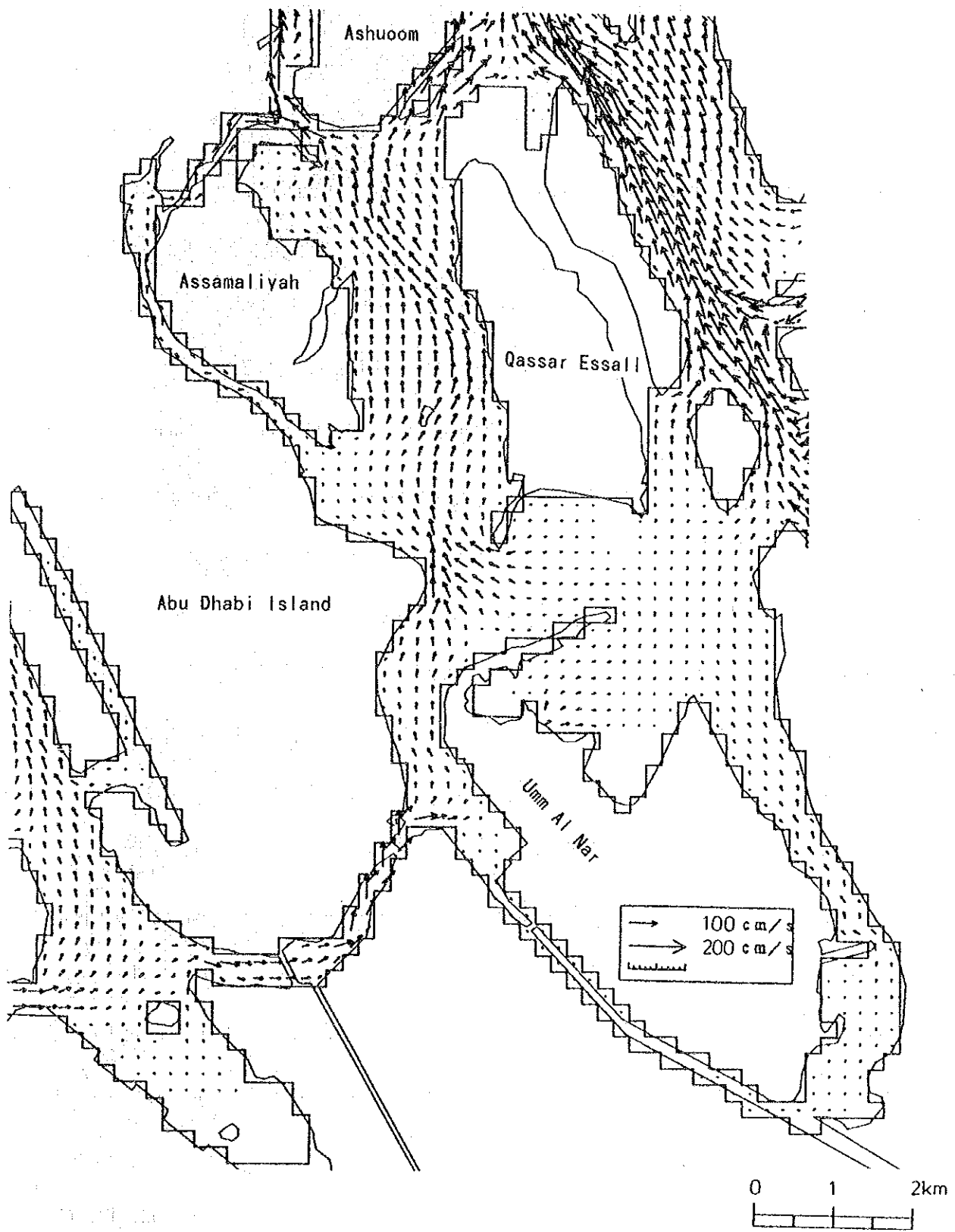


图 5. 1. 27 取水口近傍域流況 (最大大潮期、下げ潮最強時)

