

小口径円柱に作用する多方向不規則波の波力と波力係数の特性に関する実験的研究

水谷法美*・藤岡丈夫**・渡辺増美***・岩田好一朗****

1. 序 論

多方向不規則波による小口径円柱の作用波力については、これまでもいくつか検討例があり、多方向不規則波の波力は一方向不規則波の波力に比べて小さく、一方向不規則波の設計は安全側になることが報告されている(例えば、平石ら, 1994)。しかし、一方向不規則波に比べて多方向不規則波の波力が小さくなる機構はこれまで検討されておらず、未解明である。したがって、両波動場における作用波力の差は定量的には明らかにされておらず、さらに、多方向不規則波動場での慣性力係数や抗力係数もほとんど検討例が無いなど、残されている問題点も多い。

本研究では、多方向不規則波動場に設置された小口径直立円柱に作用する全波力と部分波力、および転倒モーメントを水理実験により明らかにし、小口径円柱に作用する波力に及ぼす波の多方向性について考究する。

2. 水理実験

2.1 実験方法

水理実験を、中部電力(株)電力技術研究所の平面水槽(30.0 m×23.0 m×1.2 m)で行った。同水槽には幅0.5 mの造波板42枚から構成される多方向不規則波造波装置が設置されている。

実験を波力計測実験と流速計測実験の2種類に分けて行った。波力計測実験では、水槽内に直径 $D=8$ cmの直立円柱を設置し、円柱底部に取り付けた六分力計により x 方向と y 方向の全波力 F_x と F_y 、および x と y 軸回りの転倒モーメント M_x と M_y を計測した。なお、 x と y はそれぞれ造波板法線方向と平行方向の水平軸である。さらに、図-1に示すように、円柱内部に取り付けた部分波力計により静水面下 $d=15, 25, 45$ cmにおける幅 $dz=2$ cmの円柱セグメントに作用する部分波力 dF_x と dF_y の計測も同時に行った。

流速計測実験では、円柱が無い状態で各部分波力計の

中心位置での x と y 方向の流速 u と v を電磁流速計3台を使って計測した。

波力計測実験と流速計測実験を同一の条件で行うとともに、両実験結果の位相をあわせるため、水位の計測は両実験とも円筒前面の同一地点で行った。

実験条件を以下のように設定した。すなわち、静水深 h を70 cmで一定とし、入射波の有義波高 $H_{1/3}$ を3種類(8, 10, 12 cm)、有義波周期 $T_{1/3}$ を3種類(1.2, 1.6, 2.0 s)、方向集中度パラメータ S_{max} を10, 25, 75と一方向波である999の4種類とした。なお、いずれも主波向きを x 方向に設定した。計測時間は静水状態から約4分間とし、計測したすべての時間変化を50 HzでAD変換し、ハードディスクに記録した。

2.2 解析方法

まず、流速計測実験と波力計測実験の両実験で計測した円柱前面10 cmにおける水位変動の時間波形を使って波力と流速の時間軸を合わせた。そして、この円柱前面の水位変動の時間波形にゼロダウクロス法を採用して波別解析を行い、波別解析波毎の波力と転倒モーメント、および流速の最大値とそれらの1/3最大値(添字1/3で示す)などの統計諸量の計算を行った。また、部分波力に以下に示すモリソン式を適用し、円柱セグメントの慣性力係数と抗力係数を、1)一つの時系列内では一定であると仮定した場合(手法I)、2)波別解析波ごとに

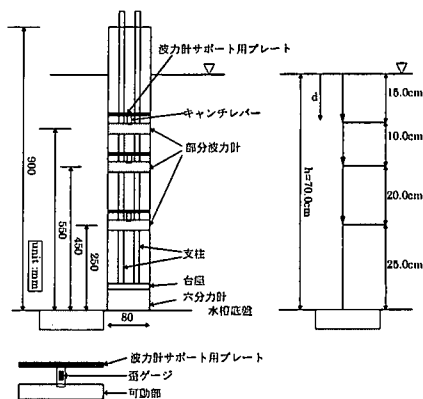


図-1 波力計測装置の概要

* 正会員 工博 名古屋大学助教授 工学研究科土木工学教室

** 学生会員 名古屋大学大学院 工学研究科土木工学専攻

*** 正会員 中部電力(株)電力技術研究所

**** フェロー 工博 名古屋大学教授 工学研究科土木工学教室

異なると仮定した場合(手法II), の二通りに対して最小自乗法により計算した。

$$dFx = \frac{1}{2} C_{Dx} \rho D u \sqrt{u^2 + v^2} dz + \frac{1}{4} C_{MX} \rho \pi D^2 \dot{u} dz \dots\dots\dots (1)$$

$$dFy = \frac{1}{2} C_{Dy} \rho D v \sqrt{u^2 + v^2} dz + \frac{1}{4} C_{My} \rho \pi D^2 \dot{v} dz \dots\dots\dots (2)$$

