

分割型吸収式造波機を用いて水面に波で文字を描く技術

奥山悦郎*

Technology for Drawing Letters on Water Surface by Element Absorbing Wave Maker

Etsuro Okuyama

Test water tank with element wave maker is widely used to make ocean waves in the shipbuilding and construction fields. Mitsui Engineering & Shipbuilding Co., Ltd. has also built such wave makers including the one in the deep-sea water tank for National Maritime Research Institute and has accumulated technical expertise over the years for such element wave maker. The use of such technical expertise, it was considered, would make it possible to draw various letters on water surface. Mitsui Akishima Lab. and Osaka University tried to make this drawing method with element wave makers for amusement purpose. Letters can be constructed with various frequency ring waves expressed by Bessel function. We have developed the technology of controlling the signal of element wave maker for drawing letters. Letters appeared on the free surface in a moment as shown in Photo 1. This technology is now improved for better performance. By this technology, the application of this element wave maker for amusement purpose would more easily be made in near future.

船舶や土木分野では、海洋波を再現するため分割型造波機を用いた水槽が多数建造されてきた。三井造船でも独立行政法人海上技術安全研究所向け深海水槽などで分割型造波機に関する技術を蓄積してきた。(株)三井造船昭島研究所では、分割型造波機のアミューズメント分野への展開を視野に入れ、様々な円筒波の重ね合わせにより文字を造波する技術を大阪大学と共同開発し、写真1のように波面に文字を描けることを確認した。さらに、この技術を発展させ、任意の文字やマークを短時間で造波できる新たな造波方法を開発した。この造波方法により様々な水面を容易にデザインできるようになるので、分割型吸収式造波機及び造波技術をアミューズメントの世界で利用する可能性がより高まった。

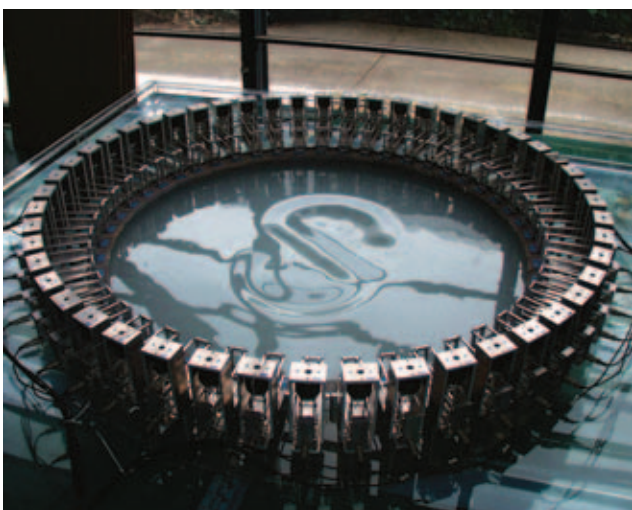


写真1 文字「S」の造波の様子
Letter [S] on Free Surface

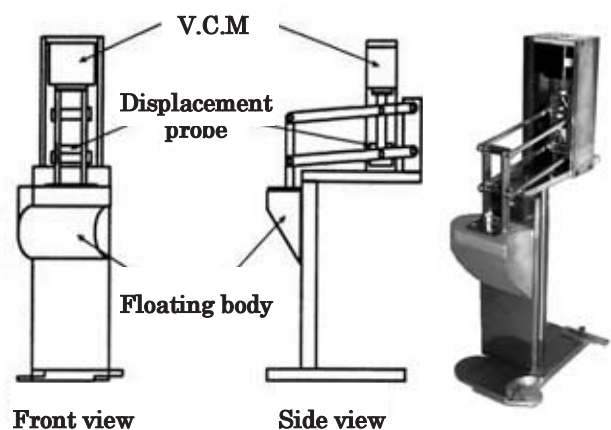


図1 AMOEBA を構成する分割型吸収式造波機
Element Absorbing Wave Maker

* 株式会社 三井造船昭島研究所 技術統括部

1. 新たな造波技術を開発

1.1 開発の背景

三井造船昭島研究所は、分割型吸収式造波機のアミューズメント分野での利用及び造波技術の高度化を目的として、平成13年度より大阪大学大学院船舶海洋工学科の内藤林教授との共同研究で、水面に波紋で文字を描く研究を続けてきた。

