

流水期の津波来襲を意図した流水の構造物への衝突に関する中規模実験 およびその数値計算手法の基礎的検討

Medium Scale Test and Numerical Simulation on Ice Impact to a Structure due to Tsunami during Sea Ice Season

木岡信治¹・森昌也²・山本泰司³・竹内貴弘⁴

Shinji KIOKA, Masaya MORI, Yasuji YAMAMOTO and Takahiro TAKEUCHI

In 1952, ice floes due to Tsunami, originated in the sea off the coast of Tokachi, caused serious damages to private houses, especially in Hamanaka town. Therefore, the ice impact force due to Tsunami during ice season should be considered for the design of structures, especially important structures or their protective structures near the coast or port and harbor. We performed a medium-scale model test on the ice impact to a structure by free-fall of the ice floe. The influences of kinetic energy of ice floe and ice temperature on the impact force were clarified. We also developed a fundamental numerical simulation method for the ice impact to a structure based on the DEM with tension resistance among particles. The method was confirmed to be appropriate if mechanical parameters were properly given.

1. はじめに

冬期の北海道北東部沿岸域などの流水域に津波が発生すれば、大きな被害を及ぼす可能性がある。事実、1952年3月、十勝沖地震で発生した津波により流水が遡上し、写真-1に示すように、家屋が損壊した例も報告されている。また、近年の流水量あるいは密接度の減少に伴い、個々の流水が波浪によって活発に運動しやすい状態となり、高速で構造物に衝突する頻度が増加することもある。過去に、網走港南防波堤で、流水接岸時の大時化で多量の海水が越波とともに防波堤を越える越水現象により、パラペット背後のパイプラインやドルフィン等が破壊したほか、上架中の漁船等にも被害を与えている。ゆえに、港湾・海岸付近の重要構造物、その防護構造物などの設計には流水による衝突も考慮する必要があるがその研究例は少ない。釧路港では、津波漂流物を止める目的で金属製支柱とワイヤロープからなる防護柵（津波スクリーン）が一部完成している。これまでに木材やコンテナなどの津波漂流物に関する研究事例（例えば、廉ら、2007；有川ら、2007）があるが、流水の場合には、その量が半無限であること、また、衝突時に脆性的破壊が生じる場合が多いことが特徴的といえる。著者等は、こうした背景を踏まえ、主に津波による流水挙動およびその陸への遡上域の推定とともに、遡上氷による構造物

への衝突力の推定、ひいては沿岸部の流水被害の予測手法やその対策法等の提案を目標とした研究に着手している。本稿ではその要素研究の一つ、海水の構造物への衝突現象について述べる。過去に早川ら（2000）が、海水の結氷盤を利用した自由落下方式による衝撃実験を実施し、海水の破壊機構等を明らかにしている。本研究では、低温室で同様な実験を実施し、さらに破壊強度に大きく影響する氷温を制御するとともに、構造物（杭）の剛性をやや小さくし、構造物応答も考慮できるものとした。そこで海水のもつ運動エネルギーと衝突力との関係や、氷温の変化が衝突力へ与える影響などについて考察した。また、衝突時の海水の破壊挙動の数値計算手法についても検討した。

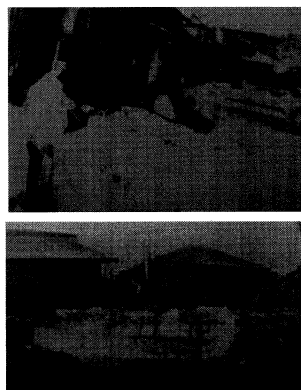


写真-1 1952年十勝沖地震で発生した津波とともに遡上した流水による家屋の被害状況の例（北海道浜中町）
（根室測候所蔵、1952年十勝沖地震調査報告書より）

2. 海水の構造物への衝突実験

前述のように、過去に早川ら（2000）が、野外にて海

- | | | |
|---------|------|----------------------------------|
| 1 正 会 員 | 博(工) | (独法)土木研究所 寒地土木研究所 寒冷沿岸域チーム 主任研究員 |
| 2 正 会 員 | | (独法)土木研究所 寒地土木研究所 寒冷沿岸域チーム |
| 3 正 会 員 | 博(工) | (独法)土木研究所 寒地土木研究所 寒冷沿岸域チーム 上席研究員 |
| 4 正 会 員 | 博(工) | 八戸工業大学工学部教授 |