ここに, ρ : 水の密度, C_{Dx}, C_{Dy} : それぞれ x, y 方向の抗力係数, C_{MX}, C_{MY} : それぞれ x, y 方向の慣性力係数, であり, 上付ドットは時間に関する微分を示す。

3. 波力の特性

3.1 極大波力

まず, 波別解析波毎の最大波力の特性(本研究では, 極大波力と称する)について論議する。有義波高を使って無次元化した極大波力の1/3最大値と方向集中度 S_{max} の関係を異なる d/h に対して示したのが図-2と3である。 d/h に関係なく dFx は方向集中度の増大とともに増加し, dFy は逆に減少する傾向がある。これは, 方向集中度が増すにしたがい, 主波向きである x 方向の進

行波成分が増大するため, x 方向波力は増大し, その直交成分である y 方向波力が減少するためである。これは, 円柱の全波力に対する平石ら(1994)の結果と同様であり, 部分波力に対しても d/h にかかわらず共通の結果となっている。しかし, 図-2に示す $d/h=0.643$ の場合, 水深波長比 $h/gT_{1/3}^2$ の大きいほうがどちらかといえば小さくなる傾向があるのに対して, 図-3の $d/h=0.214$ の場合, $h/gT_{1/3}^2$ が小さくなるにしたがい減少する傾向が明瞭に現れている。これは, 本実験では後述するように慣性力が卓越していたが, 水深波長比の大きいほうが静水面近くでは同一の波高に対して加速度が大きくなるのに対し, d/h が大きくなる(底面に近づく)と水粒子の運動が水深波長比の小さい場合に比べて小さくなるためである。また, d/h の小さい方が x, y 両方向とも無次元波力は大きい。

図-4は, 流速 u の1/3最大値($u_{1/3}$)で無次元化した x 方向の無次元波力 $dFx_{1/3}/\rho u_{1/3}^2 D dz$ と $KC_x (=u_{1/3} T_{1/3}/D)$ の関係を例示したものである。同図より, 無次元波力は KC_x のほぼ-1乗に比例して減少していることがわかる。このことは, 本実験では, 慣性力が卓越波力成分であると同時に, 部分波力が波高よりもむしろ流速場に大きく支配されることを示している。そこで, 波高の代わりに流速を使って無次元化した無次元波力 $dFx_{1/3}/\rho u_{1/3}^2 D dz$, 及び $dFy_{1/3}/\rho u_{1/3}^2 D dz$ ($v_{1/3}$: v の1/3最大値)と方向集中度 S_{max} の関係を図-5と6に示す。両図より, $dFx_{1/3}/\rho u_{1/3}^2 D dz$ は d/h が変化してもほぼ同様の値であることがわかる。また, d/h に関係なく $h/gT_{1/3}^2$ が大きいほうが無次元波力は大きい。 $dFy_{1/3}/\rho u_{1/3}^2 D dz$ には多少の差異はあるが, これは揚力の影響によるものと考えられる。したがって, 円柱に作用する波力の特性を流速場の特性と関連づけて明らかにしなければならないことが再確認できる。

図-7は流速を使って無次元化した全波力が方向集中度の変化とともにどのように変動するかを示したも

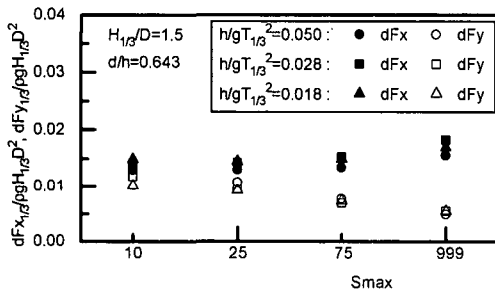


図-2 $dFx_{1/3}/\rho g H_{1/3} D^2, dFy_{1/3}/\rho g H_{1/3} D^2$ と S_{max} の関係 ($d/h=0.643$ の場合)