研究には、内藤研究室所有の小型円形波浪水槽を用いた。この水槽は50機の分割型吸収式造波機を円形に並べた直径1.6m、水深0.3mの水槽で、AMOEBa (Advanced Multiple Organized Experimental Basin: アメーバ) と呼ばれている^{1)~3)}。水槽を構成する分割型吸収式造波機を図1に示す。プランジャー、ボイスコイルモーター (V.C.M)、変位計から構成され、入射波による浮体の上下変位から演算される波吸収力をV.C.Mで発生することにより、波を吸収する。小さな水槽だが、波吸収精度が高く、様々な波浪場を長時間再現できることが確認されている^{4)~6)}。

共同研究では、Dini展開という展開法を用いて文字の凹凸をBessel関数の和で表現することにより、様々な周波数の円筒波が集中したある瞬間(造波を開始してから、ある一定時間後)に、文字を造波する技術を確立した。アルファベットの「S」やハートマークなどを水面に描画できることが確認された。この方法では、複雑な文字の凹凸をBessel関数の和で表すために十分な展開項数が必要となる。一方、造波の際には、分割型吸収式造波機の造波性能や台数により展開項数に制限が生じる。よって、この造波方法では以下に示す問題も確認された。

- ・「K」や「R」のように造波できない文字があった
- ・文字造波信号計算に一文字当たり約15分を要していた
- ・吸収式造波機を多数用いるため、その製作コストが高かった

これらの問題を解決して、分割型吸収式造波機のアミューズメント分野への転用を容易にするため、次の条件を満たす新たな文字の造波方法を開発した。

- ・従来困難であった「K」や「R」なども文字を造波できる造波方法
- ・1分以内で造波信号を作成できる造波方法
- ・従来より少ない造波機で文字を造波できる造波方法

1.2 新しい造波方法の特徴

新たな造波方法は、水面の一箇所にお椀を伏せたような盛り上がりを持つ水面を造波する方法が基となる。このような点(以下、集中点と呼ぶ)を水槽の任意の位置に造波できれば、集中点を文字やマークの形に同時に多数個造波することにより、文字やマークを水面に浮かび上がらせることができる。この方法には、以下の利点がある。

- ・点の並べ方を変えるだけで様々な文字やマークを造波できるので、造波したい模様が複雑でも造波できる。
- ・集中点は、周波数の異なる9つの円筒波の重ね合わせのみで造波できるので、造波信号を短時間で作成できる。
- ・この造波方法では、分割型造波機の数による分解能の制限がなくなるので、造波機の数減らしても文字を造波できる。

以上のように、新しい造波方法は、1.1で示した開発課題を克服できる。一例として、写真2に従来の造波方法では造波できなかった文字「K」の造波の様子を示す。

2. 従来の造波方法

新たな造波方法を説明する前に、文字をBessel関数の和に展開する従来の文字造波方法について説明する。

2.1 文字のベッセル関数展開

今、文字「S」の造波を考える。図2に示すように内接円で囲まれた部分の文字の凹凸を極座標系の関数 (r, θ) で表す。この凹凸 (r, θ) は、円周方向と動径方向に分離した上、角度変数 θ に対してFourier級数展開、距離変数 r に対してDini展開という数学的手法を用いると、以下のように、 n 次のBessel関数 $J_n(r)$ の足し合わせで表現できる。

$$(r, \theta) = \sum_{n=0}^{\infty} \{A_n \cos n\theta + B_n \sin n\theta\} Y_n\left(\frac{\mu_n}{l} r\right) \dots (1)$$

ただし、Dini展開とは、Bessel関数の直交性を用いた展

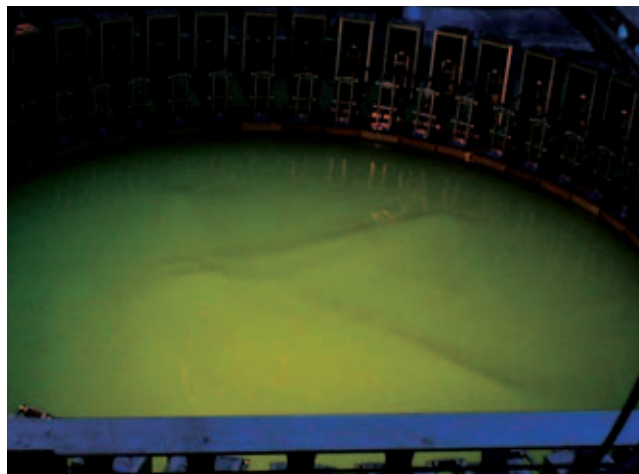


写真2 文字「K」の造波
Letter [K]