水の結氷盤を利用した自由落下方式による衝撃実験を実施し、様々な寸法（幅1.5m、厚さ0.2m、長さ1～2m）の直方体の海水を衝突速度が7～9m/sとなるよう所定の高さから落下させ、直径100mm および200mm の鋼製円断面杭（両端支持、支間長0.4m）の比較的剛な構造物へ衝突させている。本実験は、規模ではやや劣るが、低温室で同様な実験を実施した。なお、破壊強度に大きく影響する氷温を制御するとともに、構造物の剛性をやや小さくして構造物応答も考慮できるところに本実験の特徴がある。

図-1に示すように、衝突実験は自由落下方式により、人工海水を落下高 $h=0.5\text{m}\sim 1.5\text{m}$ （衝突速度 V_0 は $3.1\sim 5.4\text{m/s}$ ）と変化させて、円断面杭構造物（梁）へ衝突させることにより行った。海水の力学特性は一般的には異方性をもつが、海水の衝突の向きとしては、実際に頻度が多いと思われる氷の成長方向に垂直とした。設定した落下高（衝突速度）は実験装置の制約によるものであるが、越水であれば実際の速度（推算値）（川合ら，1997）に比べて決して小さくはないし、津波の遡上流速よりも通常小さいと考えられる海水の漂流速度に対しても決して小さくないと考えられる。人工海水（供試体）は、低温室にて25%の塩水を凍らせ、約25kg～100kgの質量（ M ）となるよう直方体に整形した（厚さ t を約0.16mと一定）。塩水を満たす容器は、実際の海水の成長過程を再現するため、成長方向をおもに鉛直方向に限定し、側部・底部を50mm厚のスタイロフォームで断熱した容器を用いた。また破壊強度に敏感な氷温を -10°C （目標値）を中心とし、 $-15\sim -5^\circ\text{C}$ （目標値）の範囲で変化させた。その制御のため、低温室内の雰囲気温度をその温度に設定し、海水の厚さが約0.2mまで成長したのち、容器から取り外し、約24時間その温度下で暴露させた。その後、供試体厚が約0.16mとなるよう、塩分濃度が比較的高くなっ

ている下部層数cmを切り落とした。なお、落下装置は低温室の外に設置されており、外気温の影響を受けないよう、冬期に実施するとともに、海水のセットおよび落下を極力短時間（15分以内）で終了させるよう努めた。ここで表-1に本実験の主な条件と試験後の供試体の氷温、密度、塩分量の計測結果をまとめた。また、参考のため、淡水水（Fresh water）についても実施した。氷温は目標値よりもやや高めであったが、氷温依存性を検討するには十分な成果であった。また海水の機械強度を大きく決定づける因子である塩分量（ブライン量）は、First-year ice（生成して1年目の氷）の場合、通常3～7%の範囲（Cammaert ら，1988）であること、また、密度が $0.86\sim 0.92\text{ kg/cm}^3$ （淡水の場合には 0.917 kg/cm^3 ）の範囲（Cammaert ら，1988）であること、さらに、結晶粒径が5mm～20mmの柱状の結晶構造であったことから、概ね実物の海水構造を再現できた。

