

現地観測方向スペクトルに基づく波向き出現特性とその表記

永井紀彦* ・橋本典明**・川口浩二***
横井博志****・久高将信*****

1. はじめに

近年、外洋に面した港湾が我が国沿岸で数多く建設されているが、これらの港湾では静穏度の確保が大きな問題となっている。この問題は、外洋ではうねりと風波が同時に来襲することが多い反面、港湾の計画や設計にあたっては、有義波高・有義波周期・平均波向きといった、数少ない波浪観測パラメータのみが使用されることに起因する。すなわち、平均波向き以外の方向から来襲する波のエネルギー成分は、港湾計画や設計の実務には十分に評価されていない。しかし、係留船舶や浮体の動揺は、来襲する不規則波の各方向スペクトル成分毎のエネルギーに大きく依存するため、船体や浮体の動揺予測を行うためには、より詳細な波浪情報が必要である。

近年、全国港湾海洋波浪情報網（ナウファス：NOW-PHAS: Nationwide Ocean Wave information network for Ports and Harbours）の開発と改良がめざましい成果を挙げ、波高計アレーによる観測や（永井ら，1994；清水ら，1996），単一の海底設置センサーで波の方向スペクトルの観測ができる海象計（橋本ら，1995）による観測が、全国に普及しつつあり、沿岸域の波浪の方向スペクトルの出現特性の解明が進んでいる。また、沿岸気象海象情報配信システム（COMEINS: Coastlly Oceanographic and MEteorological INformation System）の普及によって、沿岸域の開発・利用や防災にかかわる多くの技術者が、リアルタイムで波浪観測情報を入手・活用するようになっている（永井，1998）。

本研究は、ナウファスで得られた通年の方向スペクトル観測結果に基づき、多様な波浪の方向スペクトルの出現特性を明らかにするとともに、周期帯別の波高・波向を用いた複雑な波浪場の表記を試みたものである。

2. 検討対象波浪観測地点

図一1と表一1に示すように、太平洋北東岸のいわき沖

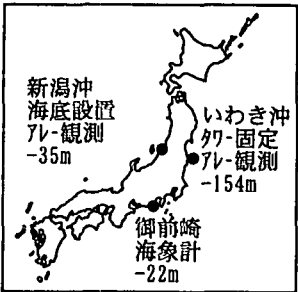
では1993年中、日本海沿岸の新潟沖では1995年中、太平洋沿岸の御前崎沖では1997年4月から1998年3月までの、比較的観測データの測得率が良好であったそれぞれ1年間を、検討対象期間とした。観測波形からの方向スペクトルの算定は、EMEP法（橋本ら，1993a）およびEMLM法（磯部ら，1984）で行った。各観測毎の方向スペクトルから、平均波向き、ピーク波向きなどの代表波向きをとりまとめるのと同時に、スペクトルの積分値から定義される周期帯毎の波高と平均波向を算定し、気象擾乱期間中および通年の出現特性を検討した。

3. 各観測地点の通年の波高・周期・波向き統計

季節および通年の平均有義波（波高・周期）を表一2に、検討対象期間中の高波を表一3に、それぞれ示す。（永井ら，1995）新潟沖では冬波が高く夏低い季節変動が顕著であるが、いわき沖や御前崎では季節変動はあまり大き

表一1 各観測地点における観測条件一覧表

	新潟沖	いわき沖	御前崎
北緯	38度0分7秒	37度17分49秒	34度37分5秒
東経	139度7分46秒	141度27分47秒	138度15分44秒
水深(m)	-35	-154	-22
観測方式	海底設置アレー	タワー固定アレー	海象計
データ内容	USW 3基 PUV 波向計	ステップ式4基 PUV 波向計	水位・水圧 斜め3成分流
解析法	EMEP	EMEP	EMLM
対象期間	1995. 1-12.	1993. 1-12.	1997. 4-98. 3.