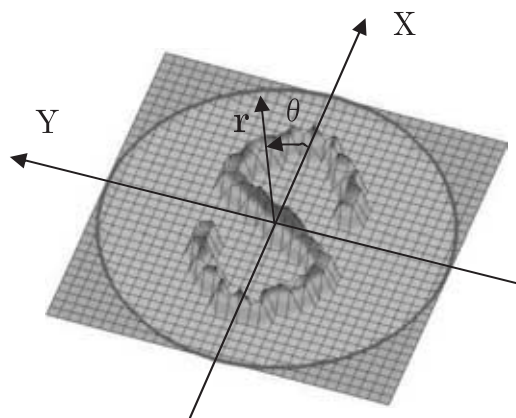


図2 文字「S」の凹凸
Crest of Letter [S]

開法の一つである．係数 A_{nk}, B_{nk} は以下の式で求まる．

$$\left\{ \begin{matrix} A_{nk} \\ B_{nk} \end{matrix} \right\} = \frac{\mu_{nk}}{l^2(p^2 + \mu_{nk}^2 - n^2)J_n(\mu_{nk})} \int_0^1 (r, \begin{Bmatrix} \cos n \\ \sin n \end{Bmatrix}) r \cdot J_n\left(\frac{\mu_{nk}}{l}r\right) dr \quad (2)$$

式中の添え字 n, k は，それぞれ円周方向，動径方向の展開項数で， μ_{nk} は以下の式の解である．

$$f(n, x) = p \cdot J_n(x) + x \cdot J_n'(x) \quad (3)$$

式(3)の $J_n(x), J_n'(x)$ は Bessel 関数である． n, p を $n > -1$ かつ $p + n > 0$ を満たす任意の実定数とすると， $f(n, x) = 0$ は多数の解を持つ．その k 番目の解を μ_{nk} としている．これは，円筒波の波数に相当する．

2.2 造波信号の作成

式(1)の右辺に時間項 $\cos(\quad t)$ を加える．

$$(r, \quad) = \sum_{n=0}^{\infty} \sum_{k=0}^{\infty} \{ A_{nk} \cos n + B_{nk} \sin n \} Y_n\left(\frac{\mu_{nk}}{l}r\right) \cos nk t \quad (4)$$

上式中の Bessel 関数は円筒波を表すので，式(4)から円筒波の重ね合わせとして波面の時系列を計算できる．造波機位置での波面の時系列から造波機の動きを逆算すると，造波信号を作成でき，円筒波を組成波とした文字を造波できる．

造波信号を作成するに当たり，水槽の造波性能による制限を式(4)に加える．

Bessel 関数で円筒波を表すとき，式(4)内の Bessel 関数の μ_{nk}/l は円筒波の波数 K に相当する．AMOEBAs の造波可能な波周波数は $10.08 \leq \quad \leq 18.84$ であることから， μ_{nk} が取りうる範囲は以下となる．

$$\frac{\mu_{nk}}{l} = K = \frac{2}{g} \quad 8.17 \leq \mu_{nk} \leq 28.86 \quad (5)$$

μ_{nk} は $n=0$ のとき，表1の値をとる．よって，動径方向の展開項数 k を4から10まで (μ_{0k} では10.27から29.08に対応する)とした．

また，式(4)の \quad 内は，角度変数 \quad に対する Fourier 級数展開を表す．係数 n は，その展開項数であり，造波機振幅モードの次数である．造波機50機の振幅で表せる振幅モードは，造波機5機で1波形を表す10が限界だと考えられ，円周方向の展開項数 n は10とした．

まとめると，AMOEBAs の造波性能を考慮した上，造波開始後 t_0 秒後に波周波数の異なる円筒波が集中して，文字が現れる波面は以下の式で表現できる．

$$(r, \quad; t) = \sum_{n=0}^{10} \sum_{k=4}^{10} \{ A_{nk} \cos n + B_{nk} \sin n \} Y_n\left(\frac{\mu_{nk}}{l}r\right) \cdot \cos nk(t - t_0) \quad (6)$$