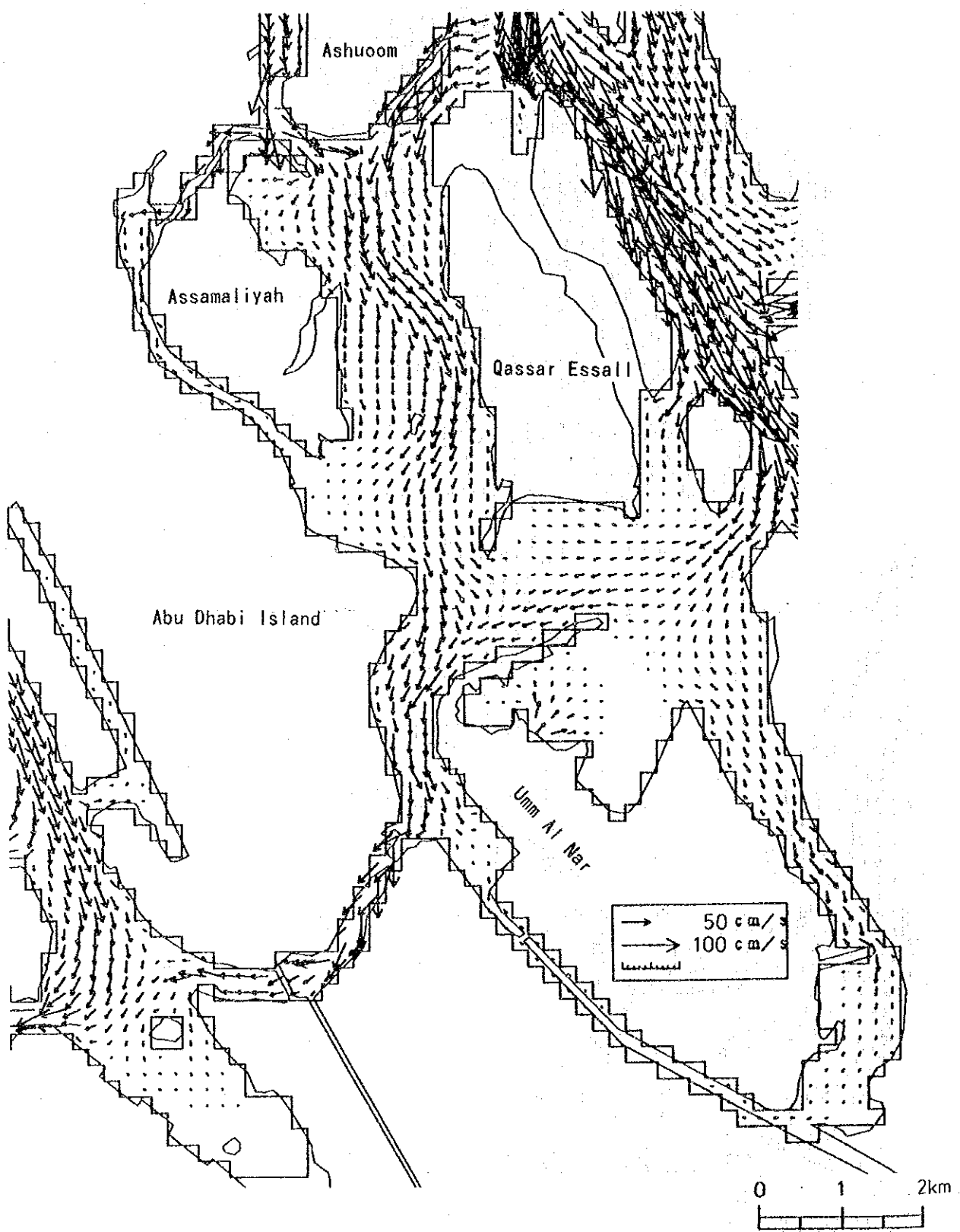


图 5.1.28 取水口近傍域流況（平均大潮期、上げ潮最強時）

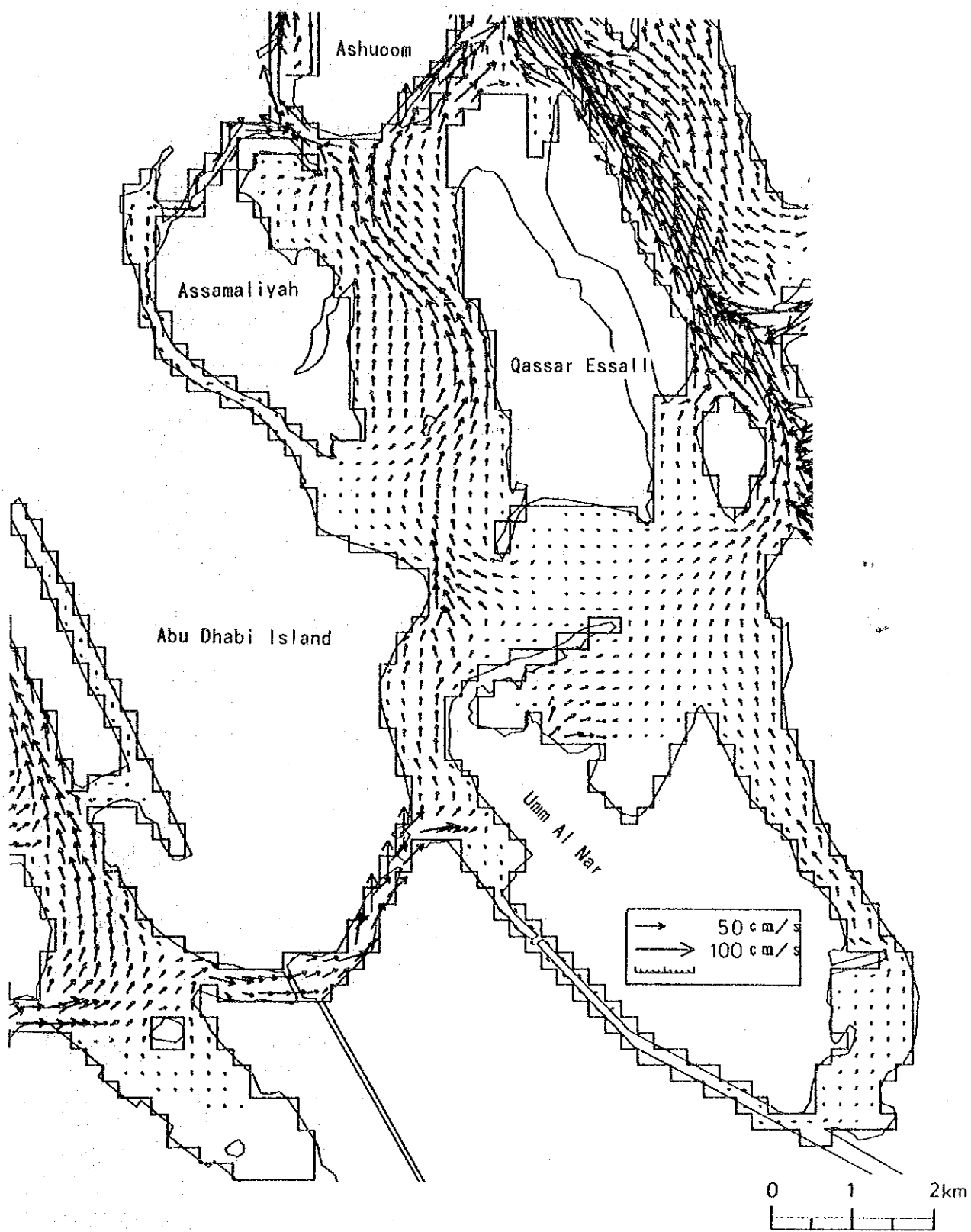


图 5. 1. 29 取水口近傍域流況 (平均大潮期、下げ潮最強時)

