

氷荷重により海洋構造物に発生する振動について

DYNAMIC RESPONSES OF AN OFF-SHORE STRUCTURE DUE TO ICE LOADING

泉山 耕¹・若生大輔²・瀧本忠教³

Koh IZUMIYAMA, Daiske WAKO and Tadanori TAKIMOTO

¹正会員 工修 運輸省船舶技術研究所 (〒181-0004 東京都三鷹市新川 6-38-1)

²運輸省船舶技術研究所 (〒181-0004 東京都三鷹市新川 6-38-1)

³工修 運輸省船舶技術研究所 (〒181-0004 東京都三鷹市新川 6-38-1)

Model tests were carried out at an ice tank to study the dynamic responses of an off-shore structure interacting with an ice sheet. A specially designed apparatus was used to simulate dynamic characteristics of the structure. Tests were made for a wide range of interaction speed of 4 to 500 mm/s. Three modes of structural responses were observed depending on the interaction speed; they are quasi static responses, steady-state vibrations and small response. Discussion is made on the speed and acceleration of the structure under the steady-state vibrations and the transition between the steady-state vibrations and small response.

Key Words : Ice load, dynamic response of structure

1. はじめに

わが国北方のサハリン島北東沖に存在する海底油・ガス田の開発は近年急速に本格化し始め、一部鉦区ではすでに商業生産が開始されている。この海域は冬季には流氷に覆われるため、海底資源開発のためにこの海域に設置されるプラットフォーム等には周囲の海氷からの力が作用する。氷が海洋構造物等に及ぼす荷重、氷荷重は、一般に他の外力に比べて格段に大きく、構造物等の設計における支配的外力となる。氷荷重の挙動は各種条件により異なり、これにより構造物が受ける影響も多様なものとなるが、氷と構造物との干渉問題を考える上で重要な問題の一つに、氷荷重による構造物の振動の発生がある。特に、サハリン沖においては潮流・風等の影響を受けて海氷の運動が活発であることを考えると、氷荷重による振動の発生は大きな問題となり得る。

氷荷重により構造物に振動が発生した場合は、氷荷重に加えて構造物の慣性力による力が構造物を支

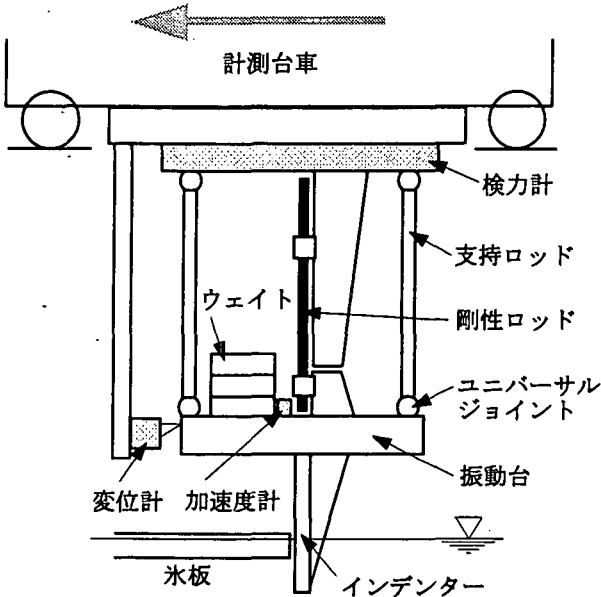
える地盤等に加わる。北欧では氷との干渉による振動により、海中の灯台が倒壊した例も報告されている¹⁾。また、このような氷との干渉による構造物の振動問題は、上述の灯台のような比較的細長い構造物特有の問題と考えられていたが、1986年北極海において、水線形状が100 m×100 mという極めて大型の海洋構造物 Molikpaq において氷荷重に起因する振動が発生し、一時は構造物全体の安定性を脅かす状態にまで陥ったことから、氷との干渉による構造物の振動問題は新たな注目を集め、以来盛んな研究が行われている²⁾。本研究では、氷海水槽における模型実験に基づき、氷荷重による海洋構造物の振動の発生について考察した。

2. 実験

実験は、運輸省船舶技術研究所の氷海水槽において行った。本水槽は、長さ35 m 幅6 m、水深1.8 m

の試験水槽を低温室内に封設した実験施設であり、室内を-20℃程度の低温に保つことにより水槽内に氷板を成長させることができる。氷海水槽において実験に使用される氷は、模型実験用に構造・厚さ・機械的諸特性等を調整した「模型氷」である。水槽上部には水槽の長さ方向に走行する計測台車があり、実験にあたっては、海洋構造物あるいは船舶等の模型をこれに取り付け、水槽の氷板内を曳引する。計測台車は最大 50 kN までの曳引能力を有する。