図一1 観測地点位置図

* 正会員 工博 運輸省港湾技術研究所水工部海象調査研究室長
** 正会員 工博 運輸省港湾技術研究所海洋環境部水理研究室長
*** 正会員 工修 運輸省港湾技術研究所水工部海象調査研究室
**** 正会員 工修 (財)沿岸開発技術研究センター研究主幹
***** 正会員 (株)エコ部長・波浪情報室長

表-2 季別および通年の平均有義波

観測地点		春季	夏季	秋季	冬季	通年
新潟沖	$H_{1/3}$ (m)	0.77	0.40	1.20	1.82	1.01
	$T_{1/3}$ (s)	5.5	4.8	6.3	6.9	5.8
いわき沖	$H_{1/3}$ (m)	1.69	1.62	1.57	1.84	1.68
	$T_{1/3}$ (s)	7.6	7.3	7.4	7.6	7.5
御前崎	$H_{1/3}$ (m)	0.92	0.88	1.07	1.07	0.96
	$T_{1/3}$ (s)	6.2	6.5	7.6	7.1	6.7

表-3 検討対象期間中の高波一覧表

地点	順位	$H_{1/3}$ (m)	$T_{1/3}$ (s)	年月日時	要因
新潟沖	1位	5.91	10.5	95110822	冬型気圧配置
	2位	4.83	8.3	95013006	冬型気圧配置
	3位	4.73	9.9	95120620	日本海低気圧及び冬型気圧配置
	4位	4.61	9.4	95010114	冬型気圧配置
	5位	4.22	9.0	95011504	冬型気圧配置
いわき沖	1位	7.89	11.3	93082720	台風 9311 号
	2位	6.85	9.8	93111408	二つ玉低気圧
	3位	6.65	13.1	93030904	東方海上低気圧からのうねり
	4位	6.04	9.9	93032914	東方海上低気圧からのうねり
	5位	5.64	10.4	93011618	二つ玉低気圧及び冬型気圧配置
御前崎	1位	4.77	13.5	97072616	台風 9709 号
	2位	4.09	13.4	97090312	台風 9718 号
	3位	3.82	12.2	97091420	台風 9719, 20 号
	4位	3.69	11.5	97062016	台風 9707 号
	5位	3.56	13.2	97081506	台風 9713 号

くない。年間平均有義波高は、いわき沖、新潟沖、御前崎の順に大きい。年間上位 5 位の高波は、新潟沖ではすべて冬型低気圧、御前崎ではすべて台風によるものであったが、いわき沖では、要因が多様であった。

4. 方向スペクトルの出現特性

図-2 は、3 観測地点における夏季、冬季および通年の方向スペクトルの平均値を示したものであり、縦軸上と横軸上にはその積分値をあわせて示している。なお、積分値の縦軸と横軸の最大目盛は、もっとも波パワーの大きかった冬季の新潟沖の値で正規化している。

