

離散的な特性を考慮した
流水運動の数値モデルの研究

林 昌奎

離散的な特性を考慮した
流水運動の数値モデルの研究

指導教官

加藤洋治 教授
山口 一 助教授

1994年6月24日

林 昌奎

目次

図表の一覧表

第1章 序論	1
第2章 流水の漂流	4
2.1 風と水の流れによる応力	4
2.1.1 直接法による風の応力測定	4
2.1.2 風速分布による風の応力測定	5
2.1.3 渦相関法による風の応力測定	6
2.1.4 形状抵抗係数	6
2.2 流水運動の数値解析モデルについて	7
2.2.1 連続体モデル	7
2.2.2 個別要素モデル	9
2.3 まとめ	10
第3章 Distribute Mass / Discrete Floe モデル	12
3.1 氷群	13
3.2 氷の単純化	14
3.2.1 矩形盤流水モデル	14
3.2.2 円盤流水モデル	15
3.3 氷群の運動方程式	17
3.4 運動量の伝達と円盤流水の横移動	19
3.5 流水の相互作用力 (内部応力)	22
3.6 氷群の移動・変形と再分布	25
3.7 海流の解析	29
3.7.1 Ekman 吹送流と鉛直方向の層分割	29
3.7.2 海水流れの支配方程式	31
3.8 まとめ	33
第4章 模擬氷の漂流実験	34
4.1 実験設備	34
4.2 実験条件	34
4.3 水の流速と風速の計測	34
4.4 模擬氷の自由漂流	35
4.4.1 模擬氷の抵抗係数	35

4.4.2 模擬水の単独漂流	35
4.4.3 模擬水の集団漂流	36
4.5 網状構造物周りの模擬水の漂流	36
4.5.1 模擬水と網状構造物との衝突	36
4.5.2 網状構造物周りの模擬水集団の漂流	37
4.6 水の流れを妨げる構造物周りの模擬水の漂流	39
4.7 まとめ	39
第5章 単純領域での流水流れの数値シミュレーション	41
5.1 数値シミュレーションにおけるパラメータ	41
5.2 開放領域での流水運動	41
5.3 流水の横移動の数値シミュレーション	42
5.4 固定境界付近での流水運動	43
5.5 流水運動を妨げる海岸構造物周りの流水の運動	44
5.6 正方形の海洋構造物周りの流水の運動	45
5.7 まとめ	46
第6章 実験・実海域での観測および他モデルとの比較	48
6.1 模擬水の漂流の数値シミュレーション	48
6.1.1 計算条件	48
6.1.2 模擬水の抵抗係数及び構造物と模擬水の衝突	49
6.1.3 模擬水の漂流の数値シミュレーション	50
6.2 実海域での流水の数値シミュレーション	51
6.3 他のモデルとの比較	51
6.3.1 単純化した海域での流水運動の比較	52
6.3.2 海洋構造物周りの流水運動の比較	52
6.4 まとめ	53
第7章 考察	54
第8章 結論	56
Acknowledgements	59
References	60
Nomenclatures	63

図表の一覧表

List of Figure and Table

第 2 章

Table 2.1.1 Representative values of drag coefficient (Bruno & Madsen, 1989)

Figure 2.2.1 Elliptical yield curve (Hibler, 1979):

The stress states are plotted as a function of the principal components of two-dimensional stress tensor.

Figure 2.2.2 Ice contact model (Savage , 1992)

第 3 章

Figure 3.0.1 Flow chart of computation

Figure 3.1.1 Pack ice, computation mesh and ice bunch

Figure 3.1.2 Ice bunch

Figure 3.2.1 Rectangle floe bunch

Figure 3.2.2 Disk floe bunch

Figure 3.3.1 Shear stress due to the wind and water flow

Figure 3.4.1 Axial collision between bunches

Figure 3.3.2 Sea surface inclination force

Figure 3.3.3 Coriolis force

Figure 3.3.4 Ice interaction force

Figure 3.4.1 Collision between floes

Figure 3.4.2 Ice floes expansion

Figure 3.4.3 Procedure of ice floe expansion

Figure 3.5.1 Axial collision between bunches

Figure 3.5.2 Shear force on bunch

Figure 3.5.3 Shear force on disk bunch

Figure 3.5.4 Total ice interaction force on one bunch

Figure 3.6.1 Ice bunch movement and deformation

Figure 3.6.2 Redistribution of Pack ice

Figure 3.7.1 Modeling of ocean flow

Figure 3.7.2 Division of water flow layer

Figure 3.7.3 Surface water velocity driven by a constant wind

第 4 章

- Table 4.1.1 Characteristics of circulating water channel
- Figure 4.1.1 Circulating water channel
- Figure 4.1.2 Floe model
- Figure 4.1.3 Ocean structure model
- Figure 4.1.4 System arrangement
- Figure 4.2.1 Test domain
- Figure 4.3.1 Measurement of wind and current
- Figure 4.3.2 Wind distribution
- Figure 4.3.3 Current distribution
- Figure 4.3.4 Current distribution in depth direction
- Figure 4.4.1 Water drag coefficient
- Figure 4.4.2 Free drift of single floe model
- Figure 4.4.3 Initial condition of free drift of floe models
- Figure 4.4.4 Free drift of disk floe models
- Figure 4.4.5 Free drift of rectangle floe models
- Figure 4.4.6 Free drift of disk and rectangle floe models
- Figure 4.5.1 Impact force on a structure due to disk floe model collision
with sampling time interval of 0.0005 sec
- Figure 4.5.2 Impact force on a structure due to disk floe model collision
with sampling time interval of 0.001 sec
- Figure 4.5.3 Impact force on a structure due to disk floe model collision
with sampling time interval of 0.002 sec
- Figure 4.5.4 Impact force on a structure due to disk floe model collision
with sampling time interval of 0.005 sec
- Figure 4.5.5 Spectrum of impact force on a structure due to disk floe model collision
with sampling time interval of 0.001 sec
- Figure 4.5.6 Impact force on a structure due to rectangle floe model collision
with sampling time interval of 0.002 sec
- Figure 4.5.7 Arrangement of drift test of floe models around
a structure of 30cm×30cm×5cm
- Figure 4.5.8 Interaction force on a structure of 30cm×30cm×5cm
due to disk floe models collision with angle of 0°

- Figure 4.5.9 Spectrum of x-direction force on a structure of 30cm×30cm×5cm due to disk floe models collision with angle of 0°
- Figure 4.5.10 Drift of disk floe models around a structure of 30cm×30cm×5cm with angle of 0°
- Figure 4.5.11 Interaction force on a structure of 30cm×30cm×5cm due to rectangle floe models collision with angle of 0°
- Figure 4.5.12 Spectrum of x-direction force on a structure of 30cm×30cm×5cm due to rectangle floe models collision with angle of 0°
- Figure 4.5.13 Drift of rectangle floe models around a structure of 30cm×30cm×5cm with angle of 0°
- Figure 4.5.14 Interaction force on a structure of 30cm×30cm×5cm due to disk floe models collision with angle of 30°
- Figure 4.5.15 Spectrum of x-direction force on a structure of 30cm×30cm×5cm due to disk floe models collision with angle of 30°
- Figure 4.5.16 Drift of disk floe models around a structure of 30cm×30cm×5cm with angle of 30°
- Figure 4.5.17 Interaction force on a structure of 30cm×30cm×5cm due to disk floe models collision with angle of 45°
- Figure 4.5.18 Spectrum of x-direction force on a structure of 30cm×30cm×5cm due to disk floe models collision with angle of 45°
- Figure 4.5.19 Drift of disk floe models around a structure of 30cm×30cm×5cm with angle of 45°
- Figure 4.6.1 Current distribution around a water stop structure
- Figure 4.6.2 Interaction force on a water stop structure of 30cm×30cm×5cm due to disk floe models collision
- Figure 4.6.3 Spectrum of x-direction force on a water stop structure of 30cm×30cm×5cm due to disk floe models collision
- Figure 4.6.4 Drift of disk floe models around a water stop structure of 30cm×30cm×5cm
- Figure 4.6.5 Interaction force on a water stop structure of 30cm×30cm×5cm due to disk floe models collision with water stop column
- Figure 4.6.6 Spectrum of x-direction force on a water stop structure of 30cm×30cm×5cm due to disk floe models collision with water stop column

Figure 4.6.7 Drift of disk floe models around a water stop structure of 30cm×30cm×5cm with water stop column

第 5 章

- Figure 5.2.1 Computation domain and initial conditions of simulation of wind driven Pack ice movement and spread in a simplified 50m deep continental shelf partially covered with a rectangular ice group of 15km×15km
- Figure 5.2.2 Computed wind driven Pack ice movement and spread when ocean current is disregarded in a simplified 50m deep continental shelf partially covered with a rectangular ice group of 15km×15km
- Figure 5.2.3 Computed wind driven Pack ice movement and spread when ocean current is taken into account in a simplified 50m deep continental shelf partially covered with a rectangular ice group of 15km×15km
- Figure 5.2.4 Surface water velocity vectors induced by ice cover after 20 hours together with ice concentration contours in a simplified 50m deep continental shelf partially covered with a rectangular ice group of 15km×15km
- Figure 5.2.5 Computed wind driven Pack ice movement and spread when ocean current is taken into account with air/ice drag coefficient of 0.004 and ice/water drag coefficient of 0.0015 in a simplified 50m deep continental shelf partially covered with a rectangular ice group of 15km×15km
- Figure 5.2.6 Surface water velocity vectors induced by ice cover after 20 hours together with ice concentration contours with air/ice drag coefficient of 0.004 and ice/water drag coefficient of 0.0015 in a simplified 50m deep continental shelf partially covered with a rectangular ice group of 15km×15km
- Figure 5.3.1 Simulation of ice floe expansion : No water flow is taken into account.
- Figure 5.4.1 Result of wind driven ice/water combined flow along an infinite long fixed boundary
- Figure 5.5.1 Computation domain of wind driven ice/water combined flow around a structure to control the ice flow
- Figure 5.5.2 Result of wind driven ice/water combined flow around a structure to control the ice flow : Structure stops both ice and water, disk floes are uniformly distributed initially.

- Figure 5.5.3 Result of wind driven ice/water combined flow around a structure to control the ice flow : Structure stops only ice, disk floes are uniformly distributed initially.
- Figure 5.5.4 Result of wind driven ice/water combined flow around a structure to control the ice flow : Structure stops both ice and water, disk floes are partially distributed initially.
- Figure 5.5.5 Result of wind driven ice/water combined flow around a structure to control the ice flow : Structure stops only ice, disk floes are partially distributed initially.
- Figure 5.5.6 Result of wind driven ice/water combined flow around a structure to control the ice flow : Structure stops both ice and water, rectangle floes are partially distributed initially.
- Figure 5.6.1 Computation domain of wind driven ice/water combined flow around a rectangular structure of 100m×100m
- Figure 5.6.2 Result of wind driven ice/water combined flow around a rectangular structure of 100m×100m : Disk floes are uniformly distributed initially.
- Figure 5.6.3 Result of wind driven ice/water combined flow around a rectangular structure of 100m×100m : Disk floes are partially distributed initially.
- Figure 5.6.4 Result of wind driven ice/water combined flow around a rectangular structure of 100m×100m : Rectangle floes are uniformly distributed initially.
- Figure 5.6.5 Result of wind driven ice/water combined flow around a rectangular structure of 100m×100m : Rectangle floes are partially distributed initially.

第 6 章

- Figure 6.1.1 Wind distribution in y-direction
- Figure 6.1.2 Water velocity distribution in depth direction at the left boundary of the computation domain
- Figure 6.1.3 Eddy viscosity in depth direction
- Figure 6.1.4 Computed water velocity distribution in y-direction at the center of the computation domain
- Figure 6.1.5 Computed water velocity distribution in x-direction
- Figure 6.1.6 Computed water velocity distribution in depth direction at the position of p
- Figure 6.1.7 Computed free drift of single floe model

- Figure 6.1.8 Computed impact force on the structure due to disk floe model collision with computation time interval of 0.004 sec
- Figure 6.1.9 Computed initial water velocity distribution, free drift of disk floe models
- Figure 6.1.10 Computed initial water velocity distribution, Free drift of rectangle floe models
- Figure 6.1.11 Computed initial water velocity distribution, drift of disk floe models around the water stop structure with water stop column
- Figure 6.1.12 Computed free drift of disk floe models
- Figure 6.1.13 Computed free drift of rectangle floe models
- Figure 6.1.14 Computed disk floe models drift around a structure of 30cmX30cmX5cm, structure stops only floe models
- Figure 6.1.15 Computed rectangle floe models drift around a structure of 30cmX30cmX5cm, structure stops only floe models
- Figure 6.1.16 Computed disk floe models drift around a structure of 30cmX30cmX5cm, structure stops both floe models and water
- Figure 6.2.1 Domain of an actual Marginal Ice Zone
- Figure 6.2.2 Observed wind speed on Marginal Ice Zone
- Figure 6.2.3 Ice floe velocity in an actual Marginal Ice Zone
- Figure 6.3.1 Initial Ice concentration of an ideal MIZ
- Figure 6.3.2 Ice concentration after 24 hours, fixed south boundary
- Figure 6.3.3 Ice concentration after 48 hours, fixed south boundary
- Figure 6.3.4 Ice concentration after 24 hours, free south boundary
- Figure 6.3.5 Ice concentration after 48 hours, free south boundary
- Figure 6.3.6 Initial configuration of ice floes for discrete element model
- Figure 6.3.7 Configuration of ice floes after 48 hours, free south boundary
- Figure 6.3.8 Result of wind driven ice flow around a structure of 100mX100m :
No water flow taken into account, uniformly distributed ice floes are driven by a constant wind 10m/sec normal to the structure face.
- Figure 6.3.9 Result of wind driven ice flow around a structure of 100mX100m :
No water flow taken into account, uniformly distributed ice floes are driven by a 45° inclined constant wind of 10m/sec.

第7章

Figure 7.0.1 Neutral 10 m drag coefficients grouped as a function of ice concentration (Anderson, 1987)

第1章 序論

北氷洋の中心部や南氷洋の南極大陸周辺部では、夏でも海水が凍ってできた氷、すなわち氷が見られることはよく知られている。これらの海域のほかに、北氷洋周辺のバレンツ海、カラ海、ラプテフ海、ビュフォート海、カナダの多島海、またバツフィン湾、ラブラドル海、ハドソン湾、セントローレンス湾などが冬になると凍結する。さらにヨーロッパではバルチック海、ボスニア湾、フィンランド湾、太平洋の縁辺海のベーリング海とオホーツク海でも氷が見られる。これらの氷ができる海域の総面積は、全海域の10%以上に達している。氷は古来から極地域での人間活動の妨げとなっているばかりでなく、極域における大気-海洋間の熱交換を大きく左右することにより、全地球規模の大気や海洋流の循環、ひいては気候変動にも影響を及ぼしている。

氷の調査は古くから続けられているが、観測環境が厳しかったため、今なお十分な成果をあげるに至っていない。しかし、1960年代以降、衛星によるリモートセンシングが始められて以来、大規模な氷域の様子が徐々に解明されつつある。また、1970年代には北極海において北極海氷共同調査 (AIDJEX: Arctic Ice Dynamics Joint Experiment) が実施された。これらを契機として、海水分野においても、いくつかの数値的なモデルが提唱された。

氷は海洋の上層の水が凍結することによって生成され、融解して海洋上層で消滅する。また、生成された氷は、海洋上を移動し、割れたり重なったりして変形する。氷の変動をモデル化するには、これらの生成、消滅、移動、変形の4つのプロセスを正しく記述する必要がある。

氷のモデルは、上記の生成・消滅過程を取り扱う熱力学的モデル、及び移動・変形を取り扱う力学的モデルの2つの方向から開発が始められた。

力学的モデルは生成された氷の移動・変動を取り扱うモデルであり、氷の運動量と質量・密度の保存の式により構成される。このモデルはCampbell (1965) が北極海の氷の移動の計算を試みたことに始まる。Coon et al. (1976) は、AIDJEXの観測結果をもとにして熱力学的過程を含めた詳細な力学的モデルを作成した。また、Rothrock (1975)、Thomdike et al. (1975)、Hibler (1977) は氷の力学的性質を詳しく調べてモデル化している。

一方、熱力学モデルは、氷に流入する、あるいは流出する熱量を評価することにより氷の生成・消滅による変化を再現することを目指すものである。熱力学モデルは、Maykut & Untersteiner (1971) が北極海の氷の変化の記述を試みたことに端を発する。これは気象学的に見積もられていた熱の値を用いて氷の厚さの年変化を計算するもので、北極海の氷の厚さの季節変化の数値予測に対してある程度の成功を取った。その後、Semtner (1976) は、Maykut & Untersteiner の複雑な物理過程を簡略化しても同様の結果が得られることを示し、Washington et al. (1976) は、氷表面層を含めたモデルを作

成ることにより、海水の変動を含めた大規模な海洋循環を記述するための道を開いた。

1970年代の末には、これらの2つの方向から進められてきた研究の成果を統合した力学的・熱力学モデルが開発された。その代表的なものは Hibler (1979) と Parkinson & Washington (1979) によるものであろう。前者は力学的な海水の変動に重点がおかれており、一方後者は全地球規模の大気や海洋のモデルに容易に組み込むことができる。

1970年代の中盤のオイルショックをきっかけに、北極地域に埋蔵する金属資源やエネルギー資源などの天然資源への関心が高まり、それらの調査・開発のため、氷海域への船の出入りや海洋・海岸構造物の建設が飛躍的に増加した。氷海域でのより安全な航海、及び極地域の環境に耐える海洋・海岸構造物の設計・建設のため、比較的狭い領域での氷の移動や氷と海洋・海岸構造物との相互作用に関するより詳細な研究が活発になった。Thomson et al. (1988)、Bruno & Madsen (1989)、Rheem et al. (1993) は従来の広い領域での海水の長期変動のモデルに適用された連続体モデルを、狭い領域での海水の短期変動に適用した。一方 Savage (1992)、Serrer et al. (1993)、Frederking & Sayed (1993) は個々の氷盤を円盤にモデル化し、各々の円盤の運動を個別に解析する個別要素モデルを提案した。しかし、連続体モデルは、狭い領域での海水の短期変動の解析にあたって重要になる海水の離散的な特性の表現が出来ないため、制限的な適用に止まっている。また、個別要素モデルは海水の離散的な特性をそのままモデル化したため、詳細な氷の移動や氷と構造物との相互作用の数値的な解明に適切なモデルではあるが、数値演算の複雑化のため計算時間が長くなり、扱える氷盤の数も限られるという欠点がある。

本論文で提案する Distributed Mass / Discrete Floe モデル (以下 DMDFモデル) は、流水の離散的な特性を考慮した、新たな流水運動や流水と海洋・海岸構造物との相互作用の数値解析モデルである。また、このモデルは現状においては海水の生成・消滅を無視する海水の力学的モデルで、比較的狭い領域での海水の短期変動を取り扱っている。DMDFモデルはかつての連続体モデルや個別要素モデルが持つ問題点の克服の可能性を示したモデルであり、連続体モデルと個別要素モデルの両方の特性を含む中間的モデルである。DMDFモデルを用いることによって、連続体モデルがなし得なかった流水の離散的な特性の表現が可能になり、個別要素モデルの欠点であった扱える氷盤の数を大幅に増やすことができた。また、このモデルでは、個々の氷盤を円盤 (Rheem et al., 1994) または、矩形盤 (Yamaguchi et al., 1993; Rheem et al., 1994) として取り扱っている。

DMDFモデルは、流水を計算格子に合わせて長方形の氷の集団、すなわち氷群に分解し、氷群の運動と変形を数値的に解析する。氷群の中の氷は全て同じ大きさを持ち、均一に分布するものと仮定する。個々の氷盤は弾性のない円盤または、矩形盤にモデル化した。氷群の移動及び変形時に働く主外力として、風・海流によるせん断応力、コリオリ力、海面の傾きによる水面傾斜力、及び流水の相互作用による内部応力を考慮してい

る。流水の内部応力は、氷群の衝突と氷群の運動量の変化の関係から定式化した。氷群の移動は semi-Lagrange タイプの質量輸送システムを用いた。流水に及ぼす海流の影響を直接に考慮するため、流水と海水の流れの同時解析を行った。また、海面での海水の流れをより正確に評価するため、多層モデルを用い、MacCormack predictor-corrector スキームによる差分計算法を用いて海流の解析を行った。

論文の第2章には、流水の力学的変動を支配する外力項について述べている。風・海流から氷に加えられる力の評価の方法と、流水の相互作用力の取り扱い方法について、連続体モデルである Hibler (1979) の viscous-plastic モデルと、流水運動を個々の円盤運動の集合として取り扱う Savage (1992) の個別要素モデルを中心に述べられている。

第3章には、流水の離散的な特性を考慮した新たな流水の力学的変動の数値シミュレーションモデルの DMDF モデルについて述べている。流水のモデル化、流水運動の定式化、流水の相互作用力の取り扱い方法、海流の解析方法などを詳しく述べる。

第4章には、流水運動の様子や、流水と海洋構造物との相互作用のメカニズムの把握のため、風路付造波回流水槽にて、模擬氷を用いて行った漂流実験について述べる。模擬氷の漂流の様子や水槽内に設置した構造物と模擬氷との相互作用の特性などが観測結果を中心に述べられている。

第5章では、DMDF モデルを用いて、単純領域での流水運動の数値シミュレーションを行い、このモデルを用いた場合の流水運動の特性を調べるとともに合理性の検証を行う。計算に用いた単純領域は、流水運動や海洋・海岸構造物との相互作用を特徴的に捉えており、かつ実海域にも有り得るような領域を選んだ。

第6章では、DMDF モデルによる流水運動の数値シミュレーションと、模擬氷の漂流実験、実海域での流水の観測及び、他モデルの計算結果との比較を行ない、このモデルの適用性を確かめる。

第7章には、DMDF のモデルの実海域への適用性を高めるために、必要な改善の指針について述べる。

第2章 流氷の漂流

流氷の漂流の研究の始まりは1902年にNansenが行ったフラム号の漂流の解析であろう。このとき、NansenはNansenの法則とも呼ばれている漂流の風力係数すなわち、流氷の流速の風速に対する比が0.0190であることを見出した。

流氷の漂流は主に次の5つの力の作用に支配される。すなわち、風から氷に加えられる応力、海流から氷に加えられる応力、コリオリ力、氷が浮いている海面の傾きによる水面傾斜力及び、流氷の相互作用による応力（内部応力）である。

流氷が海洋上に孤立している場合は、個々の氷はそれに働く大気や海流の及ぼす力によって、自由に漂流する。しかし、流氷の動く方向に、たとえば定着氷があるような場合には、氷が相互に力を及ぼし合うので、大気や海流からのみ力を受ける場合とは異なる運動をする。このような流氷相互の間に働く力を流氷の内部応力という。この内部応力をどのように評価するかが、流氷の力学的変動のモデル化を行う場合の重要な問題になる。この章では、風と水の流れによる応力の計測方法及び、流氷の内部応力の取り扱いについて述べる。

2.1 風と水の流れによる応力

流氷の上を風が吹くと、氷の表面に接線応力が生ずる。これは流氷の運動を支配する最も重要な力の1つである。風による力は表面抵抗力（surface drag）と形状抵抗力（form drag）の2つに分けて考えることができる。表面抵抗力は大気境界層におけるせん断応力として次のような方法で測定することができる。直接測定、風速分布より求める方法および、渦相関法である。形状抵抗力は風上側から風下側にかけての圧力低下として測定することができる。

海水と海氷が相対運動しているときに、氷が氷に及ぼす応力についても風と同様に考えることができる。

空気と氷の間の抵抗係数（air-ice drag coefficient、 C_a ）と水と氷の間の抵抗係数（ice-water drag coefficient、 C_w ）の測定は数多く行われており、表2.1.1にその概略を示す。

2.1.1 直接法による風の応力測定

これは文字どおり物体に働くせん断応力を直接測定しようとする方法で、鈴木（1967）によって海氷に適用された。平坦な流氷上に直径数mの円を描き、その外側の氷を幅20～30cmにわたって除去し、氷に浮かぶ氷の円板をつくる。この氷板に加わるせん断力を測定するのであるが、そのために氷板の中心に回転軸を凍着させておき、円周を等分する方向に張った鋼鉄線によってまわりの氷板に固定する。この鋼鉄線に荷重計

を取り付けておくと、氷板に加わった力を容易に測定することができる。円板に加わった力の時間平均を \bar{F}_o とする平均せん断応力: τ_o は

$$\tau_o = \bar{F}_o / \pi R^2 \quad (2.1.1)$$

である。ここで R は円板の半径である。

鈴木は τ_o として $0.42 \sim 2.6 \text{ dyne/cm}^2$ を得た。

Table 2.1.1 Representative values of drag coefficient (Bruno & Madsen, 1989)

Investigator	Ice Type	Reference Height (m)	$C_d \times 10^{-3}$
Banke et al. (1976)	smooth	10	1.10
Madsen and Bruno (1986)	smooth	10	1.33
Madsen and Bruno (1986)	slightly rough	10	1.40
Banke and Smith (1971)	rough	10	2.60
Madsen and Bruno (1986)	rough	10	1.60
Smith et al. (1970)	rough	10	3.70

Investigator	Ice Type	Reference Depth (m)	$C_w \times 10^{-3}$
Madsen and Bruno (1986)	smooth	2.0	5.46
Madsen and Bruno (1986)	slightly rough	5.1	4.07
Madsen and Bruno (1986)	slightly rough	1.1	8.40
McPhee (1979)	rough	geostrophic	5.40
Madsen and Bruno (1986)	rough	2.0	15.00
McPhee (1979)	rough	2.0	20.00

2.1.2 風速分布による風の応力測定

空気の垂直安定度が中立のときに平均速度 V_a の定常的な風が吹いているとする。さらに、 V_a が高さ z だけの関数である場合には、レイノルズせん断応力 (Reynolds stress) τ は高さに無関係な常数 τ_o となり

$$\tau_o = \rho_a C_{at} V_a^2 \quad (2.1.2)$$

であらわされる。 ρ_a は空気の密度、 C_{az} は高さ z での抵抗係数 (drag Coefficient)、 V_{az} は高さ z での平均風速である。この C_{az} は一般には C_{a10} 、すなわち高さ10mでの値としてあらわす。もし風速の測定が10mまで行われていないときには、 $V_{az} = \ln z$ とみなして測定値を外挿して求めることができる。また

$$V_{az} = \frac{1}{k} \sqrt{\frac{\tau_0}{\rho_a}} \ln \frac{z+z_0}{z_0} \quad (2.1.3)$$

であるから、式 (2.1.2) 及び (2.1.3) から、 C_{az} は z_0 、すなわち粗度係数 (roughness length または parameter) を用いて、

$$C_{az} = k^2 \left(\ln \frac{z}{z_0} \right)^{-2} \quad (2.1.4)$$

であらわされる。ここで k はカルマン定数 (Karman constant) とよばれる流体の性質によらない普遍定数で、ふつうは0.4が用いられている。すなわち、 τ_0 、 V_{az} あるいは z_0 を用いて C_{az} を求めることができる。

2.1.3 渦相関法による風の応力測定

水平及び鉛直方向の平均風速からその変動成分を、それぞれ v'_a 及び w'_a とすると、レイノルズせん断応力 τ_0 は

$$\tau_0 = -\rho_a \overline{v'_a w'_a} \quad (2.1.5)$$

である。このときに風速の平均値は、平均風速がかわらない範囲内でできるだけ長いサンプリング時間をとる必要があり、ふつうは30~45分間の平均値が用いられる。

2.1.4 形状抵抗係数

氷域には多数の氷丘脈が存在するので、実際の氷丘脈について風の応力を求めることは重要なことである。氷丘脈の高さは1m~10mぐらいで、高いものほど数が少ない。

氷丘脈に対する風の応力は形状抵抗力 (form drag) で、これは鉛直面に対して投影した面積 (sail area) に関係するとみなすことができる。風が直角にあたっているときに氷丘脈の単位長さあたりの力 F は

$$F = \frac{1}{2} \rho_a C_F V_a^2 H \quad (2.1.6)$$

ここで、 H は氷丘脈の平均の高さ、 C_F は形状抵抗係数である。風下の方向に単位長さあたり N 個の氷丘脈があるとき、氷丘脈による抵抗係数 C'_{a10} は

$$C'_{a10} = \frac{1}{2} C_F H N \quad (2.1.7)$$

であらわされる (Banke and Smith, 1973)。

1つの氷丘脈に働く抵抗力は風上側と風下側の圧力差 Δp から求めることができる。すな

わち、氷丘脈を高さ方向に n 個の層に分割し、各層における圧力差 Δp_i ($i=1, 2, \dots, n$) を測定すれば、

$$F = \int_{z=0}^H \Delta p dz \cong \sum_{i=1}^n \Delta p_i \delta z_i \quad (2.1.8)$$

のようになる。ここに δz_i は i 番目の層の厚さである。

形状抵抗係数は

$$C_F = \frac{2F}{\rho_a H V_{a10}^2} \cong \frac{2}{\rho_a H} \sum_{i=1}^n \Delta p_i \delta z_i \quad (2.1.9)$$

また、氷丘脈の傾斜 α

$$\alpha = \tan^{-1} \frac{2H}{B} \quad (2.1.10)$$

を用いて、抵抗係数との関係として

$$C_F = 0.012(1 + \alpha) \quad (2.1.11)$$

を得た (Banke et al., 1975)。

2.2 流水運動の数値解析モデルについて

この節では、今まで海水の力学的変動の数値解析モデルとして、多く用いられてきた連続体モデルである Hibler (1979) の viscous-plastic モデルと、流水運動を個々の円盤運動の集合として取り扱う Savage (1992) の個別要素モデルについて流水の内部応力の取り扱い方法を中心に簡略に述べる。

2.2.1 連続体モデル

連続体モデルの流水の運動方程式は次のように記述される。

$$\rho_i h_i \left(\frac{\partial}{\partial t} + \vec{v}_i \cdot \nabla \right) \vec{v}_i = \vec{\tau}_a + \vec{\tau}_w - \rho_i h_i \vec{f} \times \vec{v}_i - \rho_i h_i g \nabla \eta + \vec{F}_i \quad (2.2.1)$$

ここで、 ρ_i は水の密度、 h_i は平均水厚、 \vec{v}_i は氷の速度で、 $\vec{\tau}_a$ 、 $\vec{\tau}_w$ は各々風と海流による応力、 $-\rho_i h_i \vec{f} \times \vec{v}_i$ はコリオリ力、 $-\rho_i h_i g \nabla \eta$ は水面傾斜力、 \vec{F}_i は流水の内部応力である。

連続体モデルでは、流水の歪み (strain) あるいは歪み速度 (strain-rate) から内部応力を求めている。この流水の歪みや歪み速度と内部応力との関係 (constitutive law) の取り扱いに対し、いくつかのモデルが提案されている。

Hibler (1979) の viscous-plastic モデルは、流水の強度に相当するパラメータ P と流水の圧縮に対する抵抗力の大きさの比に相当するパラメータ e を用いた下記のような楕円形の降伏曲線を用いて、流水の内部応力を流水の歪み速度と関係付けたモデルである (図 2.2.1)。

$$G(\sigma_1, \sigma_2) = \left(\frac{\sigma_1 + \sigma_2 + P}{P} \right)^2 + \left(\frac{\sigma_2 - \sigma_1}{P} e \right)^2 - 1 = 0 \quad (2.2.2)$$

ここで、 σ_1 、 σ_2 は内部応力の主成分である。図2.2.1の $\dot{\epsilon}$ は点Aにおける歪み速度である。

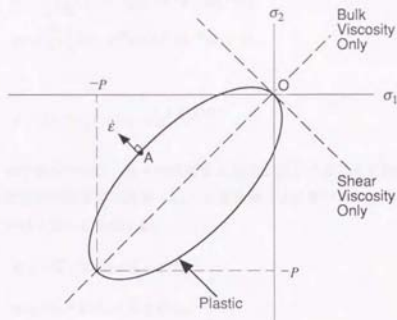


Figure 2.2.1 Elliptical yield curve (Hibler, 1979):
The stress states are plotted as a function of the principal components of two-dimensional stress tensor.

そしてこの曲線を用いて、次のように応力と歪み速度を関係付ける。まず、応力は次のような条件を満たしていると仮定する。

- (1) 降伏曲線の外側の応力はあり得ない、つまり極端に大きな応力はあり得ない。
 - (2) 応力が降伏曲線上にあるときは流氷の変形が起こっている ($\dot{\epsilon}_{ij} \neq 0$)。
 - (3) 応力が降伏曲線の内部にあるときは、応力が小さいので、流氷の変形は起らない ($\dot{\epsilon}_{ij} = 0$)。
- (2) の変形が起こる場合に対しては、次のように変形の歪み速度と降伏曲線とを関係付けるものとする。

$$\dot{\epsilon}_k = \gamma \frac{\partial G}{\partial \sigma_k} \quad (k=1,2) \quad (2.2.3)$$

ここで、 k は主成分方向を表し、 γ は応力の状態から決められるパラメータである。

応力が式(2.2.2)の降伏曲線上にあるときは、流氷は主成分方向に対し下記に示されるような変形を起こしていることになる。

$$\dot{\epsilon}_1 = \frac{2\gamma}{P^2} \{ (1+e^2)\sigma_1 + (1-e^2)\sigma_2 + P \} \quad (2.2.4-1)$$

$$\dot{\epsilon}_2 = \frac{2\gamma}{P^2} [(1-e^2)\sigma_1 + (1+e^2)\sigma_2 + P] \quad (2.2.4-2)$$

また、式 (2.2.2) と (2.2.4) を用いて次のような応力と歪み速度の関係が得られる。

$$\sigma_1 = \frac{P}{2} \left[\frac{1}{\Delta} \{ (1+e^{-2})\dot{\epsilon}_1 + (1-e^{-2})\dot{\epsilon}_2 - 1 \} \right] \quad (2.2.5-1)$$

$$\sigma_2 = \frac{P}{2} \left[\frac{1}{\Delta} \{ (1-e^{-2})\dot{\epsilon}_1 + (1+e^{-2})\dot{\epsilon}_2 - 1 \} \right] \quad (2.2.5-2)$$

ここで、

$$\Delta = [(\dot{\epsilon}_1 + \dot{\epsilon}_2)^2 + (\dot{\epsilon}_1 - \dot{\epsilon}_2)^2 / e^2]^{1/2} \quad (2.2.6)$$

である。

式 (2.2.5) の主成分方向は、各々の点の歪み速度と応力により局所的に決まるものなので、それを計算の空間固定座標系 (x, y) に書き換える必要がある。空間固定座標系での応力テンソルは下記のようになる。

$$\sigma_{xx} = (\zeta + \chi)\dot{\epsilon}_{xx} + (\zeta - \chi)\dot{\epsilon}_{yy} - \frac{P}{2} \quad (2.2.7-1)$$

$$\sigma_{yy} = (\zeta - \chi)\dot{\epsilon}_{xx} + (\zeta + \chi)\dot{\epsilon}_{yy} - \frac{P}{2} \quad (2.2.7-2)$$

$$\sigma_{xy} = \sigma_{yx} = 2\chi\dot{\epsilon}_{xy} = 2\chi\dot{\epsilon}_{yx} \quad (2.2.7-3)$$

ここで、

$$\zeta = \frac{P}{2\Delta} \quad (2.2.8-1)$$

$$\chi = \zeta / e^2 \quad (2.2.8-2)$$

$$\Delta = [(\dot{\epsilon}_{xx} + \dot{\epsilon}_{yy})^2 + \left(\frac{\dot{\epsilon}_{xx} + \dot{\epsilon}_{yy}}{e}\right)^2 + (2\frac{\dot{\epsilon}_{xy}}{e})^2]^{1/2} \quad (2.2.9)$$

$$\bar{\epsilon} = \begin{pmatrix} \dot{\epsilon}_{xx} & \dot{\epsilon}_{xy} \\ \dot{\epsilon}_{yx} & \dot{\epsilon}_{yy} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{\partial v_{ix}}{\partial x} & \frac{1}{2} \left(\frac{\partial v_{ix}}{\partial y} + \frac{\partial v_{iy}}{\partial x} \right) \\ \frac{1}{2} \left(\frac{\partial v_{ix}}{\partial y} + \frac{\partial v_{iy}}{\partial x} \right) & \frac{\partial v_{iy}}{\partial y} \end{pmatrix} \quad (2.2.10)$$

である。そして内部応力の項は下記のように与えられる。

$$F_{ix} = \frac{\partial \sigma_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_{xy}}{\partial y} \quad (2.2.11-1)$$

$$F_{iy} = \frac{\partial \sigma_{yx}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_{yy}}{\partial y} \quad (2.2.11-2)$$

2.2.2 個別要素モデル

個別要素モデルは、文字通り流水運動を個々の円盤の運動の集合として取り扱うモデルである。このモデルは 1 つ 1 つの水を Lagrange 方式で追跡するため、計算のアルゴリ

ズムが非常に複雑になり、多くの計算時間を必要とする。

Savage (1992) のモデルでは、流水を円盤の集団として取り扱っており、1つ1つの円盤の並進運動と回転運動の解析を通じて流水の変動をシミュレートする。Savageのモデルに用いられている各々の円盤に対する並進運動の支配方程式は下記のように与えられる。

$$m_i \frac{d\vec{v}_i}{dt} = a_i \vec{v}_a + a_i \vec{v}_w - m_i \vec{f} \times \vec{v}_i + \sum_{j=1}^n \vec{F}_{ij} \quad (2.2.12)$$

ここで、 m_i は円盤の質量、 a_i は円盤の断面積である。 n は問題とする円盤と衝突する円盤の数で、衝突の際の接触により伝えられる力のベクトル和が $\sum_{j=1}^n \vec{F}_{ij}$ である。Savageのモデルは海水の流れを考慮していないため、水面傾斜力の項は含まれていない。また、各々の円盤に対する回転運動の支配方程式は次のようになる。

$$I_{iz} \frac{d\omega_{iz}}{dt} = I_{iz} \frac{d^2\theta_z}{dt^2} = \sum_{j=1}^n T_{iz} - T_{vz} \quad (2.2.13)$$

ここで、 I_{iz} は円盤のz軸まわりの慣性モーメントで、円盤の半径が r_i の場合、 $I_{iz} = \frac{1}{2} m_i r_i^2$ と示される。 ω_{iz} はz軸まわりの円盤の角速度、 θ_z は角変位であり、 $\sum_{j=1}^n T_{iz}$ は隣りの円盤との衝突の際の接触により伝わるトルクの和である。 T_{vz} は水による粘性抵抗トルクである。

SavageのモデルではWalton & Braun (1986) の ratchet contact model を用いて、衝突の際の法線方向の接触力 (normal force) を求めている。Walton & Braunのモデルでは、衝突の過程を変形段階 (compaction phase) と回復段階 (recovery phase) の2段階に分けて取り扱っており、衝突の際の法線方向の接触力は変形段階のばね定数 k_1 と回復段階のばね定数 k_2 を用いて、下記のように求めている。

$$F_{in} = k_1 \delta \quad \text{for compaction} \quad (2.2.14)$$

$$F_{in} = k_2 \delta \quad \text{for recovery} \quad (2.2.15)$$

ここで、 δ は円盤の変形量を表す。

Savageは図2.2.2のように回復段階のばね定数 k_2 を変形段階のばね定数 k_1 より大きく取り、衝突の際のエネルギーの一部が円盤に吸収されるものとした。また、接線方向の接触力 (tangential force) は下記のように求めた。

$$F_{is} = \mu_i F_{in} \quad (2.2.16)$$

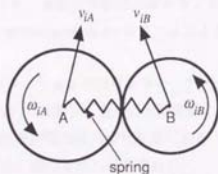
ここで、 μ_i は水の摩擦係数である。

2.3 まとめ

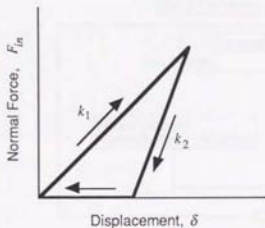
流氷の力学的変動を支配する5つの外力のうち、コリオリ力と海面の傾きによる水面傾斜力に関しては流氷の種類及び、計算モデルに無関係な取り扱いがなされているが、

風・海流から氷に加えられる力は流水の種類によって大きく異なり、その評価のほとんどは観測によって行われている。また、流水の相互作用力の取り扱い方法は用いる計算モデルによって大きく異なる。

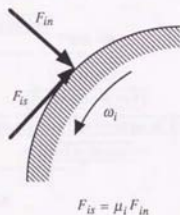
連続体モデルは、広い領域での流水の変動を取り扱うのに適し、熱力学的モデルとの融合も容易である。しかし、連続体モデルでは、狭い領域での流水の変動に大きく現れる流水の離散的な特性を表せないため、流水運動を個々の円盤運動の集合として取り扱う個別要素モデルが提案された。個別要素モデルは、流水の離散的な特性をそのままいかしたモデルで、狭い領域での流水の変動を取り扱うのに適している。一方、このモデルは1つ1つの氷をLagrange方式で追跡するため、計算のアルゴリズムが非常に複雑になり、多くの計算時間を必要とし、扱える氷盤の数も限られるので、比較的広い領域への適用が困難である。



(a) Rotating and translating disks



(b) Inelastic normal contact



(c) Frictional tangential force

Figure 2.2.2 Ice contact model (Savage, 1992)

第3章 Distributed Mass / Discrete Floe モデル

DMDFモデルは流水の運動や、流水と流氷及び流氷と海洋・海岸構造物との相互作用の数値解析モデルである。このモデルは海水の生成・消滅を無視する海水の力学的モデルであり、比較的狭い領域での海水の短期変動を取り扱っている。このモデルでは、個々の流氷を弾性のない円盤または矩形盤に単純化する。また、流氷を長方形の氷の集団、即ち氷群に分割し、氷群の移動と変形の数値的解析を通じて、流水の変動をシミュレーションする。風・海流によるせん断応力、コリオリ力、海面の傾きによる水面傾斜力、及び流氷の相互作用による内部応力を氷群の移動及び変形に因与する外力として考えている。流氷の相互作用力（内部応力）は氷群間の衝突、及び流氷の横移動による氷群の運動量の変化から定式化し、氷群の質量と水の密接度の移動にはSemi-Lagrange方式を採用した。流氷の流れに及ぼす海流の影響を直接に考慮するため、流氷の流れと海水の流れの同時解析を行った。また、海面での海水の流れをより正確に評価するため、多層モデルを用い、MacCormack predictor-corrector スキームによる差分計算法を用いて海流の解析を行った。

図3.0.1は流水運動シミュレーションの簡単なフローチャートである。このモデルでは、流水域を氷群に分割（3.1節、3.2節）、各々の氷群に働く外力を評価し（3.3節、3.4節、3.5節）、氷群の移動・変形及び運動量の変化を算定する（3.3節、3.6節）。最後に流水の再分布（3.6節）を通じて、新たな流水域を求める。

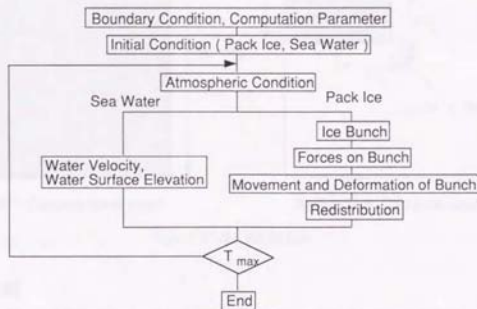


Figure 3.0.1 Flow chart of computation

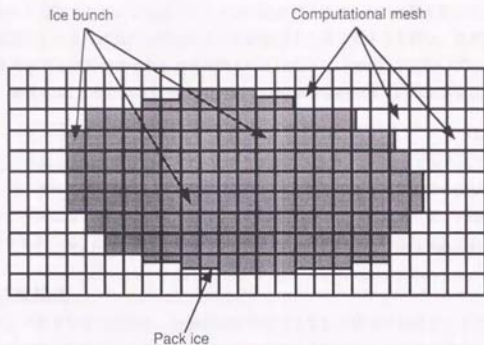


Figure 3.1.1 Pack ice, computation mesh and ice bunch

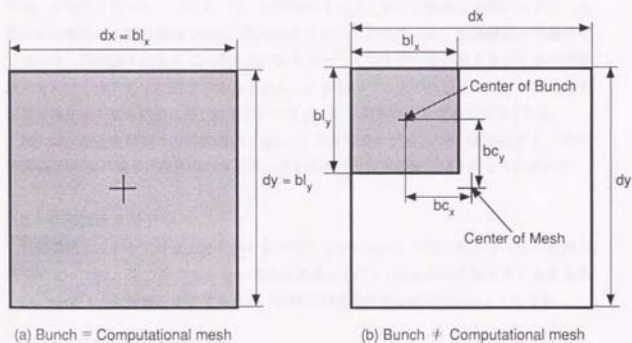


Figure 3.1.2 Ice bunch

3.1 氷群

DMDPモデルは流水を図3.1.1のように計算格子に合わせて長方形の氷の集団、すなわち氷群 (Bunch) に分割する。氷群は図3.1.2のようにその大きさと中心の位置、及び氷の密度を用いて定義する。氷群の中には正の整数の氷が存在し、全ての氷は同じ大きさ

を持ち、均一に分布することと仮定する。1つの計算格子には1つの氷群を置くことによって、流水内部の氷群は図3.1.2の(a)のように計算格子と同じ大きさを持つ。氷の密接度は、氷群の面積と氷群の中の氷の占有面積との比率であり、0から1の間のいずれかの値である。密接度0は氷がない氷群を、密接度1は全体が氷で覆われている氷群を示す。

$$C_i = \frac{A_i}{b_{ix} b_{iy}} \quad (3.1.1)$$

ここで、 C_i は氷群の氷の密接度、 b_{ix} はx方向の氷群の大きさ、 b_{iy} はy方向の氷群の大きさを、 $b_{ix} b_{iy}$ は氷群の面積、 A_i は氷群の中の氷の占有面積である。図3.1.2の(b)は氷群が計算格子と一致しない場合の氷群の例である。外側の長方形は計算格子で、内側の長方形は氷群であり、 bc_x と bc_y は計算格子の中心に対する氷群の中心の相対位置である。

3.2 氷の単純化

様々な形と大きさを持つ流水を、計算においてそのまま取り扱うのはほとんど不可能であり、流水変動の数値解析を図る場合には氷の形や大きさを何らかの形で単純化する必要がある。DMDFモデルでは図3.2.1と図3.2.2のように氷を弾性のない円盤または、矩形盤に単純化している。円盤または、矩形盤の大きさ、形及び配置は氷群の大きさ、氷群の氷の密接度と計算領域での氷の代表長さをを用いて決めている。矩形盤流水の場合は正方形を、円盤流水の場合は円形を氷の基本形としているが、氷群の大きさと氷の密接度に合わせて氷の形を変形する場合もある。計算領域での氷の代表長さは、計算の対象になる海域で最も頻繁に見られる氷の大きさ、即ち流水の大きさの平均値である。

例えば、ある氷群のx方向の長さが b_{ix} 、y方向の長さが b_{iy} 、氷の密接度が C_i 、氷の代表長さが d_i の場合、氷群内の氷の数、氷の大きさ及び氷の配置は次のように求める。

3.2.1 矩形盤流水モデル

矩形盤流水モデルでは正方形を氷の基本形にしているが、氷群の大きさと氷の密度の関係によっては、正方形にならない場合もある。図3.2.1の(a)の矩形盤流水の氷群を図3.2.1の(b)のように配置を変えてみると、氷群での氷の占有面積は下記のようになる。

$$A_i = N_{ix} d_{ix} \cdot N_{iy} d_{iy} \quad (3.2.1)$$

ここで、 d_{ix} は氷のx方向の長さ、 d_{iy} は氷のy方向の長さで、 $N_{ix} N_{iy}$ は氷群内の氷の数である。仮定により、氷群内の氷の密接度は一定であるから下記の関係が得られる。

$$C_{ix} \cdot C_{iy} = C_i \quad , \quad C_{ix} = C_{iy} = \sqrt{C_i} \quad (3.2.2)$$

