

CT 型濁度計を用いた白波砕波上飛沫量の時空間分布特性 に関する研究

小林 智 尚*・杉 浦 公 彦**

1. はじめに

白波砕波上に発生する海水飛沫は大気海洋間の潜熱・顕熱輸送に大きく寄与する現象として地球の気候予測に重要である一方、海塩粒子の発生要因であるため塩害災害にも大きく関わっている。したがってこの海水飛沫の特性を知ることは環境問題や災害対策上重要である。

Hayami and Toba (1958) や Toba (1959) はこの飛沫の発生について理論および実験をとおして検討し、その発生メカニズムを明らかにしている。また松永ら (1999) は室内実験から白波砕波上の飛沫量を海面上での風の摩擦速度と関係づけ、その算定式を提案している。

しかしながらこの海水飛沫量のミクロな時空間分布特性については不明な点が数多く残されている。これは対象とする白波砕波上の領域が海水飛沫を含む混層流領域であるために実験計測・数値解析ともに困難だからである。とくにこの飛沫量の時間的変動についてはほとんど議論されていない。

そこで本研究では佐藤ら (1997) によって開発された、任意断面内の濁度分布をほぼ瞬時に計測しうる新しいタイプの濁度計、CT 型濁度計を用い、室内実験においてこの白波砕波上の飛沫の時空間分布を測定し、その特性を明らかにした。

2. CT 型濁度計について

本研究で用いた CT 型濁度計は医療用断層撮影装置とほぼ同じ原理で、透過光の減衰量から対象断面内の濁度分布を逆解析により求める光学式濁度計である。同様の原理の適用した計測機器としては坂井 (2000) が開発したボイド率計などがある。その中でも本研究で用いた CT 型濁度計は、1) 可動部を含まないために高速の計測が可能、2) 様々な流れに対してその流れを乱さずに適用可能な構造、という大きな特徴を有している。

この CT 型濁度計の構成図を図-1 に示す。図に示されている通り、この濁度計はそれぞれ 12 個の発光素子と

受光素子で構成されている。そして、任意の発光素子からの光の透過受光量をすべての受光素子について計測する。これによってすべての発光素子と受光素子を結ぶ直線上での光の透過減衰量が得られる。この減衰量の情報から逆解析により、対象断面内での濁度分布に対応する透過光減衰率の空間分布を推定することが可能である。計測部に可動分がないため、1 断面の透過光減衰率分布の計測は約 0.1 秒で終わることができ、断面内の減衰率分布の連続計測も可能である。また計測対象断面の大きさは図-1 に示すとおり 300 mm×480 mm である。

計測された各光学経路上での透過光減衰量から空間の透過光減衰率空間分布を推定するには仮想荷重法を用いた逆問題解析手法を用いている (日野・佐藤, 1998)。この手法は弾性平板を仮定し、その平板上の複数点に荷重を加えることによって表れる平板の変形量の分布を透過光減衰率の分布と見なし、最適変形量を表現しうる荷重を求める逆推定手法である。

本研究で対象としている白波砕波上の飛沫の計測に対する CT 型濁度計の適用性については次節で検討する。

3. 白波砕波上飛沫の計測

(1) 実験装置および条件

海水飛沫の室内実験では図-2 に示す、上部に風路を有する長さ 15 m、高さ 1.0 m、幅 0.4 m の風洞水槽を用いた。実験ではこの水槽に水深 0.45 m まで水を満たした。この水槽には循環流装置が設置してあり、底面近傍

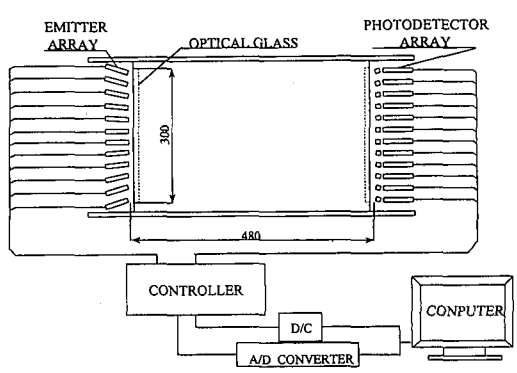
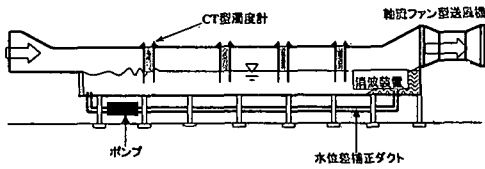


