

JAERI-Tech  
97-039



直方体タンク液面傾斜に伴う  
幾何学的バッククリングの境界要素解析  
(受託研究)

1997年8月

山根祐一・三好慶典・佐橋直樹\*

日本原子力研究所  
Japan Atomic Energy Research Institute

本レポートは、日本原子力研究所が不定期に公刊している研究報告書です。  
入手の問合せは、日本原子力研究所研究情報部研究情報課（〒319-11 茨城県那珂郡東海村）あて、お申し越しください。なお、このほかに財団法人原子力公済会資料センター（〒319-11 茨城県那珂郡東海村日本原子力研究所内）で複写による実費頒布をおこなっております。

This report is issued irregularly.

Inquiries about availability of the reports should be addressed to Research Information Division, Department of Intellectual Resources, Japan Atomic Energy Research Institute, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken 319-11, Japan.

© Japan Atomic Energy Research Institute, 1997

編集兼発行 日本原子力研究所  
印 刷 (株)高野高速印刷

直方体タンク液面傾斜に伴う幾何学的バックリングの境界要素解析  
(受託研究)

日本原子力研究所東海研究所燃料サイクル安全工学部  
山根 祐一・三好 慶典・佐橋 直樹\*

(1997年7月23日受理)

直方体タンク液面傾斜に伴う幾何学的バックリングの変化を3次元境界要素法を用いて解析した。液位が $H$ のとき、タンク底面の長さ $l$ の辺の方向への液面傾斜により、 $H/l > 0.5$ であれば幾何学的バックリングは増大し、 $H/l < 0.5$ であれば減少する。また、タンク底面の長辺の長さ $L$ に対する $H$ の比がおよそ $H/L > 0.5$ であれば、短辺の長さや傾斜方向によらず、液面傾斜により幾何学的バックリングは増大する。底面が正方形であれば、液面傾斜の効果は傾斜方向に依存しない。定常臨界実験装置S T A C Yの280T平板タンク(70cm×28cm)においては、液位が40cm以下では臨界にならないように運転される。この炉心形状においては、液位 $H$ が35cm程度より高ければ液面傾斜によって反応度は減少する。

---

この報告書は、電源開発促進対策特別会計法に基づく科学技術庁からの受託として行った研究成果の一部である。

東海研究所：〒319-11 茨城県那珂郡東海村白方白根2-4

\* (株)構造計画研究所

Boundary Element Analysis of  
the Geometric Buckling of the Solution Fuel with  
a Slant Surface in a Rectangular Tank  
(Contract Research)

Yuichi YAMANE, Yoshinori MIYOSHI and Naoki SAHASHI\*

Department of Fuel Cycle Safety Research  
Tokai Research Establishment  
Japan Atomic Energy Research Institute  
Tokai-mura,Naka-gun,Ibaraki-ken

(Received July 23, 1997)

The geometric buckling of the solution fuel with a slant surface in a rectangular tank has been investigated using the three-dimensional Boundary Element Method. In the case such that the surface with a level  $H$  is slanting in the direction of a side with length  $l$  of the bottom surface, the geometric buckling increases with the increase in the surface slant angle if the ratio  $H/l$  is larger than a threshold value,  $\sim 0.5$ , and vice versa. If  $H/L > 0.5$ , where  $L$  is the length of the longer side of the bottom surface, the geometric buckling increases with the increase in the surface slant angle, and this is valid independent of the length of the shorter side and the direction of the surface slant. For the tank with square bottom, the surface slant effect is independent from the direction of the slant. When the 280T slab tank having the bottom surface of  $70\text{cm} \times 28\text{cm}$  is used, the Static Experimental Critical Facility, STACY, is operated to be critical only for the solution level of more than  $40\text{cm}$ . For this core shape, if the level  $H$  is higher than about  $35\text{cm}$ , the value of the reactivity decreases in keeping with the surface slant.

Keywords : Boundary Element Method, Slant Surface, Neutron Diffusion Equation,  
Geometric Buckling, Slab Tank, STACY

---

This work was carried out by the Japan Atomic Energy Research Institute (JAERI) under entrustment by the Science and Technology Agency (STA) of Japan.

\* Kozo Keikaku Engineering Inc.

## 目 次

1. 序 言 .....	1
2. 方 法 .....	1
2.1 境界要素法による解析モデル .....	1
3. 結 果 .....	3
3.1 傾きのない直方体に対する解析解と境界要素解の比較 .....	3
3.2 液面傾斜時の液位高さの変化によるバックリングの変化 .....	3
3.3 液面傾斜の角度の変化によるバックリングの変化 .....	4
3.4 底面形状としきい値の関係 .....	5
3.5 液面傾斜方向とバックリング変化 .....	7
3.6 STACY 280T平板炉心への応用 .....	8
4. 結 言 .....	10
参考文献 .....	10
付 錄 計算結果のデジタル値 .....	11

## Contents

1. Introduction .....	1
2. Method .....	1
2.1 Modeling for Boundary Element Analyses.....	1
3. Results .....	3
3.1 Analytic Solution and BEM Solution for a Rectangular Shape .....	3
3.2 Geometric Bucklings for Various Heights .....	3
3.3 Geometric Bucklings for Various Slant Angles .....	4
3.4 The Shape of Bottom Surface and the Threshold .....	5
3.5 The Direction of Surface Slant and the Geometric Buckling .....	7
3.6 Application to the 280T Slab Tank of STACY .....	8
4. Conclusion .....	10
References .....	10
Appendix Digital Data.....	11

## 1. 序 言

溶液燃料は固体燃料に比べてその幾何形状が容易に変わり得る。実際、燃料タンクの傾斜や振動によって溶液の液面が傾斜または動搖（スロッシング）するが、この時条件によっては臨界超過を引き起こす<sup>1)</sup>。このため、溶液燃料タンクとしてよく用いられる円筒、直方体（平板）などの基本的な幾何学形状について、体系の形状と臨界性との関係を調べておくことは重要である。

通常、このような臨界性に与える幾何形状の効果を示す指標として、「幾何学的バックリング」が用いられる。円筒タンクの液面傾斜に伴う幾何学的バックリングの変化については、境界要素法を用いた数値計算の結果を既に報告した<sup>2)</sup>。ここでは、直方体形状のタンク内に溶液燃料が一定の高さまで満たされた体系において、

- (i) 液面が水平より傾いた場合の幾何学的バックリングの変化
- (ii) 直方体の底面の縦横比が傾斜によるバックリングの変化に与える効果
- (iii) 液面の傾斜方向の違いによるバックリングの変化

を境界要素法を用いて調べた結果を報告する。

定常臨界実験装置（S T A C Y）において、60 φ円筒炉心に続いて280 T平板炉心での実験が行われているが、後者の炉心形状への応用の結果も合せて報告する。

## 2. 方 法

### 2.1 境界要素法による解析モデル

Fig.1 に示すように、直方体の底面の長辺、短辺の長さをそれぞれ  $L, W$ 、高さを  $H$  で表わし ( $L \geq W$ )、各辺に平行に  $x, y, z$  軸を定める。原点は底面の中心とする。直方体の上端面を液面とし、液面が傾いた時その法線と  $z$  軸とのなす角を  $\theta$  とする。このとき高さ  $H$  は、液面と  $z$  軸との交点から下端面までの距離とする。また、液面の法線ベクトルの  $(x, y)$  成分からなるベクトルと  $z$  軸とのなす角を  $\phi$  とし、これにより液面の傾斜方向を表す。以下では議論を単純化するため中性子束分布の外挿距離は無視し、対象とする領域の全表面において中性子束零の境界条件が課せられているものとする。