ここで、

$$C_{ix} = \frac{N_{ix} d_{ix}}{b_{ix}} \quad (3.2.3)$$

$$C_{iy} = \frac{N_y d_{iy}}{b_l} \quad (3.2.4)$$

で、 C_{ix} はx方向の氷の密接度、 C_{iy} はy方向の氷の密接度である。

式(3.2.3)からx方向の氷の数 N_{ix} は $C_{ix} b_l x / d_{ix}$ に最も近い正の整数、同様にy方向の氷の数 N_{iy} は式(3.2.4)から $C_{iy} b_l y / d_{iy}$ に最も近い正の整数とし、氷の長さを下記のように求める。

$$d_{ix} = \frac{C_{ix} b_l x}{N_{ix}} \quad (3.2.5)$$

$$d_{iy} = \frac{C_{iy} b_l y}{N_{iy}} \quad (3.2.6)$$

また、氷群内の氷と氷との間の距離 s_{fx} 、 s_{fy} は下記の式で求める。

$$s_{fx} = \frac{b_l x - N_{ix} d_{ix}}{N_{ix}} \quad (3.2.7)$$

$$s_{fy} = \frac{b_l y - N_{iy} d_{iy}}{N_{iy}} \quad (3.2.8)$$

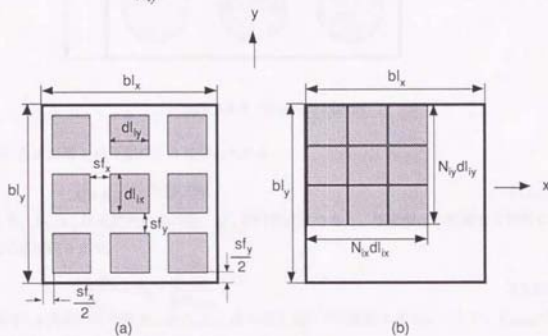


Figure 3.2.1 Rectangle floe bunch

3.2.2 円盤流氷モデル

円盤流氷の水群の場合、図3.2.2に見られるよう氷は方向によって異なる分布をしている。まず、x方向に対しては、矩形盤流氷と同様に円が一定の間隔で分布しているが、y方向に対しては図3.2.2に示すように円的位置は列ごとにx方向の円の間隔の半分ずつずれている。円盤流氷の水群では、図3.2.2で見られるように隣り合う3つの円A、B、Cを結ぶ線は3角形の辺になり、円の中心は3角形の頂点になる。円盤流氷の水群で

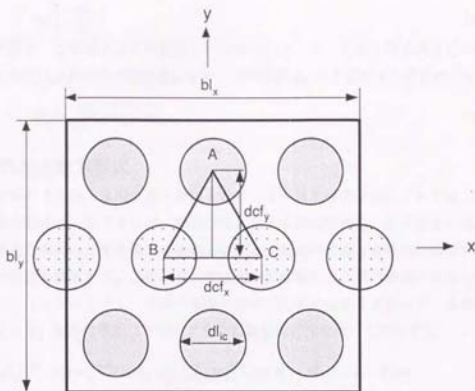


Figure 3.2.2 Disk floe bunch

の氷の占有面積 A_I は下記のように求められる。

$$A_I = N_{ix} N_{iy} \frac{\pi d_{lc}^2}{4} \quad (3.2.9)$$

ここで、 $N_{ix} N_{iy}$ は氷群内の氷の数、 d_{lc} は円の直径である。矩形盤流氷の場合と同様に下記の式が成り立つ。

$$\frac{N_{ix} d_{lc}}{b_{lx}} = C_{ix} = \sqrt{\frac{C_i}{C_{imax}}} \quad (3.2.10)$$

氷群内の x 方向の氷の数 N_{ix} は $C_{ix} b_{lx} / d_{lc}$ に最も近い正の整数とする。ここで、 C_{imax} は円盤流氷の氷群の氷の密接度の最大値である。

$$C_{imax} = \frac{\frac{1}{2} \pi d_{lc}^2}{\frac{\sqrt{3}}{4} d_{lc}^2} = \frac{\pi}{2\sqrt{3}} \quad (3.2.11)$$

また、 x 方向対して、隣り合う 2 つの円の中心間の距離は下記のようになる。

$$dcf_x = \frac{b_{lx}}{N_{ix}} \quad (3.2.12)$$

このモデルでは、図3.2.2の3角形ABCは正3角形になることを仮定している。3角形ABCが正3角形の場合、頂点Aから線分BCへの垂線の長さは $\sqrt{3} dcf_x / 2$ であり、 y 方向の氷列の数 N_{iy} は $2b_{ly} / \sqrt{3} dcf_x$ に最も近い正の整数とする。また、隣り合う 2 つの氷列の間の距離は下記のようになる。

$$dcf_y = \frac{bl_y}{N_{iy}} \quad (3.2.13)$$

円盤氷群の場合、3 三角形ABCの面積と、3つの円A、B、Cが3三角形ABCの内に占める面積との比は氷群の氷の密接度になり、円の直径 dl_{ic} は下記のように求められる。

$$dl_{ic} = \sqrt{\frac{4}{\pi} C_1 dcf_x dcf_y} \quad (3.2.14)$$

3.3 氷群の運動方程式

このモデルのような、氷の成長・融解を考慮しない流水の力学的モデルでは、風・海流によるせん断応力、コリオリ力、海面の傾きによる水面傾斜力、及び流氷の相互作用による内部応力を外力とする流水の運動方程式と、流氷の質量と密接度の保存式を用いて、流氷の変動を解析する。このモデルでは流水の変動を、氷群の移動と変形の数値解析を通じてシミュレートする。氷群の移動の解析では水の回転を考慮せず、氷群の並進運動のみ考える。氷群の移動は下記のような運動量保存式を用いて解析する。

$$M_i(\bar{v}_i^{t+dt} - \bar{v}_i^t) = \int_t^{t+dt} (A_i \bar{\tau}_a + A_i \bar{\tau}_w - M_i g \nabla(\eta + \bar{\eta}) - M_i \bar{f} \times \bar{v}_i + \bar{F}_i) dt \quad (3.3.1)$$

$$M_i(\bar{v}_i^{t+dt} - \bar{v}_i^t)$$

この項は計算でのタイムステップ dt の間の氷群の運動量の変化を表わしている。

ここで、

$$M_i = \rho_i h_i C_1 b l_x b l_y \quad (3.3.2)$$

は氷群の質量、 ρ_i は氷の密度、 h_i は氷の平均厚さであり、 \bar{v}_i^t と \bar{v}_i^{t+dt} は、タイムステップ dt の前後の氷群内の流水の平均速度である。

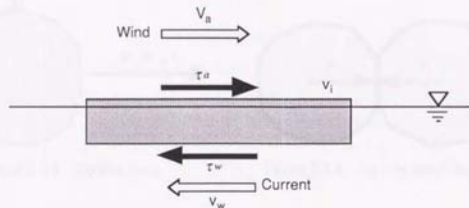


Figure 3.3.1 Shear stress due to the wind and current

\bar{r}_a, \bar{r}_w

これは、風と海流から流水に加えらるる応力を示す項で、下記のような式で表わす。

$$\bar{r}_a = \rho_a C_a |\bar{v}_a - \bar{v}_i| (\bar{v}_a - \bar{v}_i) \quad (3.3.3)$$

$$\bar{r}_w = \rho_w C_w |\bar{v}_w - \bar{v}_i| (\bar{v}_w - \bar{v}_i) \quad (3.3.4)$$

ここで、 ρ_a, ρ_w は各々空気と海水の密度、 C_a は空気と氷の間の抵抗係数、 C_w は海水と氷の間の抵抗係数で、 \bar{v}_a, \bar{v}_w は各々風と海流の速度である。

$-M_i g \nabla(\eta + \eta')$

この項は海面の傾きによる水面傾斜力で、 g は重力加速度、 η は自由表面の高さであり、 η' は氷の排除効果による自由表面の上昇を表わしている。

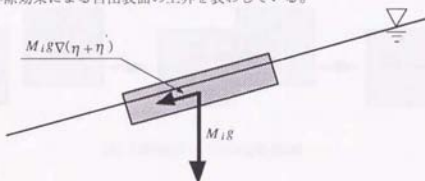


Figure 3.3.2 Sea surface inclination force

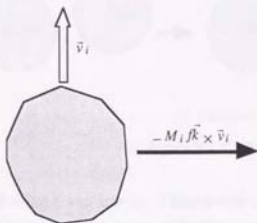


Figure 3.3.3 Coriolis force

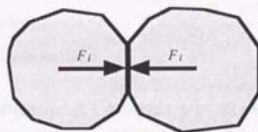


Figure 3.3.4 Ice interaction force

$-M_i f \bar{k} \times \bar{v}_i$

これはコリオリ力である。北半球では氷の進行方向に向かって右側の方向に働く。 f はコリオリのパラメーターであり、 Ω を地球の回転角速度、 ϕ を地理上の緯度とすると下記のようなになる。

$$f = 2\Omega \sin \phi$$

(3.3.5)

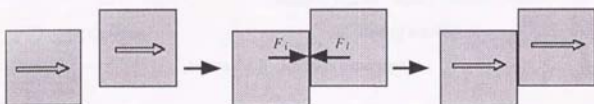
ここで、 \bar{k} は深さ方向の単位ベクトルである。

$$\bar{F}_i$$

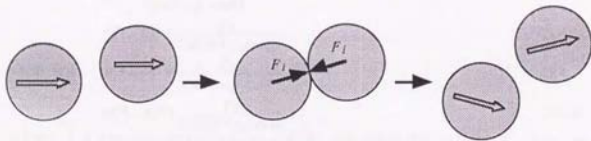
これは流水の相互作用力を示す項である。つまり流水が相互に衝突したり離れたりすることによって生じる力である。この項の定式化については3.5で詳しく述べる。

3.4 運動量の伝達と円盤流水の横移動

流水を矩形盤に単純化し、流水の回転を考慮しない場合の水の衝突は線と線の接触になり、図3.4.1の(a)のように運動量伝達は一定方向に行われ、衝突による流水運動の方向



(a) Collision of rectangle floes



(b) Collision of disk floes

Figure 3.4.1 Collision between floes

変換は現れない。しかし、円盤流水の場合の水の衝突は、点と点の接触となり、図3.4.1の(b)のように異なる方向への運動量の伝達が行われ、衝突の際に運動方向の変化を伴う。それによって、氷を円盤に単純化する場合の流水運動には、矩形盤流水の運動では現れない、横移動 (Lateral Expansion) が生ずる。

図3.4.2のように、1つの円盤流水の水群が固定境界と衝突する場合の流水の横移動について考える。固定境界と衝突する水群内の氷の列は図3.4.2の(b)のように4列と仮定する。

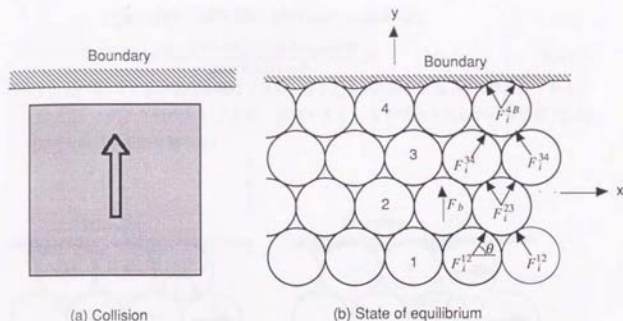


Figure 3.4.2 Ice floes expansion

平衡状態での力の釣り合いの関係から、各々の氷の間の相互作用力は下記のようなる。

$$F_i^{12} = \frac{F_b}{2(\sin\theta + \mu_i \cos\theta)} \quad (3.4.1)$$

$$F_i^{23} = F_i^{12} + \frac{F_b}{2(\sin\theta + \mu_i \cos\theta)} \quad (3.4.2)$$

$$F_i^{34} = F_i^{23} + \frac{F_b}{2(\sin\theta + \mu_i \cos\theta)} \quad (3.4.3)$$

$$F_i^{4B} = F_i^{34} + \frac{F_b}{2(\sin\theta + \mu_i \cos\theta)} \quad (3.4.4)$$

ここで、 θ は運動方向と相互作用力がなす角で、このモデルでは 30° になる。また、 F_b は氷に働く相互作用力を除いた力の合力である。これらの相互作用力によって、氷群の右と左側の端の氷から集団を離れ、 x 方向及び $-x$ 方向へ移動する。

図3.4.3のように氷群の右側の方では、まず1列と3列の右端の氷1と3が、正の x 方向への運動量 $F_{ix}^0 dt_1^0$ を受け、集団を離れる。

$$\begin{aligned} F_{ix}^0 dt_1^0 &= (F_i^{12} + F_i^{23} + F_i^{34})(\cos\theta - \mu_i \sin\theta) \cdot dt_1^0 \\ &= \frac{(1+2+3)F_b(\cos\theta - \mu_i \sin\theta)}{2(\sin\theta + \mu_i \cos\theta)} dt_1^0 \end{aligned} \quad (3.4.5)$$

ここで、 μ_i は氷と氷の間の摩擦係数で、 Δt_1^0 は氷1と3が集団を離れるまでの時間である。続いて、2列と4列の右端の氷2と4が、 x 方向への運動量 $F_{ix}^0 dt_1^0$ を受け、集団を離れる。

$$\begin{aligned}
 F_{ix}^c dt_1^c &= (F_1^{12} + F_1^{23} + F_1^{34} + F_1^{4B})(\cos\theta - \mu_i \sin\theta) \cdot dt_1^c \\
 &= \frac{(1+2+3+4)F_B(\cos\theta - \mu_i \sin\theta)}{2(\sin\theta + \mu_i \cos\theta)} dt_1^c \quad (3.4.6)
 \end{aligned}$$

ここで、 Δt_1^c は氷1と3が集団を離れてから、氷2と4が集団を離れるまでの時間である。引き続き、1列と3列の氷1'と3'が、続いて氷2'と4'が各々x方向への運動量 $F_{ix}^c dt_2^c$ と $F_{ix}^c dt_3^c$ を受け、集団を離れる。

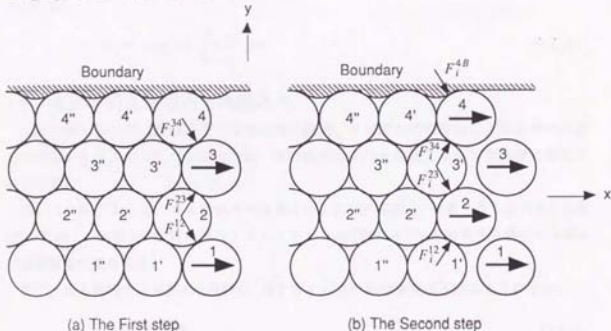


Figure 3.4.3 Procedure of ice floe expansion

固定境界と衝突する水群内の氷の列が n_{iy} 列の場合の x 方向に移動する氷の数は $n_{iy}N_{ix}/2$ であり、衝突によって生ずる x 方向への運動量は下記ようになる。

$$\begin{aligned}
 F_{ix}^R dt &= (F_{ix}^c dt_1^c + F_{ix}^c dt_2^c + F_{ix}^c dt_3^c + F_{ix}^c dt_4^c + \dots \\
 &\quad \dots + F_{ix}^c dt_{n_{iy}/2}^c + F_{ix}^c dt_{n_{iy}/2}^c) \quad (3.4.7)
 \end{aligned}$$

ここで、

$$dt = dt_1^c + dt_2^c + dt_3^c + dt_4^c + \dots + dt_{n_{iy}/2}^c + dt_{n_{iy}/2}^c \quad (3.4.8)$$

$$F_{ix}^c = \frac{[1+2+\dots+(n_{iy}-1)]F_B(\cos\theta - \mu_i \sin\theta)}{2(\sin\theta + \mu_i \cos\theta)} \quad (3.4.9)$$

$$F_{ix}^c = \frac{[1+2+\dots+n_{iy}]F_B(\cos\theta - \mu_i \sin\theta)}{2(\sin\theta + \mu_i \cos\theta)} \quad (3.4.10)$$

である。氷が集団から離れる現象は周期的に起こるので、各々の段階での氷の離れる時間を下記のように仮定することが可能である。

$$dt_1^c = dt_2^c = dt_3^c = dt_4^c = \dots = dt_{n_{iy}/2}^c = dt_{n_{iy}/2}^c = \frac{dt}{2} \quad (3.4.11)$$

したがって、衝突によって生ずる右方向への運動量は下記ようになる。

$$F_{ix}^R dt = (F_{ix}^v + F_{ix}^c) \frac{dt}{2} = \frac{n_{iy} \cdot n_{iy} \cdot F_b (\cos\theta - \mu_1 \sin\theta)}{4(\sin\theta + \mu_1 \cos\theta)} dt \quad (3.4.12)$$

x 方向へ移動する流氷の質量は、衝突する流氷の質量の半分の $(\frac{1}{2})M_1 n_{iy} / N_{iy}$ であり、 dt の間 $F_{ix}^R / ((\frac{1}{2})M_1 n_{iy} / N_{iy}) = 2F_{ix}^R N_{iy} / (M_1 n_{iy})$ の加速度で加速される。氷群の右端の氷の dt の間の右方向への移動距離は $F_{ix}^R N_{iy} dt^2 / (M_1 n_{iy})$ である。したがって、氷群の左端の氷も dt の間に左方向に同じ距離を移動するので、 dt 時間後の氷群の x 方向の大きさは下記のようになる。

$$b_{ix}^{t+dt} = b_{ix}^t + 2 \frac{F_{ix}^R N_{iy}}{M_1 n_{iy}} dt^2 \quad (3.4.13)$$

3.5 流氷の相互作用力（内部応力）

流氷の相互作用力（内部応力）は氷群間の衝突、及び流氷の横移動による氷群の運動量の変動から定式化した。定式化の際、氷の衝突は変形を考慮しない完全非弾性衝突と仮定する。

図3.5.1に示すように、ある時間での氷群Aのx方向の速度 v_{ix}^A が隣り合う氷群Bの速度 v_{ix}^B より速く、氷群Aが計算の際のタイムステップ dt の間に氷群Bと衝突する場合の氷群Aの運動量変化を考える。

まず、ある時間での氷群Aの氷群Bに対するx方向の相対速度は下記ようになる。

$$v_{ix}^{AB} = v_{ix}^A - v_{ix}^B \quad (3.5.1)$$

タイムステップ dt の間に氷群Aと氷群Bが衝突する条件は氷群間の距離 dl と氷群Aと氷群Bの氷間の距離 sf_x^A と sf_x^B を用いて求められる。2つの氷群AとBが dt の間に衝突する条件は下記のようになる。

$$v_{ix}^{AB} dt - dl - \frac{(sf_x^A + sf_x^B)}{2} \geq 0 \quad (3.5.2)$$

2つの氷群AとBが衝突する場合、衝突に関与する氷群AとBの氷列の数 n_{ix}^A 、 n_{ix}^B は下記の不等式を満足する正の整数である。

$$(n_{ix}^A - 1) sf_x^A \leq v_{ix}^{AB} dt - dl - \frac{(sf_x^A + sf_x^B)}{2} < n_{ix}^A sf_x^A \quad (3.5.3)$$

$$(n_{ix}^B - 1) sf_x^B \leq v_{ix}^{AB} dt - dl - \frac{(sf_x^A + sf_x^B)}{2} < n_{ix}^B sf_x^B \quad (3.5.4)$$

タイムステップ dt の間の衝突による氷群Aの運動量変化は、下記の式で求められる。

$$\int_{t_i}^{t_i+dt} F_{ix}^A dt = m_i^A (v_{ix}^A - v_{ix}^A) \quad (3.5.5)$$

$$v_{ix}^A = \frac{m_i^A v_{ix}^A + m_i^B v_{ix}^B}{m_i^A + m_i^B} \quad (3.5.6)$$

$$m_i^A = \frac{n_{ix}^A}{N_{ix}^A} M_1^A, \quad m_i^B = \frac{n_{ix}^B}{N_{ix}^B} M_1^B \quad (3.5.7)$$

ここで、 m_i^A 、 m_i^B は衝突する氷群AとBの流水の質量であり、式(3.5.6)は衝突の際の運動量保存則から求めた式で、2つの氷群AとBが完全非弾性衝突していることを表している。氷群AとBのx方向の衝突に加え、氷群AとBに垂直方向の衝突が同時に行われる場合、式(3.5.6)は下記のように表せる。

$$\dot{v}_{ix} = \frac{m_i^A v_{ix}^A + m_i^B v_{ix}^B + (F_{ise}^{RA} + F_{ise}^{LB})}{m_i^A + m_i^B} \quad (3.5.8)$$

ここで、 F_{ise}^{RA} 、 F_{ise}^{LB} は氷群AとBのy方向の衝突によるx方向の横移動運動量である。

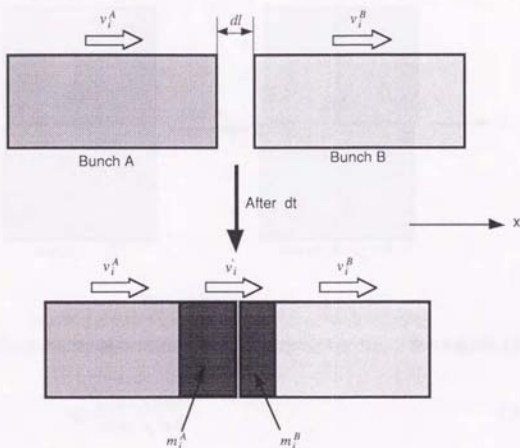


Figure 3.5.1 Axial collision between bunches

x方向の速度が各々 v_{ix}^A 、 v_{ix}^C の隣り合う2つの氷群AとCの摩擦について考えよう。2つの氷群AとCの間の摩擦力は氷群間の相対速度 $v_{ix}^A - v_{ix}^C$ とy方向の相互作用力 F_{iy}^A を用いて下記のように求められる。

$$F_{ix}^A = \text{sign}(v_{ix}^A - v_{ix}^C) \mu_i F_{iy}^A \quad (3.5.9)$$

しかし、場合によっては、計算の際のタイムステップdtの前後の2つの氷群AとCの相対速度 $v_{ix}^A - v_{ix}^C$ 、 $v_{ix}^{A+dt} - v_{ix}^{C+dt}$ が異なる方向になり、摩擦力の方向がタイムステップdt

の間にも変わることも考えられる。DMDFモデルではタイムステップ dt の間の摩擦力の方向の変化を考慮し、摩擦力を下記の式から求めた。

$$F_{ixy}^A dt = \text{sign}(v_{ix}^{A,t} - v_{ix}^{C,t}) \mu_l F_{iy}^A dt^* + \text{sign}(v_{ix}^{A,t+dt} - v_{ix}^{C,t+dt}) \mu_l F_{iy}^A (dt - dt^*) \quad (3.5.10)$$

ここで、 dt^* は摩擦力の方向が変わるまでの時間である。

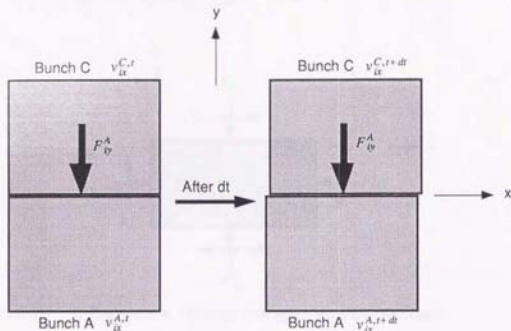


Figure 3.5.2 Shear force on bunch

円盤流水の水群の衝突の場合の水群間の摩擦力の定式化では、下記の摩擦係数を用いた。

$$\mu_l^c = \frac{\sin \theta + \mu_l \cos \theta}{\cos \theta - \mu_l \sin \theta} \quad (3.5.11)$$

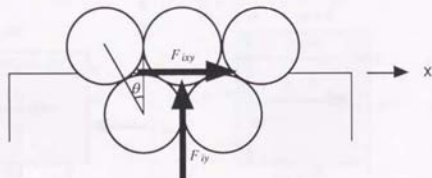


Figure 3.5.3 Shear force on disk bunch

図3.5.4はある1つの氷群に働く全ての相互作用力を示し、氷群に働く相互作用力は下記の式で求める。

$$F_{ix} = F_{ix}^w - F_{ix}^e + F_{ixy}^l - F_{ixy}^n \quad (3.5.12)$$

$$F_{iy} = F_{iy}^l - F_{iy}^n + F_{iyx}^w - F_{iyx}^e \quad (3.5.13)$$

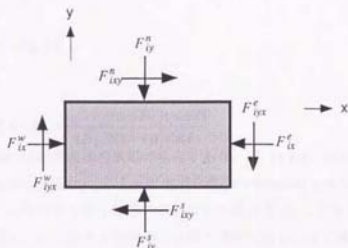


Figure 3.5.4 Total ice interaction force on one bunch

3.6 氷群の移動・変形と再分布

ある時間に、計算格子ごとに1つずつ定義された各々の氷群は氷群の運動方程式(3.3.1)に従って移動し、氷群間の相互作用によって変形する。DMDFモデルでは、計算ステップごとに計算格子に合わせて氷群を定義するので、ある計算ステップに定義され、移動・変形した各々の氷群は、計算が次のステップに移る際に計算格子ごとに新たに定義される氷群に再分布する。

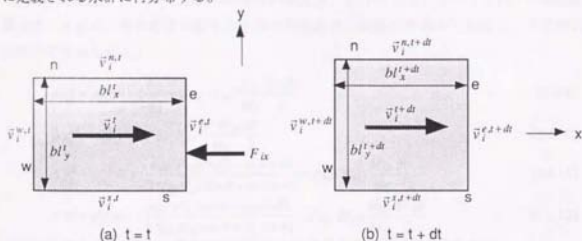


Figure 3.6.1 Ice bunch movement and deformation

氷群の移動と変形は、氷群の4つの辺の移動で表す。図3.6.1のように、ある時刻 t での氷群の速度は v_i^t で、計算の際のタイムステップ dt の間に辺 e が隣りの氷群と衝突し、相互作用力 F_{ix} を受けるような、大きさ $b_{ix}^t b_{iy}^t$ のある氷群を考える。タイムステップ dt の間には辺 e 、 w 、 n 、 s に働く垂直方向の力 F_{ix}^e 、 F_{ix}^w 、 F_{ix}^n 及び、 F_{iy}^s は下記ようになる。

$$F_{ix}^e = -F_{ix} \quad (3.6.1)$$

$$F_{ix}^w = 0 \quad (3.6.2)$$

$$F_{iy}^n = F_{iy}^s = 0 \quad (3.6.3)$$

または、

$$F_{iy}^n = -F_{iy}^s = \frac{n_{ix} \cdot F_{ix} (\cos\theta - \mu_i \sin\theta)}{4 N_{iy} (\sin\theta + \mu_i \cos\theta)} \quad (3.6.4)$$

ここで、式(3.6.3)は矩形流氷の氷群の場合であり、式(3.6.4)は円形流氷の氷群の場合で、衝突による相互作用力 F_{ix} によって生ずる流氷の横移動によるものである。

全ての氷に均一に作用する相互作用力以外の外力成分を \bar{F}_b とすると、時刻 $t+dt$ での円形流氷の氷群の辺 e 、 w に接する氷列の x 方向の速度と辺 n 、 s に接する氷列の y 方向の速度は下記のようになり、

$$v_{ix}^{e,t+dt} = v_{ix}^{t,t} + \left(\frac{F_{ix}^e}{n_{ix}} + F_{bx} \cdot N_{iy} \right) \frac{dt \cdot N_{ix}}{M_i} \quad (3.6.5)$$

$$v_{ix}^{w,t+dt} = v_{ix}^{t,t} + F_{bx} \cdot N_{iy} \frac{dt \cdot N_{ix}}{M_i} \quad (3.6.6)$$

$$v_{iy}^{n,t+dt} = v_{iy}^{t,t} + \left(\frac{2F_{iy}^n}{N_{iy}} + F_{by} \cdot N_{ix} \right) \frac{dt \cdot N_{iy}}{M_i} \quad (3.6.7)$$

$$v_{iy}^{s,t+dt} = v_{iy}^{t,t} + \left(\frac{2F_{iy}^s}{N_{iy}} + F_{by} \cdot N_{ix} \right) \frac{dt \cdot N_{iy}}{M_i} \quad (3.6.8)$$

時間 dt の間の辺 e 、 w の x 方向への移動距離 Δx_i^e 、 Δx_i^w と辺 n 、 s の y 方向への移動距離 Δy_i^n 、 Δy_i^s は、各々の辺に接する氷列の速度変化は線形的であると仮定し、下記の式を用いて求められる。

$$\Delta x_i^e = v_{ix}^{t,t} dt - \left(\frac{F_{ix}}{n_{ix}} + F_{bx} \cdot N_{iy} \right) \frac{N_{ix} dt \cdot dt}{M_i 2} \quad (3.6.9)$$

$$\Delta x_i^w = v_{ix}^{t,t} dt + F_{bx} \cdot N_{iy} \frac{dt \cdot N_{ix} dt}{M_i 2} \quad (3.6.10)$$

$$\Delta y_i^n = v_{iy}^{t,t} dt + \left(\frac{n_{ix} \cdot F_{ix} (\cos\theta - \mu_i \sin\theta)}{2 N_{iy} N_{iy} (\sin\theta + \mu_i \cos\theta)} + F_{by} \cdot N_{ix} \right) \frac{N_{iy} dt \cdot dt}{M_i 2} \quad (3.6.11)$$

$$\Delta y_i^s = v_{iy}^{t,t} dt - \left(\frac{n_{ix} \cdot F_{ix} (\cos\theta - \mu_i \sin\theta)}{2 N_{iy} N_{iy} (\sin\theta + \mu_i \cos\theta)} + F_{by} \cdot N_{ix} \right) \frac{N_{iy} dt \cdot dt}{M_i 2} \quad (3.6.12)$$

上記の関係式から時刻 $t+dt$ での円形流氷の氷群の大きさは下記ようになる。

$$bl_x^{t+dt} = bl_x^t - \frac{F_{ix} N_{ix}}{n_{ix} M_i} \frac{dt \cdot dt}{2} \quad (3.6.13)$$

$$bl_y^{t+dt} = bl_y^t + \frac{n_{ix} \cdot F_{ix} (\cos\theta - \mu_i \sin\theta) dt \cdot dt}{M_i N_{iy} (\sin\theta + \mu_i \cos\theta) 2} \quad (3.6.14)$$

矩形流水の氷群の場合の時間 dt の間の e 、 w 、 n 、 s の移動距離と時間 $t+dt$ での矩形流水の氷群の大きさは下記のようになる。

$$\Delta x_i^t = v_{ix}^t dt - \left(\frac{F_{ix}}{n_{ix}} + F_{bx} \cdot N_{iy} \right) \frac{N_{ix} dt \cdot dt}{M_i 2} \quad (3.6.15)$$

$$\Delta x_i^w = v_{ix}^t dt + F_{bx} \cdot N_{iy} \frac{dt \cdot N_{ix} dt}{M_i 2} \quad (3.6.16)$$

$$\Delta y_i^n = v_{iy}^t dt + F_{by} \cdot N_{ix} \frac{N_{iy} dt \cdot dt}{M_i 2} \quad (3.6.17)$$

$$\Delta y_i^s = v_{iy}^t dt + F_{by} \cdot N_{ix} \frac{N_{iy} dt \cdot dt}{M_i 2} \quad (3.6.18)$$

$$bl_x^{t+dt} = bl_x^t - \frac{F_{ix} N_{ix}}{n_{ix} M_i} \frac{dt \cdot dt}{2} \quad (3.6.19)$$

$$bl_y^{t+dt} = bl_y^t \quad (3.6.20)$$

ある計算ステップで定義され、タイムステップ dt の間に移動、変形した各々の氷群は、計算が次のステップに移る際に計算格子ごとに新たに定義される氷群に再分布する。図3.6.2は流水の移動、変形及び再分布の過程を表す図である。ある計算ステップ i で、流水は図3.6.2(a)のように計算格子1、2、3、4に各々1つずつ、4つの氷群を定義する。各々の氷群は大きさ (bl_x^j, bl_y^j) 、中心の位置 (bc_x^j, bc_y^j) 及び氷の密度 (C_f) を用いて表す。 j は計算格子の番号である。

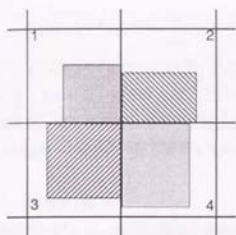
各々の氷群はタイムステップ dt の間、図3.6.2(b)のように移動、変形する。移動、変形後の計算格子1を考えると、図3.6.2(c)のように移動、変形前、計算格子1にあった氷群は位置と大きさを変え、同じ格子内に残るが、計算格子2、3、4にあった氷群の一部は移動、変形前の計算格子を越え、計算格子1に入り込んでいる。図3.6.2(c)の計算格子1内の、異なる特性を持つ4つの氷の集団は図3.6.2(d)のような計算格子内の全ての氷が含まれる最低の大きさを持つ、新たな氷群に質量と運動量を保存しながら下記の再分布式を用いて再分布する。

$$bl_x^{j,t+dt} = x_{max}^j - x_{min}^j \quad (3.6.21)$$

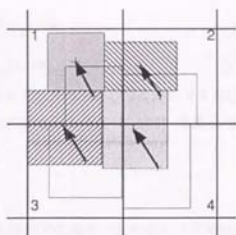
$$bl_y^{j,t+dt} = y_{max}^j - y_{min}^j \quad (3.6.22)$$

$$bc_x^{j,t+dt} = \frac{x_{max}^j + x_{min}^j}{2} \quad (3.6.23)$$

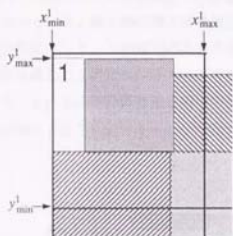
$$bc_y^{j,t+dt} = \frac{y_{max}^j + y_{min}^j}{2} \quad (3.6.24)$$



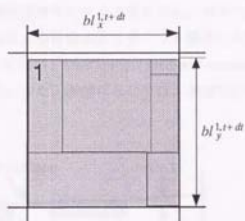
(a) $t = t$



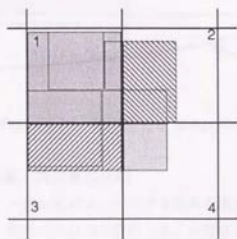
(b) Movement and deformation



(c) Computation mesh 1



(d) Redistribution



(e) $t = t + dt$

Figure 3.6.2 Redistribution of Pack ice

$$C_j^k h_j^{k,t+\Delta t} b_j^{k,t+\Delta t} = \sum_{k=1}^{N_s} C_j^k h_j^{k,t} b_j^{k,t+\Delta t} b_j^{k,t+\Delta t} \quad (3.6.25)$$

$$C_j^k h_j^{k,t+\Delta t} b_j^{k,t+\Delta t} \bar{v}_j^{k,t+\Delta t} = \sum_{k=1}^{N_s} C_j^k h_j^{k,t} b_j^{k,t+\Delta t} b_j^{k,t+\Delta t} \bar{v}_j^{k,t+\Delta t} \quad (3.6.26)$$

ここで、 k は移動、変形する前、氷群が定義された計算格子の番号に対応する数字で、 m は移動、変形後の計算格子 j に残る氷の集団の数である。式 (3.6.25) は質量の保存を、式 (3.6.26) は運動量の保存を表している。

3.7 海流の解析

海流の解析には、流水の運動に直接関係する海面での海水の流れをより正確に評価するため、多層モデルを用いた。鉛直方向の海水の運動は水平方向の海水の運動に比べ、無視できる程の大きさと仮定し、計算領域を鉛直方向に分け、各々の層を2次元的に取り扱っている。層と層の間では摩擦による運動量伝達が行われると仮定した。海水の運動方程式として、自由表面の高さの分布と、流氷による自由表面上昇による静水圧の変動を考慮した2次元 Navier-Stokes 方程式の積分形を用い、MacCormack predictor-corrector スキームによる差分計算法を用いて解析を行った。また、座標系としては、水深方向を z 方向とする3次元デカルト座標系を用いた。

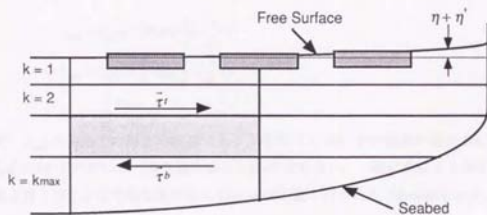


Figure 3.7.1 Modeling of ocean flow

3.7.1 Ekman 吹送流と鉛直方向の層の分割

広く深い海の上を吹く、一様な風によって生ずる海水の流れを考えよう。当然流れも圧力も水平方向に一様で、鉛直方向にのみ変化する。定常状態での海水の運動方程式は下記のようなになる。

$$-f v_{wy} = \frac{d}{dz} (E_z \frac{d v_{wx}}{dz}) \quad (3.7.1)$$

$$f v_{wx} = \frac{d}{dz} \left(E_z \frac{d v_{wy}}{dz} \right) \quad (3.7.2)$$

ここで、 E_z は鉛直方向の渦粘性係数で、 f はコリオリパラメーターである。鉛直方向の渦粘性係数 E_z が一定であると仮定すると式(3.7.1)と(3.7.2)の直接積分が可能になり、海水の流速は下記のように求められる。

$$v_{wx} = A e^{\frac{\pi}{D_f} z} \cos\left(\frac{\pi}{D_f} z + c\right) + B e^{-\frac{\pi}{D_f} z} \cos\left(\frac{\pi}{D_f} z + d\right) \quad (3.7.3)$$

$$v_{wy} = A e^{\frac{\pi}{D_f} z} \sin\left(\frac{\pi}{D_f} z + c\right) - B e^{-\frac{\pi}{D_f} z} \sin\left(\frac{\pi}{D_f} z + d\right) \quad (3.7.4)$$

$$D_f = \pi \sqrt{\frac{2 E_z}{f}} \quad (3.7.5)$$

ここで、 D_f は海水の流れ方向が海面での流れ方向と正反対になる水深であり、 A 、 B 、 c 及び d は境界条件から得られる定数である。無限水深の場合、海底での流速は0なので、定数 A は0になる。風から水面に与えられるせん断応力を $\bar{\tau}_{aw}$ とすると、水面での境界条件は下記のようになる、

$$\bar{\tau}_{aw} = \bar{k} \times \rho_w E_z \left(\frac{d v_w}{dz} \right)_{z=0} \quad (3.7.6)$$

ここで、 ρ_w は海水の密度である。風が吹く方向を y 方向とすると、 $\tau_{awx} = 0$ になり、海流の流速は下記のようになる。

$$v_{wx} = v_{w0} e^{-\frac{\pi}{D_f} z} \cos\left(\frac{\pi}{4} - \frac{\pi}{D_f} z\right) \quad (3.7.7)$$

$$v_{wy} = v_{w0} e^{-\frac{\pi}{D_f} z} \sin\left(\frac{\pi}{4} - \frac{\pi}{D_f} z\right) \quad (3.7.8)$$

$$v_{w0} = \frac{\bar{\tau}_{awy}}{\rho_w \sqrt{E_z f}} \quad (3.7.9)$$

ここで、 v_{w0} は海面での海水の流速であり、海面($z=0$)での海水の流れ方向は風の方向から右に45°ずれている(南半球の場合左に45°ずれる)。一般に風による海水の流れを吹送流と言うが、ここで得た解は特にEkman吹送流と言われる(Sverdrop et al., 1942)。

このモデルでは、Ekman吹送流の流速分布を用いて、計算領域の鉛直方向の層の分割を行った。すなわち、鉛直方向の層は、計算領域の平均風速を用いて求められたEkman吹送流の流速分布を用いて、各々の層の水平方向の流量が一定になるように層の高さを決め、図3.7.2のように計算領域の鉛直方向の分割を行った。このモデルでは、海水の密度 ρ_w を一定と仮定し、風から水面に与えられるせん断応力 $\bar{\tau}_{aw}$ と鉛直方向の渦粘性係数 E_z は風速の関数として取り扱っている。

$$\int_{z_1}^{z_2} e^{-\frac{\pi}{D_f} z} dz = \int_{z_1}^{z_2} e^{-\frac{\pi}{D_f} z} dz = \int_{z_1}^{z_2} e^{-\frac{\pi}{D_f} z} dz = \dots = \int_{z_{m-1}}^{z_m} e^{-\frac{\pi}{D_f} z} dz \quad (3.7.10)$$

$$dz_1 = z_1, \quad dz_2 = z_2 - z_1, \quad \dots, \quad dz_m = h - z_{m-1} \quad (3.7.11)$$

ここで、 h は計算領域の水深、 km は鉛直方向の層の数で、 dz_k は k -番目の層の厚さである。

一方、このモデルでは海水の流れ方向が海面での流れ方向と正反対になり、流速が海面流速の $e^{-\pi}$ (0.043) 倍になる水深 $z=D_f$ を計算水深とし、水深が $z=D_f$ より深い海域では $z=D_f$ を境界として取り扱っている。勿論、水深が $z=D_f$ より浅い海域では海底面を境界にしている。水深 $z=D_f$ での境界条件として、深海流がある場合は深海流の流速を、深海流がない場合は流速0を用いている。深海流がない場合の吹送流の反復計算の結果によれば、計算水深 $z=D_f$ より深いところでの流速の海面流速への影響はほとんどないと見なせる。図3.7.3はこのモデルによる、風速が10m/sec、コリオリパラメータが $0.000144s^{-1}$ (緯度 80° の北半球) の場合の吹送流の計算結果である。図3.7.3の(a)は計算水深 $z=D_f$ を用いた場合の海面流速のモデル計算結果 (実線) で、無限水深での理論値 (破線) とよく一致している。理論値と計算結果との間に見られる若干の食い違いは、計算結果が層の平均値を表すためである。風の方向と同じ方向の海面流速と風の方向と垂直方向の水面流速が一致しているのは、海面での海水の流れ方向が風の方向と 45° ずれているのを意味する。図3.7.3の(b)は水深が $z=D_f$ より浅い水深20mの領域での海面流速の計算結果で、海底面の影響が大きく現れており、海面流速の絶対値は、(a)の場合と大差がないものの、風と海面流がなす角が 45° より小さくなっている (この場合、 21°) 。

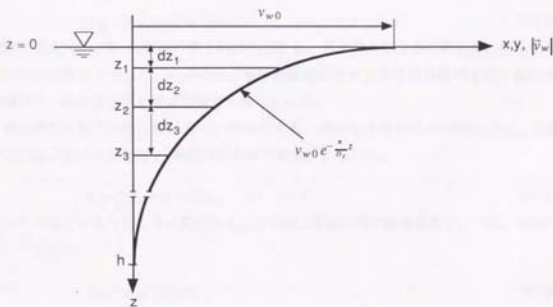


Figure 3.7.2 Division of water flow layer

3.7.2 海水流れの支配方程式

海水流れの支配方程式である海水の連続式と運動方程式は下記のようになる。

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{\partial Q_{wx}}{\partial x} + \frac{\partial Q_{wy}}{\partial y} = 0 \quad (3.7.12)$$

$$\frac{\partial q_{wx}}{\partial t} + v_{wx} \frac{\partial q_{wx}}{\partial x} + v_{wy} \frac{\partial q_{wx}}{\partial y} - f q_{wy} = -g \frac{\partial(\eta + \tau)}{\partial x} dz_k + \frac{\tau_{xx} + \tau_{yy}}{\rho_w} + 2E_{xx} \frac{\partial^2 q_{wx}}{\partial x^2} + E_{yx} \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{\partial q_{wx}}{\partial x} + \frac{\partial q_{wy}}{\partial y} \right) \quad (3.7.13-1)$$

$$\frac{\partial q_{wy}}{\partial t} + v_{wx} \frac{\partial q_{wy}}{\partial x} + v_{wy} \frac{\partial q_{wy}}{\partial y} + f q_{wx} = -g \frac{\partial(\eta + \tau)}{\partial y} dz_k + \frac{\tau_{xy} + \tau_{yx}}{\rho_w} + 2E_{yy} \frac{\partial^2 q_{wy}}{\partial y^2} + E_{xy} \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\partial q_{wx}}{\partial x} + \frac{\partial q_{wy}}{\partial y} \right) \quad (3.7.13-2)$$

$$q_{wx} = v_{wx} dz_k, \quad q_{wy} = v_{wy} dz_k \quad (3.7.14)$$

$$Q_{wx} = \int_{z_0}^{\eta} v_{wx} dz, \quad Q_{wy} = \int_{z_0}^{\eta} v_{wy} dz \quad (3.7.15)$$

ここで、 $\bar{\tau}_i$ 、 $\bar{\tau}_b$ は各々の層の上面、底面に働く摩擦によるせん断応力であり、 q_{wx} と q_{wy} は各々の層のx方向とy方向の流量で、 Q_{wx} と Q_{wy} は全流量である。 E_{xx} 、 E_{xy} 、 E_{yx} 、 E_{yy} は水平方向の渦粘性係数であり、海流の研究では次ような式が一般的に用いられている。

$$E_{xx} = dx^{\frac{1}{3}} \times 10^{-6} m^2/s \quad (3.7.16)$$

$$E_{xy} = E_{yx} = (dxdy)^{\frac{1}{3}} \times 10^{-6} m^2/s \quad (3.7.17)$$

$$E_{yy} = dy^{\frac{1}{3}} \times 10^{-6} m^2/s \quad (3.7.18)$$

運動方程式 (3.7.13) の左辺の第1項は加速度を、第2項と第3項は対流を、第4項はコリオリ力を表す。そして、右辺の第1項は海面傾斜力を、第2項は層の上面、底面での摩擦力を、第3項と第4項は粘性力を表している。

最上層の上面でのせん断応力は、風から水面に直接与えられるせん断応力 $\bar{\tau}_{aw}$ と流水と海水によるせん断応力 $\bar{\tau}_w$ の組み合わせで表す。すなわち、

$$\bar{\tau}_i = C_i \bar{\tau}_w + (1 - C_i) \bar{\tau}_{aw} \quad \text{for } k = l \quad (3.7.19)$$

風から水面に与えられるせん断応力 $\bar{\tau}_{aw}$ は空気と海面の間の摩擦係数 C_d (Wu, 1982) を用いて求めた。

$$\bar{\tau}_{aw} = \rho_a C_d |\bar{V}_a| \bar{V}_a \quad (3.7.20)$$

$$C_d = (0.8 + 0.06 |\bar{V}_a|) \times 10^{-3} \quad (3.7.21)$$

ここで、 ρ_a は空気の密度である。流水と海水によるせん断応力 $\bar{\tau}_w$ は、氷群の運動方程式と共通の式 (3.3.4) を用いている。

最上層の底面から最下層の上面までのせん断応力は、下記の式を用いて求めた。

$$\bar{\tau}_b^{k-1} = -\bar{\tau}_i^k = \rho_w E_z \frac{\partial \bar{V}_w}{\partial z} \quad \text{for } k = 2 \text{ to } km \quad (3.7.22)$$

最底面では *no-slip* 条件を用いた。鉛直方向の渦粘性係数 E_z は Ekman (1905) と Thorade (1914) の観測式を基に、このモデルに合わせて修正した開放領域での渦粘性係数 E_{20} と計算格子の大きさ及び、氷の密接度のパラメーターを用いて求めた。

$$E_z = (1 - 0.5 C_E) \cdot E_{20} \quad (3.7.23)$$

ここで、計算格子の大きさと氷の密接度のパラメーター C_E は、関心地点を中心にする大きさ $20\text{km} \times 20\text{km}$ の正方形領域の平均の氷の密接度であり、開放領域での渦粘性係数 E_{20} は下記のようになる。

$$\rho_w E_{20} = \left\{ \begin{array}{ll} 0.114 |\bar{v}_d|^3 & |\bar{v}_d| < 4 \text{ m/sec} \\ 5.584 |\bar{v}_d| - 15.04 & 4 \text{ m/sec} < |\bar{v}_d| \leq 8 \text{ m/sec} \\ 0.463 |\bar{v}_d|^2 & 8 \text{ m/sec} < |\bar{v}_d| \end{array} \right\} \quad (3.7.24)$$

3.8 まとめ

DMDP モデルは、比較的狭い領域での海水の短期変動を取り扱う、かつての連続体モデルと個別要素モデルの両方の特性を含む、中間的なモデルである。このモデルを用いることによって、連続体モデルでは表現できない流水の離散的な特性を表せるとともに、個別要素モデルに比べより多くの流水を、短時間で計算できる。このモデルは、流水を計算格子に合わせて長方形の氷の集団、すなわち氷群に分解し、氷群の運動と変形の数値解析を通じて流水運動をシミュレートする。また、流水の相互作用力は氷群間の衝突及び、流水の横移動による氷群の運動量の変化から定式化する。さらに、流水の運動と海水の流れを同時に解析することによって、流水の運動に及ぼす海流の影響を直接に考慮することができる。このモデルの定式化には、次のような仮定が用いられている。