装置の概要を図・1 に示す。実験では、幅 100 mm の平板型インデントアを氷板内に一定速度で貫入させた。この実験手法は、氷と構造物の運動の関係が実現象と逆になるが、氷と構造物との干渉問題の研究には最も一般的な実験方法である。インデントアは振動台に取り付けられ、これはさらに剛性ロッド並びに支持ロッドを介して検力計・計測台車に取り付けられる。支持ロッドの両端はユニバーサルジョイントとなっており、これにより、振動台は水平を保ったまま運動することが可能である。インデントアに加わる力は、剛性ロッドにより検力計に伝達される。振動台の水平面内の運動に対する剛性、固有振動数等の動的特性は、剛性ロッドの上下の支点間の距離並びに振動台上に載せるウェイト量を変えることにより、調整することができる。振動台の変位及び加速度はそれぞれ、レーザー型変位計及び加速度計により計測した。



図・1 実験装置の概要

表・1 に実験条件を示す。実験では振動台の剛性は一定とし、振動台に載荷するウェイト量を変えることにより固有振動数を 5.73 Hz 及び 3.88 Hz の 2 種類に変化させた。また、固有振動数が 3.88 Hz の状態に対しては、氷板の厚さを 3 種類に変化させた。

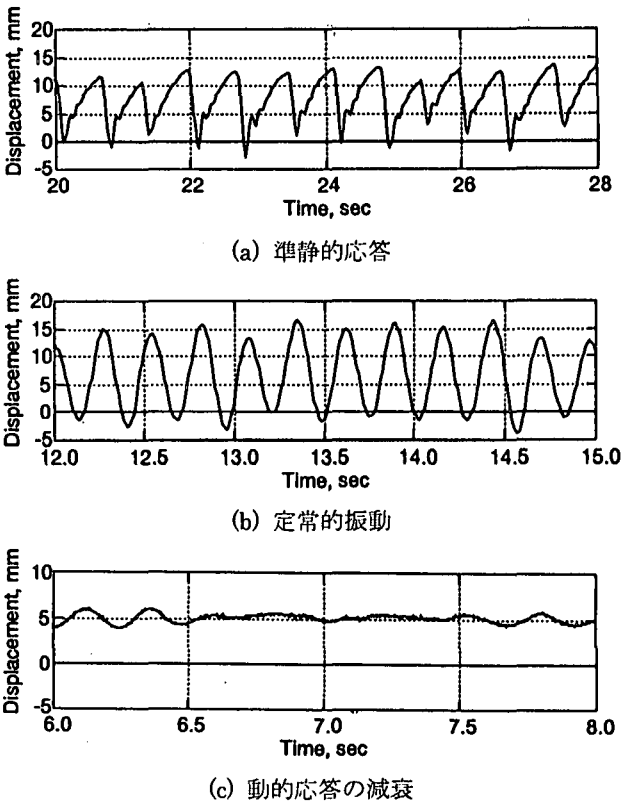
インデントアの氷板への貫入速度については、それぞれのケースについて、4 から 500 mm/s という広い範囲について実験を行った。

表・1 実験条件

ケース	剛性 (kN/mm)	振動数 (Hz)	速度 (mm/s)	氷厚 (mm)
H-30	151.4	5.73	4～500	30
L-18	151.4	3.88	4～500	18
L-30	151.4	3.88	4～500	30
L-45	151.4	3.88	4～500	45

3. 実験結果

氷板との干渉によりインデントアに発生する動的応答は、各種条件により影響を受けるが、最も顕著な影響を及ぼすものは氷板への貫入速度、すなわち、実現象では氷板の移動速度である。Karna は、氷板との干渉時における海洋構造物の動的応答は、氷板の移動速度の増加に伴い、準静的応答 (Quasi-static Response)、定常振動 (Steady-state Vibrations) 及び応答の減衰 (Small Response) の 3 種類に分類されるとした³⁾。本実験結果として得られたインデントアの動的応答も同様の分類ができる。それぞれの分類に対してインデントアの計測台車に対する相対的な変位量の時間変化の例を図・2 に示す。