$\theta = 0^\circ$  の時、すなわち液面が水平な場合は幾何学的バックリング  $Bg^2$  は

$$Bg^2 = \left(\frac{\pi}{L}\right)^2 + \left(\frac{\pi}{W}\right)^2 + \left(\frac{\pi}{H}\right)^2 \quad (1)$$

のように解析的に求められる<sup>3)</sup>。液面が下端面と交わらない範囲で  $\theta$  を変化させて（例えば、 $\phi = 0$  の時  $\tan \theta < 2H/L$ ），その時の  $Bg^2$  の変化を数値計算によって求める。Fig.1 において、 $L, W$  及び  $H$  を定めれば傾き  $\theta, \phi$  によらず計算される領域の体積は等しく、液体の体積は変化しない。そのため材料バックリング  $Bm^2$  は変化しないと仮定して、計算で求めた幾何学的バックリング  $Bg^2$  と比較することにより、液面の傾きにともなう反応度変化をとらえることができる。幾何学的バックリングを計算する基本的な方法は円筒タンクについて用いた方法と

## 1. 序 言

溶液燃料は固体燃料に比べてその幾何形状が容易に変わり得る。実際、燃料タンクの傾斜や振動によって溶液の液面が傾斜または動搖（スロッシング）するが、この時条件によっては臨界超過を引き起こす<sup>1)</sup>。このため、溶液燃料タンクとしてよく用いられる円筒、直方体（平板）などの基本的な幾何学形状について、体系の形状と臨界性との関係を調べておくことは重要である。

通常、このような臨界性に与える幾何形状の効果を示す指標として、「幾何学的バックリング」が用いられる。円筒タンクの液面傾斜に伴う幾何学的バックリングの変化については、境界要素法を用いた数値計算の結果を既に報告した<sup>2)</sup>。ここでは、直方体形状のタンク内に溶液燃料が一定の高さまで満たされた体系において、

- (i) 液面が水平より傾いた場合の幾何学的バックリングの変化
- (ii) 直方体の底面の縦横比が傾斜によるバックリングの変化に与える効果
- (iii) 液面の傾斜方向の違いによるバックリングの変化

を境界要素法を用いて調べた結果を報告する。

定常臨界実験装置（STACY）において、60 φ円筒炉心に続いて280 T平板炉心での実験が行われているが、後者の炉心形状への応用の結果も合せて報告する。

## 2. 方 法

### 2.1 境界要素法による解析モデル

Fig.1 に示すように、直方体の底面の長辺、短辺の長さをそれぞれ  $L, W$ 、高さを  $H$  で表わし ( $L \geq W$ )、各辺に平行に  $x, y, z$  軸を定める。原点は底面の中心とする。直方体の上端面を液面とし、液面が傾いた時その法線と  $z$  軸とのなす角を  $\theta$  とする。このとき高さ  $H$  は、液面と  $z$  軸との交点から下端面までの距離とする。また、液面の法線ベクトルの  $(x, y)$  成分からなるベクトルと  $x$  軸とのなす角を  $\phi$  とし、これにより液面の傾斜方向を表す。以下では議論を単純化するため中性子束分布の外挿距離は無視し、対象とする領域の全表面において中性子束零の境界条件が課せられているものとする。

$\theta = 0^\circ$  の時、すなわち液面が水平な場合は幾何学的バックリング  $Bg^2$  は

$$Bg^2 = \left(\frac{\pi}{L}\right)^2 + \left(\frac{\pi}{W}\right)^2 + \left(\frac{\pi}{H}\right)^2 \quad (1)$$

のように解析的に求められる<sup>3)</sup>。液面が下端面と交わらない範囲で  $\theta$  を変化させて（例えば、 $\phi = 0$  の時  $\tan \theta < 2H/L$ ），その時の  $Bg^2$  の変化を数値計算によって求める。Fig.1 において、 $L, W$  及び  $H$  を定めれば傾き  $\theta, \phi$  によらず計算される領域の体積は等しく、液体の体積は変化しない。そのため材料バックリング  $Bm^2$  は変化しないと仮定して、計算で求めた幾何学的バックリング  $Bg^2$  と比較することにより、液面の傾きにともなう反応度変化をとらえることができる。幾何学的バックリングを計算する基本的な方法は円筒タンクについて用いた方法と

と同じであり<sup>2)</sup>、中性子拡散方程式を境界要素法を用いて数値積分する。数値計算には原研所の3次元境界要素計算コードM R B E M<sup>4)5)</sup>を用いた。

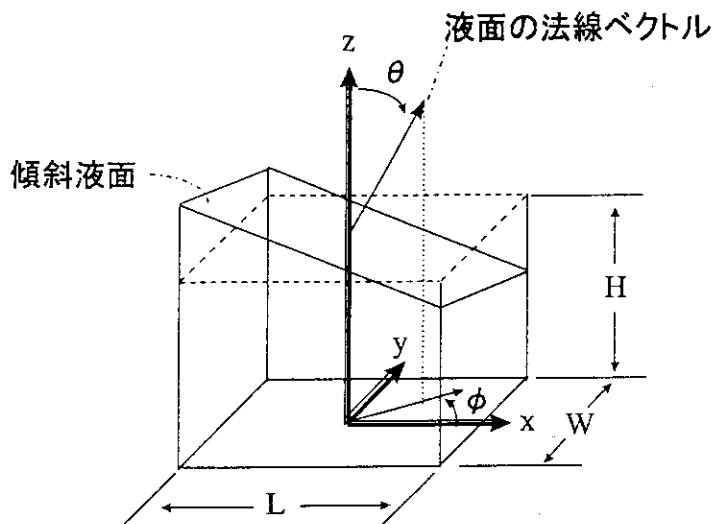


Fig.1 液面傾斜を伴う直方体体系。 $L$ : 底面の長辺 (cm),  $W$ : 底面の短辺 (cm),  $H$ : 高さ (cm),  $\theta$ : 液面の傾き ( $^{\circ}$ ),  $\phi$ : 液面傾斜の方向 ( $^{\circ}$ )。

境界要素は、一要素あたり 9 個の節点を持つ 2 次のアイソパラメトリック要素<sup>4)</sup>を採用した。Fig.2 に示すように、計算する領域の各辺を 3 分割し、9 要素配した。ただし必要に応じて分割数を 3 ~ 5 と変えて計算した。

なお境界要素法では、幾何学的バックリングは領域表面の中性子流のみを境界積分して求めることができ<sup>5)</sup>、中性子源反復法<sup>6)</sup>によって収束解が定められる。