- 氷群を円盤または、矩形盤の集団と考える。
- 氷群の氷の密接度、氷の大きさ、流速など氷群に関わる全ての物理量は、氷群の内部で一定であると仮定する。
- 流水運動は並進運動のみと考える。
- 流水の衝突は、変形のない完全非弾性衝突と仮定する。
- 流水の相互作用力は、計算の際のタイムステップの間一定と仮定する。
- 流水の破壊及び重合はないことと仮定する。

第4章 模擬氷の漂流実験

流水運動の様子や、流水と海洋構造物との相互作用のメカニズムの把握のため、東京大学生産技術研究所千葉実験所の風路付造波回流水槽にて、模擬氷を用いた漂流実験を行った。風と潮流による模擬氷の自由漂流や、水槽内に設置した構造物による模擬氷の流れの変動及び構造物と模擬氷との相互作用力の観察・計測を行った。

4.1 実験設備

実験に用いられた東京大学生産技術研究所千葉実験所の風路付造波回流水槽は、風・潮流の順逆の向きに自由な組合せが可能な装置である。図4.1.1は風路付造波回流水槽の概要図で、水槽の主要目を表4.1.1に示す。

模擬氷は比重が実際の海水に最も近い、比重0.912のポリプロピレン製を用いた。実験では、直径5cm、厚さ1.5cmの円盤と厚さ1.5cmの5cm×5cmの矩形盤の2種類の模擬氷が用いられた。図4.1.2は実験で用いられた模擬氷を示す。模擬氷の大きさは水槽の大きさと実験条件に合わせて決定した。

水槽内に設置する構造物は模擬氷と構造物との相互作用力の計測の際、水の流れの影響を少なくするため、水を自由に通す網を用いて作った。実験には、大きさ30cm×30cm×5cmの網状構造物(図4.1.3)が用いられた。

模擬氷と構造物との相互作用力の計測には、計測時間と相互作用力の関係を考慮し、最大500gfの前後及び、横方向の力と1.6kgf-cmのモーメントの計測が可能な3分力計を用いた。図4.1.4は設備配置の概要図である。

4.2 実験条件

実験は水槽の水深を0.9mとし、水槽の下流側の長さ8m、幅1.8mの実験領域(図4.2.1)を設け、実験領域の中央の長さ4m、幅1.8mの領域で、観察及び計測を行った。流水の流れの様子や流水と海洋構造物との相互作用のメカニズムの把握のため、約30秒の観測時間が必要と判断し、それに合わせて模擬氷の速度、風速及び流速を決めた。実験での風速及び潮流の速度の決定の際には風速を重視し、先に風速を決め、模擬氷の計画速度を満たすよう、潮流の速度を決めた。風速は、風によって水槽の水面に発生する波による模擬氷への冠水が起こらないような最大速度とした。実験で用いられた風の代表速度は3.2m/secで、潮流の代表速度は115mm/secである。

4.3 水の流速と風速の計測

観測領域内の流速の分布や風速の分布の把握のため、観測領域の15点(図4.2.1の○印)

での水面下15mmの流速と水面上50mmの風速の計測を行った。また、観測領域の中心での流速の鉛直分布と風による流速の変動の把握のため、潮流のみの場合と、風と潮流両方の場合の流速の計測を図4.3.1に示す7つの水深で行った。風速の計測にはビトー管風速計を、流速の計測には翼車式流速計を用いた。

図4.3.2は観測領域の水面上50mmでの風速の計測結果である。風速は水槽の中央で遅く、水槽の内側と外側で速い。また、水槽の内側が外側よりやや速い分布になっている。図4.3.3は観測領域の水面下15mmでの流速の計測結果である。流速は計測領域の上流側から領域の中心（上流側から2m）付近までは徐々に速くなり、風速と同様に水槽の中央で遅く、水槽の内側と外側で速い分布になっているが、領域の中心を過ぎてからは、ほぼ一定の流速になっている。

流速の鉛直分布の計測結果を図4.3.4に示す。□印は潮流のみの場合の流速の分布で、◇印は風と潮流両方の場合の流速の分布である。潮流のみの場合の流速の鉛直分布は、水面付近で一番遅く、水深100mm付近まで徐々に速くなり、更に水深が深くなるに伴い速くなる。しかし、風と潮流両方の場合の流速分布は、風の影響によって水面付近で速くなるもの水深による変動が激しい。水深150mmでは2つの場合の流速がほぼ一致していることから、この実験条件での風の影響が及ぶ水深は150mmと考えられる。

4.4 模擬氷の自由漂流

4.4.1 模擬氷の抵抗係数

実際の流氷の受ける抵抗力は、主に氷と海水の間の摩擦によるものである。しかし、模擬氷の場合の水に対する主な抵抗力は模擬氷の形状抵抗になる。図4.4.1は模擬氷の抵抗係数の計測結果である。抵抗係数は下記のように与えられる。

$$C_w = \frac{\text{Drag}}{\frac{1}{2} \rho_w S_f v_w^2} \quad (4.4.1)$$

ここで、 S_f は模擬氷の平面断面積である。模擬氷の抵抗係数は、矩形盤90°の場合の流速11cm/sec付近での値を除くと、流速が遅くなるに伴い大きくなっていく。それは模擬氷の周りに発生する波の影響によるものと考えられる。

4.4.2 模擬氷の単独漂流

風と潮流が十分に発達した水槽の計測領域の上流側の中央（図4.4.2の(a)のD点と(b)のR点）に1つの円盤、または矩形盤模擬氷を置き、模擬氷の自由な漂流の観測を行った。図4.4.2は模擬氷の漂流の観測写真から得られた円盤（図4.4.2の(a)）、または矩形盤（図4.4.2の(b)）の軌跡である。模擬氷の位置は1秒間隔で描かれている。模擬氷は風と潮流に加速され、置かれてからおよそ6秒後までは徐々に速くなり、その後はほぼ一定の速さに

なる。漂流の速度は矩形盤の方が約17.5cm/secで、円盤の約17.0cm/secより若干速い。模擬水の漂流に現れる、潮流の流れに対し垂直方向への動きは模擬水の回転の影響と考えられる。図4.4.2の(b)の矩形盤の場合、矩形盤は運動を始めてからおよそ8秒後までは時計方向の回転を、8秒後から16秒後までは反時計方向の回転を、その後は時計方向の回転をし、矩形盤の運動もそれに合わせ、潮流の流れ方向に対し右、左、右方向に動いている。

4.4.3 模擬水の集団漂流

図4.4.3のように計測領域の上流側の中央の80cm×90cmの領域に模擬水の集団を置き、風と潮流が十分に発達した後、模擬水を開放する方法で、模擬水の集団漂流の実験を行った。水面の模擬水は風と潮流が十分に発達するまで、集団から離れないように拘束した。模擬水の拘束によって、模擬水を放す前の水面には水槽の中央と内側及び外側に大きな流速の差が生ずる。図4.4.4と図4.4.5は円盤模擬水の集団と矩形盤模擬水の集団の漂流の観測の写真で、図4.4.6は円盤模擬水と矩形盤模擬水を混ぜ合わせた集団の漂流の観測の写真である。円盤模擬水の場合は、初期の水面での流速の差がそのまま模擬水の動きに現れ、初期の流速が速い水槽の内側及び外側の模擬水が水槽中央の模擬水より速い速度で動く。また、上流側の水面には水槽の中央から内側及び外側への水の流れが生じ、水槽の中央から内側及び外側へ模擬水の動きが現れる。

図4.4.5の矩形盤模擬水の場合には、模擬水と模擬水との間に水の表面張力が働き、模擬水の集団からの離れはなかなか現れなかったが、その分水槽の中央を基準に内側の集団には反時計方向の回転モーメントが、外側の集団には時計方向の回転モーメントが働き、水槽の中央を基準に、内側の模擬水の集団と外側の模擬水の集団が反対方向に回転する動きが現れる。円盤模擬水と矩形盤模擬水を混ぜ合わせた模擬水の集団の漂流では上記の2つの例の中間的な動きが現れる。集団の漂流の速さは模擬水の単独漂流と違って、円盤模擬水の集団が速く、矩形盤模擬水の集団が遅かった。それは矩形盤模擬水の集団の漂流の場合に現れる、水の表面張力の働きによる矩形盤模擬水と矩形盤模擬水の吸着により、矩形盤模擬水の空気抵抗が減少したためと考えられる。

4.5 網状構造物周りの模擬水の漂流

4.5.1 模擬水と網状構造物との衝突

30cm×30cm×5cmの網状構造物を水槽の中央に設置し、1つの模擬水が構造物に衝突する際の衝突力の計測を行った。模擬水は単独漂流の場合と同様に、風と潮流が十分に発達した水槽の上流側の中央に置き、構造物と衝突する直前まで自由漂流させた。構造物は衝突面と模擬水の漂流方向が垂直になるようセットし、模擬水が構造物と衝突するとき、漂流の速度が一定になるよう、模擬水の置く位置を、構造物の上流側2mの地点と

した。構造物に働く力の計測ではサンプリングの間隔を0.5ms、1ms、2ms、5msとし、計測での時間依存性も同時に調べた。

図4.5.1、図4.5.2、図4.5.3、図4.5.4はサンプリングの間隔が各々0.5ms、1ms、2ms、5msの場合の円盤模擬氷の衝突により構造物に働く力の計測結果で、最大値はサンプリングの間隔と関係なくおよそ100gfである。図4.5.5はサンプリングの間隔が1msの場合の構造物に働く力の周波数スペクトラム図で、図4.5.5の(a)は衝突が起こる前の周波数スペクトラム、図4.5.5の(b)は衝突が起こる直前からの周波数スペクトラム、図4.5.5の(c)は全計測区間の周波数スペクトラムである。この実験の場合、衝突により構造物に働く力のスペクトラム図には、4つのスペクトル密度のピークが現れる。ピークA、B、Dは衝突と関係なく現れる、言わばシステムの振動によるものと思われる。特にピークBの周波数25.0Hzは検力計の固有周波数と一致している。ピークAの周波数は6.84Hzで、ピークDの周波数は73.1Hzである。周波数56.4Hzで現れるピークCは模擬氷と構造物の衝突によって発生する構造物の振動によるものと思われる。

図4.5.6は矩形盤模擬氷の衝突により構造物に働く力の計測結果で、サンプリングの間隔は2msである。矩形盤模擬氷の場合は同条件での円盤模擬氷(図4.5.3)の場合に比べ、力の最大値はほとんど変わらないが、衝突後の振動の取まりが早い。その理由は矩形盤と構造物は面と面の安定な接触であるのに対し、円盤と構造物は面と線の不安定な接触であるためである。

4.5.2 網状構造物周りの模擬氷集団の漂流

図4.5.7の(a)のように水槽の中央に30cm×30cm×5cmの網状構造物を設置し、上流側から流れてくる模擬氷の集団との相互作用の観測を行った。模擬氷の集団の配置や初期の漂流方法は模擬氷の集団の自由漂流の場合と同様である。模擬氷と構造物との相互作用力の計測には、Fx、Fy、Mzが計測可能な3分力計を用いた。風及び潮流方向をx方向、水槽の中央から内側に向かう方向をy方向、水深方向をz方向とした。実験は、構造物の側面における法線と潮流の流れ方向となす角 β が、0°、30°、45°の3つの条件で行われた。周波数スペクトラムのスペクトル密度は次の式で定義した。

$$dB = 10 \log_{10} \frac{|a_i + i b_i|}{N} \quad i = 1, 2, 3, \dots, N/2 - 1 \quad (4.5.1)$$

ここで、 a_i 、 b_i はフーリエ係数であり、 N はサンプル数である。

図4.5.8、図4.5.10は $\beta = 0^\circ$ の場合の円盤模擬氷の漂流と、構造物と模擬氷との相互作用の観測結果で、図4.5.9は図4.5.8の(a)の相互作用力Fxの周波数スペクトラム図である。相互作用力の計測の際のサンプリングの間隔は2msで、計測時間は16秒である。円盤模擬氷の場合の相互作用力の計測は、模擬氷の漂流開始後約16秒から行った。模擬氷が構造物

と衝突する前の模擬水の漂流の様子は、模擬水の集団の自由漂流と同様に水槽の内側及び外側の模擬水が水槽中央の模擬水より速い速度で、潮流とはほぼ同じ方向に移動する。この実験では円盤模擬水の集団の密接度が高いため、模擬水の集団の最前列が構造物と衝突するとはほぼ同時に構造物の上流側の模擬水のはほとんどが衝突に参加する円盤模擬水の集団の最初の衝突が起きる。最初の衝突の際、円盤模擬水の集団は構造物との衝突によって x 方向の運動量が減少すると同時に円盤の衝突によって y 方向の運動量が生じ、模擬水の集団には y 方向及び $-y$ 方向への動きが現れる。続いて第2、第3、第4の衝突が起き、構造物の上流側の円盤模擬水のはほとんどは構造物を過ぎて構造物の下流側に移動し、構造物の上流側には1列の模擬水が残る。図4.5.8の x 方向の相互作用力 F_x の計測結果に現れる4つのピークは、このような円盤模擬水の集団の衝突の様子とよく一致している。図4.5.9の F_x の周波数スペクトラム図にも、図4.5.5の1つの模擬水の衝突による力の周波数スペクトラム図には現れない、円盤模擬水の集団の衝突によるものと思われる周波数4.76Hzでのスペクトラル密度のピークが現れる。模擬水の集団の衝突が終わった後、 F_x と M_z に現れるピークは円盤と構造物の不安定な接触によるものである。

図4.5.11、図4.5.12、図4.5.13は $\beta=0^\circ$ の場合の矩形盤模擬水の漂流と、構造物と模擬水との相互作用の観測結果である。相互作用力の計測の際のサンプリングの間隔は2msで、計測時間は16秒である。矩形盤模擬水の場合の相互作用力の計測は模擬水の漂流開始後、約15秒から行った。矩形盤模擬水の場合も模擬水が構造物と衝突する前は、模擬水の集団の自由漂流と同様に移動する。矩形盤模擬水の場合の衝突は円盤模擬水の場合と同様に、集団的な衝突が起きるが、最初の衝突の際、ほとんどの x 方向の運動量を失う。矩形盤模擬水の集団は水槽の中央を基準に、内側の模擬水の集団と外側の模擬水の集団が反対方向に回転しながら移動するため、水槽内側の模擬水の集団と外側の模擬水の集団の2つの模擬水の集団に分けられ各々独立に運動し、構造物との衝突も独立に行われる。この実験の場合は、水槽の内側の集団が先に構造物と衝突し、続いて若干の時間差をおいて外側の集団が衝突する。図4.5.11の(c)の z 方向の相互作用モーメントの計測結果には、このような衝突の様子を示す鋭い正負の2つのピークが現れている。

図4.5.14、図4.5.15、図4.5.16は $\beta=30^\circ$ の場合の円盤模擬水の漂流と、構造物と模擬水との相互作用の観測結果で、図4.5.17、図4.5.18、図4.5.19は $\beta=45^\circ$ の場合の円盤模擬水の漂流と、構造物と模擬水との相互作用の観測結果である。2つの場合ともに、模擬水と構造物との衝突に時間差が生ずるため、相互作用力のピークの数が多くなり、最大ピークの値は低くなる。 $\beta=30^\circ$ の場合は、構造物と模擬水の衝突が y 方向対し非対称的に起きるため、他の場合に比べ y 方向の相互作用力 F_y が大きくなっている。

4.6 水の流れを妨げる構造物周りの模擬氷の漂流

図4.6.1の(a)のように、水の流れを制止する構造物を水槽の中央に設置し、構造物周りの円盤模擬氷の漂流と、構造物と模擬氷との相互作用の観測を行った。構造物の大きさは網状構造物と同様の $30\text{cm} \times 30\text{cm} \times 5\text{cm}$ 、 $\beta=0^\circ$ 、相互作用力の計測の際のサンプリングの間隔は 2ms 、計測時間は 16秒 である。相互作用力の計測は模擬氷の漂流開始後、約 19秒 から行った。図4.6.2、図4.6.3、図4.6.4は観測結果である。また、図4.6.1の(b)のように水の流れを妨げる柱を構造物の下に置き、底固定海洋構造物と同様の潮流条件での模擬氷の漂流実験を行った。柱の断面の大きさは構造物と同様の $30\text{cm} \times 30\text{cm}$ である。相互作用力の計測は模擬氷の漂流開始後、約 21秒 から行った。観測の結果を図4.6.5、図4.6.6、図4.6.7に示す。

水の流れを妨げる構造物を用いた場合の模擬氷の漂流には、構造物による水の流れの変化による影響が大きく作用する。まず、構造物だけの場合は、図4.6.1の(a)に示すように構造物の上流側の水面付近に水の流れがせき止められる淀み領域が形成され、模擬氷と構造物との衝突を若干遅らせる。しかし、相互作用力の最大値への影響はほとんど現れない。淀み領域形成の影響は衝突前より衝突後の模擬氷の運動に大きく現れる。網状構造物の場合には構造物と模擬氷の集団との衝突後、模擬氷の横移動が起き、1列の模擬氷を除く全ての模擬氷が衝突後すぐ構造物を過ぎて、下流側に移動する。ところが、この場合は淀み領域が形成されることによって、模擬氷の水に対する相対速度が生じず衝突後の模擬氷への運動量の伝達が行われないため、水の淀み領域に模擬氷の停滞領域が形成される。このような現象はx方向の相互作用力 F_x の計測結果にも現れ、模擬氷の集団の衝突が終わった後に現れるピークの数が網状構造物の場合に比べ、少ない。

水の流れを妨げる構造物と柱の両方を用いた場合には、図4.6.1の(b)に示すように構造物の上流側に淀み領域が形成されるとともに構造物に沿って構造物を回り込む流れが生ずる。模擬氷はこれらの影響を受け、構造物に近づくに連れてx方向の漂流速度を下げるとともにy方向及び-y方向の漂流速度を上げ、構造物との衝突寸前、流れの方向を変えて構造物を回り込むように流れて行く。このような模擬氷の運動方向の変化によって、x方向の相互作用力 F_x の最大値は柱がない場合に比べおよそ $1/3$ に減少し、模擬氷の停滞領域も現れない。ちなみに、漂流開始から構造物と衝突するまでの所要時間は 24秒 で、網状構造物の場合の 21秒 、水の流れを妨げる構造物だけの場合に比べ一番遅かった。

4.7 まとめ

以上の風と潮流による模擬氷の自由漂流や水槽内に設置した構造物による模擬氷の流れの変動及び構造物と模擬氷との相互作用力の観察・計測を通じて流氷の運動や流氷と

構造物との相互作用の特徴について、下記のようにまとめられる。

1. 流氷と水はお互いに影響を及ぼし合うので、流氷の変動を予測するためには、海面での水の流れの解析が流氷運動の解析と同時に行われなければならない。模擬氷の自由漂流実験では、模擬氷の漂流速度と水面での水の流速との関係が顕著に現れる。模擬氷の拘束によって、模擬氷を開放する前の水面には水槽の中央と内側及び外側に大きな流速の差が生ずる。また、初期の水面での流速の差がそのまま模擬氷の動きに現れている。

2. 流氷の形によって、運動の様子が異なるので、流氷の形のモデル化には特に注意する必要がある。実験に用いられた円盤と矩形盤の2つの形は、実際の流氷の形とかなり異なっているが、実際の流氷運動の両極端を表す例として意味があり、実際の流氷運動や流氷と構造物との相互作用は2つの例の中間的な特徴を持つものと思われる。

3. 流氷の衝突によって構造物に加わる氷荷重は、模擬氷と構造物との衝突の際の相互作用力の計測結果にも現れているように、離散的に変動するとともに、氷荷重の最大値は平均値より遥かに高い値になるものと思われる。この実験では、模擬氷と構造物との最初の接触の直後に平均値のおよそ30倍の高い相互作用力のピークが現れた。

4. 海洋構造物の形式は流氷との相互作用に大きく左右される。この実験に用いた3つのタイプの構造物周りの模擬氷の運動や相互作用力の計測結果では、模擬氷と構造物だけを考慮する場合、水の流れを妨げる構造物と柱の両方を用いた場合に、模擬氷による影響が一番少なかった。

モデル計算による模擬氷の運動との比較については第6章で述べる。

第5章 単純領域での流氷流れの 数値シミュレーション

この章では、流氷運動の力学的数値モデルのDistributed Mass / Discrete Floe モデルを用いて、単純領域での流氷運動の数値シミュレーションを行い、このモデルを用いた場合の流氷運動の特性を調べるとともに合理性の検証を行う。計算に用いた単純領域は、流氷運動や海岸・海洋構造物との相互作用を特徴的に捉えられ、かつ実海域にも有り得るような領域を選んだ。

5.1 数値シミュレーションにおけるパラメーター

全ての数値シミュレーションに共通に用いられたパラメーターは次のとおりである。

空気の密度	: ρ_a	=	1.293 kg/m ³
海水の密度	: ρ_w	=	1025.9 kg/m ³
海氷の密度	: ρ_i	=	910.0 kg/m ³
海氷の厚さ	: h_i	=	1 m
重力加速度	: g	=	9.81 m/sec ²
コリオリパラメーター	: f	=	$1.36 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$
地理上の緯度	: ϕ	=	70° N
海氷と空気との抵抗係数	: C_a	=	0.003
海氷と海水との抵抗係数	: C_w	=	0.008
氷と氷との摩擦係数	: μ_i	=	0.3 (Sayed and Daley, 1993)
氷と構造物との摩擦係数		=	0.1
深さ方向の層の数		=	5

ここで、抵抗係数 C_a と C_w は、表面が粗い海氷についての値であり、氷と構造物との摩擦係数は様々な研究により求められた代表的な値である。

5.2 開放領域での流氷運動

この節では、図5.2.1のような開放領域において、速さと方向が一定の風によって引き起こされる流氷運動について考える。計算領域の水深は一定 (50m) としている。計算に用いた格子の大きさは、 dx , dy ともに1km、流氷の代表長さは100m、風速は15m/sec、方向はx方向である。計算の際のタイムステップは30秒である。初期の流氷域の広さは15km×15km、氷の密接度は0.5、流氷と海水の流速は0である。円盤と矩形盤を用いて計

算した結果、流氷の形による流氷運動の変化は現れなかった。これは、このような氷の密度が比較的低い流氷域では、流氷の相互作用の影響がほとんどないと思われる。そこで、この節では、矩形盤を用いた場合の結果のみを示すことにする。

図5.2.2は海水の流れを考慮しない場合、すなわち、海水の流速を0と固定した場合の流氷運動の計算結果で、図5.2.3は海水の流れと流氷運動を同時に取り扱った場合の計算結果である。流氷域は氷の密度の等値線を用いて表す。等値線の一番外側の値は0.05で、間隔は0.05である。流氷は図5.2.2と図5.2.3に示されるように、時間が経つにしたがい、進行方向の右側にずれながら風下に流される。流氷の流れ方向の右ずれは、コリオリ力の影響である。

海水の流れを考慮しない場合には、流氷に働く風からのせん断応力及び、海水からのせん断応力が全氷域で等しい値になるため、流氷の流速は全氷域で一定になる。そのため、流氷域はいつも一定の形を保ち、氷の密度の分布の変化も現れない(図5.2.2)。しかし、海水の流れを同時に考える場合には、流氷が海水の流れに乗せられ移動するので、流氷の流速は海水の流れに大きく左右される。

海水の流速は式(3.7.17)に示す海水面に与えられるせん断応力の大きさによって求められる。この計算で用いた、海水と空気間の抵抗係数 C_a の0.003は、式(3.7.19)による風速15m/secでの空気と海水面との摩擦係数 C_d の0.001775より大きいので、海水面に与えられるx方向のせん断応力は、氷の密度が高い領域で大きくなる。したがって、海水のx方向の流速は氷の密度が高い領域で速くなる。図5.2.4は海水の流れを考慮した場合の、運動開始後20時間の流氷域付近の海面での、流氷がない場合の流速に対する海水の相対流速の分布図で、上記の様な傾向がよく表されている。密度の高い流氷域の中央での流氷のx方向の流速が外側より速くなり、流氷域は時間が経つにしたがい拡大され(図5.2.3)、氷の密度のピークは流氷域の右下に移って行く(図5.2.4)。

図5.2.5と図5.2.6は表面が平滑な海水の場合(海水と空気間の抵抗係数 C_a 0.0015、海水と海水の間の抵抗係数 C_w 0.004)の、流氷運動の計算結果である。この場合は、 C_d が C_a より大きいので、前の例と違って流氷域の中央での流氷のx方向の流速が外側より遅くなり、氷の密度のピークは流氷域の左下に移って行く(図5.2.6)。

海水の流れを同時に考える2つの例の氷の密度のピークがともに下向きになるのは、y方向の風速が0であるので、海水面に与えられるy方向のせん断応力が氷の密度のみ依存するためである。

5.3 流氷の横移動の数値シミュレーション

この節では流氷が風によって海岸のような固定境界に押し寄せ、固定境界に沿って広がる場合の流氷運動を円盤流氷モデルを用いてシミュレートする。計算に用いた格子の

大きさは、 dx 、 dy ともに1km、流水の代表長さは100m、風速は10m/sec、方向は y 方向である。計算の際のタイムステップは30秒である。初期の流水域は図5.3.1の(a)のとおりで、 x 方向の幅は6km、氷の密接度は0.7、流水の流速は0である。この計算では、流水と固定境界との衝突により生ずる横移動だけをシミュレートするため、固定境界と氷の間及び氷と氷の間の摩擦は無視し、海水の流速を0と固定した。

流水は風によって加速され、固定境界に向かって動き、境界と衝突する。流水は境界との衝突の発生する x 方向及び、 $-x$ 方向の流水の相互作用力によって、境界に沿って x 方向及び、 $-x$ 方向に広がる。図5.3.1の(b)は風によって海岸に押し寄せる流水の分布の時間変動の数値解析結果であり、このような流水運動の特性がよく示されている。流水の分布の変動は氷の密接度の等値線を用いて表している。図5.3.1の(b)の等値線の一番外側の値は0.1で、間隔は0.1である。流水域は4日間、 x 方向に15.2km、 $-x$ 方向に10.8km広がり、4日後の流水域の x 方向の幅は初期の6kmの5倍を越える32kmである。また、流水の分布が左右非対称になるのは、コリオリ力の影響である。

5.4 固定境界付近での流水運動

巨大な氷山や棚氷の周辺に流水域があるときの流水運動について考える。棚氷の辺を無限に長い壁面と仮定し、図5.4.1の(a)のような計算領域を設定した。計算領域の水深は無限であり、計算に用いた格子の大きさは、 dx が1km、 dy が0.866kmで、流水（円盤）の直径は200m、風速は10m/sec、方向は $-x$ 方向である。初期の流水域は固定境界から43.3kmまでの範囲で、氷の密接度は全水域で一定の0.635である。氷群と固定境界との摩擦には、氷群と氷群との摩擦と同様に式(3.5.11)の摩擦係数を用いた。初期の流速は流水、海水ともに0である。計算の際のタイムステップは30秒である。

流水と海水は風によって加速され、 $-x$ 方向に動き出すと同時に、コリオリ力の作用によって進行方向右側にずれながら固定境界に押し寄せる。この計算は x 方向の条件が全領域で等しく、領域の右側と左側で周期境界を採用しているため、全ての計算変数は x 方向に対し一定である。図5.4.1の(b)は固定境界に働く y 方向の氷荷重の時間変動であり、流水が固定境界に押し寄せる様子をよく表している。 y 方向の氷荷重は流水に働くコリオリ力であり、その大きさは固定境界に押し寄せた流水の質量に比例する。また、固定境界に押し寄せる流水の質量が離散的に増加するため、氷荷重も時間が経つにしたがい階段状に増加する。氷荷重曲線に現れる周期的なピークは氷列の衝突によるもので、衝突の瞬失われる流水の y 方向の運動量を表す。氷荷重は、全ての流水が固定境界に押し寄せるまで増加し、最後の氷列の衝突の後には一定の値になる。それは、流水と海水の運動がほぼ平衡状態に達し、流水に働くコリオリ力が変わらないためである。図5.4.1の(c)は氷の密接度の分布で、固定境界に押し寄せる流水の質量の時間変動を示している。固

定境界と反対の流氷域の境界付近で水の密接度が初期値より下がるのは、流氷の流速の差によるものである。海面での水の流速は5.2節で述べたように、氷の密接度に比例するので、流氷域で速くなり、流氷のない海面すなわち、固定境界と反対の流氷域の境界の外側で遅くなる。流氷の移動速度は、このような海水の流速の差によって、固定境界と反対の流氷域の境界付近で、流氷域の内側より遅くなるため氷の密接度が初期値より下がる。流氷の移動速度の差は氷の密接度が急速に変わるところで大きくなるので、このようなところでは氷の密接度の減少も大きくなる。図5.4.1の(d)及び図5.4.1の(e)は流氷と海面での水のx方向の流速の分布で、上述のような氷の密接度と流速の関係がよく表されている。図5.4.1の(f)及び図5.4.1の(g)は各々y方向とx方向の流氷の相互作用力の分布で、y方向の相互作用力は流氷が固定境界に押し寄せる際の力を、x方向の相互作用力はy方向の相互作用力によって生ずる流氷の横移動力を表す。y方向及びx方向の相互作用力は押し寄せた流氷の質量に比例するので、固定境界付近で一番高く、固定境界から離れるにしたがい線形的に減少する。x方向の相互作用力はy方向の相互作用力の約1/10の大きさである。

5.5 流氷運動を妨げる海岸構造物周りの流氷の運動

図5.5.1のように海岸から突き出ている構造物周りの流氷運動について考える。この計算には、流氷運動と海水の流れの両方を妨げる構造物と流氷運動だけを妨げる構造物の2つのタイプの構造物を用いた。構造物の大きさは2つのタイプともに10km×1kmである。

計算領域の水深は一定(30m)であり、計算に用いた格子の大きさは、dx、dyともに1km、流氷(円盤)の直径は100m、風速は10m/sec、方向は-x方向である。流氷域の初期条件として、計算領域全体に流氷が均等に分布する場合と、図5.5.1に示すような一部の領域に流氷が分布する場合の2つの初期流氷分布を用いた。初期の流速は流氷、海水ともに0であり、流氷域の水の密接度は0.5である。計算の際のタイムステップは30秒である。

数値シミュレーションは構造物のタイプ、流氷域の初期条件及び氷盤の形状の3つの条件の組合せから、5つの場合について行った。図5.5.2、図5.5.3は全計算領域に円盤流氷が均等に分布する場合の流氷運動の数値シミュレーション結果で、図5.5.2は流氷運動と海水の流れの両方を妨げる構造物の場合、図5.5.3は流氷運動だけを妨げる構造物の場合である。図5.5.2と図5.5.3の(a)から(f)までは、流氷域及び流氷と海面での水の流れの時間変動を、図5.5.2と図5.5.3の(g)は構造物に働く氷荷重の時間変動を示す。流氷は風によって-x方向に流される。構造物の上流側には、構造物によって運動を止められた流氷が集まり、氷の密接度が高い流氷の停滞領域を形成する。構造物が海水の流れを妨げる場合、構造物の上流側では、海面が上昇し、-y方向の海水の流れが生ずる。また、構

造物の下流側には海面が下降し、上流側と反対の y 方向の海水の流れが生じ、結果的に構造物の周囲には時計方向に回転する海水の流れが現れる。このような海水の流れの影響を受けて、流氷は構造物付近で構造物を回り込むように移動する。一方、構造物が海水の流れを妨げない場合には、上記のような海水の流れが現れないため、構造物の上流側の流氷の停滞領域の伸びが速くなり、構造物に働く氷荷重も流氷の停滞領域の伸び率に比例し、構造物が海水の流れを妨げる場合より急速に増加する。また、構造物の下流側では、構造物が海水の流れを妨げる場合に現れる y 方向の海水の流れが生じないため、流氷の y 方向への動きが遅くなり、より広い開水面が現れる。

図5.5.4、図5.5.5及び図5.5.6は初期の流氷域が計算領域に一部分ある場合の流氷運動のシミュレーション結果で、図5.5.4は構造物が海水の流れを妨げる場合の円盤流氷の運動を、図5.5.5は構造物が海水の流れを妨げない場合の円盤流氷の運動を、図5.5.6は構造物が海水の流れを妨げる場合の矩形盤流氷の運動を表している。まず、海水の流れを妨げる構造物周りの円盤流氷の運動は、流氷が全領域に均等に分布している場合と同様に海水の流れの影響を大きく受ける。この場合、流氷の流入が終わった後、構造物の上流側に停滞した流氷の質量は、海水の流れと円盤流氷の横移動によって時間が経つにしたがい減り続け、氷荷重の大きさも流氷の質量に比例し減少する。また、流氷の y 方向への動きが活発になるため、氷荷重の時間変動も激しくなる。それに対し、構造物が海水の流れを妨げない場合には構造物を越えて流れる流氷の質量が円盤流氷の横移動のみに依存するので、構造物の上流側に停滞した流氷の質量の減少は小さく、氷荷重の減少も小さい。

矩形盤流氷の運動の場合は、円盤流氷のような流氷の横移動が行われないため、構造物の上流側での流氷の停滞領域の伸びが速く、 x 方向に長く伸びた形状になる。構造物に働く氷荷重は停滞領域の伸びに比例するので、急速に増加するが、図5.5.6(g)に比べて減少は小さい。

5.6 正方形の海洋構造物周りの流氷の運動

この節では、水深が25mで一定の単純大陸棚に設置された、海水の流れと流氷運動の両方を妨げる大きさ100m×100mの正方形海洋構造物周りの流氷運動及び、流氷と構造物との相互作用について考える。数値解析は流氷が計算領域全体に均等に分布する場合と、図5.6.11に示される一部の領域に分布する場合について、各々円盤流氷と矩形盤流氷の両方を用いて行った。

計算に用いた格子の大きさは、 dx 、 dy ともに20m、流氷の代表長さは5m、風速は10m/sec、方向は x 方向である。初期の流速は流氷、海水ともに0であり、流氷域の水の密接度は0.73である。計算の際のタイムステップは0.5秒である。

このシミュレーションでは、流水の形によって流水の運動や流水と構造物の相互作用がどのように変化するかについて調べた。図5.6.2と図5.6.4は各々円盤流水と矩形盤流水が計算領域全体に均等に分布する場合の流水運動及び、構造物に働く氷荷重の時間変動を示している。円盤流水の場合には、構造物を回り込む海水の流れと流水の横移動によって、構造物の上流側付近で、 y 方向及び $-y$ 方向への流水の移動量が多くなる。その影響で、構造物の上流側に形成される氷の密度が高い流水の停滞領域は、上流側から流入する流水の質量と構造物の両脇から下流側に流出する流水の質量の差が少ないため、停滞領域の成長速度は緩やかであり、流入する流水の質量と流出する流水の質量が等しくなる時点からは、ほぼ一定の大きさを保ち続ける。また、構造物の下流側には構造物の両脇から入り込む流水が絡み合うところと構造物の後面の間に開水面が現れる。流水と海水の流れが全体的に右下方向になるのは、コリオリ力の影響である。一方、構造物に働く氷荷重は、構造物の前面での流水の運動が活発になるため、変動が激しく、ピークの値は高くなる。

それに対し、矩形盤流水の場合は、構造物の前面付近での y 方向及び $-y$ 方向への流水の移動量が少ないため、停滞領域の上流側から流入する流水の質量の方が、構造物の両脇から下流側に流出する流水の質量より遥かに多いので、細長い形をした停滞領域が急速に成長する。構造物に働く氷荷重は、構造物の上流側での流水の運動が緩やかであるため、変動が少なく、停滞領域の大きさに比例して徐々に増加し、ピークの値は低い。

流水が構造物の上流側の一部の領域に分布し、構造物との衝突の前に風によって加速され、衝突の際にはある程度の運動量を持つ場合の流水運動（図5.6.3、図5.6.5）は、流水が計算領域全体に均等に分布する場合と同様に構造物の上流側付近での流水の運動の様子に大きく左右される。まず、円盤流水の場合（図5.6.3）には、構造物の上流側付近での y 方向及び $-y$ 方向への流水の移動量が多くなるため衝突後、構造物の上流側に停滞した流水の質量は急速に減少し、流水と構造物の衝突力は活発な流水運動の影響によって幾つかのピークに分散されて現れる。しかし、矩形盤流水の場合には、構造物の上流側付近での流水の運動が緩やかであるため衝突後、構造物の上流側に停滞した流水の質量の減少は小さい、衝突力は集中的に現れる。

5.7 まとめ

この章では、Distributed Mass / Discrete Floe モデルを用いて、5つの単純海域での流水運動の数値シミュレーションを行い、モデル計算による流水運動の特性や海水の流れ、流水の分布の様子、流水の形及び構造物の種類と、流水運動との関係を調べた。モデル計算による流水運動の主な特性として、流水と海流との関係及び、流水と構造物との相互作用について下記のように述べる事ができる。

流水運動と海水の流れはお互いに影響を及ぼし合っている。海水の流速は海水面に与えられる応力に大きく左右される。海水面に与えられる応力は空気と水面の間の摩擦力と、流水と水の間の摩擦力の和であり、氷の密接度に比例する。流水が全領域に均等に分布する場合は、全海水面に一定の応力が与えられるため、場所による海水の流速の差は生じない。しかし、流水の分布が均等ではない場合あるいは、流水が部分的に分布する場合には、場所によって海水面に与えられる応力が異なるため、海水の流速の差が生ずる。このような海水の流速の差は、そのまま流水の流速の差に現れ、流水域の拡大や流水域内の氷の密接度の変動につながる。

流水と海岸・海洋構造物との相互作用は、構造物周りの海水の流れと流水の横移動に大きく関係する。構造物が水の流れを妨げる場合は、構造物の周りに構造物に沿って流れる海流が形成されるので、流水はその流れの影響を受け、構造物を回り込むように移動する。また、流水が円盤に近い場合には、流水の相互作用による流水の横移動が多くなるので、構造物の上流側での流水運動は活発になり、構造物を回り込む流水の質量も多くなる。一方、構造物が海水を妨げない場合あるいは、流水が矩形盤に近い場合には、構造物を回り込む流水の量は少なく、構造物前面での流水運動は安定になる。停滞領域の大きさは円盤流水が、水の流れを妨げる構造物と出会う場合に小さく、矩形盤流水が水を妨げない構造物と出会う場合に大きくなる。氷荷重の方は流水運動の安定性に比例し、円盤流水に近い流水が、水の流れを妨げる構造物と衝突する場合、激しく変動するが、矩形盤に近い流水が水を妨げない構造物と衝突する場合には、比較的安定した値になる。

第6章 実験・実海域での観測及び他モデルとの比較

この章では、Distributed Mass / Discrete Floe モデルによる流水運動の数値シミュレーションと、第4章に述べた模擬氷の漂流実験、実海域での流水の観測及び、他モデルの計算結果との比較を行ない、このモデルの適用性を確かめる。

6.1 模擬氷の漂流の数値シミュレーション

この節では、風路付き回流水槽において行われた模擬氷の漂流実験の観測結果と、実験での風及び、潮流の条件を再現して行った模擬氷の漂流の数値シミュレーション結果との比較を行う。計算に用いた領域は水の流速および、風速の計測を行った領域を含む図4.2.1のような幅1.8m、長さ8mの領域である。

6.1.1 計算条件

模擬氷の漂流実験での潮流及び風の条件を再現した計算領域を構成するため、次のような風、潮流及び、渦粘性条件を用いた。

まず、風は実験で計測した風速分布を基にして与えた。すなわち、x方向に対しては一定と仮定し、y方向に対しては、水槽内の計測結果から得られた風速分布を用いて図6.1.1のように分布しているものと仮定した。また、風は風路の形状を考慮して、計算領域の上流側境界から1.5mのところから水面に影響を与えるものと仮定した。風が水面に与えるせん断応力は、式(3.7.19)から求められる空気と水面の間の摩擦係数の1.5倍の値を式(3.7.18)に代入して求めた。これは、式(3.7.19)は水面からの高さが10mのところでの風速から空気と水面の間の摩擦係数を求める式であるため、その摩擦係数を1.5倍し補正する必要があると考えたからである。この値は、実験に応じた吹送流の計算を行い、水の流速が計測値と最も良く一致する値である。

計算領域の上流境界での水の流入条件と、深さ方向の渦粘性係数の分布は、計測領域の中央(p点)で計測した深さ方向の水の流速分布を満足させるため、図6.1.2と図6.1.3のように分布しているものと仮定した。領域の上流境界でのy方向への流速変化はないと仮定した。水深150mmまでを計算領域とし、それより深い領域での流速は一定とした。水平方向の渦粘性係数は $0.005\text{m}^2/\text{sec}$ と仮定した。その他の計算に用いたパラメーターは次のとおりである。

$$\begin{aligned} \text{空気の密度} &: \rho_a = 1.247 \text{ kg/m}^3 \\ \text{海水の密度} &: \rho_w = 999.7 \text{ kg/m}^3 \\ \text{海氷の密度} &: \rho_i = 912.0 \text{ kg/m}^3 \end{aligned}$$

海水の厚さ	: h_i	=	15 mm
重力加速度	: g	=	9.81 m/sec ²
コリオリパラメーター	: f	=	0.8498 × 10 ⁻⁴ s ⁻¹
模擬氷と模擬氷との摩擦係数	: μ_i	=	0.0
模擬氷と構造物との摩擦係数		=	0.1
水の深さ方向の層の数		=	5
水の深さ方向の層の高さ		=	30 mm

上記の条件を用いて、計算領域での水の流れの数値解析を行い、図6.1.4、図6.1.5及び図6.1.6のような水の流速分布を得た。図6.1.4は計算領域の中央の水面でのy軸に沿った流速分布で、図6.1.5は水面でのx方向の流速分布である。図6.1.5の横軸は図4.2.1に示す計測領域のx方向の距離である。計算で求められた水の流速は、計測による値と若干異なっているが、模擬氷の漂流実験を行った水槽の水の流速分布の特徴をよく表していると思われる。以下の計算は、全て上記の条件を用いて行った。

6.1.2 模擬氷の抵抗係数及び構造物と模擬氷の衝突

計算で用いる模擬氷の水に対する抵抗係数は、実験で計測した、図4.4.1の流速と抵抗係数の関係から求めた。しかし、空気に対する抵抗係数は、空気抵抗の直接計測が極めて困難であるため、模擬氷の単独漂流での風速、水及び模擬氷の流速の関係を用いて求めた。

模擬氷の単独漂流の実験の際、模擬氷の流速は、円盤が17.0cm/sec、矩形盤が17.5cm/secであり、風速は3.2m/sec、水面での水の流速は12.7cm/secであった。計算では、実験での水に対する模擬氷の相対流速が非常に小さかったので、計測した一番小さい流速での値0.2を模擬氷の水に対する抵抗係数とした。模擬氷と空気間の抵抗係数は、空気から与えられる力と水からの力が等しいと仮定し、円盤模擬氷で0.013、矩形盤模擬氷で0.016とした。図6.1.7はこれらを用いて行った単独の円盤または、矩形盤流水の漂流の数値計算の結果である。この図は、第4章の図4.4.2に示す実験結果に対応しており、氷盤の位置及び、移動速度はこれらと良く一致している。模擬氷の密接度が高いところでは、個々の模擬氷の場合に比べ、形状抵抗が低くなるので、計算では、模擬氷の密接度を考慮し、次の式を用いて氷群の抵抗係数を求めた。

$$\left\{ \begin{array}{ll} C_a = C_{a0} & \text{for } C_i < 0.5 \\ C_a = (1.5 - C_i) C_{a0} & \text{for } C_i \geq 0.5 \end{array} \right\} \quad (6.1.1)$$

$$\left\{ \begin{array}{ll} C_w = C_{w0} & \text{for } C_l < 0.3 \\ C_w = (1.3 - C_l)C_{w0} & \text{for } C_l \geq 0.3 \end{array} \right\} \quad (6.1.2)$$

ここで、 C_{a0} は、 C_{w0} は各々1つの模擬氷の空気と水に対する抵抗係数である。

計算の際のタイムステップは、数値的に求められた模擬氷と構造物との衝突による相互作用力が、実験で求められた値とほぼ等しくなるように決めた。計算での模擬氷と構造物との衝突は実験と違って、構造物の振動、変形などを考慮しない完全弾性衝突として取り扱われるため、模擬氷の衝突のような単純衝突では、タイムステップが計算の重要なパラメーターになる。図6.1.8は計算により求められた、タイムステップ0.004secを用いた場合の模擬氷と構造物の衝突の際の相互作用力である。タイムステップは若干異なるが、実験では図4.5.4の0.005secの場合がこれに対応している。実験では、模擬氷と構造物の衝突によって構造物に振動が生じ、相互作用力の変動が現れるが、計算ではこのような相互作用力の変動は現れないため、ピーク値を実験でのピーク値と合わせた。

6.1.3 模擬氷の漂流の数値シミュレーション

模擬氷の漂流の数値シミュレーションは、実験と同様の初期条件(図4.5.1)を用いて、模擬氷集団の自由漂流、水を通す構造物周りの模擬氷の漂流及び、水の流れを妨げる構造物周りの模擬氷の漂流について行った。図6.1.9と図6.1.10は各々水を通す構造物を用いる場合、円盤模擬氷群、矩形盤模擬氷群が構造物の上流側に置かれた場合の水面での水の流速分布を示すもので、模擬氷が置かれたところ(氷の速度0)では、減速が起きている。また、図6.1.11は構造物が水の流れを妨げる場合の水面での水の流速分布で、構造物の影響が水の流速の分布に大きく現れている。

図6.1.12と図6.1.13は各々円盤・矩形盤模擬氷群の自由漂流の数値シミュレーション結果である。それぞれ、実験では図4.4.4と図4.4.5に対応する。模擬氷は実験と同様に水面での水の流速の影響を受け、水の流速が大きい側面側の模擬氷が中央の模擬氷より大きい速度で動き、全体の漂流速度は実験の結果とよく一致している。しかし、実験では風によって発生する波の影響と、個々の模擬氷の相互作用による横移動の影響が強く、漂流方向に対して垂直な方向への模擬氷の拡散が大きかったのに対し、数値計算では波の影響や個々の模擬氷の相互作用を取り入れていないため、漂流方向に対して垂直な方向への模擬氷の拡散は少なかった。また、矩形盤模擬氷の実験では、水の水面張力と模擬氷の回転によって、模擬氷の集団が水槽の側面方向へ回転したが、計算では水の表面張力の影響や模擬氷の回転を考慮していないので、実験のような模擬氷集団の回転の様子は表せなかった。

図6.1.14、図6.1.15及び、図6.1.16は水を通す構造物周りの円盤・矩形盤模擬氷の漂流と、

水の流れを妨げる構造物周りの円盤模擬水の漂流の数値シミュレーション結果である。模擬氷と構造物との相互作用は、第5章にも述べられているように構造物周りの水の流れや模擬氷の形に依存する。構造物が水の流れを妨げない場合の模擬氷は、自由漂流とほぼ同様に構造物に向かって移動する。衝突後の構造物の上流側付近に形成される模擬氷の密接度が高い停滞領域の形状は、円盤模擬氷の場合、模擬氷の横移動によって構造物の前面に沿う形になるが、矩形盤模擬氷の場合には模擬氷の横移動が起きないため、三角形のような形になる。このような現象は、実験でもよく現れている(図4.5.10、図4.5.13)。構造物に働く相互作用力のピークは、実験の場合と同様に矩形盤模擬氷の場合の方が、円盤模擬氷の場合より高い値になっている。構造物が水の流れを妨げる場合には、構造物の上流側付近に構造物に沿う流れが形成されるので、模擬氷の構造物に向かう移動速度が遅くなり、衝突が遅れるとともに、衝突の際の相互作用力も小さい。

6.2 実海域での流氷の数値シミュレーション

この節では、Bruno と Madsen (1989) がアラスカのビューフォート海にて、行った観測結果による実際の氷盤運動と、モデル計算により求められる氷盤運動を比較する。