一方、図-2に示すよう、衝突を受ける構造物として、今回は前述の防護柵などを想定した杭構造物とした。杭は、支間を0.6mとした両端単純支持のSS材の丸棒（直径 d ：60mm、固有振動数：338Hz）で、両支点部にロードセル（定格容量：20kN）、杭の下側に歪ゲージを配置し、衝突時の支点反力やひずみをサンプリング間隔5kHzで計測した。ただし、支点部は浮き上がり防止のため金具で上下に固定した（支点部での回転は許容）。また破壊モードは高速ビデオカメラなどで観察するとともに、個々の供試体の氷温、密度、塩分量、人工海水の結晶粒径（偏光装置による撮影写真より推定）などを計測した。

表-1 主な実験条件および試験後の供試体の物性値

	T_{ice0} ($^\circ\text{C}$)	供試体寸 法(m)	T_{ice} ($^\circ\text{C}$)	T_a ($^\circ\text{C}$)	S (%)	ρ_i (g/cm^3)
CASE 1	-10	B:0.3-0.6 L:0.3-1.2	-9.3～ -8	-2.1～ +3	6.38	0.913
CASE 2	-15	B:0.6 L:0.3-0.6	-13～ -11	-4.8～ -2.4	5.93	0.917
CASE 3	-5	B:0.6 L:0.3-0.6	-5.7～ -4.5	-1.2～ +0.2	5.22	0.914
CASE 0 [淡水]	-10	B:0.6 L:0.3-0.6	-8.5～ -8	+0.7～ +2	—	0.916

各CASEにおいて落下高：0.5～1.5m（衝突速度が3.1～5.4m/s）

供試体（人工海水）（直方体）の厚さは約0.16mの一定値

結晶粒径(Grain size)はおおよそ5mm～20mm

T_{ice0} : 目標氷温（低温室内雰囲気温度）、 T_{ice} : 氷温、 T_a : 外気温、 S : 氷内の塩分量、

ρ_i : 氷の密度

3. 実験結果と考察

(1) 海水の破壊性状と衝突力の一般的傾向

図-2に、標準的と思われる実験条件（ $L=B=0.6\text{m}$ 、 $h=1\text{m}$ ）と、本実験で実施したケースのうち最も運動エネルギーが大きなケース（ $L=1.2\text{m}$ 、 $B=0.6\text{m}$ 、 $h=1.5\text{m}$ ）を例として、その衝突力（ロードセルによる各支点反力）の経時変化（実線）と、その時の海水の破壊状況を示した。なお、同図にはシミュレーション結果も示したが、

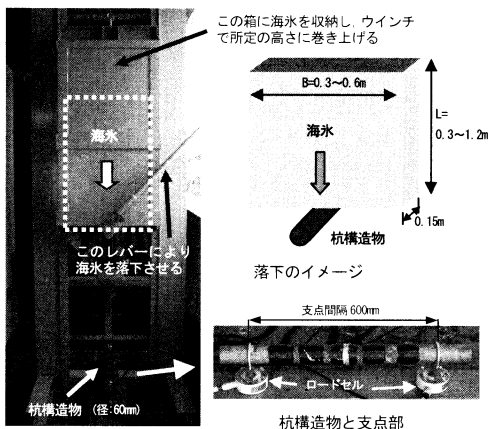
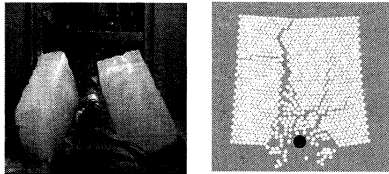
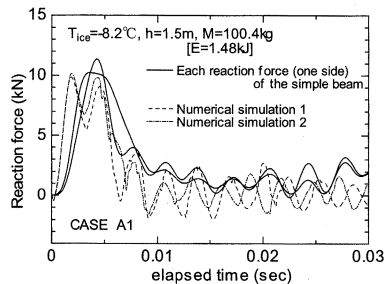
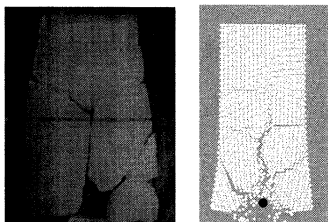
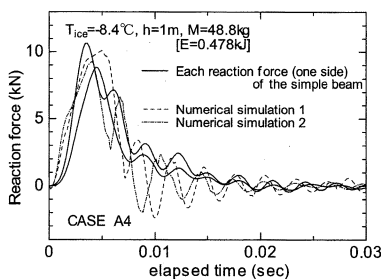