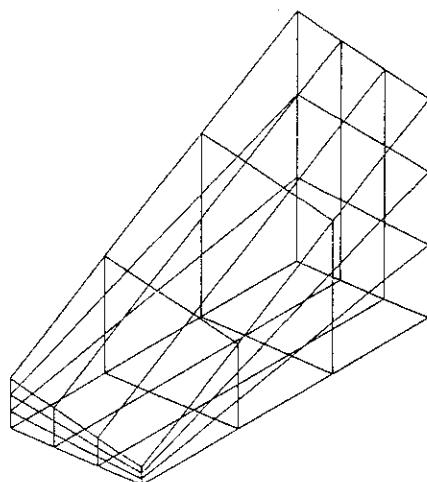


Fig.2 計算で用いられた境界要素メッシュの例。

### 3. 結 果

#### 3.1 傾きのない直方体に対する解析解と境界要素解の比較

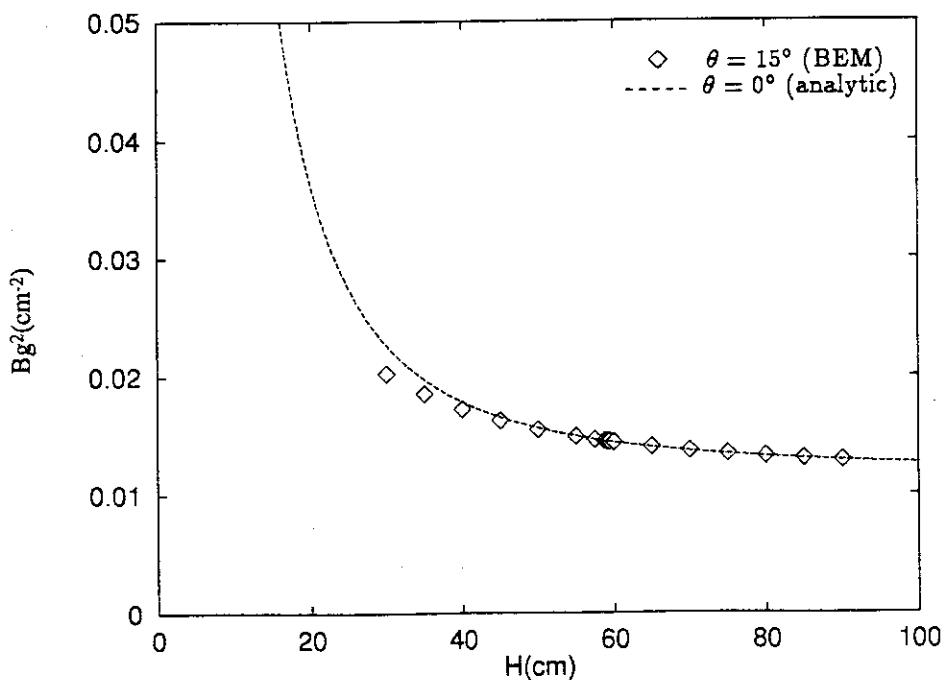
境界要素法による数値計算の信頼性を検証するため、傾きのない直方体体系についてMRBEMコードによる結果と解析解を比較した。Table.1に見られるように、相対誤差は0.01%程度以下であり、MRBEMコードによる数値計算が十分な精度を有すると判断できる。

**Table.1** 底辺  $L$  及び  $W$ , 高さ  $H$  の直方体に対する幾何学的バックリングの境界要素解と解析解

$L(cm)$	$W(cm)$	$H(cm)$	境界要素解	解析解	相対誤差(%)
60	60	60	0.00822504	0.00822467	-0.00448
60	60	25	0.0212764	0.0212745	-0.00883
70	28	60	0.0173460	0.0173445	-0.00852
70	28	25	0.0303976	0.0303944	-0.01075

#### 3.2 液面傾斜時の液位高さの変化によるバックリングの変化

底面の形状を  $L = 120cm$ ,  $W = 30cm$  に固定して液面を傾けた時の幾何学的バックリング(以下、単にバックリングと記す)を、液位  $H$  のいろいろな値に対して計算した。その結果を Fig.3 と Table A1 に示す。◇は  $\theta = 15^\circ$  の数値計算結果、点線は  $\theta = 0^\circ$  の解析解を示している。



**Fig.3** 液位  $H$  と液面傾斜時の幾何学的バックリング  $Bg^2$ 。  
( $L = 120cm$ ,  $W = 30cm$ )

る。 $\theta = 0^\circ$  の解析解を基準とすると、 $H \lesssim 60\text{cm}$  では、液面を  $\theta = 15^\circ$  傾斜させた時のバックリングは小さくなっていることがわかる。このバックリングの基準値 ( $\theta = 0^\circ$  の解析解) からのずれの割合を

$$\Delta Bg^2 \equiv \frac{Bg^2 - \text{基準値}}{\text{基準値}} \times 100 \quad (2)$$

で定義される  $\Delta Bg^2$  で表したのが Fig.4 及び Table A2 である。◇ は液面傾斜の方向が  $x$  軸方向を、◆ は対角線の方向をそれぞれ向いていることを示している。ある液位 ( $H_c$  とする) をしきい値として、それよりも液位が低い場合 ( $H < H_c$ ) バックリングが大幅に減少している。液位が高い場合 ( $H > H_c$ ) にはわずかにバックリングが増加している。

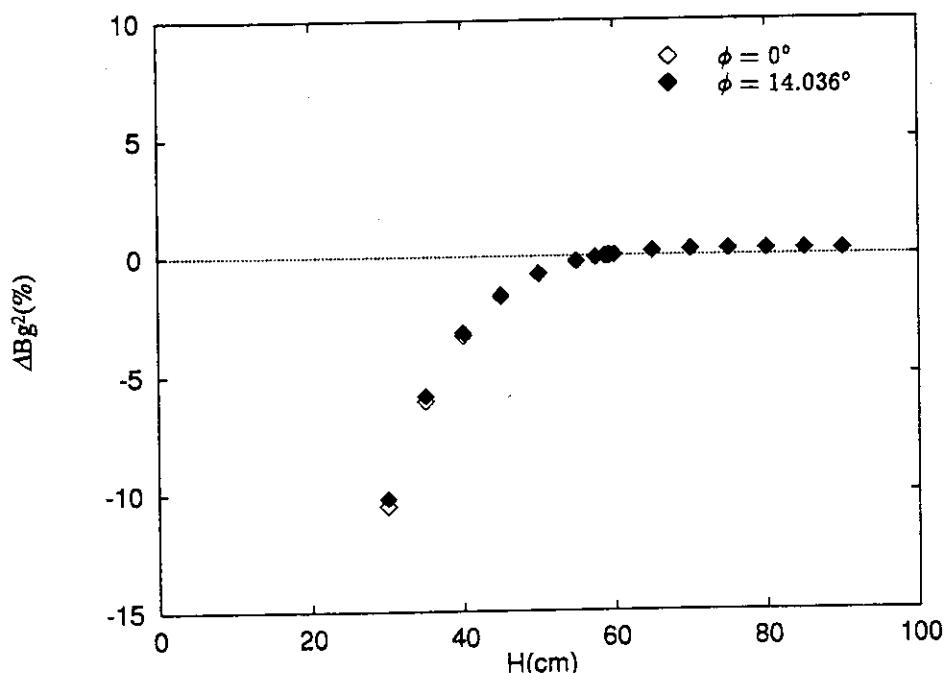


Fig.4 液位  $H$  とバックリングの変化割合  $\Delta Bg^2$ 。

( $L = 120\text{cm}$ ,  $W = 30\text{cm}$ ,  $\theta = 15^\circ$ )