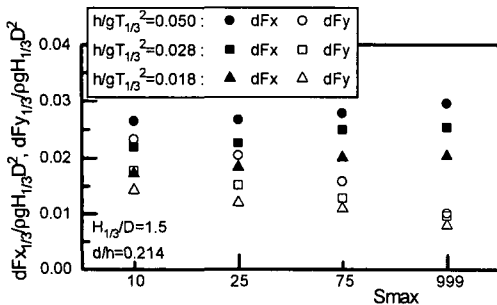


図-3 $dFx_{1/3}/\rho g H_{1/3} D^2, dFy_{1/3}/\rho g H_{1/3} D^2$ と S_{max} の関係 ($d/h=0.214$ の場合)

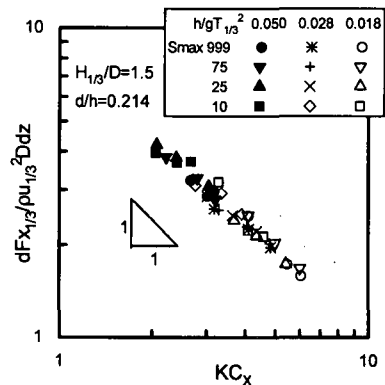


図-4 $dFx_{1/3}/\rho u_{1/3}^2 D dz$ と KC_x の関係

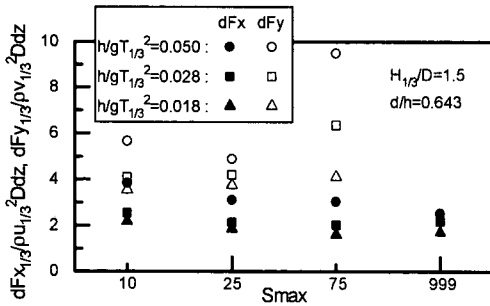


図-5 $dFx_{1/3}/\rho u_{1/3}^2 Ddz$, $dFy_{1/3}/\rho v_{1/3}^2 Ddz$ と S_{max} の関係 ($d/h=0.643$ の場合)

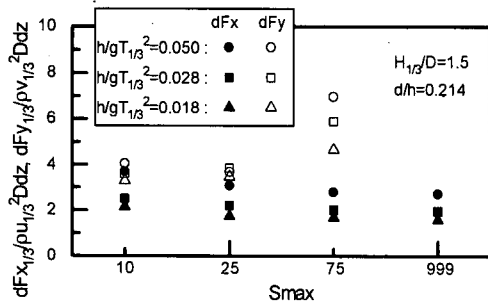


図-6 $dFx_{1/3}/\rho u_{1/3}^2 Ddz$, $dFy_{1/3}/\rho v_{1/3}^2 Ddz$ と S_{max} の関係 ($d/h=0.214$ の場合)

のである。なお、流速の代表値として、最も自由表面に近い $d/h=0.214$ の値を使用した。 x 方向の全波力に対する値は全体的に部分波力に対する値とほぼ等しい。

ところで、図-5と6、及び図-7より、方向集中度 S_{max} が大きくなると x 方向の無次元部分波力と全波力ともに減少するという従来の結果と逆の傾向が認められる。これは、主波向きの流速が同じであれば、方向集中度が減少するにしたがいその直交成分の流速は増すことになり、作用する流速ベクトルは大きくなるため、作用波力も大きくなったためであろう。また、直交方向の流れによる揚力の影響も主要な要因であると考えられる。一方、 y 方向に対する無次元部分波力と全波力は方向集中度 S_{max} が増すにつれて一度減少し、その後大きくなる傾向があるが、これは、波力の絶対値は方向集中度が増すほど大きくなるが、無次元化する流速 $v_{1/3}$ の値が S_{max} が大きくなると小さくなるためである。以上の結果より、主波向き方向の波力は、流速 u が同一の条件では多方向性が強くなるほど増大するといえる。

多方向不規則波の場合、種々の方向から来襲する波が重合するため、波高は大きくなっても流速は互いに打ち消しあう場合もあるため、水粒子速度が波高に比例して増大するとは必ずしも言えない。したがって、同一の波高に対しては一方向不規則波に比べて多方向不規則波の