表1 μ_{0k} の値
Value of μ_{0k}

k	1	2	3	4	5	6
μ	1.25	4.07	7.15	10.27	13.39	16.53
k	7	8	9	10	11	12
μ	19.66	22.8	25.94	29.08	32.22	35.36

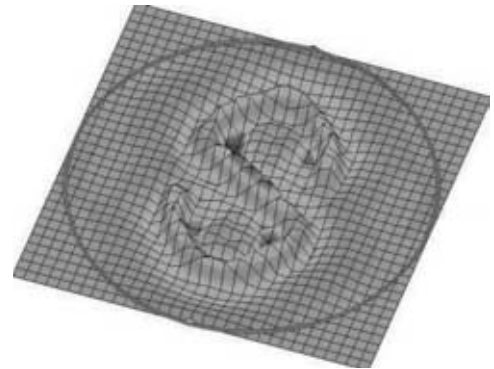


図3 造波性能を考慮した式(6)による文字の凹凸
Calculation with Expression (6)
(Number of Expansion Term $n=10, k=7$)

式(6)に $t = t_0$ を代入し，文字「S」の凹凸計算した結果を図3に示す．図2の文字の凹凸 (r, \quad) と比較すると，文字の近傍に掘り込みが残ることと，平面全体に凹凸が生じることが分かる．

2.3 文字の造波

式(6)をもとに造波信号を作成し，実際に文字の造波を行った．写真1に示したとおり，写真に撮った「S」の字は肉眼でも良く視認できた．

そこで，様々な文字の造波を試みた．アルファベット「A,C,E,H,I,L,M,N,O,S,T,U,Y」を造波したが，肉眼で良く確認できた．また，文字の大きさは0.5m四方まで小さくでき，文字の造波位置も水槽中央から上下左右にずらせることもできた．

一文字目の造波信号に二文字目の造波信号，三文字目の造波信号と時間をずらせて重ねれば，文字の連続造波が可能であることが確認された．

式(6)に示す造波性能による制限により，文字の大きさ，位置などにも制限が生じることが確認された．

2.4 波面の計測

造波した文字が式(6)に従った波高分布になることを確認するため，波面計測を行った．

AMOEBAs に内接する一辺1.2mの正方形の領域を5cmメッシュに区切り，各点で文字が現れる時刻 $t = t_0$ の波面変位を計測した．計測には，超音波式の変位計を用いた．

計測結果を図4にコンター図と断面の比較で示す．コンター図では，円内がAMOEBAsを表す．断面図の「Target」は，図2で示した文字の凹凸 (r, \quad) である．「Simulation」