図・2 インデントアの変位の時間変化の例

(a) 準静的応答

干渉速度が低い場合、インデントの応答は準静的なものとなる。計測台車の前進に従ってインデントは相対的に後方へ変位する。ある時点で氷板の破壊が発生し、インデントは急速に前方へ運動する。このプロセスが繰り返されることにより、インデントの変位の時間変化は鋸歯状のものとなる (図-2 (a))。

(b) 定常的振動

干渉速度が上がるに従って、インデントの応答は定常振動的なものとなり、変位の時間変化は正弦波状となる (図-2 (b))。

(c) 動的応答の減衰

さらに貫入速度が上昇するとインデントの動的応答は減衰し、ある一定の変位量を中心として小さな振幅で変動するだけとなる (図-2 (c))。

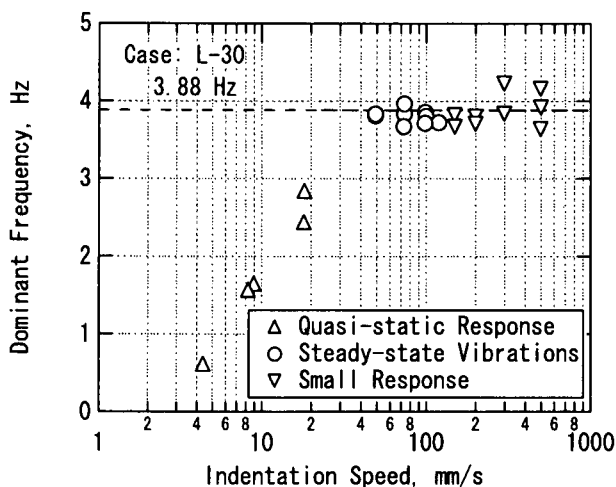


図-3 インデントの応答周波数と貫入速度

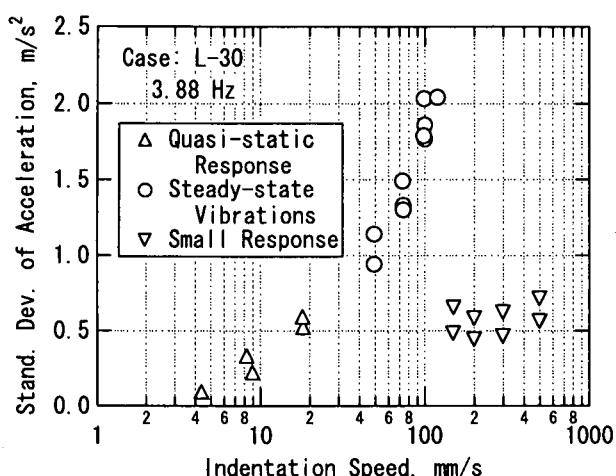


図-4 インデントの加速度と貫入速度

図-3 にインデントの動的応答の卓越周波数と貫入速度との関係を、ケース L-30 について示す。図中の破線はインデントの固有周波数を示す。貫

入速度が低く、準静的応答が卓越する領域では、インデントの応答周波数は固有周波数よりも低く、貫入速度に伴って増大する。速度が 40 mm/s 程度を超えると定常的振動状態が現れる。この状態ではインデントの応答周波数は固有周波数に極めて近い値となる。さらに速度が増加するとインデントの動的応答が減衰する領域に達する。この場合の応答周波数も固有周波数に近い。ただし、この領域におけるインデントの振動振幅は小さい。

インデントの動的応答の程度を表す指標として、インデントの運動加速度の標準偏差をとり、これと貫入速度の関係を示した図が図-4 である。同図より、インデントの応答は、貫入速度の増大とともに活発になり、定常振動状態においてピークを迎えた後、急激に減衰する、という特徴を有することが判る。

4. 考察

氷との干渉により海洋構造物に振動等の動的応答が発生する現象に関わる第 1 の問題点は、構造物の運動による慣性力の発生である。構造物を支える地盤には氷荷重と慣性力の合力が伝達され、これが構造物と地盤との間の剪断強度等の地盤支持力を上回ると構造物全体の倒壊等を引き起こす可能性がある。また、冒頭に述べた Molikpaq の例では、振動により構造体内部に充填された中詰砂に液状化現象が起きた可能性も指摘されている²⁾。従って、氷と海洋構造物の動的干渉問題を扱うにあたっては、氷板の運動速度・機械的諸特性等の条件と構造物の応答の関係を知らることが重要となる。