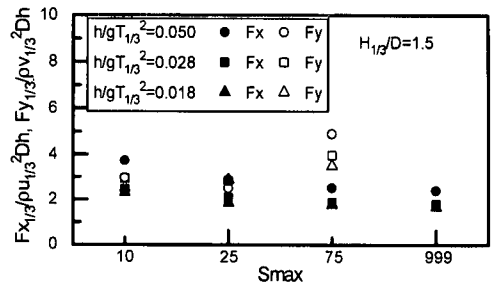


図-7 $Fx_{1/3}/\rho u_{1/3}^2 Dh$, $Fy_{1/3}/\rho v_{1/3}^2 Dh$ と S_{max} の関係

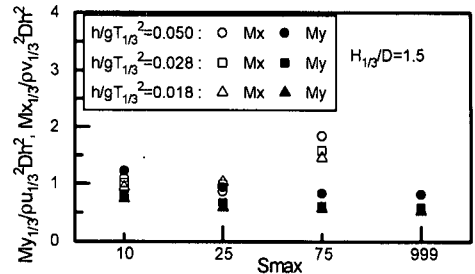


図-8 $Mx_{1/3}/\rho u_{1/3}^2 Dh^2$, $My_{1/3}/\rho v_{1/3}^2 Dh^2$ と S_{max} の関係

波力は小さくなり、図-2と3に例示したように、波高を使った無次元波力に対しては一方向不規則波より小さくなるが、波力の発生機構の面から言えば、特に多方向不規則波の場合、流速場と関連づけた解析が必要であることがここからも指摘できる。そして、このことは、多方向不規則波の水粒子速度場を正確に求めることの重要性を改めて示している。

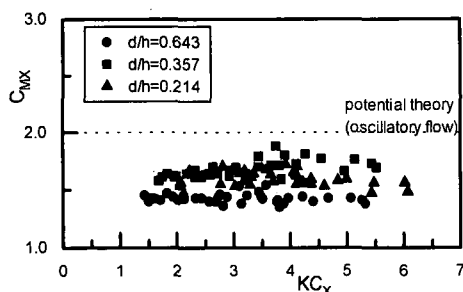
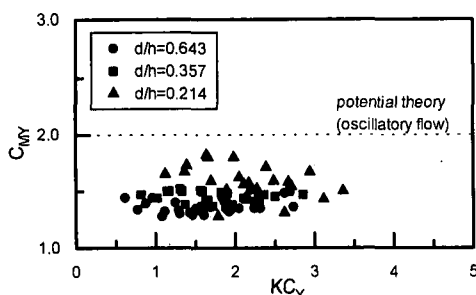
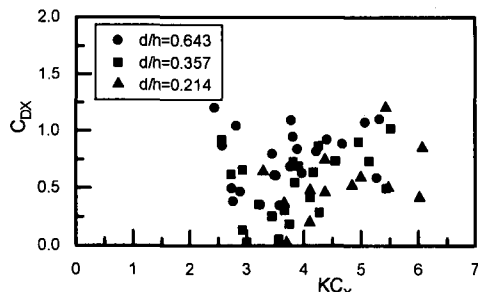
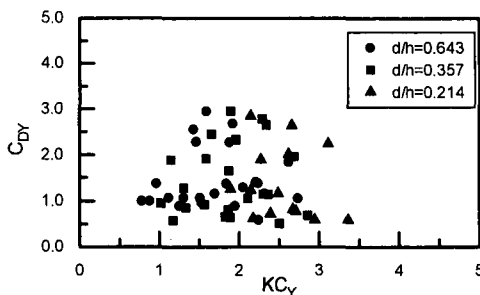
3.2 転倒モーメント

転倒モーメントの1/3最大値 ($Mx_{1/3}$, $My_{1/3}$) の無次元量 $Mx_{1/3}/\rho u_{1/3}^2 Dh^2$ と $My_{1/3}/\rho v_{1/3}^2 Dh^2$ の S_{max} にともなう変動特性を図-8に示す。 x 方向の水粒子の運動に強く支配される My に対する値は S_{max} の増加とともに減少し、その直交方向成分の Mx に対する値は $S_{max}=25$ で極小値をとるなど、図-7に示した全波力の特性とほぼ同様の結果が認められる。全波力に比べて、 $h/gT_{1/3}^2$ による差がより明瞭に現れることが予想されたが、 $h/gT_{1/3}^2$ による差も全波力と有意な差は認められない。この点については、更にデータの蓄積が必要である。

以上、部分波力と全波力、および転倒モーメントの極大波力について、1/3最大値を中心に論議したが、これらの結果は1/10最大値や平均値についても同様であったことを付記しておく。