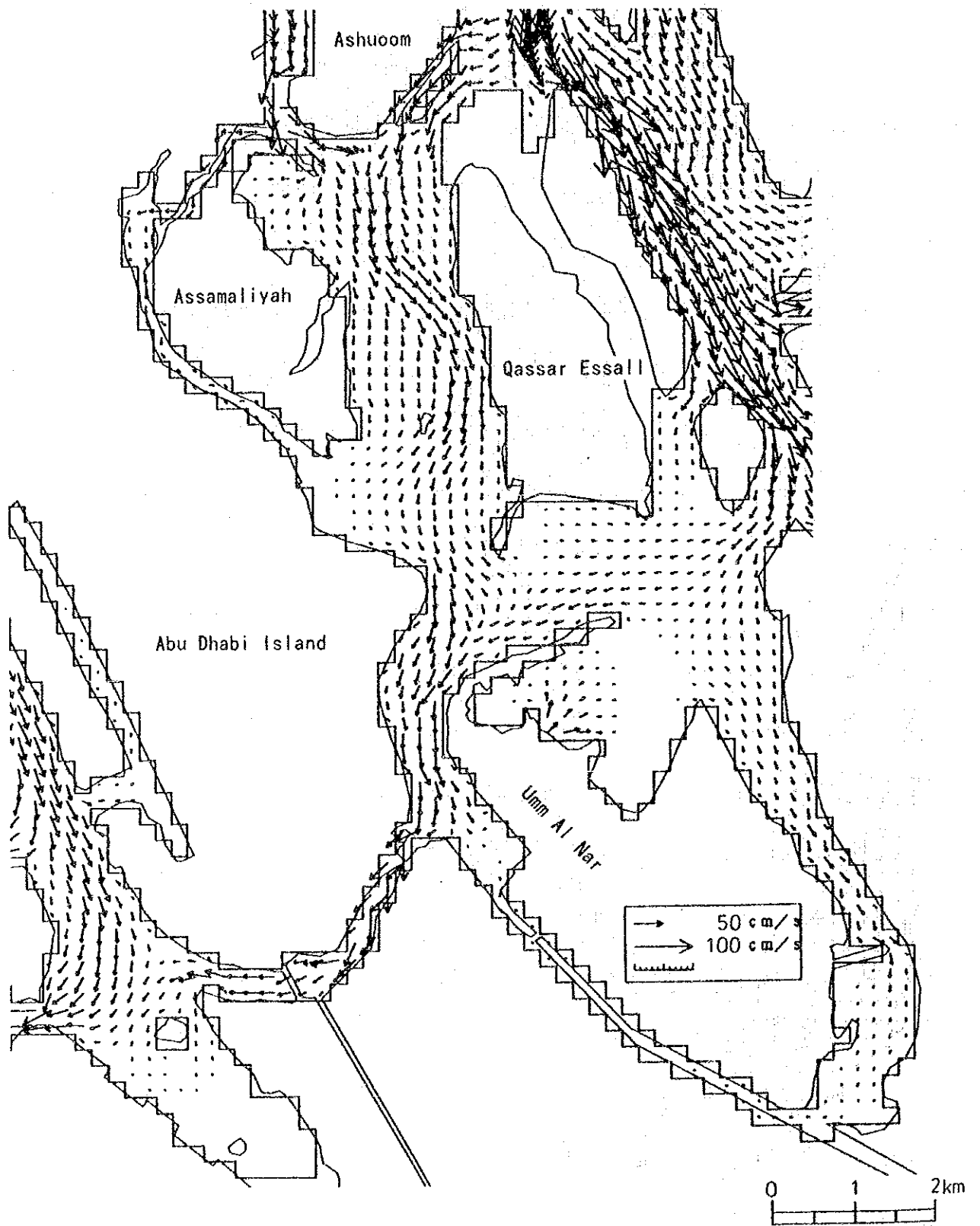


图 5.1.30 取水口近傍域流況（中潮期、上げ潮最強時）

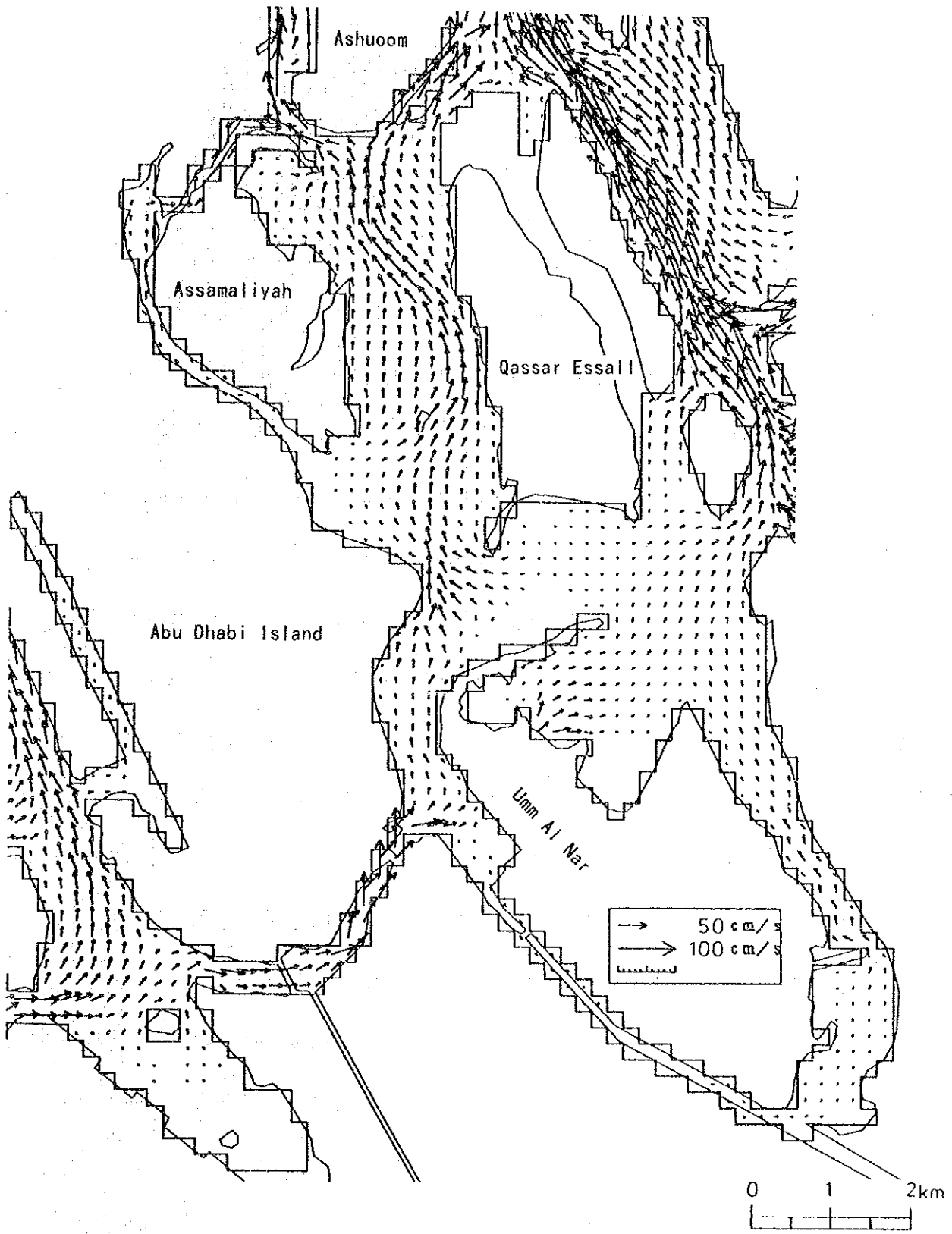


图 5.1.31 取水口近傍域流況（中潮期、下げ潮最強時）

