

第一章：波向計測研究の背景

1. 日本と海洋

海洋は地球の表面積の約7割を占める。海洋国 日本は、四方を総延長が 34,386 km にもおよぶ海岸線（1989 年に調査した時の値）に囲まれている。それだけに入々の「海洋」とのかかわりの歴史は古く、縄文時代にはもうすでに「海洋」を利用して、いろいろな物が運ばれていた、といわれている。海のことについて、いくつかの述語を下記のように紹介する。

Wave 波浪：風波とうねり

波浪の源は、はるか外洋で風によって作られる風波である。おもに 風によって起こされる。よって波は風上からくるともいえる。しかし、海の上にはあちこちで風が吹いており、実際の波浪は長さも高さも違うさまざまな波が合わさったものである。まず風によって小さなさざなみができる、これらの小さな波が合わさって、風域を出てからうねりとしてまとまり、そのうねりが岸に打ち寄せ、浅瀬にぶつかって砕ける。一度引き起こされた波は、水の粒の運動として周りへ伝わるので、そこに風がなくても伝わってくる波もある。土用波というのは、はるか南方の海に発生した台風でできた波が、何千キロもはなれた日本へ伝わってきたものである。このような波をうねりと言う。これに対して直接風によってできた波を風波と呼ぶ。うねりが入ってくる方向も、波が発生する場所によって変わるし、海底の地形によっても波の形状、サイズ、そしてうねりの方向が微妙に変化する。

Tide 潮：

海には潮の干満がある。これは地球と月と太陽の引力によっておこる自然現象である。それぞれの惑星の持つ引力が地球の表面を覆っている海水に微妙に影響する。つまり引力により海面が膨れ上がる部分と、反対に海水が少なくなる部分ができるが、それがいわゆる潮の満ち干きである。月と太陽と地球が一直線に並んだとき、潮に影響する起潮力という力が最大限に働き、海面は大きく盛り上がる。これが大潮である。反対にこの起潮力が直角に働く時、干満の差はもっとも小さく、小潮となる。潮の状況は月を見ればわかるが、満月や新月の時は大塩、下弦・上弦の月のときは小潮となる。1カ月単位で考えれば大潮の時がある。一日単位で考えれば、もっとも潮の動く時、つまり干きはじめと満ちはじめに波が大きくなることがある。



東京湾の静かな波の風景



湾岸へ向いている波の様子



外洋の渦巻き波の様子



本学の室内実験水槽で発生した規則波

Wind 風：

風は空気の移動によって起こるものである。空気は暖まると膨張して上昇し、冷えると縮んで下降する。気圧の変化によりこうした現象が起こるが、そのバランスをとるため、空気が動く。この動きが、風である。風は波を作り、さらに波が砕ける状況にも大きく影響する。波に対して

岸から沖に向かって吹く風をオフショア、反対に沖から岸に吹く風をオンショアと言う。このオンショアが波を作るが、強く吹きすぎると、波面はぐちゃぐちゃなチョッピー状態になる。逆にほどよいオフショアが吹くと、オンショアで乱れた波の面を整えてくれて、波面がきれいな波を作ってくれるというわけである。 オンショアが大きく吹いて波が上がったあと、風がオフショアに変わる時期である。

Weather 天気：

波が起きる原因として天気が大きな影響を持っている。つまり天気図を読むことで、ある程度は波の有無が判断できる。最も波が上がるのが台風のときである。天気図に書かれている等圧線を見て、その等圧線の幅が狭ければ狭いほど急激に気圧が変化していることを示している。つまり、風が強いという。日本の場合は、一般に台風が北緯20度線を越えて北上したら、太平洋岸にうねりが入るといわれている。また日本海側の場合、冬の典型的な気圧配置、西高東低になったあとに波が上がりやすくなる。

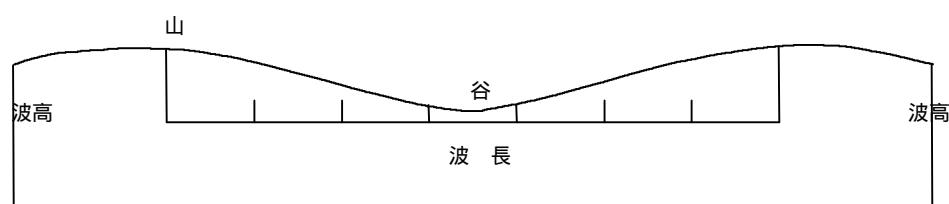
Current カレント(流れ)：

海には常に流れが生じている。岸から沖への流れをリップカレントという。カレントを見つける方法として、まず、他では波が割れているのに、そこだけ波がわれていないところ。また、沖に向かって海底の砂が巻き上げられて、そこだけ色がかわっているところ。同じように漂流物や泡が沖に向かって流れているところ。さらに、砂浜が一部低くなっていて、海に向かって緩やかになっているところの延長線上にこのリップカレントがあるという。

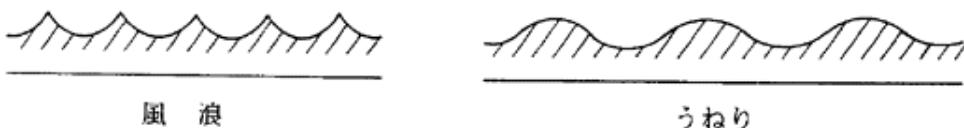
2 . 波浪の基本

波長と波高：

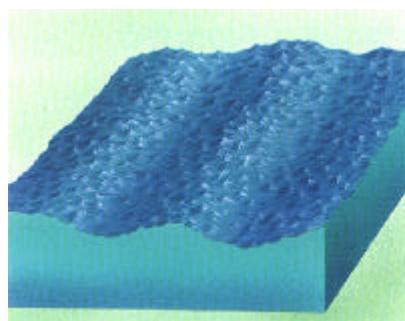
下図示すように、波の山から山の長さを波長、谷から山の高さを波高とよびます。風が強くなると波高も高くなりますが、波高が波長の7分の1以上になると山がくずれ、白波ができます。風速が大きいほど、風域(吹送距離：風からエネルギーを受ける領域)が長いほど、風の継続時間が大きいほど、大きな波が発生する。しかし、ある時間以上吹き続けても、風域の大きさで決まるある限界値以上の波高にはならない。風域を離脱し、風からエネルギーの供給を受けずに伝播する波をうねりである。



波のエネルギープロセス：風 水面へのエネルギーの移行 風波の発達 風波（エネルギー）の伝播 変形（エネルギーの保存と逸散） 海岸への遡上（岸からの反射）。上図は波の周期とその外力・復元力を示す。強風域の中で、その強風によって起こされた波を「風浪」と呼び、発生域の外に伝播して行って「うねり」に変化する。風浪は、個々の波が鋭い頂きをもった山脈と似た形をしている。頂きの長さ（尾根）は、それほど長くなく、頂きと頂きとの距離の2~3倍しかない。個々の波は全てが同じ方向に並んでいるわけでもなく、不規則である。現在通過しつつある波の次に、どのような波が来るか予測することはできない。一方、「うねり」は低くて丸い頂きを持っている。頂きの長さはかなり長く、少なくとも頂きと頂きとの距離の6~7倍はある。「うねり」はかなり規則的で、高い波の次には高い波が続き、5~6個同じ程度の波が連続する。したがって、「うねり」は短時間内では予測が可能であるが、長時間にわたっては風浪と同様に予測が不可能である。



実際の波は、高さや形や向きのちがうさまざまな波が一緒に合わさって、伝わって行く。



波の伝わり方・進み方：

波が進むのを見ると、波と一緒に水も進むように見えるが、うきをうかべて観察すると、うきはほんのわずかしか進んでいないことが分かる。水の粒の動きもうきと同じである。



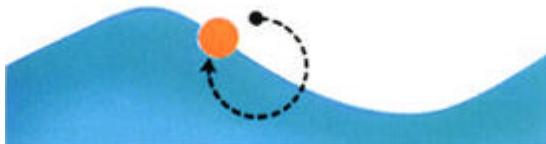
1. 波の山にあるうき



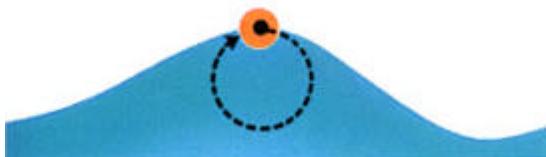
2. 波とともに前へ進む。



3. 円をえがいて下がる。



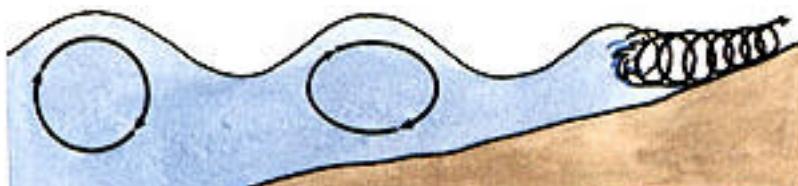
4. もとへもどる。



5. もとの位置からわずかに前へ進んでいる。

海岸で砕ける波：

陸地にとどいた波は、海岸の地形によって変化を受け、くずれて行く。波には大きな力があり、その力は海岸に全部たたきつけられる。そのため陸地はけずられたり、運ばれてきた石や砂がたまつたりする。波が岸に近づくと、それまで円の形で動いていた水の粒は、下の地形によって、橢円形につぶされ、最後には地形にそって水がかけ上がる流れとなる。力がつくると、今度は地形のかたむきによって、反対の力を受けて海へ戻る。

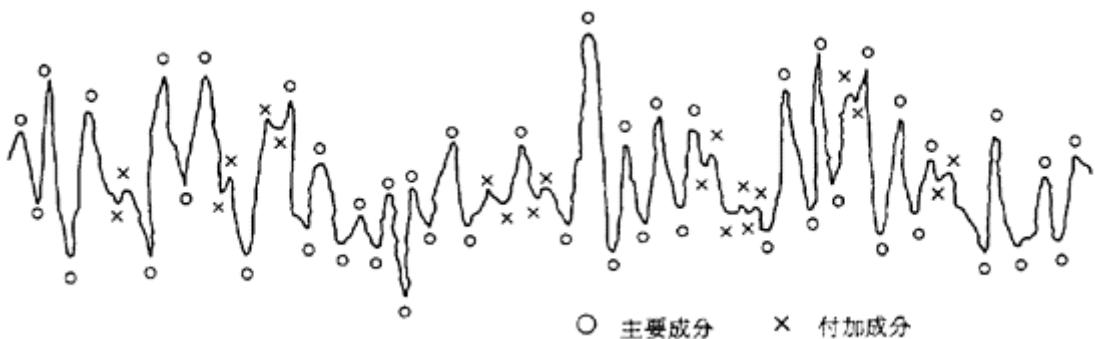
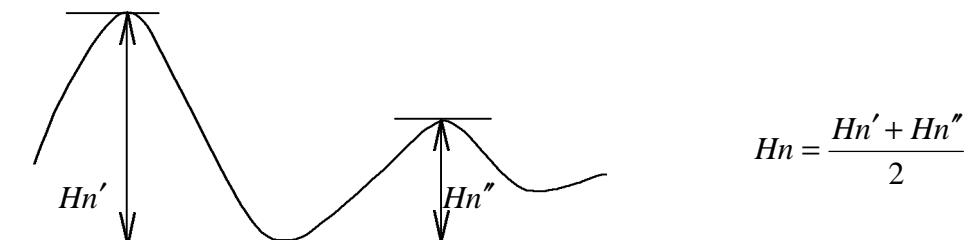


波のパラメーター（波高）の分布：

一般的の海洋波では、波高 H の統計的分布は、レイリー分布に近い。波高 H の統計的分布がレイリー分布で与えられる場合には、 $1/n$ 最大波及び最高波を理論的に求めることができる。 $1/n$ 最大波高 $H_{1/n}$ は、一連の数多くの波の中で波高の大きい方から全体の波の個数 $1/n$ だけを選び出して、それらの波高を平均した値を意味する。 $1/3$ 最大波高を有する仮想的な波は有義波と呼ばれ、船乗りが海面を観察し、その海面の波高として報告する値に近く、その海面における基本的な波高と言われている。平均波高 \bar{H} 、有義波高 $H_{1/3}$ 及び $1/10$ 最大波高がパラメーターとしてよく使う。また、 N 波中の最大波高 H_{\max} と有義波 $H_{1/3}$ の間には下記の関係がある。

N	50	100	200	500	1000	10000
$H_{\max} / H_{1/3}$	1.42	1.53	1.64	1.77	1.86	2.15

海上にある1点において、水面の高さを連続記録して作成した曲線から波高を取るには、次の法則による。波高は相隣る波の山の高さを、その間の波の谷から測った値の平均とする。記録曲線は図に示すように、主要波成分に高周波付加成分が重なった形となっているが、主要波成分のみを探って波高分布とする。このようにして得た $H_{1/3}$ が船乗の観測する有義波高に相当する。



高周波成分まで全ての極大極小を探った場合、 $H_{1/10}$ がほぼ有義波高に相当する。波高観測には平均水面を下方に向って切ってから次に平均水面を上方に切るまでの最低点から、平均水面を上方に切ってから次に平均水面を下方に切るまでの間の最高点までを波高とする方法がある。この場合は実質上、うねり成分に相当する。

深海波：

一般に海の深さが波長の $1/2$ よりも大きい場合、その波を深海波といい、海底の影響を受けないと考えられている。この場合、波の伝播速度 C 、周期 T_w は

$$C = \frac{g}{2\pi} L_w = 1.249 L_w \quad (\text{m/sec}) \quad (1)$$

$$T_w = \frac{2\pi}{g} L_w = 0.801 L_w \quad (\text{sec}) \quad (2)$$

ここで、 L_w = 波長 (m)、 g = 重力の加速度 (m/sec^2) である。不規則波については、見掛けの波長と見掛けの周期との間に、この式を適用することはできない。この場合は、十分に発達した波に対し見掛けの平均周期長と、見掛けの平均波長 L_w との間には次の関係が成立する。

$$L_w = \frac{2}{3} \cdot \frac{g}{2\pi} \cdot T_w^2 = 1.04 T_w^2 \quad (3)$$

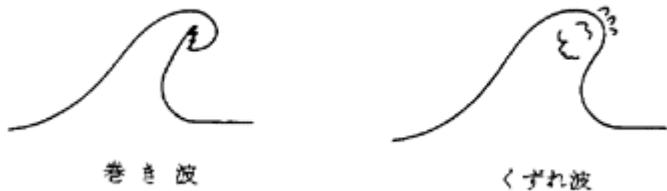
浅海波：

海の深さが波長に比べて十分に深くない場合は、波の伝播速度が変化するばかりでなく、波の発生及び衰弱もまた海底の影響を受ける。水深が波長の $1/2$ より浅い海域（浅海域）に波が入ると、波の速度が遅くなるとともに、波の頂きの高さは高くなる。浅海域を通り越した波は再び元の速度を取り戻す。遠浅の海岸に近づいた波は岸に近い部分が減速され、方向を変えながら岸に向かう。海岸線に達する時には海岸線に平行な形に極めて近くなっている。水深が波長の $1/25$ より小さくなると長波（極浅水波）とみなせ、波の伝播速度 C 、周期 T_w はそれぞれ

$$C = gh \quad (\text{m/sec}) \quad (4)$$

$$T_w = \frac{L_w}{gh} \quad (\text{sec}) \quad (5)$$

で求められる。ここで、 h = 水深（m）、 L_w = 波長（m）、 g : 重力の加速度（m/sec²）である。潮流のある海面や河口等のように流れのある所では、その流速に相当する波の速度は増減し、波高もそれに応じて変化する。引潮の時の河口で極めて高い碎波（巻き波及びくずれ波）が発生するのはこのためである。



