

砕波帯内の浮遊砂濃度に関する実験的研究

細 井 正 延*・安 藤 智 幸**

1. ま え が き

離岸堤・突堤・護岸などの海岸侵食防止工を合理的に計画する上に、砕波帯内での掃流砂だけでなく浮遊砂濃度の分布が重要な要素となる。すなわち、砕波帯内では浮遊砂濃度が大きく、しかも高濃度の浮遊砂が水面近くまで存在しており、これが沿岸流あるいは離岸流によって運ばんされる結果、そこでは海底地形の変動が著しい。とくに砕波帯内に護岸が設置され反射率が大きい場合には、発生する重複波によって浮遊砂濃度が大きくなることが予想され、そこには堆積が生じにくく侵食が現われやすいことになる。本研究は、まず護岸を設けない状態で、砕波帯内の浮遊砂濃度の汀線に直角方向の分布状態を実験によって調べ、次に砕波帯内に護岸を置いて砕波点と護岸との間の浮遊砂濃度の分布を調べて、護岸がない場合との比較を行なった。沖浜帯の浮遊砂についての研究結果はかなりあるが、砕波帯のものは二、三あるに過ぎない^{1),2),3),4)}。

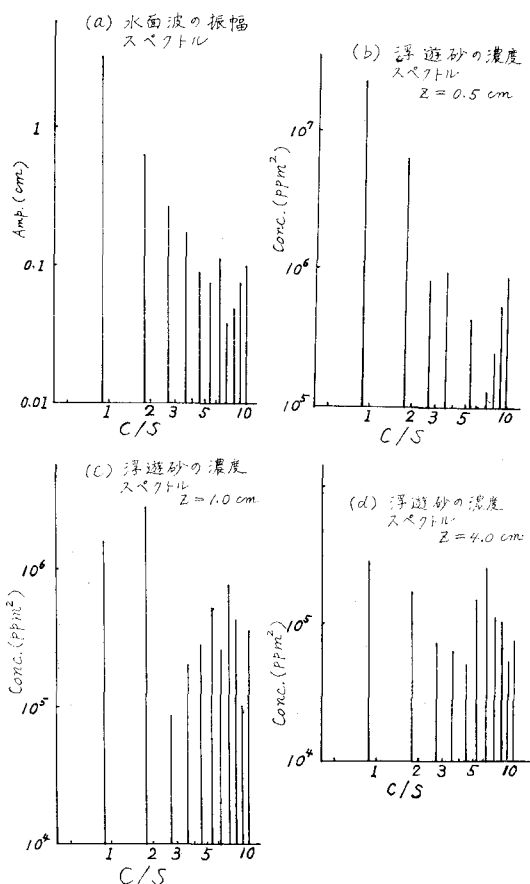
2. 実験装置と方法

実験は長さ 26.9m、幅 0.6m、深さ 1.2m の片面ガラス張り鋼鉄製の造波水槽を用い、造波装置と反対側の水槽端に、1:40 の斜面こう配になるように平均粒径 0.21 mm の砂を敷いて斜面上で砕波するようにし、またこの斜面に続いて水平部にも同じ砂を敷きならした。水平部水深 $h=26.5$ cm、水平部での波高 $H=7.8$ cm、周期 $T=1.12$ sec および $h=30$ cm、 $H=7.6$ cm、 $T=1.08$ sec の状態で行なった。浮遊砂濃度の測定には光電管式濃度計を用いたが、これは発光ダイオードとフォトランジスターからなっていて、水中を透過する光量を砂粒子が遮断する割合によって濃度を測定しようとするもので、受光面における光量の増減を電圧変換するようになっている。

3. 実験結果と考察

(1) 砕波帯と沖浜帯での浮遊砂濃度スペクトルの比較

水平部での波高 $H=7.8$ cm、周期 $T=1.12$ sec、沖波波形こう配 $H_0/L_0=0.044$ 、水平部の水深 $h=26.5$ cm で波を作用させて、砂床面に砂れんが発達した状態で、水平部 1 カ所、砕波帯内 2 カ所において、水面波の振幅スペクトルと、水底から $z=0.5, 1, 4, 7$ cm の高さの所での浮遊砂濃度のスペクトルを求めたが、その一部を図—1、図—2 に示す。図—1 の測定点での砂れんの波高 1 cm、波長 4 cm で、また図—2 では波高 1.2 cm、波長 7 cm であった。図—1 にみられるように、水平部（沖浜帯）では水面波の振幅は基本成分波がとくに卓越しており、これに対応して濃度スペクトルも $z=0.5, 1$