4. 波力係数の特性

一つの時系列内で波力係数は一定であると仮定して求めた波力係数(手法I)の C_{MX} と C_{MY} は、図-9と10に示すように、 d/h によって若干変化するが、 C_{MX} の

図-9 C_{MX} と KC_X の関係図-10 C_{MY} と KC_Y の関係図-11 C_{DX} と KC_X の関係図-12 C_{DY} と KC_Y の関係

$KC_X (= u_{1/3} T_{1/3} / D)$ にともなう変化は小さい。 $d/h=0.643$ の場合、 C_{MX} は 1.5 より若干小さく、それ以外の d/h に対しては、 C_{MX} は 1.5 より若干大きい、いずれの場合も一様振動流場に対するポテンシャル理論による値 2.0 に比べて小さくなっている。一方、 C_{MY} も C_{MX} に比べてばらつきは大きい、 $KC_Y (= v_{1/3} T_{1/3} / D)$ による変化はほとんど無く、ほぼ 1.5 を中心に分布し、 d/h が小さくなると多少大きくなる。水平円柱が波動場に設置された場合、円柱表面に循環流が形成され、マグヌス効果により慣性力係数は小さくなることが報告されているが（例えば、新井ら、1994）、多方向不規則波動場でも水平面内に u と v の二つの流速成分が存在し、円柱周りに循環流が形成されている可能性は十分ある。加速度の方向と循環流の向きの関係を本研究では明確にはできなかったが、水平円柱の場合と同様、マグヌス効果に近い現象が本実験でも生じていた可能性もあり、その結果慣性力係数が小さくなったことが推察される。この点については、今後更に検討する必要がある。

一方、図-11 と 12 は x 方向の抗力係数 C_{DX} と KC_X 、および y 方向の抗力係数 C_{DY} と KC_Y の関係をそれぞれ示したものである。 x, y 両方向ともに抗力係数は慣性力係数よりもばらつきが大きく、明瞭な傾向を見出すのは困難であるが、 C_{DX} は 0~1.0 の間に大半が分布する。このばらつきの原因としては、慣性力が卓越していたため相対的に抗力係数に誤差が入り易いこと、直交方向成分の不規則な流れがあるため、渦の場や揚力が一方向流れ

の場合に比べて複雑であることが挙げられ、波の多方向性ととともに不規則性も波力係数のばらつきに寄与していることが考えられる。

なお、図-9~12 では、 S_{max} や $h/g T_{1/3}^2$ による有意な傾向を見出す事はできなかったため、記号の区別は行っていないが、更にデータを蓄積して S_{max} や $h/g T_{1/3}^2$ の効果について検討を加える必要があろう。

図-13 と 14 は、岩田ら（1989）が没水球体に対して行ったように、波の時系列による波力の差を検討するため、手法 II で定義した波別解析波毎の C_{MX} と C_{DX} の $KC_X (= u_m T / D)$ 、添字 m は波別解析波の最大値を示す）にともなう変化をそれぞれ例示したものである。なお、多方向不規則波の場では波高の増大・減少よりも流速の増大・減少の方が重要であると考え、 KC_X の増大・減少過程で記号を区別してある。 KC_X の小さい範囲は減少過程の値が多いためあまり明瞭ではないが、 KC_X が増大過程の波の C_{MX} は KC_X の減少過程の C_{MX} より大きくなる傾向が認められる。一方、 C_{DX} は KC_X の増大過程に対する値が減少過程に対する値よりも小さい。本研究では可視化実験を行っていないため剥離域を明確に与えることはできないが、抗力係数のこの傾向は没水球体の非剥離域での傾向と同様であり、慣性力係数の特性も同様である。すなわち、円柱の場合も波別解析波の波力は波の不規則性によって変化することが明らかである。したがって、既述した手法 I による波力係数のばらつきに対して、波の不規則性が影響を及ぼしている可能性のあることが