### 3.3 液面傾斜の角度の変化によるバックリングの変化

3.2 では液面の傾斜角度が  $\theta = 15^\circ$  である場合のみ見た。ここでは、上述の結果がいろいろな傾斜角度に対しても認められるかどうかを考える。液位がしきい高さ ( $H_c \approx 60\text{cm}$ ) よりも低い場合と高い場合の 2通りについて液面の傾き  $\theta$  を変えて  $\Delta Bg^2$  を求めた結果を Fig.5 及び Table A3 に示す。菱形のマーカーは液位 30cm, 四角のマーカーは液位 80cm の場合を表わしている。また、白いマーカーは液面傾斜が  $x$  軸方向を向いており、黒いマーカーは対角線方向を向いていることを示している。

液位が低い場合 ( $H = 30\text{cm}$ ),  $\Delta Bg^2$  は液面の傾きとともに単調に減少している。これは中性子の洩れが、液面が傾くことによって小さくなることを意味している。このような扁平な

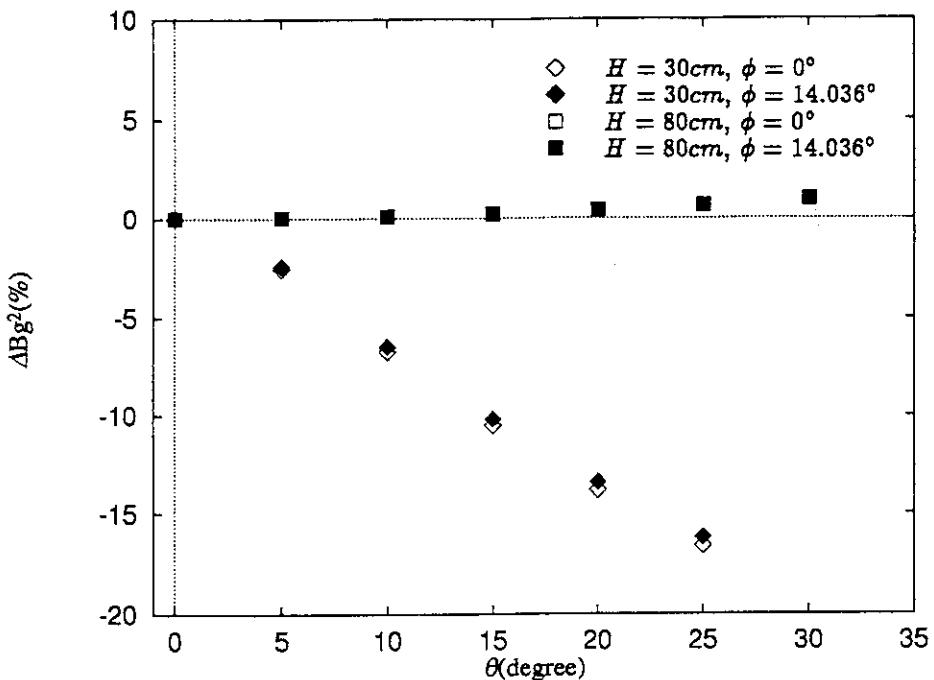


Fig.5 液面の傾き  $\theta$  とバックリングの変化割合  $\Delta Bg^2$ 。  
( $L = 120\text{cm}$ ,  $W = 30\text{cm}$ )

体系が  $\theta = 0^\circ$  で臨界に近い状態にあれば、液面が傾斜することにより容易に臨界を超える可能性がある。

液位が高い場合 ( $H = 80\text{cm}$ )、バックリングは傾き  $\theta$  とともに単調に増加する傾向を持っていることがわかる。つまり液位が十分に高ければ、液面の傾斜は中性子の洩れを大きくする効果を持っている。したがってこのような形状は扁平な形状に比べてより安全である。

### 3.4 底面形状としきい値の関係

ここまでで見たように、体系の幾何学的バックリングは液面傾斜に伴って増加する場合と減少する場合があるが、どちらの傾向を持つかは、その体系の液位に依存している。あるしきい値  $H_c$  を境に、液位が低い場合バックリングは減少し、液位が高い場合バックリングは増加する。

このバックリングの増減のしきい値  $H_c$  が、底面長方形の長辺と短辺の比にどのように依存しているのかを評価した結果を Fig.6 及び Table A4 に示す。液面の傾斜方向は  $x$  軸方向 ( $\phi = 0^\circ$ ) とし、底面の面積を一定に保ちながら長辺と短辺の比  $L/W$  を変えて、しきい値  $H_c/L$  を求めた。図からわかるように、 $1 \leq L/W \leq 8$  の範囲では  $H_c/L \simeq 0.5$  である。このことから、しきい値は底辺の比によらずほぼ一定値 0.5 をとると考えられる。

Fig.6 と同様であるが、液面の傾斜方向を底面の対角線方向とした場合を Fig.7 及び Table A5 に示す。白いマーカーは  $H_c/L$  を示している。黒いマーカーは分母の  $L$  のかわりに対角線長さ  $D$  を用いている ( $H_c/D$ )。しきい高さは定義からすると対角線長さを用いた  $H_c/D$  で考えるのが自然である。

