

円筒容器の水中落下姿勢と落下状態

中 埜 岩 男 ^{*1}

水中を落下する円筒容器，長さ：直径＝1.1：1の数値シミュレーションを行った結果，容器の初期姿勢によって水中落下時の状態が大きく左右され，その運動は，減衰振動，非減衰振動および回転運動の3種類に大別されることがわかった。

Underwater Falling Motion of the Circular Cylinder

Iwao Nakano^{*2}

Numerical simulations show that the underwater falling of the circular cylinder, length/diameter $\div 1.1$, depend to a great extent upon initial conditions and that its motion is roughly classified by three kinds of motions, such as decay oscillation, non-decay oscillation, and rotation.

1. ま え が き

有限円筒状物体の運動の概略は，野本ら¹⁾が既に報告した。

しかし，フルード模型の水槽落下試験で見られる回転運動の数値シミュレーションによる再現という点で，必ずしも満足のいく結果が得られていなかった。

本研究は，野本らの研究の延長として，回転運動の再現が，どのような条件の下で可能であるかという点に留意しながら数値シミュレーションを実施した。

なお，本研究に使用したプログラムやデータは，基本的には野本らが使用したものと同一であり，詳細は野本らの報告を参照されたい。

2. 研究 方 法

2.1 概 要

今回，実施した数値シミュレーションは，円筒容器の鉛直面内の二次元運動のみを取扱うことに

した。

対象とした円筒容器は，容積 $1300\phi \times 1400(\text{mm})$ ，重量約 5 t であり，この容器の海面上での姿勢角をパラメーターとし，数値シミュレーションを実施した。

2.2 運動方程式

円筒容器の浮心と重心は一致し，容器は一様な密度をもち，形状のゆがみはないものとする。また，海流の影響は考えないものとする。

このときの円筒容器の運動を，次の運動方程式によって表わす。ただし，円筒の軸方向に X 軸をとり，Y 軸および Z 軸を円周上に直角にとる。

$$\left. \begin{aligned} (m + A_{11}) \dot{U}_x &= -(m + A_{33}) \cdot U_z \cdot q \\ &\quad + \frac{1}{2} \rho \cdot U^2 \cdot S \cdot C_x - (W - B) \sin \theta \\ (m + A_{33}) \dot{U}_z &= (m + A_{11}) \cdot U_x \cdot q \\ &\quad + \frac{1}{2} \rho \cdot U^2 \cdot S \cdot C_z + (W - B) \cos \theta \\ (I_y + A_{55}) \dot{q} &= + \frac{1}{2} \rho \cdot U^2 \cdot S \cdot C_m \cdot b \\ &\quad - \frac{1}{2} \rho C_R \cdot S \cdot b^3 \cdot q \cdot |q| \end{aligned} \right\} (1)$$

^{*1} 海洋保全技術部

^{*2} Marine Environment Department

m ; 円筒容器の質量
 S ; 円筒容器の 表面積
 a ; 円筒容器の直径
 b ; 円筒容器の長さ
 W ; 円筒容器に働く重力
 B ; 円筒容器に働く浮力
 ρ ; 周囲の流体の密度
 ρ_B ; 円筒容器の密度
 V ; 円筒容器の体積
 I_y ; Y 軸の周囲の主慣性モーメント
 θ ; 水平方向と X 軸のなす角
 q ; Y 軸の周囲の角速度
 U_x ; X 軸方向の速度
 U_z ; Z 軸方向の速度

 $\dot{q}$; Y 軸の周囲の角加速度
 $\dot{U}_x$; X 軸方向の加速度
 $\dot{U}_z$; Z 軸方向の加速度

 A_{11} ; X 軸方向の並進の付加質量
 A_{33} ; Z 軸方向の並進の付加質量
 A_{55} ; Y 軸の周囲の回転の付加質量

 C_x ; X 軸方向に働く流体力の無次元係数
 C_z ; Z 軸方向に働く流体力の無次元係数
 C_R ; Y 軸の周囲の流体力のモーメントを打消す
 ように働くモーメントの抵抗係数
 C_m ; Y 軸の周囲の流体力のモーメントの無次元
 係数