図—1 沖浜帯での水面波と浮遊砂濃度のスペクトル

* 正会員 工博 名古屋工業大学 教授 工学部土木工学科

** 正会員 工修 愛知県土木部河川課

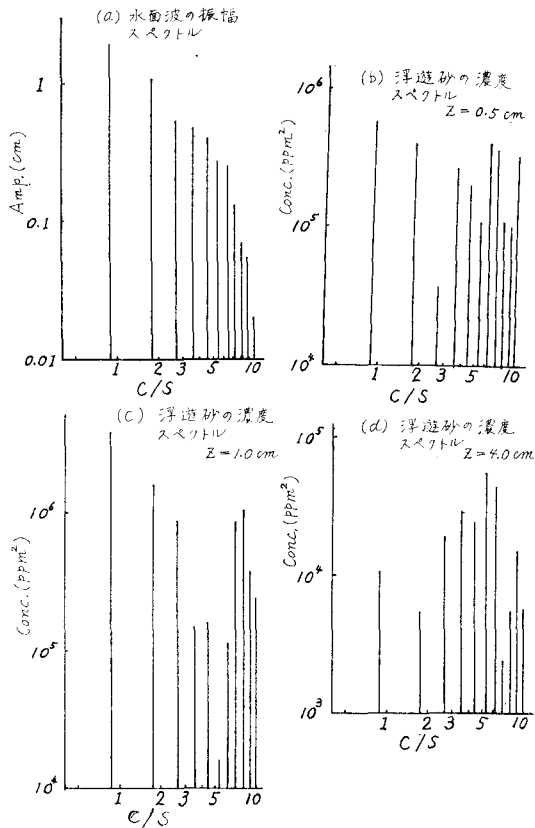


図-2 砕波帯での水面波と浮遊砂濃度のスペクトル

cm の所では基本周波数および2倍周波数成分が大きくなっている。 $z=4\text{ cm}$ でも基本周波数と7倍周波数の所にピークがあって周波数特性が若干存在している。図示されていないが、 $z=7\text{ cm}$ ではとくに卓越した成分がなく、ホワイトノイズ的である。砕波帯内では図-2のように、水面波の振幅は沖浜帯と異なって、基本周波数のほかに倍周波数成分がかなりの大きさをもっており、また濃度スペクトルは $z=1\text{ cm}$ の所では周波数特性がやや見られるもののその他の高さではとくに卓越した成分をもっており、ホワイトノイズ的であって、この傾向は砕波帯内のすべての場所に現われ、沖浜帯とは異なった現象である。

上記の結果から考えて、浮遊砂移動量は沖浜帯に対しては(1)式で表わされなければならないが、砕波帯内ではより簡単に(2)式のように、浮遊砂濃度および水粒子速度のそれぞれの時間平均値を乗じて求めればよいことになる。

$$q_s = \frac{1}{T} \int_0^h \int_0^T c(z,t) u(z,t) dt dz \dots\dots\dots (1)$$

$$q_s = \int_0^h \overline{c(z)} \overline{u(z)} dz \dots\dots\dots (2)$$

ここに、 q_s : 単位時間当りの浮遊砂移動量
 h : 水深
 T : 波の周期

$c(z,t)$, $\overline{c(z)}$: 底面から z の高さでの時刻 t における浮遊砂濃度、その1周期当りの時間平均値
 $u(z,t)$, $\overline{u(z)}$: 底面から z の高さでの時刻 t における水粒子の水平速度、その1周期当りの時間平均値

(2) 汀線に直角方向の浮遊砂濃度の分布

実験の種類は表-1に示すとおりである。

表の中で、 X_r は汀線から鉛直壁(護岸)までの距離、 X_b は汀線から最初の砕波点までの距離、 r はHealyの方法で測定した反射率である。また、 η , λ は砕波帯に形成された砂れんの高さおよび波長の平均値である。No. 1, 2は鉛直壁を設けない場合、No. 3, 4は1/40こう配の斜面上に最初から鉛直壁を置き、表-1のような波を約24時間作用させて砂面形状がほぼ平衡状態に達してから浮遊砂濃度の測定を行なったものであり、初期地形1/40こう配と呼ぶことにする。No. 5~8は1/40こう配の斜面上に鉛直壁を置かない状態で約24時間波を作用させて平衡状態に達してから、鉛直壁を砕波帯内に置いてさらに同じ波を24時間あてて平衡こう配をつくり(初期地形平衡こう配と呼ぶ)、測定を行なったものである。このように初期地形を変えて実験を行なった理由は、濃度測定の際の最終地形に与える初期地形の影響を検討するためである。