観測及び計算を行ったのは図6.2.1のような領域であり、比較的水深が浅い大陸棚である。観測項目は、直径が約600m、厚さが約3.8mの氷盤の12日間にわたる位置と流速及び、海岸での風速である。計算での風速は、全領域で海岸の風速と等しいと仮定した。図6.2.2は観測期間中の風速の変動を示している。

計算に用いた格子の大きさは、 dx 、 dy ともに3km、流氷の代表長さとは600mで、流氷の平均厚さは3.8mである。初期条件として、計算領域には水の密接度0.7の流氷が全領域に均等に分布するとし、流速は流氷、海水ともに0と仮定した。計算の際のタイムステップは30秒である。境界条件は、海岸でFree Slip、その他の境界では0次流出または、0次流入である。計算では、流氷と空気間の抵抗係数を0.003、流氷と海水間の抵抗係数を0.0055とした。

図6.2.3は初期状態で、海岸から29.3km、領域の左側境界から72kmのところの位置した氷盤の流速の時間変動である。図6.2.3の○印は計測による氷盤の流速を、実線は計算による氷盤の流速を示している。計算によって求められた氷盤の流速が0.5m/sec以下のところでは、計測結果とおおよそ一致している。

6.3 他のモデルとの比較

この節では、従来の流氷運動の数値解析モデルである連続体モデルと個別要素モデルによる流氷運動と、Distributed Mass / Discrete Floe モデルによる流氷運動の計算結果を比較する。

6.3.1 単純化した海域での流氷運動の比較

計算の比較は、図6.3.1のような複雑な形状の海岸を有する領域において行った。図6.3.1の境界と流氷の分布は、実際の海水域を比較計算のために単純化したものである。計算では海水の流れはないと仮定し、流氷は風によって流されるとした。計算に用いた流氷と空気との抵抗係数は0.00065、流氷と海水との抵抗係数は0.005である。連続体モデルとDMDFモデルの計算で用いた格子の大きさは、 dx 、 dy ともに10kmである。海岸と西側の境界ではNo Slipの条件を、東と北側の境界では0次流出または、0次流入の条件を用いた。

図6.3.2と図6.3.3は、南側の境界でNo Slip条件を用いた場合のDMDFモデルと連続体モデルによる流氷域の時間変動を、図6.3.4と図6.3.5は、南側の境界で0次流出または、0次流入条件を用いた場合の流氷域の時間変動を表している。図6.3.6は個別要素モデルを適用する場合の円盤の初期分布であり、図6.3.7は南側の境界で0次流出または、0次流入条件を用いた場合の48時間後の円盤の分布の計算結果である。DMDFモデルと連続体モデルでは、一般的に使われている流氷域の表示をそのまま、計算の条件として取り扱うことが可能であり、計算例のような流氷の相互作用が小さい海水域での流氷運動に対しては、およそ一致した結果を示している。ところが、個別要素モデルでは、計算の簡略化のために直径6km~10kmという大きな氷盤を数き詰めたような初期条件で計算しているため、氷の密接度分布としての比較は困難である。しかし、全体的な氷の運動の様子は、他の2つのモデルのものと同様である。

6.3.2 海洋構造物周りの流氷運動の比較

図6.3.8と図6.3.9は、各々DMDFモデルと個別要素モデルを用いて行った、大きさが100m×100mの海洋構造物周りの流氷運動及び、流氷と構造物の相互作用の計算結果である。DMDFモデルでは、0次流入及び0次流出条件を用い、個別要素モデルでは流氷の流入及び流出を周期境界を用いて表した。流入及び流出条件の他は2つのモデルで、同一の計算条件を用いた。初期の計算領域には、氷の密接度は0.73の流氷が全領域に均等に分布すると設定し、初期流速0の流氷が右方向に吹く風速10m/secの風によって流されるものとした。この計算でも、海水の流れは考慮していない。

流氷と構造物との相互作用によって、構造物の上流側と両脇に形成される氷の密接度が高い領域を流氷運動に及ぼす構造物の影響範囲とする。風が構造物の側面に垂直にあたる場合（図6.3.8）の計算結果から推定される流氷運動に及ぼす構造物の影響範囲は、DMDFモデルを用いる場合、構造物の上流側の方に約1000mで、両脇の方に約250mであった。個別要素モデルでは流氷の流入及び流出を周期境界を用いているため、構造物の上流側の方の構造物の影響範囲は、計算結果から直接推定することが不可能であったが、

構造物の両脇の方の構造物の影響範囲は約200mで、DMDFモデルより小さかった。一方、構造物に働く相互作用力の平均値は、DMDFモデルの場合10.356KNで、個別要素モデルを用いた場合10.544KNであり、2つのモデルではほぼ同程度の値が得られたが、相互作用力のピーク値はDMDFモデルを用いる場合約230KNで、これは個別要素モデルの約50KNと比べてかなり大きかった。また、風が45°傾いて吹く場合（図6.3.9）の風の方向に対して垂直な方向への構造物の影響範囲は、DMDFモデルで約550mであつたが、個別要素モデルでは計算結果からの推定が不可能であつた。構造物に働く相互作用力は、多少の違いはあるものの大きな差は見られなかった。

6.4 まとめ

実験・実海域の観測結果及び、他のモデルの計算結果との比較をまとめると次のようになる。

DMDFモデルは、流氷運動を流氷の集団である氷群の移動や変形として表すため、個々の流氷の間の相互作用及び流氷の回転は考慮していない。また、水槽での模擬氷の漂流実験のように流氷の大きさが比較的小さいとき無視できなくなる水の表面張力と、水槽の水面に発生する波の影響も考慮していない。そのため、モデル計算による模擬氷の運動は、実験の観測結果と多少異なっている。しかし、全体の模擬氷の流れの様子や構造物に働く相互作用力の定性的特性は実験の結果とよく一致している。

このモデルを用いた、実海域での流氷運動の数値シミュレーションから求められた流氷域内の氷盤の流速は、流速が0.5m/sec以下のところでは計測の結果とよく一致している。流速が大きくなると計算の方が小さくなるが、全体的な変化は良く捉えられている。

一般的に、連続体モデルは比較的大きな領域での流氷運動を取り扱うのに適切であるが、比較的小さい領域での流氷運動、特に流氷の相互作用の影響が大きく現れる領域では適用が困難であると言われている。また、個別要素モデルは流氷の相互作用の影響が大きく現れる領域での流氷運動を取り扱うために提案されたモデルであり、広い領域に適用するには無理がある。これらのモデルとのDMDFモデルの計算結果の比較を通じて、DMDFモデルが広い領域及び、流氷の相互作用の影響が大きく現れる領域での流氷運動の両方の取り扱いに適切なモデルであることが示された。

第7章 考察

Distributed Mass / Discrete Floe モデルは、流水運動を氷群の運動と変形として表し、流水の相互作用力は氷群間の衝突及び、流水の横移動による氷群の運動量の変化から定式化する。さらに、流水の運動と海水の流れを同時に解析することによって、流水の運動に及ぼす海流の影響を直接に考慮している。一方、このモデルの定式化には、次のような仮定が用いられている。

- 氷群を円盤または、矩形盤の集団と考える。
- 氷群の氷の密接度、氷の大きさ、流速など氷群に関わる全ての物理量は、氷群の内部で一定であると仮定する。
- 流水運動は並進運動のみと考える。
- 流水の衝突は、変形のない完全非弾性衝突と仮定する。
- 流水の相互作用力は、計算の際のタイムステップの間一定と仮定する。
- 流水の破壊及び重合はないことと仮定する。

第5章に示した単純領域での流水運動の解析と、第6章に示す模擬氷の漂流の実験及び、実海域での流水の観測結果とモデル計算結果との比較から、このモデルによる流水運動のシミュレーション結果が合理的であり、流水運動の定性的な特性をよく表していることがわかった。さらに、従来の流水変動の数値モデルである連続体モデル及び、個別要素モデルによる流水運動の数値解析結果との比較によって、このモデルが比較的広い領域及び、流水の相互作用の影響が大きく現れる領域での流水運動の両方の取り扱いに適切なモデルであることが示されている。

一方、このモデルの実海域への適用性を高めるためには、より多くの実海域での流水運動の観測結果との比較を行い、本モデルをより現実的に改善する必要があると思われる。模擬氷の漂流実験及び、他のモデルの計算結果との比較など、今までこのモデルを用いて行った流水運動の解析結果から、このモデルを次のように改善していくべきであると思われる。

- 現段階では、氷群の大きさと個々の流水の大きさとの関係には、明確な基準がない。そのため、計算格子すなわち、氷群の大きさは、個々の流水の大きさを考慮せず、計算の都合に合わせて決定した。しかし、この氷群の大きさと個々の流水の大きさとの関係は、実際の観測結果を基にして決定するべきものである。
- このモデルでは、氷群の氷の密接度、氷の大きさ、流速など氷群に関わる全ての物理量は、氷群の内部で一定であると仮定している。しかし、実際の観測結果を調べると、流水域での氷の密接度及び、流速はほぼ連続的に変化している。そのため、氷群内で

の物理量の変化も取り扱えるように改善する必要がある。

- このモデルでは、流水の回転運動を考慮していないが、模擬氷の漂流の観測結果から、流水の回転運動は無視できないことがわかった。すなわち、角運動量保存則も導入し、氷盤の回転も考慮できるようにした方がよい。
- 流水の衝突は、変形のない完全非弾性衝突とし、また流水の破壊及び重合はないと仮定しているが、実際の流水の衝突のメカニズムについて、再検討を要すると思われる。
- 流水の相互作用力は、計算の際のタイムステップの同一と仮定しているため、流水の相互作用力及び、円盤流水の横移動力が過大評価されていると思われる。これを改善するには、計算の際のタイムステップを十分に小さく取るかあるいは、1タイムステップ内での反復計算が必要であろう。
- このモデルでは、流水と空気及び、海水の間の抵抗係数を一定と仮定しているが、図7.0.1に示されているように抵抗係数は氷の密接度によって変化する。実海域での流水運動の数値シミュレーションでは、このような抵抗係数の変化も考慮すべきであろう。

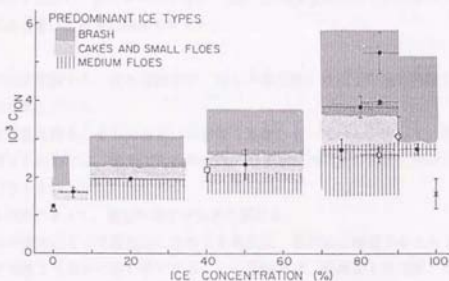


Figure 7.0.1 Neutral 10 m drag coefficients grouped as a function of ice concentration (Anderson, 1987)

第8章 結論

Distributed Mass / Discrete Floe モデルは、流氷の運動や、流氷と流氷及び流氷と海洋・海岸構造物との相互作用の数値解析モデルである。このモデルは海氷の生成・消滅を無視する海氷の力学的モデルであり、比較的狭い領域での海氷の短期変動を取り扱っている。DMDFモデルはかつての連続体モデルと個別要素モデルの両方の特性を含む、中間的なモデルである。このモデルでは連続体モデルでは表現できない流氷の離散的な特性を表せる。また、個別要素モデルに比べより多くの流氷を、短時間で計算できるモデルである。このモデルでは、個々の流氷を弾性のない円盤または矩形盤に単純化する。また、流氷を長方形の氷の集団、即ち氷群に分割し、氷群の移動と変形の数値的解析を通じて、流氷の変動をシミュレーションする。風・海流によるせん断応力、コリオリ力、海面の傾きによる水面傾斜力、及び流氷の相互作用による内部応力を氷群の移動及び変形に関与する外力として考えている。流氷の相互作用力（内部応力）は氷群間の衝突、及び流氷の横移動による氷群の運動量の変化から定式化し、氷群の質量と氷の密接度の移動にはSemi-Lagrange方式を採用した。流氷の流れに及ぼす海流の影響を直接に考慮するため、流氷の流れと海水の流れの同時解析を行った。また、海面での海水の流れをより正確に評価するため、多層モデルを用い、MacCormack predictor-corrector スキームによる差分計算法を用いて海流の解析を行った。

模擬氷の漂流実験から、流氷運動及び、流氷と構造物との相互作用の特徴についてまとめると次のようになる。

1. 流氷運動と海水の流れはお互いに影響を及ぼし合っている。従って、流氷の変動を予測するためには、海面での水の流れの解析が流氷運動の解析と同時にに行われなければならない。
2. 流氷の形によって、運動の様子が大きく異なる。
3. 流氷の衝突によって構造物に加わる氷荷重は、離散的に変動するとともに、最大値は平均値より遥かに高い値になる。この実験では、模擬氷と構造物との最初の接触の直後に平均値のおよそ30倍の高い相互作用力のピークが現れた。

第5章に示した単純領域での流氷運動の解析と、第6章に示す模擬氷の漂流の実験及び、実海域での流氷の観測結果とモデル計算結果との比較から、このモデルによる流氷運動のシミュレーション結果が合理的であり、上記のような流氷運動の定性的な特性をよく表していることがわかった。それらをまとめると、

1. 海水の流速は海水面に与えられる応力に大きく左右される。海水面に与えられる応力は空気と水面の間の摩擦力と、流氷と水の間の摩擦力の和であり、氷の密接度の

関数とする。流水が全領域に均等に分布する場合は、全海水面に一定の応力が与えられるため、場所による海水の流速の差は生じない。しかし、流水の分布が均一ではないあるいは、流水が部分的に分布する場合には、場所によって海水面に与えられる応力が異なるため、海水の流速の差が生ずる。このような海水の流速の差は、そのまま流水の流速の差になって現れ、流水域の拡大や流水域内の氷の密接度の変動につながる。

2. 流水と海洋・海岸構造物との相互作用は、構造物周りの海水の流れと流水の横移動に大きく関係する。構造物が水の流れを妨げる場合は、構造物の周りに構造物に沿って流れる海流が形成されるので、流水はその流れの影響を受け、構造物を回り込むように移動する。また、流水が円盤に近い場合には、流水の相互作用による流水の横移動が多くなるので、構造物の前面での流水運動は活発になり、構造物を回り込む流水の量も多くなる。一方、構造物が水を妨げない場合あるいは、流水が矩形盤に近い場合には、構造物を回り込む流水の量は少なく、構造物の上流側での流水運動は安定になる。氷荷重の方は流水運動の安定性に比例し、円盤流水が、水の流れを妨げる構造物と衝突する場合激しく変動するが、矩形盤流水が水を妨げない構造物と衝突する場合には、比較的安定した値になる。
3. モデルによる計算結果は、模擬氷を用いた実験における氷盤の運動や構造物への氷荷重をおおむね良く表している。しかし、以下の理由により、細部においては差異がある。DMDFモデルは、流水運動を流水の集団である氷群の移動や変形の数値解析を用いて表すため、個々の流水の間の相互作用及び流水の回転は考慮していない。また、水槽での模擬氷の漂流実験のように流水の大きさが比較的小さいとき無視できなくなる水の表面張力や水槽の水面に発生する波の影響も考慮していない。
4. 実海域での流水運動の数値シミュレーションから求められた、流水域内のある氷盤の流速は、計測の結果と割合よく一致している。詳しく言えば、氷盤の流速が0.5m/sec以下では計算と観測は非常によく一致している。流速が速くなると計算の方が観測のものより小さくなるが、その変化は良く捉えられている。

一般的に、連続体モデルは比較的広い領域での流水運動を取り扱うのに適切であるが、比較的狭い領域での流水運動、特に流水の相互作用の影響が大きく現れる領域では適用が困難であると言われている。また、個別要素モデルは流水の相互作用の影響が大きく現れる領域での流水運動を取り扱うために提案されている。それに対してDMDFモデルは広い領域及び、流水の相互作用の影響が大きく現れる領域での流水運動の両方の取り扱いに適切なモデルである。すなわちDMDFモデルは、かつての連続体モデルと個別要素モデルの両方の特性を含む、中間的なモデルである。このモデルを用いることによって、連続体モデルでは表現できない流水の離散的な特性を表せるとともに、個別要素モ

デルに比べより多くの流水を、短時間で計算できる。

このモデルの実海域への適用性を高めるためには、より多くの実海域での流水運動の観測結果との比較を行い、本モデルをより現実的に改善する必要があると思われる。

1. 氷群の大きさと個々の流水の大きさの関係は、実際の観測結果を基にして決定すべきものである。
2. 実際の観測結果を調べると、流氷域での水の密接度及び、流速はほぼ連続的に変化しているため、氷群内での物理量の変化も取り扱えるように改善する必要がある。
3. 模擬氷の漂流の観測結果から、流水の回転運動は無視できないことがわかった。従って、角運動量保存則も導入し、氷盤の回転も表せるようにする。
4. 実際の流水の衝突のメカニズムを調査し、それに応じたモデル化を考慮する。例えば、0でない反発係数を用いることなどが考えられる。
5. 流水の相互作用力は、計算の際のタイムステップの間一定と仮定しているため、流水の相互作用力及び、円盤流水の横移動力が過大評価されていると思われる。これを改善するには、計算の際のタイムステップを十分に小さく取るかあるいは、1タイムステップ内での反復計算が必要であろう。
6. 実海域での流水運動の数値シミュレーションでは、流水と海水及び、空気との抵抗係数の変化を考慮すべきである。

Acknowledgements

この論文を完成させるにあたっては、指導教官の加藤洋治教授、山口一助教授に懇切な暖かい御指導を頂き、心からの謝意を表します。

実験においては、前田正二助手、宮永大技官にお世話になりました。実験設備は、東京大学生産技術研究所の千葉実験所の風路付き回流水槽を使わせて頂き、関係者の方々に感謝します。

本論文で提案したDMDFモデルとの比較計算のため、Hiblerの連続体モデルを用いて計算して頂いた Ice Centre Environment Canada の V. R. Neralla 氏、個別要素モデルを用いて計算して頂いた National Research Council Canada の M. Sayed 氏に感謝します。

また、日本に来て以来、研究内容から日常生活に至るまでお世話になった研究室の方々に感謝します。特に日本での学生生活を共に過ごした高杉信秀氏に深く感謝します。

最後に、慣れない日本での生活の中で苦勞を強いることになった妻の李有景と娘のザミンに心から「ありがとう」と言いたいと思います。

References

- Anderson, R. J. (1989). "Wind stress measurements over rough ice during the 1984 Marginal Ice Zone experiment," *J Geophys Res*, Vol 92, pp 6933-6941.
- Banke, E. G. and S. D. Smith (1971). "Wind stress over ice and over water in the Beaufort Sea," *J Geophys Res*, Vol 76, pp 7368-7374.
- Banke, E. G. and S. D. Smith (1973). "Wind stress on arctic sea ice," *J Geophys Res*, Vol 78, pp 7871-7883.
- Banke, E. G. and S. D. Smith (1975). "Measurements of form drag on ice ridges," *AIDJEX Bull* 28, pp 21-27.
- Banke, E. G., S. D. Smith and R. J. Anderson (1976). "Recent measurements of wind stress on arctic sea ice," *J Fish Res Board Can*, Vol 33, pp 2307-2317.
- Bruno, M. S. and O. S. Madsen (1989). "Coupled circulation and ice floe movement model for partially ice-covered continental shelves," *J Geophys Res*, Vol 94, pp 2065 - 2077.
- Campbell, W. J. (1965). "The wind-driven circulation of ice and water in a polar ocean," *J Geophys Res*, Vol 70, No 4, pp 3279-3301.
- Coon, M. D., G. A. Maykut, R. S. Pritchard, D. A. Rothrock and A. S. Thorndike (1974). "Modelling the pack ice as an elastic-plastic material," *AIDJEX Bull*, Vol 24, pp 1 - 105.
- Coon, M. D., R. Colony, R. S. Pritchard and D. A. Rothrock (1976). "Calculation to test a pack ice model," *AIDJEX Bull*, Vol 31, pp 170 - 187.
- Ekman, V. W. (1905). "On the influence of the earth's rotation on ocean currents," *Arkiv Matem, Astr Fysik* (Stockholm), pp 53.
- Flato, G. M. and W. D. Hibler III (1992). "Modeling Pack ice as a cavitating fluid," *J Phys Oceanography*, Vol 22, pp 626 - 651.
- Frederking, R. and M. Sayed (1993). "Numerical simulations of mesoscale rheology of broken ice fields," *Proc 12th Int Conf POAC*, Vol 2, pp 789 - 798.
- Glen, J. W. (1970). "Thoughts on a viscous model for sea ice," *AIDJEX Bull*, Vol 2, pp 18 - 27.
- Hibler III, W. D. (1977). "A viscous sea ice law as a stochastic average of plasticity," *J Geophys Res*, Vol 82, pp 3932 - 3938.
- Hibler III, W. D. (1979). "A dynamic thermodynamic sea ice model," *J Phys Oceanogr*, Vol 9, pp 815-846.
- Hibler III, W. D. (1986). "Ice dynamics," In "The geophysics of sea ice" (N. Untersteiner ed.) NATO ASI Series, Series B: Physics Vol 146, Plenum Press, New York and London, pp 577-640.

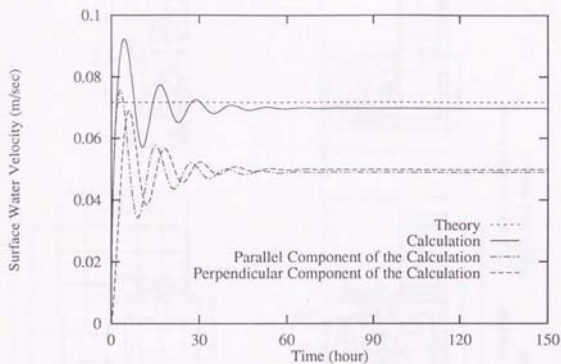
- Hoffmann, K. A. (1989). "Computational fluid dynamics for engineering," Engineering Education System, Austin, pp 220-221.
- Madsen, O. S. and M. S. Bruno (1986). "A methodology for the determination of drag coefficients for ice floes," Proc 5th Int OMAE, Vol 4, pp 410-417.
- McPhee, M. G. (1979). "The effect of the oceanic boundary layer on the mean drift of pack ice: Application of a simple model," J Phys Oceanogr, Vol 9, pp 388-400.
- Maykut, G. A. and N. Untersteiner (1971). "Some results from a time - dependent thermodynamic model of sea ice," J Geophys Res, Vol 76, pp 1550-1575.
- Neralla, V. R., M. Sayed, M. Serrer and S. B. Savage (1993). "The influence of ice rheology on ice forecasting," Int Conf Sea Ice, Beijing, China.
- Parkinson, C. L. and W. M. Washington (1979). "A large - scale numerical model of sea ice," J Geophys Res, Vol 84, pp 311-337.
- Rheem, C. K., H. Yamaguchi, H. Kato and H. Horikome (1993). "A numerical study on Pack ice movement using a dynamic ice model as a continuum," J Soc Naval Arch Jpn, Vol 173, pp 169 - 174.
- Rheem, C. K., H. Yamaguchi and H. Kato (1994). "Numerical simulation of rectangle ice floes movement using a Distributed Mass / Discrete Floe model," J Soc Naval Arch Jpn, Vol 175.
- Rheem, C. K., H. Yamaguchi and H. Kato (1994). "A Distributed Mass / Discrete Floe model For rheology computation of Pack ice consisting of disk floes", Pro 4 th Int Conf ISOPE, Vol 2, pp 458 - 465.
- Rothrock, D. A. (1975). "The energetics of the plastic deformation of pack ice by ridging," J Geophys Res, Vol 80, pp 4514-4519.
- Saeki, H., T. Ono and A. Ozaki (1979). "Experimental study on ice forces on a cone-shaped and an inclined pile structure," Proc Int Conf POAC, Quebec City, pp 536-547.
- Savage, S. B. (1992). "Marginal Ice Zone dynamics modelled by computer simulation involving floe collisions," Report to the Institute for Mechanical Engineering, National Research Council Canada.
- Serrer, M., S. B. Savage and M. Sayed (1993). "Visualization of Marginal Ice Zone dynamics," Proc 1st Int Conf and Exhibition VIDEA 93, Southampton, UK.
- Sentner, A. J. Jr. (1976). "A model for the thermodynamic growth of sea ice in numerical investigations of climate," J Phys Oceanogr, Vol 6, pp 379-389.
- Smith, S. D., E. G. Banke and O. M. Johannessen (1970). "Wind stress and turbulence over ice in the Gulf of St. Lawrence," J Geophys Res, Vol 75, pp 2803-2812.

- Suzuki, Y. (1967). "Wind and water drag of an ice floe," In "Physics of snow and ice" Vol 1 (H. Oura ed.), Institute of Low Temperature Science, Hokkaido Univ, Sapporo, Japan, pp 661-666.
- Sverdrop, H. U., M. W. Johnson and R. H. Fleming (1942). "The ocean," Prentice-Hall, Inc, Englewood Cliffs, NJ, pp 489 - 503.
- Thomson, N. R., J. K. Sykes and R. F. McKenna (1988). "Short-term ice motion modeling with application to the Beaufort Sea," J Geophys Res, Vol 93, pp 6819 - 6836.
- Thorade, H. (1914). "Die geschwindigkeit von triftomungen und die ekman'sche theorie," Ann d Hydrogr u Mar Meteor, Bd 42, pp 379 - 391.
- Thordike, A. S., D. A. Rothrock, G. A. Maykut and R. Colony (1975). "The thickness distribution of sea ice," J Geophys Res, Vol 80, pp 4501-4513.
- Washington, W. M., A. J. Semtner Jr., C. Parkinson and L. Morrison (1976). "On the development of a seasonal change sea - ice model," J Phys Oceanogr, Vol 6, pp 679-685.
- Wu, J. (1982). "Wind-stress coefficients over sea surface from breeze to hurricane," J Geophys Res, Vol 87, pp 9704 - 9706.
- Yamaguchi, H., C. K. Rheem and H. Kato (1993). "Pack ice movement simulation using a Distributed Mass / Discrete Floe model," Proc 12th Int Conf POAC, Vol 2, pp 848 - 856.
- 佐藤清富 (1988) : オホーツク海海水の数値モデルによる解析、雪氷、Vol 49、pp 193-201.
- 佐藤清富、加納祐二、白土正明 (1989) : 北海道周辺海域を対象とした数値海水モデル、研究時報、Vol 41、pp 121-136.
- 篠原吉雄 (1989) : 海水の力学的モデルについて、個候時報、56.1、pp 23-52.
- 田畑忠司 (1977) : 海洋科学基礎講座4 海洋物理IV、東海大学出版会、pp 115-221.

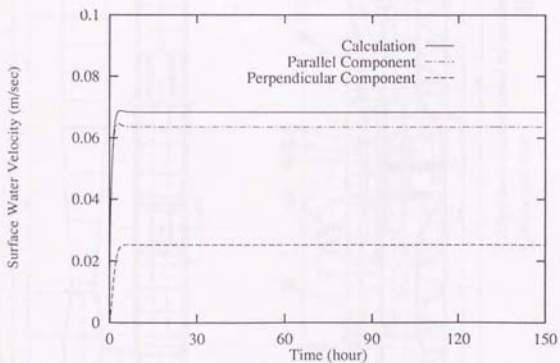
Nomenclatures

A_i	Total ice area in a bunch
bc_x	Center position of a bunch in x-direction
bc_y	Center position of a bunch in y-direction
bl_x	Length of a bunch in x-direction
bl_y	Length of a bunch in y-direction
C_a	Drag coefficient between the air and ice
C_i	Ice concentration of a bunch
C_{ix}	Ice concentration of a bunch in x-direction
C_{iy}	Ice concentration of a bunch in y-direction
C_w	Drag coefficient between the water and ice
d_{cf_x}	Distance between center of neighboring disk floes in x-direction
d_{cf_y}	Distance between center of neighboring disk floe rows in y-direction
dl_i	Representative size of the floes in a bunch
dl_{ix}	Length of the rectangle floe in x-direction
dl_{iy}	Length of the rectangle floe in y-direction
dl_w	Diameter of the disk floe
dt	Time step for the computation
dx	Length of a computational mesh in x-direction
dy	Length of a computational mesh in y-direction
E_{ij}	Eddy viscosity
f	Coriolis parameter
\bar{F}_i	Ice interaction force (internal stress)
g	Acceleration of gravity
h_i	Ice thickness
\bar{k}	Unit vector in the depth direction
M_i	Mass of a bunch
N_{ix}	Number of floe rows in a bunch in x-direction
N_{iy}	Number of floe rows in a bunch in y-direction
n_{ix}	Number of floe rows to collide in a bunch in x-direction
n_{iy}	Number of floe rows to collide in a bunch in y-direction
δ'_x	Space between neighboring floes in x-direction
δ'_y	Space between neighboring floes in y-direction

\bar{v}_a	Wind velocity at a height of 10 m
\bar{v}_i	Ice velocity
\bar{v}_w	Water velocity
ϕ	Latitude of interest
Ω	Angular velocity of the Earth rotation
μ_i	Ice/ice friction coefficient
η	Water surface elevation
η'	Water surface elevation due to ice displacement effect
ρ_a	Density of air
ρ_i	Density of ice
ρ_w	Density of water
$\bar{\tau}_a$	Shear stress acting on a bunch due to the wind
$\bar{\tau}_w$	Shear stress acting on a bunch due to the wind



(a) Deep ocean



(b) Finite depth

Figure 3.7.3 Surface water velocity driven by a constant wind

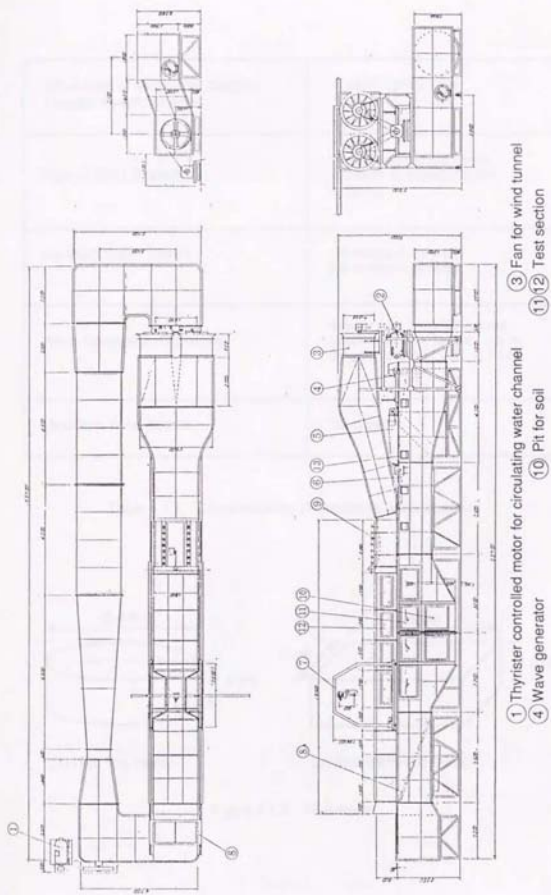


Figure 4.1.1 Circulating Water Channel

Dimension of Measuring Section (length \times width \times depth)	6.4m \times 1.8m \times 1.0m
Type of Drive System	thyristor controlled motor diameter of impeller 0.9m 3 blades
Maximum Water Speed	1.5 m/sec in forward 0.8 m/sec in reverse
Wave Generation Capability	regular and irregular waves maximum wave height : 0.2 m range of period : 0.5 - 2.2 sec
Maximum Wind Speed	15 m/sec

Table 4.1.1 Characteristics of circulating water channel

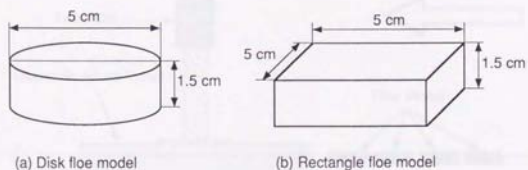


Figure 4.1.2 Floe model

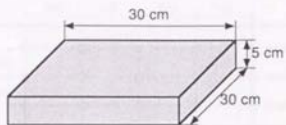


Figure 4.1.3 Ocean structure model

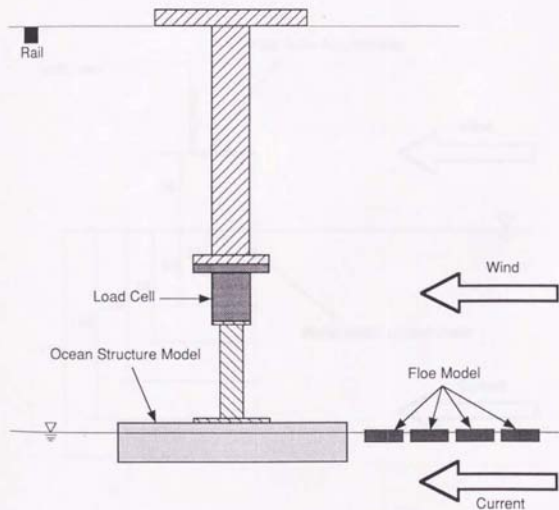


Fig 4.1.4 System arrangement

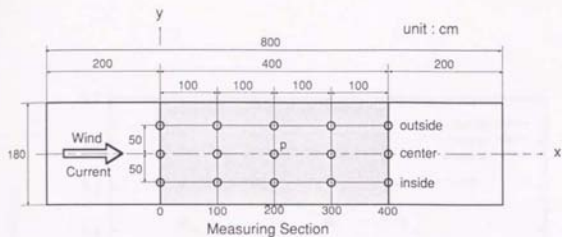


Figure 4.2.1 Test domain

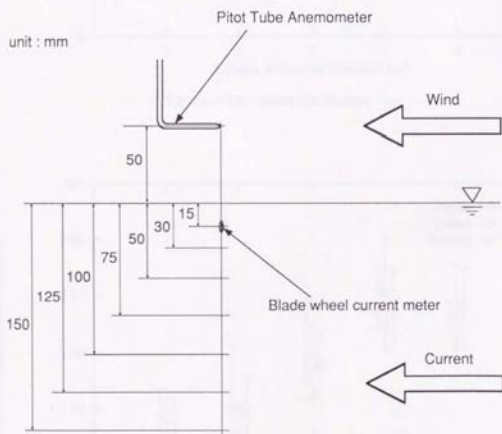


Figure 4.3.1 Measurement of wind and current

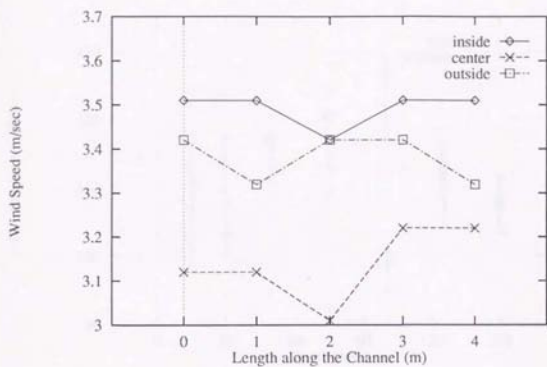


Figure 4.3.2 Wind distribution

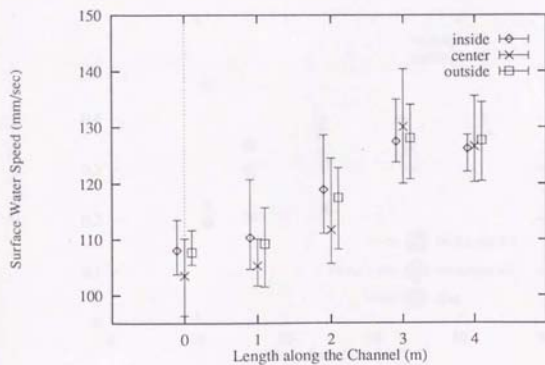


Figure 4.3.3 Current distribution

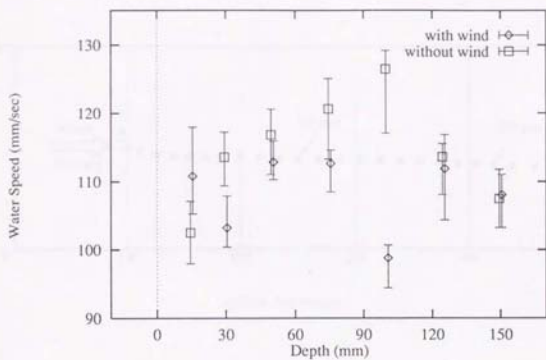


Figure 4.3.4 Current distribution in depth direction

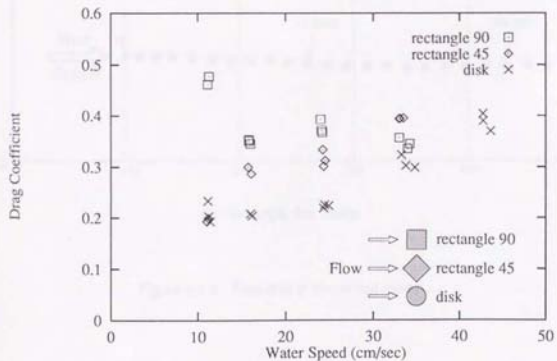
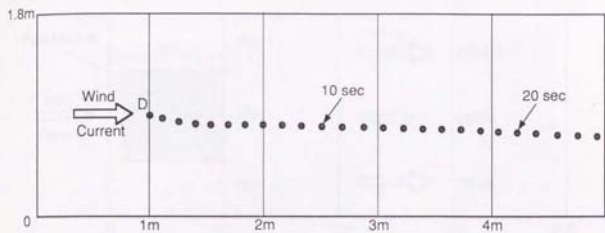
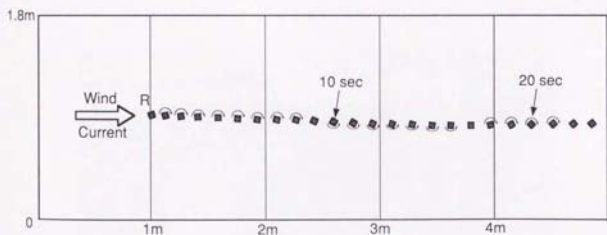


Figure 4.4.1 Water drag coefficient



(a) Disk floe model



(b) Rectangle floe model

Figure 4.4.2 Free drift of single floe model

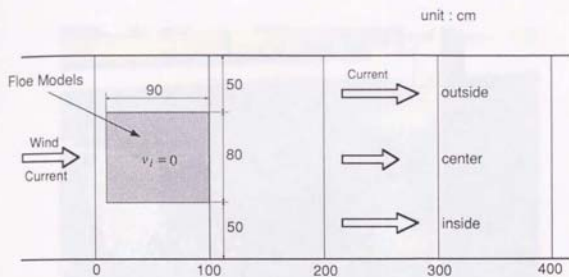
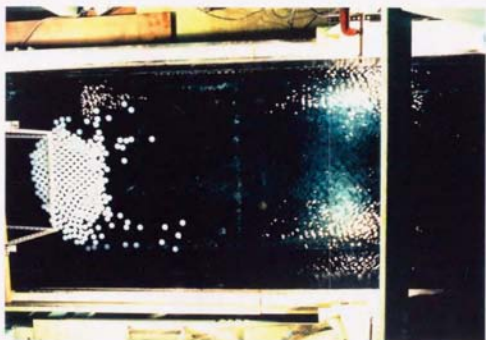
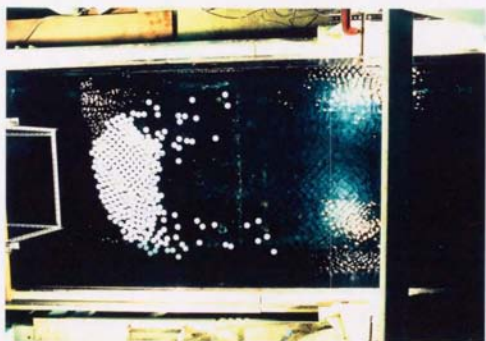


Figure 4.4.3 Initial condition of free drift of floe models

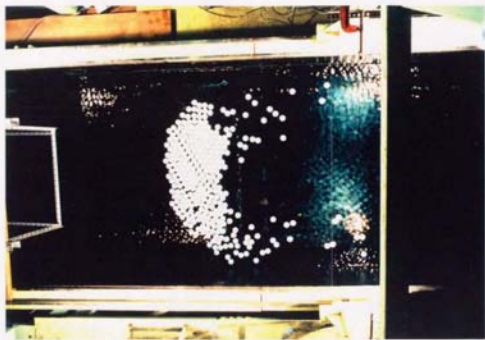


(a) $t = 5$ second

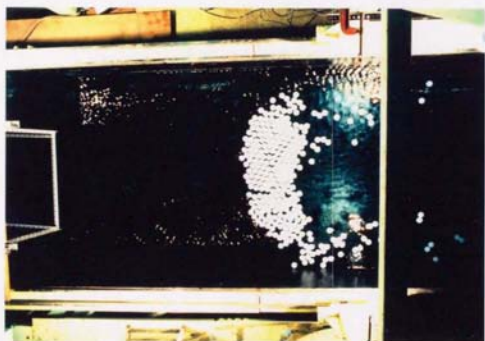


(b) $t = 10$ second

Figure 4.4.4 Free drift of disk floe models

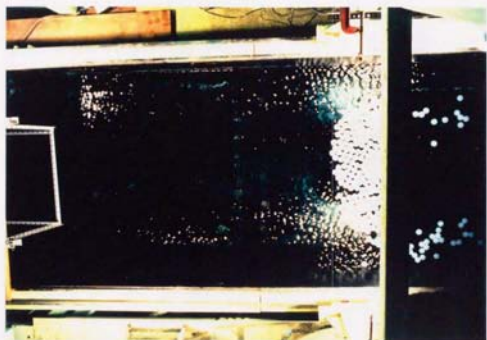


(c) $t = 15$ second

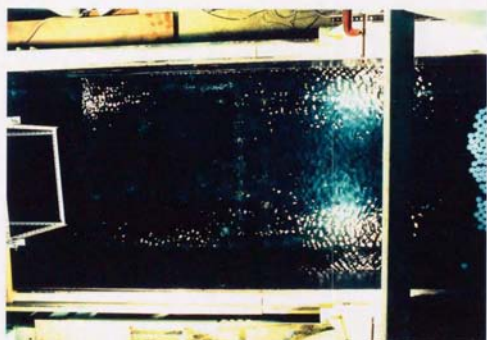


(d) $t = 20$ second

Figure 4.4.4 Free drift of disk floe models

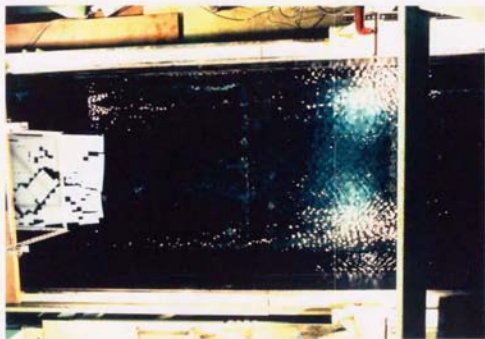


(e) $t = 25$ second



(f) $t = 30$ second

Figure 4.4.4 Free drift of disk floe models

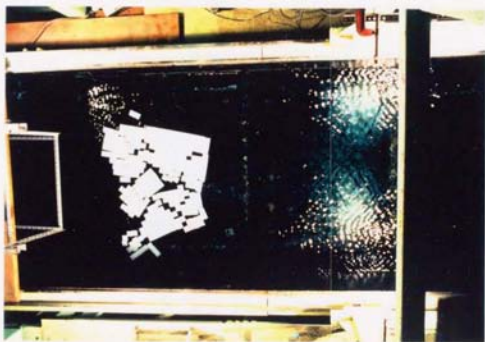


(a) $t = 5$ second



(b) $t = 10$ second

Figure 4.4.5 Free drift of rectangle floe models

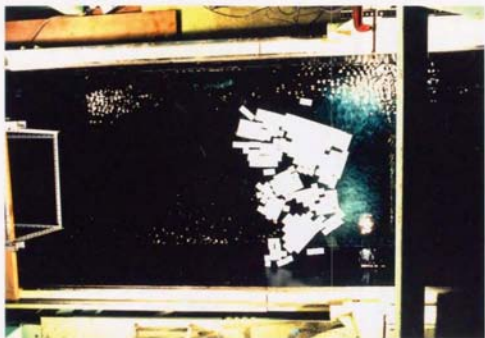


(c) $t = 15$ second

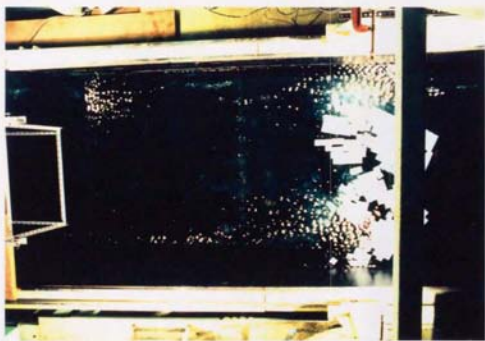


(d) $t = 20$ second

Figure 4.4.5 Free drift of rectangle floe models

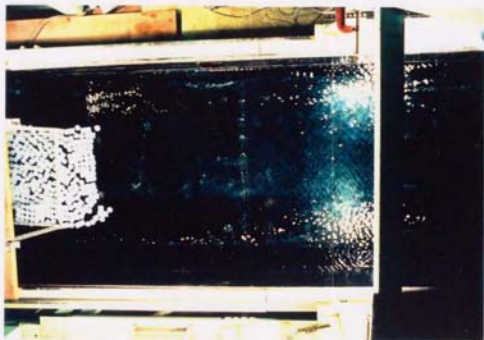


(e) $t = 25$ second

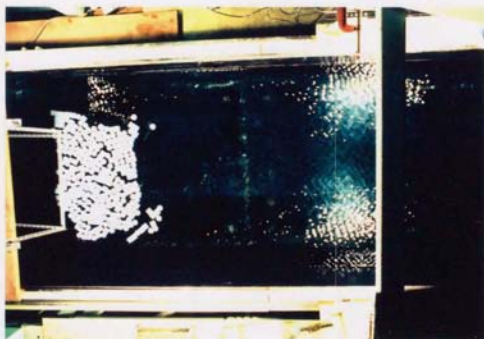


(f) $t = 30$ second

Figure 4.4.5 Free drift of rectangle floe models

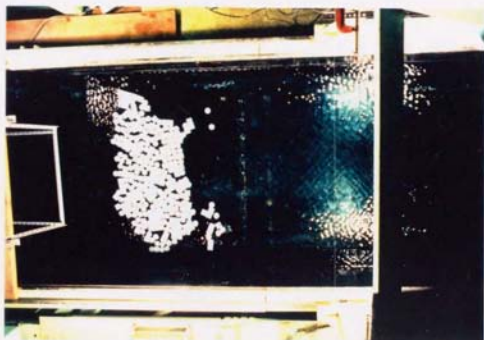


(a) $t = 5$ second

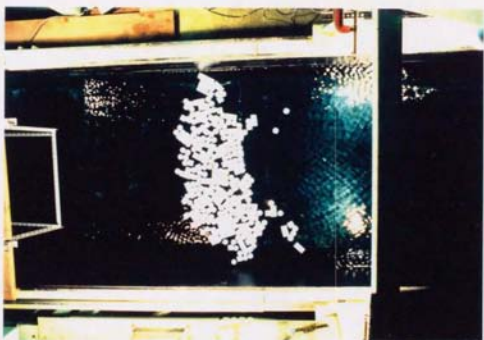


(b) $t = 10$ second

Figure 4.4.6 Free drift of disk and rectangle floe models

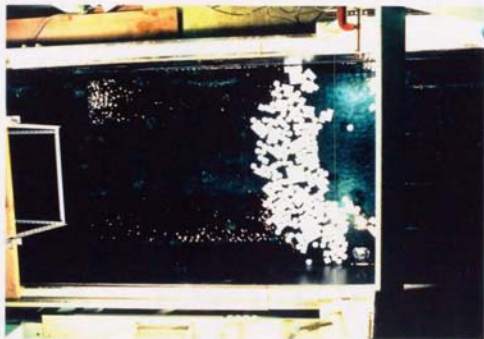


(c) $t = 15$ second



(d) $t = 20$ second

Figure 4.4.6 Free drift of disk and rectangle floe models



(e) $t = 25$ second



(f) $t = 30$ second

Figure 4.4.6 Free drift of disk and rectangle floe models

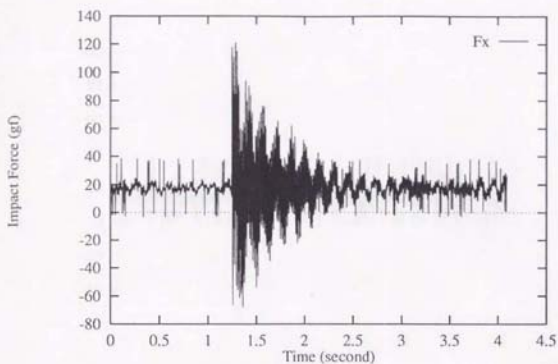


Figure 4.5.1 Impact force on a structure due to disk floe model collision with sampling time interval of 0.0005 sec