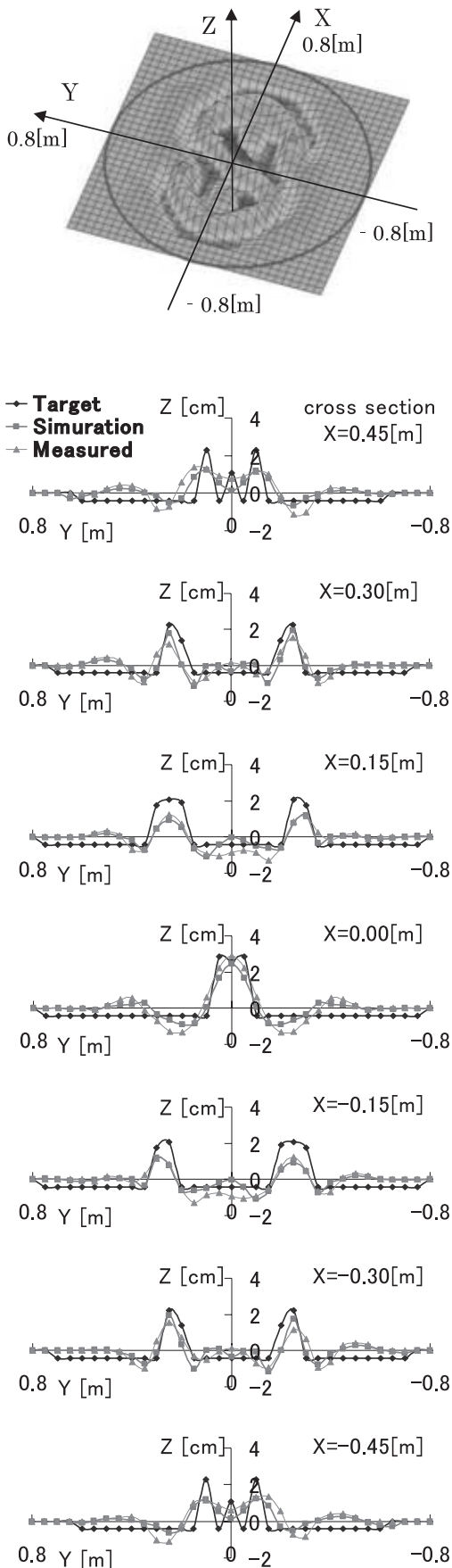


図4 文字「S」の凹凸 計測値
Measurement of Crest (Letter [S])

は、図3に示した式(6)に従って文字が造波される時刻 $t = t_0$ の波面を計算したものである。「Measured」は、計測値を表す。縦軸は、波面の変位を [cm] で表しており、Y軸は、コンター図に合わせて左を正值とした。各断面において「Measured」と「Simulation」は良い一致を示した。これから、AMOEBAsの造波性能を考慮した式(6)には妥当性があることが確認された。また、式(6)により波面のシミュレーションができることが確認された。

2.5 造波が困難な文字

次に、「S」より複雑な文字「K」に対し、式(6)を用いた波面のシミュレーションを行った。結果を図5に示す。文字の中心部は確認できるが、端々は消え、文字「K」と認識することが難しい。実際に造波をしたところ、文字「K」を肉眼でとらえることは困難であった。

原因は、AMOEBAsの造波性能の制限により、角度方向の展開であるFourier展開の展開項数を大きくとれず、式(6)では文字「K」の凹凸を十分表現できないためである。

角度方向の展開項数を増加させるためには、吸収式造波機の数を増やし、造波可能周波数帯を大きくする必要がある。しかし、式(6)から波面をシミュレーションして、「K」を造波するためには、展開項数を約200項とる必要があり、造波機を増やす方法が現実的ではないことが分かった。

3. 新しい文字造波方法

角度方向に級数展開を行わずに文字の凹凸を表す新たな造波方法を考える。

3.1 集中点の数式表現

図6に示すように、水槽中心に水面の盛り上がりを持つ集中点をDini展開すると、この集中点は式(1)で示した以下のBessel関数の和に展開できる。

$$(r, \theta) = \sum_{n=0}^{\infty} \sum_{k=0}^{\infty} \{ A_{nk} \cos n\theta + B_{nk} \sin n\theta \} Y_n \left(\frac{\mu_{nk}}{l} r \right) \dots (7)$$

この集中点は、原点 $r = 0$ で値をもつことから0次のBessel関数の和で表される。また、集中点の縦断面形状は

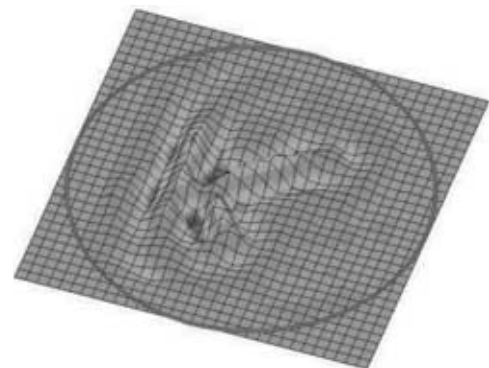


図5 式(6)による文字「K」の波面シミュレーション
Surface Letter [K] Simulated with Expression (6)