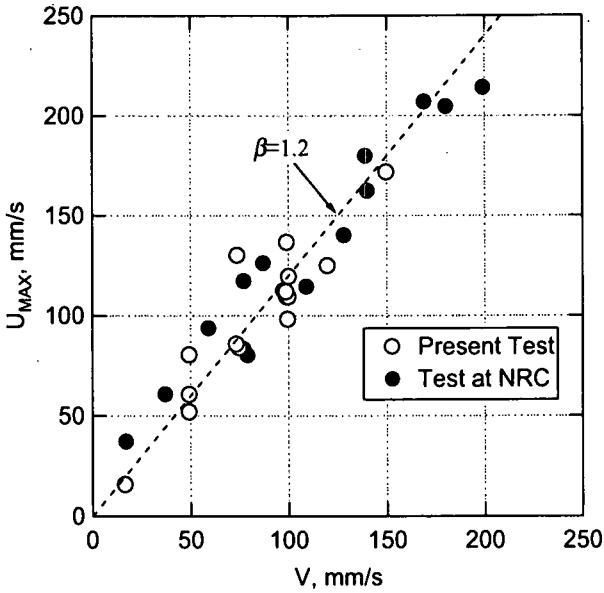
今回の実験結果では、インデントの応答には、準静的応答、定常的振動、動的応答の減衰の 3 種類の状態があり、定常的振動が発生している場合に最も応答が活発であることが示された。従って、このような結果を勘案すると、構造物の設計にあたっては、定常振動状態における構造物の応答特性、並びに、定常振動状態から応答の減衰状態への遷移条件の把握が重要となることが言えよう。

Karna らは、氷荷重を受けて定常振動状態にある構造物の運動について、次の関係を導いた⁴⁾。

$$U_{\max} = \beta V \quad (1)$$

ここに、 $U_{\max}$ 及び V は、それぞれ、構造物の運動速度の最大値及び氷の運動速度である。ただし、構造物の運動は、氷との接触部における計測値であり、氷の運動方向を正とする。また、 β は係数で、Karna によれば、1 を少し上回る値をとる。図-5 は本実験の結果について、式(1)の関係を示したものである。

図には、カナダ NRC において実施された模型試験結果についても示した⁵⁾。同図より、式(1)は実験結果を良く説明し、係数 β については、 $\beta=1.2$ 程度とすることが判る。



図・5 インデンターの最大運動速度と貫入速度

式(1)及び図・5により、インデンターの最大運動速度と貫入速度との関係が得られた。また、図・3において、定常的振動が発生しているときの卓越周波数が、インデンターの固有周波数に極めて近いものであることが示されている。従って、定常振動状態におけるインデンターの運動が正弦波により近似されると仮定すると、これら結果を用いてインデンターの加速度 a が、それぞれ次のように与えられる。

$$a = 2\pi f_N \beta V \sin(2\pi f_N t) \tag{2}$$

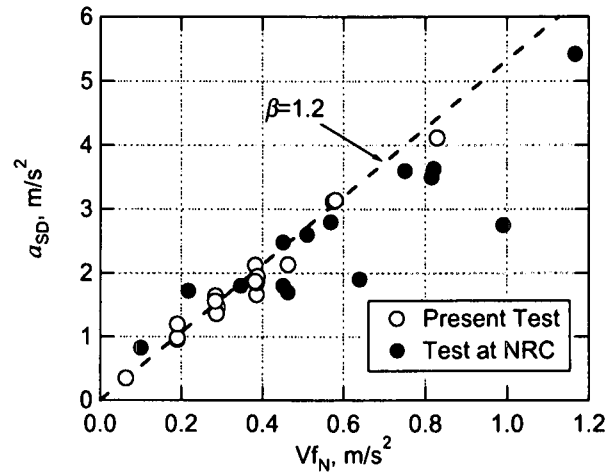
ここに、 f_N 及び t は、それぞれ、インデンターの固有周波数並びに時間である。ここで、図・4同様にインデンターの加速度の標準偏差 a_{SD} を動的応答の指標と考えると、これは式(2)より次のように与えられる。

$$a_{SD} = \sqrt{2}\pi\beta V f_N \tag{3}$$

この結果を用い、実験より得られた加速度の標準偏差と加速度の時限を有するパラメーター $V f_N$ を比較した結果が図・6である。図中の破線は、式(3)において、図・5同様に $\beta = 1.2$ とした結果である。NRC において実施された実験結果の一部は理論より予想されるものよりも低い加速度を示しているものの、全体的には理論と実験結果との一致は良い。