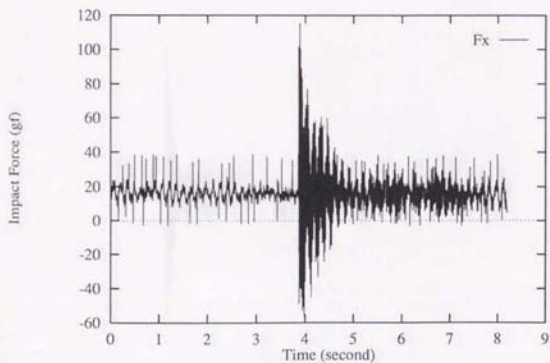


Figure 4.5.2 Impact force on a structure due to disk floe model collision with sampling time interval of 0.001 sec

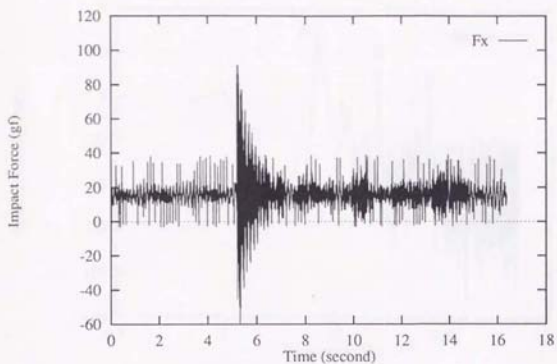


Figure 4.5.3 Impact force on a structure due to disk floe model collision with sampling time interval of 0.002 sec

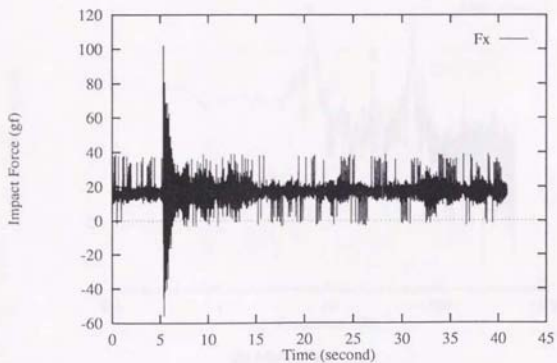
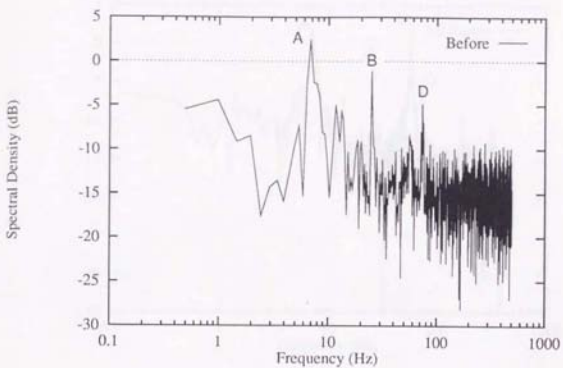
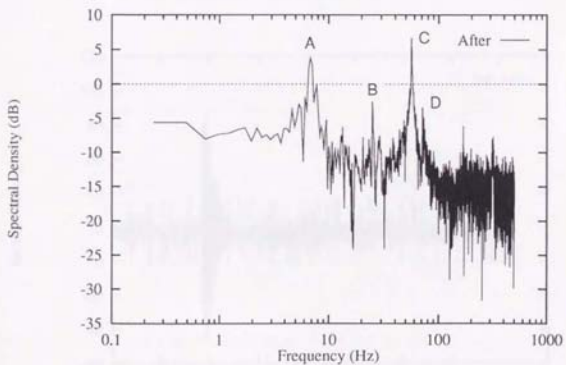


Figure 4.5.4 Impact force on a structure due to disk floe model collision with sampling time interval of 0.005 sec

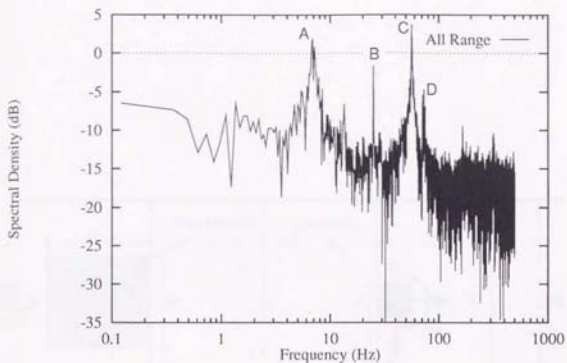


(a) Before collision



(b) After collision

Figure 4.5.5 Spectrum of impact force on a structure due to disk floe model collision with sampling time interval of 0.001 sec



(c) All range of time

Figure 4.5.5 Spectrum of impact force on a structure due to disk floe model collision with sampling time interval of 0.001 sec

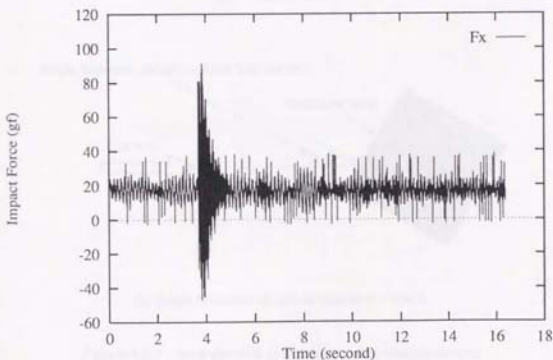
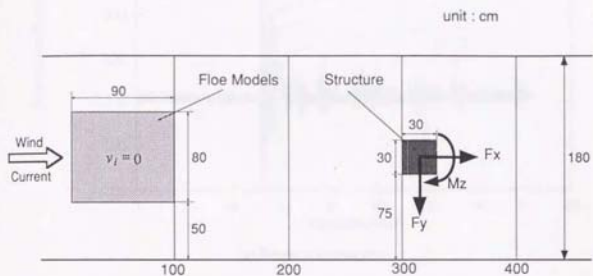
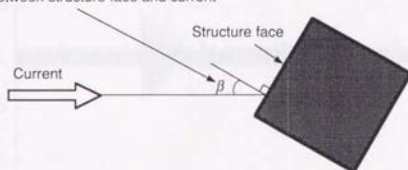


Figure 4.5.6 Impact force on a structure due to rectangle floe model collision with sampling time interval of 0.002 sec



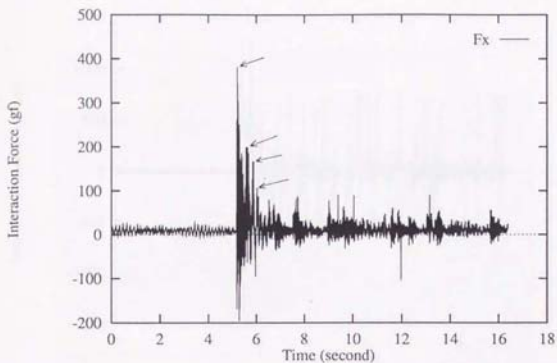
(a) Initial condition

Angle between structure face and current

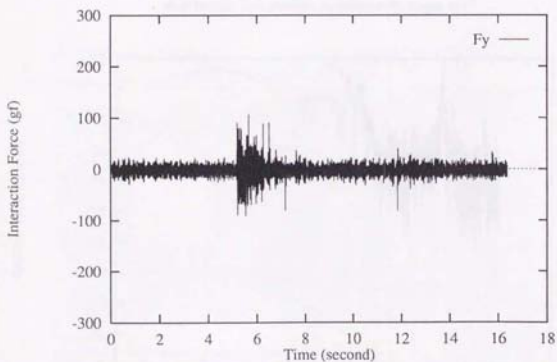


(b) Angle between structure face and current

Figure 4.5.7 Arrangement of drift test of floe models around a structure of 30cm×30cm×5cm

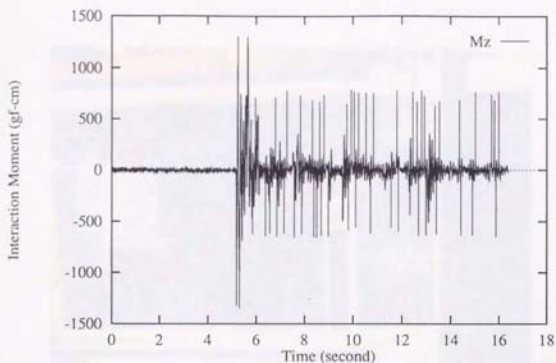


(a) Force in x-direction



(b) Force in y-direction

Figure 4.5.8 Interaction force on a structure of 30cm×30cm×5cm due to disk floe models collision with angle of 0°



(c) Moment in z-direction

Figure 4.5.8 Interaction force on a structure of 30cm×30cm×5cm due to disk floe models collision with angle of 0°

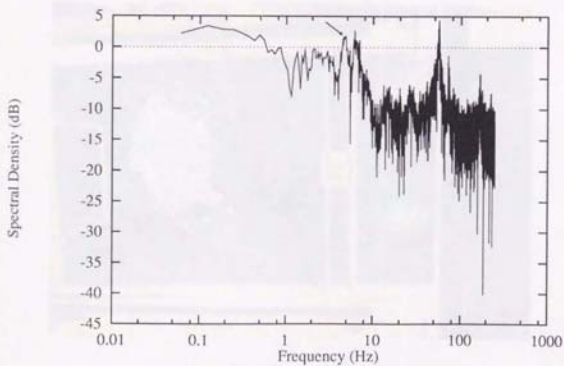
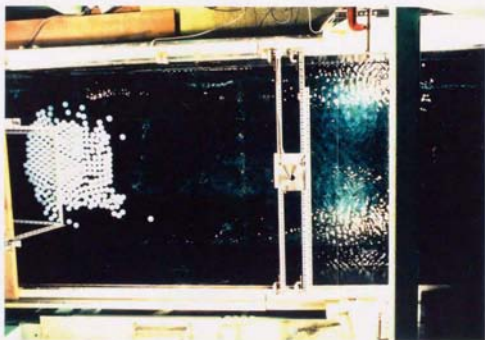
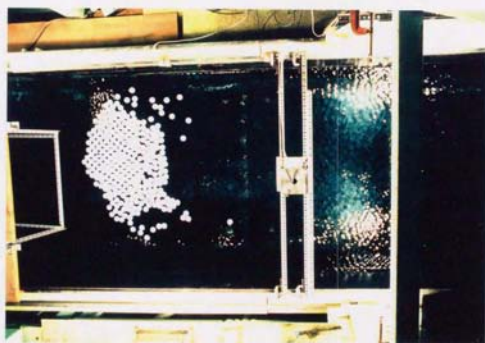


Figure 4.5.9 Spectrum of x-direction force on a structure of 30cm×30cm×5cm due to disk floe models collision with angle of 0°

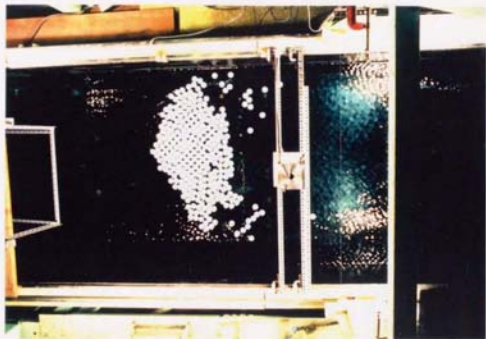


(a) $t = 6$ second

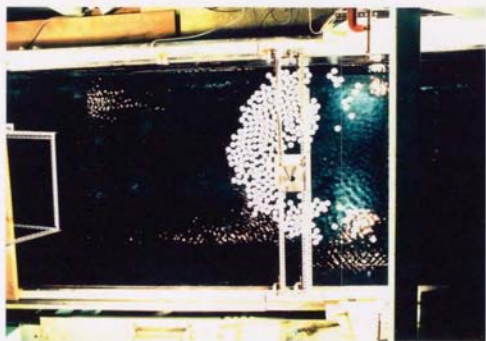


(b) $t = 12$ second

Figure 4.5.10 Drift of disk floe models around a structure of $30\text{cm} \times 30\text{cm} \times 5\text{cm}$ with angle of 0°

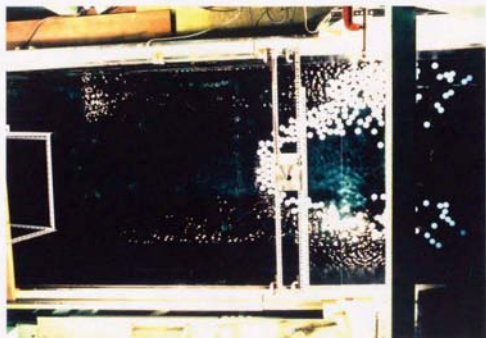


(c) $t = 18$ second

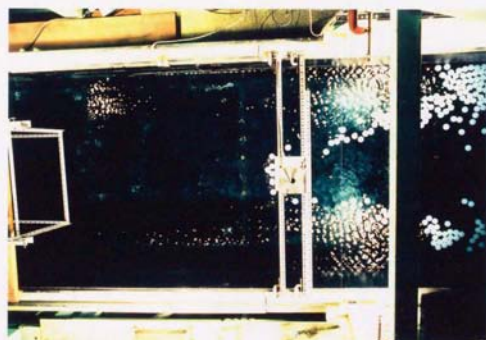


(d) $t = 24$ second

Figure 4.5.10 Drift of disk floe models around a structure of $30\text{cm} \times 30\text{cm} \times 5\text{cm}$ with angle of 0°

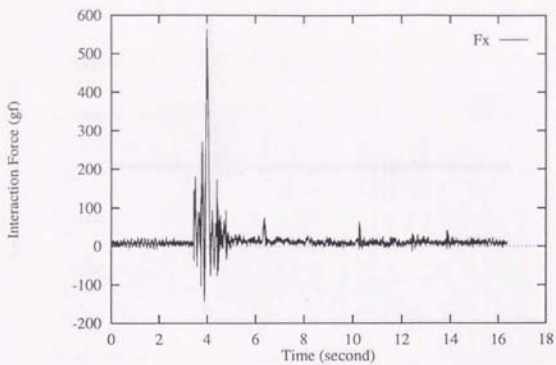


(e) $t = 30$ second

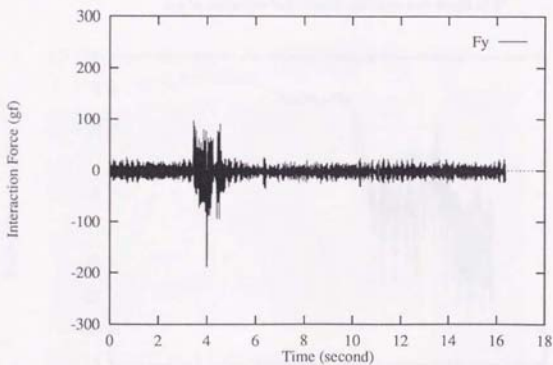


(f) $t = 36$ second

Figure 4.5.10 Drift of disk floe models around a structure of $30\text{cm} \times 30\text{cm} \times 5\text{cm}$ with angle of 0°

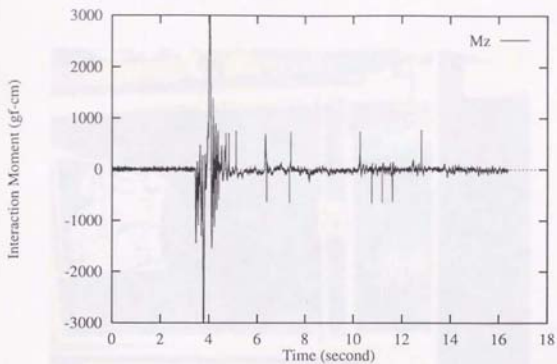


(a) Force in x-direction



(b) Force in y-direction

Figure 4.5.11 Interaction force on a structure of $30\text{cm} \times 30\text{cm} \times 5\text{cm}$ due to rectangle floe models collision with angle of 0°



(c) Moment in z-direction

Figure 4.5.11 Interaction force on a structure of 30cmX30cmX5cm due to rectangle floe models collision with angle of 0°

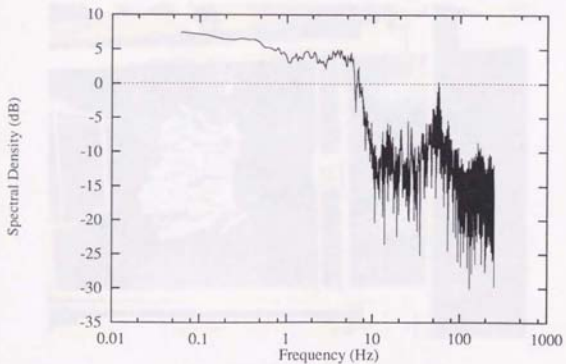
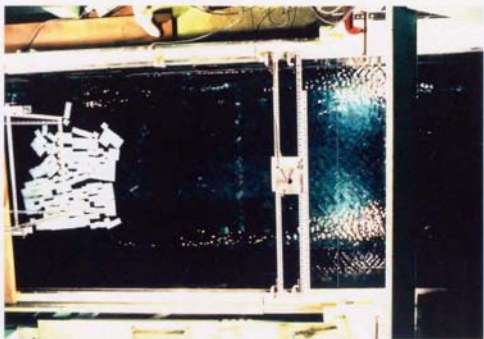


Figure 4.5.12 Spectrum of x-direction force on a structure of 30cmX30cmX5cm due to rectangle floe models collision with angle of 0°

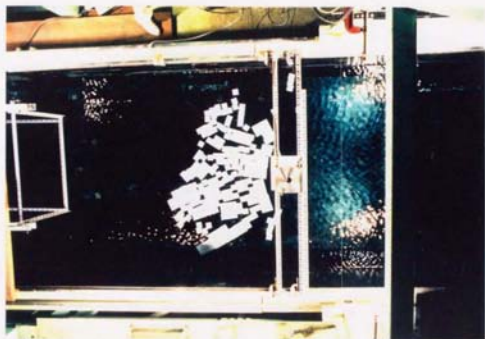


(a) $t = 6$ second

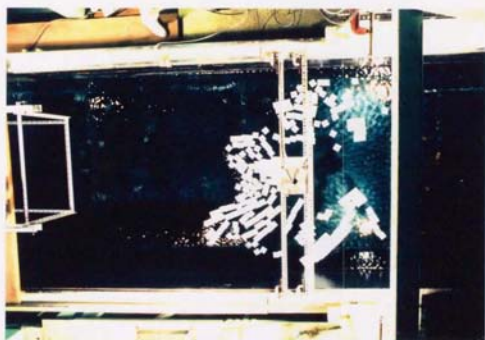


(b) = 12 second

Figure 4.5.13 Drift of rectangle floe models around a structure of 30cm \times 30cm \times 5cm with angle of 0°

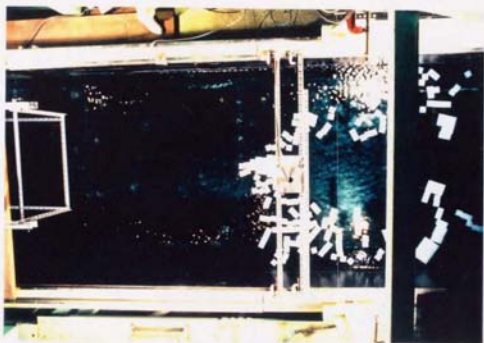


(c) $t = 18$ second

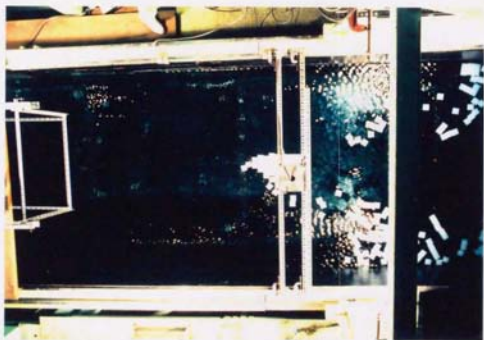


(d) $t = 24$ second

Figure 4.5.13 Drift of rectangle floe models around a structure of 30cm \times 30cm \times 5cm with angle of 0°

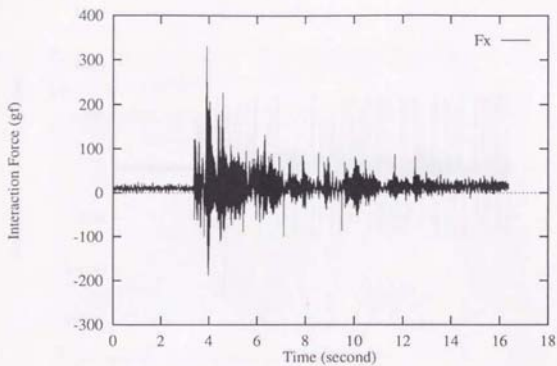


(e) $t = 30$ second

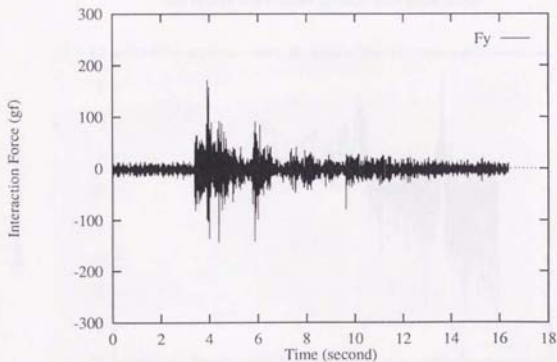


(f) $t = 36$ second

Figure 4.5.13 Drift of rectangle floe models around a structure of $30\text{cm} \times 30\text{cm} \times 5\text{cm}$ with angle of 0°

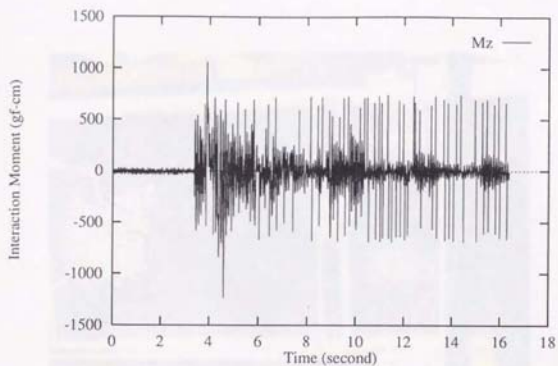


(a) Force in x-direction



(b) Force in y-direction

Figure 4.5.14 Interaction force on a structure of 30cm×30cm×5cm due to disk floe models collision with angle of 30°



(c) Moment in z-direction

Figure 4.5.14 Interaction force on a structure of 30cmX30cmX5cm due to disk floe models collision with angle of 30°

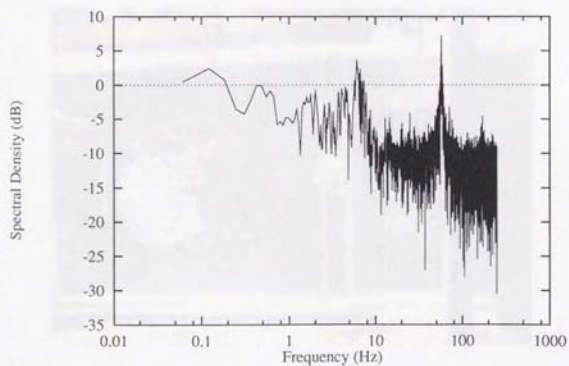
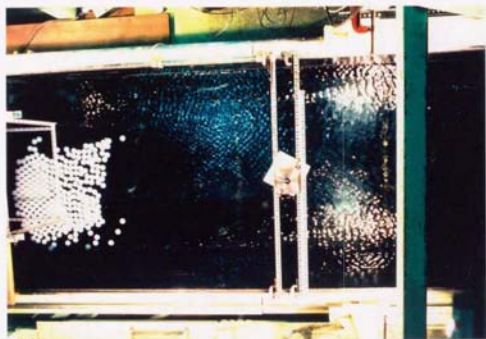
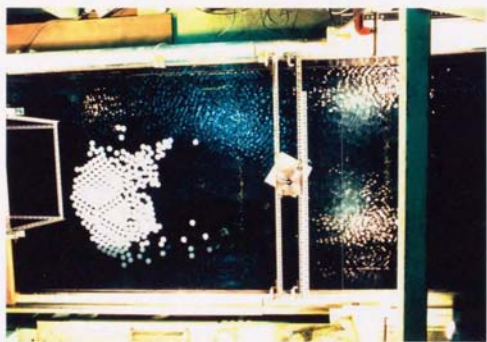


Figure 4.5.15 Spectrum of x-direction force on a structure of 30cmX30cmX5cm due to disk floe models collision with angle of 30°

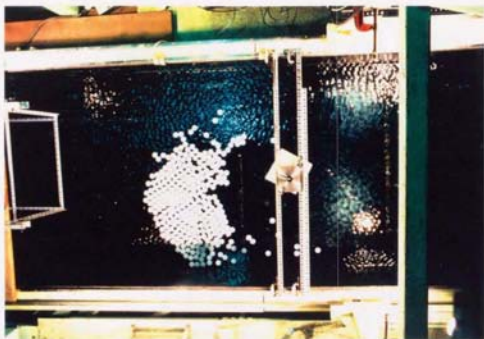


(a) $t = 6$ second

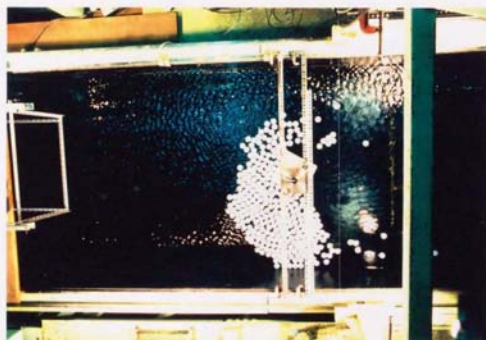


(b) $t = 12$ second

Figure 4.5.16 Drift of disk floe models around a structure of $30\text{cm} \times 30\text{cm} \times 5\text{cm}$ with angle of 30°

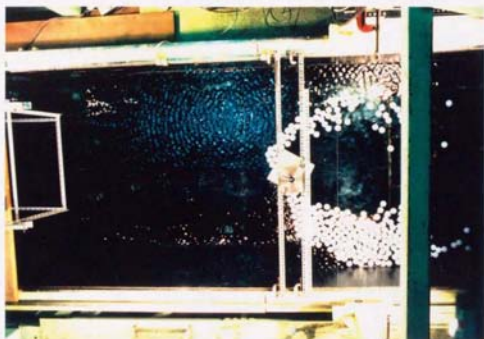


(c) $t = 18$ second

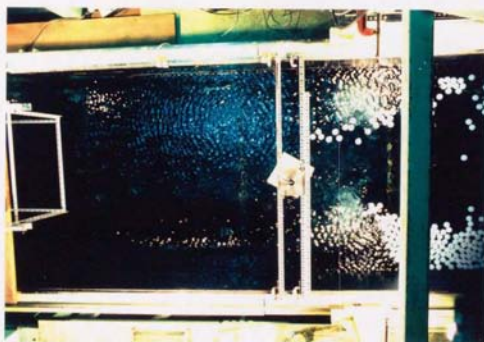


(d) $t = 24$ second

Figure 4.5.16 Drift of disk floe models around a structure of $30\text{cm} \times 30\text{cm} \times 5\text{cm}$ with angle of 30°

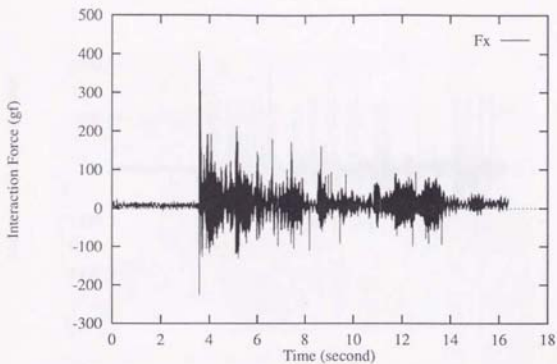


(e) $t = 30$ second

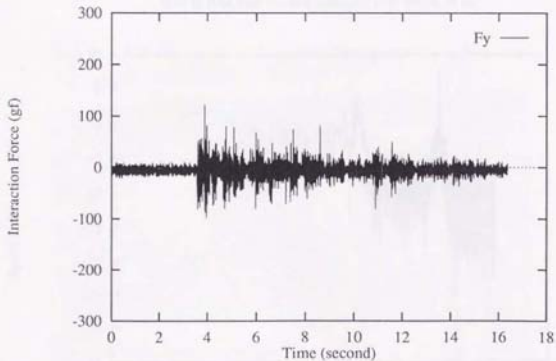


(f) $t = 36$ second

Figure 4.5.16 Drift of disk floe models around a structure of $30\text{cm} \times 30\text{cm} \times 5\text{cm}$ with angle of 30°

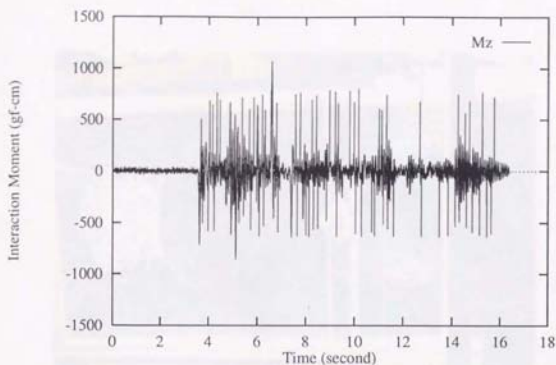


(a) Force in x-direction



(b) Force in y-direction

Figure 4.5.17 Interaction force on a structure of 30cmX30cmX5cm due to disk floe models collision with angle of 45°



(c) Moment in z-direction

Figure 4.5.17 Interaction force on a structure of 30cmX30cmX5cm due to disk floe models collision with angle of 45°

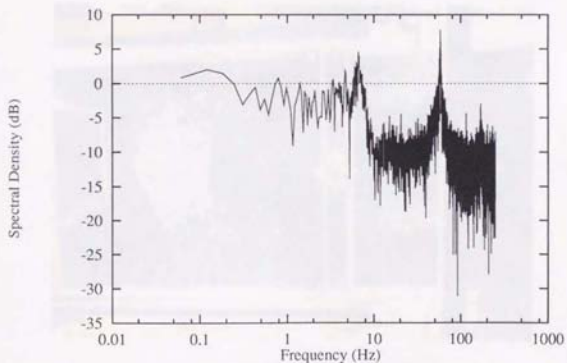
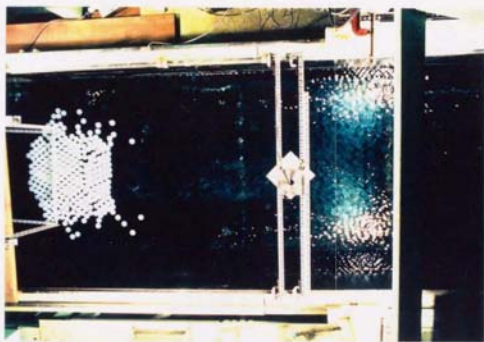
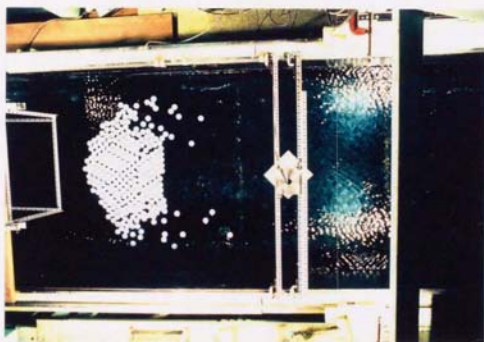


Figure 4.5.18 Spectrum of x-direction force on a structure of 30cmX30cmX5cm due to disk floe models collision with angle of 45°

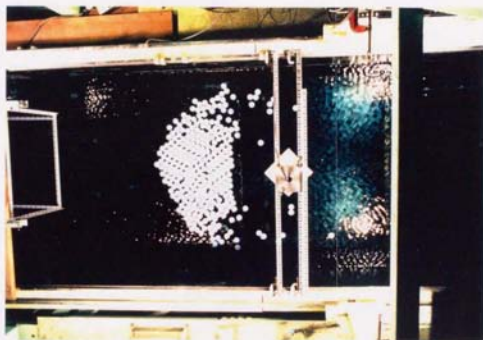


(a) $t = 6$ second

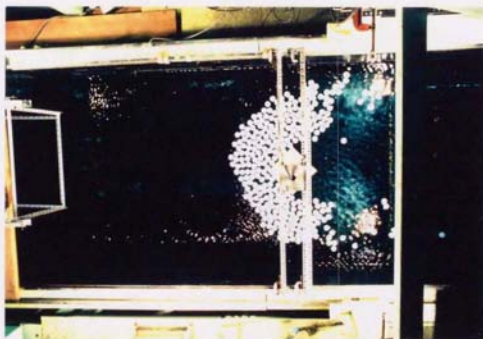


(b) $t = 12$ second

Figure 4.5.19 Drift of disk floe models around a structure of $30\text{cm} \times 30\text{cm} \times 5\text{cm}$ with angle of 45°

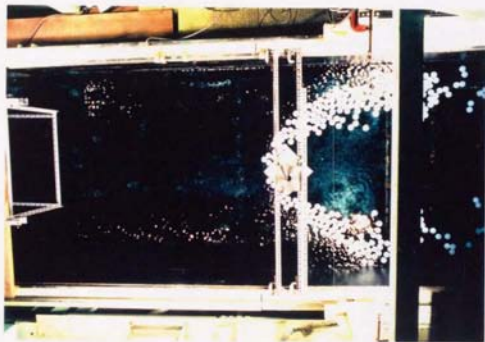


(c) $t = 18$ second

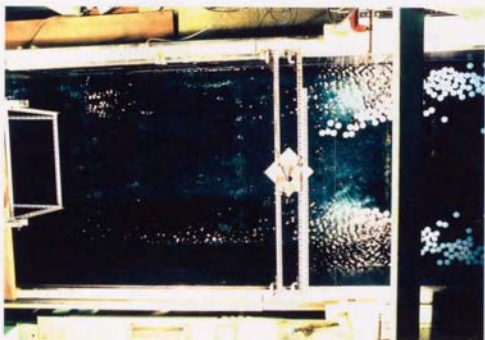


(d) $t = 24$ second

Figure 4.5.19 Drift of disk floe models around a structure of $30\text{cm} \times 30\text{cm} \times 5\text{cm}$ with angle of 45°

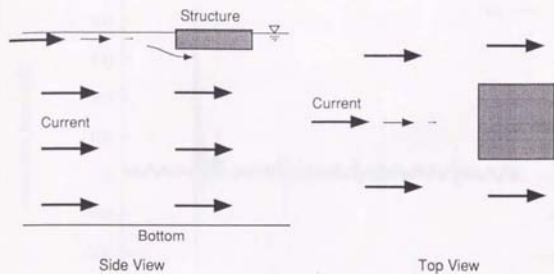


(e) $t = 30$ second

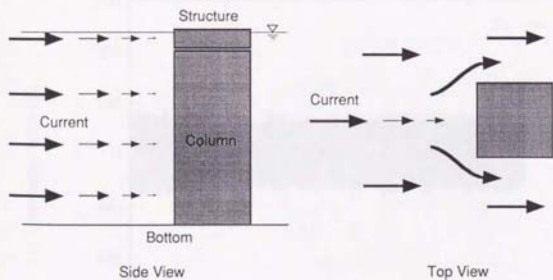


(f) $t = 36$ second

Figure 4.5.19 Drift of disk floe models around a structure of $30\text{cm} \times 30\text{cm} \times 5\text{cm}$ with angle of 45°

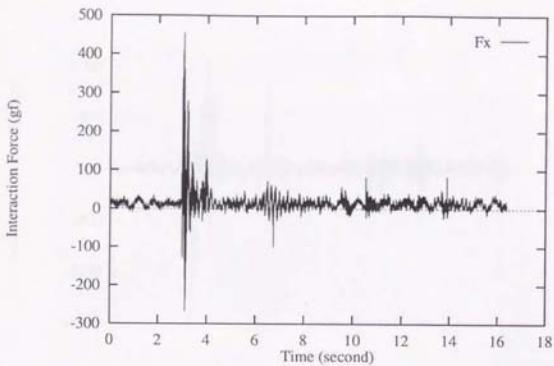


(a) Without water stop column

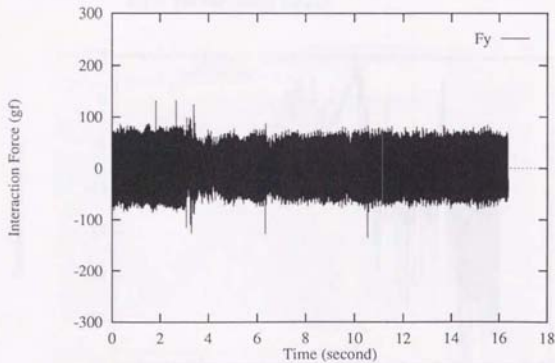


(b) With water stop column

Figure 4.6.1 Current distribution around a water stop structure

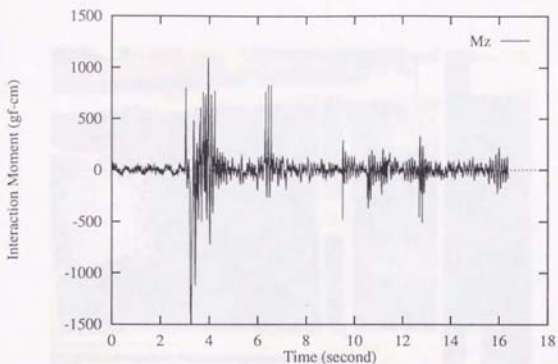


(a) Force in x-direction



(b) Force in y-direction

Figure 4.6.2 Interaction force on a water stop structure of 30cm \times 30cm \times 5cm due to disk floe models collision



(c) Moment in z-direction

Figure 4.6.2 Interaction force on a water stop structure of 30cm×30cm×5cm due to disk floe models collision

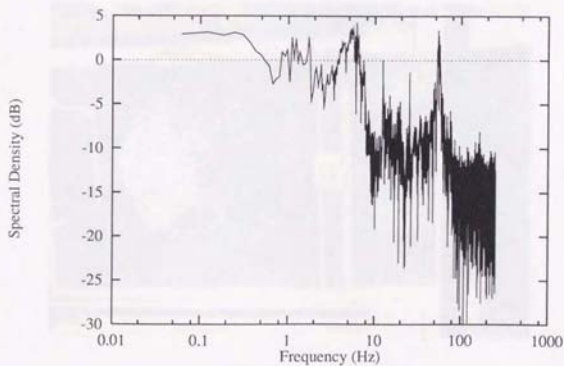
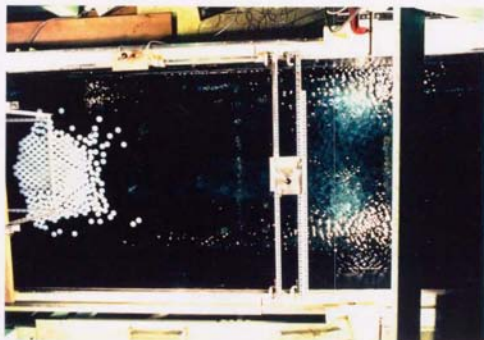
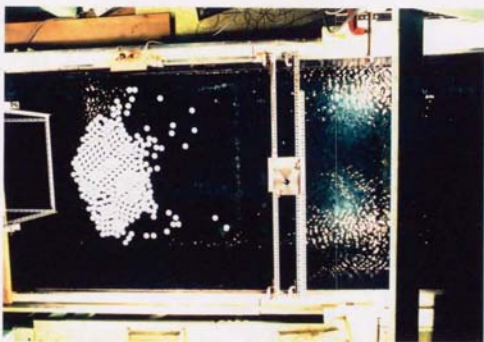


Figure 4.6.3 Spectrum of x-direction force on a water stop structure of 30cm×30cm×5cm due to disk floe models collision

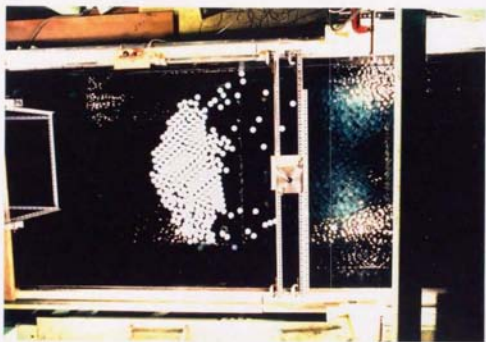


(a) $t = 6$ second



(b) $t = 12$ second

Figure 4.6.4 Drift of disk floe models around a water stop structure of 30cmX30cmX5cm

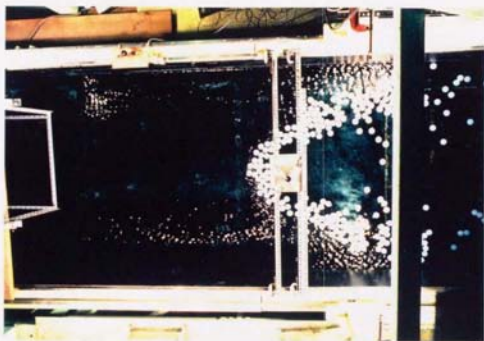


(c) $t = 18$ second

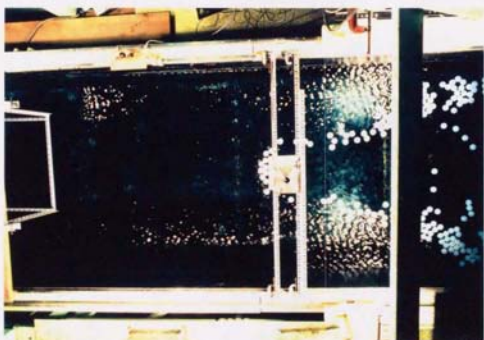


(d) $t = 24$ second

Figure 4.6.4 Drift of disk floe models around a water stop structure of $30\text{cm} \times 30\text{cm} \times 5\text{cm}$

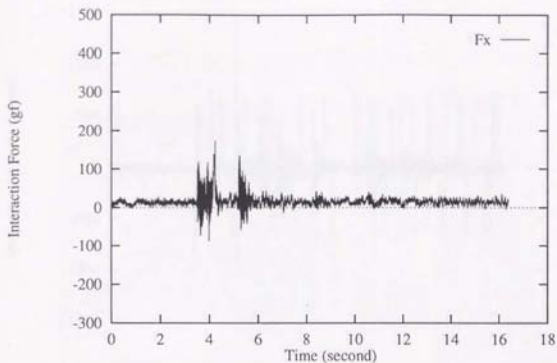


(e) $t = 30$ second

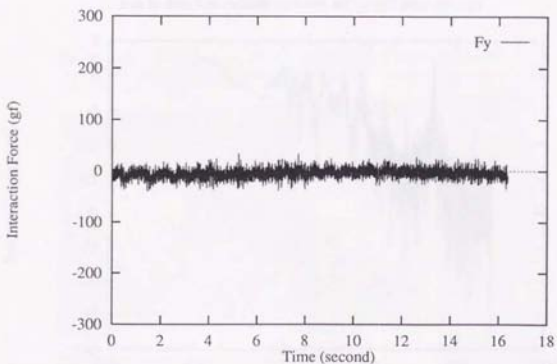


(f) $t = 36$ second

Figure 4.6.4 Drift of disk floe models around a water stop structure of $30\text{cm} \times 30\text{cm} \times 5\text{cm}$

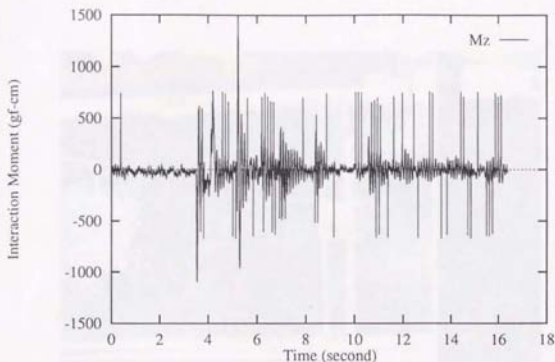


(a) Force in x-direction



(b) Force in y-direction

Figure 4.6.5 Interaction force on a water stop structure of 30cm \times 30cm \times 5cm due to disk floe models collision with water stop column



(c) Moment in z-direction

Figure 4.6.5 Interaction force on a water stop structure of 30cm×30cm×5cm due to disk floe models collision with water stop column

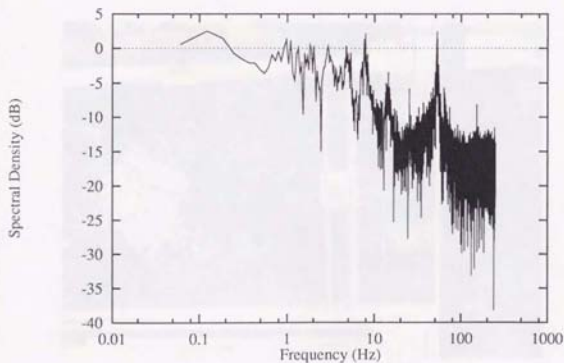
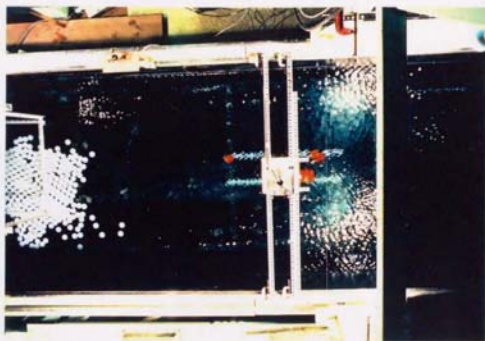
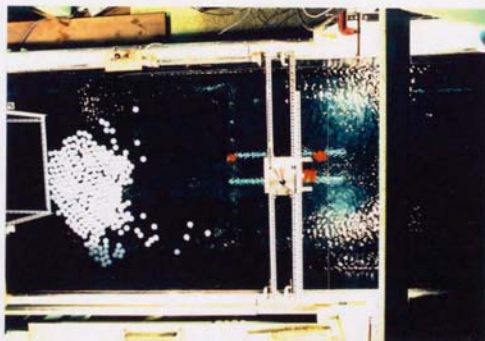


Figure 4.6.6 Spectrum of x-direction force on a water stop structure of 30cm×30cm×5cm due to disk floe models collision with water stop column

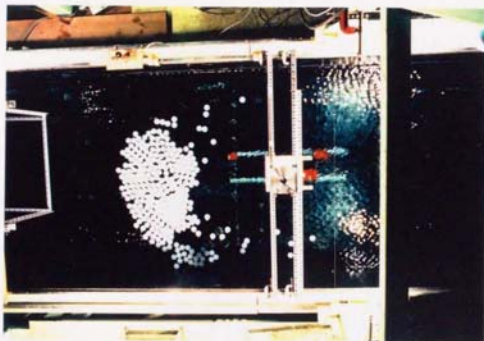


(a) $t = 6$ second

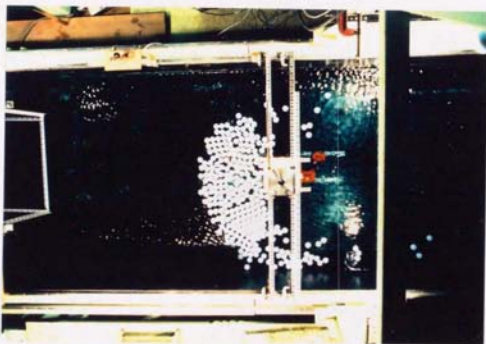


(b) $t = 12$ second

Figure 4.6.7 Drift of disk floe models around a water stop structure of $30\text{cm} \times 30\text{cm} \times 5\text{cm}$ with water stop column