図-1 CT 型濁度計の構成図

* 正会員 工博 岐阜大学助教授 大学院工学研究科環境エネルギーシステム専攻
** エヌ・ティ・ティ・システム開発(株)



図一 風洞水槽

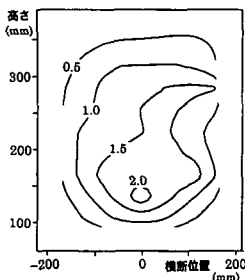
での戻り流れや風応力による吹き寄せの効果を軽減している。またこの図にはCT型濁度計の設置位置も示している。このようにここでは吹送距離2.76 m, 5.76 m, 8.30 m, 10.40 mの位置において、風洞の軸と直交する鉛直断面内の白波砕波による飛沫の分布をCT型濁度計を用いて計測した。計測断面内を水波が通過する場合には、気層と液層との光の屈折率の違いにより、光学的なCT型濁度計では計測が不可能である。そこで計測断面内を水波が通過しないよう、この断面を静水面より高さ75 mmから375 mmまでと設定した。

また実験条件としての平均風速は12.7 m/s, 14.5 m/sの2通りとした。

(2) 計測結果の一例 (CT型濁度計の特性の検証)

ここでは計測結果の一例を示し、CT型濁度計の特性と白波砕波上の飛沫の計測への適用性を議論する。

図一3に、平均風速12.7 m/s, 吹送距離5.76 mの断面内における飛沫の断面内平均分布を示す。飛沫量と透過光減衰率との関係は飛沫の粒径などにも大きく依存するのでこれらの図ではこの減衰率の空間分布のままで表示する。今回飛沫の存在する空間を通過する光の減衰率と飛沫量の関係は明らかにできなかった。さらに光の透過量は飛沫の濃度だけでなく、飛沫水粒子の大きさによっても大きく異なると想像できるが、松永ら(1999)は室内実験による結果として海面上方ほどこの飛沫水粒径が小さいことを示している。このことは、透過光の減衰率と飛沫量が単純には対応していないことを示している。したがって、本論文ではこの透過光の減衰率で飛沫を表現することとどめ、飛沫量への換算は行わない。



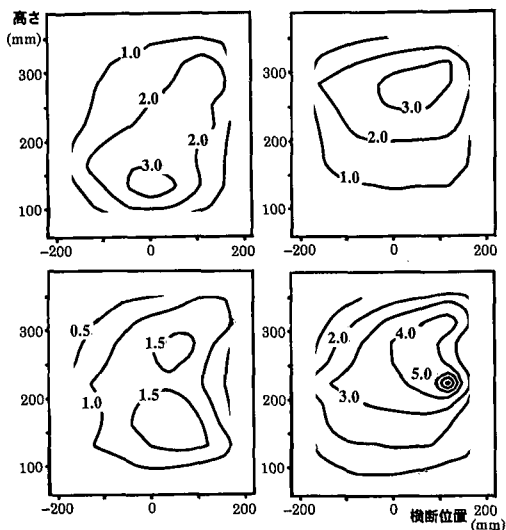
図一3 平均飛沫 (透過光減衰率, 相対値) 分布計測結果の一例 (平均風速12.7 m/s, 吹送距離5.76 m)