図・6に示した結果は、構造物の動的特性が与えられた場合、その構造物に発生する定常的振動による加速度が氷板の運動速度をパラメーターとして式(3)により与えられることを意味する。振動による慣

性力は振動加速度と直接的な関係があることを考えると、(3)式は氷海域に建設される海洋構造物の設計に重要な情報を与えるものと言えよう。



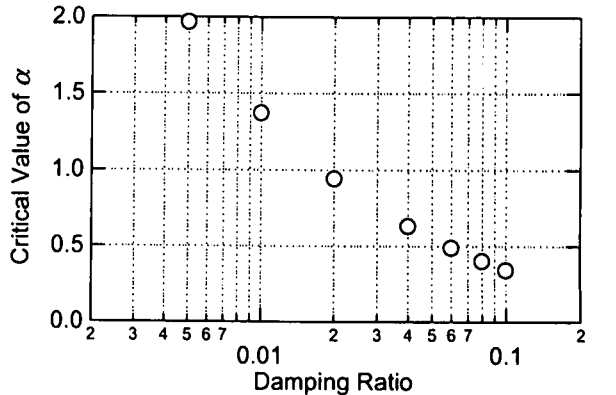
図・6 振動加速度についての実験結果と理論の比較

これまでの議論により、定常的振動が発生している場合の加速度は式(2)により与えられることが示された。しかしながら、図・4に見られるように、定常的振動はある貫入速度で急激に減衰することから、この条件無しに式(2)を用いた場合には、過大な加速度を推定する可能性がある。

定常的振動状態から動的応答の減衰状態への遷移は、構造物と氷の干渉速度の増大に伴う減衰の影響の増大によるものと考えられる。Toyama らは、次式で与えられる無次元パラメーター α がある限界値に達したときにこの遷移が起こるとの理論解を示した。

$$\alpha = \frac{VK}{f_N F_C} \tag{4}$$

ここに、 K 及び F_C は、それぞれ、構造物の剛性及び氷が破壊するときに構造物に働く氷荷重である。彼らによれば、定常的振動状態から動的応答の減衰状態への遷移に至る限界値は系の減衰係数の関数として図・7のように与えられる。



図・7 定常的振動から応答減衰への遷移限界値

Toyama らの研究では、理論解析ばかりではなく、実海氷を用いた実験も行われている。しかしながら、彼らの実験における氷板と構造物模型の干渉速度の範囲が 2 から 48 mm/s と比較的狭い領域にあり、模型の応答が減衰する領域での実験結果が得られていないため、上記理論を実験的に検証するには至っていない。本研究による実験結果を式(4)の形で整理した結果を図-8に示す。なお同図では、図-6においてインデンターの運動加速度とパラメーター Vf_N との間に良い相関があることが示されていることから、インデンターの動的応答を示す指標として、 a_{SD}/Vf_N を用いた。また、本実験では氷の破壊時の氷荷重 F_C の直接計測を行っていないことから、以下の式によりこれを推定した。⁷⁾

$$F_C = m\sigma_c B h \sqrt{5 \frac{h}{B} + 1} \quad (5)$$

ここに、 m はインデンターの形状による係数であり、本研究に用いた平板上のインデンターについては 1.0 となる。また、 σ_c 、 B 、及び h は、それぞれ、氷の一軸圧縮強度、インデンターの幅及び氷厚である。