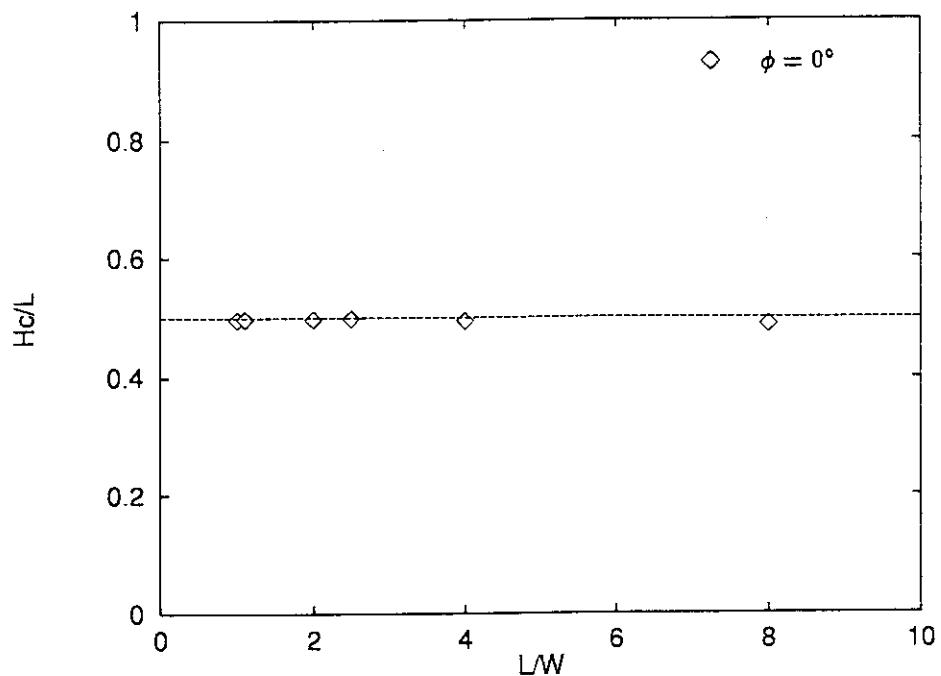


Fig.6 底面の長辺と短辺の長さの比  $L/W$  としきい値  $Hc/L$  との関係。

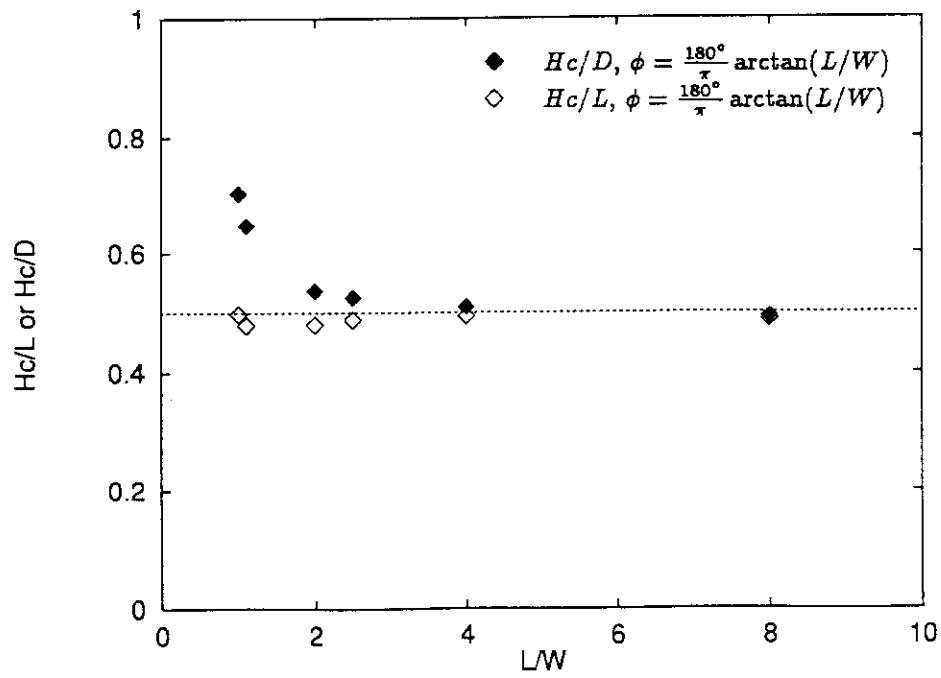


Fig.7 底面の長辺及び短辺の長さの比  $L/W$  としきい値  $Hc/L$  及び  $Hc/D$  との関係。  $D$  : 底面の対角線長さ (cm)。

黒いマーカーが示すように,  $L/W$  が 4 以上では  $Hc/D$  はほぼ 0.5 であるが,  $L/W$  が 1 に近いところでは  $Hc/D$  は 0.7 程度にまで大きくなる。しかし、白いマーカーが示すように、対角線長さのかわりに長辺の長さ  $L$  を用いると、見掛け上しきい値  $Hc/L$  は 0.5 程度となる。これは  $L/W \approx 1$  の付近では、底面の対角線長さと長辺の長さの比が最も大きいためであると考えられる。逆に  $L/W > 2$  では対角線長さと長辺の比が 1 に近づくため、 $Hc/L$  の値は  $Hc/D$  に近くなる。

直径  $D$ , 高さ  $H$  の円筒形状では、しきい高さは  $H/D \approx 0.454$  であった<sup>2)</sup>。これと比較すると、底面形状が四角である場合のしきい高さは 10% 程度高くなっている。

### 3.5 液面傾斜方向とバックリング変化

直方体形状では底面の形状が四角であるため、円筒形状とは異なり、液面傾斜の方向によってはバックリングの変化の度合に違いが表われると考えられる。

$L/W = 4$  となる体系 ( $L = 120\text{cm}$ ,  $W = 30\text{cm}$ ) で液面の傾斜方向  $\phi$  を変えながらバックリングの変化割合  $\Delta Bg^2$  を調べた結果を Fig.8 及び Table A6 に示す。ここで液位はしきい値よりも低く ( $H = 30\text{cm}$ ), 液面傾斜は  $\theta = 15^\circ$  としている。図より、 $\Delta Bg^2$  は  $\phi$  に伴って単調に上昇していき、 $\phi = 80^\circ$  付近で正負がいれかわる様子が見られる。これは、 $H = 30\text{cm}$  という液位が、 $\phi = 0^\circ$  の場合のしきい値  $0.5L = 60\text{cm}$  に比べて小さい値であるけれども、 $\phi = 90^\circ$  の場合のしきい値  $0.5W = 15\text{cm}$  に対しては大きい値であることによる。対角線方向は  $\phi = 14.0^\circ$  であるが、特にここで目立った変化は見られなかった。

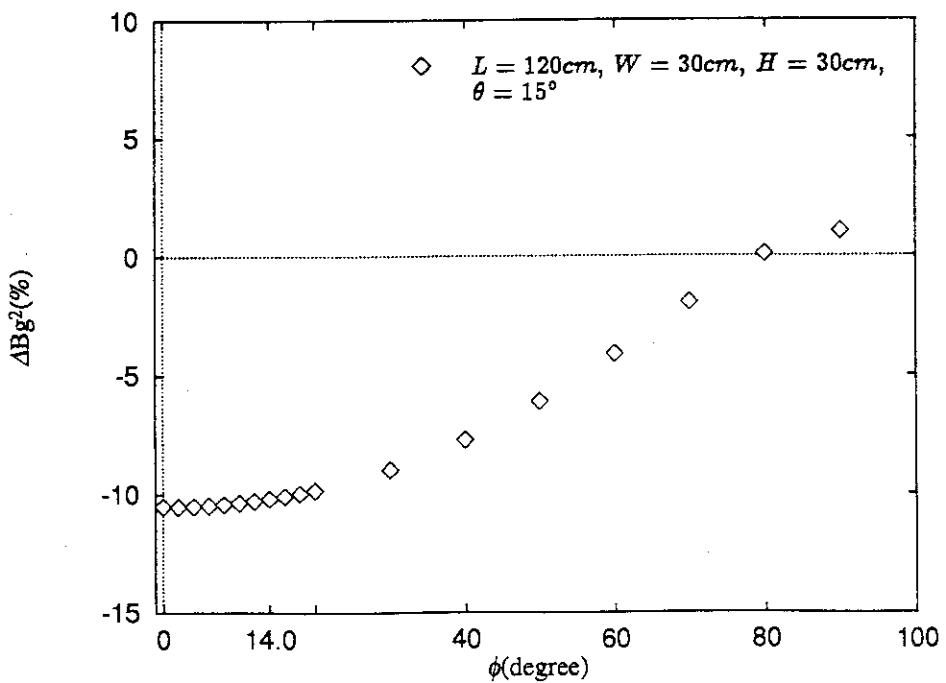


Fig.8 液面傾斜方向  $\phi$  とバックリングの変化割合  $\Delta Bg^2$  の関係。

底面が正方形 ( $L/W = 1$ ) であるような体系 ( $L = W = 60\text{cm}$ ) について、傾斜方向  $\phi$  を変えながら  $\Delta Bg^2$  を調べた結果を Fig.9 及び Table A7 に示す。液面の傾斜角は  $\theta = 30^\circ$  としている。◇は液位が  $Hc/L (\simeq 0.5)$  よりも低い体系、◆はそれより高い体系を表わしている。図より、バックリング変化は傾斜方向にはほとんど依存していないことがわかる。