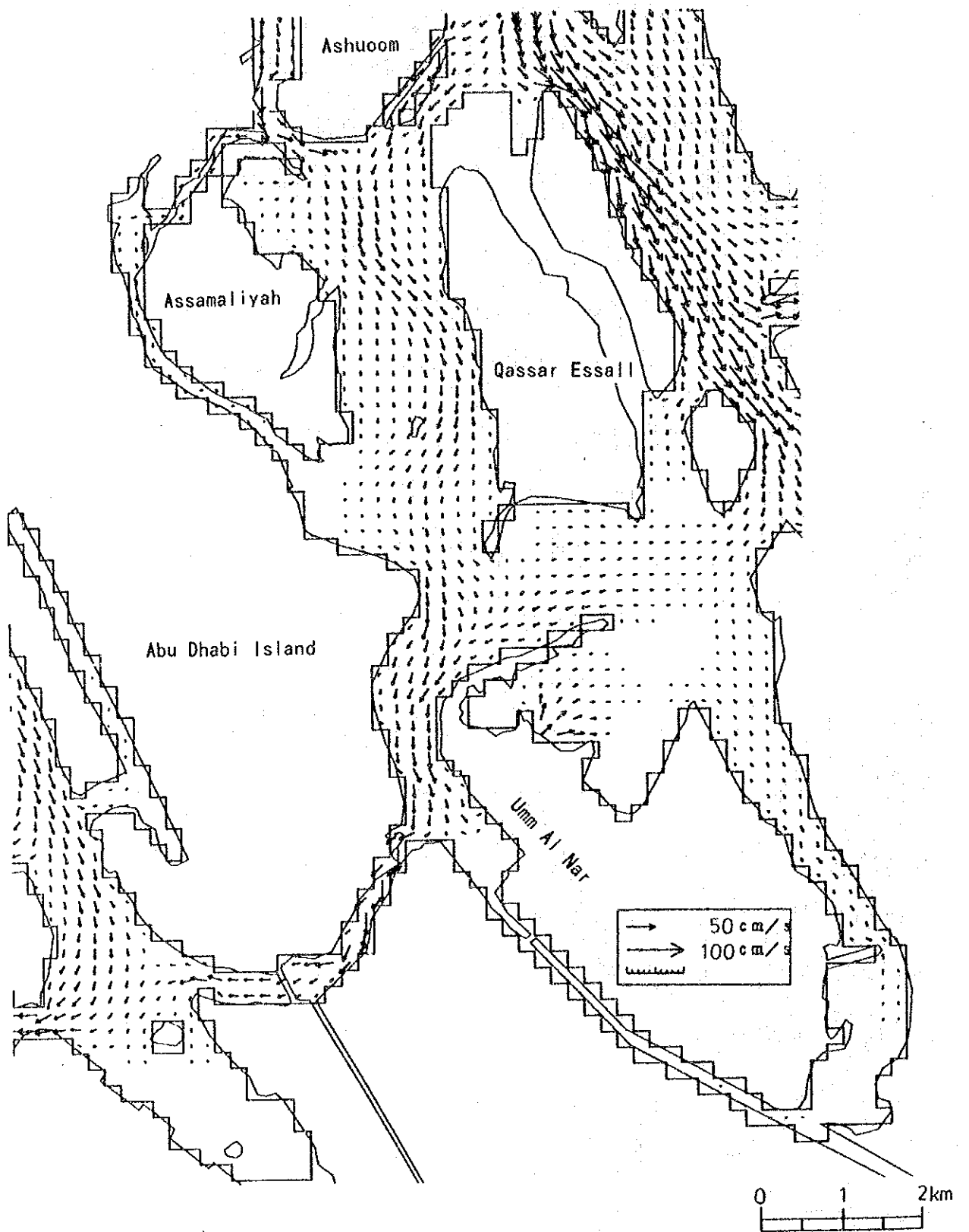


図 5. 1. 32 取水口近傍域流況（小潮期、上げ潮最強時）

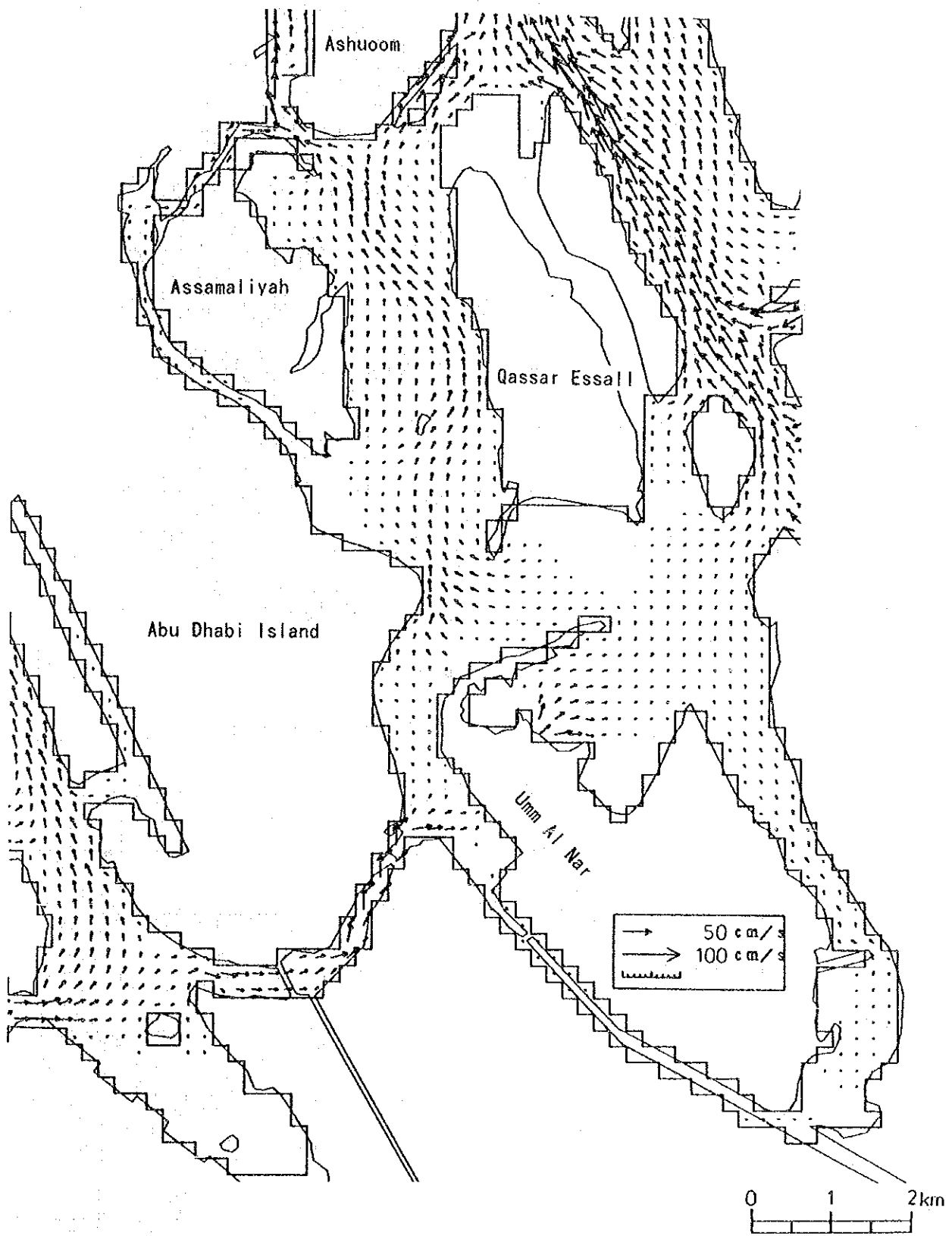


图 5.1.33 取水口近傍域流況（小潮期、下げ潮最強時）