図-1 自由落下方式による海水の衝突実験装置

これについては後述する。衝突してからおよそ 3×10^{-3} s 程度で荷重がピークを迎えたのち、構造物の減衰振動が生じていることが分かる。またその時の破壊モードは、同図(a)のように比較的海水の寸法、特に衝突方向の寸法が小さい場合には、引張によるスプリット破壊が卓越し、海水上端部までクラックが及んで海水が二つに破壊・分離した。一方、同図(b)のように海水の寸法が大きい場合は、クラッシング（貫入）が卓越して、その後クラックが生じる破壊モードであった。しかし、海水上端部まで及ばず、途中で分岐して側部に到達した。以上の破壊モードは早川ら（2000）と同様であり、その詳細な機構については、早川ら（2000）が考察している。なお、本実験でも正味の衝突力を計測できなかったが、次項で述べる理由と後述のシミュレーションによる推定値（図-7）から、本実験条件での正味の衝突力のピーク



(a) $B=0.6\text{m}$, $L=0.6\text{m}$, $h=1\text{m}$ [$T_{ice}=-8.4^\circ\text{C}$]



(b) $B=0.6\text{m}$, $L=1.2\text{m}$, $h=1.5\text{m}$ [$T_{ice}=-8.2^\circ\text{C}$]

図-2 支点反力波形及び破壊モードの実測とシミュレーションとの比較例（支点反力は片側づつ表示）

値より、その構造物の応答（慣性力）を含む反力のピーク値の方が若干大きくなると予想された。しかし次項(3)の考察も含め、冒頭に述べたような基本的な衝突特性を理解するため、反力を代用して検討することに不都合はないと考えられる。また、構造物下面に配置した歪みゲージによる支点反力推定値とロードセルによる測定値とはほぼ同一の値であったため、以降も衝撃力の代表値としてロードセルの値を用いる。

(2) 衝突力(支点反力)と海水の運動エネルギーとの関係

図-3には、海水の運動エネルギー E と合支点反力（最大値） R との関係を示した。同図には、破壊を考慮しない（運動エネルギーはすべて杭の弾性歪みエネルギーに変換）質点とはりによる簡易モデルによる推定値（破線）を示した。このモデルによれば、反力 R は、 E と梁の等価剛性 K との積の平方根に比例する。なお、この場合、梁の等価剛性 K は 29MN/m である。その比例定数として β としたが、構造物および落下物の寸法・形状、物性、破壊モードなどに依存する補正係数であると見なせる。実測値を見ると、概ねその簡易モデルの傾向を表し、氷温が低いほど反力が大きくなっているのが分かる。しかし、ある程度運動エネルギーが増大すると、反力は一定となることが推察される。これは後述の破壊シミュレーションによっても示すことができる。さらに質量と衝突速度に分けて調べたのが図-4である。氷温によって異なるが、大局的な傾向は、質量そして衝突速度それぞれある程度大きくなれば反力が一定となるように見受けられる。その一定となる速度あるいは質量は、氷温そして速度・質量相互に依存する可能性がある。しかし同一条件でもバラツキがあること、データ数が少ないことから、さらに追加実験をして今後も検討する余地がある。また、氷温に応じて異なるが、この簡易モデルによる値と比べておよそ1オーダー小さな値となっており、海水の破壊・側方への飛散などによるエネルギー消費が大きいと考えられる。このように脆性的破壊が生じる場合には、衝突荷重はかなり小さな値となり、また、ある程度運動エネルギーが大きくなると一定値になることが推察される。