### 3.6 STACY 280T平板炉心への応用

NUCEF の定常臨界実験装置 (STACY) では  $L = 70\text{cm}$ ,  $W = 28\text{cm}$  の平板炉心を使用する予定である。この体系について、液面を  $30^\circ$  傾斜させたときの  $\Delta Bg^2$  を、液位  $H$  が  $10 \sim 60(\text{cm})$  の間で示したのが Fig.10 及び Table A8 である。白い菱形 (◇), 黒い菱形 (◆), 白い四角 (□) の各マーカーはそれぞれ液面傾斜方向  $\phi$  の値が、 $\phi = 0^\circ$  (底面の長辺方向),  $\phi = 21.8014^\circ$  (対角線方向),  $\phi = 90^\circ$  (底面の短辺方向) に対応している。菱形のマーカーが示す 2 つの体系、すなわち液面傾斜方向が底面の長辺方向を向いている体系と対角線方向を向いている体系については、しきい高さ  $Hc \simeq 0.5$  を境にしてバックリングの増減が入れ替っている。四角のマーカーが示す、傾斜方向が底面の短辺方向を向いている体系については、高さ  $H \simeq 13.975\text{cm}$  にしきい値があるが、これは短辺の長さ  $W$  に対してやはり  $Hc/W \simeq 0.5$  の関係にある。

四角のマーカーが示すグラフに顕著に表われているが、どのグラフでも、液位が上昇するにつれて  $\Delta Bg^2$  が負から正に転じ、最大値を取ったあと 0 に近づく。これには 2 つの作用が寄与していると考えられる。一つには、これまでの結果から、液位が高くなるにつれ液面傾斜によるバックリングの増加量は大きくなることがわかっている。一方、液位が高くなることにより、液面傾斜によって変形する部分が体系全体に占める割合は相対的に小さくなる。これら 2 つの作用のバランスからグラフが最大値を取る位置が決ると考えられる。

液面傾斜の方向が底面の短辺方向の場合しきい高さは  $Hc \simeq 13.975\text{cm}$  であり、傾斜方向が長辺又は対角線方向のとき  $Hc \simeq 35\text{cm}$  であるから、後者の方がより高いところにしきい値がある。よって STACY の運転時にはこれよりも高い液位を維持するようすれば、液面傾斜は常にバックリングを増加させる、すなわち、反応度を減少させる。逆に、 $H < 13.975\text{cm}$  であると、バックリングは任意の方向の液面傾斜によって減少し、反応度が添加され得る。

以上の議論では外挿距離を無視していたが、ここで外挿距離を考慮に入れた考察を行う。STACY 280T 平板炉心における横方向の外挿距離はおよそ  $9\text{cm}$  程度なので、この外挿距離を考慮した  $L = 70 + 9 = 79\text{cm}$  の体系に対するしきい高さ  $Hc$  はおよそ  $Hc \sim 39.5\text{cm}$  となる。この値より縦方向の外挿距離、およそ  $7\text{cm}$ 、を差し引いた値  $39.5\text{cm} - 7\text{cm} = 32.5\text{cm}$  が実際のしきい液位である。STACY の臨界液位は  $40\text{cm}$  以上に制限されているため、外挿距離を考慮に入れても、運転時に液面の傾斜により正の反応度が添加されることはないと考えられる。

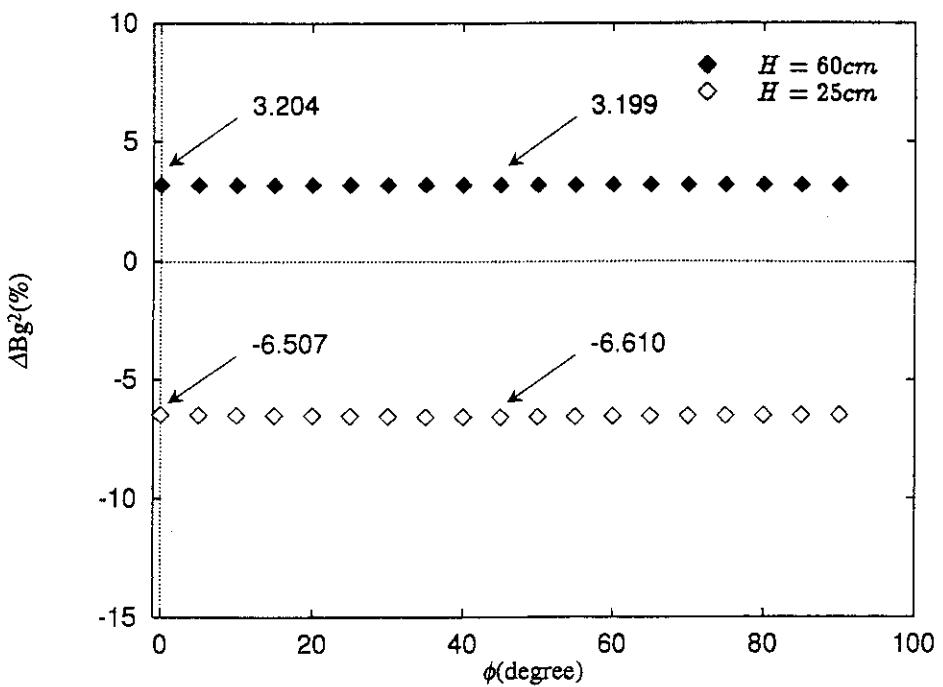


Fig.9 液面傾斜方向  $\phi$  とバックリングの変化割合  $\Delta Bg^2$  の関係。  
( $L = 60\text{cm}, W = 60\text{cm}, \theta = 30^\circ$ )