またこの図において飛沫の断面内平均分布は中心よりやや下方で最大濃度を示している。このように飛沫の最大濃度を示す点は水面近傍に近く、実際の現象の特徴を定性的に再現している。しかしながら測定断面周辺部においてはその濃度が小さくなっている。特に測定断面の下端は水面ごく近傍となり、飛沫の濃度も大きい。この図の計測結果ではその様子が再現されていない。この原因としては次の二つが考えられる。一つは任意の発光素子と受光素子1対で決まる光学経路が計測断面中心部に比べて周辺部では疎であるためである。これにより周辺部では透過光減衰率の分布を推定する逆解析において情報が十分ではなく、推定誤差が大きくなってしまう。もう一つは、透過光減衰率空間分布の逆解析に仮想荷重法を用いたためである。前節でも述べたとおり、この仮想荷重法による逆問題解析法では弾性平板を仮定する。しかし測定断面と同じ長方形の弾性平板は解析上、四辺あるいは四頂点が支持されている必要がある。このためこの弾性平板の四辺や四頂点に近い部分に対応する測定断面の周辺部では、解析上「支持」という条件に拘束され、ゼロに近い値から大きくずれることはなく、どのような場合でも小さい値を示すこととなる。以上のような理由から計測結果は測定断面周辺部において小さい値を表している。このうち本研究で対象としている白波砕波上の飛沫の計測については、特に後者の仮想荷重法による問題が大きいと考えられる。この問題を解決するためには解析手法に関して再検討する必要がある。

このように本研究の白波砕波上の飛沫の計測にCT型濁度計を適用するにはいくつかの問題がある。しかしながらこの濁度計では飛沫を実験水槽の外部から計測するために流れ場を乱さずに計測でき、しかも断面内の飛沫分布の瞬間値を連続して計測できるなど従来の計測器にはない長所を備えている。また測定断面周辺部とは異なり、中央付近では計測のための光学経路の密度も高く、仮想荷重法による解析でも拘束条件による問題がない。そこでここではこのCT型濁度計を用いて白波砕波上の飛沫の計測を進めることとした。

(3) 計測断面内の飛沫分布の時間変動

CT型濁度計を用いることにより、本研究では任意の瞬間における白波砕波上の飛沫の空間分布を捕らえることができる。平均風速14.5 m/s, 吹送距離5.76 mの断面において計測された飛沫による透過光減衰率の空間分布の瞬間値の一例を図一4に示す。このように飛沫の断面内分布は大きく変動しており、その最大値やその発生地点が時々刻々変化していることが分かる。特に、飛沫による透過光の減衰率についてはこの図に示されている通り、2倍以上も変動している。このように水面近傍の飛沫量が時間とともに大きく変動していることは、松永ら



図—4 瞬間飛沫（透過光減衰率，相対値）分布計測結果の一例（平均風速 14.5 m/s，吹送距離 5.76 m）

(1999) が指摘している通り，飛沫の生成が水面上でスポット的に現れる白波砕波によって行われており，この砕波の発生空間分布が飛沫の時間変動に影響を及ぼしているものと考えられる。実際目視による観測でも白波砕波による水粒子の放出や，風による波峰部での水粒子のちぎれで，飛沫が生成されている様子が見られた。

そこで本研究では計測された飛沫を計測断面内の平均量とともに，その変動量を標準偏差で表すこととした。

（4）吹送距離の違いによる飛沫について

ここでは吹送距離の異なる各計測断面における飛沫について，その平均値と標準偏差をもとに，吹送距離による飛沫の分布特性について議論する。図—5 および図—6 に，それぞれ平均風速 12.7 m/s，14.5 m/s における各測定断面での飛沫による透過光減衰率の断面平均分布と各点における時間変動の大きさを表す標準偏差の分布を示す。これらの図においては標準偏差の分布でも計測断面周辺部で小さい値が現れていることが分かる。これは前節において飛沫の平均分布で示したのと同様，仮想荷重法による逆解析法を用いたことによってこの計測周辺部はゼロに近い値に拘束されるためである。このように断面内の分布では計測断面周辺部において推定誤差が大きいものの中心部近傍では定性的に実験結果を再現しているものと考えられる。したがって，これらの図では主に計測断面中心部での結果をもとに検討する。