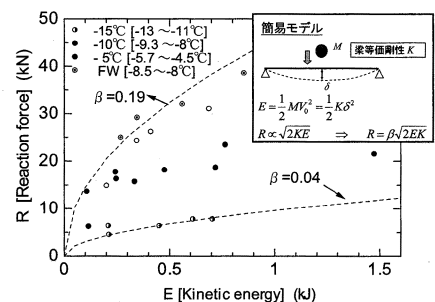


図-3 合支点反力（最大値）と海水の運動エネルギーとの関係（FW は淡水を意味する）

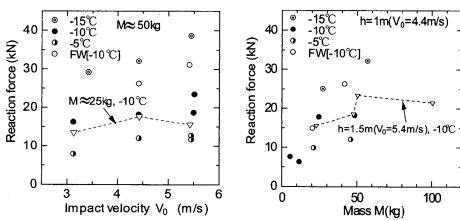


図-4 合支点反力と衝突速度(左)および質量(右)との関係

(3) 衝突力(支点反力)のピーク値発生時刻と海水の運動エネルギーとの関係

図-5に合支点反力のピーク値発生時刻 t_{max} と運動エネルギーとの関係を示す。なお t_{max} は構造物の固有周期 T (0.003s)で無次元化している。反力のピーク値発生時刻は運動エネルギーの増加とともに急激に減少して、一定値となることが分かる。早川ら(2000)は比較的大きな運動エネルギー領域で実施し、この時間が一定値となることを報告しており、本実験結果と同様な傾向となっている。さらに本実験よりそれは水温にも依存しないことも推察された。またこの場合、ピーク値発生時刻の2倍と仮定した衝撃作用時間と梁の固有周期 T との比(インパルス長比)は2~3と推定され、バネ-質点系に三角波あるいは半正弦パルス波の衝撃荷重を加えた簡易モデルより推定される動的増幅率から、正味の衝撃力よりもその応答値(反力)の方が若干大きな値であることが推察された。これは後述のシミュレーション(図-7)からも示される。

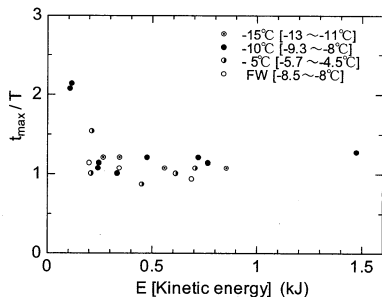


図-5 合支点反力のピーク値発生時刻と海水の運動エネルギーとの関係

(4) 水温が衝突荷重に与える影響

海水の温度(水温)は、海水底面では海水の結氷温度(約 -1.8°C)に一致し、表面ではおよそ気温に近いと考えてよい(上部に積雪がある場合や日中の放射熱の影響が大きい場合はこの限りでない)ので、その平均的な水温が -10°C 以下になることもめずらしくない。水温は $-1.8^{\circ}\text{C} \sim -10^{\circ}\text{C}$ 以下で常に変動するが、海水の機械強度(圧縮、曲げ強度など)や破壊荷重(貫入試験などによる)は、水温に大きく依存することが知られている。このように木材、コンテナ、船舶などの他の津波漂流物と