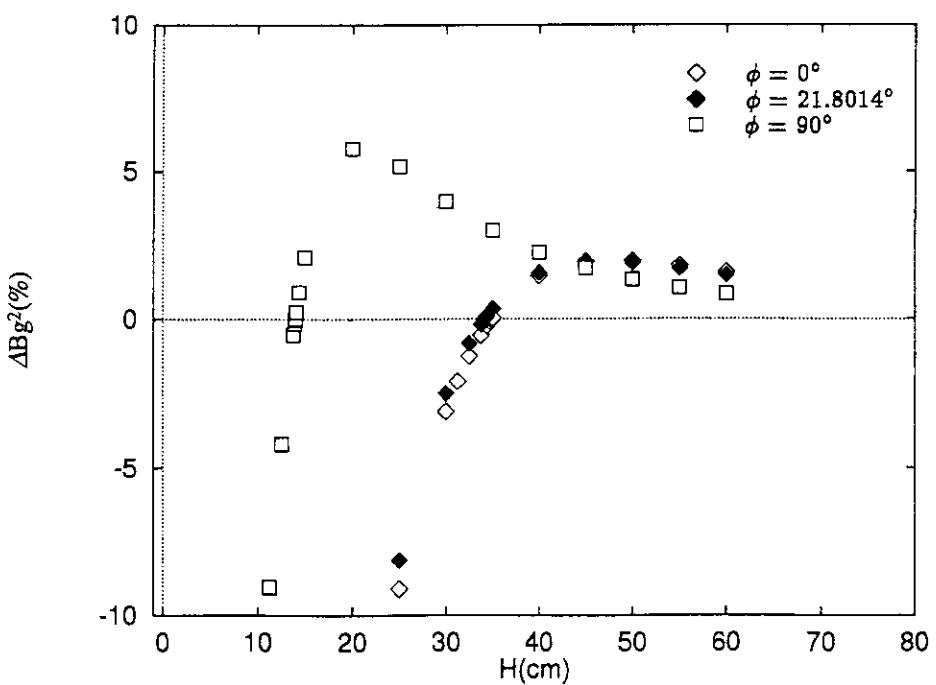


Fig.10 液位高さ  $H$  とバックリングの変化割合  $\Delta Bg^2$  の関係。  
( $L = 70\text{cm}, W = 28\text{cm}, \theta = 30^\circ$ )

## 4. 結 言

液面の傾斜方向が長辺方向であれば、液面傾斜により幾何学的バックリングが減少するか増大するかのしきい値は、底面の長辺  $L$  と短辺  $W$  の比によらず高さ  $H$  と長辺  $L$  の比がおよそ  $H/L \sim 0.5$  である。液面傾斜方向が対角線方向であっても、このしきい値は  $H/L \sim 0.5$  と表わせられる。液面傾斜の方向が短辺方向であれば  $H/W \sim 0.5$  である。 $H$  が  $0.5L$  より大きい場合バックリングは、傾斜方向によらず液面傾斜とともに単調に増加する。 $H$  が  $0.5W$  より小さい場合バックリングは、傾斜方向によらず液面傾斜とともに単調に減少する。また底面が比較的細長い長方形の場合、円筒体系とは異り、バックリングの変化割合  $\Delta Bg^2$  が傾斜方向に依存しているが、正方形の場合ほとんど依存していなかった。

定常臨界実験装置 STACY の 280T 平板 ( $70\text{cm} \times 28\text{cm}$ ) 炉心においては、液位  $H$  が  $35\text{cm}$  程度より高ければ液面傾斜によって反応度が添加されるおそれがないと考えられる。

本報告では、液面傾斜の反応度効果について、幾何学的バックリングの増減による検討を行ったが、今後は、炉心周辺の反射体の影響を評価するため、中性子実効増倍率の変化を直接解析する方法を検討する予定である。

## 参 考 文 献

- 1) Suzuki, T. and Miyoshi, Y. : "Measurements of Reactivity Effects Caused by Surface Waves Excited in Nuclear Fuel Systems Having a Free Surface", J. Nucl. Sci. Technol., Vol.23, No.9, pp.840-842 (1986).
- 2) Yamane, Y., Itagaki, M. and Sahashi, N. : "Boundary Element Analysis of the Geometric Buckling of the Liquid Fuel with a Slant Surface in a Cylindrical Tank", JAERI-Tech 96-018 (1996) (in Japanese).
- 3) Glasstone, S. and Edlund, M.C. : "The Elements of Nuclear Reactor Theory", Van Nostrand, New York (1952).
- 4) Itagaki, M. and Sahashi, N. : "Three-Dimensional Isoparametric Boundary Element Method for Solving Neutron Diffusion Equations", J. Nucl. Sci. Technol., Vol.33, No.1, pp.7-16 (1996).
- 5) Itagaki, M. and Sahashi, N. : "Three-Dimensional Multiple Reciprocity Boundary Element Method for One-Group Neutron Diffusion Eigenvalue Computations", J. Nucl. Sci. Technol., Vol.33, No.2, pp.101-109 (1996).
- 6) Wachspress, E.L. : "Iterative Solution of Elliptic Systems and Applications to the Neutron Diffusion Equations of Reactor Physics", Prentice-Hall (1966).

## 4. 結 言

液面の傾斜方向が長辺方向であれば、液面傾斜により幾何学的バックリングが減少するか増大するかのしきい値は、底面の長辺  $L$  と短辺  $W$  の比によらず高さ  $H$  と長辺  $L$  の比がおよそ  $H/L \sim 0.5$  である。液面傾斜方向が対角線方向であっても、このしきい値は  $H/L \sim 0.5$  と表わせられる。液面傾斜の方向が短辺方向であれば  $H/W \sim 0.5$  である。 $H$  が  $0.5L$  より大きい場合バックリングは、傾斜方向によらず液面傾斜とともに単調に増加する。 $H$  が  $0.5W$  より小さい場合バックリングは、傾斜方向によらず液面傾斜とともに単調に減少する。また底面が比較的細長い長方形の場合、円筒体系とは異り、バックリングの変化割合  $\Delta Bg^2$  が傾斜方向に依存しているが、正方形の場合ほとんど依存していなかった。

定常臨界実験装置 STACY の 280T 平板 ( $70\text{cm} \times 28\text{cm}$ ) 炉心においては、液位  $H$  が  $35\text{cm}$  程度より高ければ液面傾斜によって反応度が添加されるおそれがないと考えられる。

本報告では、液面傾斜の反応度効果について、幾何学的バックリングの増減による検討を行ったが、今後は、炉心周辺の反射体の影響を評価するため、中性子実効増倍率の変化を直接解析する方法を検討する予定である。

## 参 考 文 献

- 1) Suzuki, T. and Miyoshi, Y. : "Measurements of Reactivity Effects Caused by Surface Waves Excited in Nuclear Fuel Systems Having a Free Surface", J. Nucl. Sci. Technol., Vol.23, No.9, pp.840-842 (1986).
- 2) Yamane, Y., Itagaki, M. and Sahashi, N. : "Boundary Element Analysis of the Geometric Buckling of the Liquid Fuel with a Slant Surface in a Cylindrical Tank", JAERI-Tech 96-018 (1996) (in Japanese).
- 3) Glasstone, S. and Edlund, M.C. : "The Elements of Nuclear Reactor Theory", Van Nostrand, New York (1952).
- 4) Itagaki, M. and Sahashi, N. : "Three-Dimensional Isoparametric Boundary Element Method for Solving Neutron Diffusion Equations", J. Nucl. Sci. Technol., Vol.33, No.1, pp.7-16 (1996).
- 5) Itagaki, M. and Sahashi, N. : "Three-Dimensional Multiple Reciprocity Boundary Element Method for One-Group Neutron Diffusion Eigenvalue Computations", J. Nucl. Sci. Technol., Vol.33, No.2, pp.101-109 (1996).
- 6) Wachspress, E.L. : "Iterative Solution of Elliptic Systems and Applications to the Neutron Diffusion Equations of Reactor Physics", Prentice-Hall (1966).