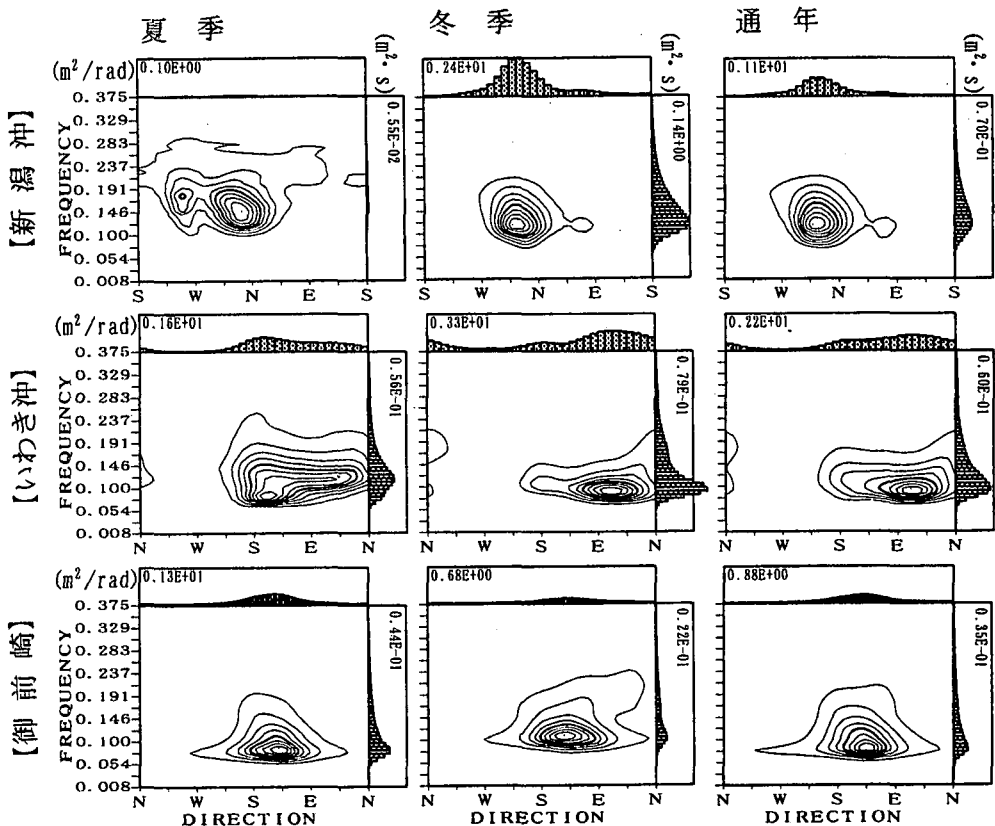


図-2 季別および通年の方向スペクトル

新潟沖では、夏季の波パワーが極めて低いため、通年平均スペクトルの形状は、冬季のものとよく似ている。来襲波浪は、N から WNW の方位にほぼ限られており、周期 8 秒 (0.125 Hz) 付近がピーク周期となり、周期 10 秒以上のパワーは比較的弱い、特徴が見られる。

いわき沖では、S から E を経て N に至る極めて広い範囲の方向から波浪が来襲しているが、夏季には S 系の、冬季には N 系の波パワーが相対的に高い。夏季・冬季・通年に共通して、周期 14 秒 (0.07 Hz) 付近に方向スペクトルのピークが見られるが、夏季には周期 8 秒 (0.125 Hz) 付近にももう一つのピークが見られる。

御前崎では、年間を通じて、来襲波浪のパワーは、S から E にかけてが相対的に高いが、特に冬季においては、E から N にかけての波パワーも無視はできない。

図-3 は、3 観測地点における高波浪時の方向スペクトルの例を示したものである。図の実線は方向スペクトルのモーメント平均値として定義される平均波向きを、破線は方向スペクトルのピーク波向きを、それぞれ示している。現状の波浪観測台帳では、多くの場合、平均波向きまたはピーク波向きを、波向きとしている。

新潟沖の 1995 年 11 月 8 日 12 時は、冬型気圧配置によって急激に波が発達した時であり、ゼロアップクロス法で求まる有義波高と周期は 5.3 m と 11.0 秒であった。NNW 方向の 12.5 秒 (0.08 Hz) の第 1 ピークに加えて、NW 方向の 8 秒 (0.125 Hz) の第 2 ピークが見られ、さらには、新潟東港からの反射波と推定される ENE 方向の弱い第 3 ピークが見られる。このため、平均波向きとピーク波向きは約 15 度異なっている。

いわき沖の 1993 年 11 月 14 日 4 時は、二つ玉低気圧によって波浪が発達している時であり、有義波高と周期は 4.7 m と 8.3 秒であった。スペクトル形状は、同じ SE からの周期 10 秒 (0.1 Hz) と 7 秒 (0.14 Hz) との、双峰型であった。この場合は、平均波向きとピーク波向きはほぼ一致しているが、有義波諸元だけでは、双峰型スペクトルの波浪の特性が十分には理解できない。

御前崎の 1998 年 1 月 9 日 2 時は、低気圧が本州の南海上を進んだ時であり、有義波高と周期は 2.8 m と 8.5 秒であった。スペクトルは、顕著な双峰型であり、S からの周期 10 秒 (0.1 Hz) の第 1 ピークと、NE からの 6 秒 (0.17 Hz) の第 2 ピークが見られる。この場合、平均波向きとピーク波向きは約 45 度異なっている。

このように、有義波高、有義波周期、および平均波向きまたはピーク波向きだけを記載した波浪観測台帳では、複雑な波浪場を十分に表現できないことがわかる。

5. 周期帯毎の波高・波向きの表記

(1) 周期帯毎の波高・波向きの表記法の提案

方向スペクトルは、波浪の場を正確に示すが、すべての分割成分の値を表示しなければならないため、数多くの数値を各観測時毎に表記しなければならない、時間的な変動を表現することがきわめて困難である。このため、波浪観測台帳に実務上記載可能な数少ないパラメータで、方向スペクトルを表現することが重要である。ここでは、周期 30 秒以上の長周期波成分の記載法 (永井ら, 1999) から類推した、周期帯毎のスペクトル積分値から求めた成分波高と波向きによる波浪場の表現を試みる。