浮遊砂濃度は各測線上で、水底から上方に0.5, 1.0,

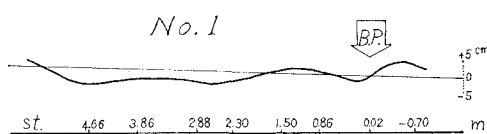
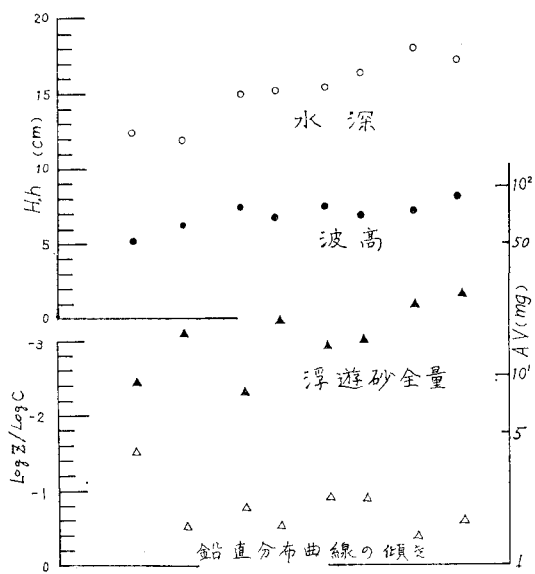
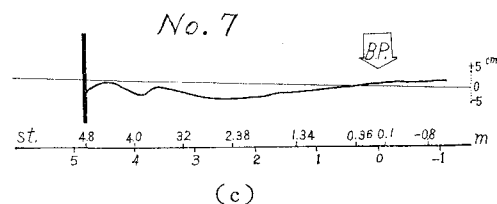
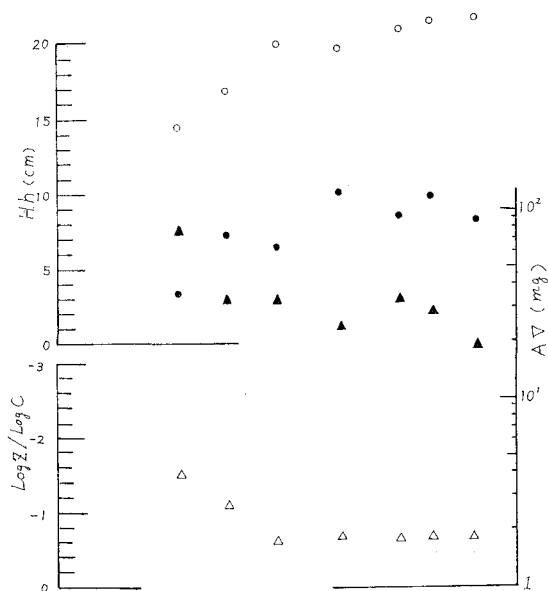
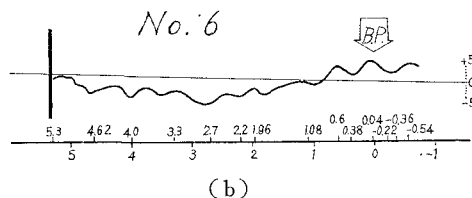
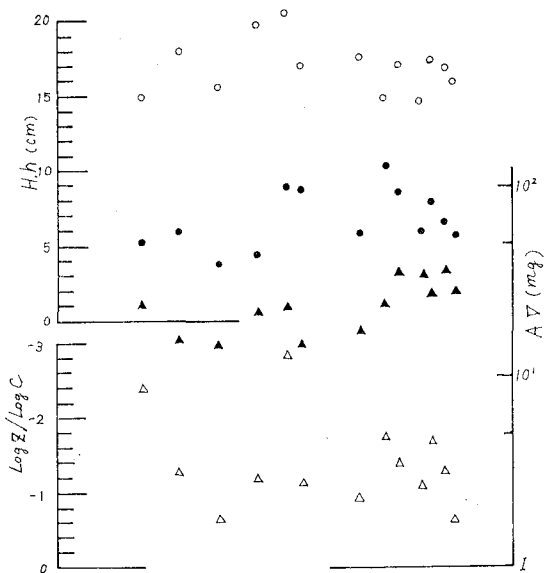
表-1 実験の種類