ただし、 C_x , C_z , および C_m では慣性力によるものは除く。

2.3 使用データ

円筒容器の約 $\frac{1}{10}$ 模型を塩化ビニール樹脂で作り、3 分力検出器に取付け、波動水槽内を曳航し、数値シミュレーションに必要な C_x , C_z および C_m の静的流力特性を求めた。図 1 はその結果を示す。

実験結果を整理し、最小自乗法によって求めた近似曲線は、それぞれ次のようになった。

$$\left. \begin{aligned} C_x &= -0.962 \cos \alpha \\ C_z &= -0.800 \sin \alpha + 0.065 \sin 3\alpha \\ &\quad + 0.089 \sin 5\alpha \\ C_m &= 0.00424 \sin 2\alpha + 0.00324 \sin 6\alpha \\ &\quad + 0.000393 \sin 10\alpha \end{aligned} \right\} (2)$$

ただし、 α は迎角である。

この結果は $\frac{1}{10}$ 模型について得られたものであり、レイノルズ数の相違を考慮し、上記の値にスケールファクター 0.3 を乗じたものを、円筒容器の値として採用する。

表 1 は $\frac{1}{10}$ 模型の諸元、表 2 は円筒容器の諸元を示す。数値シミュレーションは、表 2 の値を用いて実施した。

表 1 $\frac{1}{10}$ 模型の諸元

Dimensions of the model

長さ (mm) length	直径, D (mm) diameter	f = H/D
129	120	1.1

2.4 計算上の要点

運動方程式は、円筒容器固定座標で計算されるので、得られた結果を地球固定座標上の値に変換し、落下状況を調べることにした。

当初、タイムステップを 0.1 sec として計算を行ったが、予想していた減衰振動が見られなかった。タイムステップについて検討した結果、0.01 sec 以下を採用すれば、計算上の不自然な振動が消えることが分った。ここでは計算時間の短縮のため、0.01 sec を採用した。