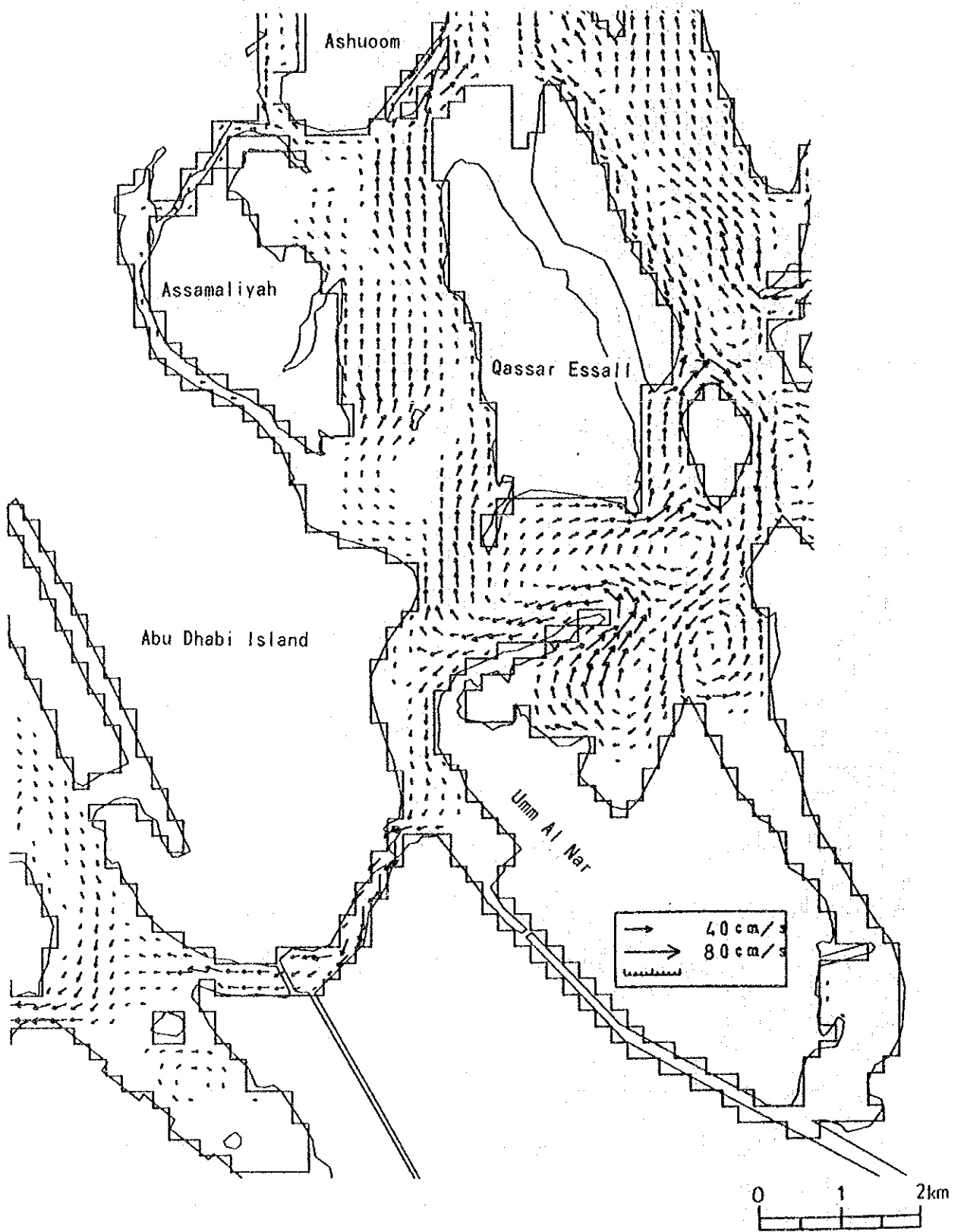


图 5.1.34 取水口近傍域流況（吹送流、風向：N）

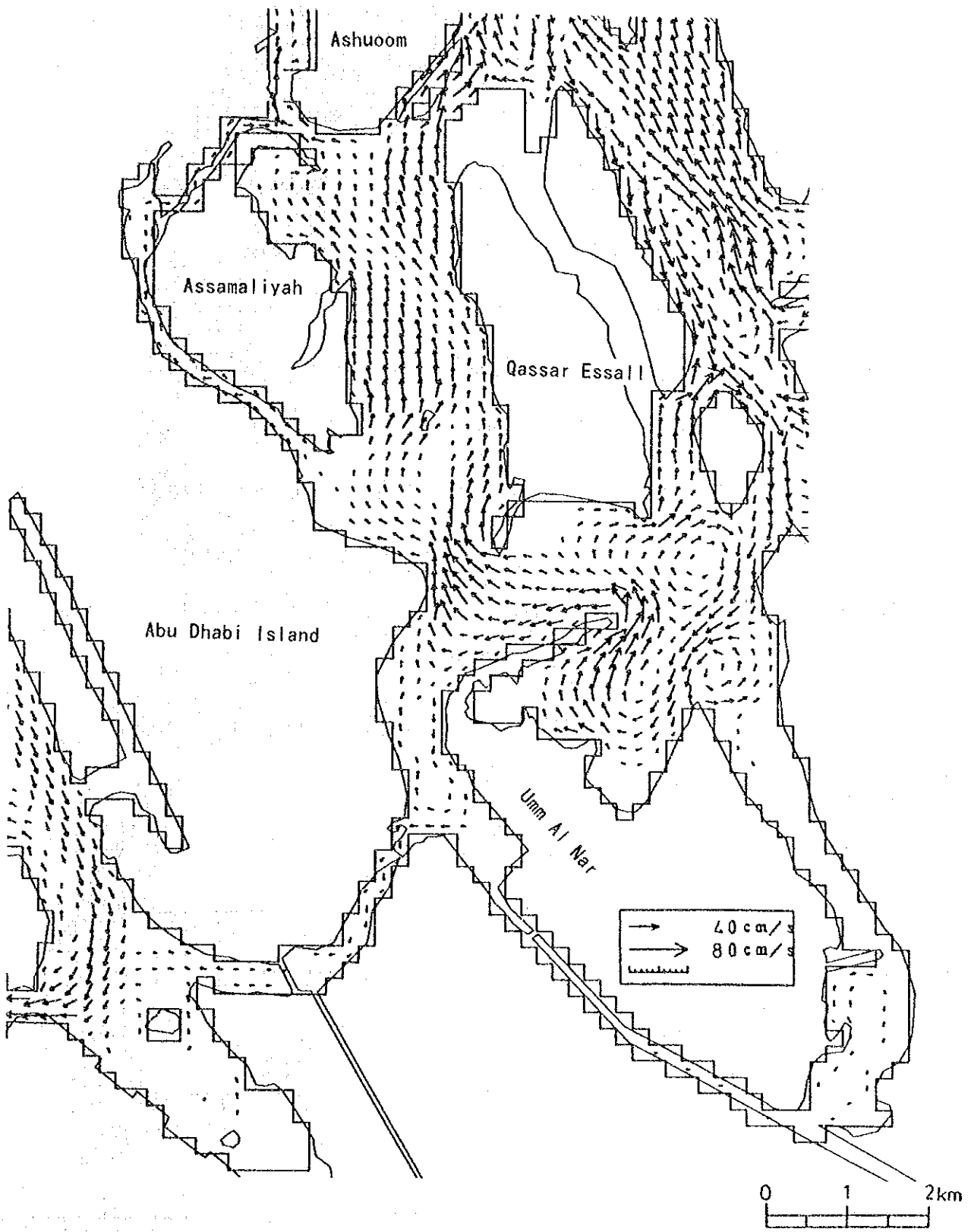


图 5.1.35 取水口近傍域流況 (吹送流、風向: NW)