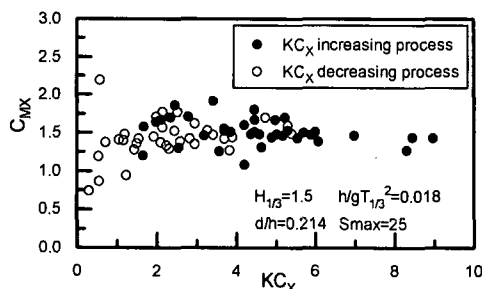


図-13 波別解析波の慣性力係数の特性

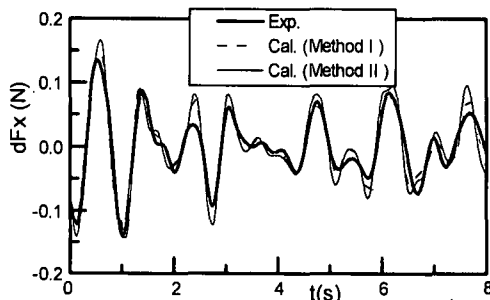


図-15 波力の計算値と実験値の比較

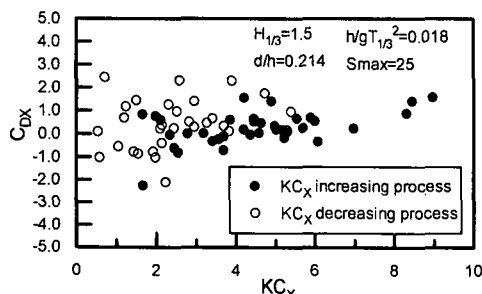


図-14 波別解析波の抗力係数の特性

指摘できる。ただし、本実験で行った実験ケースは限られており、波の不規則性が波力に及ぼす影響を定量的に評価するには至っていない。

5. 波力の予測手法

2種類の手法(手法I, 手法II)により得られた波力係数を使って計算した計算波力を実験で計測した波力と比較した例を図-15に示す。波別解析波毎に波力係数を決定している手法IIの方が特に極大・極小値の計算精度が手法Iに比べて向上しているものの、手法Iでも計算波力と実験値の一致度は悪くない。なお、図示していないが、両手法により計算した極大波力の1/3最大値を実験値と比較した結果、特に有意な差は認められなかった(藤岡, 1996)。したがって、現段階では手法Iにより1/3最大波力のような平均統計量の概略値の予測は可能であるといえる。ただし、本研究では、実験で計測した流速の時間変化を使用しているが、実際にはこの流速の時間変化も予測する必要がある、今後に残された大きな課題である。

6. 結 論

以上、本研究では、多方向不規則波動場中に設置された直立円柱に作用する部分波力、全波力および転倒モーメントについて水理実験結果に基づいて考究した。本研究で得られた主要な結論を要約すると以下のような

る。

- 1) 多方向不規則波動場では一方向不規則波の場合と異なり水位変動と主波向きの流速の時間変化の位相関係の相関が低くなるため、円柱に作用する波力を波高を使って無次元化した場合と流速を使って無次元化した場合では無次元最大波力の特性が異なる。
- 2) 波高で無次元化した x 方向(主波向の方向)の無次元最大波力は、従来の結果と同様、波の方向集中度が高くなるほど増大する。しかし、流速で無次元化した x 方向の無次元最大波力は波の方向集中度が低くなるほど大きくなり、逆に y 方向の無次元最大波力は小さくなる。すなわち、同じ流速の振幅に対しては、多方向性が強いほど主波向きの波力は大きくなり、その直交成分は小さくなるという新たな知見が得られた。これは、全波力、転倒モーメントともに共通の結果である。
- 3) 円柱に作用する部分波力の慣性力係数はKC数が変わっても大きく変化せず、1.3~1.8の範囲の値をとる。一方、抗力係数は慣性力係数に比べてKC数の変化に伴う変動が大きく、KC数の増加とともに増大し、0~1.5程度の範囲に分布する。

謝辞：本実験を行うにあたり、中部電力(株)および中電工事(株)の多くの方の協力を賜った。ここに記して関係各位に感謝の意を表する次第である。

参 考 文 献

- 新井信一・大島伸次・近藤圭央(1994): 規則波中水平柱状部材の低KC数領域での質量力減少と循環流, 海岸工学論文集, 第41巻, pp. 861-865.
- 岩田好一朗・水谷法美・都築克嘉(1989): 没水球体に作用する不規則波による波力の特性に関する研究, 土木学会論文集, 第405号/II-11, pp. 215-224.
- 平石哲也・富田康大・鈴木康正(1994): 円柱波力における波の多方向性の影響, 海岸工学論文集, 第41巻, pp. 836-840.
- 藤岡丈夫(1996): 小口徑円柱に作用する多方向不規則波による波力に関する実験的研究, 名古屋大学卒業論文, 20 p.