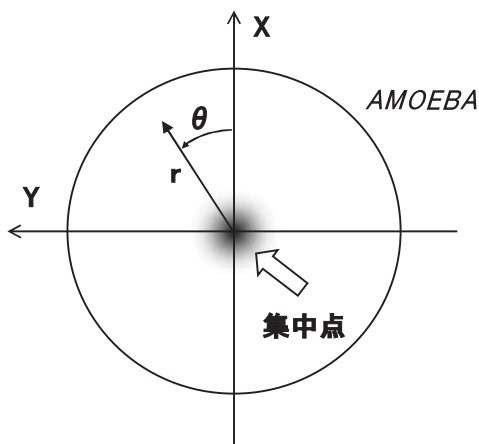


図6 水槽中心の集中点
Concentrate Point

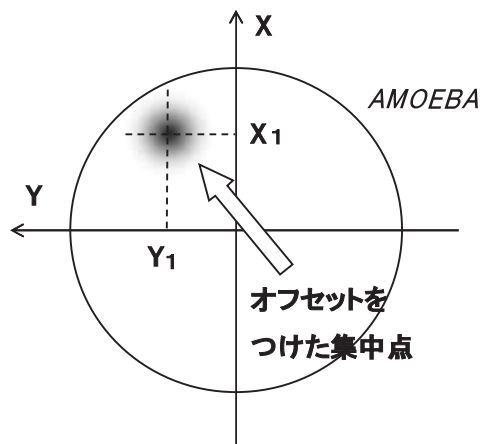


図7 オフセットをつけた集中点
Concentrate Point (Off Center)

角度変数によらず同形状なので、円周方向の展開項数 n は 0 となる。式(7)に $n = 0$ を代入すると、集中点は以下で表される。

$$(r,) =_{k=1} A_{0k} J_0(\mu_{0k} r) \dots\dots\dots (8)$$

実際にこの集中点を Dini 展開して、式(2)により係数を求めると、 A_{0k} 以外の係数はすべて 0 となり、集中点は式(8)で表せる。

次に、図6の集中点を水槽中心から (X_1, Y_1) だけ移動させた図7の集中点を考える。この集中点は水槽中心に集中する集中点と同じ大きさなので、式(8)で求めた係数 A_{0k} を用いて以下の Bessel 関数の和で表せる。

$$(r,) =_{k=1} A_{0k} J_0(\mu_{0k} r_1) \dots\dots\dots (9)$$

ただし、 $r_1 = \sqrt{(X - X_1)^2 + (Y - Y_1)^2}$ である。式(9)で表せる集中点を並べると、点の集合で様々な凹凸を表現でき、文字や模様を表せる。複数個の集中点で表した凹凸は次式となる。

$$(r,) = \left\{_{i, k=1} A_{0k} J_0(\mu_{0k} r_i) \right\} \dots\dots\dots (10)$$

ここで、 i は集中点の数を表す展開項数とする。また、それぞれの集中点の位置を (X_i, Y_i) としたとき、動径を表す関数は $r_i = \sqrt{(X - X_i)^2 + (Y - Y_i)^2}$ となる。

3.2 造波信号の作成

式(10)の右辺に時間を表す関数項を加え、Bessel 関数を円筒波として波面の時間変化を求めれば、造波機位置での波面の時系列が求まる。その時系列から造波機の動きを求めれば、造波信号を作成できる。

式(10)では、集中点から造波機までの距離がそれぞれ異なるので、造波機位置での波面の動きは、位置による位相差を生ずる。その位相差を表すため、第1種 Bessel 関数と共役

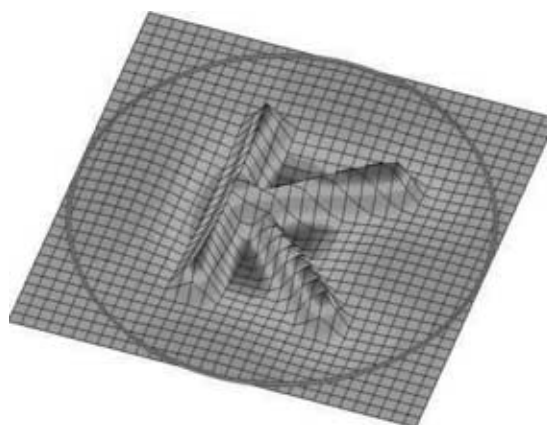


図8 式(11)による文字「K」の波面シミュレーション
Surface Letter [K] Simulated with Expression (11)

な第2種 Bessel 関数 $Y(r)$ を用い、時間項 $e^{i(t-t_0)}$ を加え、式(10)を以下のように書き改める。

$$(r, , t) =_{i, k=4}^{10} A_{0k} \{ J_0(\mu_{0k} r_i) + i Y_0(\mu_{0k} r_i) \} e^{i(t-t_0)} \dots\dots\dots (11)$$

この式は $t = t_0$ のとき式(10)となり、文字の凹凸が現れる。また前述の造波方法で説明したとおり、AMOEBEA の造波性能を考慮して展開項数に制限を加えている。