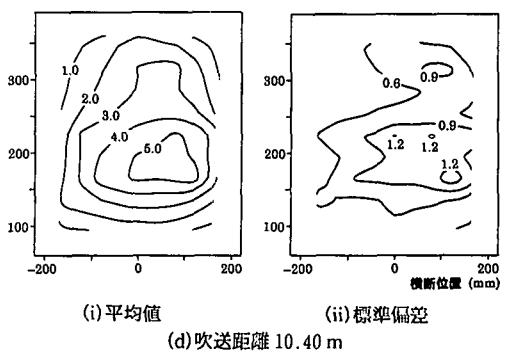
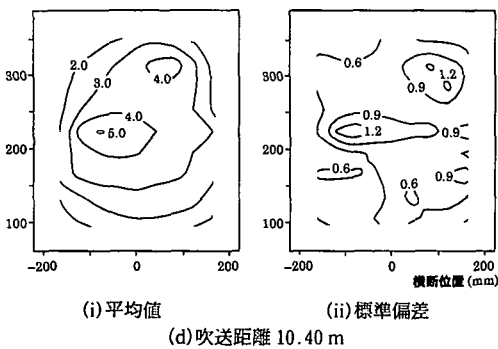
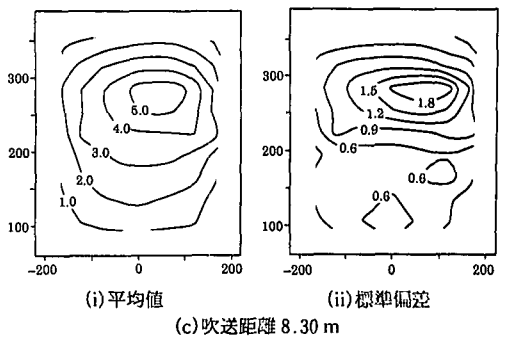
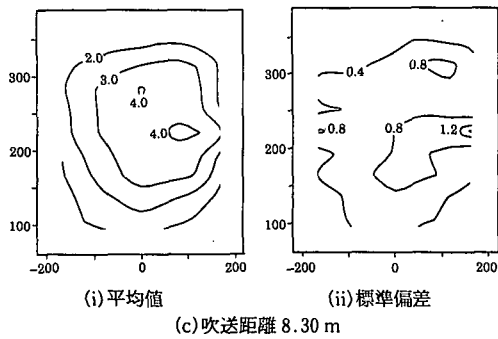
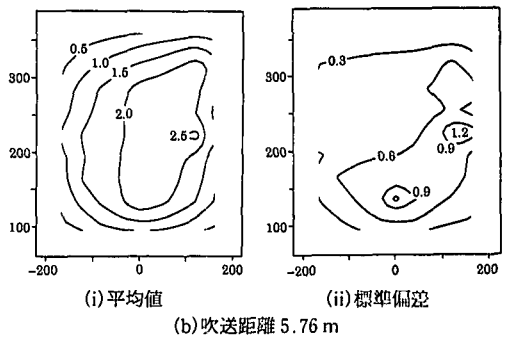
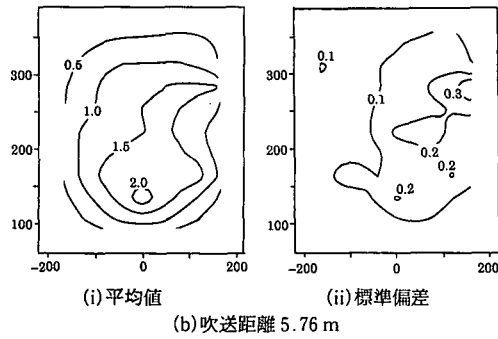
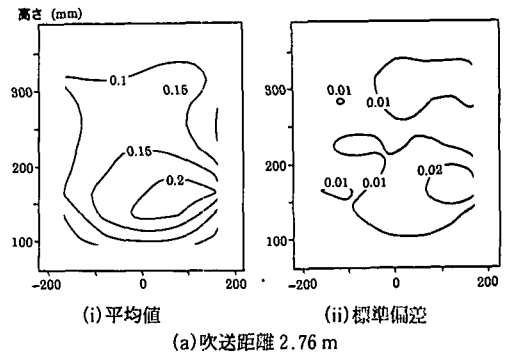
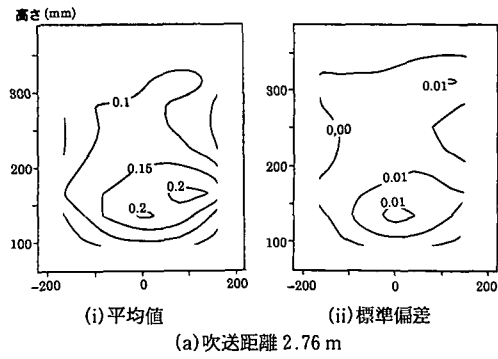
飛沫の断面内平均分布を見ると，ほぼどの断面においても計測断面中央より下方側で最大値を表している。これは，誤差の大きい計測断面周辺部を除いて，水面近傍で飛沫が多いことを示している。ただし吹送距離が大き