風浪と吹送距離、吹続時間との関係：

海面における風速、風が吹いてきた距離（吹送距離）、風の吹き続けた時間（吹続時間）と風浪との関係には二つの基本的なケースがある。一つは無限の吹送距離上の風浪の発生するケースで、この場合には波が時間の経過とともに発達する。したがって、波の特性は吹送時間と風速によって定まる。もう一つは、波が定常状態に発達するが、吹送距離に制限のあるケースである。この場合の波の特性は、吹送距離と風速によって定まる。船が出会う波は、これら二つの基本的なケースとその中間のケースの波であるが、前に吹いた風によって起きた古い波の上に、新しく局地的な風が吹き始める場合は多い。例えば、大洋の広い範囲に吹いていた風が、天気の変化のために風速と風向を変える。風向が反対となれば新しく発生した風は古い波を破壊し、あるいは、その一部を破壊して新しい波を生成する。

波高・波長比（波傾斜 Wave steepness）：

風が吹き始めると波高と波長の比は急激に大きくなり、短い時間で最大の比となる。以後は、波高、波長とも増大するが、その比は段々と低下する。したがって、風上の波は陥しく、発達した波は緩やかとなる。言換えると、波長の短い波ほどその比は大きくなる。風速は波高・波長比との間には余り関係はない。波の波高・波長比が $1/7$ で碎けるが、これは波の立ち始めの観測結

果とよく一致している。また、波の若さ（波令 Wave age：波の速さ/風速）と波高・波長比（波傾斜 Wave steepness）との間に密接な関係がある。すなわち、波が起き始めてから波令 0.4 くらいまでは波の傾斜は次第に急になり、波令 0.4 で傾斜は 10% と最大になり以後は次第に緩やかになって行く。

波浪応答：

船舶が波浪中を前進する時、波との出会いによってピッキング運動を起こす。船舶にはピッキングの固有周期があり、波との出会い周期が固有周期と一致すると同調して発達したピッキングを生じ、スラミングを発生する。スラミングとは、通常は滑らかに変化している船体のピッキング運動が、水面衝撃によって不連続な運動となる現象で、水によって上向きの槌打ちを受けるものである。一般の船舶が規則波と出会うとき、波との出会い周期 T_e が、船の固有ピッキング周期 TP より大きいときには、船は出会い周期で強制ピッキングを行い、出会い周期の方が小さいときには船の慣性力が大きいので固有周期でピッキングをする。また、不規則波中では固有周期でピッキングをしている場合が多いと考えられている。

3 . 波浪情報の重役

船舶の運行安全：

海域を通行する船舶は、海底地形、潮流、風波等が相互に作用し合う複雑な状況を解読しながら航行しなければならない。乗員と積み荷の安全は海洋波浪と関わっている。洋上行動する船舶の受ける波浪外力はきわめて複雑であり、今日でもまだ解明の不十分な点が多く残っている。操船者は技術的に波を見て増減速によって強い波浪衝撃を避け、船体に無理をさせないようにしながら、安全運行しなければならない。運航中に波浪が高くなつて大きな衝撃を受けるようになれば、速力を落とし、コースを変更して運航限界を守る。

(1 .) 三角波：

波浪の種類が様々で中には三角波と呼ばれる脅威的な波がある。いろいろな方向からの波が重なり合って大きな三角形の形をした波となることがあり、これを三角波と言う。この三角波は突然現れるため予測がつかないことが多く、しかも、下から突き上げられるように現れるため非常に危険な波であり、古くからこの三角波で多数の船が沈没している。河口、湾口や水路の合流箇所などは三角波が発生し易い場所である。

(2 .) 3 大 8 小 (波浪の周期)

横波が船にとって極めて危険である。しかし、どうしても横波を受けなければならぬことがある。それは旋回などする時である。このときの旋回のタイミングというものが非常に大切です。波は風によりある程度影響されるが、おおむね規則的な運動をしており船乗りの言葉として「3大8小」というものがある。それは、小さい波が8回続くとついで大きな波が3回訪れ、このサイクルを延々と繰り返している。9th wave (9 番目の波) とは大波のことを意味し、旋回するときなどは極めて重要な情報の一つである。通常は 9th wave のときに残る 2 つの大波を認識し、最後の 11th wave の波頭で残る大波がないかを十分に確認ののち、旋回運動に入る。

船舶の設計及び防波堤建設：

船舶の設計に当たり、波浪外力を考えねばならない。使用海域に発生し得る最大の暴風浪にも耐えて、所要の速力を発揮できる船が経済的に成立しないものとすれば、その船の受ける最大の波浪外力は、その船に乗っている人間の生理的、心理的に耐える衝撃の限界によって決まると言えよう。訓練された乗員のみによって運航される船ではそれ相当の大きな衝撃を、不特定の乗客を運ぶ客船や交通艇の類は一般の人々の耐える限界をもって、その構造設計の基礎としなければならない。シェルターから遠く行動する船舶の設計にあたっては特に慎重に波浪外力を決定しなければならない。湾岸利用の防波堤建設にも同様である。

魚撈作業の漁場選択及び漁業人工養殖：

漁業関係にすると、底びき網、定置網、人工養殖漁業などもすべて、波浪情報と緊密関わっている。

海洋エネルギーの利用：

海洋エネルギーは、波力や潮汐、潮流、海流といった力学的なエネルギー、海洋濃度差、温度差のような熱エネルギーなど、さまざまな「形」で存在する。しかし、エネルギー密度が低いため、効率的にエネルギーを取り出すために、現在もさまざまな技術開発が進められている。また発電コストも割高になるため、経済性が課題になっている。太陽や風力なども自然のエネルギーで、自然エネルギーは再生可能でクリーンなエネルギーである。近代日本国家の基盤を支えてきた港湾、今後に沿岸海域の開発（海上空港や長大橋を含む）海洋エネルギーの利用なども期待されている。主に海洋エネルギーの発電方式には、海洋温度差発電、波力発電、潮汐潮流海流など発電がある。

（1）潮汐発電：

潮汐発電は潮汐現象（潮の干満）による海水の流れのエネルギーを発電に利用する一種の水力発電方式です。すでにフランスでは 24 万 kW、中国では 6,000 kW の発電所が稼働しているが、日本の近海は潮位差が少ないため、実用化にはなお課題が残されている。潮汐には月や太陽などの引力によって、普通 1 日にほぼ 2 回の干満のあることはよく知られている。潮汐の大きさ（潮位差）はどこでも一定というわけではない。それは地球の自転や海底地形の影響を受けるためである。潮汐発電は大体湾を堤防で締め切って、湾の内側と外側の落差の大きい時間帯にその落差を利用して発電を行う。



ランスの潮汐発電所（フランス）La Rance

上図はランスの潮汐発電所である。フランスの北西部、ブルターニュ地方のランス川の河口にある。出力 24 万 kW は、海洋エネルギーを利用した発電所として、世界最大の規模を誇るものである。付近の潮位差は平均で 8 m もあり、潮汐発電の条件に恵まれている、堤防は道路橋としても利用されている。その他、潮汐のエネルギーに恵まれたカナダ、中国、韓国、ロシア、オーストラリアなどに潮汐発電のパイロットプラントも建設されている。

（2）潮流発電：

潮流とは、潮汐現象による流れのことである。日本には流れの速い「瀬戸」や「海峡」と呼ばれるところが沢山ある。潮位差はあまり大きくなくても、海底地形が狭まっているところではエネルギーが集約されている。



徳島大学による鳴門海峡で行った潮流発電の実験

鳴門はうず潮でも有名なところである。上図は徳島大学による鳴門大橋工事用桟橋に固定して潮流発電実験を行う風景である。

（3）海流発電：

海流の流れを利用するのが海流発電である。潮流は潮汐による流れのため、流れる向きが一日に約 4 回変わるのでに対し、海流は地球規模の流れで、年間を通じて流れる方向は一定である。しかし海流は比較的陸地から遠いところを流れているため、その利用方法が難しいのである。

（4）海洋温度差発電：

海洋表層の温水（例えば 25~30 度）と、500~1,000m 程度の深海の冷水（5~7 度）の温度差を利用して蒸気をつくり、タービンを回す発電方式である。フロンやアンモニアなど低沸点の媒体を気化して循環させる「クローズサイクル」と、温水そのものを気化し深海で淡水に還元する「オープンサイクル」の 2 つの方法がある。海水の温度を調べてみると、太陽の熱によって海の表面付近は暖められているが、海の深いところ（深さ数百mのところ）までは太陽の熱が伝わらず、温度は年間を通してほぼ一定である。海洋温度差発電は、海の海面付近の暖かい海水と、深いところの冷たい海水との「温度の差」を利用して発電する。フロンやアンモニアといった気化しやすい作動媒体を熱の交換に用いる。暖かい海水で蒸発させタービンを回す。そして冷たい海水で作動媒体をもとの状態に戻してやる、これが原理の概略である。洋上プラントは取水管の

長さが短くてすみ、また用地の確保も不要ですが、これに対して、陸上プラントは海底の地形に沿って取水管を設置しなくてはならないため、その長さは長くなつて、経済性を確保するためには急な海底斜面の場所が必要である。



ナウル島の温度差発電実験プラント

ナウル共和国は赤道に近い国で、海洋表面付近の温度は約30度と高く、また海底地形は急（約40度）という恵まれた条件のもとで、東京電力、東電設計による海洋温度差発電実験が行われた。上図はその実験の様子である。

（5.）波力発電：

波のエネルギーは、場所によってその特性が異なる。また時間によって、日や月、季節によつてもその大きさが変化することはよく知られている。例えば日本海側では、冬の季節風による波が高く、逆に夏期は比較的穏やかなことが多いのである。これに対して、太平洋側は台風の時期を除けば、季節的な変動は少ないといえる。静穏な海が、何日も続くことはあまりなく、一年を通じて、1～2m程度の波が押し寄せことが多いのである。波力発電の方式は大きく分けて1次変換（先ずどういったエネルギーに変換するか）によって3種類に分類することが出来る。

1. 空気エネルギーに変換する：

波による海面の上下動で押し出される空気によってタービンを回す発電方式である。浮体式振動水中型、沿岸固定式、振子式といった多くのエネルギー変換装置の開発が進められている。また小規模なものはすでに航路標識ブイの移動電源として実用化されており、今現在日本国内で約1,000基の実績がある。



海洋科学技術センターによる「海明」波力発電システム

上図は海洋科学技術センター(JAMSTEC)による「海明」という名前の浮体構造物波力発電システムである。海洋科学技術センターが「海明」という名前の浮体構造物で、波力発電を実験した。「海明」で複数個空気室が設けられている。構造物の底部は開いていて、空気室内の水面が上下することによって、上部に取り付けられた空気タービンを回しエネルギーを取り出します。

2.) 機械的なエネルギーに変換する:



「振り子式波力発電システム」

上図は室蘭工業大学と日立造船(株)による北海道留萌郡増毛町の増毛港の堤防に設けられた波力発電装置である。波エネルギーを受圧板の振り子運動として捕らえ、油圧に変換する。いわば「波のプール」の造波装置の逆の原理で電力に変換する方式である。

3.) 水の位置エネルギーまたは水流エネルギーに変換する:

波によって打ち寄せられる水塊を構造物の斜面に沿って遡上（斜面に沿ってのぼること）そして越波させ、背後の池に貯留します。そして池の水面と海水面との水位の差を利用して低落差用水車タービンを回すというのが、その原理である。



「タップチャン : TAPCHAN : Taped Channel Power Plant」

上図はノルウェーにある波力発電の実証プラントである。ベルゲンの西北西約 20km、北海に面した Tof testallan という岩礁地帯に建設され、1986 年に完成している。収斂形状で波を集めている。図でわかるように、収斂する先の方向が一方向に曲がっている。これは構造物の斜面や側壁の受ける波の衝撃力を少なくするとともに、越波する海水の量を増やす効果がある。背後

の池の面積は約 8500 m²あって、水面は海面よりも 3 ~ 8 m 高く、落差 3 m で水量 14 ~ 16m³ / s の低落差用力プラン水車が用いられ、定格出力 350 kW の波力発電が行われている。

(6 .) 濃度差発電 :