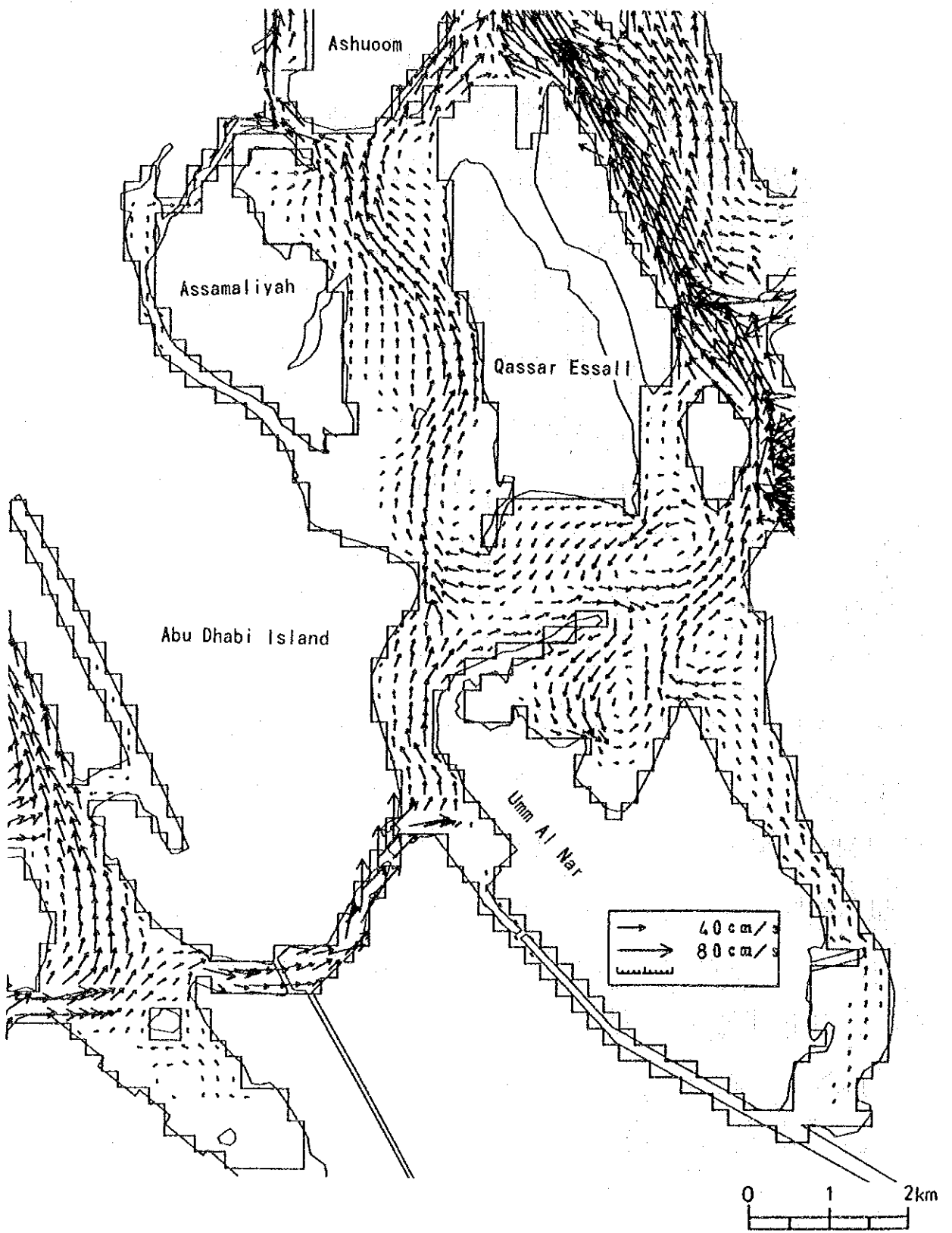


图 5.1.36 取水口近傍域流況 (吹送流、風向: S)