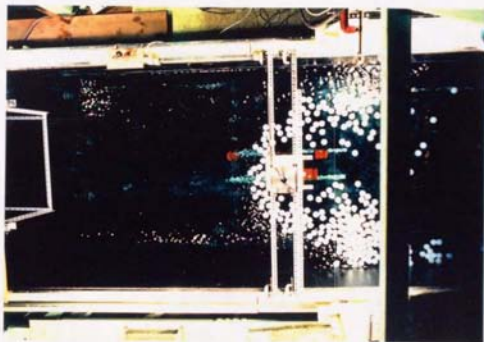


(c) $t = 18$ second

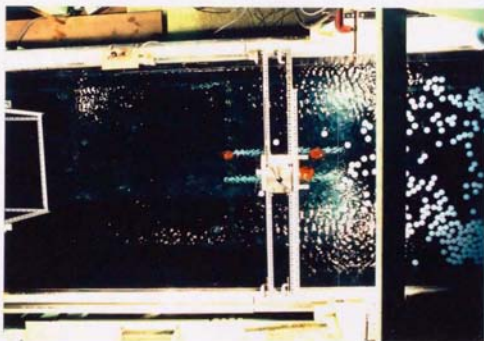


(d) $t = 24$ second

Figure 4.6.7 Drift of disk floe models around a water stop structure of $30\text{cm} \times 30\text{cm} \times 5\text{cm}$ with water stop column



(e) $t = 30$ second



(f) $t = 36$ second

Figure 4.6.7 Drift of disk floe models around a water stop structure of $30\text{cm} \times 30\text{cm} \times 5\text{cm}$ with water stop column

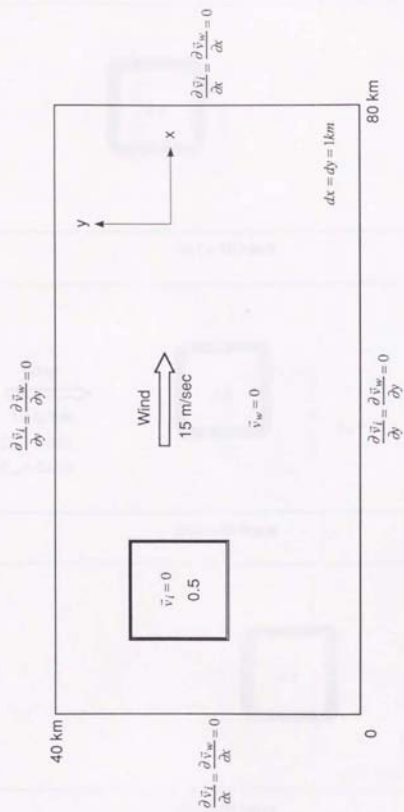
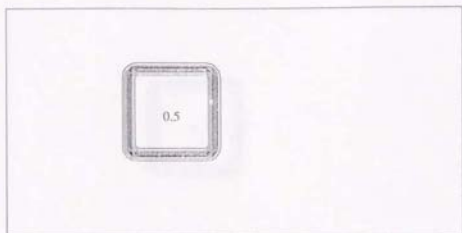
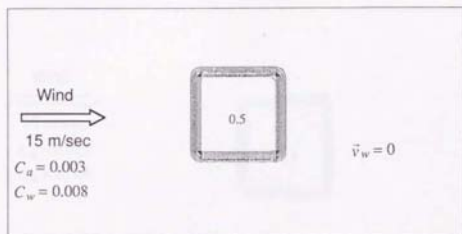


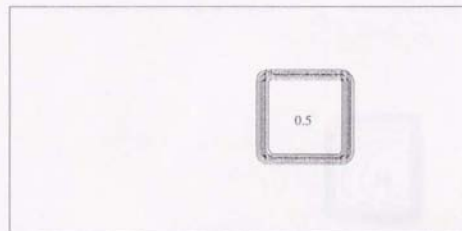
Figure 5.2.1 Computation domain and initial conditions of simulation of wind driven pack ice movement and spread in a simplified 50m deep continental shelf partially covered with a rectangular ice group of 15km X 15km



(a) $t = 10$ hours

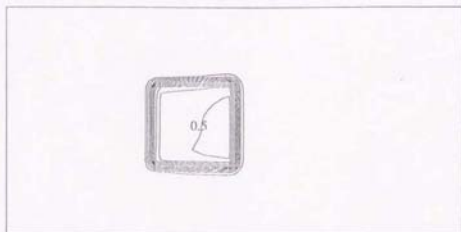


(b) $t = 20$ hours

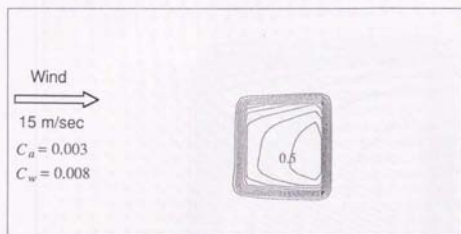


(c) $t = 30$ hours

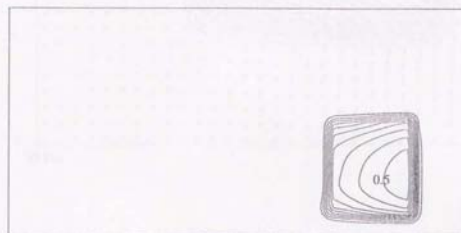
Figure 5.2.2 Computed wind driven Pack ice movement and spread when ocean current is disregarded in a simplified 50m deep continental shelf partially covered with a rectangular ice group of 15km \times 15km



(a) $t = 10$ hours



(b) $t = 20$ hours



(c) $t = 30$ hours

Figure 5.2.3 Computed wind driven Pack ice movement and spread when ocean current is taken into account in a simplified 50m deep continental shelf partially covered with a rectangular ice group of 15km X 15km

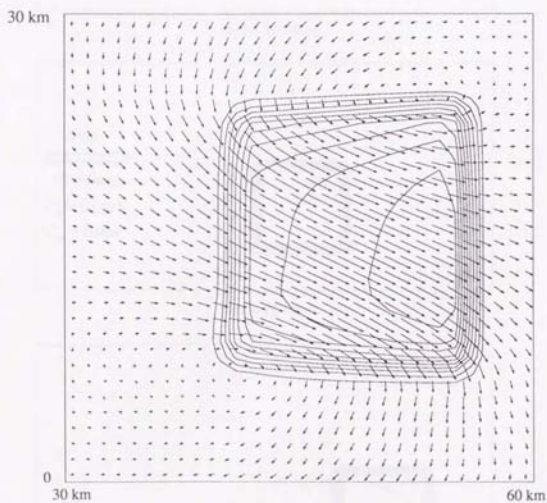
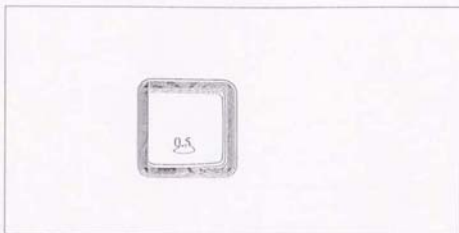
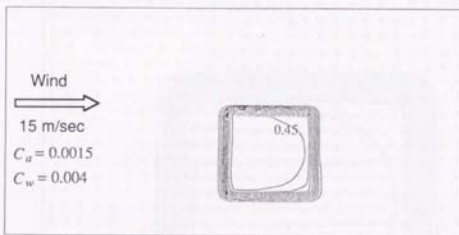


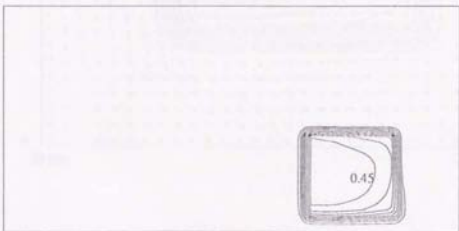
Figure 5.2.4 Surface water velocity vectors induced by Ice cover after 20 hours together with ice concentration contours in a simplified 50m deep continental shelf partially covered with a rectangular ice group of 15km \times 15km



(a) $t = 10$ hours



(b) $t = 20$ hours



(c) $t = 30$ hours

Figure 5.2.5 Computed wind driven Pack ice movement and spread when ocean current is taken into account with air/ice drag coefficient of 0.004 and ice/water drag coefficient of 0.0015 in a simplified 50m deep continental self partially covered with a rectangular ice group of 15kmX15km

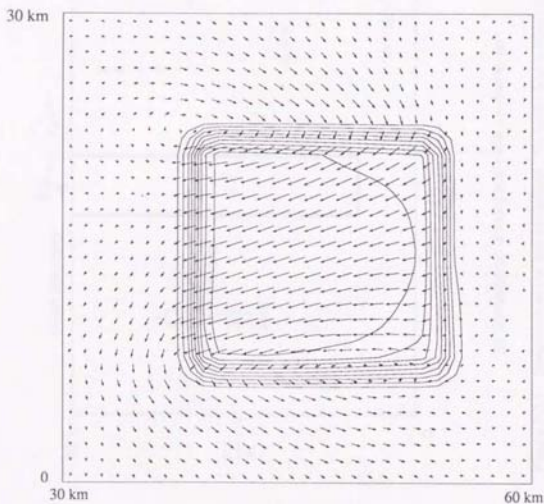
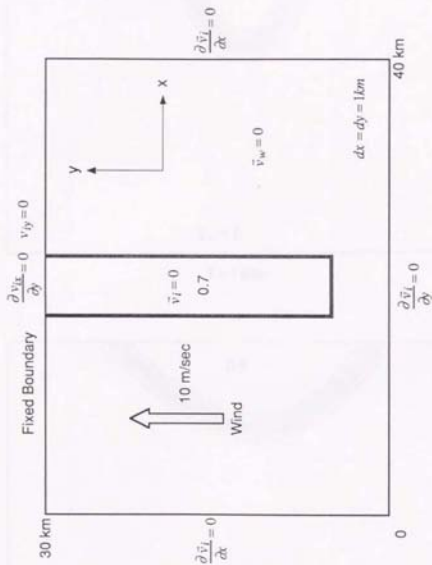
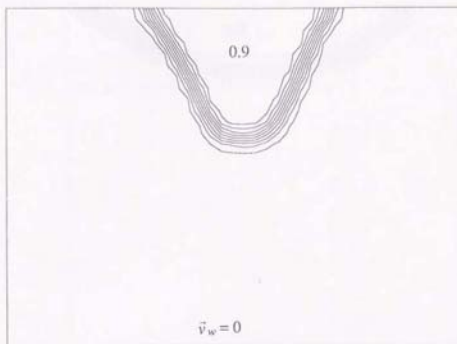


Figure 5.2.6 Surface water velocity vectors induced by ice cover after 20 hours together with ice concentration contours with air/ice drag coefficient of 0.004 and ice/water drag coefficient of 0.0015 in a simplified 50m deep continental self partially covered with a rectangular ice group of 15kmX15km

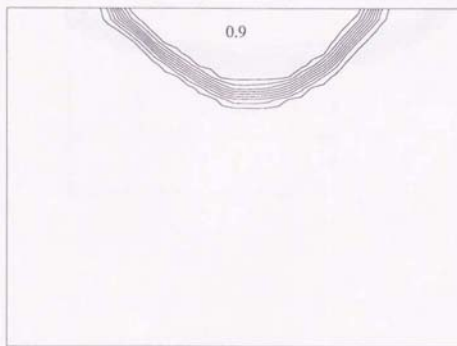


(a) Computation domain and initial ice distribution

Figure 5.3.1 Simulation of ice floe expansion; No water flow is taken into account.



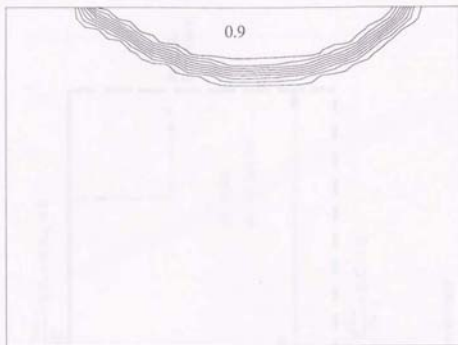
$t = 1$ day



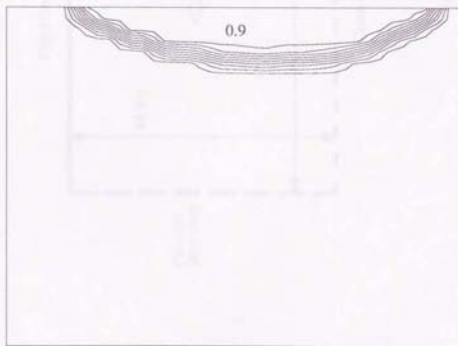
$t = 2$ days

(b) Computed ice distribution

Figure 5.3.1 Simulation of ice floe expansion : No water flow is taken into account.



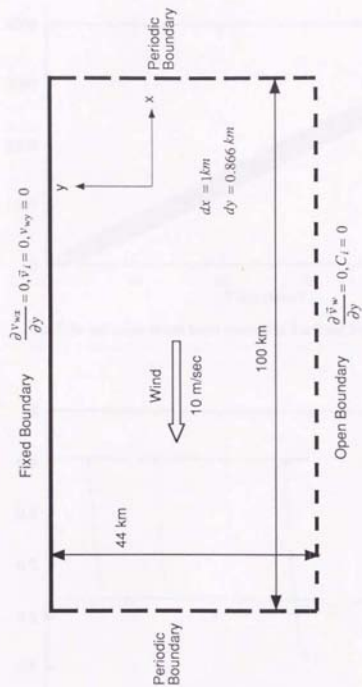
$t = 3$ days



$t = 4$ days

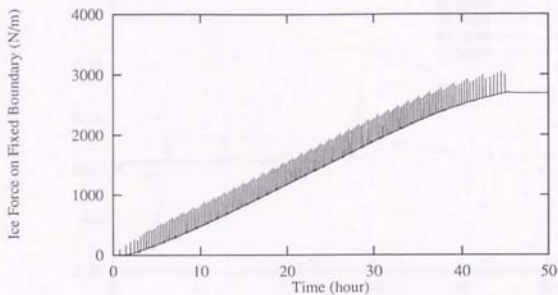
(b) Computed ice distribution

Figure 5.3.1 Simulation of ice floe expansion : No water flow is taken into account.

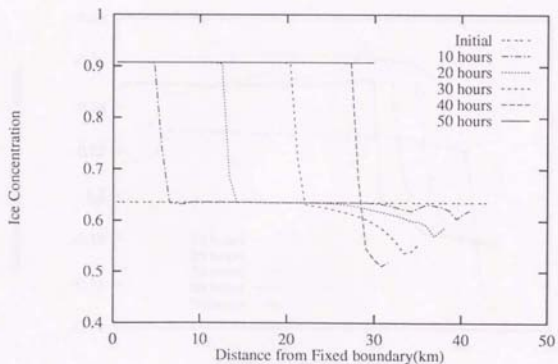


(a) Computation domain

Figure 5.4.1 Result of wind driven ice/water combined flow along an infinitely long fixed boundary

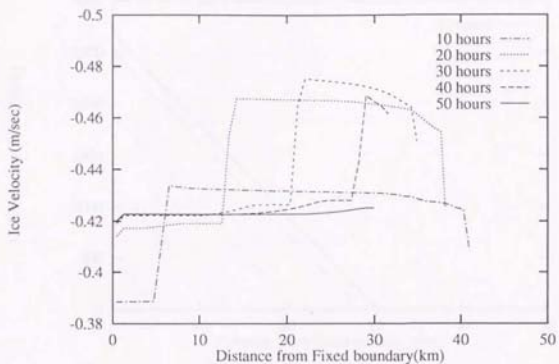


(b) Time variation of ice force normal to the fixed boundary

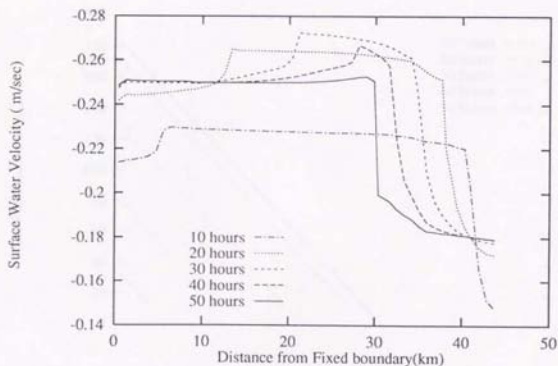


(c) Distribution of ice concentration

Figure 5.4.1 Result of wind driven ice/water combined flow along an infinite long fixed boundary

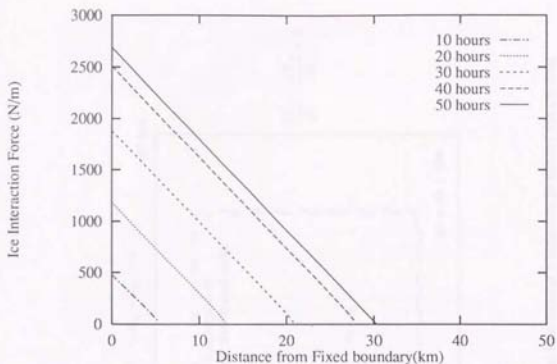


(d) Distribution of ice velocity parallel to the fixed boundary
(Positive in the up wind direction)

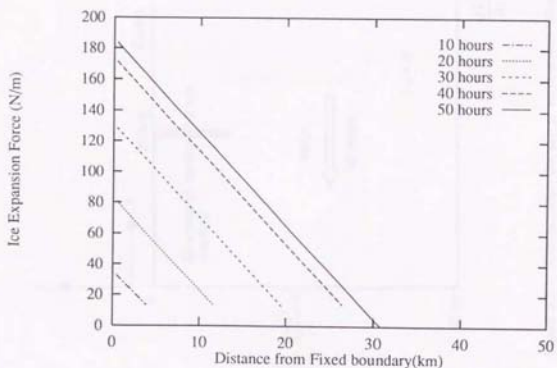


(e) Distribution of surface water velocity parallel to the fixed boundary
(Positive in the up wind direction)

Figure 5.4.1 Result of wind driven ice/water combined flow along an infinite long fixed boundary



(f) Distribution of ice interaction force normal to the fixed boundary



(g) Distribution of ice expansion force (i.e. force to parallel to the boundary)

Figure 5.4.1 Result of wind driven ice/water combined flow along an infinite long fixed boundary

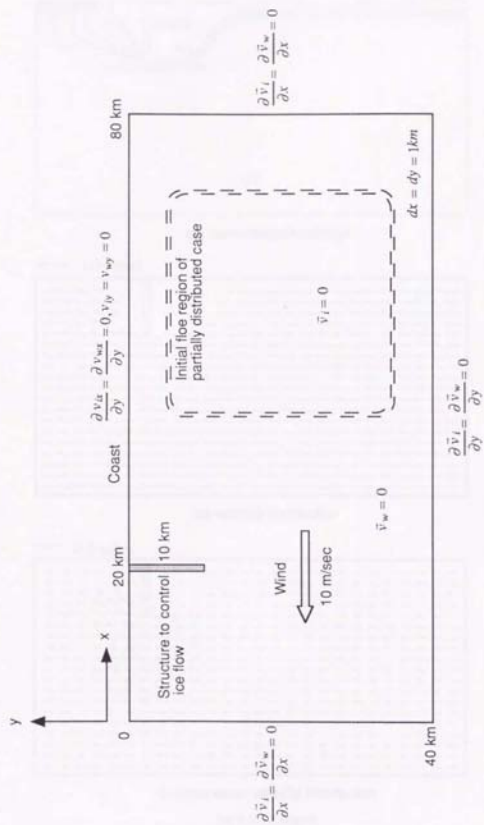
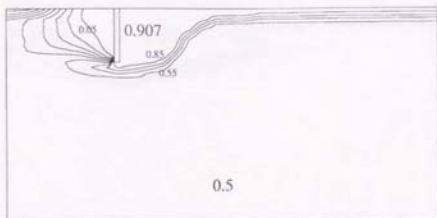
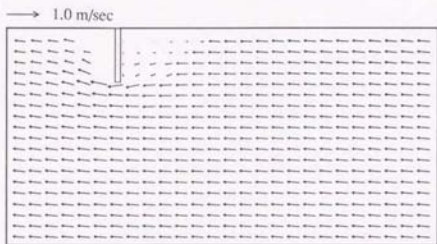


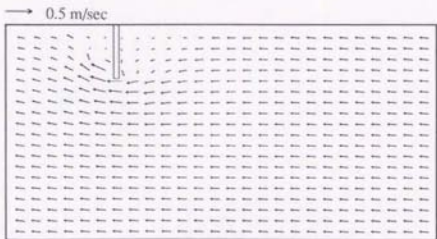
Figure 5.5.1 Computation domain of wind driven ice/water combined flow around a structure to control the ice flow



Ice concentration contour



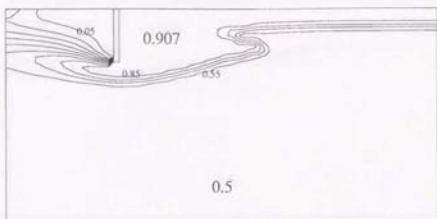
Ice velocity distribution



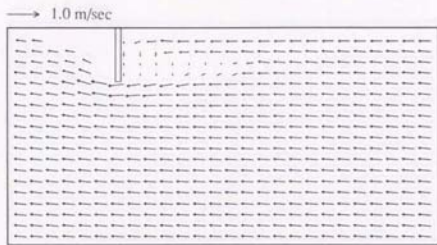
Surface water velocity distribution

(a) $t = 12$ hours

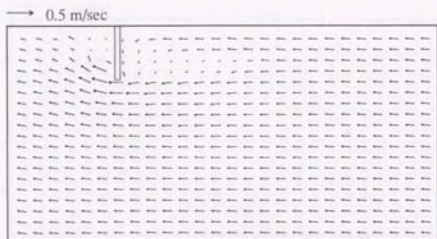
Figure 5.5.2 Result of wind driven ice/water combined flow around a structure to control the ice flow : Structure stops both ice and water, disk floes are uniformly distributed initially.



Ice concentration contour



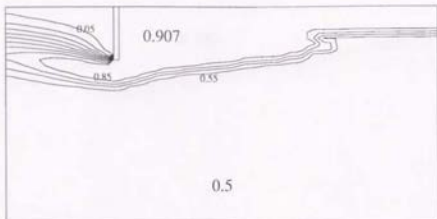
Ice velocity distribution



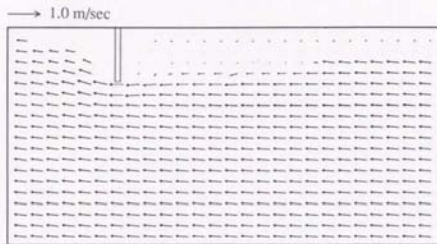
Surface water velocity distribution

(b) $t = 24$ hours

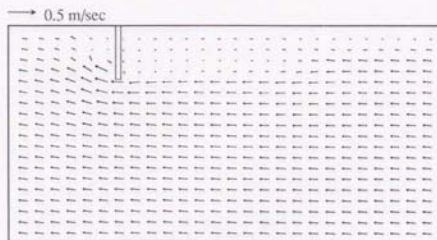
Figure 5.5.2 Result of wind driven ice/water combined flow around a structure to control the ice flow : Structure stops both ice and water, disk floes are uniformly distributed initially.



Ice concentration contour



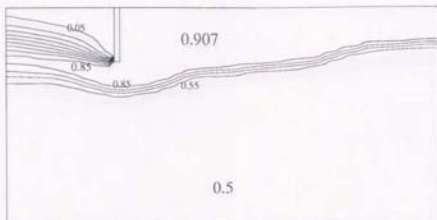
Ice velocity distribution



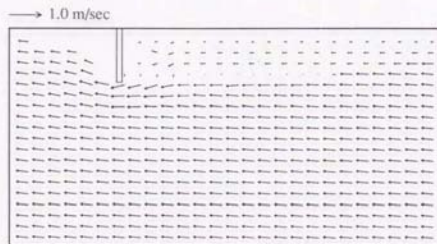
Surface water velocity distribution

(c) $t = 36$ hours

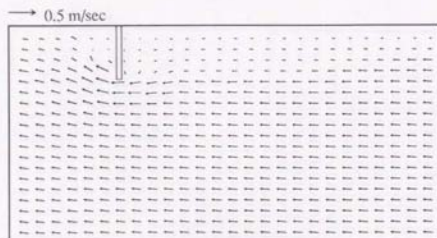
Figure 5.5.2 Result of wind driven ice/water combined flow around a structure to control the ice flow : Structure stops both ice and water, disk floes are uniformly distributed initially.



Ice concentration contour



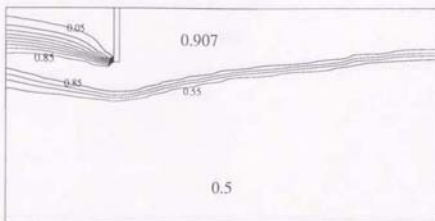
Ice velocity distribution



Surface water velocity distribution

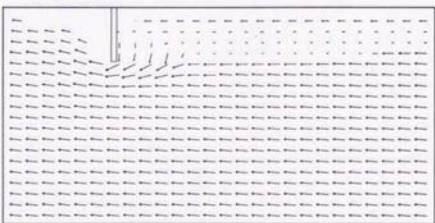
(d) $t = 48$ hours

Figure 5.5.2 Result of wind driven ice/water combined flow around a structure to control the ice flow : Structure stops both ice and water, disk floes are uniformly distributed initially.



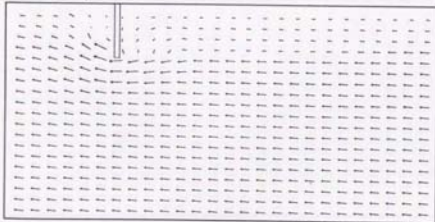
Ice concentration contour

→ 1.0 m/sec



Ice velocity distribution

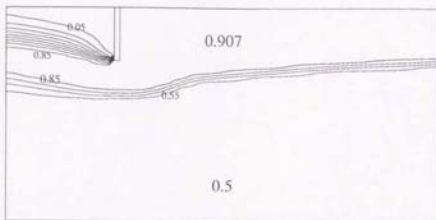
→ 0.5 m/sec



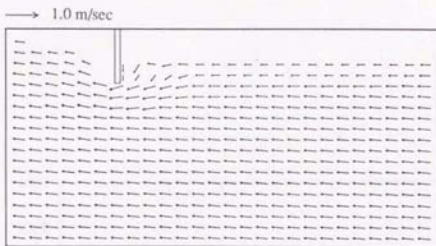
Surface water velocity distribution

(e) $t = 60$ hours

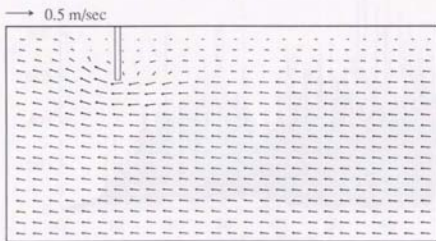
Figure 5.5.2 Result of wind driven ice/water combined flow around a structure to control the ice flow : Structure stops both ice and water, disk floes are uniformly distributed initially.



Ice concentration contour



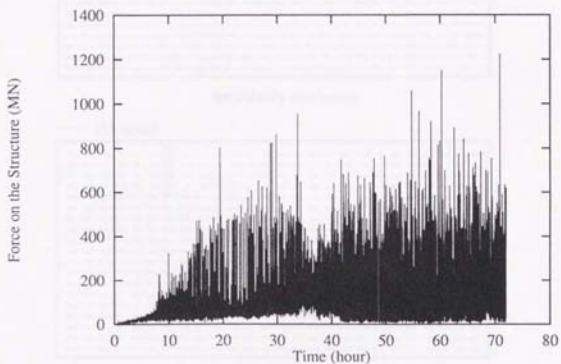
Ice velocity distribution



Surface water velocity distribution

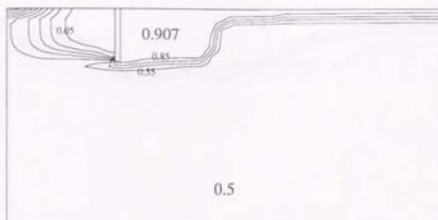
(f) $t = 72$ hours

Figure 5.5.2 Result of wind driven ice/water combined flow around a structure to control the ice flow : Structure stops both ice and water, disk floes are uniformly distributed initially.

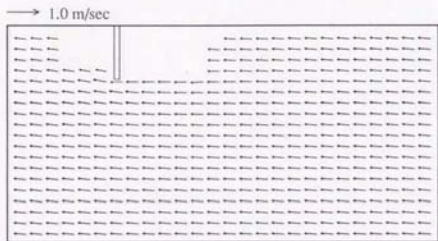


(g) Time variation of ice force on the structure

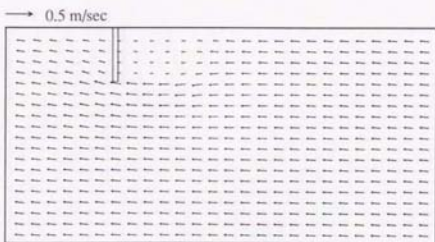
Figure 5.5.2 Result of wind driven ice/water combined flow around a structure to control the ice flow : Structure stops both ice and water, disk floes are uniformly distributed initially.



Ice concentration contour



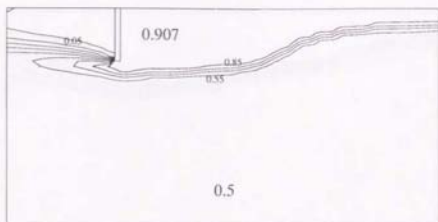
Ice velocity distribution



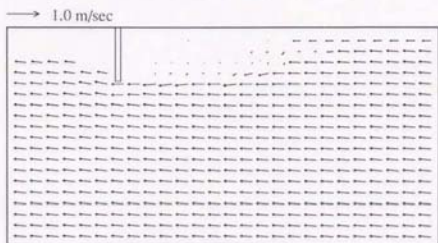
Surface water velocity distribution

(a) $t = 12$ hours

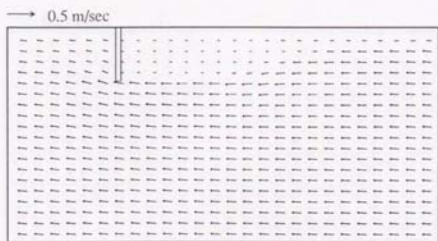
Figure 5.5.3 Result of wind driven ice/water combined flow around a structure to control the ice flow : Structure stops only ice, disk floes are uniformly distributed initially.



Ice concentration contour



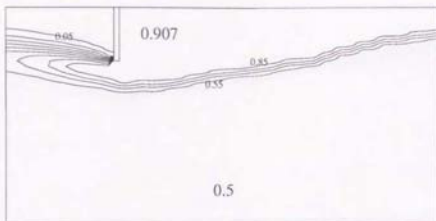
Ice velocity distribution



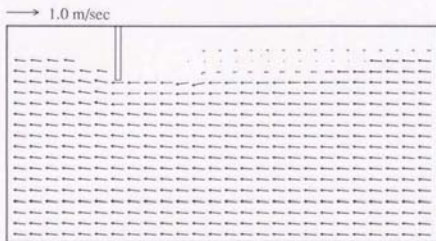
Surface water velocity distribution

(b) $t = 24$ hours

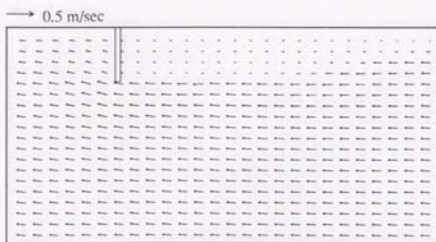
Figure 5.5.3 Result of wind driven ice/water combined flow around a structure to control the ice flow : Structure stops only ice, disk floes are uniformly distributed initially.



Ice concentration contour



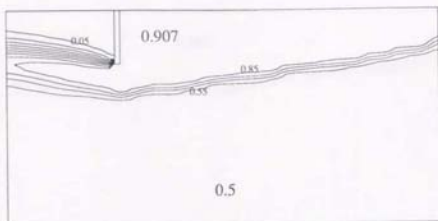
Ice velocity distribution



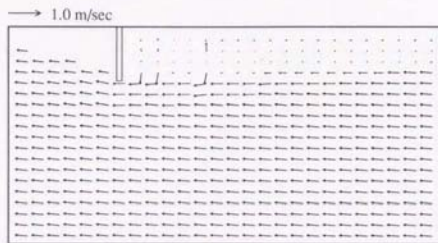
Surface water velocity distribution

(c) $t = 36$ hours

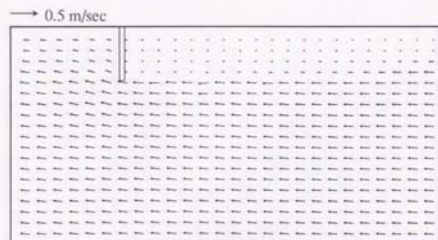
Figure 5.5.3 Result of wind driven ice/water combined flow around a structure to control the ice flow : Structure stops only ice, disk floes are uniformly distributed initially.



Ice concentration contour



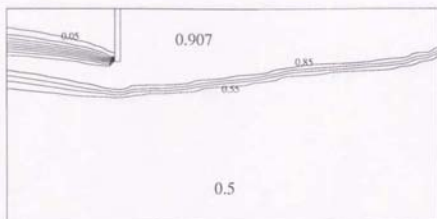
Ice velocity distribution



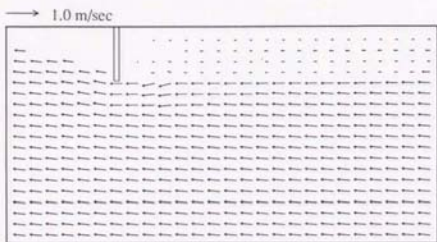
Surface water velocity distribution

(d) $t = 48$ hours

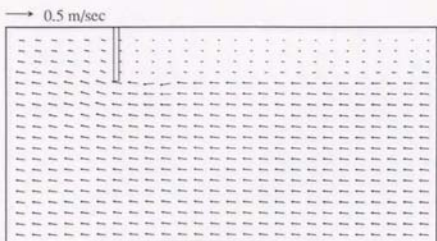
Figure 5.5.3 Result of wind driven ice/water combined flow around a structure to control the ice flow : Structure stops only ice, disk floes are uniformly distributed initially.



Ice concentration contour



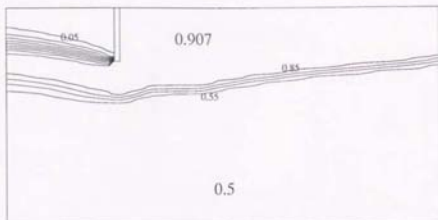
Ice velocity distribution



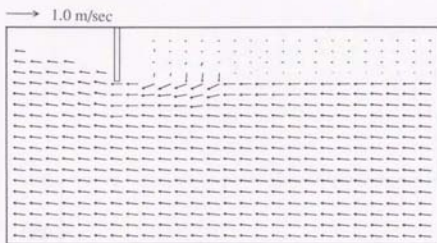
Surface water velocity distribution

(e) $t = 60$ hours

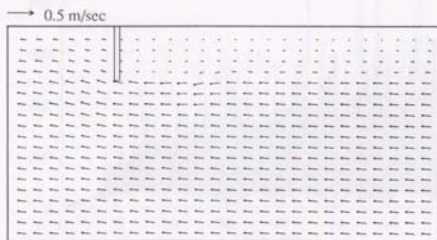
Figure 5.5.3 Result of wind driven ice/water combined flow around a structure to control the ice flow : Structure stops only ice, disk floes are uniformly distributed initially.



Ice concentration contour



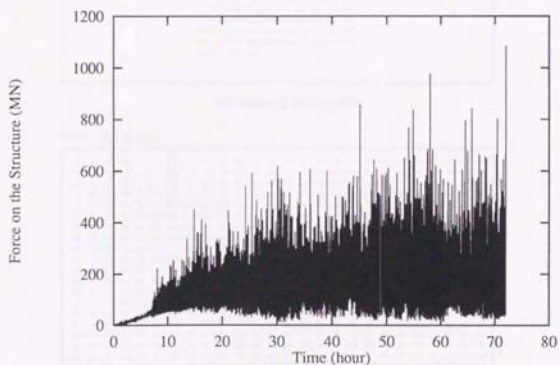
Ice velocity distribution



Surface water velocity distribution

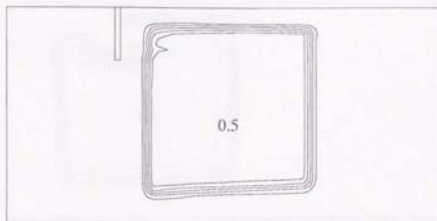
(f) $t = 72$ hours

Figure 5.5.3 Result of wind driven ice/water combined flow around a structure to control the ice flow : Structure stops only ice, disk floes are uniformly distributed initially.

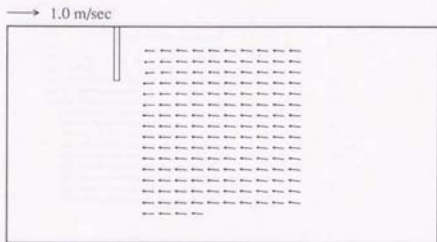


(g) Time variation of ice force on the structure

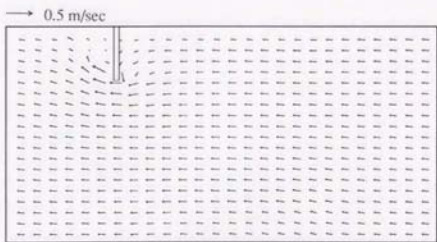
Figure 5.5.3 Result of wind driven ice/water combined flow around a structure to control the ice flow : Structure stops only ice, disk floes are uniformly distributed initially.



Ice concentration contour



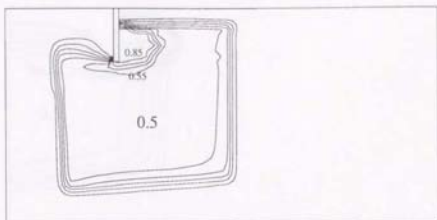
Ice velocity distribution



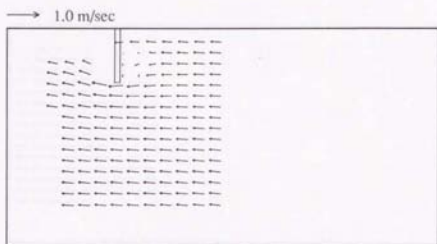
Surface water velocity distribution

(a) $t = 12$ hours

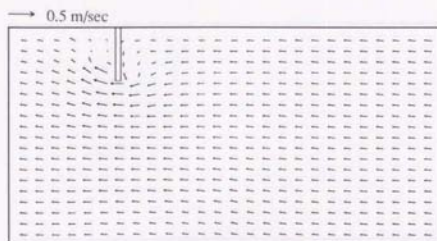
Figure 5.5.4 Result of wind driven ice/water combined flow around a structure to control the ice flow : Structure stops both ice and water, disk floes are partially distributed initially.



Ice concentration contour



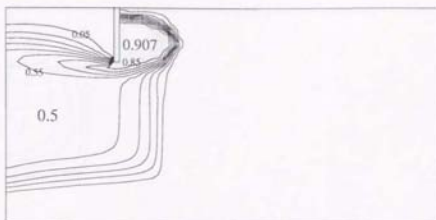
Ice velocity distribution



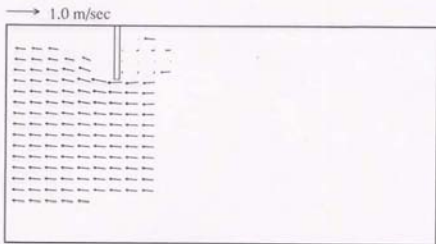
Surface water velocity distribution

(b) $t = 24$ hours

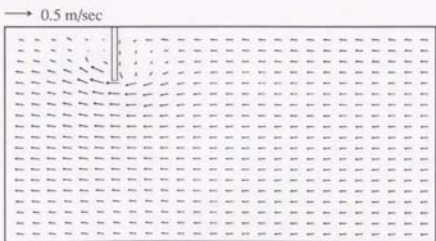
Figure 5.5.4 Result of wind driven ice/water combined flow around a structure to control the ice flow : Structure stops both ice and water, disk floes are partially distributed initially.



Ice concentration contour



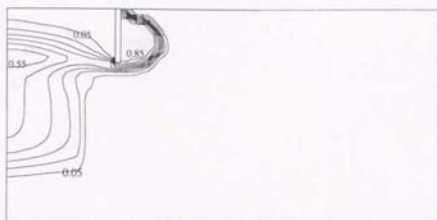
Ice velocity distribution



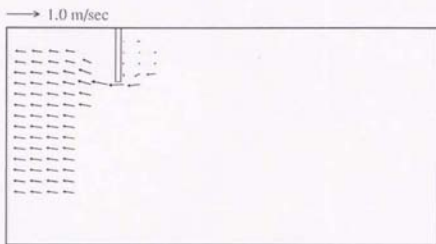
Surface water velocity distribution

(c) $t = 36$ hours

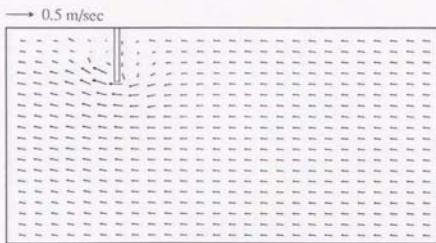
Figure 5.5.4 Result of wind driven ice/water combined flow around a structure to control the ice flow : Structure stops both ice and water, disk floes are partially distributed initially.



Ice concentration contour



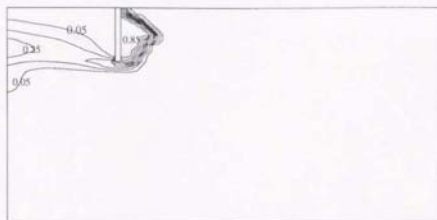
Ice velocity distribution



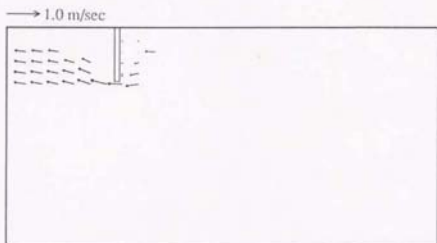
Surface water velocity distribution

(d) $t = 48$ hours

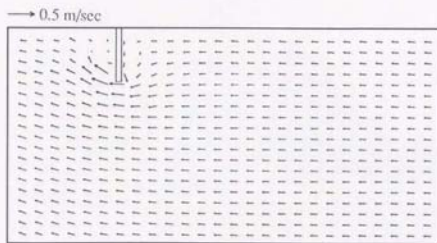
Figure 5.5.4 Result of wind driven ice/water combined flow around a structure to control the ice flow : Structure stops both ice and water, disk floes are partially distributed initially.



Ice concentration contour



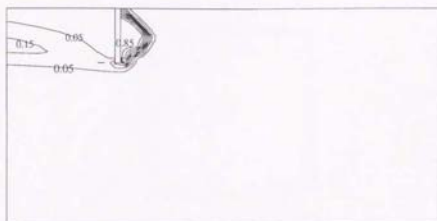
Ice velocity distribution



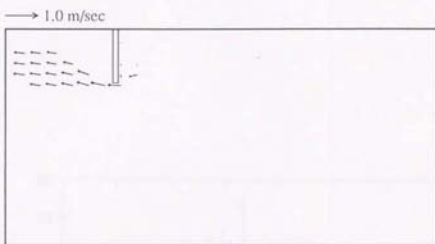
Surface water velocity distribution

(a) $t = 60$ hours

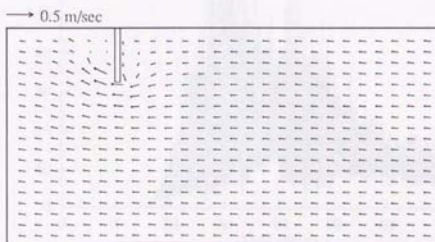
Figure 5.5.4 Result of wind driven ice/water combined flow around a structure to control the ice flow : Structure stops both ice and water, disk floes are partially distributed initially.



Ice concentration contour



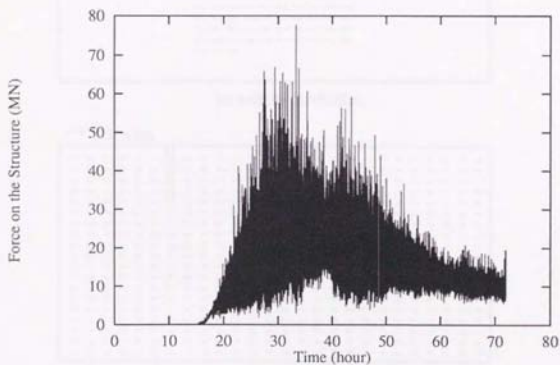
Ice velocity distribution



Surface water velocity distribution

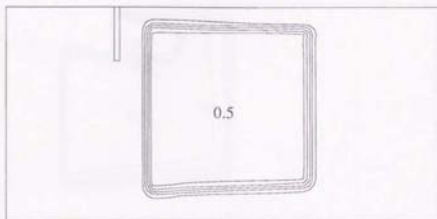
(f) $t = 72$ hours

Figure 5.5.4 Result of wind driven ice/water combined flow around a structure to control the ice flow : Structure stops both ice and water, disk floes are partially distributed initially.

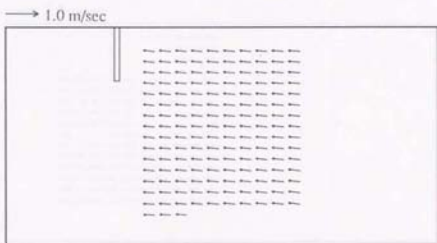


(g) Time variation of ice force on the structure

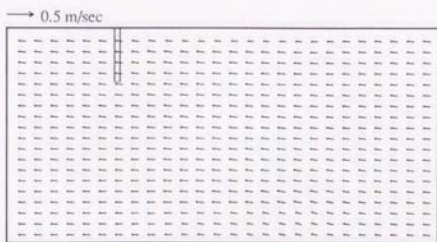
Figure 5.5.4 Result of wind driven ice/water combined flow around a structure to control the ice flow : Structure stops both ice and water, disk floes are partially distributed initially.



Ice concentration contour



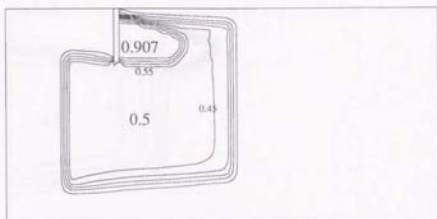
Ice velocity distribution



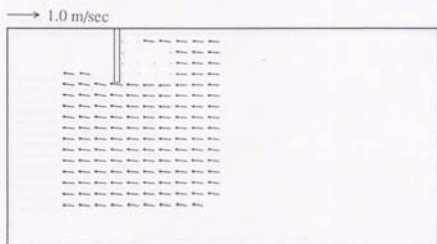
Surface water velocity distribution

(a) $t = 12$ hours

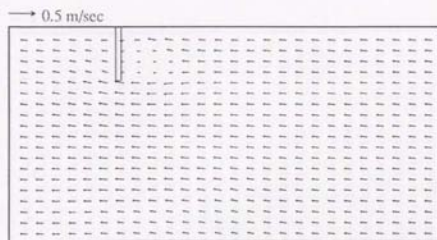
Figure 5.5.5 Result of wind driven ice/water combined flow around a structure to control the ice flow : Structure stops only ice, disk floes are partially distributed initially.



Ice concentration contour



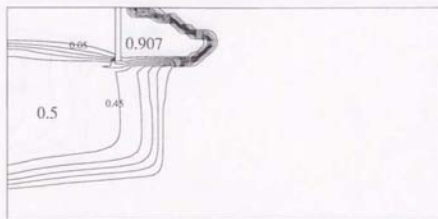
Ice velocity distribution



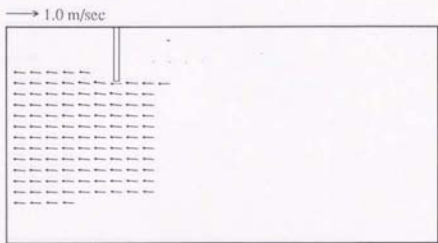
Surface water velocity distribution

(b) $t = 24$ hours

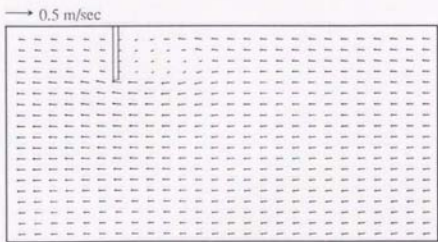
Figure 5.5.5 Result of wind driven ice/water combined flow around a structure to control the ice flow : Structure stops only ice, disk floes are partially distributed initially.