濃度差発電も一種の海洋エネルギー利用の発電方式である。エネルギー資源量は大きいのですが、技術的な課題が多く残っている。

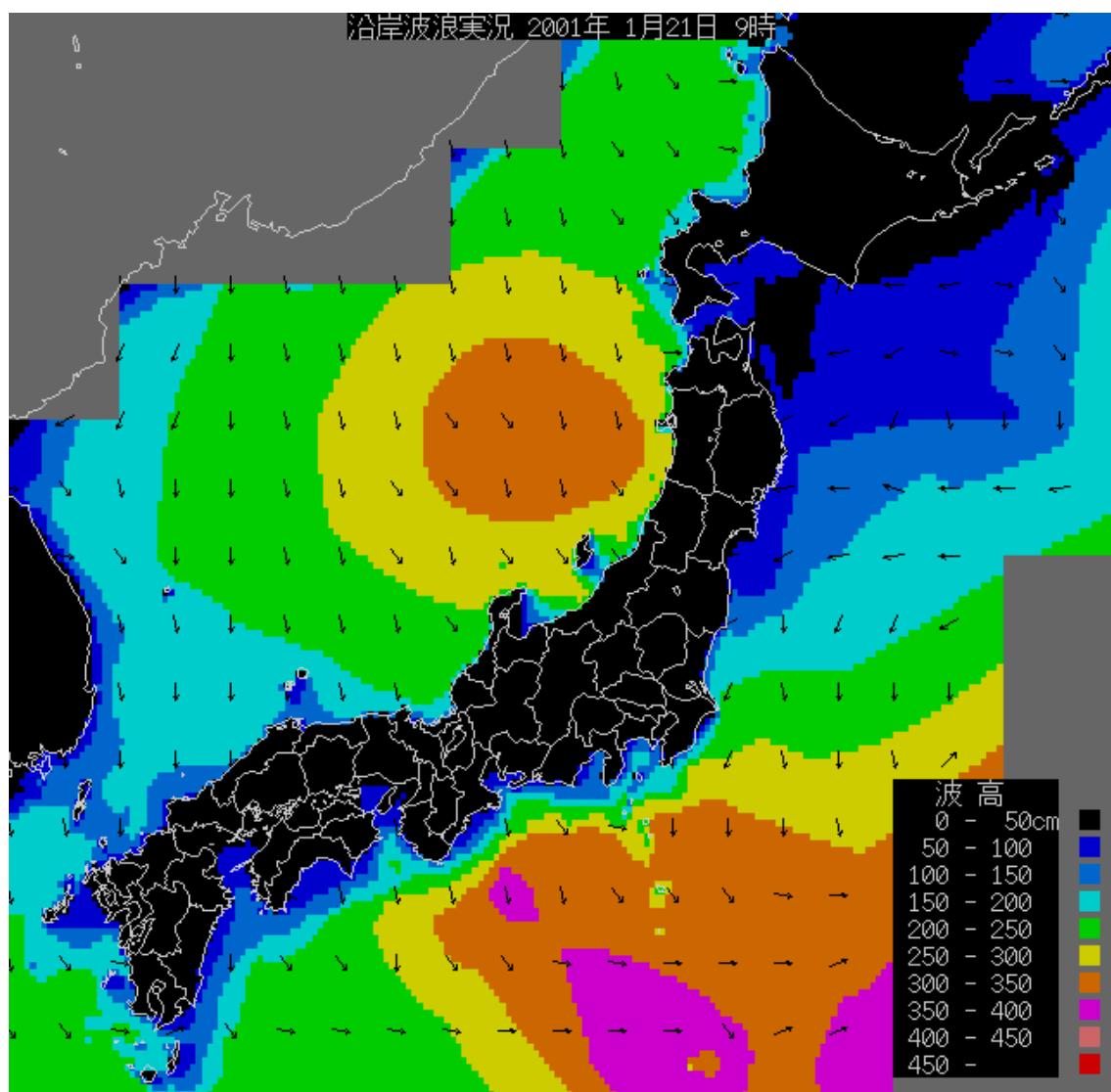
地震、台風、地球環境解析 :

地震活動は、太平洋を取り巻く環太平洋地震帯に圧倒的に集中している。また、中国・ビルマ国境から中央アジアを経て南ヨーロッパに至る地域も、世界有数の地震多発地帯である。近年、社会活動に影響を与える年々の変動が著しい気象が現れている。例えば 1993 年の夏、日本の東北地方は異常な低温にみまわれ、農作物は大きな被害を受けた。翌年の 1994 年夏は前年と打って変わって日本全国的に猛暑となり、西日本では異常渇水にみまわれた。海上気象に関しては、1993 年夏は日本の東北地方太平洋沿岸では例年と比較して高い波高が継続し、港湾の施工計画に影響を及ぼした。このような平年から偏った気象海象を予測することができれば、防災あるいは施工工程管理の上で事前に対処の方法を検討することができる。波浪の長期統計特性(波候)については、船舶、沿岸・ブイ波浪観測資料あるいは波浪計算資料を用いて、船舶設計及び港湾設計等の工学的目的から調べられているが、波浪情報の計測制度及び地球環境全体に関しては十分な調査研究がなされていないのが現状である。気候の変動および地球環境の将来予測が大きな課題になっている現在、波浪情報(波候)の精度よく地球環境の広範囲把握が早急にされるべきものである。波浪など環境の解析は、高度情報化する将来において、海難防止および港湾整備計画のために重要な情報を与えるとともに、地球温暖化に関連した海洋土木活動のあり方を検討する上で、重要な基礎知識をもたらすものと期待される。

第二章：今までの波向計測法：

1．波浪観測資料：

日本沿岸の波浪観測資料として、主に気象庁の沿岸波浪観測所及び港湾局の沿岸波浪観測所(NOWPHAS)のデータである。データの観測時間間隔は港湾局観測所については、2時間毎(JST；0, 2, 4, ……、22時)であり、気象庁観測所は以前3時間毎(JST；3, 6, 9, ……、24時)であったが、現在毎時観測に移行した。外洋の波浪観測資料として、主に気象庁の波浪ブイ及びNOAAの波浪ブイのデータである。NOAA、気象庁等の外洋波浪ブイによる観測を除けば、船舶による波浪の目視観測資料が唯一のものである。最近になって、人工衛星のマイクロ波高度計によって観測された波高の資料が蓄積されつつあるが、波向情報が推測値しか提供していない。そして衛星の数が少なく、データの時空間的な均一性の点で問題が残されている。



上図は人工気象衛星からの波向情報の推測図（気象庁発表による）である。

下表は観測所の人工観測波浪日表（気象庁発表による）である。

観測所名：新潟沖

1998年10月

日 時	有 義 波		最 大 波		気 象		
	波 高 [m]	周 期 [秒]	波 高 [m]	周 期 [秒]	波 向	風 向 [m/s]	風 速 [m/s]
21日 0時	0.14	4.90	0.23	3.90	北東	東	2.80
21日 2時	0.11	4.70	0.17	4.30	南 南 東	北北西	3.10
21日 4時	0.14	4.00	0.25	4.90	南東	北北東	4.50
21日 6時	0.17	3.50	0.29	3.60	北東	南東	2.40
21日 8時	0.17	4.00	0.29	4.00	北 北 東	北東	2.10
21日 10時	0.17	4.10	0.41	4.00	東 北 東	東北東	3.10
21日 12時	0.14	4.70	0.26	3.80	南東	北東	3.00
21日 14時	0.12	5.10	0.20	4.40	北	北東	5.00
21日 16時	0.12	4.70	0.19	5.00	南 南 東	北北東	4.50
21日 18時	0.14	5.10	0.22	4.50	南 南 東	東北東	4.40
21日 20時	0.13	5.50	0.18	7.30	北東	東南東	4.10
21日 22時	0.15	5.60	0.23	4.40	北東	南南東	7.40

2 . 波高と周期の季節変動：

太平洋沿岸海域は一般に、3月と9月を中心に月平均波高が高く、7月と12月を中心に波高が低い約6カ月周期の季節変化である。月平均周期は、波高とほぼ同様な6カ月周期の季節変化である。日本海沿岸では、月平均波高は12・1月に高く、6・7月に低い12カ月周期の変動である。月平均周期も波高と同様に、冬季に長く夏季に短い約12カ月周期の変動である。

3 . 以前の方法：

波向とは波浪のエネルギーを伝わっていく方向である。波浪は弱定常性質を持っているが、剛体ではなく、常に変形する。そして、波浪画像の背景と光線も変化するから、波向を計測することは波高や周期に比べて、非常に難し。これまでに提案された計測方法として：波高計アレイから推定する方法（Barber, 1961）、ピッチ・ロール・ブイによる方法（Longuet-Higgins et al. 1961）、クロバーブイ方法（Mitsuyasu, et al. 1975）、レーダーを用いた方法（井島ほか. 1964）、航空写真から解析する方法（杉森, 1973）などが有るが、いずれも調査研究の目的として、大型の

測器が必要である、あるいは操作解析が複雑で、計測の労力が大きすぎるなどの欠点があった。今も遠洋、全球性海洋観測、環境調査など主に船舶乗組員によって観測をしている。

4 . 桑島らの方法 :

1992 年桑島らはマイクロ波ドップラーレーダを用いた波向計を提案した。レーダ波の反射距離を測って、一番近いのが真向かい波浪来る方向だとその原理である。1994 年水槽実験を経て、東京湾で実機実験を行った。これは固定点設置のため、使用場所が湾岸に限られている。そして、微弱うねり波の波向判断は困難である。

第三章：波向計測に使った画像処理手法ユニック

1 . 画像処理手法の特徴抽出 :

画像の特徴を忠実に現すパラメータを特徴パラメータと呼び、その形状を特徴パターンという。さらにこれらの特徴パターンを求める作業を特徴抽出という。波向を求めるのになみの峰ラインと谷ラインもこういった特徴である。CV 手法の特徴抽出は大体下記の三大種類の方法がある。

1 .) エッジ / 輪郭 / 線成分の抽出 :

画像解析の第1段階の処理は画像の不連続部分をエッジとしてエッジ抽出し、このエッジを境界線として画像をいくつかの連続領域に分割することである。つまり、濃度の変化点を抽出することにより対象物のエッジが検出できる。具体的な手法としては、2次微分処理、ハフ変換等があり、濃淡画像からエッジ検出を行う場合、一般に所処で途切れている場合が多い。まず切れている点列を繋ぐことが必要であり、膨張法、収縮法、延長跡法等種々の方法が提案されている。

2 .) 領域分割による抽出 :

認識対象あるいはその一部を1個の塊として取り出す事が必要になる場合が多い。その場合、画像を特徴の一様な互いに関係のない連結領域に分割して、領域として抽出する。領域拡張法、統計的仮設検定法、特徴空間写像法等のいくつかの方法が提案されているが、特に決め手になるものではなく、対象や目的に応じて使い分ける必要がある。領域の特徴には領域の形状特徴と領域内部の画像特徴がある。形状特徴は幾何学的特徴(対象画像の距離、面積、重心、中心等)、細線化処理後の領域の心線、閉曲線の特徴等であり、統計的特徴は画像の濃度分布のパラメータ(平均濃度、分散値等)、カラー等である。

3 .) テクスチャの抽出 :

テクスチャとはある規則によって配列された繰り返しパターンを基礎とするものである。画像からテクスチャ自身の持つ固有の特徴を抽出しモデル化を行って、画像パターンの同定を行うものである。等質領域抽出と称して、画像から異なるテクスチャ領域を認識する方法である。例えば、航空写真から畑、道路、住宅の領域を抽出したり、X線写真から病巣領域を抽出する。このように、画像から認識対象を切出す操作をセグメンテーションという。

2 . 白黒濃淡画像変換 :

フルカラー画像が各画素に、赤、緑、青の3原色それぞれの成分の階調値が割り当てられている画像である。各色成分の階調値を R, G, B で表せば、 $256 \times 256 \times 256 = 1677216$ 色を表現することができる。画像中の特徴を抽出する際には、フルカラー画像より、グレイ画像あるいは白黒画像を扱う方が処理が行ないやすいのが普通である。そこで、与えられた フルカラーの原画像をグレイ画像に変換することが必要となる。経験的に原画像の画素の赤、緑、青の各階調値 R, G, B を用いて、 $Y = 0.299R + 0.587G + 0.114B$ という式で決まる階調値 Y で変換後の階調値を定める。

3 . ヒストグラム :

各階調値を持っている画素の数をプロットしたグラフを 階調値(あるいは濃度)ヒストグラム

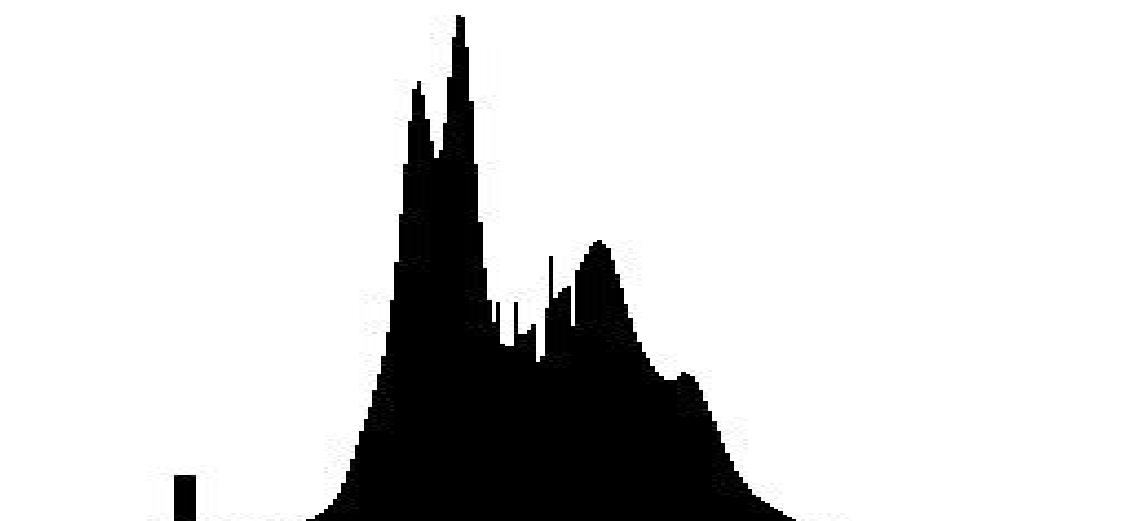
ラムと言う。単純ですがヒストグラムは、画像処理において重要な情報の一つである。例えば、ヒストグラムをもとに二値化の際の閾値を決めたりする。



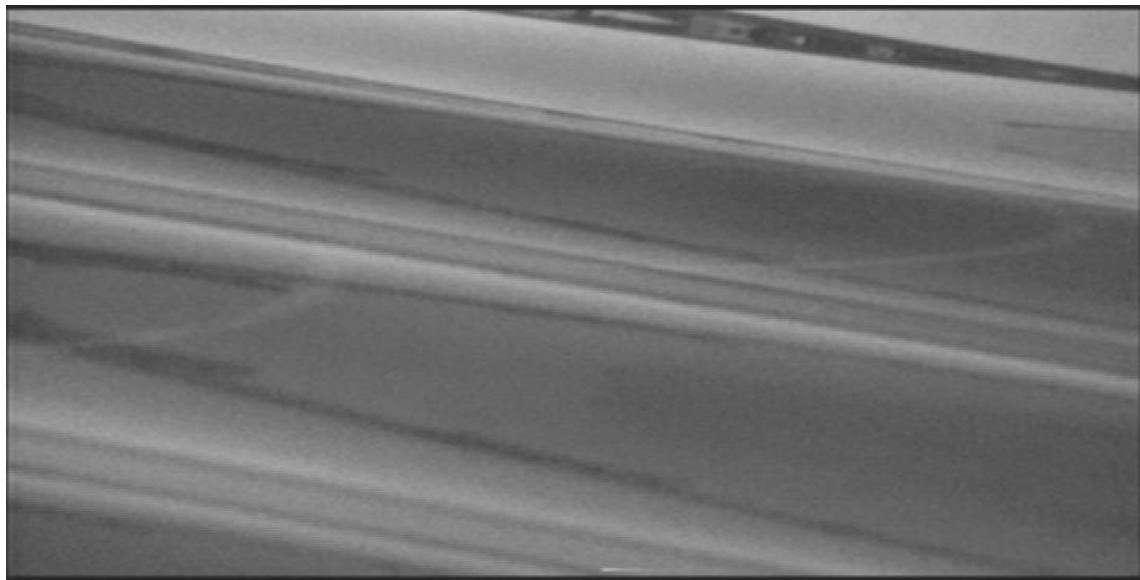
湾岸へ向いている波のヒストグラム図



オリジナル湾岸へ向いている波の原画像



水槽造波機の規則波のヒストグラム図



オリジナル水槽造波機の規則波の原画像

4 . 平滑化フィルタ :