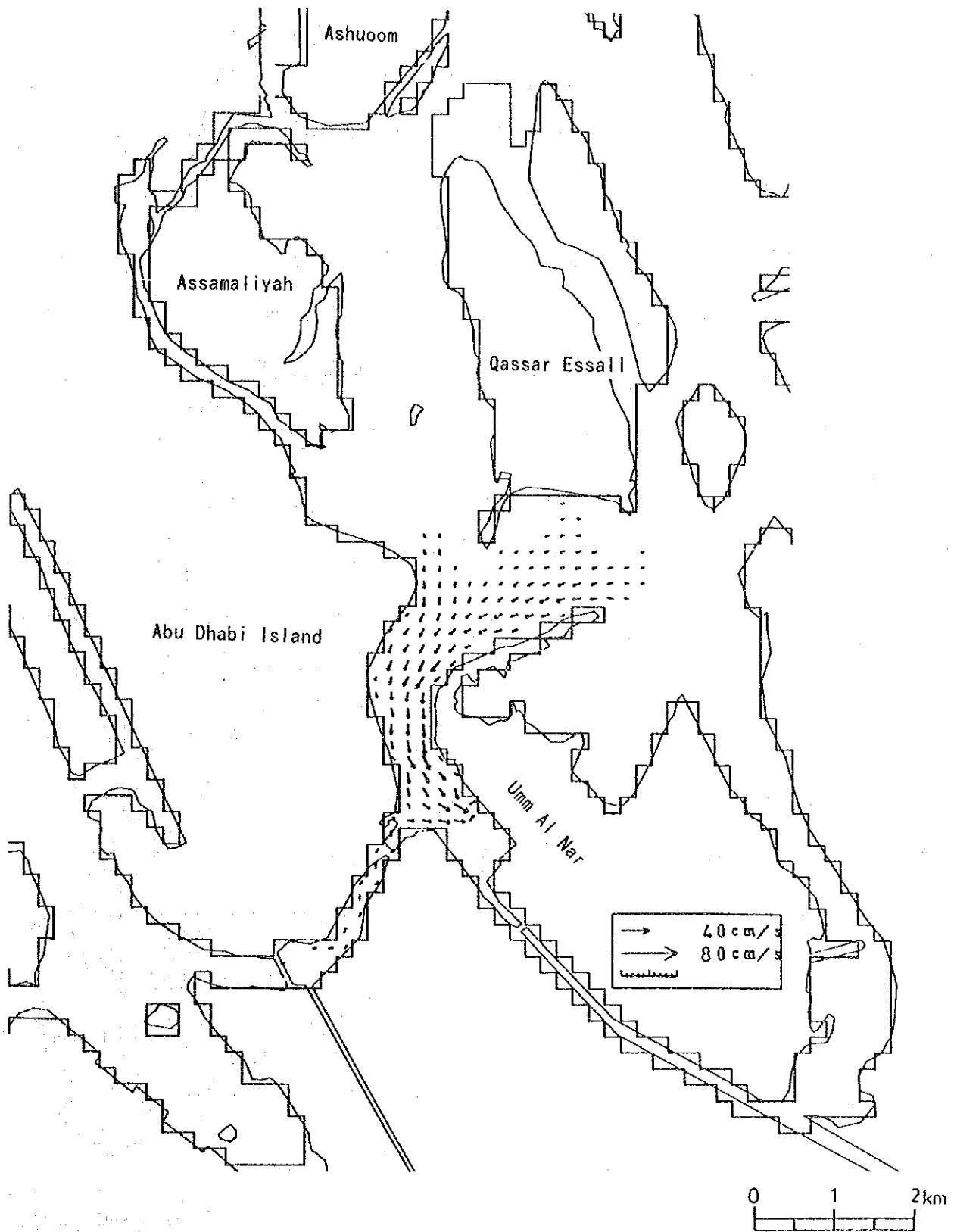


図 5. 1. 37 取 水 流 ベ ク ト ル

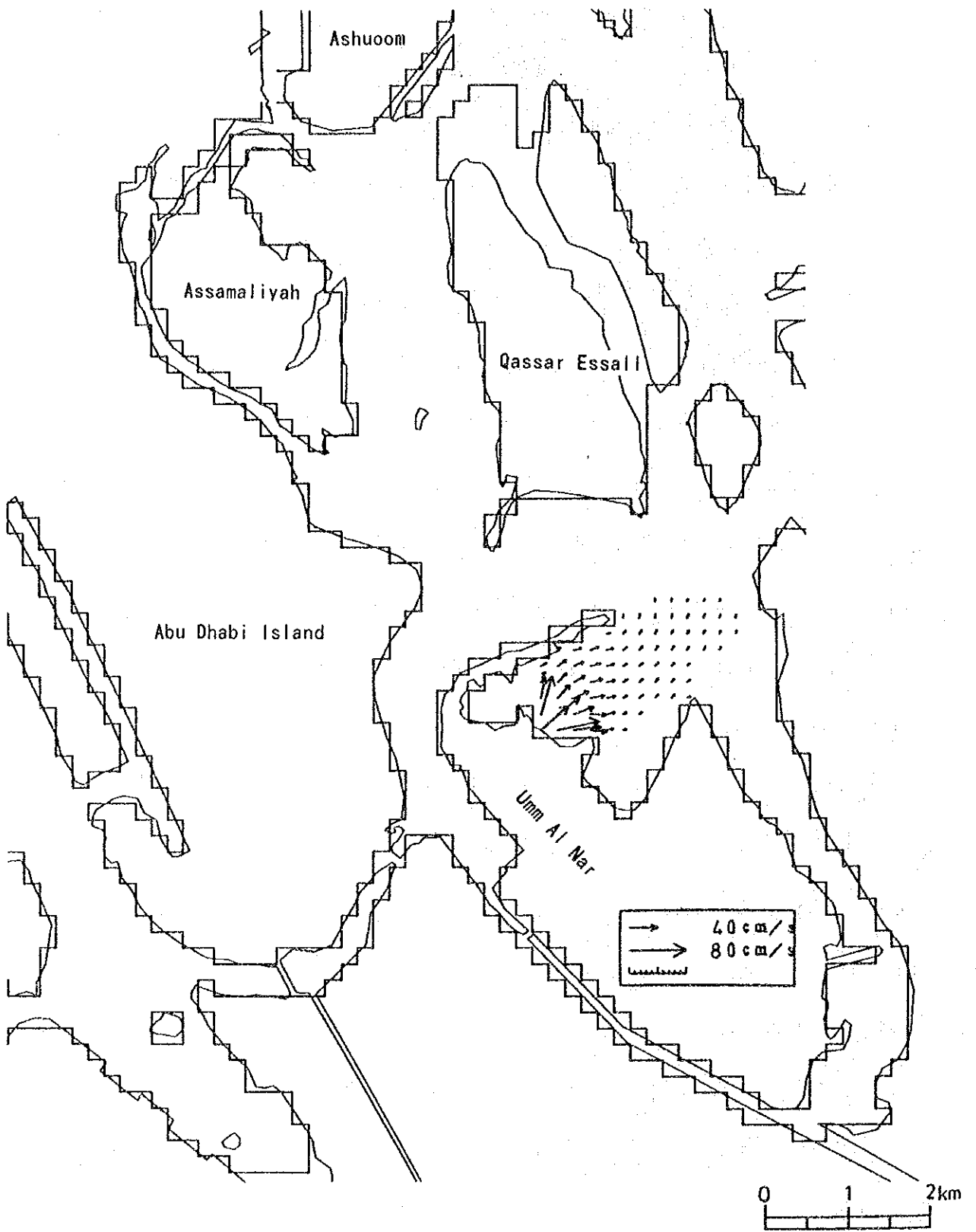