Ice concentration contour



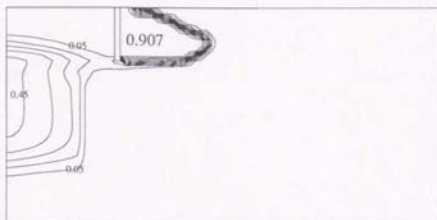
Ice velocity distribution



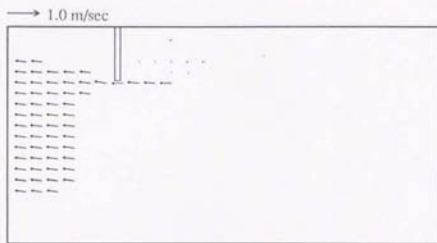
Surface water velocity distribution

(c) $t = 36$ hours

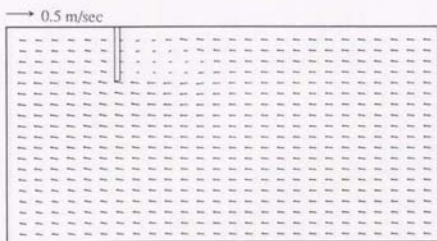
Figure 5.5.5 Result of wind driven ice/water combined flow around a structure to control the ice flow : Structure stops only ice, disk floes are partially distributed initially.



Ice concentration contour



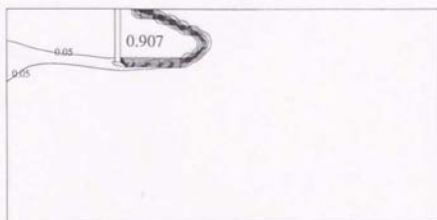
Ice velocity distribution



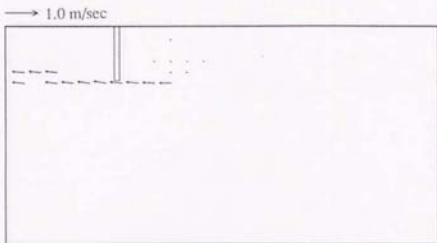
Surface water velocity distribution

(d) $t = 48$ hours

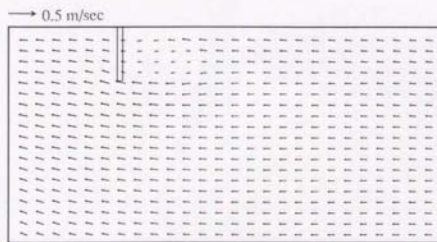
Figure 5.5.5 Result of wind driven ice/water combined flow around a structure to control the ice flow : Structure stops only ice, disk floes are partially distributed initially.



Ice concentration contour



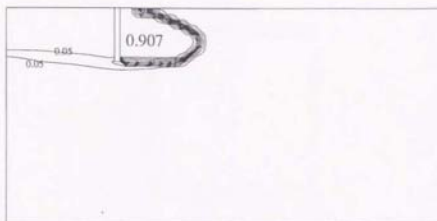
Ice velocity distribution



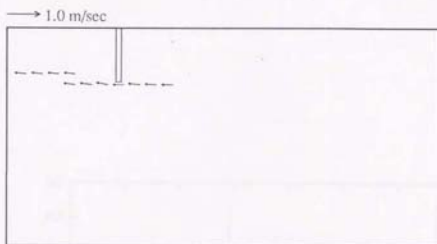
Surface water velocity distribution

(e) $t = 60$ hours

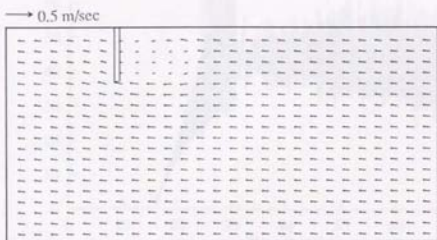
Figure 5.5.5 Result of wind driven ice/water combined flow around a structure to control the ice flow : Structure stops only ice, disk floes are partially distributed initially.



Ice concentration contour



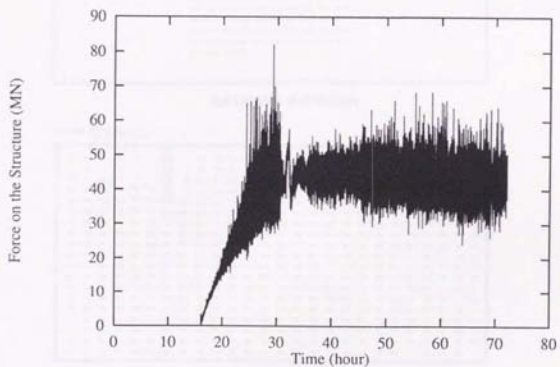
Ice velocity distribution



Surface water velocity distribution

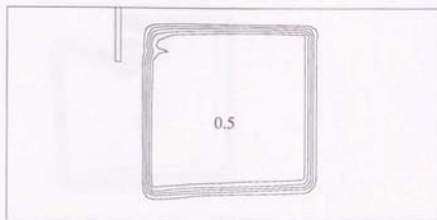
(f) $t = 72$ hours

Figure 5.5.5 Result of wind driven ice/water combined flow around a structure to control the ice flow : Structure stops only ice, disk floes are partially distributed initially.

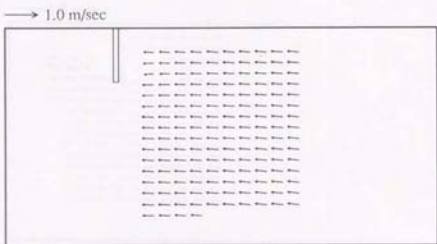


(g) Time variation of ice force on the structure

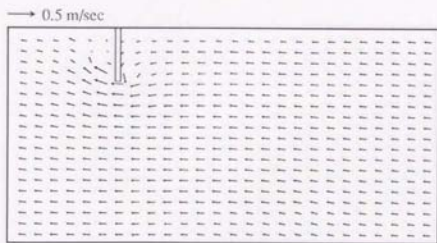
Figure 5.5.5 Result of wind driven ice/water combined flow around a structure to control the ice flow : Structure stops only ice, disk floes are partially distributed initially.



Ice concentration contour



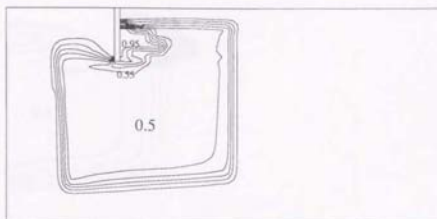
Ice velocity distribution



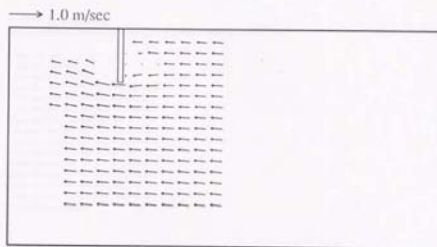
Surface water velocity distribution

(a) $t = 12$ hours

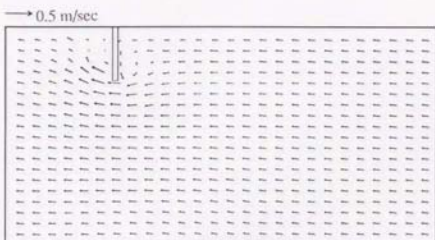
Figure 5.5.6 Result of wind driven ice/water combined flow around a structure to control the ice flow : Structure stops both ice and water, rectangle floes are partially distributed initially.



Ice concentration contour



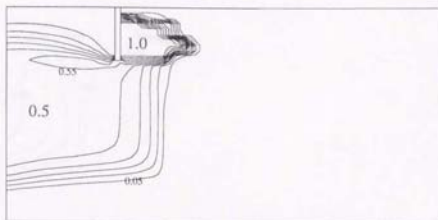
Ice velocity distribution



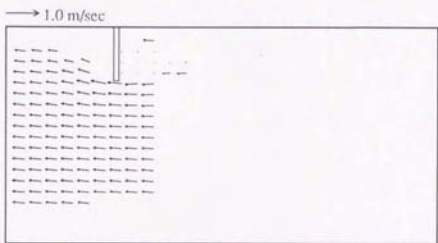
Surface water velocity distribution

(b) $t = 24$ hours

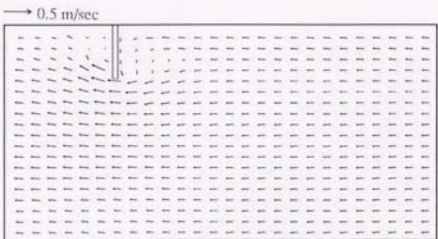
Figure 5.5.6 Result of wind driven ice/water combined flow around a structure to control the ice flow : Structure stops both ice and water, rectangle floes are partially distributed initially.



Ice concentration contour



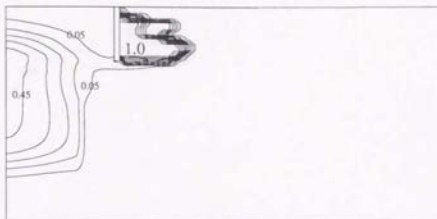
Ice velocity distribution



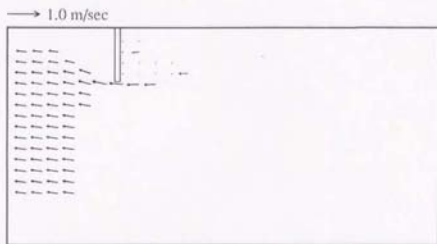
Surface water velocity distribution

(c) $t = 36$ hours

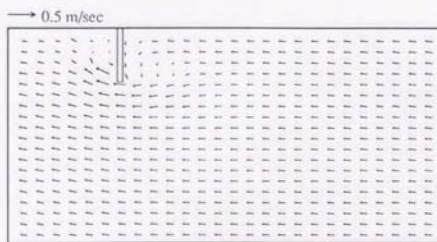
Figure 5.5.6 Result of wind driven ice/water combined flow around a structure to control the ice flow : Structure stops both ice and water, rectangle floes are partially distributed initially.



Ice concentration contour



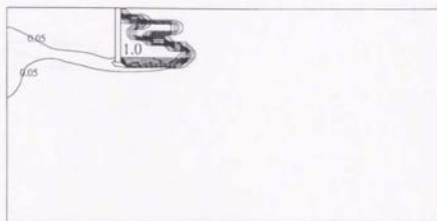
Ice velocity distribution



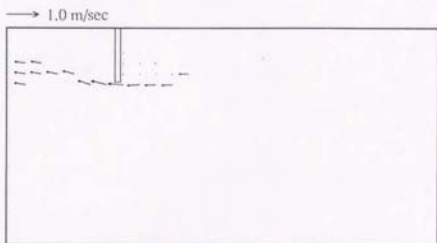
Surface water velocity distribution

(d) $t = 48$ hours

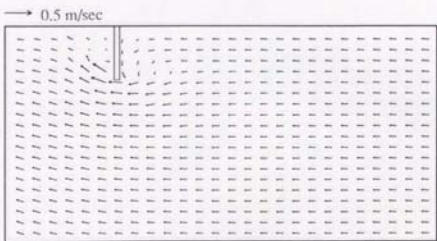
Figure 5.5.6 Result of wind driven ice/water combined flow around a structure to control the ice flow : Structure stops both ice and water, rectangle floes are partially distributed initially.



Ice concentration contour



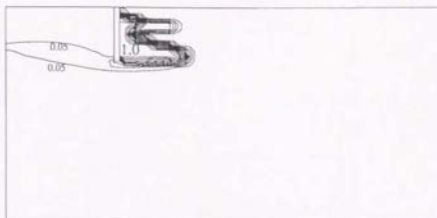
Ice velocity distribution



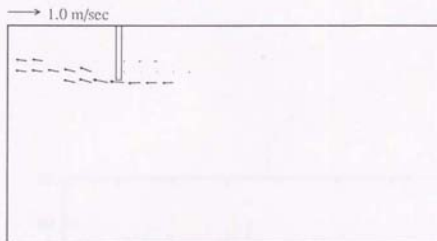
Surface water velocity distribution

(e) $t = 60$ hours

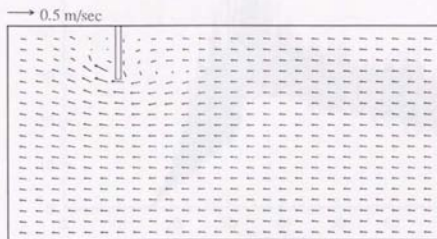
Figure 5.5.6 Result of wind driven ice/water combined flow around a structure to control the ice flow : Structure stops both ice and water, rectangle floes are partially distributed initially.



Ice concentration contour



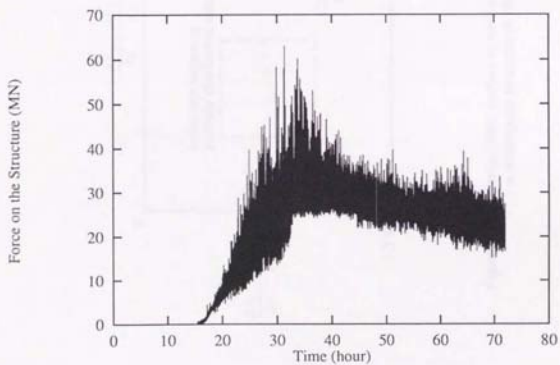
Ice velocity distribution



Surface water velocity distribution

(f) $t = 72$ hours

Figure 5.5.6 Result of wind driven ice/water combined flow around a structure to control the ice flow : Structure stops both ice and water, rectangle floes are partially distributed initially.



(g) Time variation of ice force on the structure

Figure 5.5.6 Result of wind driven ice/water combined flow around a structure to control the ice flow : Structure stops both ice and water, rectangle floes are partially distributed initially.

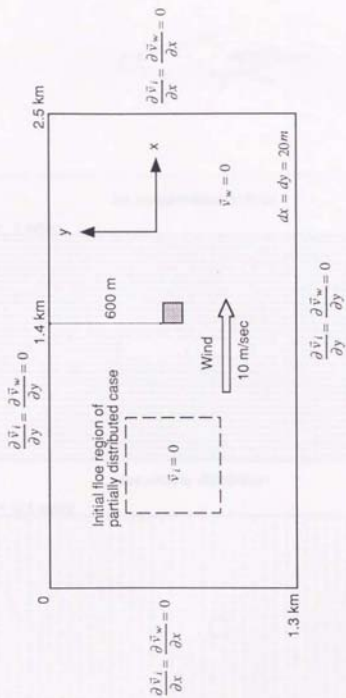
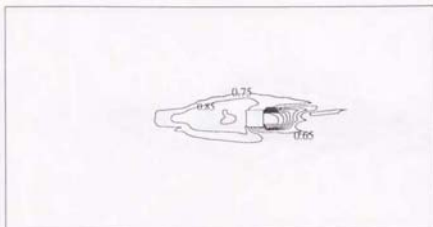
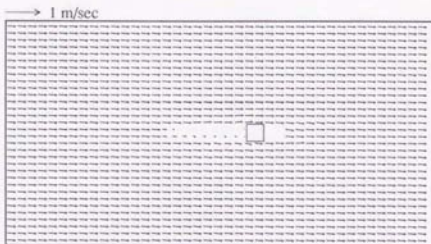


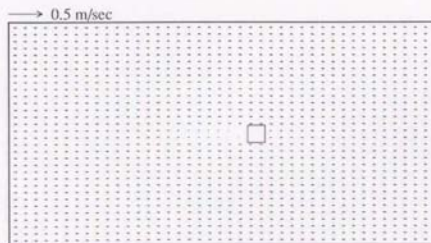
Figure 5.6.1 Computation domain of wind driven ice/water combined flow around a rectangular structure of 100mX100m



Ice concentration contour



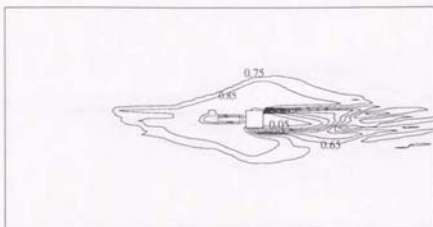
Ice velocity distribution



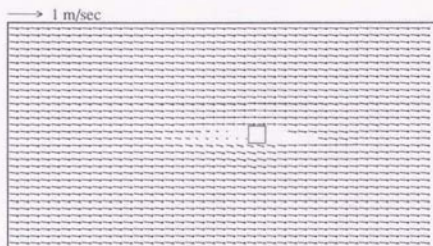
Surface water velocity distribution

(a) $t = 20$ minutes

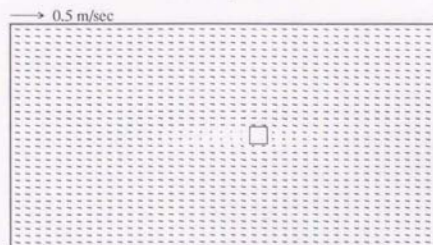
Figure 5.6.2 Result of wind driven ice/water combined flow around a rectangular structure of 100mX100m : Disk floes are uniformly distributed initially.



Ice concentration contour



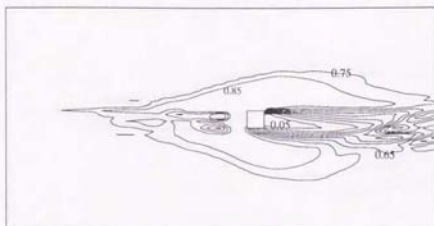
Ice velocity distribution



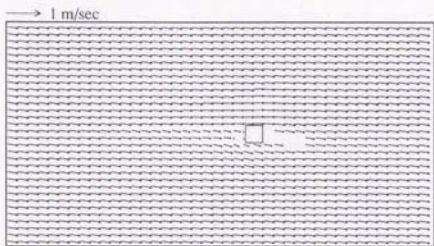
Surface water velocity distribution

(b) $t = 40$ minutes

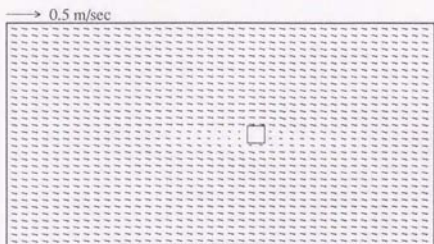
Figure 5.6.2 Result of wind driven ice/water combined flow around a rectangular structure of 100mX100m : Disk floes are uniformly distributed initially.



Ice concentration contour



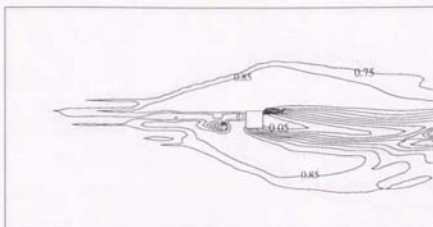
Ice velocity distribution



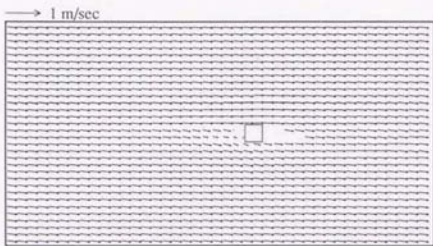
Surface water velocity distribution

(c) $t = 60$ minutes

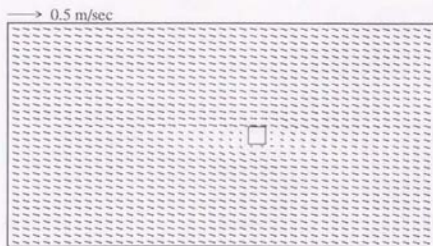
Figure 5.6.2 Result of wind driven ice/water combined flow around a rectangular structure of $100\text{m} \times 100\text{m}$: Disk floes are uniformly distributed initially.



Ice concentration contour



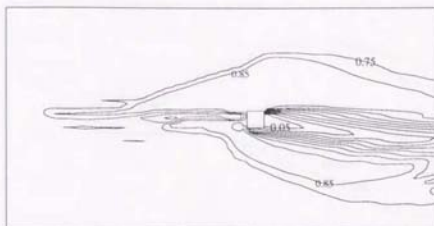
Ice velocity distribution



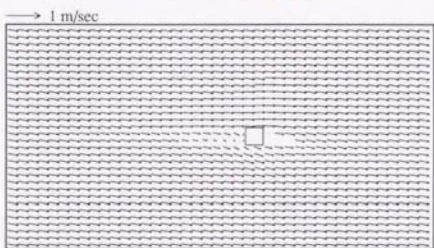
Surface water velocity distribution

(d) $t = 80$ minutes

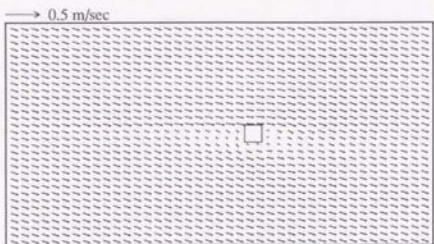
Figure 5.6.2 Result of wind driven ice/water combined flow around a rectangular structure of 100mX100m : Disk floes are uniformly distributed initially.



Ice concentration contour



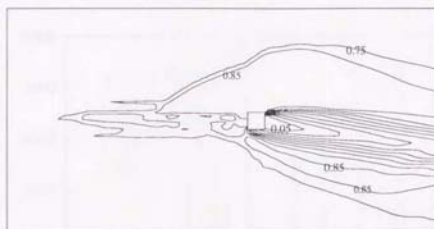
Ice velocity distribution



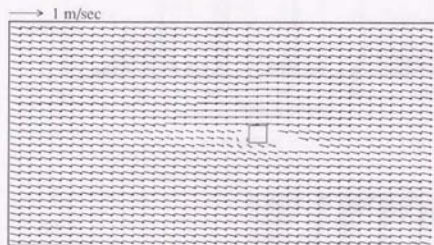
Surface water velocity distribution

(e) $t = 100$ minutes

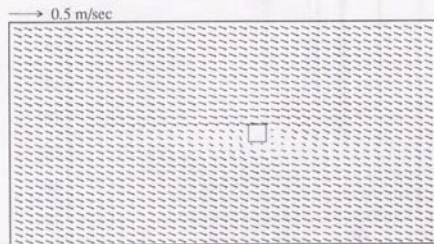
Figure 5.6.2 Result of wind driven ice/water combined flow around a rectangular structure of 100mX100m : Disk floes are uniformly distributed initially.



Ice concentration contour



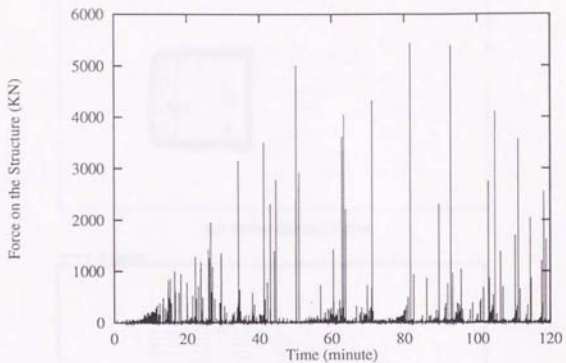
Ice velocity distribution



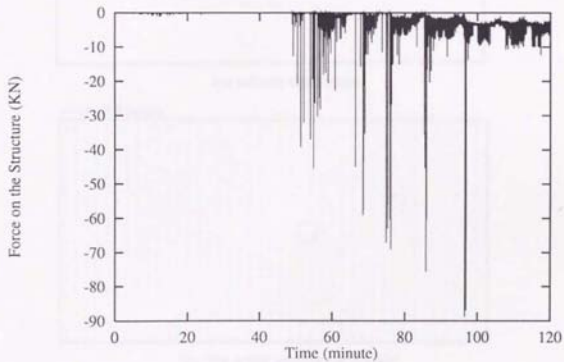
Surface water velocity distribution

(f) $t = 120$ minutes

Figure 5.6.2 Result of wind driven ice/water combined flow around a rectangular structure of 100mX100m : Disk floes are uniformly distributed initially.



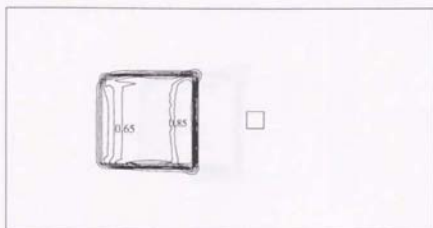
x - direction



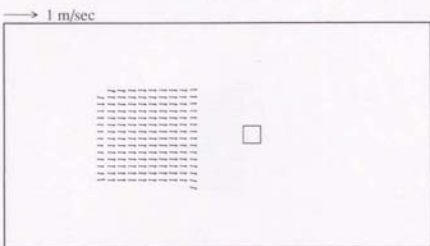
y - direction

(g) Time variation of ice force on the structure

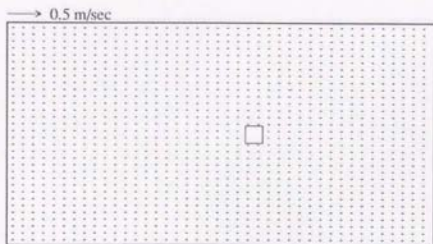
Figure 5.6.2 Result of wind driven ice/water combined flow around a rectangular structure of 100m×100m : Disk floes are uniformly distributed initially.



Ice concentration contour



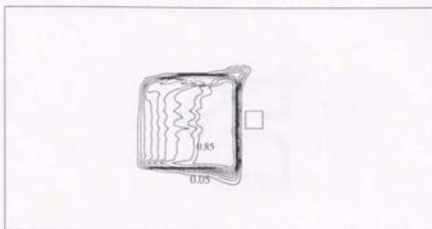
Ice velocity distribution



Surface water velocity distribution

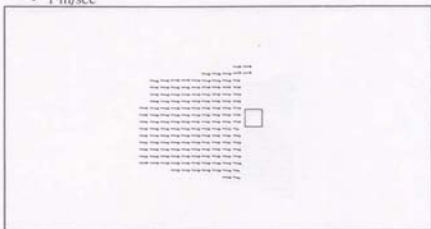
(a) $t = 20$ minutes

Figure 5.6.3 Result of wind driven ice/water combined flow around a rectangular structure of $100\text{m} \times 100\text{m}$: Disk floes are partially distributed initially.



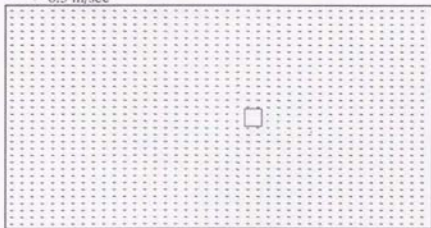
Ice concentration contour

→ 1 m/sec



Ice velocity distribution

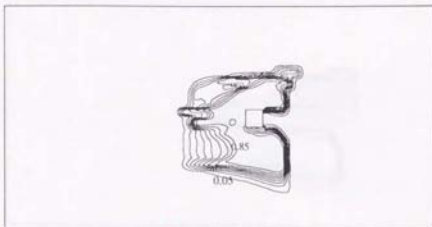
→ 0.5 m/sec



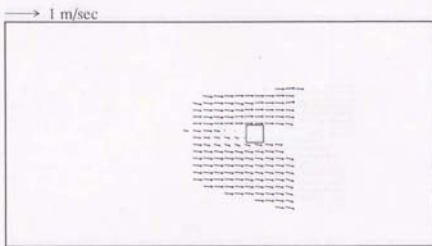
Surface water velocity distribution

(b) $t = 40$ minutes

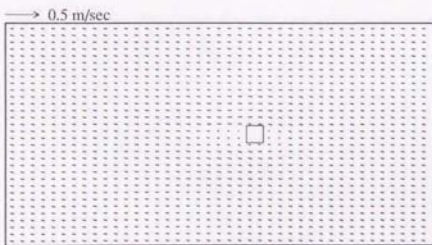
Figure 5.6.3 Result of wind driven ice/water combined flow around a rectangular structure of $100\text{m} \times 100\text{m}$: Disk floes are partially distributed initially.



Ice concentration contour



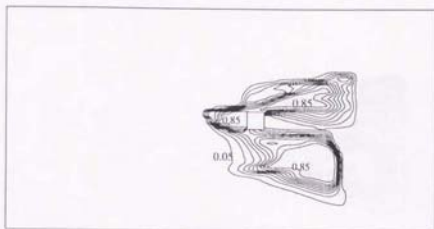
Ice velocity distribution



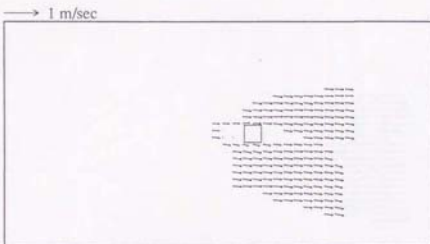
Surface water velocity distribution

(c) $t = 60$ minutes

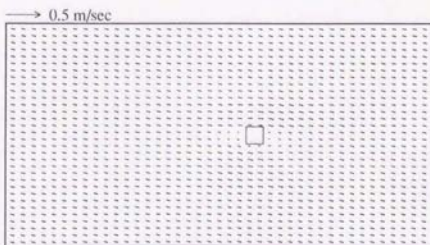
Figure 5.6.3 Result of wind driven ice/water combined flow around a rectangular structure of 100m \times 100m : Disk floes are partially distributed initially.



Ice concentration contour



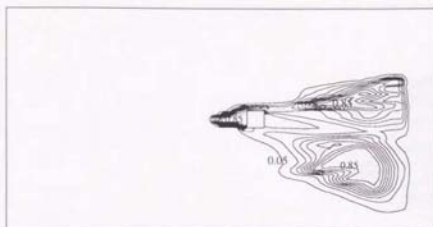
Ice velocity distribution



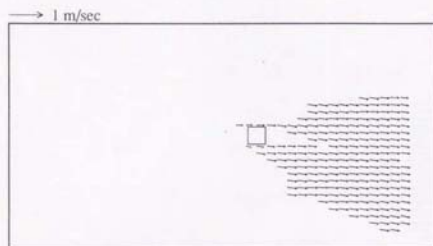
Surface water velocity distribution

(d) $t = 80$ minutes

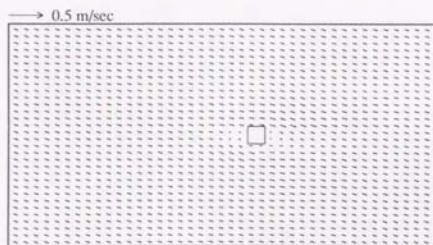
Figure 5.6.3 Result of wind driven ice/water combined flow around a rectangular structure of $100\text{m} \times 100\text{m}$: Disk floes are partially distributed initially.



Ice concentration contour



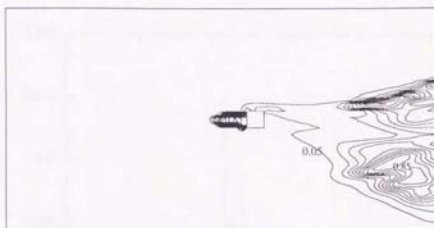
Ice velocity distribution



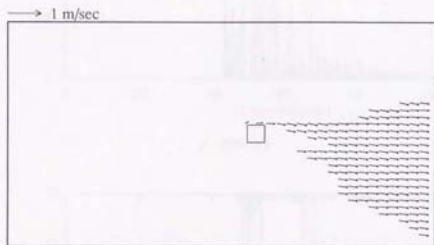
Surface water velocity distribution

(e) $t = 100$ minutes

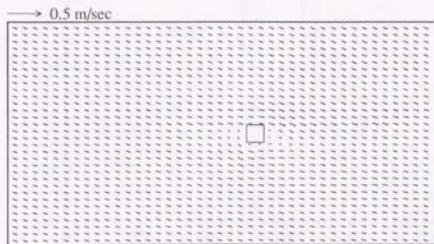
Figure 5.6.3 Result of wind driven ice/water combined flow around a rectangular structure of $100\text{m} \times 100\text{m}$: Disk floes are partially distributed initially.



Ice concentration contour



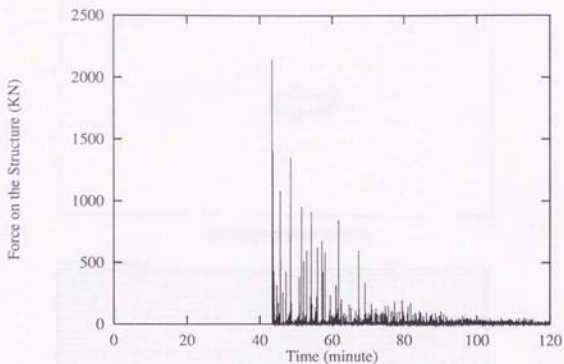
Ice velocity distribution



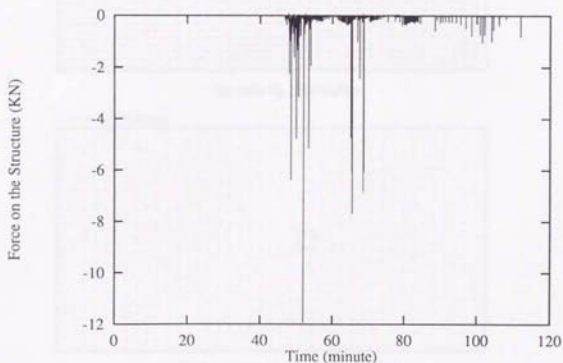
Surface water velocity distribution

(f) $t = 120$ minutes

Figure 5.6.3 Result of wind driven ice/water combined flow around a rectangular structure of 100mX100m ; Disk floes are partially distributed initially.



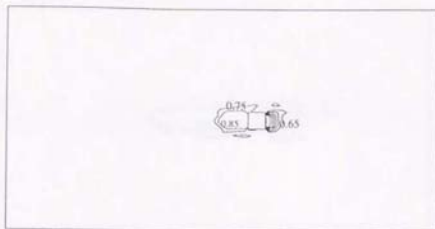
x - direction



y - direction

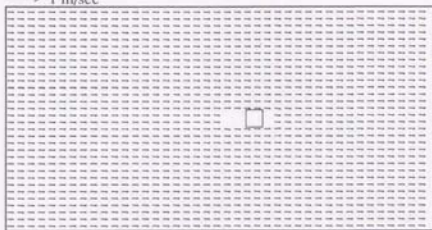
(g) Time variation of ice force on the structure

Figure 5.6.3 Result of wind driven ice/water combined flow around a rectangular structure of 100m×100m : Disk floes are partially distributed initially.



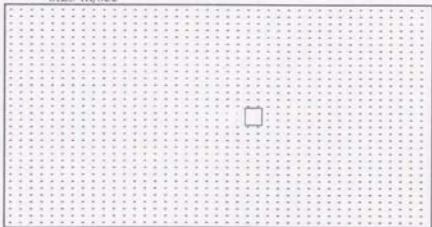
Ice concentration contour

→ 1 m/sec



Ice velocity distribution

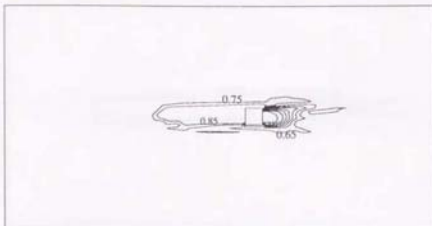
→ 0.25 m/sec



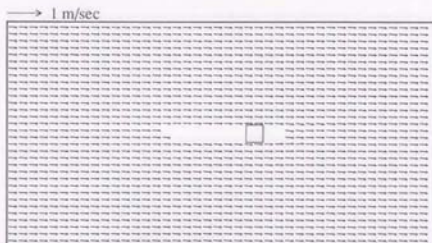
Surface water velocity distribution

(a) $t = 10$ minutes

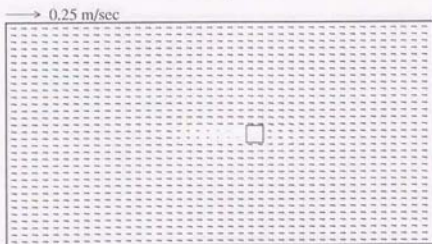
Figure 5.6.4 Result of wind driven ice/water combined flow around a rectangular structure of $100\text{m} \times 100\text{m}$: Rectangle floes are uniformly distributed initially.



Ice concentration contour



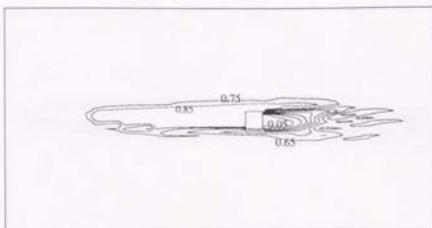
Ice velocity distribution



Surface water velocity distribution

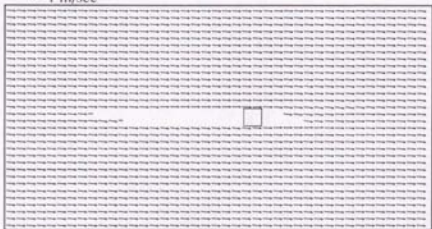
(b) $t = 20$ minutes

Figure 5.6.4 Result of wind driven ice/water combined flow around a rectangular structure of $100\text{m} \times 100\text{m}$: Rectangle floes are uniformly distributed initially.



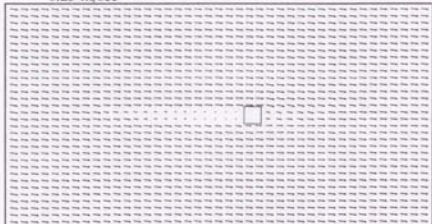
Ice concentration contour

→ 1 m/sec



Ice velocity distribution

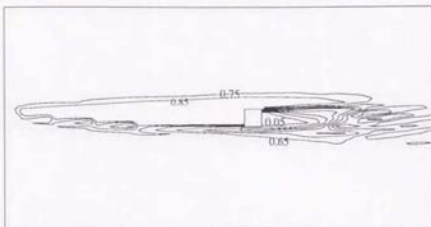
→ 0.25 m/sec



Surface water velocity distribution

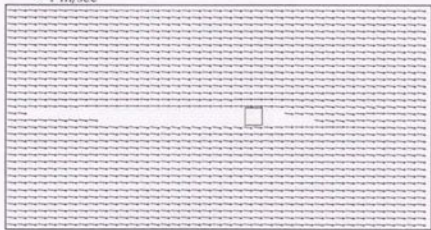
(c) $t = 30$ minutes

Figure 5.6.4 Result of wind driven ice/water combined flow around a rectangular structure of $100\text{m} \times 100\text{m}$: Rectangle floes are uniformly distributed initially.



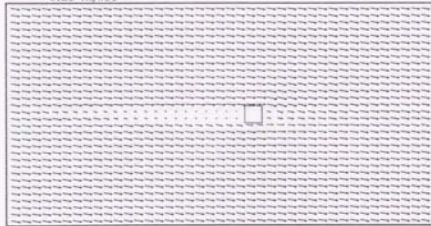
Ice concentration contour

→ 1 m/sec



Ice velocity distribution

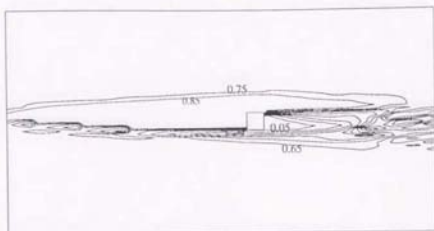
→ 0.25 m/sec



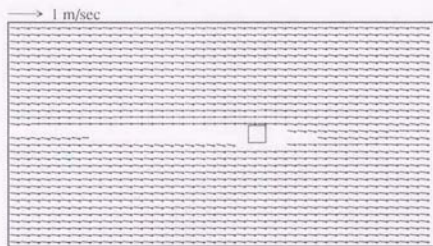
Surface water velocity distribution

(d) $t = 40$ minutes

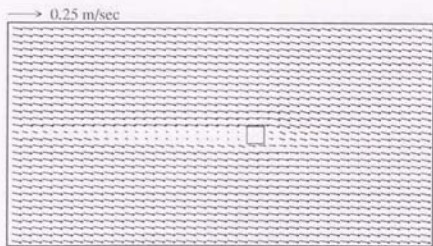
Figure 5.6.4 Result of wind driven ice/water combined flow around a rectangular structure of 100mX100m : Rectangle floes are uniformly distributed initially.



Ice concentration contour



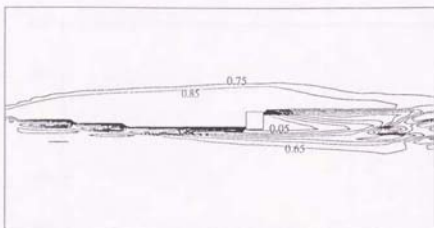
Ice velocity distribution



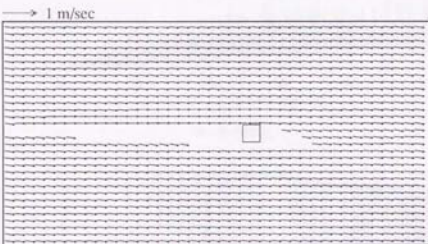
Surface water velocity distribution

(e) $t = 50$ minutes

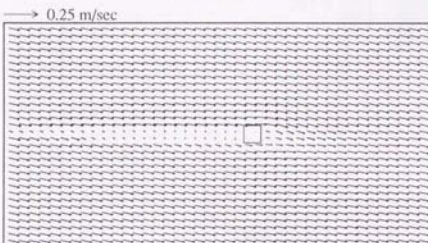
Figure 5.6.4 Result of wind driven ice/water combined flow around a rectangular structure of $100\text{m} \times 100\text{m}$: Rectangle floes are uniformly distributed initially.



Ice concentration contour



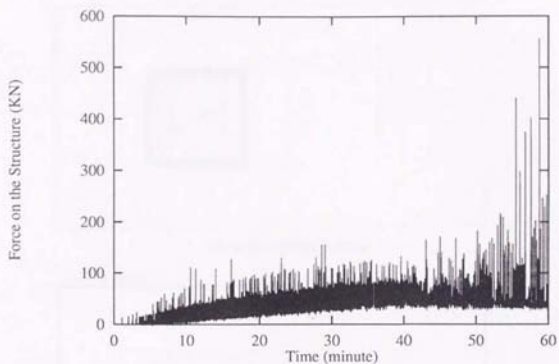
Ice velocity distribution



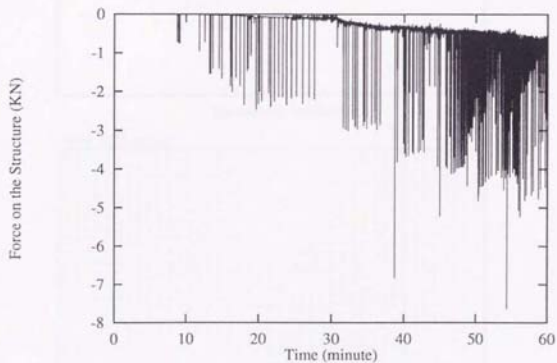
Surface water velocity distribution

(f) $t = 60$ minutes

Figure 5.6.4 Result of wind driven ice/water combined flow around a rectangular structure of $100\text{m} \times 100\text{m}$; Rectangle floes are uniformly distributed initially.



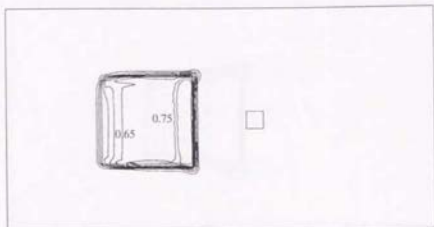
x - direction



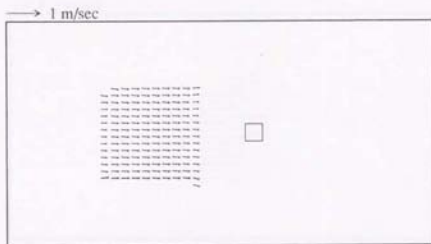
y - direction

(g) Time variation of ice force on the structure

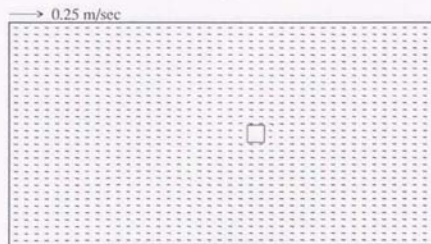
Figure 5.6.4 Result of wind driven ice/water combined flow around a rectangular structure of 100mX100m : Rectangle floes are uniformly distributed initially.



Ice concentration contour



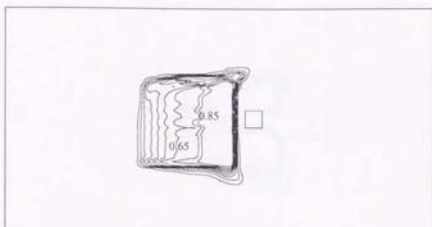
Ice velocity distribution



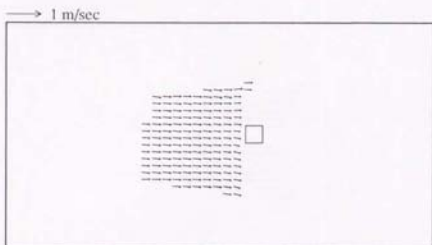
Surface water velocity distribution

(a) $t = 20$ minutes

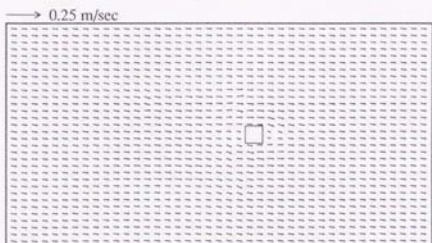
Figure 5.6.5 Result of wind driven ice/water combined flow around a rectangular structure of $100\text{m} \times 100\text{m}$: Rectangle floes are partially distributed initially.



Ice concentration contour



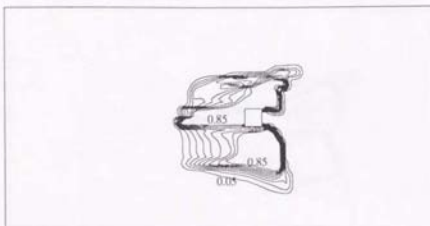
Ice velocity distribution



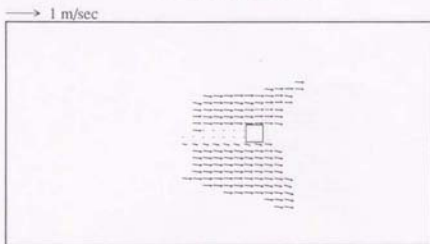
Surface water velocity distribution

(b) $t = 40$ minutes

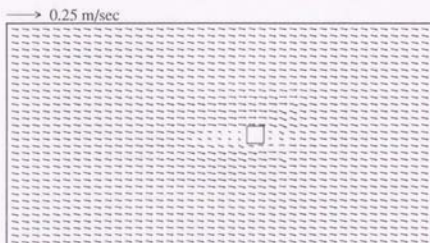
Figure 5.6.5 Result of wind driven ice/water combined flow around a rectangular structure of $100\text{m} \times 100\text{m}$: Rectangle floes are partially distributed initially.



Ice concentration contour



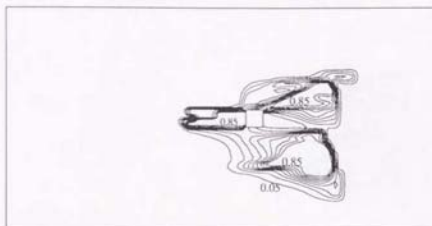
Ice velocity distribution



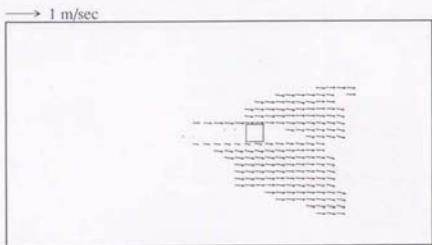
Surface water velocity distribution

(c) $t = 60$ minutes

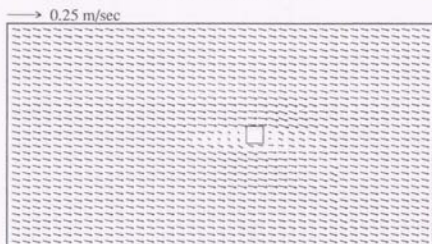
Figure 5.6.5 Result of wind driven ice/water combined flow around a rectangular structure of 100mX100m : Rectangle floes are partially distributed initially.