周期帯の区分は、表-4 に示すように、実質的な周期帯の分割数を 4 段階とし、長周期側と短周期側と併せて 6 分割とした。0.5 秒間隔でサンプリングされた 2048 データを、FFT によって周波数スペクトル解析すると、1024 の周波数についてスペクトルパワーが出力される。この場合の各周波数は、 $n/1024$ (Hz) として示される。ここに、 n は 1 から 1024 までの整数である。ナウファスでは、周波数スペクトル計算結果は平滑化のため 8 周波数毎に平均して表示されるので、スペクトル演算結果として現れる周波数は、 $m/128$ (Hz) となる。表-4 の順位は、1 から 128 までの整数 m を示している。

最も長周期側の 30 秒以上の長周期成分の周期帯では、一般に波浪の非線形性が強く、方向スペクトルを算定する仮定となる線形波浪の分散方程式が必ずしも成り立た

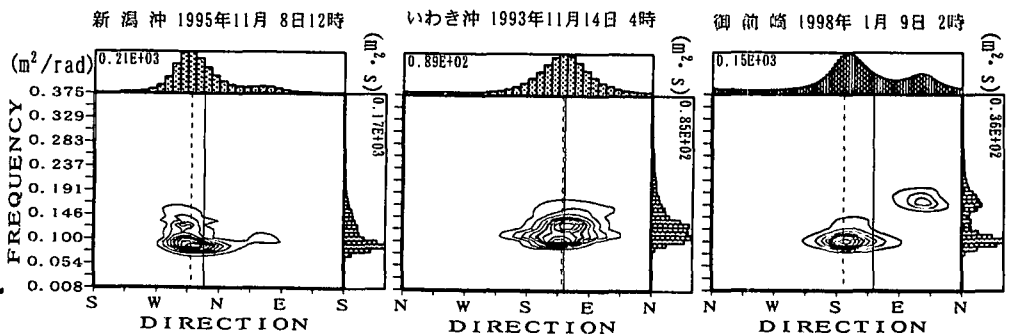


図-3 風場が変化する過程の方向スペクトルの例

表-4 周波数の区分と周期帯

区分	スペクトル 順位	対応周波数 (Hz)	対応周期 (s)
f1	1- 4	1/128- 4/128	32.0 以上
f2	5- 8	5/128- 8/128	25.6-16.0
f3	9- 12	9/128- 12/128	14.2-10.7
f4	13- 16	13/128- 16/128	9.8- 8.0
f5	17- 30	17/128- 30/128	7.5- 4.3
f6	31-128	31/128-128/128	4.1 以下

ないので、方向スペクトルの算定結果の信頼性は高いとは言えない(橋本ら(1993b))。また、最も短周期側の周期帯は、海象計による方向スペクトル算定が可能な波浪の限界周期をひとつのめやすとして設定された周期帯であり、やはり、方向スペクトルの算定結果の信頼性は高いとは言えない領域である。このため、実質的に活用を行う周期帯毎の平均波向としては、両端を除いた中間域の4領域ということになるが、これらの周期帯は、概ね、周期15秒、10秒、8秒という比較的区切りのよい周期で分割を行っている。

(2) 高波浪時における周期帯成分波の経時変化例

図-4は、図-3の方向スペクトルに示した観測時刻前後の高波浪時における周期帯成分波の経時変化を、周期帯毎の成分波高と成分波向きの変化で示したものである。ここに、成分波高とは、周期帯におけるスペクトルの積分値の平方根を4倍した値であり、成分波の有義波高に相当する。成分波向きとしては、周期帯内のスペクトルのモーメント平均をとった平均波向きとした。