平滑化(smoothing)は、雑音除去や画像をぼやけさせる手段の1つとして使用される。画像をぼやけさせるメリットは、パターンマッチングにおいて位置ずれを軽減でき、ある程度のボケなら認識率の向上につながる。平滑化には、下記の四つの方法などがある。

1 .) 移動平均法 :

画像中の雑音による濃度のばらつきを無くすために使用する。注目画素の近傍の濃度値の平均濃度値を出力画像の画素値とする。エッジのボケを少しでも減らすために、中心にまわりより大きな重みを与える(加重平均法)、"円形"なフィルタを使用したりする。操作を何回も繰り返すと画質の低下につながるので要注意。

2 .) メディアンフィルタ

$n * n$ 領域の濃度の中央値を出力濃度とする。主に $3 * 3$ のサイズで行われる。エッジがぼけるのをかなり防ぐことができる。ごま塩雑音に対して有効である。計算コストとの面から判断しても、この手法は優れているのでよく使用される。

3 .) 選択的局所平均化

移動平均法と同じく局所領域中の平均濃度を出力値とする方法である。移動平均法との違いは、局所領域中にエッジを含むかどうか調べ、エッジを含まない局所領域で平均値を求めることがある。これによりエッジをぼかすことなく雑音除去を行える。計算コストの点では、メディアンフィルタに劣る。

4 .) ガウシアンフィルタ

加重平均法で $3 * 3$ より大きな局所領域では、正規分布型の重み係数を使用する。移動平均より緩やかな平滑化を行うことができる。

5 . 閾値の決定法 :

2 値化は、文章などの白黒画像を、濃淡値のあるスキャナなどで入力した場合や対象物と背

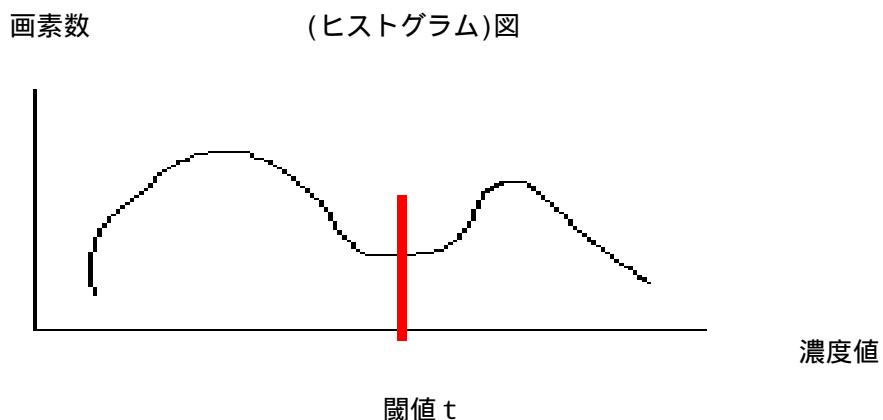
景とを分離したりするためなどに使用される。2値化処理をするときの閾値の選択方法としては主に下記の五つ方法などがある。

1.) P-タイル法について：

図面や文章画像など切り出すべき対象の面積がある程度推定できる時に使用する。切り出す対象図形の面積を S_o 、全体の面積を S とすると、 $p=S_o/S$ として濃度値が t 以上になる画素が全画素に対して p の割合になるように閾値 t を決定する。濃度値の低い方から $1-p$ となるように t を決定。

2.) モード法：

対象物と背景の濃度差が大きく違う（谷がはっきりとできる）時に使用する。ヒストグラムを求めて山が2つあった場合その谷を閾値 t とする。ノイズが多い時や画像が複雑な時は使用しにくい。下図はモード法による閾値選択を示す。



3.) 微分ヒストグラム法：

濃度の変化率（微分値）によって閾値 t を決定する。変化率（微分値）を求める方法は 近傍の各画素の濃度値とその差の最大値を求める方法と 近傍との差の総和を求める方法などがある。図形の境界が、一定の濃度値の範囲に納まっている時に使う。境界付近の濃度値が複雑に変化する対象には不適である。

4.) 判別分析法：

濃度値のヒストグラムにおいて、閾値で2つのクラスに分割した時、最もクラス間分散とクラス内分散の比が大きくなるように閾値 t を決定する。ヒストグラムが2つの山を持つ時、モード法として働く。さらに、谷が無くても閾値が求まるのでよく使われる。

5.) 可変閾値法(動的閾値処理)：

閾値を部分領域(小領域)毎に変化させる。入力装置のシェーディングなどにより画像が濃度値の緩やかな勾配を持つ時に使用。シェーディングとは光源の位置や周りの環境条件から対象物の明るさを決めることがある。

6. 二値画像処理:

濃淡画像を対象領域と背景に分離する2値化は、画像処理あるいはパターン認識の最も基本的な手続きの一つである。カラービデオ画像情報から256階調のデジタル情報に変換された画

像を下図に示す。波ラインの抽出、領域分割するため、このディジタル画像の濃度ヒストグラムより峰ラインの平均濃度付近と谷ラインの平均濃度付近の 2 つのピーク値の谷の部分に当たる濃度を閾値とし（モード法）を用いる、画像を 2 値化する。



室内水槽造波のオリジナル原画像



上記オリジナル画像のヒストグラム図



上記オリジナル画像の二値化した結果画像

濃淡画像の画素の集合を $\{x\}$ とし、各画素の濃淡値を g とすると、閾値 t による二値化処理は、各画素 x が二つのクラス C_1 と C_2 のどちらに属するかを

$$g(x) \leq t \rightarrow x \in C_1, g(x) > t \rightarrow x \in C_2 \quad (6)$$

のように決定する手法である。ここで、 C_1 および C_2 は、それぞれ背景と対象領域である。対象を背景から正確に分離するためには、適切な閾値を選ぶ必要がある。

7 . 細線化処理:

ここでは、細線化の代表的な方法として、Hilditch の方法を述べる。この方法では図形の境界画素をある条件のもとで逐次削除(画素の値を 1 から 0 に置き換える)して行くことにより 8 連結で線幅 1 の線図形を得ている。記述を簡単化するために、8 近傍の画素を用いると、対象画素 $P(x, y)$ の濃度値を $B(p(x, y)) = B(P_0)$ とし、 P_0 の 8 近傍画素を $P_k, k \in N_8 = \{1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8\}$ で表わす。また、 $N_4 = \{1, 2, 3, 4\}$ ， $N_{odd} = \{1, 3, 5, 7\}$ として、処理手順を下記で示す。

手順 1 :

2 値画像のある画素 $P(x, y)$ について、以下の 6 つの条件がすべて満足される時、 $B(P_0) = -1$ とする。その他の場合は、 $B(P_0)$ の値はそのままとする。

(条件 1) P_0 が対象領域の画素である条件 $B(P_0) = 1$

(条件 2) P_0 が境界画素である条件

$$\sum_{k \in N_4} B^*(P_{sk-1}) \geq 1, B^*(P) = 1 - |B(P)| \quad (7)$$

この式は、 P_0 の近傍画素 P_1, P_3, P_5, P_7 のうち少なくとも一つの画素が 0 でなければならぬことを示す。すなわち、画素の連結性を 8 連結としているので、これらの近傍画素のうち一つが 0 であれば P_0 は境界画素である。

(条件 3) 端点を削除しない条件

$$\sum_{k \in N_2} |B(P_k)| \geq 2 \quad (8)$$

この式は端点を保存するための条件である。この条件がないと線は細線化の過程で短縮されてしまう。

(条件 4) 孤立点を保存する条件 ($B(P_k) = 1$ の時、 $C_k = 1$; $B(P_k) \neq 1$ 、 $C_k = 0$)

$$\sum_{k \in N_2} C_k \geq 1 \quad (9)$$

この条件は、逐次処理方式すなわち直前の処理結果を用いて評価される。 P_0 の 8 近傍がそのうち少なくとも一つの画素の値が 1 のとき、 P_0 は孤立点ではない。

(条件 5) 連結性の保存する条件 ($|B(P_{k+m})| = 1$ の時、 $C(P_{k+m}) = 1$; $|B(P_{k+m})| \neq 1$ 、 $C(P_{k+m}) = 0$)

$$N_c^8(P_0) = 1, \\ N_c^8(P_0) = \sum_{k \in N_{odd}} \{C^*(P_k) - C^*(P_k)C^*(P_{k+1})C^*(P_{k+2})\} \quad (10)$$

この条件は画素 P_0 に連結する成分の数が 1 でなければならないことを示す。成分の数が 1 であるとき、画素 P_0 を削除しても近傍画素の成分の数は同じく 1 であり連結性が損なわれることはない。

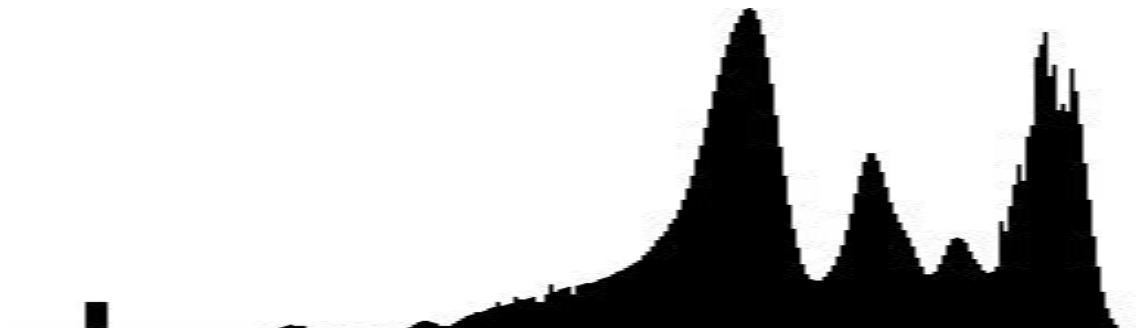
(条件 6) 線幅が 2 の線分に対して、その片側のみ削除する条件 $B(P_i) \neq -1$ または $B(P_i) = 0$ とした時の $N_c^8(P_0) = 1$ 、ただし $i \in N_8$ ここで、 $B(P_i) = 0$ とした時は条件 6 で定められる画素 P の連結数である。この条件は、 P_0 の 8 近傍で、-1 である画素と P を同時に削除しても連結成分数がなお 1 でなければならないことを表す。

手順 2 :

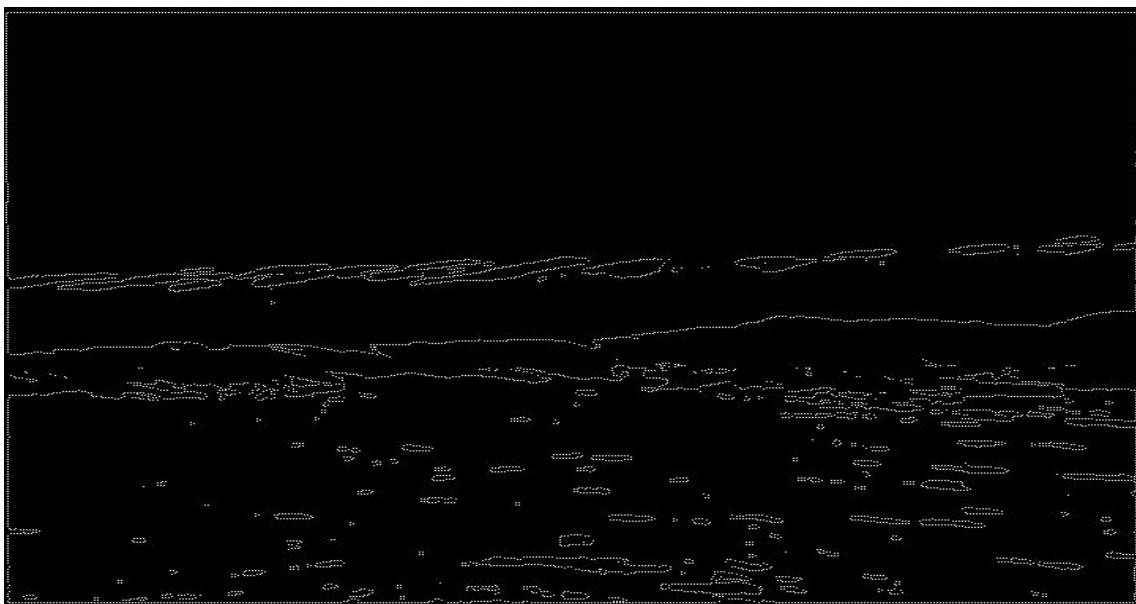
$x, y) = -1$ となるすべての画素 $p(x, y)$ に対して、 $p(x, y) = 0$ とする。この時、 $p(x, y) = -1$ となる画素が一つも存在しない場合において細線化処理を終了する。それ以外では [手順 1] を繰り返す。