また、円筒容器の初期条件として、姿勢角 θ を 0.01° 刻みで変化させ、6000 m 深度までの落下運動を追跡することにした。

3. 結 果

以上のように、数値シミュレーションを実施した結果、表 3 に示すような運動をすることがわかった。

また、この表の区分のうち、いくつかの初期条件でシミュレートした個々の結果を図 3 に示す。

これらの図は、図 2 に示す θ の値を変化させたとき、円筒容器の落下運動の変化状況を重心の運動で示す。運動追跡は 6000 m 深度まで行った。

(1) $\theta \leq 49.44^\circ$ のとき

6000 m 深度まではほぼ横揺れがなく、落下初期の位置から 20 m 程度離れるに過ぎない。

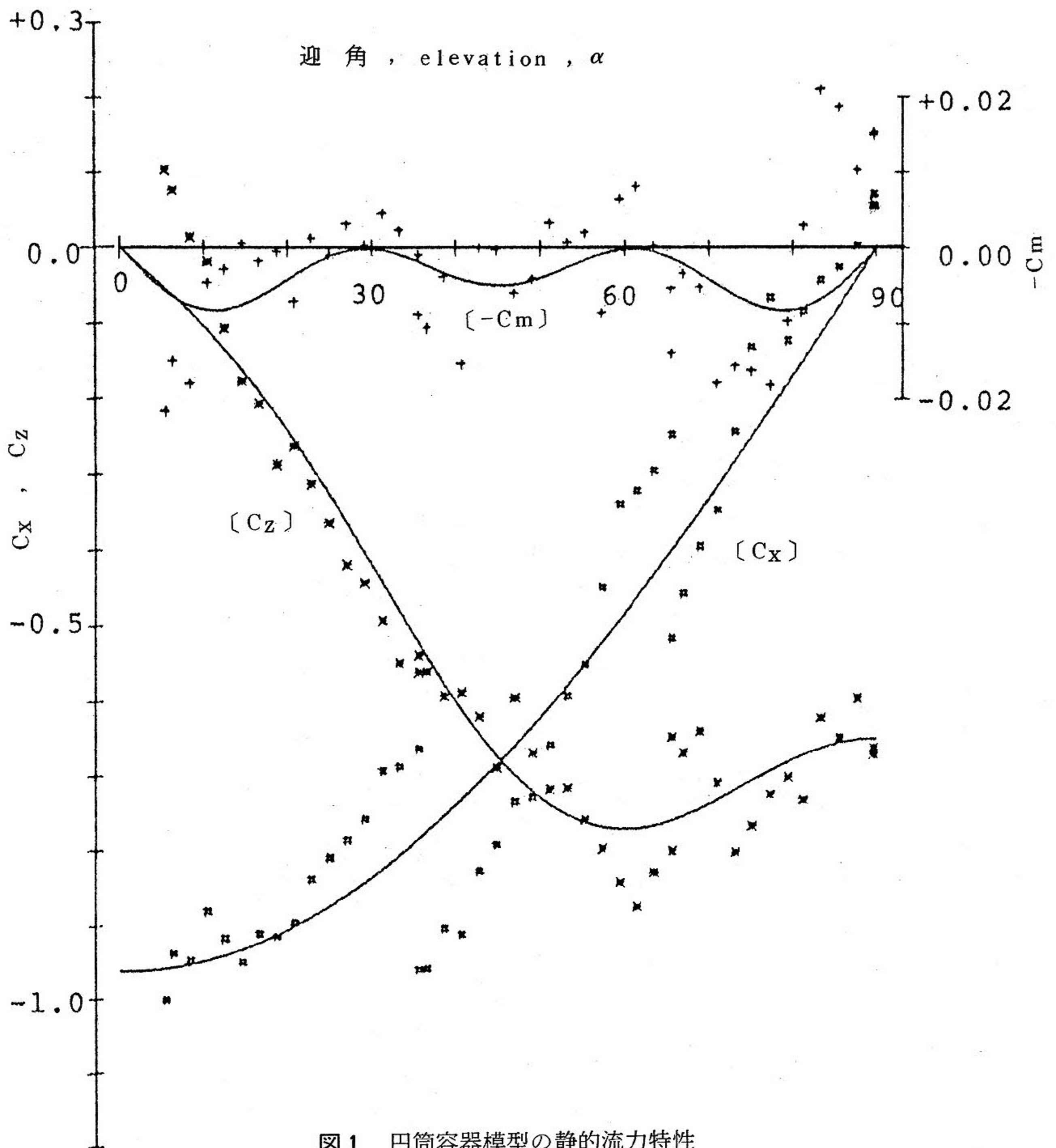


図1 円筒容器模型の静的流力特性

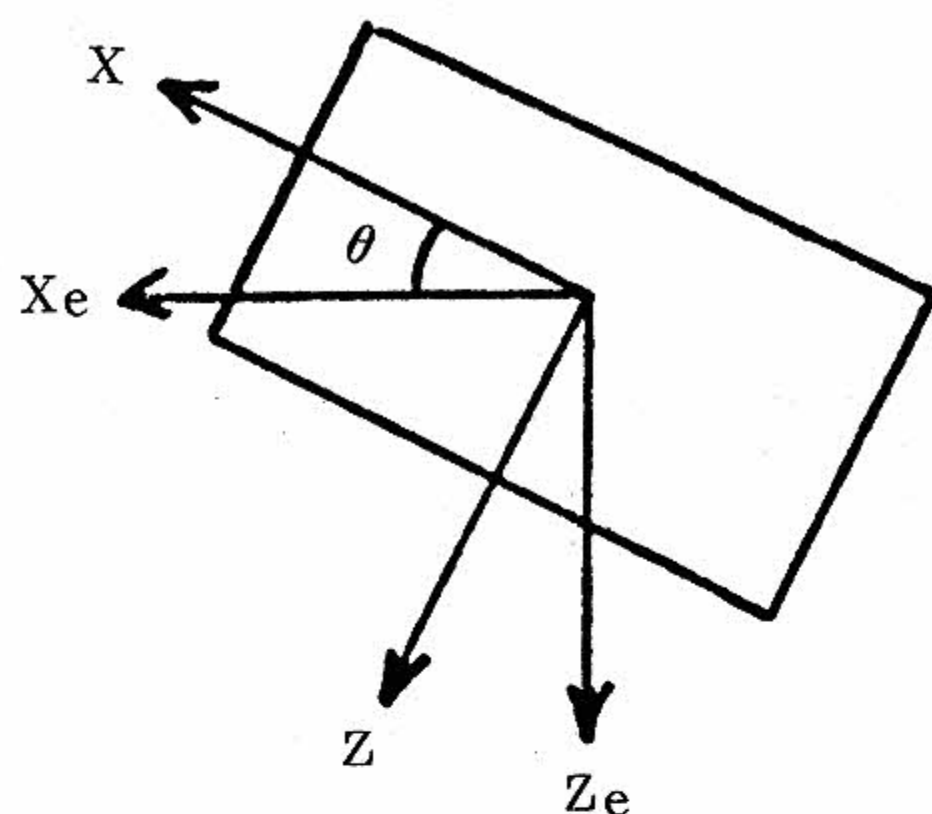
Static hydrodynamic characteristics of the models of circular cylinders

表2 円筒容器の諸元

Constants for numerical simulation of the circular cylinder

質量, m (kg) weight	直径, a (m) diameter	長さ, b (m) length	$A_{11}/\rho V$	$A_{33}/\rho V$	$A_{55}/(\rho/\rho_e) I_y$	ピッチ減衰係数
4630	1.3	1.4	0.6	0.8	0.25	0.093

pitch damping coefficient



X, Z ; 円筒容器固定座標
co-ordinate on the circular cylinder
 X_e, Z_e ; 地球固定座標
co-ordinate on earth

図2 初期条件
First period conditions

表3 円筒容器の落下運動の種類
Falling motions of the
circular cylinder