## 付録 計算結果のデジタル値

Table A1 (Fig.3 の数値データ)

$H(cm)$	$Bg^2(cm^{-2})$
30	0.02023958
35	0.01851286
40	0.01722681
45	0.01624476
50	0.01548067
55	0.01487804
57.5	0.01462457
58.75	0.01450803
59.0625	0.01447752
59.21875	0.01446360
59.300	0.01445640
59.310	0.01445551
59.320	0.01445463
59.330	0.01445375
59.340	0.01445286
59.375	0.01445211
60	0.01439771
65	0.01401120
70	0.01369726
75	0.01343813
80	0.01322515
85	0.01304725
90	0.01289736

$$L = 120\text{cm}, W = 30\text{cm}, \phi = 0^\circ, \theta = 15^\circ$$

Table A2 (Fig.4 の数値データ)

$H(cm)$	$\Delta Bg^2(%)$	
	$\phi = 0(^{\circ})$	$\phi = 14.036(^{\circ})$
30	-10.515	-10.2062
35	- 6.06632	- 5.863
40	- 3.32943	- 3.203
45	- 1.6988	- 1.62655
50	- 0.761488	- 0.725654
55	- 0.243092	- 0.230352
57.5	- 0.0832278	- 0.0808366
58.75	- 0.020992	- 0.0219567
59.0625	- 0.023323	- 0.00875208
59.21875	- 0.0164996	- 0.00232843
59.2578	***	- 0.000752302
59.267	***	- 0.000389105
59.277	***	+1.15487e-05
59.29685	***	+0.000843167
59.300	- 0.0130021	***
59.310	- 0.0126131	***
59.320	- 0.0121582	***
59.330	- 0.0117066	***
59.340	- 0.0113274	***
59.375	+0.00633968	+0.00391774
60	+0.0315213	+0.0277001
65	+0.168597	+0.156586
70	+0.230054	+0.213662
75	+0.238079	+0.232261
80	+0.238052	+0.231004
85	+0.227372	+0.21992
90	+0.211918	+0.204536

$L = 120cm, W = 30cm, \theta = 15^{\circ}$

Table A3 (Fig.5 の数値データ)

$H(cm)$	$\theta(^{\circ})$	$\Delta Bg^2(\%)$	
		$\phi = 0(^{\circ})$	$\phi = 14.036(^{\circ})$
30	0	+0.0106844	+0.0106844
30	5	- 2.53399	- 2.40957
30	10	- 6.71109	- 6.45178
30	15	-10.515	-10.2062
30	20	-13.8262	-13.4385
30	25	-16.6105	-16.1993

$H(cm)$	$\theta(^{\circ})$	$\Delta Bg^2(\%)$	
		$\phi = 0(^{\circ})$	$\phi = 14.036(^{\circ})$
80	0	+0.00354721	+0.00354721
80	5	+0.0292412	+0.0284075
80	10	+0.106854	+0.10367
80	15	+0.238052	+0.231004
80	20	+0.425262	+0.413135
80	25	+0.670833	+0.653098
80	30	+0.97613	+0.953164

$L = 120\text{cm}$ ,  $W = 30\text{cm}$

Table A4 (Fig.6 の数値データ)

$L/W$	$L(cm)$	$W(cm)$	$H/L$
1.0	60.0000	60.0000	0.496875
1.1	62.9285	57.2078	0.497688
2.0	84.8530	42.4260	0.497507
2.5	70.0000	28.0000	0.497374
4.0	120.0000	30.0000	0.494646
8.0	169.7100	21.2130	0.488425

$\phi = 0^{\circ}$

Table A5 (Fig.7 の数値データ)

$L/W$	$L(cm)$	$W(cm)$	$\phi(^{\circ})$	$Hc/D$	$Hc/L$
1.0	60.0000	60.0000	45.0000	0.703536	0.497475
1.1	62.9285	57.2078	42.2737	0.647301	0.478964
2.0	84.8530	42.4260	26.5650	0.536268	0.479653
2.5	70.0000	28.0000	21.8000	0.525511	0.487924
4.0	120.0000	30.0000	14.0360	0.509135	0.493933
8.0	169.7100	21.2130	7.1250	0.492342	0.488540

Table A6 (Fig.8 の数値データ)

$\phi(^{\circ})$	$\Delta Bg^2(%)$
0	0.02023958
2	0.02023375
4	0.02023845
6	0.02024627
8	0.02025723
10	0.02027134
12	0.02028860
14	0.02030904
16	0.02033266
18	0.02035948
20	0.02038953
30	0.02058882
40	0.02087161
50	0.02123848
60	0.02168283
70	0.02217732
80	0.02263690
90	0.02285071

$$H = 30\text{cm}, L = 120\text{cm}, W = 30\text{cm}, \theta = 15^{\circ}$$

Table A7 (Fig.9 の数値データ)

$\phi(^{\circ})$	$\Delta Bg^2(\%)$	
	$H = 25cm$	$H = 60cm$
0	-6.50724	3.20353
5	-6.51039	3.20338
10	-6.51955	3.20296
15	-6.53356	3.20231
20	-6.55048	3.20150
25	-6.56839	3.20065
30	-6.58526	3.19988
35	-6.59861	3.19919
40	-6.60740	3.19876
45	-6.61018	3.19867
50	-6.60740	3.19876
55	-6.59861	3.19919
60	-6.58526	3.19988
65	-6.56839	3.20065
70	-6.55048	3.20150
75	-6.53356	3.20231
80	-6.51955	3.20296
85	-6.51039	3.20338
90	-6.50724	3.20353

$L = 60cm, W = 60cm, \theta = 30^{\circ}$

Table A8 (Fig.10 の数値データ)

$H(cm)$	$\Delta Bg^2(\%)$		
	$\phi = 0(^{\circ})$	$\phi = 21.8014(^{\circ})$	$\phi = 90(^{\circ})$
11.25	***	***	- 9.05544
12.5	***	***	- 4.18151
13.75	***	***	- 0.524134
13.905	***	***	- 0.164895
13.96	***	***	- 0.03484
13.97	***	***	- 0.0114062
13.98	***	***	+0.0119638
14.06	***	***	+0.241578
14.375	***	***	+0.900976
15	***	**	+2.08755
20	***	***	+5.77132
25	- 9.1144	- 8.14774	+5.16927
30	- 3.09886	- 2.50713	+3.98736
31.25	- 2.09531	***	***
32.5	- 1.24901	- 0.816012	***
33.75	- 0.541393	- 0.179302	***
34.0625	***	- 0.038832	***
34.14	***	- 0.00506024	***
34.1498	***	- 0.000858798	***
34.1596	***	+0.00336966	***
34.1793	***	+0.0118619	***
34.2187	***	+0.0287356	***
34.3283	***	+0.0751347	***
34.375	- 0.23417	+0.0946412	***
34.6875	- 0.0913277	***	***
34.8437	- 0.0225664	***	***
34.8828	- 0.00557334	***	***
34.89	- 0.0183554	***	***
34.895	- 0.0138511	***	***
34.9	+0.00183625	***	***
34.91	+0.00616054	***	***
34.9218	+0.0112376	***	***
35	+0.0445899	+0.34168	+2.99228
40	+1.46191	+1.55801	+2.25367
45	+1.93812	+1.9183	+1.71961
50	+1.9622	+1.88701	+1.33285
55	+1.80153	+1.70643	+1.04958
60	+1.58532	+1.48823	+0.839268

 $L = 120\text{cm}$ ,  $W = 30\text{cm}$ ,  $\theta = 30^{\circ}$