図 5. 1. 38 放水流ベクトル

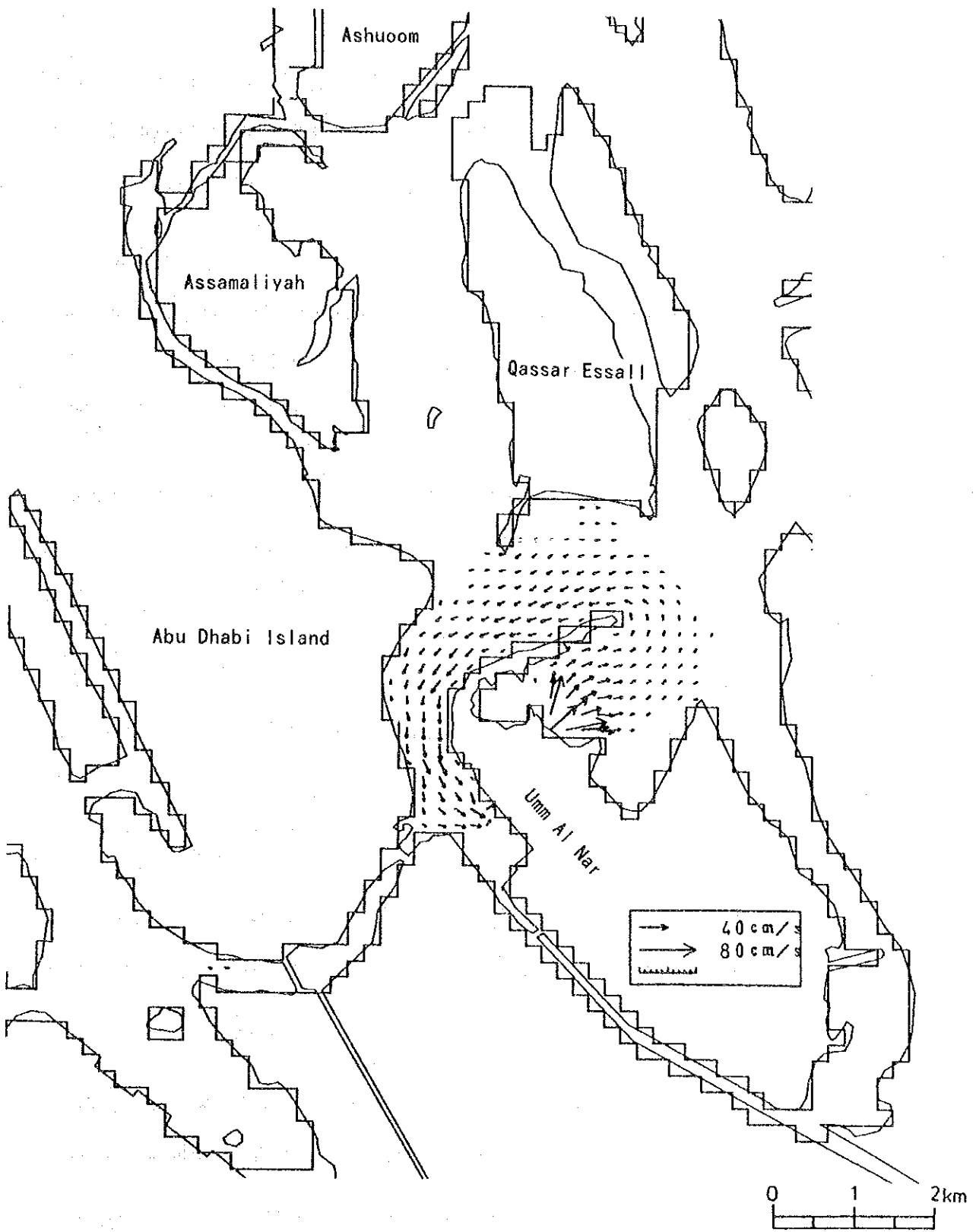


図 5. 1. 39 取放水流ベクトル