角 度 (θ) angle	種 類 classification
$0.00 \sim 49.44^\circ$	減 衰 振 動 damping oscillation
$49.45 \sim 81.73^\circ$	非 減 衰 振 動 non-damping oscillation
$81.74 \sim 89.90^\circ$	回 転 運 動 rotational motion

図3中の(1)がその概略図である。

(2) $49.45^\circ \leq \theta \leq 81.73^\circ$ のとき

6000 m 深度に達してもまだ横振れは残り、位置のずれは、最大約 120 m に達する。

図3中の(2),(3)および(4)にはその概略を示す。

X 軸の正方向または負方向にずれるかは、 θ によってその範囲が決まっていると思われるが、 0.01° 刻みでは確認できなかった。

(3) $\theta \geq 81.74^\circ$ のとき

図3の(5),(6),(7)および(8)に示すように、3,000 m 付近から回転運動に移るもの、落下の初期で、回転運動を起こすものさまざまである。また、6,000 m 深度での中心位置からのずれは最大 800 m 程度であった。

4. 結 言

当初は、 θ によって表3の区分によって、X 軸の正負方向の別まで分かると予想していた。しかし $81 \sim 83^\circ$ 付近は不安定領域で、 θ の 0.01° 刻みで運動方向が異なるため、範囲の細分化は困難であった。

また、円筒容器の初期姿勢角の相違によって減衰振動、非減衰振動および回転運動の別が生じる理由と条件について、今回、明らかにできなかった。

なお、本研究の数値シミュレーションには、HITAC 10 II システムを使用した。

文 献

- 1) 野本昌夫, 堀田宏, 服部陸男, 1979, “有限円筒状物体の水中落下運動の解析”, JAMSTECTR (3), 7 ~ 15
- 2) Hoerner, S. F., “Fluid-Dynamic Drag” (1965), Published by the author.