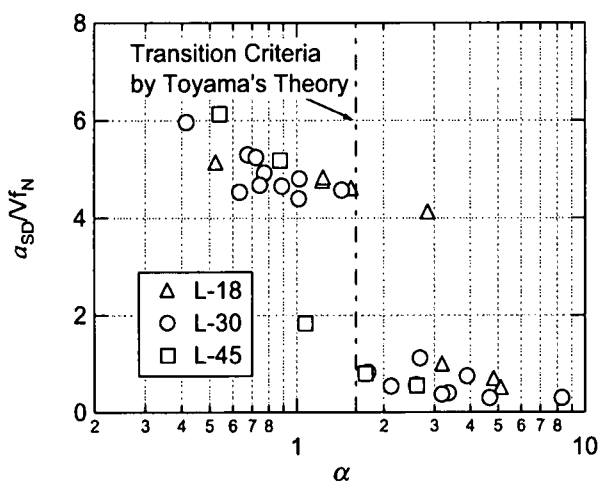


図-8 定常的振動から応答減衰への遷移

自由振動試験結果によれば、本研究に用いた試験系の減衰係数は、固有振動数が 3.88 Hz の場合、0.0075 から 0.0090 程度の値をとる。図-7によれば、この減衰係数に対しては、図中破線で示した $\alpha = 1.6$ 程度で定常的振動から動的応答の減衰への遷移が起こる。実験データの全体的傾向と比較すると、この理論解はほぼ実験結果を説明するように見える。しかしながら、データを詳細に検討すると、定常的振動から動的応答の減衰への遷移が起こる α の値は氷厚に依存し、氷厚が厚いほど小さな値を取る傾向があることが判る。これは Toyama の理論には含まれていないパラメーターの影響と考えることができよう。

このパラメーターが何であるかを論じるには、残

念ながら、今回の実験ではデータが充分ではない。しかしながら、Sodhi による研究が一つの可能性を与える⁸⁾。彼は氷荷重による構造物の振動についての数値計算による研究を行ったが、計算に必要なパラメーターの一つとして氷の弾性率を挙げている。この場合の弾性率とは、氷の機械的特性としての弾性率ではない記しておく。これは、氷縁に構造物から力が加わると氷縁は変位するが、この力と変位の比であり、構造物の剛性に対応する量である。Sodhi の計算結果によれば、定常的振動から動的応答の減衰への遷移が起こるときの氷板速度は、氷の弾性率と構造物の剛性の比の関数であり、これが増加するに従って減少する。一般に氷の弾性率は氷厚に伴って増加すると考えられるので、図-8は Sodhi の理論と定性的に一致するものと言える。

5. まとめ

本論文では、氷海域に建設される海洋構造物に氷荷重による振動等の動的応答が発生する現象について、氷海水槽における模型実験結果に基づいて論じた。本論文の主要な結論は以下の通りである。

- (1) 氷荷重による構造物の振動の挙動は、貫入速度の影響を受け、貫入速度の増大に伴って、構造物の変位の経時曲線が、鋸歯状を示す順静的振動から正弦波状となる定常振動へと遷移し、ある一定速度以上では振動が減衰する。
- (2) 定常的振動状態にある場合の構造物の運動速度の最大値は氷の運動速度とほぼ一致あるいはこれを僅かに上回るものとなる。
- (3) 上記の結果に基づいて計算される構造物の振動加速度の最大値は、計測値と良い一致を示した。
- (4) 定常振動が減衰する氷の運動速度は、氷の強度及び厚さ、構造物の剛性及び固有周波数の関数として与えられる。

参考文献

- 1) Englebrektson, A.: Dynamic ice loads on a lighthouse structure, *Proc. of the 4th International Conference on Port and Ocean Engineering under Arctic Conditions (POAC'77)*, Vol. 2, pp. 654-663, 1977.
- 2) 加藤一行: 1986年4月12日 MOLIKPAQ に何が起きたか, 寒地技術論文・報告集, vol.13, 1997.
- 3) Karna, T.: Mitigation of steady-state vibrations induced by ice, *Proc. of the 4th International Offshore and Polar Engineering Conference (ISOPE'94)*, Vol. 2, pp. 534-539, 1994.

- 4) Karna, T. and Turunen, R. A.: Straightforward technique for analysing structural response to dynamic ice action, *Proc. of the 9th Conference of Offshore Mechanics and Arctic Engineering (OMAE'90)*, Vol. 4, pp. 135-142, 1990.
- 5) Izumiyama, K., Irani, M.B. and Timco, G.W.: Influence of compliance of structure on ice load. *Proc. of the 12th International Symposium on Ice*, Vol. 1, pp. 229-238, 1994.
- 6) Toyama, Y., Sensu, T., Minami, M. and Yashima, N., 1983. Model tests on ice-induced self-excited vibration of cylindrical structures, *Proc. of the 7th International Conference on Port and Ocean Engineering under Arctic Conditions (POAC'83)*, Vol. 2, pp. 834-844, 1983.
- 7) Afanas'ev, V.P.: Ice pressure on vertical structures. *Technical Translation 1708. National Research Council of Canada*, 1972.
- 8) Sodhi, D.S.: A Theoretical model for ice-structure interaction. Experience of Arctic offshore structure., *Special Report, H, IAHR Working Group on Ice Forces on Structure*, 1994.