No.	H (cm)	T (sec)	H_0/L_0	h (cm)	s	η (cm)	λ (cm)	X_r (m)	X_b (m)	X_r/X_b	r
1	7.6	1.08	0.046	30.0	1/40	0.88	6.71	0.0	7.90	0.0	0.103
2	"	"	"	"	"	0.81	5.11	0.0	7.80	0.0	0.108
3	"	"	"	"	"	0.93	5.55	1.90	7.90	0.241	0.338
4	"	"	"	"	"	0.93	5.70	2.90	8.40	0.345	0.206
5	"	"	"	"	"	0.87	5.76	1.30	8.30	0.157	0.229
6	"	"	"	"	"	0.75	5.17	2.90	8.20	0.354	0.289
7	"	"	"	"	"	0.94	6.23	3.80	8.40	0.452	0.489
8	"	"	"	"	"	1.20	7.80	5.00	8.40	0.595	0.560

1.5, 2, 3, 4, 5, 7, 10 cm の所で測定し、その鉛直分布曲線から水底から水面までの 1 cm^2 の水柱に含まれる浮遊砂の質量（以後これを全量という）および鉛直分布曲線の傾き $\log z/\log c$ (z は水底からの高さ, c は z の所の浮遊砂濃度) を各測線位置で求めた。No. 1, 6, 7 について全量および傾きの場所的分布を示すと、図-3 (a)~(c) のとおりである。鉛直壁が置かれていない No. 1, 2 および鉛直壁がある場合でも反射率が小さい No. 3, 4, 5, 6 においては、全量は砕波点直前が最も大きく、岸側に近づくにしたがって次第に小さくなり、また鉛直分布曲線の傾きは汀線または鉛直壁のすぐ近くでわずかに大きく、その他の場所ではほぼ一定である。しかし、反射率の大きい No. 7, 8 では、岸側に近いほど全量が大きくなっている。また、No. 1~8 を比較すると、砕波点近傍での全量はいずれもほとんど同じ値であるから、鉛直壁が置かれてとくに反射率が大きい場合には、鉛直壁近くでの全量がかなり大きいことがわかる。

(3) 浮遊砂総量と反射率との関係

横軸に汀線から鉛直壁までの距離の無次元表示 X_r/X_b をとり、縦軸に反射率の無次元表示 r/r_b (r_b は鉛直壁を置かない No. 1 における 0.103 を用いた) をとって示すと、図-4 のようである。初期地形が 1/40 こう配の場合には点がばらついていて、初期地形が平衡こう配の場合には両者の間には良好な比例関係が存在して



(a)

図-3 砕波帯内の浮遊砂の分布

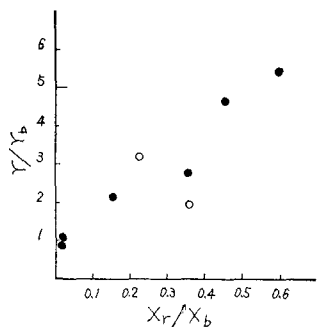


図-4 鉛直壁の設置位置と反射率との関係

いる。次に、横軸に反射率をとり、縦軸に砕波点から鉛直壁まで、または鉛直壁がない場合には汀線までの間に含まれる浮遊砂の総量（以後総量という）をとって図示すると図-5 のようで、反射率が 0.2 よりも小さい場合には総量は反射率に関係なくほぼ一定であり、0.2 を越えると反射率に比例して増大し、とくに 0.49, 0.56 の場合には著しく大きくなる。鉛直壁を沖側に設置するほど砕波点と鉛直壁の水容積量が小さくなるにもかかわらず総量が増大することは、重複波の効果が大きいことを意味している。