Ice concentration contour



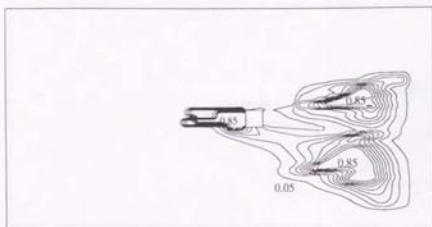
Ice velocity distribution



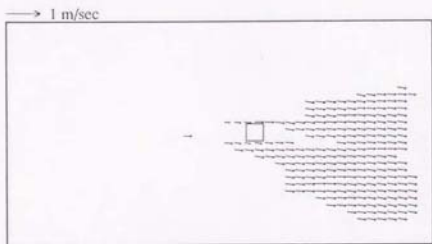
Surface water velocity distribution

(d) $t = 80$ minutes

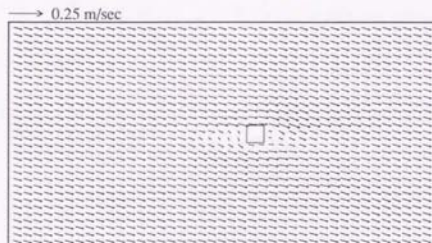
Figure 5.6.5 Result of wind driven ice/water combined flow around a rectangular structure of 100mX100m : Rectangle floes are partially distributed initially.



Ice concentration contour



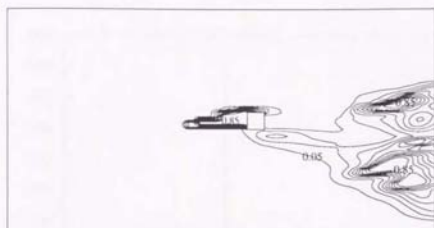
Ice velocity distribution



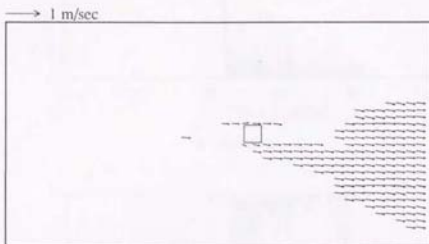
Surface water velocity distribution

(e) $t = 100$ minutes

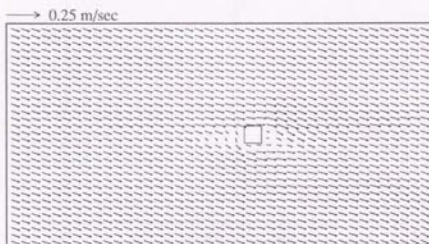
Figure 5.6.5 Result of wind driven ice/water combined flow around a rectangular structure of 100mX100m : Rectangle floes are partially distributed initially.



Ice concentration contour



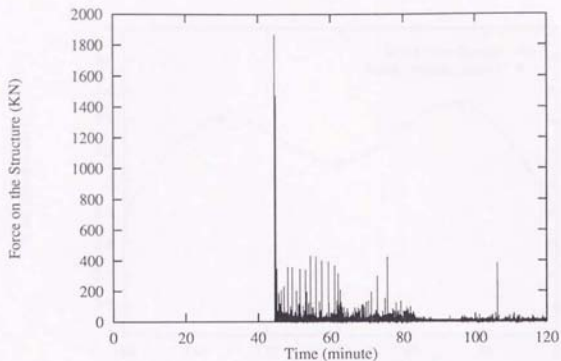
Ice velocity distribution



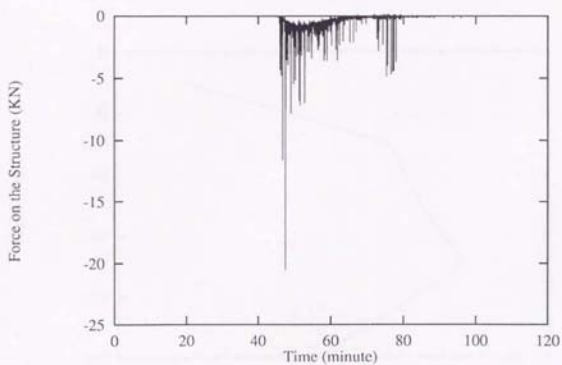
Surface water velocity distribution

(!) $t = 120$ minutes

Figure 5.6.5 Result of wind driven ice/water combined flow around a rectangular structure of 100mX100m : Rectangle floes are partially distributed initially.



x - direction



y - direction

(g) Time variation of ice force on the structure

Figure 5.6.5 Result of wind driven ice/water combined flow around a rectangular structure of 100mX100m : Rectangle floes are partially distributed initially.

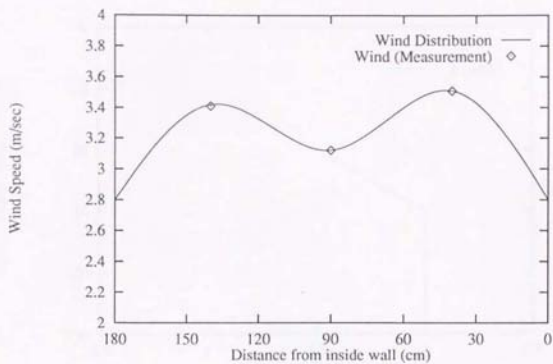


Figure 6.1.1 Wind distribution in y-direction

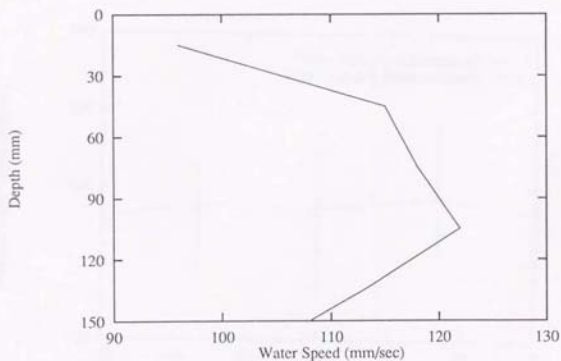


Figure 6.1.2 Water velocity distribution in depth direction at the left boundary of the computation domain

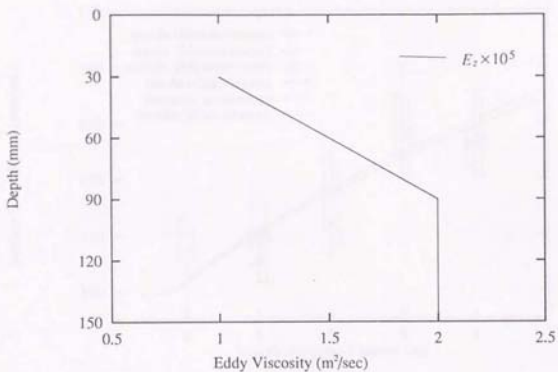


Figure 6.1.3 Eddy viscosity in depth direction

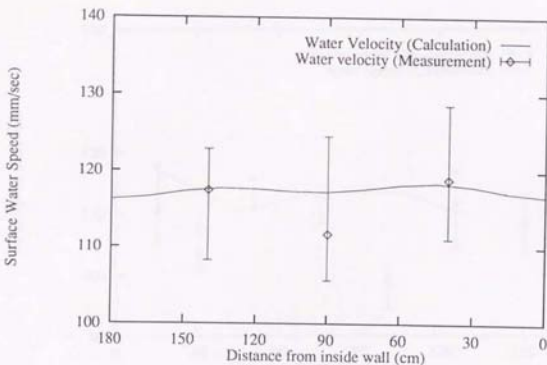


Figure 6.1.4 Computed water velocity distribution in y-direction at the center of the computation domain

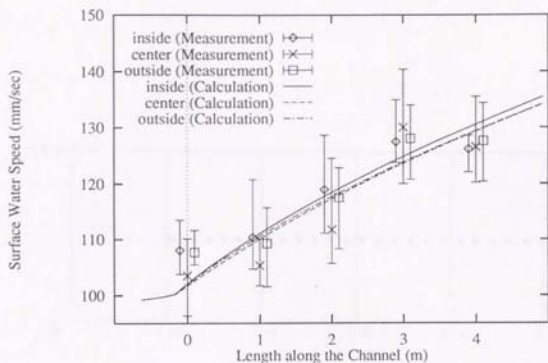


Figure 6.1.5 Computed water velocity distribution in x-direction

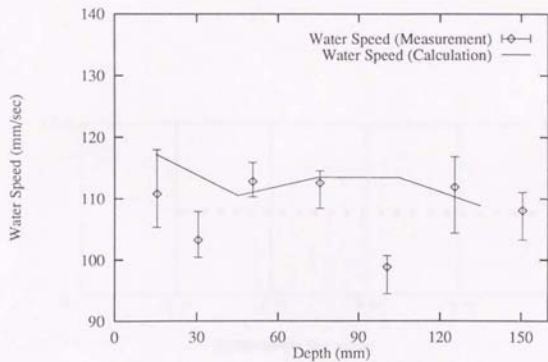
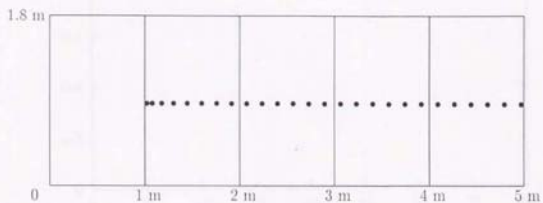
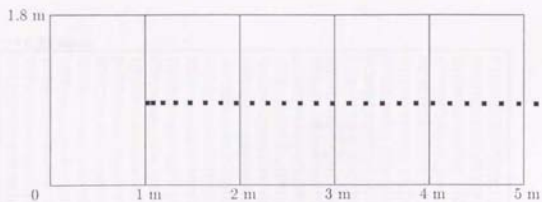


Figure 6.1.6 Computed water velocity distribution in depth direction at the position of p



(a) Disk floe model



(b) Rectangle floe model

Figure 6.1.7 Computed free drift of single floe model

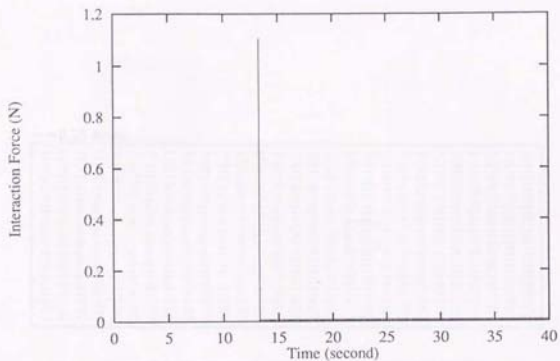


Figure 6.1.8 Computed impact force on the structure due to disk floe model collision with computation time interval of 0.004 sec

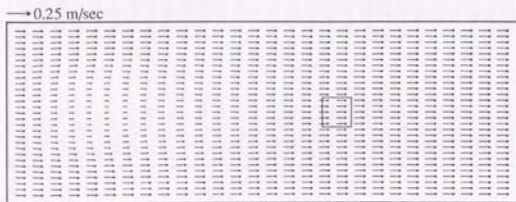


Figure 6.1.9 Computed initial water velocity distribution, free drift of disk floe models



Figure 6.1.10 Computed initial water velocity distribution,
Free drift of rectangle floe models

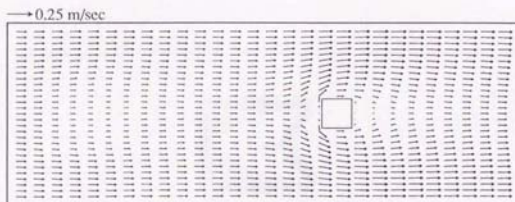
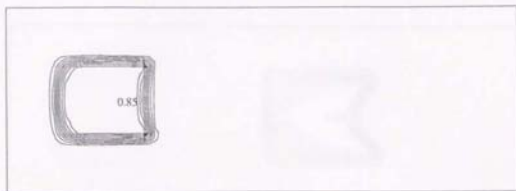
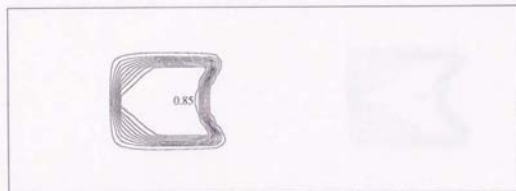


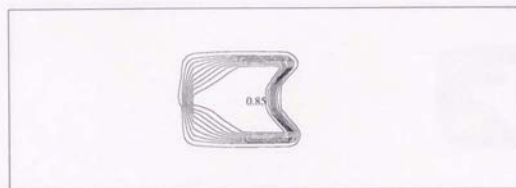
Figure 6.1.11 Computed initial water velocity distribution, drift of disk floe models around
the water stop structure with water stop column



(a) $t = 5$ seconds

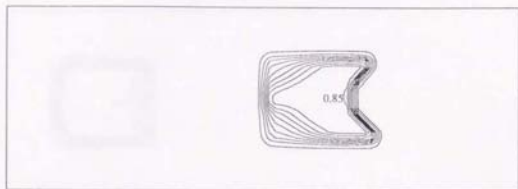


(b) $t = 10$ seconds

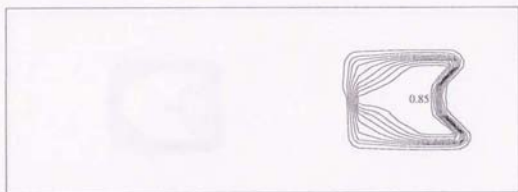


(c) $t = 15$ seconds

Figure 6.1.12 Computed free drift of disk floe models



(d) $t = 20$ seconds

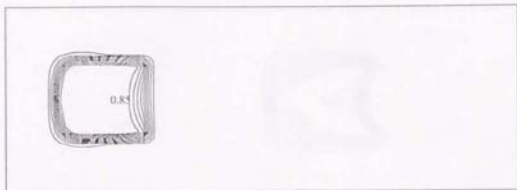


(e) $t = 25$ seconds

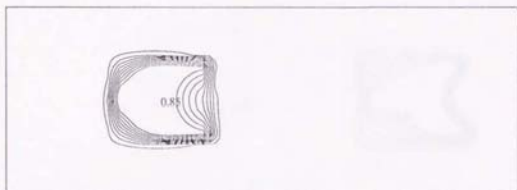


(f) $t = 30$ seconds

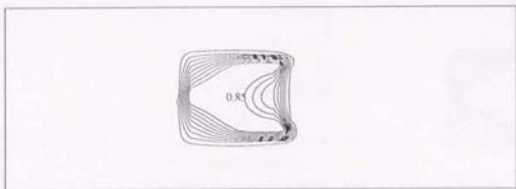
Figure 6.1.12 Computed free drift of disk floe models



(a) $t = 5$ seconds

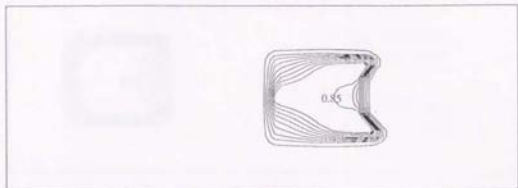


(b) $t = 10$ seconds

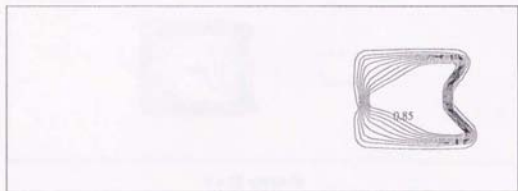


(c) $t = 15$ seconds

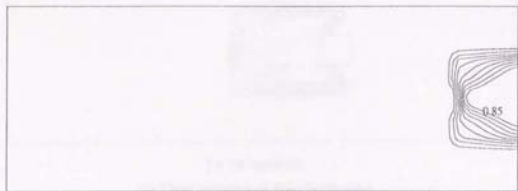
Figure 6.1.13 Computed free drift of rectangle floe models



(d) $t = 20$ seconds

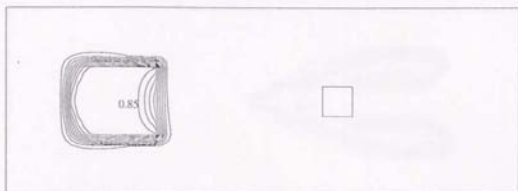


(e) $t = 25$ seconds

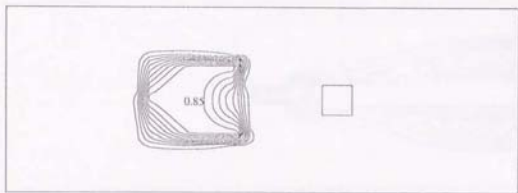


(f) $t = 30$ seconds

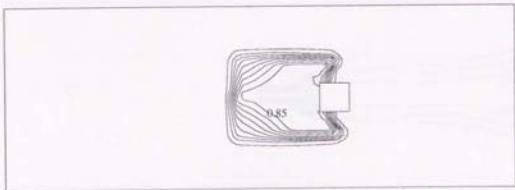
Figure 6.1.13 Computed free drift of rectangle floe models



t = 6 seconds



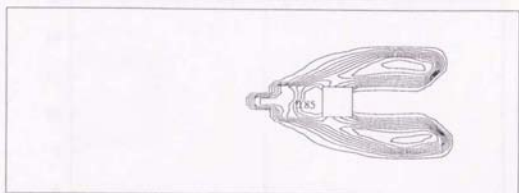
t = 12 seconds



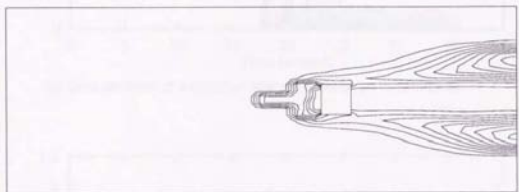
t = 18 seconds

(a) Time variation of floe distribution

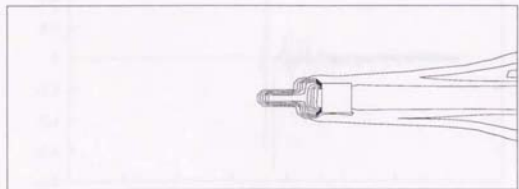
Figure 6.1.14 Computed disk floe models drift around a structure of 30cmX30cmX5cm, structure stops only floe models



$t = 24$ seconds



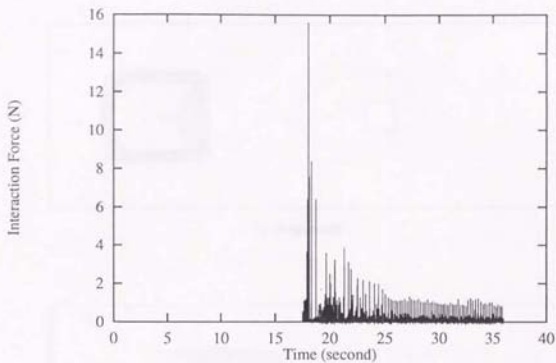
$t = 30$ seconds



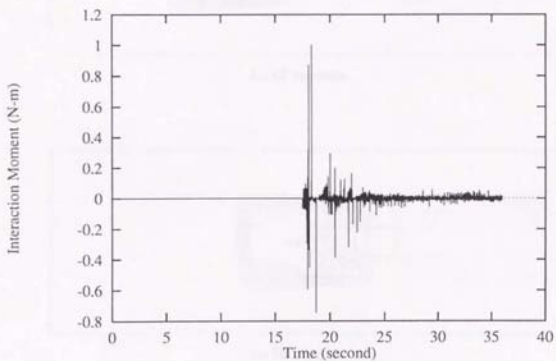
$t = 36$ seconds

(a) Time variation of floe distribution

Figure 6.1.14 Computed disk floe models drift around a structure of 30cm \times 30cm \times 5cm, structure stops only floe models

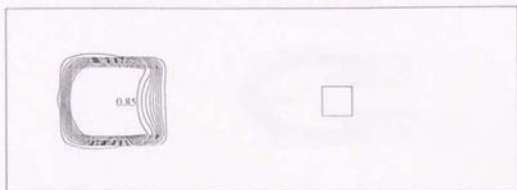


(b) Time variation of x-direction interaction force on the structure

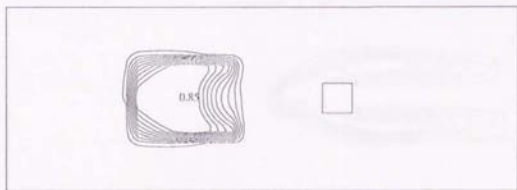


(c) Time variation of z-direction interaction moment on the structure

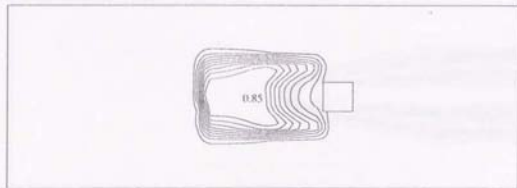
Figure 6.1.14 Computed disk floe models drift around a structure of 30cmX30cmX5cm, structure stops only floe models



t = 6 seconds



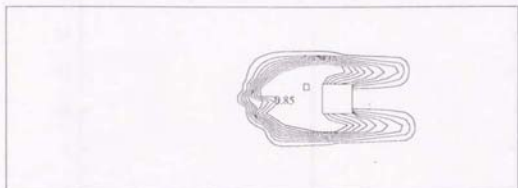
t = 12 seconds



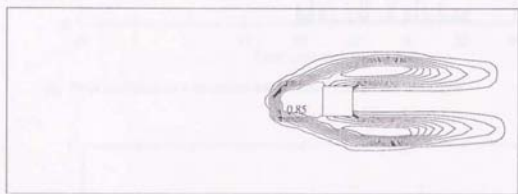
t = 18 seconds

(a) Time variation of floe distribution

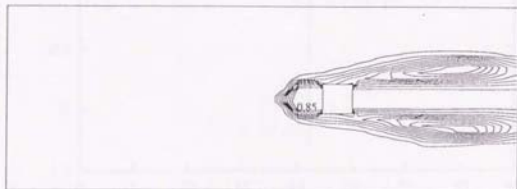
Figure 6.1.15 Computed rectangle floe models drift around a structure of 30cm×30cm×5cm, structure stops only floe models



t = 24 seconds



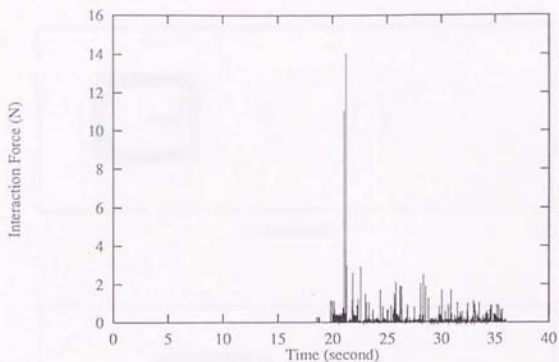
t = 30 seconds



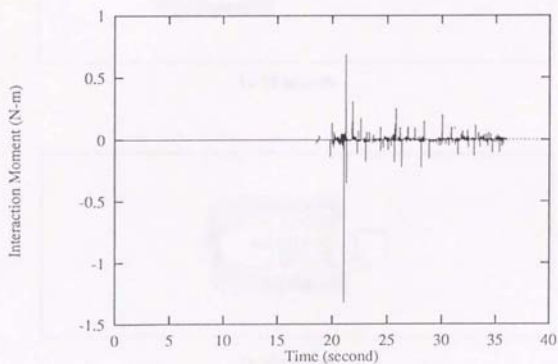
t = 36 seconds

(a) Time variation of floe distribution

Figure 6.1.15 Computed rectangle floe models drift around a structure of 30cmX30cmX5cm, structure stops only floe models

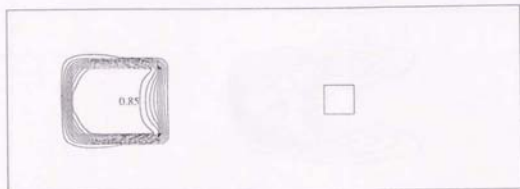


(b) Time variation of x-direction interaction force on the structure

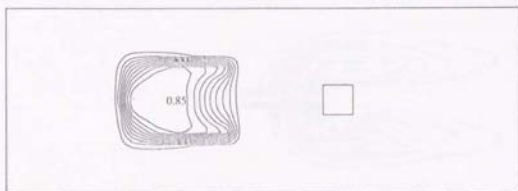


(c) Time variation of z-direction interaction moment on the structure

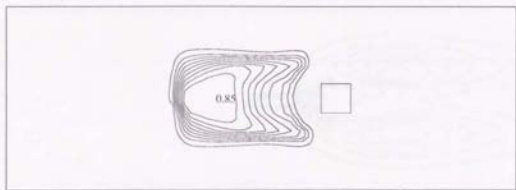
Figure 6.1.15 Computed rectangle floe models drift around a structure of 30cmX30cmX5cm, structure stops only floe models



$t = 6$ seconds



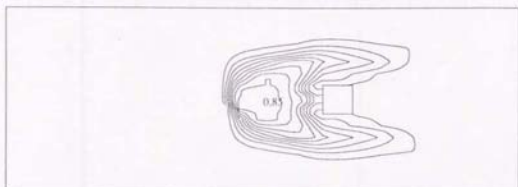
$t = 12$ seconds



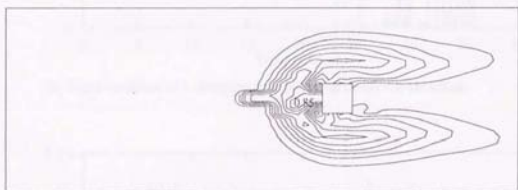
$t = 18$ seconds

(a) Time variation of floe distribution

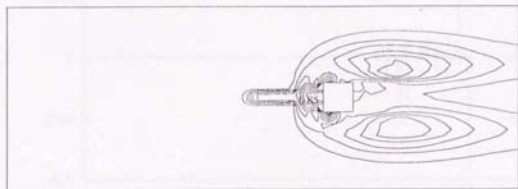
Figure 6.1.16 Computed disk floe models drift around a structure of 30cm \times 30cm \times 5cm, structure stops both floe models and water



t = 24 seconds



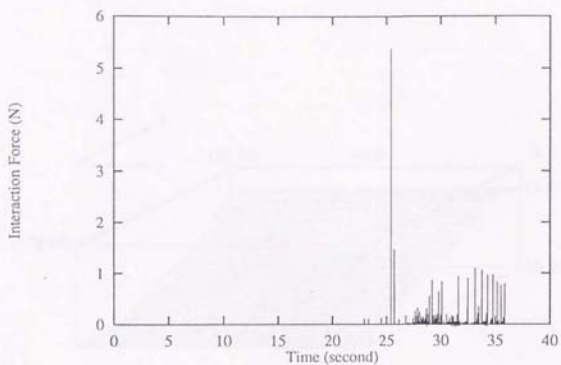
t = 30 seconds



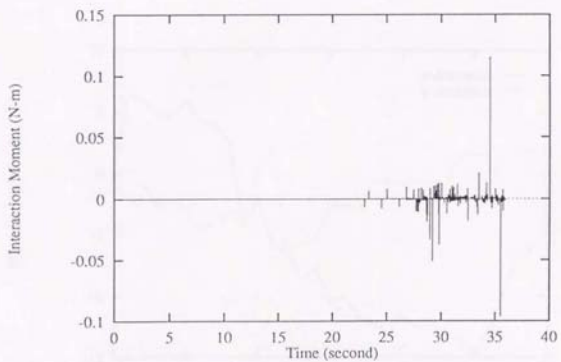
t = 36 seconds

(a) Time variation of floe distribution

Figure 6.1.16 Computed disk floe models drift around a structure of 30cm×30cm×5cm, structure stops both floe models and water



(b) Time variation of x-direction interaction force on the structure



(c) Time variation of z-direction interaction moment on the structure

Figure 6.1.16 Computed disk floe models drift around a structure of 30cm \times 30cm \times 5cm, structure stops both floe models and water

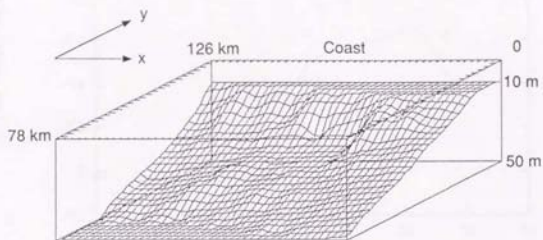


Figure 6.2.1 Domain of an actual Marginal Ice Zone

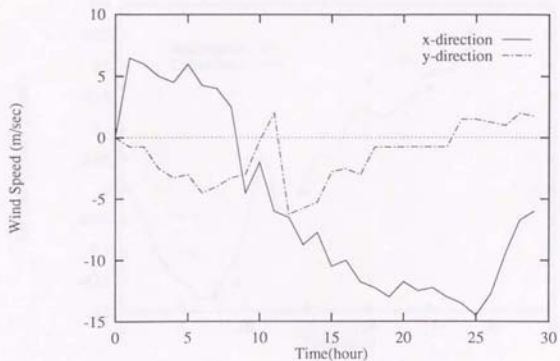
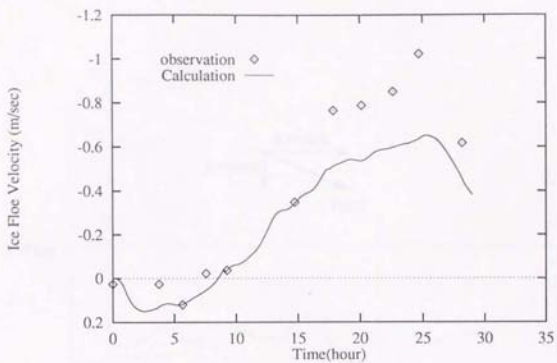
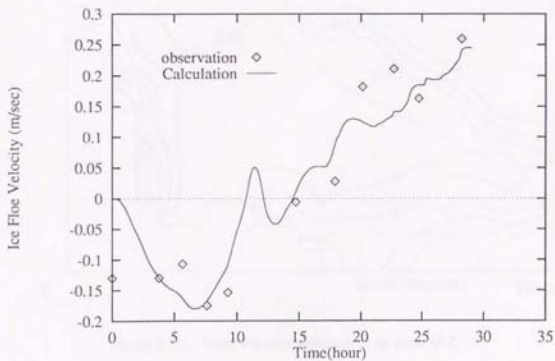


Figure 6.2.2 Observed wind speed on Marginal Ice Zone



(a) x - direction component



(b) y - direction component

Figure 6.2.3 Ice floe velocity in an actual Marginal Ice Zone

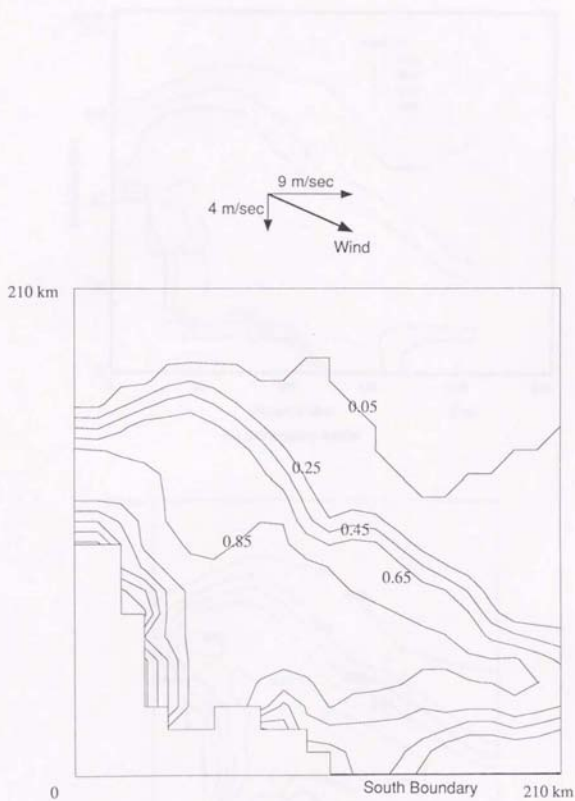
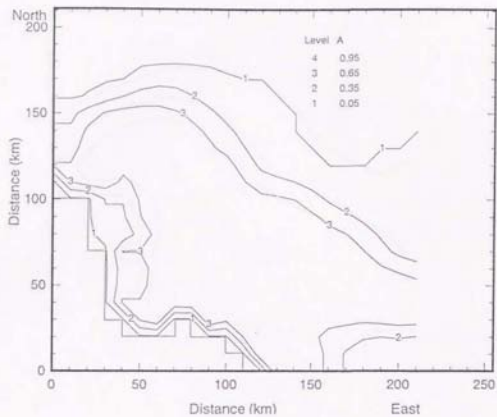
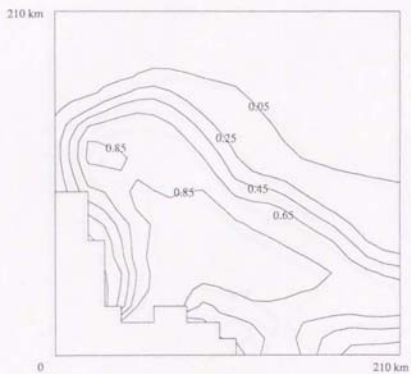


Figure 6.3.1 Initial Ice concentration of an ideal MIZ

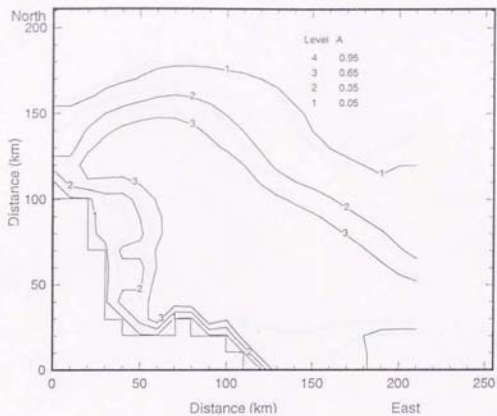


(a) Continuum model

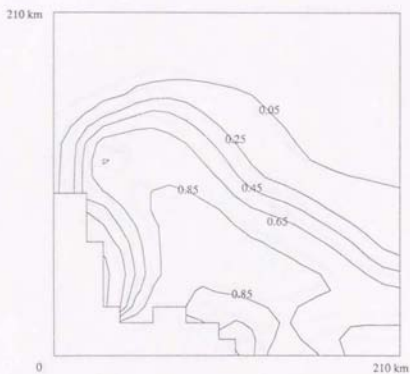


(b) Distributed Mass / Discrete Floe model

Figure 6.3.2 Ice concentration after 24 hours, fixed south boundary

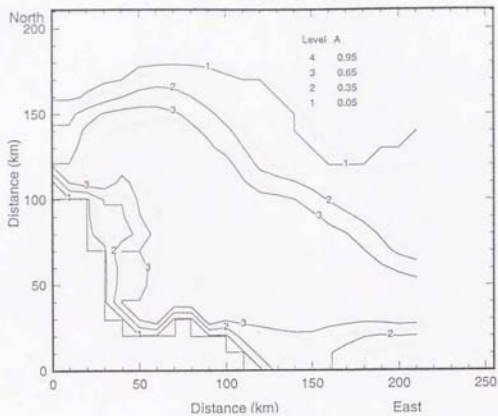


(a) Continuum model

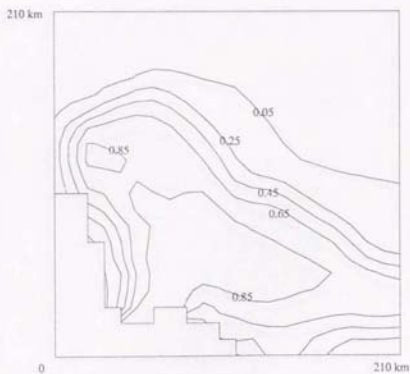


(b) Distributed Mass / Discrete Floe model

Figure 6.3.3 Ice concentration after 48 hours, fixed south boundary

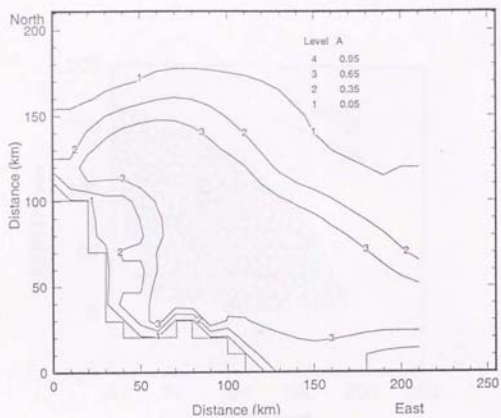


(a) Continuum model

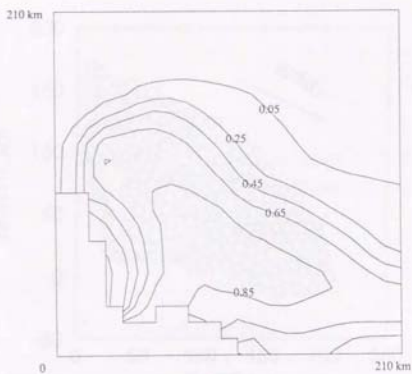


(b) Distributed Mass / Discrete Floe model

Figure 6.3.4 Ice concentration after 24 hours, free south boundary



(a) Continuum model



(b) Distributed Mass / Discrete Floe model

Figure 6.3.5 Ice concentration after 48 hours, free south boundary

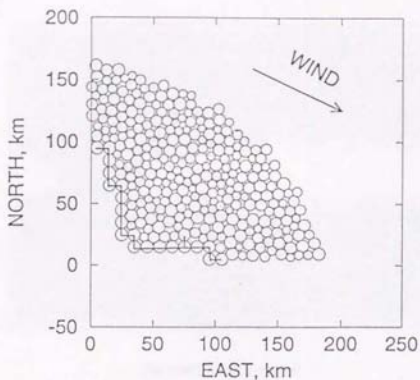


Figure 6.3.6 Initial configuration of ice floes for discrete element model

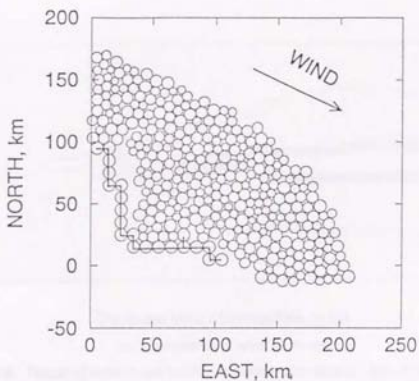
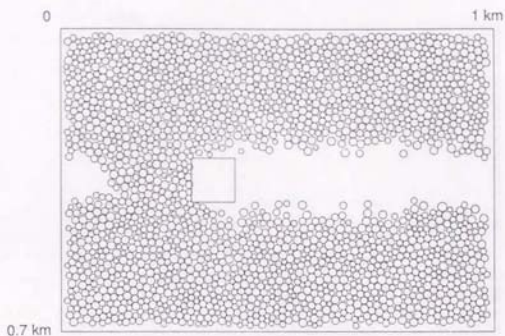
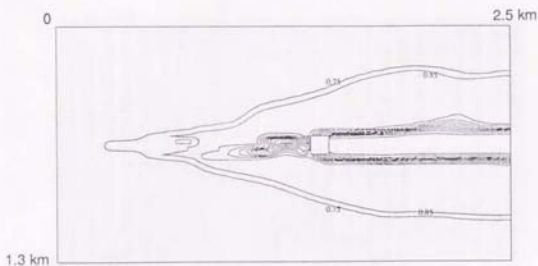


Figure 6.3.7 Configuration of ice floes after 48 hours, free south boundary



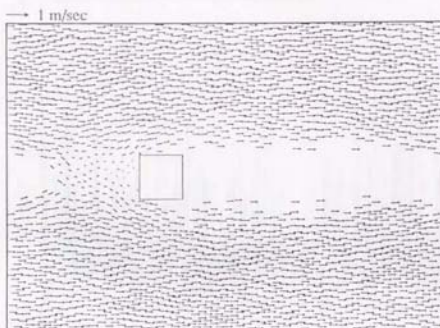
Discrete Element model



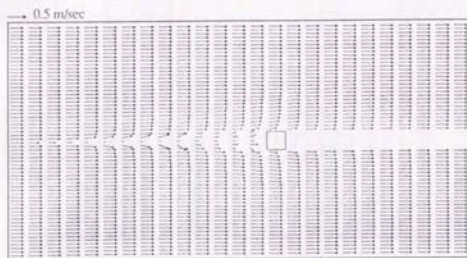
Distributed Mass / Discrete Floe model

(a) Ice distribution after 10 hours

Figure 6.3.8 Result of wind driven ice flow around a structure of $100\text{m} \times 100\text{m}$:
No water flow taken into account, uniformly distributed ice floes are driven
by a constant wind 10m/sec normal to the structure face.



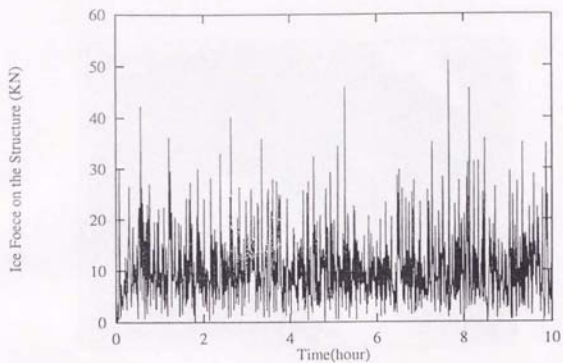
Discrete Element model



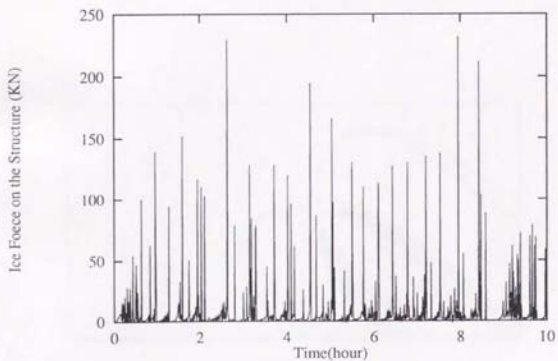
Distributed Mass / Discrete Floe model

(b) Ice velocity distribution after 10 hours

Figure 6.3.8 Result of wind driven ice flow around a structure of 100mX100m :
No water flow taken into account, uniformly distributed ice floes are driven
by a constant wind 10m/sec normal to the structure face.



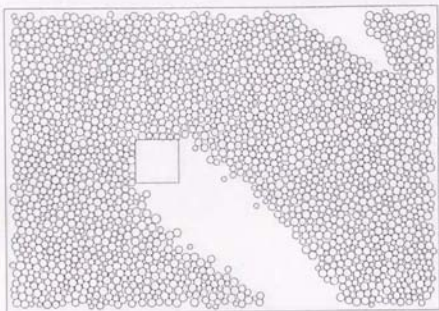
Discrete Element model



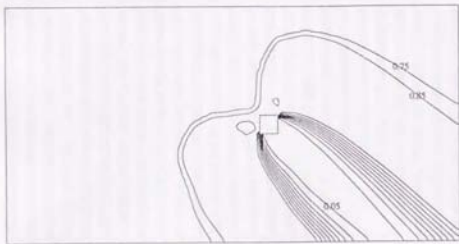
Distributed Mass / Discrete Floe model

(c) Time variation of interaction force on the structure

Figure 6.3.8 Result of wind driven ice flow around a structure of $100\text{m} \times 100\text{m}$:
No water flow taken into account, uniformly distributed ice floes are driven
by a constant wind 10m/sec normal to the structure face.



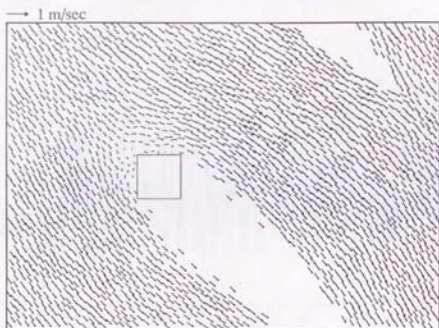
Discrete Element model



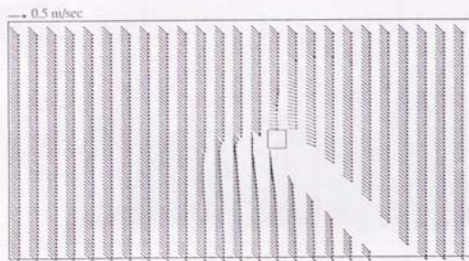
Distributed Mass / Discrete Floe model

(a) Ice distribution after 10 hours

Figure 6.3.9 Result of wind driven ice flow around a structure of 100mX100m :
No water flow taken into account, uniformly distributed ice floes are driven
by a 45° inclined constant wind of 10m/sec.



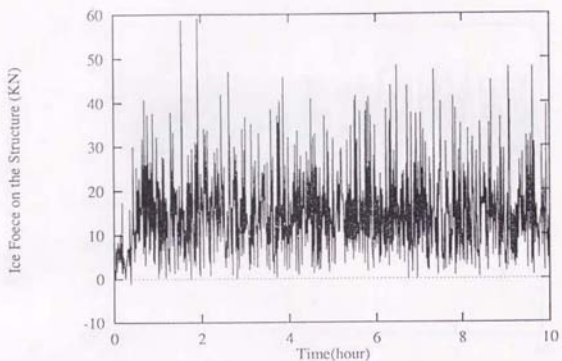
Discrete Element model



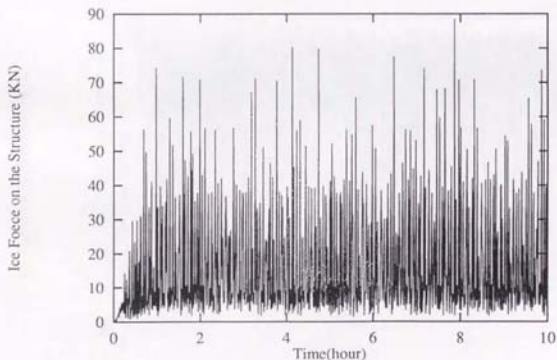
Distributed Mass / Discrete Floe model

(b) Ice velocity distribution after 10 hours

Figure 6.3.9 Result of wind driven ice flow around a structure of 100mX100m :
No water flow taken into account, uniformly distributed ice floes are driven
by a 45° inclined constant wind of 10m/sec.



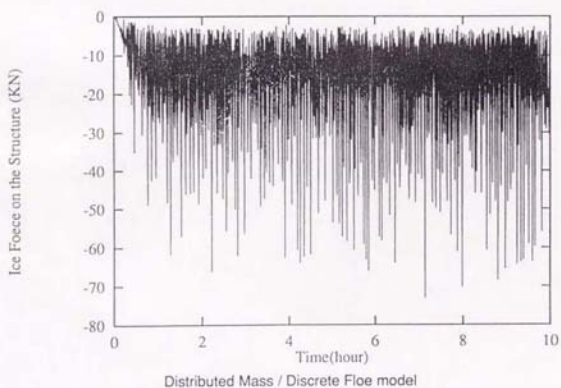
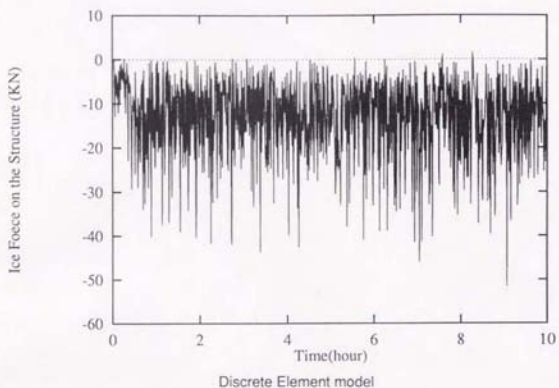
Discrete Element model



Distributed Mass / Discrete Floe model

(c) Time variation of x-direction interaction force on the structure

Figure 6.3.9 Result of wind driven ice flow around a structure of 100mX100m :
No water flow taken into account, uniformly distributed ice floes are driven
by a 45° inclined constant wind of 10m/sec.



(d) Time variation of y-direction interaction force on the structure

Figure 6.3.9 Result of wind driven ice flow around a structure of $100\text{m} \times 100\text{m}$: No water flow taken into account, uniformly distributed ice floes are driven by a 45° inclined constant wind of 10m/sec .