異なり、冒頭で述べた流水の特徴以外にも水温ひいては外気温・気象条件に大きく依存することが特徴の一つに数えられる。図-6には、絶対値で表示した水温と合支点反力との関係を示した。図中の点線は水温の影響を考慮した1軸圧縮強度(σ_c)の推算値に杭径(d)と氷厚(t)を乗じて力として表したものを示した。一般に海水の1軸圧縮強度は海水のブライン量(塩分量、水温の関数)や密度を用いて推定することができ、幾つかの実験式が提案されている。ここで示した推算値は、Truskovら(1992)およびWeeks(1967)によるものを示した。海水の強度は歪み速度あるいは荷重速度にも依存するが、前者は圧縮強度が最大となる歪み速度領域で実施した結果から推定されたものであり、後者は荷重速度の影響を除いた式であり、圧縮強度指標とも呼ばれる。図-6より、本実験結果である衝突力は水温の低下にともなって直線的に増加し、準静的な試験で得られる圧縮強度の水温依存性よりも大きいことが推察される。さらに、その衝突力は、運動エネルギーよりも、水温による影響(前述の水温変化の範囲で)の方が大きいことも推察される。また両者の式より、 -10°C の淡水の方が -15°C の海水($S=6\%$)の圧縮強度より大きくなる事が予想されるが衝突力の場合は逆になっている(図-3, 4)ことも興味深い。衝突力の概算値として例えばTruskovら(1992)の圧縮強度に構造物の投影面積を乗じたものを採用すれば、安全側と言えそうだが、北海道のように比較的水温が高い地域や、構造物の寸法や形状によっては、かなり過大な設計荷重を与える可能性がある。

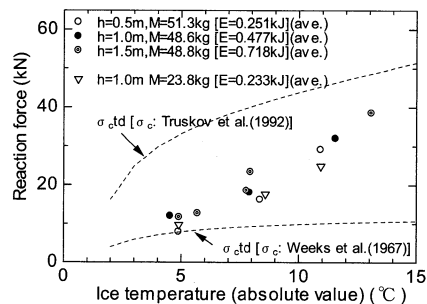


図-6 水温(絶対値)と合支点反力(最大値)との関係

4. 海水の衝突破壊挙動の数値計算手法の基礎的検討

(1) 数値計算手法構築の目的

本検討の主な目的は、構造物応答も含めた衝突現象の理解を助けるとともに、かなりの労力(コストと時間)がともなう実験によるデータを補完、あるいは実験不可能な条件での結果を予測できるようなツールを構築することにある。最終的には、数値実験を含めた実験データを基に衝突力の簡易推定式を提案したいと考えている。

(2) 計算手法の概要

計算手法として、粒子間に引張抵抗を与えた2次元の個別要素法を用いた。この手法は、特にRC構造物などの衝撃破壊解析への適用例が多い（例えば、鈴木ら、1997）。本検討では、構成粒子は円柱の等径要素6角形配置とし、パラメータ設定については、初期値に一般に考えられる海水の機械強度（例えば、Cammaert, 1988）を参照し、破壊モードや衝突力を実現と合うように適宜調整した。杭構造物は、はり要素のFEM（要素数30）で解析し、動的解析のための時間積分はニューマークの β 法を用いた。なお、減衰マトリクスはレーリー減衰によるものとした。

(3) シミュレーション結果とその妥当性の検証

まずパラメータの設定は、本実験で標準的な条件（目標水温 -10°C 、 $B=0.6\text{m}$ 、 $L=0.6\text{m}$ 、 $h=1\text{m}$ ）での結果を用いた。実際の破壊モードや静的な変形特性に合わせてパラメータ設定すると、衝突荷重はやや実験値よりも大きな値となるため、主なパラメータにバラツキを与えることにより、良好な結果が得られた。実際の海水内の種々の物性値も空間的にバラついており、このため機械強度も多少バラツキがあることを考えると、不都合な考え方ではない。ここで、表-2に設定した主なパラメータを示すが、重要と思われる幾つかのパラメータを対数正規分布に従う確率変数として扱い、仮に0.4の変動係数を与えた。

表-2 主な計算条件

確定量		確率変数	平均	C.V.
粒子配列	等径要素6角形	粒子間摩擦係数	0.2	0.4
時間ステップ	10^{-4}s	法線方向バネ定数	3.2MN/m^2	0.4
粒子径	0.02m	粘着力	420kPa	0.4
粒子減衰定数	0.01	引張限界歪みのパラメータ	0.01	0.4