くなるにしたがって，飛沫の最大を示す地点が徐々に上方に移動していく傾向が見られる。またこれと同様に飛沫の時間変動を表す標準偏差の分布においても，水面近傍で最大値を示す分布形から，断面一様分布へと変化する傾向を示している。このような傾向は，吹送距離の短い地点では風上からの移流される飛沫が少ない状態で，風波による空中への飛沫の供給が多く行われることによってその供給源である水面近傍に飛沫が集中しているために現れると考えられる。そして吹送距離が大きい地点では風上からの飛沫の供給が大きくなるため，相対的に水面からの飛沫の供給は少なくなり，したがって飛沫分布の最大地点も上方に移動する。

これらの特性をさらに検討するために図—7，図—8 および図—9 にそれぞれ計測断面内における，飛沫による透過光平均減衰率の最大値，標準偏差の最大値およびこの両者から求められる変動率を表す。ここで飛沫の変動率は，飛沫の平均値に対する標準偏差の比で定義した。

図—7 および図—8 から，飛沫の平均量や時間変動を示す標準偏差の値は吹送距離が大きくなるにしたがって急激に大きくなり，すぐに定常状態に達することが分かる。

これに対して図—9 で示されている変動率の空間分布では，吹送距離が大きくなり風波が発生・発達するにしたがってこの変動率が大きくなるものの，ある地点において最大値を示し，その後減少しながら定常値に近づく傾向が見られる。そして風速が大きい場合にはより短い吹送距離で変化率が最大を示している。このことからこの変動率の変化は風波の発達率に大きく関係しているものと想像される。またこの飛沫の変動率が一度最大値を取る理由として次のことが考えられる。目視観測などから，飛沫は水面全体で生成されるのではなく，白波発生部あるいは波頂部など限られた領域で生成される。したがってこれらの飛沫生成領域の風下ごく近傍などでは飛沫が多く存在し，逆に風上側では飛沫が少ないという空間変動が生ずる。そしてこの飛沫の空間変動が，固定点では飛沫の時間変動として観察されることになる。この飛沫の空間変動は風波の発達にしたがって大きくなると考えられる。一方すでに空中に存在し風上より移流してくる飛沫の分布はほぼ一様であると考えられる。したがって図—9 で定義した飛沫の変動率は，大まかに，その地点で水面から空中に放出される飛沫とすでに空中に存在している飛沫との比で表されることになる。ここで吹送距離の小さい領域を考えると，風波がまだ十分に発達していないために水面からの飛沫の放出量が小さいが，この地点では空中にある飛沫はきわめて少ない。そのため水面から放出される飛沫の時空間変動が顕著に現れ，飛沫の変動率は大きな値を示すことになる。吹送距離が大きくなるにしたがって，風波が発達し水面から放



図一五 計測断面内での飛沫による透過光減衰率分布(平均風速 12.7 m/s)

図一六 計測断面内での飛沫による透過光減衰率分布(平均風速 14.5 m/s)