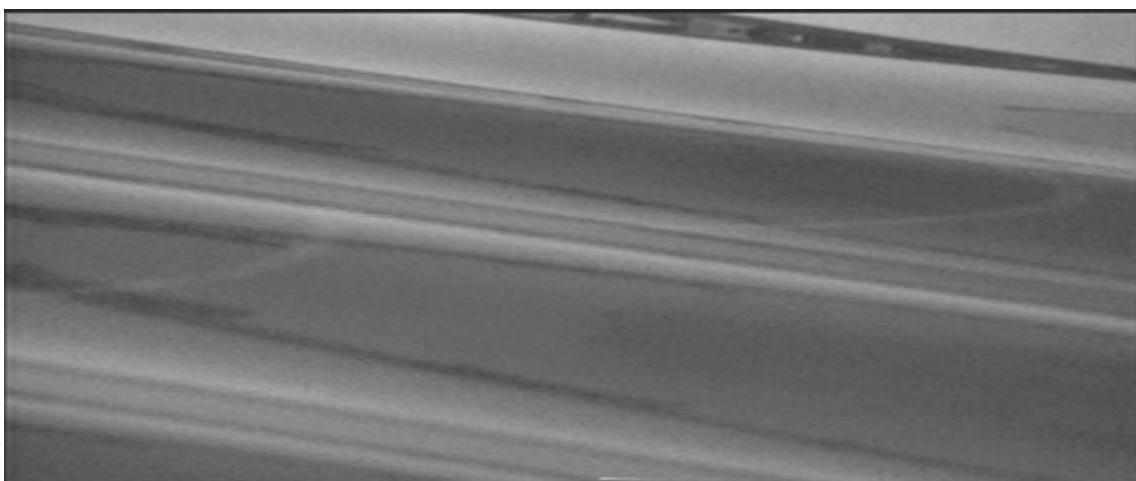
湾岸向波浪のオリジナル原画像



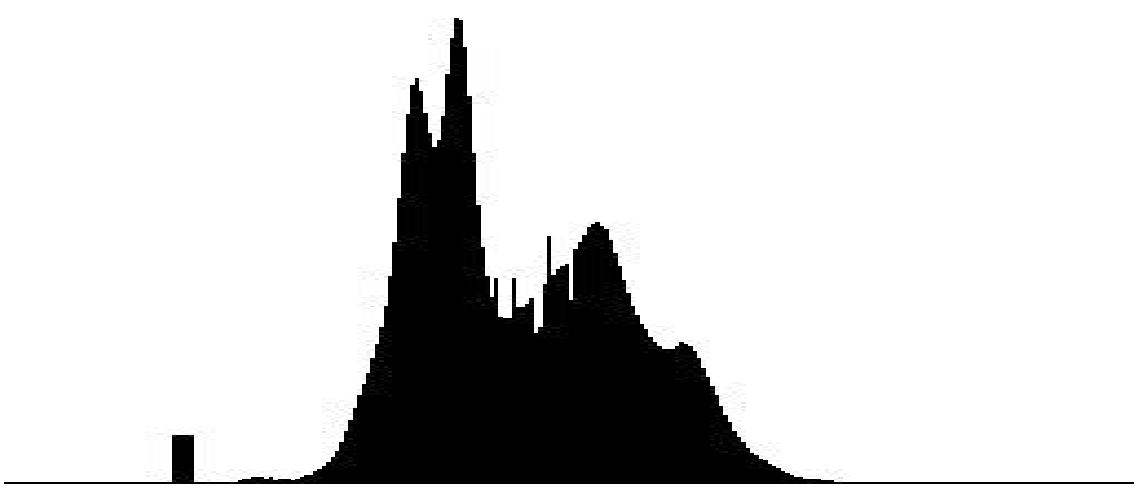
湾岸向波浪原画像のヒストグラム図



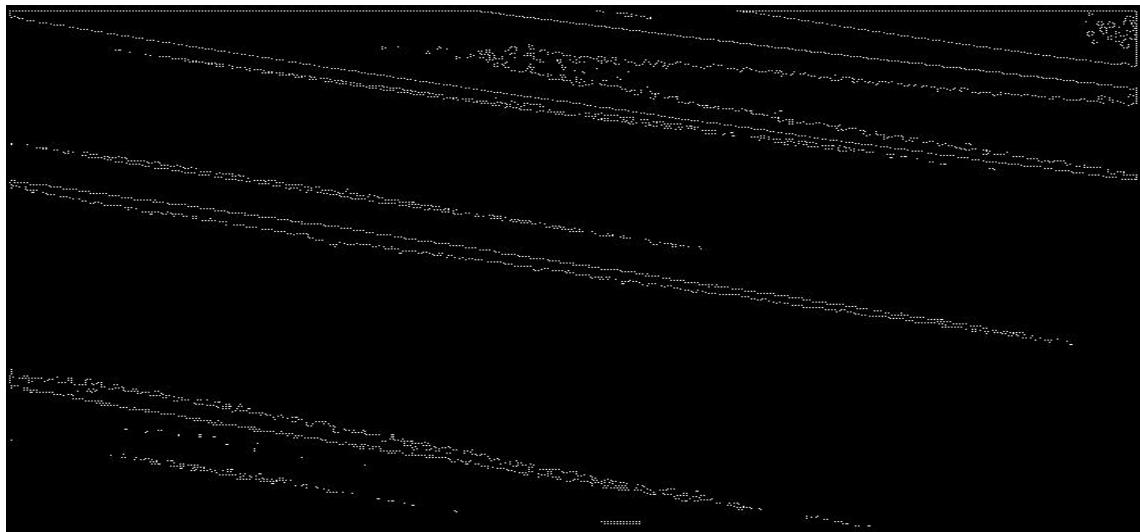
湾岸向波浪原画像に対する細線化した結果画像



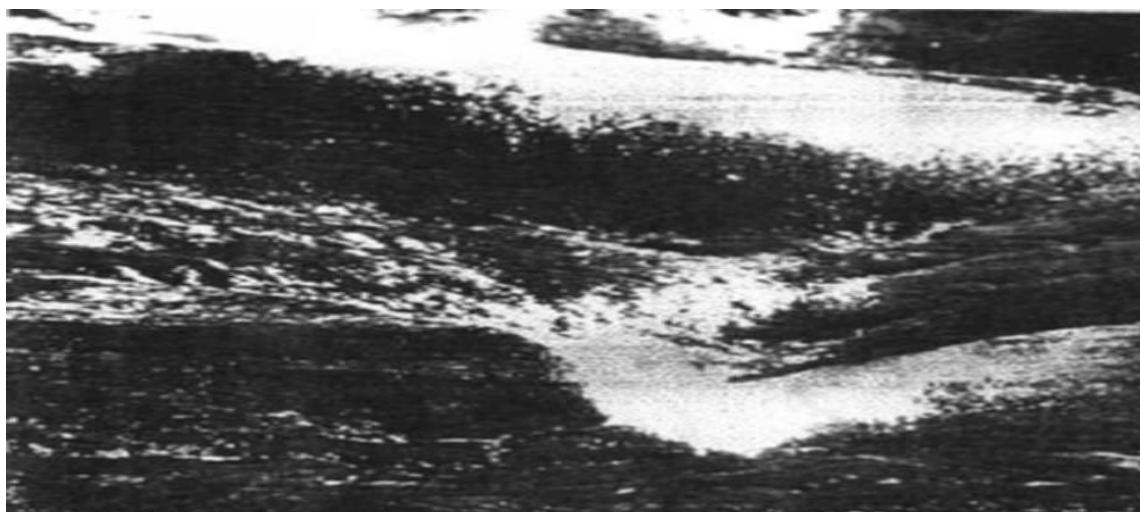
室内造波原画像



室内造波原画像のヒストグラム図



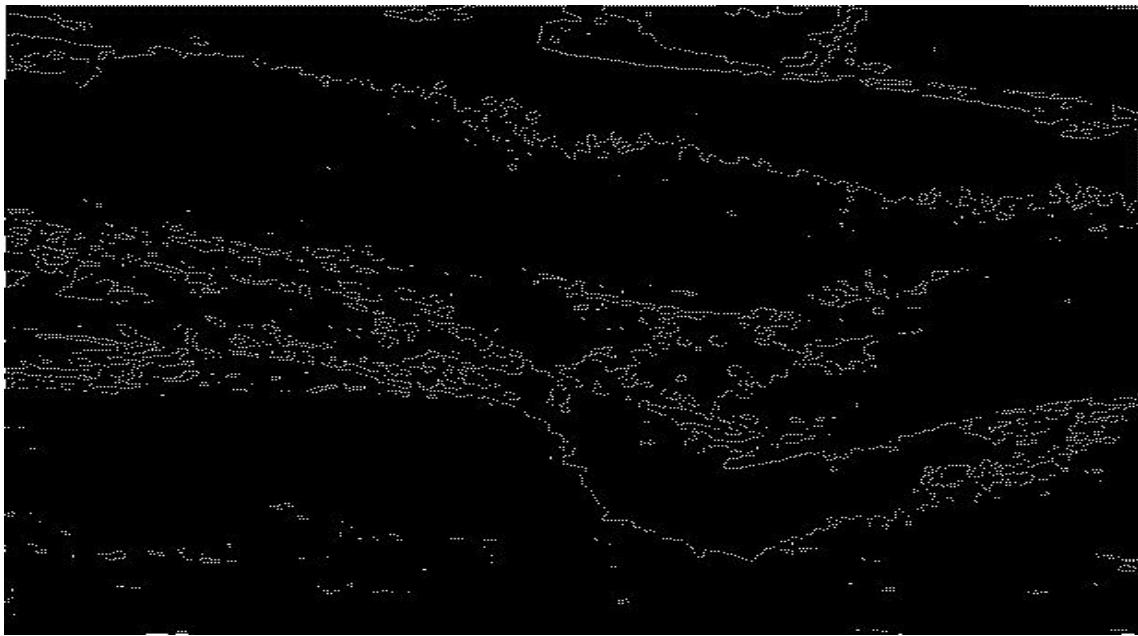
室内造波原画像の細線化結果図



外洋の渦巻き波浪原画像



外洋の渦巻き波浪原画像のヒストグラム図



外洋の渦巻き波浪原画像の細線化結果

8 . ラベリング処理 :

細線化した 2 値画像の境界線に対して、波ラインを抽出する処理である。この処理によって、波の峰ラインと谷ラインなどの情報を得ることが出来る。白黒 2 値のビットパターンに対して、与えられた白黒 2 値の画像の黒画素を 8 連結で調べてゆき、連結している黒画素をそれぞれ連結成分として抽出する。連結成分の抽出にはラベル付けの手法を用いる。

1 .) ラスタスキヤン処理 :

2 値画像のある対象画素の座標を $p(x, y)$ とし、 x を X 座標値、 y を Y 座標値とする。この時、画像の左端から水平方向に対して順に画素値を調べて行く操作をラスタスキヤンと呼ぶ。このラスタスキヤンにより、ある対象画素 $p(x, y)$ の画素値が 0 の時、常にラスタスキヤン操作を続ける。そして、右端にたどり着くと一段下がってまた右端から左端へとラスタスキヤンを続ける。

2 .) 8 近傍処理 :

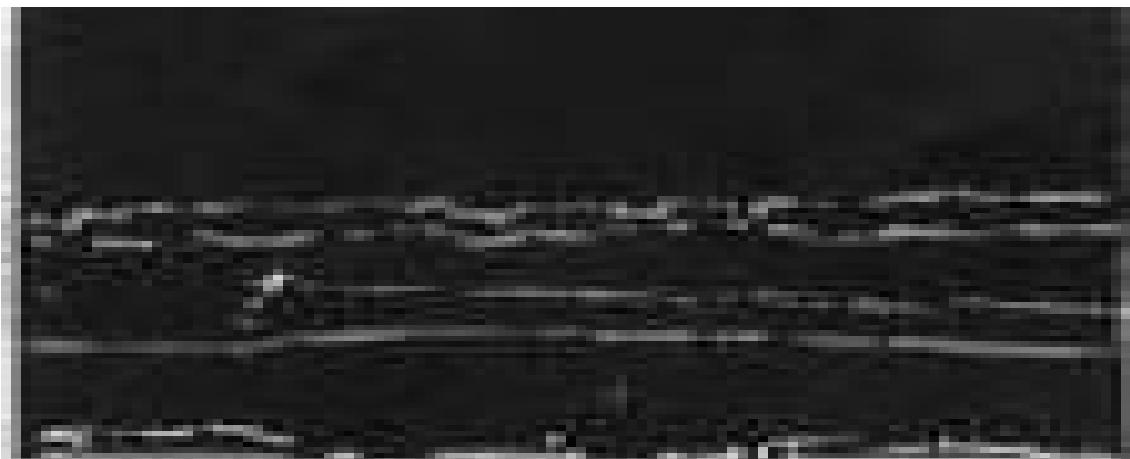
ラスタスキヤンの際に $p(x, y)$ の画素値が 1 である時、ラスタスキヤン処理を一時中断する。そして、 $p(x, y)$ を P_0 と仮定した時、 P_0 を取り囲む画素を P_1 から P_7 で定義する。現在、左から水平方向にラスタスキヤンすることで、画素の移動方向は P_0 から P_1 に進行したことになる。この時、進行方向 P_1 の逆方向である P_5 は、移動前の画素値 P_0 であるため画素値は 0 である。したがって、 P_5 の次の画素 P_6 から、反時計周りに 8 近傍を調べて行く。そして、反時計周りで P_6 から P_5 の探索中で始めて画素値が 1 となる方向が次の P_0 の位置となる。この移動した際に、過去に移動してきた軌跡を保存するために 0 , 1 以外の値を画素に書き込む必要がある。この処理を繰り返すことにより、 $p(x, y)$ の進行方向に対して、左に 1 の領域、右に 0 の領域を追跡することになる。そして、最後にラスタスキヤン処理から 8 近傍処理へ移った座標位置に戻り、8

近傍処理が終了する。このラスタスキャン処理と8近傍処理を交互に繰り返すことによって、画像の右下にたどり着いた時ラベリング処理処理が終了する。

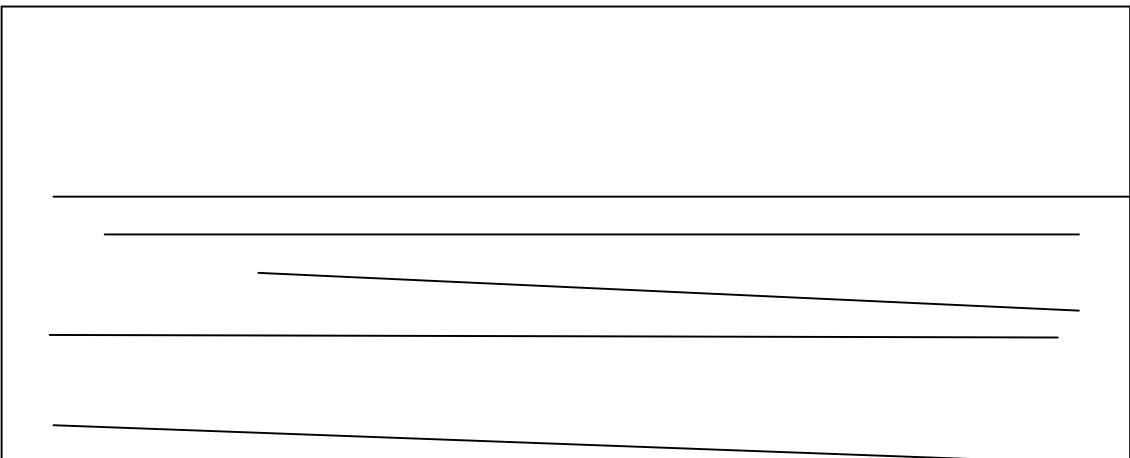
9 . 領域分割処理 :

画像を局所的な特徴が一様な領域に分割する領域分割は、コンピュータビジョンにおける最も基本的な手法の一つであり、小さな領域から一様な領域を統合する統合法、大きな領域を分割する方法、確率的弛緩法を用いる方法等の多くの手法が提案されている。領域の統合をどこで止めるか、あるいは、領域の分割とどこで止めるかといった分割数の決定の自動化は、これらの手法に共通する課題である。

10 . 直線の当てはめ方法 :