前述の図-2に、支点反力波形および破壊モードの実測とシミュレーションとの比較例を示した。計算結果は、出力された最初の2例を示した。計算値は、海水の破壊モードや構造物の自由減衰振動を含む反力波形などについては概ね再現できているものと思われるが、負の支点反力値（引張力）や、同図(b)のように、2つのピークを持つ場合がある等などの点で不具合があり、まだ改良の余地がある。特に前者の不具合は、支点部の再現（または実験の不備）が不十分であることによる。図-7には、合支点反力の最大値と運動エネルギーとの関係の実測値と計算値（計算コスト削減のため最初の3つの出力値の平均）との比較例を示した。計算は、前述の標準条件で設定した同一のパラメータ（表-2）を用い、運動エネルギー（質量や落下高）のみを変えて行った。設定した標準条件よりも海水サイズが小さくなると実測値と合わなくなるようであるが、反力と運動エネルギーとの関係、特にある運動エネルギー以上では反力が一定となる傾向などを大

まかに再現している。まだ幾つかの課題は残されているが、今後、氷温依存性も含めた適切なパラメータの設定により、個別要素法による計算が可能であると思われる。

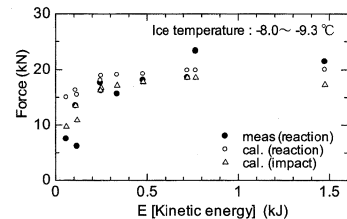


図-7 合支点反力（最大値）と運動エネルギーとの関係の実測値と計算値との比較例（目標水温： -10°C ）

5. まとめ

海水の衝突力は、運動エネルギーとともに増加するが、ある程度運動エネルギーが大きくなると一定値になること、また運動エネルギーは、主に海水の破壊・側方への飛散などに消費される割合が大きいために推察された。また衝突力は水温の低下にともなって直線的に増加し、本実験の範囲の運動エネルギーの変化よりもその依存性が大きかったほか、一軸圧縮強度の氷温依存性よりも大きいたことが分かった。また、適切なパラメータ設定が実現できれば、個別要素法により、海水の破壊挙動とその構造物応答などが良好に再現できることが分かった。

今後は、本研究で残された課題を克服するとともに、衝突体が木材や鋼製材料など他の材料についても同様な実験を行い、海水による衝突力と比較したい。また水が存在した場合の付加質量の影響も検討していく必要がある。

参考文献

- 有川太郎・大坪大輔・中野史丈・下迫健一郎・石川隆信 (2007) : 週上津波によるコンテナ漂流力に関する大規模実験, 海岸工学論文集第54巻, pp. 846-850.
- 川合邦広・佐藤正樹・早川哲也・花田真州・佐伯浩 (1997) : 越水防止施設に作用する水荷重の評価と試設計, 海洋開発論文集第13巻, pp. 807-812.
- 鈴木真次・石川隆信・古川浩平・水山高久・石川芳治 (1997) : 個別要素法による鉄筋で補強した砂防ダム袖部の衝撃破壊解析, 構造工学論文, Vol.43A, pp. 1555-1566.
- 早川哲也・花田真州・川合邦広・佐伯浩 (2000) : 越波および津波により杭構造物に作用する衝撃水力算定法, 海岸工学論文集第47巻, pp. 976-980.
- 康慶善・水谷法美・白石和陸・宇佐美敦浩・宮島正悟・富田孝史 (2007) : 陸上週上津波によるコンテナの漂流挙動と漂流衝突力に関する研究, 海岸工学論文集第54巻, pp. 841-845.
- Cammaert, A. B. and D. B. Muggeridge (1988): Ice Interaction with Offshore Structures, Van Nostrand Reinhold, pp.76-111.
- Truskov, P.A., Astafiev, V. N. and G. A. Surkov (1992) : Problems of Choice of Sea Ice Cover Parameters Design Criteria, The 7th International Symposium on OKHOTSK SEA & SEA ICE ABSTRACTS, pp.21-26.
- Weeks, W. F. (1976) : Sea Ice Properties and Geometry, AIDJEX Bulletin, No.34, pp.137-172