各観測地点毎に、下段に有義波高と周期を、上段にベクトル表示した周期帯毎の成分波高と波向きを、それぞれ示しているが、各周期帯を追うことによって、風波と

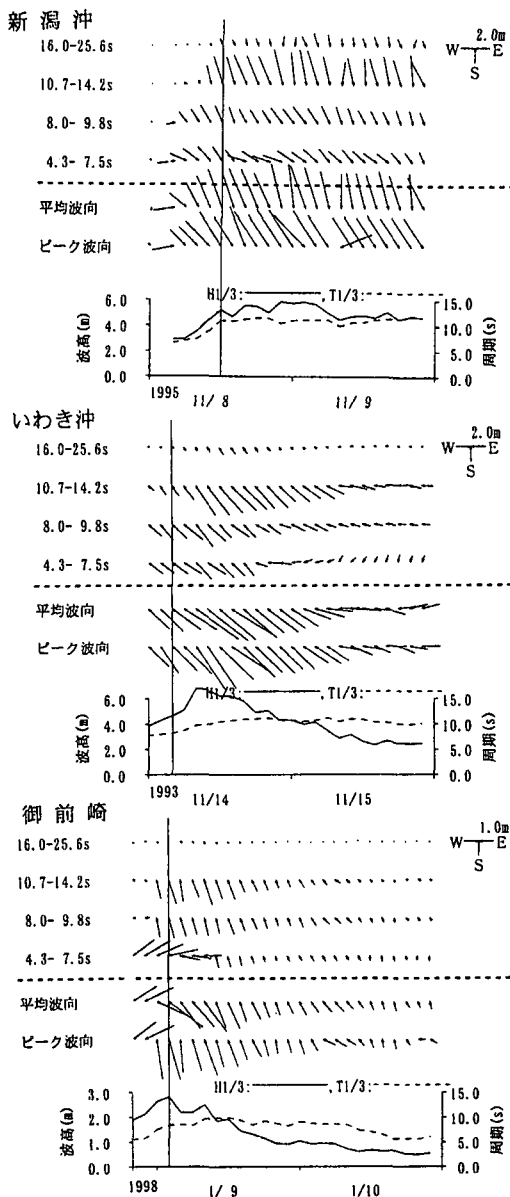


図-4 周期帯別の波高と波向きの経時変化例

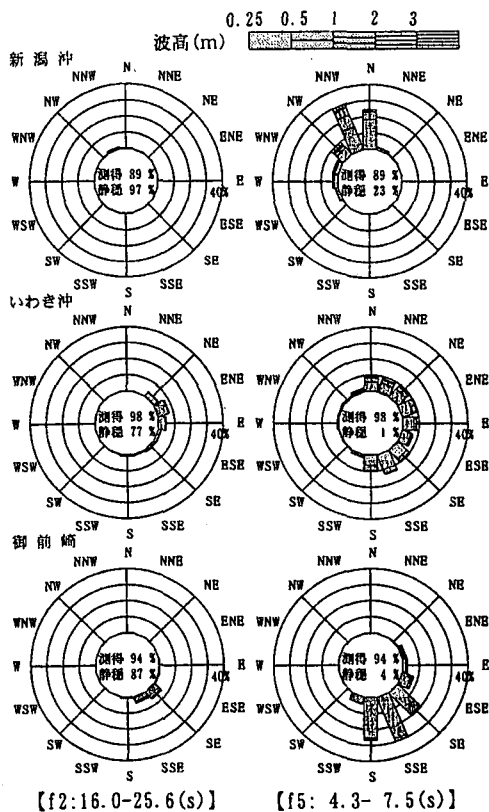


図-5 周期帯別の波向き分布図

表-5 全周期帯の波高の出現分布の比較

階 級	新 潟 沖		いわき沖		御 前 崎	
5.0 m 以上	10	0.3	39	0.9	0	0.0
4.0-5.0 m	26	0.7	63	1.4	5	0.1
3.0-4.0 m	111	2.8	201	4.6	42	1.0
2.0-3.0 m	381	9.7	770	17.7	230	5.6
1.0-2.0 m	947	24.0	2475	56.8	1036	25.0
0.5-1.0 m	943	23.9	798	18.3	2354	56.9
0.5 m 以下	1529	38.7	11	0.3	471	11.4
累 計	3947	100.0	4357	100.0	4138	100.0

表-6 長周期帯 f2 の波高の出現分布の比較

階 級	新 潟 沖		いわき沖		御 前 崎	
1.0 m 以上	25	0.6	94	2.2	174	4.2
0.50-1.0 m	11	0.3	283	6.6	164	4.0
0.25-0.5 m	43	1.1	567	13.3	181	4.4
0.25 m 以下	3809	98.0	3332	77.9	3619	87.5
累 計	3888	100.0	4276	100.0	4138	100.0