(4) 反射率が大きい場合の浮遊砂濃度

反射率が 0.49, 0.56 の場合には、重複波の腹と節の位置が水路方向に絶えず移動しており、砂床面には重複波に特有なサンドウエーブは現われていない。すなわち、水面波の記録をみると図-6 のようにビート現象が現われており、そのために水面近くの浮遊砂濃度は、重複波の節が測定点にきたときにもそれ以前の腹の影響が残ってかなり大きな値を示し、また水底近くでは腹がその位置にきたときにも濃度が大きいことが測定によって

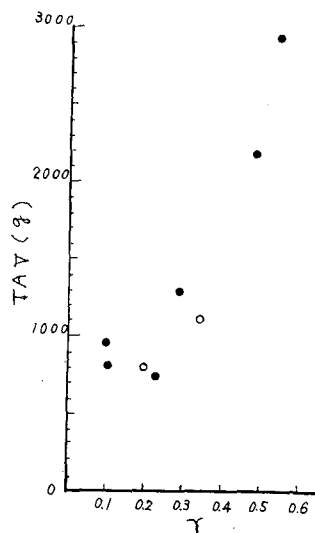


図-5 反射率と砕波帯の浮遊砂総量との関係

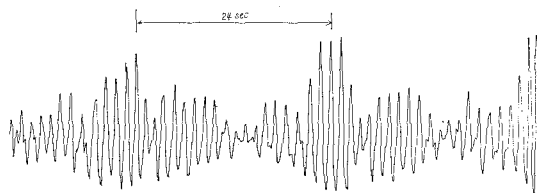


図-6 重複波高のビート現象

明らかになった。図-7 は測定点に現われた波高と浮遊砂の 1 周期の平均濃度との関係を示したもので、(a) は底面から 0.5 cm 上方で、(b) は 7 cm 上方のものである。黒丸は節と腹が時間的に移動する No. 7, 8 の実験値で、白丸は節・腹が移動しない場合である。白丸の実験は、鉛直壁によって反射波が生じてから、それがさらに造波板で反射して測定点に達するまでは、時間的にビートをうたない安定した波形記録が得られたので、その時間内に節と腹の間の数点の位置で濃度と波高を測定したものである。(a) から、底面近くでは節の所では白丸と黒丸の両者の濃度は同じであるが、腹の所では白丸の値は非常に小さいが、黒丸の値はかなり大きいことがわかる。これとは反対に (b) 図から、底面から 7 cm 上

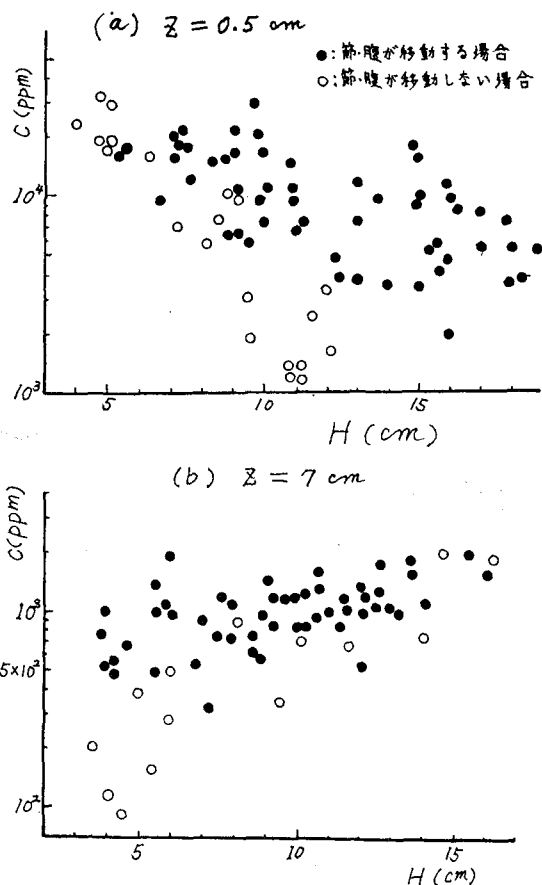
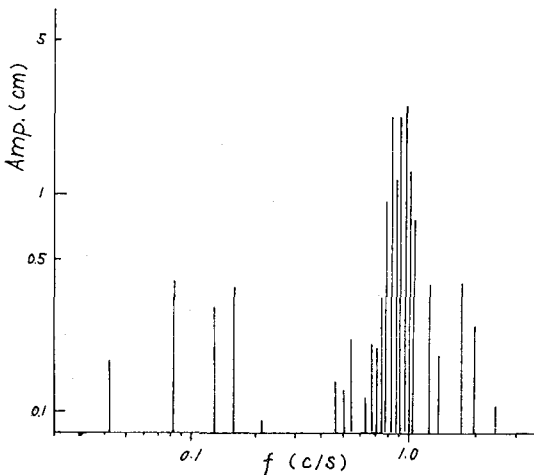