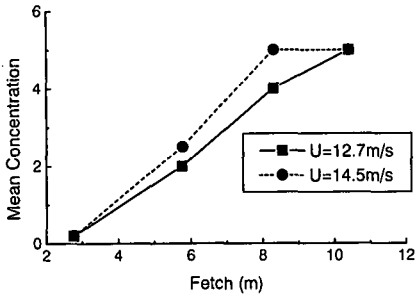


図-7 透過光減衰率分布(相対値)の最大値の空間分布

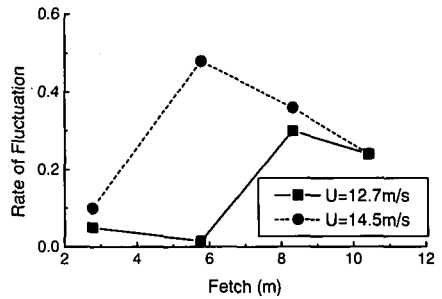


図-9 飛沫の変動率の空間分布

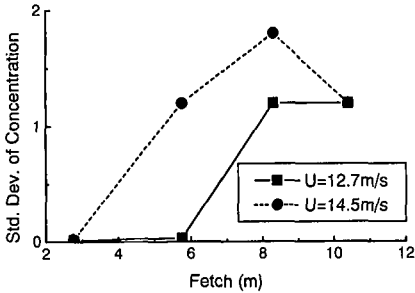


図-8 透過光減衰率の時間標準偏差値最大値の空間分布

出される飛沫も多くなるので、この傾向は吹送距離がある程度大きなところまで見られ、それにしたがって変動率も増大すると考えられる。しかし、ある吹送距離に達すると水面から放出される飛沫量に比べて空中に存在する飛沫の量は十分多くなる。この段階では水面から放出される飛沫の変動成分は移流されている飛沫に比べて小さくなるために、変動率は徐々に低下する。そして定常状態に達する。以上のような理由により、図-9に示される特性を示す変動率の空間分布が現れると考えられる。

4. おわりに

本研究では、白波砕波上の飛沫の空間分布やその時間変動の特性について室内実験でCT型濁度計を用いて計測・検討を行った。

透過光減衰率の空間分布を計測するこのCT型濁度計は、計測対象断面の周辺域でゼロに近い計測値を推定してしまうなどの問題点があるものの、対象断面内での分布を時系列的に計測することも可能であり、変動のある現象を捉える上では極めて有効であることが分かった。

一方白波砕波上の飛沫の分布として計測結果から大きな飛沫の時間変動が見出された。この変動は標準偏差で平均値の半分にも及ぶことがあった。この変動を示す標準偏差の分布の特徴として、風波の発生初期段階に対応する吹送距離の短い領域では水面近傍に集中して飛沫の大きな変動が観測された。そして比較的吹送距離の長い

領域では飛沫の時間変動が見られる領域が計測断面全体に広がった。またこの飛沫の時間変動を、飛沫の平均値に対する変動の標準偏差の比として表した変動率で表すと、吹送距離が長くなるにしたがってこの値も大きくなるものの、ある地点で最大値を示し、その後徐々に減少しながら一定値に漸近することが分かった。これは飛沫の生成領域が空間的に間欠的であるために変動率が現れるものの、吹送距離が大きい領域ではすでに気層中に飛沫が多く分布しているためにこの間欠的に飛沫が生成される様子が相対的に顕著に表れなくなるために変動率が低下してしまうものと考えられる。

以上のような白波砕波上の飛沫の空間分布とその変動特性を定性的に明らかにすることができた。

謝辞：本研究を行うにあたって、中央大学教授、日野幹雄先生および株式会社カノマックス技術研究所副社長、佐藤行成氏よりCT型濁度計を提供いただきました。ここに謝意を表します。

参考文献

- 坂井臣司 (2000): 期液二層流ボイド率分布とミスト濃度・粒径分布のCT計測法に関する研究, 岐阜大学大学院工学研究科博士論文, 147 p.
- 佐藤行成・常見 亮・日野幹雄 (1997): CT型レーザー土砂濃度二次元分布計の試作, 水工学論文集, 第41巻, 1091-1096.
- 日野幹雄・佐藤行成 (1998): CT型レーザー濃度計—仮想荷重法の応用による逆問題の解—, 水工学論文集, 第42巻, 565-570.
- 松永信博・榎田 操・鶴崎賢一 (1999): 強風によって輸送される白波砕波上の飛沫量と風応力の関係, 土木学会論文集, No. 635, II-49, pp. 113-116.
- Hayami, S. and Toba, Y. (1958): Drop production by bursting of air bubbles on the sea surface (I), Experiments at still sea water surface, Jour. Oceanogr. Soc. Japan, Vol. 14, pp. 145-150.
- Toba, Y. (1959): Drop production by bursting of air bubbles on the sea surface (II), Theoretical study on the shape of floating bubbles, Jour. Oceanogr. Soc. Japan, Vol. 15, pp. 121-130.