うねりの重なった波浪場の時間変化がよく理解できる。

(3) 周期帯成分波の出現統計

図-5 は、3 観測地点の通年の波向きの出現特性を示したものである。右の図は周期 16.0 秒から 25.6 秒までの長周期成分波 f2 であり、左の図は 4.3 秒から 7.5 秒までの短周期成分波 f5 である。各図の中央には、1 年間の 2 時間ごとの全 4380 観測中の、データ異常等による欠測を除いたデータの測得率と、成分波高 25 cm 以下として定義される静穏（成分波の波向き特定が困難）となった割合を、併せて表示している。

表-5 と表-6 は、それぞれ、波高と周期の結合出現度数と頻度を示したものであるが、前者は全周期帯を対象とした通常の波候統計であり、後者は長周期成分波 f2 に関するものである。

例えば、御前崎における波向きの出現を見ると、短周期成分波 f5 では、SE, SSE および S 方向の波の来襲が多く見られるが、長周期成分波 f2 では SE を中心として ESE から SSE 方向であり、16 方位にして 1 方位分 (22.5 度) 程度、方位がずれている。これは、周期の長い波ほど屈折の影響を強く受けるためである。

また、通年平均の有義波高では 3 観測地点中で御前崎が最も平均的には低波浪であるが、長周期成分波 f2 の波高が 1 m を超える観測事例数は、新潟沖で 25 観測、いわき沖で 94 観測、御前崎港沖で 174 観測あり、平均的には一番有義波高が低い御前崎港沖で、周期の長いうねりが最も多く来襲することも理解できる。

6. ま と め

本研究では、通常の有義波高や周期だけの統計では表現することができない、海域毎のうねり成分や風波成分毎の波浪の出現特性の相違を、周期帯毎の成分波の波高計と波向きを用いることによって、明快に記述できるこ

とを示した。波浪場を正確に表現する方向スペクトルは、情報量が多すぎるので、2 時間毎のすべての観測結果について確認することは容易ではない。ここで示した周期帯別の波向情報は、方向スペクトルを確認しなければならないケースを選択するためにも、非常に有効であるものと考えられる。

最後に、本研究の実施にあたり、合田良実博士を委員長とする（財）沿岸開発技術センターの海象観測情報の解析・活用等に関する研究会の皆様から、数多くの助言とご指導をいただいたことを述べ、謝意を表する。

参 考 文 献

- 磯部雅彦・近藤浩右・堀川清司 (1984): 方向スペクトルの推定における MLM の拡張, 第 31 回海岸工学講演会論文集, pp. 173-177.
- 清水勝義・永井紀彦・橋本典明 (1996): 沖波の方向スペクトルの出現特性 (第 2 報) - いわき沖における 7 か年方向スペクトル統計-, 港研報告第 35 巻, 第 1 号, pp. 65-89.
- 永井紀彦・橋本典明・浅井 正 (1994): 島による遮蔽を受ける海洋波の方向スペクトルの出現特性-新潟沖の観測結果-, 港湾技術資料 No. 783, 21 p.
- 永井紀彦・清水勝義・菅原一晃・橋本典明 (1995): 全国港湾海洋波浪観測年報 (NOWPHAS 1993), 港研資料 No. 796, 309 p. (1995 年版, 1997 年版, 1998 年版的各年報は, それぞれ, 港研資料 No. 859, 926, 951)
- 永井紀彦 (1998): ナウファス (全国港湾海洋波浪情報網) の現状と今後の課題, 土木学会論文集 (技術展望), 第 609 号 VI-41, pp. 1-14.
- 永井紀彦・橋本典明・川口浩二・大山洋志・岩崎幸夫 (1999): 連続観測システムの構築によるネットワーク沖合長周期波観測, 海岸工学論文集, 第 46 巻, pp. 1311-1315.
- 橋本典明・永井紀彦・浅井 正・菅原一晃・久高将信・小野修平 (1993a): 方向スペクトルの推定における最大エントロピー原理法 (MEP) の拡張, 海岸工学論文集, 第 40 巻, pp. 136-140.
- 橋本典明・永井紀彦・浅井 正・菅原一晃・朴 慶寿 (1993b): 波浪の多方向性と弱非線形性を考慮した水圧波から表面波への換算法について, 港研報告第 32 巻, 第 1 号, pp. 27-51.
- 橋本典明・永井紀彦・高山知司・高橋智昭・三井正雄・磯部憲雄・鈴木敏夫 (1995): 水中超音波のドップラー効果を応用した海象計の開発, 海岸工学論文集, 第 42 巻, 土木学会, pp. 1081-1085.