上図は細線化した画像の結果画像である



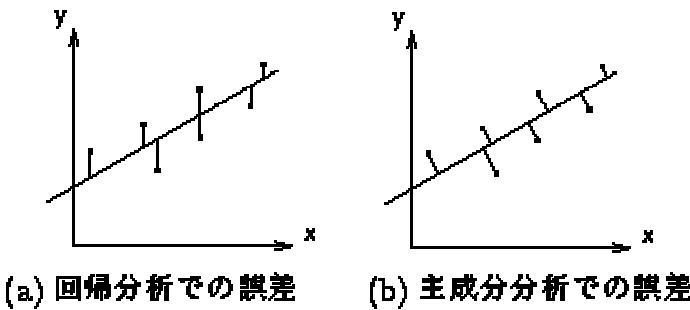
直線の当てはめ結果図

実際の画像処理や画像理解においては、画像から必要な情報を取り出すために、エッジ抽出等によって得られた平面上の点の集合に直線や曲線を当てはめる等の方法が取られることが多い。2つのデータを散布図に表してみると、点がほぼ直線の上に乗っていると考えられることがある。最もこれらのデータをよく近似する直線を回帰直線といい、回帰直線の方程式のことを回帰式という。実際には直線的な関係だけでなく、いろいろな曲線で近似することもある、この

ように、データを近似する関係式を見つけることを 回帰分析という。

(1.) 主成分分析：

今、平面上のデータ点の集合を $S = \{(x_i, y_i)\}_{i=1,\dots,N}$ とする。ここで、各点に付けられた添字の順番に意味はないものとする。



誤差の測り方を示す図

多変量データ解析では、このようなデータ点集合に直線 $y = ax + b$ を当てはめる場合、重回帰分析を用いるのが普通である。つまり、データ点から直線への y 軸に平行な誤差の2乗の平均、すなわち、

$$\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (y_i - ax_i + b)^2 \quad (11)$$

が最も小さくなるように直線を当てはめる(上図(a))。しかし、この方法は、変量 x の線形式で変量 y を予測することを意図している。したがって、予測の方向を入れかえて y から x を予測する場合の回帰直線は、 x から y を予測する場合と同じにはならない。しかし、画像処理への応用では、 x と y とは、対等に扱わなければならないことが多く、こうした方向性は好ましくないものと考えられる。主成分分析を用いると x と y を対等に扱い、上図(b)のように誤差をデータ点から直線までの最短距離として評価することができる。一般に、平面上の直線は、方

向ベクトル $\bar{a} = (D_x, D_y)^T$ (ただし、 $\bar{a}^T * \bar{a} = 1$)を用いて、

$$\bar{r}(t) = \bar{r}_0 + \bar{a}t \quad (12)$$

のように表せる。ここで、 $\bar{r}(t) = (x(t), y(t))^T$ および $\bar{r}_0 = (x_0, y_0)^T$ である。

この時、データ点 $\bar{r}_i = (x_i, y_i)^T$ からこの直線上の点 $\bar{r}(t)$ までの2乗距離は

$$d_i^2(t, \bar{a}, \bar{r}_0) = t^2 + 2\bar{a}^T(\bar{r}_0 - \bar{r}_i)t + (\bar{r}_0 - \bar{r}_i)^2 \quad (13)$$

で与えられる。直線を固定すると、この距離が最小となるのは、データ点から直線に垂直な直線を下ろした場合であり、データ点からこの直線までの最短距離の2乗は、

$$d_i^2(\bar{a}, \bar{r}_0) = (\bar{r}_i - \bar{r}_0)^2 - \bar{a}^T(\bar{r}_i - \bar{r}_0)(\bar{r}_i - \bar{r}_0)^T \bar{a} \quad (14)$$

となる。したがって、このようにして測ったデータ点の集合から直線への平均2乗誤差は、

$$e^2(\bar{a}, \bar{r}_0) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N d_i^2(\bar{a}, \bar{r}_0) \quad (15)$$

と表される。方向ベクトルに関する制約条件のもとで、この平均2乗誤差を最小とする直線のパラメータ \bar{a} および \bar{r}_0 を求める問題は、ラグランジエ乗数を $|$ として、評価関数

$$J(\bar{a}, \bar{r}_0) = e^2(\bar{a}, \bar{r}_0) + |(\bar{a}^T \bar{a} - 1)| \quad (16)$$

を最小化する問題に帰着される。最適なパラメータ \bar{a} および \bar{r}_0 は、

$$\bar{r}_0 = m = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \bar{r}_i \quad (17)$$

$$C_{\bar{a}} = |\bar{a}| \quad (18)$$

となる。ただし、

$$C = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (\bar{r}_i - m)(\bar{r}_i - m)^T \quad (19)$$

はデータ点集合の分散共分散行列である。つまり、式(19)は、主成分分析の固有値問題と全く同じとなる。

この時達成される最小2乗誤差は、

$$e^2 = \text{tr}C - | \quad (20)$$

となる。

(2.) 最小2乗法:

最小2乗法は、 N 個のデータ (x, y) があった時、それに最もよく合う直線や曲線を求めるための方法である。以下のような式 $F(a, b)$ を考えてみる。

$$F(a, b) = \sum_{i=1}^N (ax_i + b - y_i)^2 \quad (21)$$

データに誤差がなく、データが厳密に $y = ax + b$ に乗っていれば、 $F(a, b)$ の値がゼロとなる a, b が存在するはずだが、データが誤差を含む場合、必ずしも $F(a, b)$ はゼロにはならない。そこで、 $F(a, b)$ の値が最も小さくなるように a と b の値を決めてことで、近似的にデータの当てはめを行う。このように、 $f(x, y)$ の二乗和が最小になるように方程式の係数を決める方法が最小2乗法である。 $F(a, b)$ を計算すると以下のようになる。

$$F(a, b) = \sum_{i=1}^N (ax_i + b - y_i)^2 = Aa^2 + Bb^2 + Cab + Da + Eb + F \quad (22)$$

A, B, C, D, E, F は、 $\{x_i\}, \{y_i\}$ の式になるが、これらを定数と考えると、 $F(a, b)$ を最小にするような a, b は、以下の式を満たしている

$$\frac{\partial F}{\partial a} = \frac{\partial F}{\partial b} = 0 \quad (23)$$

(3 .) 一般化ハフ変換:

一般化ハフ変換とはハフ変換の応用で、デジタル画像から任意形状の図形について、並行移動・回転・変倍パラメータを抽出するための手段として用いられる手法である。一般化ハフ変換では、パラメータ空間として図形の形状を用い、並行移動 (x, y 方向) と s 倍の変倍、そして回転角度 j の 4 つのパラメータで 4 次元パラメータ空間を構成し、投票を行なう。簡単な例として円を少し歪めたような下図の画像を使う。まずこの画像に対して参照点を決め、エッジを検出し、エッジ上の各点について、エッジ方向 q をインデックスとした参照点へのベクトル (r, q) を記述した表を作る。この表のことを「形状定義表」とか「R テーブル」とか言ったりする。この R テーブルより、元の画像に (x, y) だけの並行移動、 s 倍の拡大、 j だけの回転が加えられたとき、エッジ方向 q が与えられたときに参照点 (xq, yq) は

$$xq = x + s \cdot r \cos(a + j) \quad (24)$$

$$yq = y + s \cdot r \sin(a + j) \quad (25)$$

である可能性が考えられることになる。この時、原画像から θ だけ回転しているので、 (r, q) はテーブル上の $(q - j)$



一般化ハフ変換説明図

をインデックスとした値を用いる。上式によって得られる点は、参照点となりうる候補点なので、このときの対応するパラメータ空間 (xq, yq, s, j) に投票する。こうして、画像中の各エッジに対してこの投票を繰り返し、最も投票数の多い点のパラメータが元の図形の変形パラメータとして得されることになる。

11. オプティカル・フロー処理 :

オプティカル・フローとは画像上の画素の流れ(動き)をベクトルで表したものいい、動画像のフレーム間での各画素の動きをベクトルで求めて移動方向を検出する方法である。その特徴は瞬間瞬間の微小変化を扱い、変化が連続的であれば各画素の動きが流れるように変化する所である。移動ベクトルが検出できれば移動物体の把握、追跡が可能であり、交通量調査、対象の動きベクトル方向の判別等、応用範囲は広い。これから、波ラインの移動方向ベクトルを求める時使っているオプティカル・フローについて基本計算方法を述べる。オプティカル・フロ

— (Optical Flow) は観測者が感じる画面上にある物体の見かけ速度分布を指す。それを決定する基本式は 2 つの仮定から導出される。その 1 つは、対象となる物理点のもつ濃淡値が運動に際して一定に保つこと。時刻 t における画面上にある点 (x, t) の濃淡値を $P(x, y, t)$ とし、微小時間 Δt 後は物理点が点 ($x + \Delta x, y + \Delta y, t + \Delta t$) まで移動しその濃淡値を $p(x + \Delta x, y + \Delta y, t + \Delta t)$ とすると、次式が成立。

$$p(x, y, t) = p(x + \Delta x, y + \Delta y, t + \Delta t) \quad (26)$$

それを Tay lor 展開し、 Δt を 0 に極限を取ると、次式が得られる。

$$up_x + up_y + p_t = 0 \quad (27)$$

ただし、(u, v) は見かけ速度ベクトルであり、 p_x, p_y, p_t は x, y, t に対する偏微分である。もう一つの仮定は、見かけ速度は滑らかに変化することである。速度の滑らかさは速度ベクトルのラプラシアンの和で評価する。

$$E_c = \nabla u^2 + \nabla v^2 \quad (28)$$

実際に計算するには、(27)式の p_x, p_y, p_t は有限差分で近似し誤差をもたらす。(28)式も離散化する必要があり、実際には速度分布の滑らかさを次式で評価する。

$$E_b = up_x + up_y + p_t \quad (29)$$

$$E_c^2 = (u - \bar{u})^2 + (v - \bar{v})^2 \quad (30)$$

ただし、(u, v) は近傍速度ベクトルの平均値である。

$$\left\{ \begin{array}{l} \bar{u}(i, j) = \frac{1}{12} [u(i-1, j-1) + u(i+1, j-1) + u(i-1, j+1) + u(i+1, j+1) \\ \quad + \frac{1}{6} [u(i-1, j) + u(i, j-1) + u(i, j+1) + u(i+1, j)] \\ \bar{v}(i, j) = \frac{1}{12} [v(i-1, j-1) + v(i+1, j-1) + v(i-1, j+1) + v(i+1, j+1) \\ \quad + \frac{1}{6} [v(i-1, j) + v(i, j-1) + v(i, j+1) + v(i+1, j)]] \end{array} \right. \quad (31) \quad (32)$$

重み係数 a^2 を導入して(29)式と(30)式を統合すると次式のような誤差評価式が与えられる。

$$E = \iint (E_b^2 + a^2 E_c^2) dx dy \quad (33)$$

誤差 E が最小値を取る条件で速度分布の計算式が得られる。結局、次式を反復して収束すれば

速度分布が求められる。

$$\begin{cases} u^{k+1} = \bar{u}^k - P_x \frac{P_x \bar{u}^k + P_y \bar{v}^k + P_t}{\alpha^2 + P_x^2 + P_y^2} \\ v^{k+1} = \bar{v}^k - P_y \frac{P_x \bar{u}^k + P_y \bar{v}^k + P_t}{\alpha^2 + P_x^2 + P_y^2} \end{cases} \quad (34)(35)$$

ただし、反復回数である。動画像の測定領域内の演算点で算出した局所瞬時ベクトル場のすべてを速度要素としてその後、統計値処理を行い、流体表面速度へと適用している。オプティカル・フローを液体や固液混相流の流体表面に適用すると、画像に写る表面素性により結果に大きな差が見られる。液体の流れでは滑らかな速度ベクトル場が得られるが、明確な輪郭成分の持つ物質が混ざる固液混相流では空間微分成分が強く影響する。これはオプティカルの演算には、見かけ速度と流体表面模様の情報が混在していることになる。

(1.) 重回帰分析の勾配法によるオプティカルフロー処理 :

動画像から対象の動きのパラメータを時空間微分から推定するための方法として勾配法がある。この方法では、「物体上の点の明るさは移動後も変化しない」という仮定から時空間微分とオプティカルフローとの関係式を導出し、それを利用して対象の動きを推定する。今、時刻 t における画像上の点 $r = (x, y)$ の輝度値を $p(x, y, t)$ とし、微小時間 Δt 後に対象が $u = (\Delta x, \Delta y)^T$ だけ移動したとする。このとき、点の明るさが移動後も変わらないとすると、

$$p(x, y, t) = p(x + \Delta x, y + \Delta y, t + \Delta t) \quad (36)$$

が成り立つ。今、右辺を Taylor 展開すると、

$$p(x, y, t) = p(x + \Delta x, y + \Delta y, t + \Delta t) \quad (37)$$

となる。ここで、 e は、 $\Delta x, \Delta y, \Delta t$ に関する高次の項であるが、これを無視し、両辺を Δt で割り、 $\Delta t \rightarrow 0$ とすると、

$$(\nabla p)^T u + p_t = 0 \quad (38)$$

という関係式が得られる。ただし、 $\nabla p = (\frac{\partial p}{\partial x}, \frac{\partial p}{\partial y})^T$ および $p_t = \frac{\partial p}{\partial t}$ である。

もし、局所領域内の各点のオプティカルフロー u が等しいと仮定できるなら、局所領域内で上記の関係式が最小 2 乗誤差の意味で最も良く当てはまるような u を推定すればよい。つまり、局所領域 R で 2 乗誤差

$$E = \sum_{r \in R} ((\nabla p)^T u + p_t)^2 \quad (39)$$

を最小とする重回帰分析を用いて求められる。

(2.) 時空間フィルタリングによる勾配法を用いたオプティカルフロー処理 :

(a.) 勾配法 :

画像上の(x, y)の時刻 t での明るさを $p(x, y, t)$ とし、その点が時刻 $t + dt$ に $(x + dx, y + dy)$ に移り、明るさが変化しないとする、次式が成り立つ。

$$p(x, y, t) = p(x + dx, y + dy, t + dt) \quad (40)$$

上式をテーラー展開し、 dx, dy, dt の二次以上の項は、微小であるとして切捨てる。両辺を dt で割り、 $dt \rightarrow 0$ とすると、

$$p_x(x, y, t)u + p_y(x, y, t)v + p_t(x, y, t) = 0 \quad (41)$$

ここで、 u は x 方向の速度成分、 v は y 方向の速度成分、添字は偏微分を表す。これが、勾配法における拘束式である。上式は、2つの未知数 u, v を含むので、このままでは、解くことができない。そこで、次のような方法を用いて、 u, v を求める。