図-7 反射率が大きい場合の浮遊砂濃度の特性

方では節の所では白丸は濃度が小さいが、黒丸の値は大きく、腹の所では両者の値は等しい。これらのことから、腹と節が交互に現われる場合には、底面近くでは測定点に腹がきたときにもその前の節があったときの高濃度の影響が残って濃度がかなり大きく、また底面よりかなり上方では、測定点に節がきたときにもその前の腹のときの高濃度が影響して濃度が高くなることが推定される。

実験 No. 7, 8 のように、水面波に周期が約 24 sec と 12 sec のビートが現われていることが 図—6 から推測できるので、この重複波形について $1/24$ c/s ごとの調和解析を行なった結果が 図—8 で、基本周波数の振幅に比べてかなり小さいが $1/24$ と $1/12$ の振幅が存在していることがわかる。水路方向の一次の副振動周期を求めると約 23.5 sec となり、このような周期で砂床面上の水深が変化すれば、重複波の碎波点の位置も移動することになる。そのほか、ビート現象が発生する原因を考察してみたが、明確にすることはできなかった。節と腹の位置が周期的に移動する現象は、実際の海岸でも起こりうるであろうか。入射波がサーフビート現象を呈しながら進行する場合には、平均水深が変動するので碎波点の位置が周期的に移動し、実験と類似の現象が発生し、重複波による浮遊砂濃度が非常に高い値をとるものと思われる。



図—8 重複波高の調和解析

4. 結 論

(1) 碎波帯における浮遊砂移動量の算定には、浮遊砂濃度および水粒子の水平速度のそれぞれの1周期当りの時間平均値を乗じて求めればよく、沖浜帯よりも容易である。

(2) 水面から水底までの浮遊砂全量の汀線に直角方向の場所的分布をみると、鉛直壁があってもなくても碎波点近くでの全量はほぼ同じであるが、鉛直壁が置かれとくに反射率が大きい場合には鉛直壁の近くで全量はかなり大きくなる。

(3) 鉛直壁がない場合(反射率 0.103, 0.108)の碎波点と汀線の間の浮遊砂総量、および鉛直壁がある場合の碎波点と壁の間の浮遊砂総量と反射率との関係調べたところ、反射率が0.2より小さい場合には総量はほぼ一定で、0.2を越えると反射率に比例して増大し、とくに0.49, 0.56の場合には著しく大きい。

(4) 反射率が0.49と0.56の場合に浮遊砂総量がとくに大きくなる原因は、重複波の腹と節の位置が絶えず水路方向に移動するために、水面近くの浮遊砂濃度は節が測定点にきたときにもかなり大きく、また水底近くでは腹がその位置にきたときにも濃度が大きい結果によるものと考えられる。類似の現象は実際の海岸でも起こっていると思われるので、重複波が発生しているときの浮遊砂量を算定する場合には注意を要する。

本研究を行なうにあたり、実験の実施、計算に多くの労を煩わした大学院生の清水雅昭君、当時学部学生の伊藤秀司、牧野伸一両君に謝意を表する。また、本研究は文部省科学研究費特別研究(代表者大阪大学榎木教授)によるものであることを付記する。

参 考 文 献

- 1) 堀川清司・福井直治: 碎波帯内の浮遊砂と碎波形態, 第25回年講講演集, pp. 85~86, 1970.
- 2) 入江 功: 現地海岸での浮遊砂量について, 第22回海講論文集, pp. 313~317, 1975.
- 3) 田中則男: 碎波帯内における浮遊砂分布の一観測例とその観測方法について, 第22回海講論文集, pp. 319~324, 1975.
- 4) 細井正延・安藤智幸・清水雅昭: 碎波帯内の浮遊砂濃度分布に関する研究, 第31回年講講演集, pp. 7~8, 1976.