式(11)に従い、文字「K」の波面シミュレーションを行った結果を図8に示す。図5では確認できなかった文字が、図8では明確に表せていることが分かる。

3.3 文字造波の確認試験

式(11)に従い、造波機位置での波面の時系列から造波信号を作成し、円筒波を組成波とした文字を造波できることを平成17年11月、大阪大学の AMOEBEA で確認した。

文字「K」の造波の様子を1.2の写真2に示した。従来の

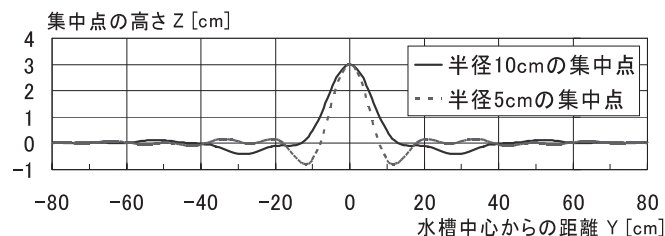


図9 集中点の断面図
Concentrate Point (Cross Section)

方法では端が消え造波できなかった文字「K」も、写真2のように造波できることが確認された。

この造波方法では、分割型造波機の数による分解能の制限がなくなるので、造波機の数減らしても文字を造波できる可能性がある。そこで、隣り合う造波機に同じ造波信号を与え、分割型造波機を25機の水槽に見立てた造波実験も行った。文字、マークとも、50機の実験と全く遜色ない造波が行われることが確認された。

3.4 集中点に対する考察

今回用いた集中点は、図9の実線で断面を表した底辺の半径が10cmで高さが約3cmの集中点である。周波数成分は、AMOEBで発生可能な波周波数1.6～3.0Hzまでの9成分である。

集中点は水槽中心から半径60cm以内の円内であれば任意の場所に造波できる。文字の造波においては、集中点と集中点の間隔を10cmとし、文字の凹凸の高さをほぼ一定に揃えた。

肉眼での視認性を高めるためには、波崩れの起こらない程度に波傾斜を上げる必要がある。波傾斜を上げるには、集中点を構成する組成波の波周波数を高くする方法がある。AMOEBでは、波周波数2.2～3.0Hzの6成分を用いて集中点の半径を5cmまで小さくできるが、図9の点線で示すとおり、集中点の回りにやや深い掘り込みが発生する。集中点の半径が小さくなると、集中点の間隔も小さくできるので、水槽内により多数の集中点を造波できる。よって、より複雑な文字や模様を造波でき、水槽内に複数の文字を造波できる可能性がある。

4. まとめ

新しい造波方法は、水面の一部が盛り上がった集中点を文字の形に並べる方法なので、様々な文字やマークを自由に水面に描けることが確認できた。

新しい造波方法では、造波する文字ごとにDini展開を行う必要がないので、造波信号を約15秒で作成できることを確認した。

また、AMOEBの造波性能でも文字の凹凸を無理なく数式で表せるため、分割型造波機25機による試験でも文字やマークを造波できることが確認された。

参考文献

- 1) M. Bessho : Characteristics of New Wave-Energy Conversion Devices, Proc. of 13th ONR Symposium, (1980) p.841
- 2) Y. Kyouzuka : Studies on an Absorbing Wave Maker, Transactions of WJSNA, No.70 (1985)
- 3) S. Naito, M. Minoura : Research on Element Wave Makers and Wave Field Generated by Their Combination, Proc. of 4th ISOPE Conference, Osaka, Vol.3 (1994) p.8
- 4) S. Naito, M. Minoura, K. Nakagawa : Interest Absorbing Wave Makers and Their Control, Proc. of Wave Generation '99, (1999) p.233
- 5) S. Naito, M. Minoura : Evaluation of Performance of New Wave Making Basin, 9th Proc. of ISOPE Conference, Vol.3 (1999) p.396
- 6) 内藤林, 箕浦宗彦, 坂下晴空, 田中謙太 : 新型波浪水槽の性能評価, 関西造船協会誌, 第231号 (1999) p.75

〔問い合わせ先〕

株式会社 三井造船昭島研究所 技術統括部
TEL 042 - 545 - 3116 奥山 悦郎

船舶・艦艇事業本部 事業開発部
TEL 03 - 3544 - 3345 吉田 和生