(b.) フィルタリング法：

入力画像 $p(x, y, t)$ に2種類の異なったフィルター g, h をかけて、2枚の画像を得、それから次のような勾配法の拘束式を得る。

$$(g * p)_x u + (g * p)_y v + (g * p)_t = 0 \quad (42)$$

$$(h * p)_x u + (h * p)_y v + (h * p)_t = 0 \quad (43)$$

ただし、* は畳み込み積分を表す。これらの式を連立させて解いて、(u, v) を求める。ここで用いられるフィルター出力には、次のような特徴がなくてはならない。

(ア) 勾配法での画像の微分可能性を保証するための連續性

(イ) 勾配法のテーラー展開で高次項を無視しているため、高次項の影響の抑制

(ウ) 2つの拘束式が独立性となる

上の条件(ア)、(イ)を満たすには、フィルターに平滑化効果があれば良い。そこで、空間フィルターとして、ガウシアンフィルターを採用する。さらに、条件(ウ)を満たすには、フィルタに方向性があれば良い。よって、 x 方向に分散大きく、かつ微分されたガウシアンフィルタ g と、 y 方向に分散大きく、かつ微分されたガウシアンフィルタ h を採用する。

$$g(x, y) = \frac{\partial}{\partial x} \left[\frac{1}{2\pi S_1 S_2} \exp \left(-\frac{1}{2} \left\{ \left(\frac{x}{S_1} \right)^2 + \left(\frac{y}{S_2} \right)^2 \right\} \right) \right] \quad (44)$$

$$h(x, y) = \frac{\partial}{\partial y} \left[\frac{1}{2\pi S_1 S_2} \exp \left(-\frac{1}{2} \left\{ \left(\frac{x}{S_1} \right)^2 + \left(\frac{y}{S_2} \right)^2 \right\} \right) \right] \quad (45)$$

このようにすると、分散の大きい方向に平行なエッジの方が垂直な方向よりも敏感である。フィルタ g, h では敏感なエッジの方向が異なるため、異なる方向のエッジが交差するような点では、フィルタによって敏感なエッジが異なり、 u, v 空間での拘束式の傾きに差が出ることになる。ま

た、時間方向に関しても、微分可能性を補償するためにスムージングフィルタをかける。

(3.) フローの信頼性：

時空間フィルタリングに基づく勾配法によってオプティカルフローを計算する場合、画像中の局所的な情報しか用いていないため、"窓枠問題"が生じる。このような場所では、拘束式の独立性がなくなることから、従来オプティカルフローの信頼性の評価値として、2つの拘束式の行列式の絶対値の大きさを用いてきた。即ち、次式を満たす点のフローを信頼性があるとしていた。

$$|(g * p)_x(h * p)_y - (g * p)_y(h * p)_x| > threshold \quad (46)$$

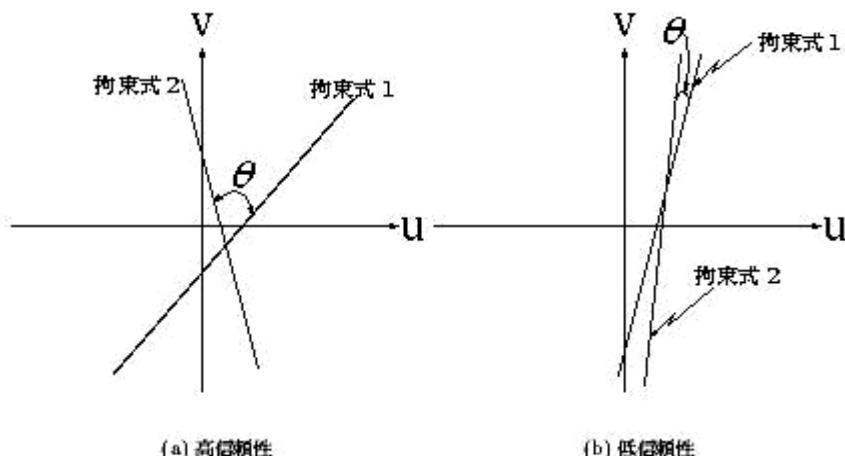
しかし、空間勾配には誤差があることを考えると、この評価値は空間勾配が大きい所の誤差に対しては、大きく影響を受ける。つまり、独立性がなくても、空間勾配が大きい所では、この式を満たしてしまうことがある。そこで、フローの信頼性の評価式として、上式を空間勾配で正規化した次式を用いる。

$$\frac{|(g * p)_x(h * p)_y - (g * p)_y(h * p)_x|}{\sqrt{(g * p)_x^2 + (g * p)_y^2} \sqrt{(h * p)_x^2 + (h * p)_y^2}} > threshold \quad (47)$$

この式に物理的な解釈を加える。 \mathbf{q} を u, v 空間での 2 つの拘束式のなす角とすると、

$$\begin{aligned} \sin\theta &= \frac{\mathbf{G} \times \mathbf{H}}{|\mathbf{G}||\mathbf{H}|} \\ \mathbf{G} &= ((g * f)_x, (g * f)_y), \\ \mathbf{H} &= ((h * f)_x, (h * f)_y) \end{aligned} \quad (48)$$

となる。この式の右辺の絶対値は、式 (46) の左辺と等しいことから、式 (47) は、2 つの



拘束式が uv 空間でなす角がある程度以上大きいということを表す。また，画像の輝度勾配が小さい場合，2 つの拘束式を解く時の分母の絶対値が小さくなり，信頼性が低くなる。次式を満たすような点ではオプティカルフローの信頼性があるとする。

$$(g * p)_x^2 + (g * p)_y^2 + (h * p)_y^2 + (h * p)_x^2 > threshold \quad (49)$$

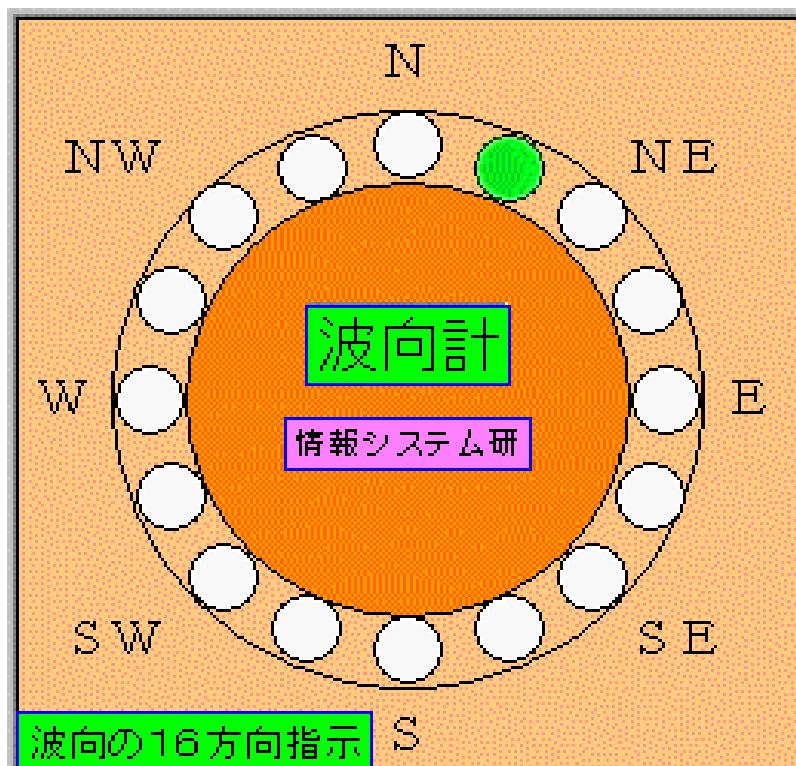
最終的に式 (47)(49) の両方の式を満たす点ではオプティカルフローの信頼性があるとする。

第四章：波向計測システム処理の流れ

本研究では画像処理手法を波向計測への応用を試みたものである。基本的な考え方は人間の目で波向を判断するのと似ている。ビデオカメラで撮影した波の白黒の輝度画像をコンピューターに取り込み。取り込んだ波の画像ファイルに対して、波浪画像の輝度変化が急激な峰ライン或いは谷ラインを抽出し、1フレーム画像の中の峰ライン或いは谷ラインから平均的波向結果を求める。さらに、複数フレームの波向結果を平均する。この間妥当でないと判断されるデータは除去してコンピューターのモニタに波向として16方向の一つを表示させる。実用システムでは同じように、繰り返して次回の波向出力結果を表示させ、時々刻々の波向出力結果をリアルタイムにて、画像処理手法の演算の元で波向を計測、演算、出力表示することを想定する。

白黒波浪の濃淡画像に対して、まず輝度ヒストグラムを求める。そしてヒストグラムのピーク値によって閾値を決める。決めた閾値をオリジナル画像に適用して二値化処理をする。二値化結果画像に対して平滑化してから細線化する。細線化の結果をラベリングして領域分割を行う。そして波浪の峰ライン或いは谷ラインの領域が得られる。領域分割した細線化の画像へハフ変換を実施して、何本の峰ライン或いは谷ラインの近似直線が抽出できる。それを平均にして一つの直線結果になって、1フレームの波向結果とする。このように何回（複数フレーム）の波向結果をもう一度平均して、最後一回の波向としてコンピューターのモニタに出力表示する。繰り返してリアルタイムにて次回、次々回……波向結果を出力表示する。

波浪の伝わる方向はオプティカル方法によって、波浪の移動方向ベクトルを求めて判断する。連続の2フレーム画像をオプティカル演算かけて、上記の近似直線の抽出するように何回の方向を平均してから今回の結果とする。画像のノイズなどの影響を低減するため、波浪移動方向ベクトルと抽出した峰ライン比較して、ベクトル方向が峰ラインの上方か、下方かを判断する。実際の波浪伝達方向としてはベクトル方向が峰ラインの上方か、下方かをオプティカル・フロー法によって決定して、峰ラインの垂直方向を取る。



上図はコンピューターのモニタに 16 方向の出力結果を示す。

本研究では水槽実験と湾岸実験の実波浪画像など色々を試して造りました。



複雑海洋実波浪原画像 ヒストグラム 波浪画像の二値化結果 波浪画像の細線化結果



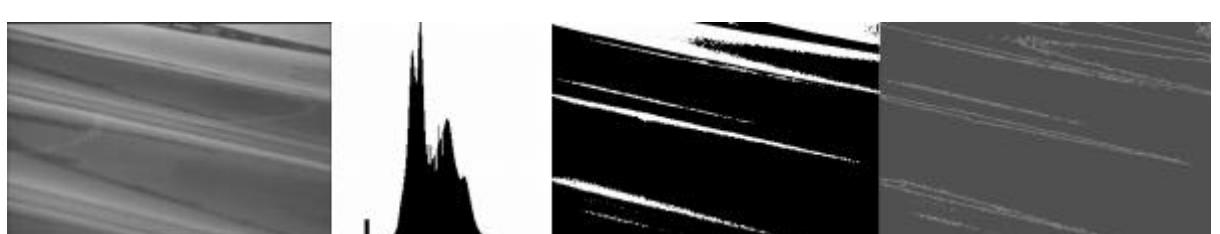
複雑海洋実波浪原画像 ヒストグラム 波浪画像の二値化結果 波浪画像の細線化結果



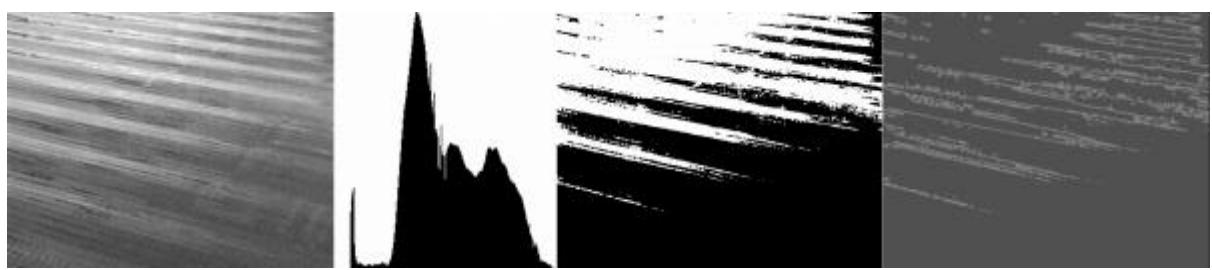
静かな海洋実波浪原画像 ヒストグラム 波浪画像の二値化結果 波浪画像の細線化結果



湾岸実波浪原画像 ヒストグラム 波浪画像の二値化結果 波浪画像の細線化結果



水槽長周期波浪原画像 ヒストグラム 波浪画像の二値化結果 波浪画像の細線化結果



水槽短周期波浪原画像 ヒストグラム 波浪画像の二値化結果 波浪画像の細線化結果

結論で言えば：条件のよい室内実験について、安定した結果が得られている。また、うねりと風波の実画像ともに開発した手法で判別できることが分った。今後は論文で述べた波向特定手法における信頼性の検証と向上が課題である。

第五章：時機製作時の考え方

1. コスト関係：

コストを考えると、CCD フレームセンサーが安い、速い三菱会社の網膜センサーをせんたくする。CPU が日立会社の H8/3034 シリーズマイコンとか、普通のペンティアム マザーボードを選択する。通信速度の面ですが、シリアル、パラレル、PCI ビデオ A/D ボードとも考えられる。

2. 精度と使いやすさ：

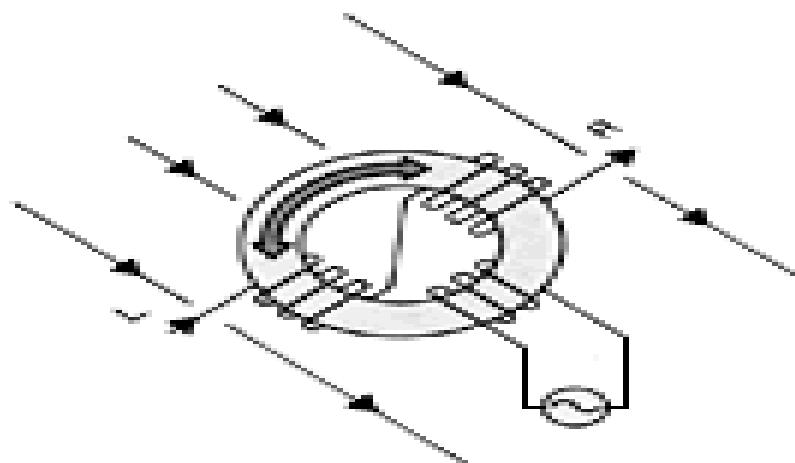
ハードウェア とソフトウェア が一緒に精度を決める。アルゴリズムが賢くなら、ハードが速ければ、精度がよくなる。使いやすさを考えると、マイコン制御の方が体積小さくで済む。そして防振、防水、軽量などもよく考えなければ成らないことである。

3. 必要な発展機能：

(1.) 磁気フラックスゲットセンサーの組み込む

同時に実際の波向の地理方位を波向計で直接記録なら、リアルの方位情報が必要となる。それは磁気フラックスゲットセンサーの組み込むことで、解決できる。超拘束透磁率材と特殊基板製造技術により、磁気フラックスゲットセンサーは地磁気（日本周辺では 0.3 ガウス程度）の 1/100 の磁束密度（200 ~ 300nT）に感応する高感度トロイダル型磁気センサーである。船舶、車輌、航空機、海洋ブイ、オートパイロットなどの方位計として使える。フラックス・ゲートセンサーの原理を下記の図で述べる。

フラックス・ゲートセンサーは、高透磁率コアを交流駆動コイルにより飽和させる。外部磁界の影響がない状態では、半波サイクルにおける周期は等しくなるが、一方向からの磁束がコアを通過すると半波サイクルのどちらかが早く飽和した、他方は遅れて飽和する。これをトロイダルコイルで行った場合 1 方向への励磁状態において発生した回転磁界は右と左で反対の向きとなる。この状態のコアに左右、各逆向きの起電力を発生するようにセンスコイルを巻き、センス電圧を外部に出力する。この様なセンスコイルを 2 組 (X-コイル、Y-コイル) 直交して配置することにより、トロイダル型フラックス・ゲートセンサーは X、Y ベクトル値に対応した電力電圧を発生させる。

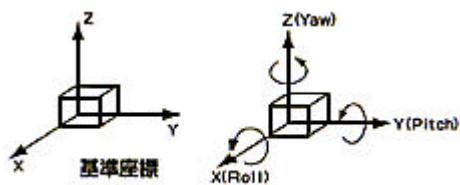


フラックス・ゲートセンサーの原理図

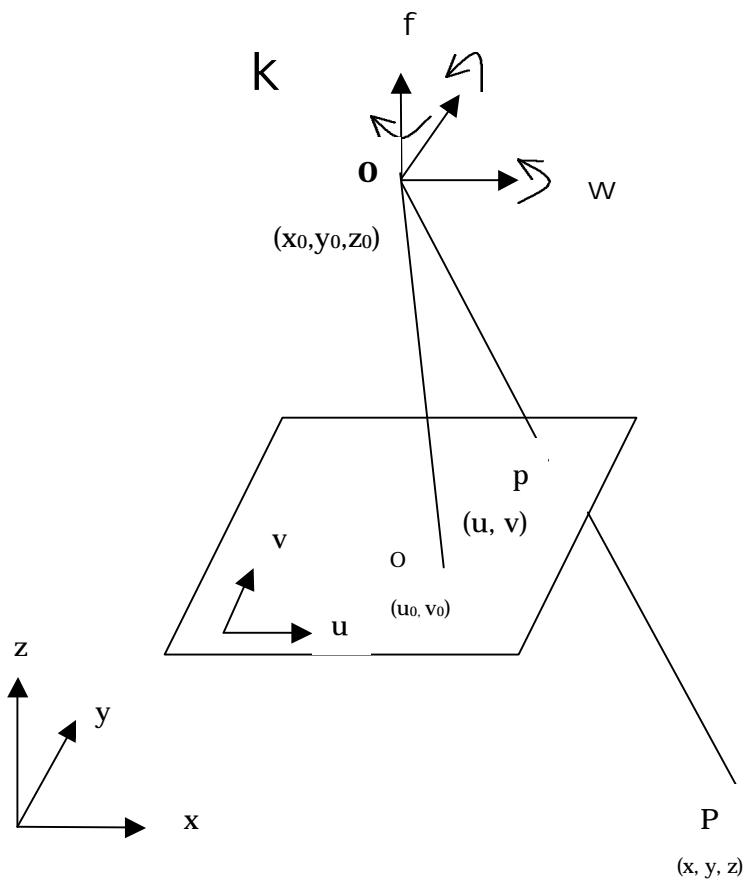
フラックス・ゲートセンサーの計測帯域は DC ~ 10KHz 程度の交流磁界までをアナログ電圧で出力する。市販の A/D ボードをお手持ちのパソコンに増設する事で容易に計測する事ができる。従来の磁気センサーでは、難しかった超高速サンプリングを行うことが可能である。

(2 .) 傾斜三軸加速度センサーの組み込む

船舶の揺れによるビデオカメラから取り込めた画像の振れを抑えるため、ビデオカメラに3軸のモーションセンサーを付ける事が考えられる。船舶の動きで、入力画像が振れるのを解決なら、波向への判断精度も一層高くなる。傾斜三軸加速度センサーの組み込むにより、ビデオカメラの動きのピッチ・ロール・ヨーの各角度を検出し、そして画像処理の座標変換にて、画像の振れを修正できる。下図が基本の座標関係を示す。



基本座標関係図



画像処理の振れ修正ための座標関係図

ここで、撮像系の投影中心 O の位置 (X_0, Y_0, Z_0) 姿勢 (W, Q, K) 主点の位置 $o(u_0, v_0)$ 対象座標 $P(x, y, z)$ 画曾座標 $P'(u, v)$ はいずれも時刻 T の関数である。それらの座標関係が下記の(50)式～(53)式で示す。

$$u = -c \frac{a_{11}(x - x_0) + a_{12}(y - y_0) + a_{13}(z - z_0)}{a_{31}(x - x_0) + a_{32}(y - y_0) + a_{33}(z - z_0)} + u_0 \quad (50)$$

$$v = -c \frac{a_{21}(x - x_0) + a_{22}(y - y_0) + a_{23}(z - z_0)}{a_{31}(x - x_0) + a_{32}(y - y_0) + a_{33}(z - z_0)} + v_0 \quad (51)$$

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{21} & a_{31} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} (u - u_0) \\ (v - v_0) \\ -c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} x_0 \\ y_0 \\ z_0 \end{bmatrix} \quad (52)$$

$$\begin{bmatrix} a_{11} & a_{21} & a_{31} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\omega & -\sin\omega \\ 0 & \sin\omega & \cos\omega \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos f & 0 & \sin f \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin f & 0 & \cos f \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos k & -\sin k & 0 \\ \sin k & \cos k & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (53)$$

(3.) 内蔵ライトの輝度補正：

入力して画像に変換された波浪情報を次の段階で一般には前処理とも呼ぶ補正の処理を行う。未知の入力画像は一般に各種の歪み、ノイズ、周辺減光等を含んでいる。特徴抽出を行う前にこれらを除去しておく必要がある。補正として、ノイズ除去、平滑化、鮮鋭化、さらに画像の2次元フィルタリングと呼ばれる処理、そして特徴抽出が容易にできるよう多値画像から2値画像に変換し(2値化)、認識対象とする図形や文字の骨格線を抽出する細線化操作がある。また、雨天とか夜に使うため、実用の波向計は内蔵する補助光源としてのライトが必要である。勿論、照明システムとして光源(ハロゲン、LED、蛍光灯など)照射方式(反射式、同軸落射、バックライトのような透過式など)点灯方式(交流、直流、パルス、自動点灯など)も検討しなければならないことである。

(4.) アルゴリズムの向上：

精度をよくするために、良いアルゴリズムが不可欠である。アルゴリズムの向上のために、ウェーブレット変換とか、濃淡画像の直接細線化とかの手法も考えられる。

ウェーブレット変換とはある波形からマザーウェーブレット(mother wavelet)と呼ばれている波形と相似な波形だけを抽出する、一種のフィルターのようなものである。マザーウェーブレット (t) は既存のものを使用してもいいし、自分で定義して使用することもできる。ただし、台が有界(サポートコンパクト)で振動的でなければならない。このマザーウェーブレットをスケール(伸縮)、トランスレート(平行移動)することによって、解析する波形中のこれと相似な様々なスケールの波形を、時間軸情報を失うことなく抽出することができる。以上のことを見たうエーブレット変換の定義式が次式である。

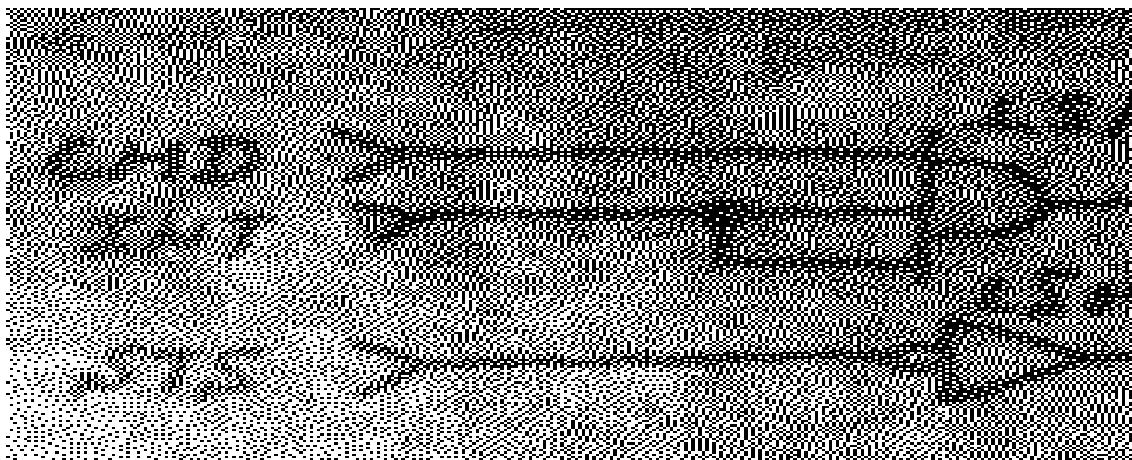
$$W(a,b) = \int_{-\infty}^{\infty} \frac{1}{\sqrt{a}} y \left(\frac{t-b}{a} \right) f(t) dt \quad (54)$$

積分の範囲は， $-$ から ∞ となっているが，マザーウエーブレットがサポートコンパクトである為， $-$ から ∞ まで計算する必要はない。 $W(a,b)$ はウエーブレット係数（以下ではW係数と示す）と呼ばれ，マザーウエーブレット $y(t)$ との相似性の強さを示す量である。また， $y(t)$ の上の棒は複素共役であることを示している。W係数は，自身の情報のほかに，スケール情報と時間情報の2つの情報を持っているので，スケールと時間を軸に，W係数を高さとする等高線として結果を出力する。

濃淡画像の細線化(Gray-scale Image Thinning) が一種の新しい特徴抽出方法である。



上図で分かるように、細線化(thinning)とは、文字やフローチャートなどのような線図形の連続した中心線を抽出する手法です。抽出された中心線が最小のデータ量で元の画像の基本的な構造情報を表しているので、細線化は文書画像などでは処理の重要な一環となっている。従来の研究の中では、二値画像を対象とした手法が数多く提案されているが、濃淡画像から直接、谷線や尾根線と言った構造特徴を抽出する新しい手法もあった。濃淡画像の細線化は画像に対する二値化処理を必要ないので、標高地図から谷線や尾根線の抽出、徐々に変化している背景に書かれた文字や線図形の抽出のような二値化の難しい応用では重要な役割を果たせる。下図示したのが



濃淡画像の細線化のもう一例である。



上図は濃淡画像の直接細線化の例である。

(5.) 風速、風向の参照及び統計方法の応用

実用の波向計の信頼性を追求するために、風向、風速、風温など気象情報の参照が考えられる。実際今も人工衛星などの波向情報もあおよそ風と天気の情報からの推測の結果である。そして、画像処理手法の計算にて、人工観測などより早く結果出せる。信頼性向上のため、統計の方法を利用して、何回の計算の統計結果により、一回の出力とする。

統計的手法は、画像処理でも基本的な道具として、さまざまな場面で利用されている。基本的な統計的手法、特に、多変量データ解析手法および最近画像処理でも盛んに使われるようになってきたロバスト統計、EM アルゴリズムやモデル選択手法などの統計手法が画像処理の中よく使われる。

第六章：後書き

1. 終りに：

室内の実験水槽で造波機により生成された波は最も素直な性質を備えており、波の峰や谷は容易に判断できる。しかし、実際の海岸で見られる波はこれよりやや複雑であり、静穏な海では波の峰や谷の判断は比較的容易である。また荒れた海では単純な波の峰や谷という概念ではとらえきれない；平穏な海でも波長が長く波高が低い波は視野との関係で十分にはとらえきれない。

室内水槽の造波実験が安定した結果を得られた、実際のより簡単な湾岸波浪も良い結果を得られた。画像上での波向推定結果は通常の人間の目視判定（16方位）と匹敵し得るものであった。規則波なら安定した結果を得られる、うねりと風波ともに画像処理手法で波向計測できることが分かった。コストと据付などを配慮する実用計器として、画像処理手法による実現できる。干渉、屈折、回折などより複雑な波浪に対して、計測の信頼性が課題として残っている。このような実験により種々の知見が得られ、画像処理による波向計測の可能性と有効性が示せた。

波浪情報の重要な要素である波向の計測方法について画像処理を用いて新しい方法を提案し、実験を行った。うねりと風波共に画像処理手法で判別できることができた。今後は本稿で述べた波向特定手法における信頼性の検証と向上を計ると共に引き続き波浪の画像処理観測手法の開発にも努力する；リアルタイム計測できる、移動据付しやすい、安価実用な携帯型波向計の開発をもめざす；波向結果の信頼性向上のため、風温と風向などもコンピューターに取り込んで参考する。

2. 参考資料：

- [1]. Hu Ye, Zeng Xiaoming, Masaki Oshima 2000年 “Analysis and Measurement for Direction of Sea Waves with Computer Vision Technique”, IMECE ’ 2000 pp85-89 Shanghai, China
- [2]. 桑島 進、徳長 航 2000 年 “船舶乗組員による風観測の特性” 日本航海学会第 101 回講演会
- [3]. 磯崎 一郎、鈴木 靖 2000 年 “波浪の解析と予報” 東海大学出版社
- [4]. 桑島 進、渡部 動、安田 明生 1994 年 “マイクロ波ドプラ - レーダを用いた波向計開発” AMTEC pp95-106.Japan
- [5] Barber. N. F., 1961. “The direction resolving power of an array of wave detectors” Proceedings. Conf. Ocean Wave Spectra. Prentice-Hall, Inc., Englewood Cliffs, N. J. pp. 137-150

3. くれぐれも感謝する：

最後に本研究の指導にあたって、大島正義先生及び波浪環境解析特論授業をした桑島進先生、そして本学の実験水槽担当の三田先生へ心から感謝したい。本研究の実験中本学博士後期課程三年生の曾暁鳴さんからも色々助言と帮助をくれて、一緒に感謝します。さらに本研究が中間発表と毎週のゼミ・ミニ ティングにて、情報システム研究室の方々からも色々指摘などを戴いて、くれぐれも感謝の意を申し上げます。

4. 論文に関するご意見の連絡：

論文に関するご意見、ご感想がございましたら、或いは問い合わせなどが下記のメールアド

レスにてメールでお願いします。

大島正毅 : Mail:oshima@ipc.tosho-u.ac.jp

Tel:03-5245-7417

呼 煉 : Mail:huyanyiren@hotmail.com

Tel:03-3521-4010

曾 晓鳴 : Mail:soulivesou@yahoo.co.jp

Tel:090-4927-5974

2000年01月