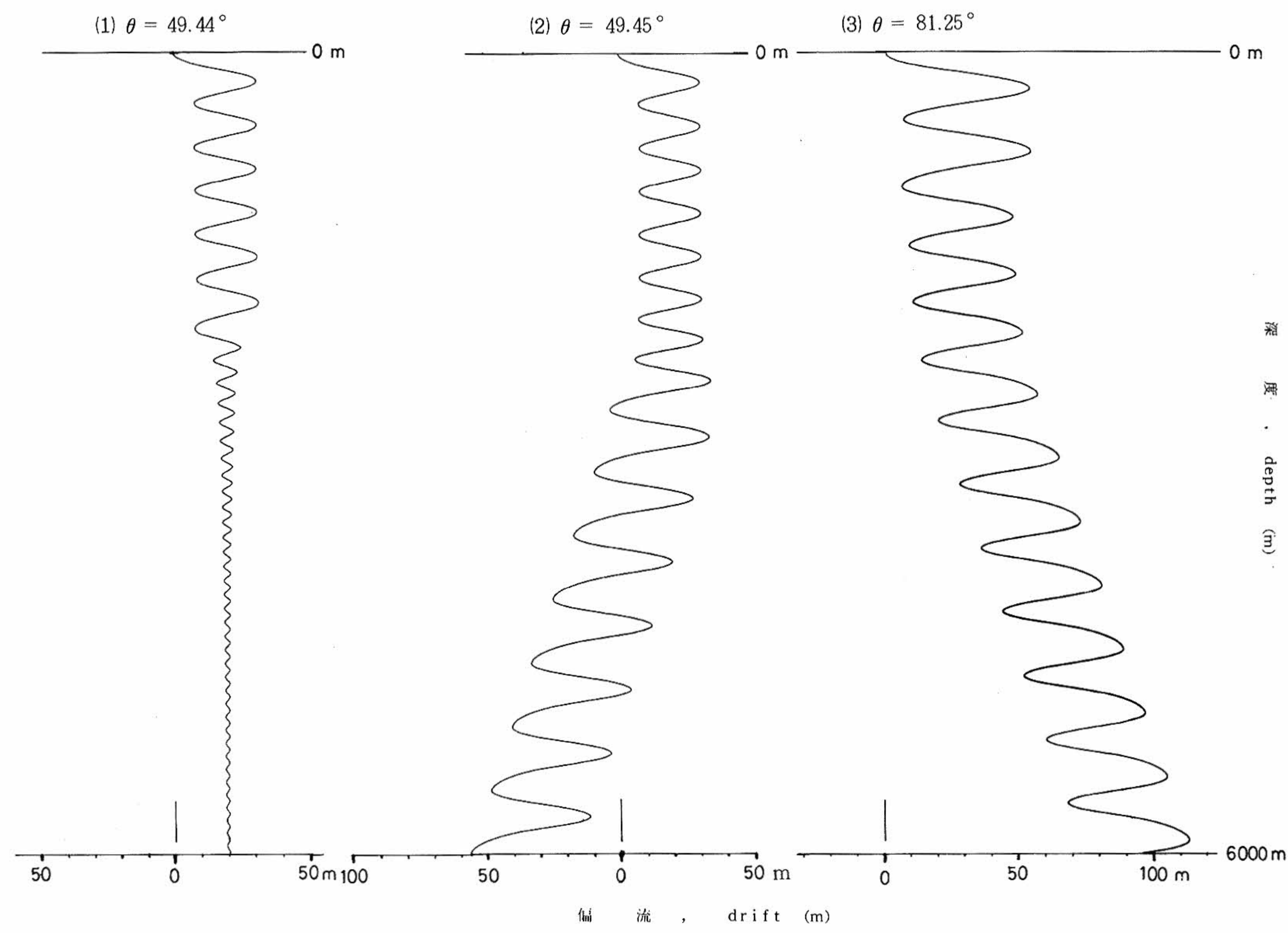


図3 円筒容器の落下運動 (その1)
Falling motion of the circular cylinder (Part 1)

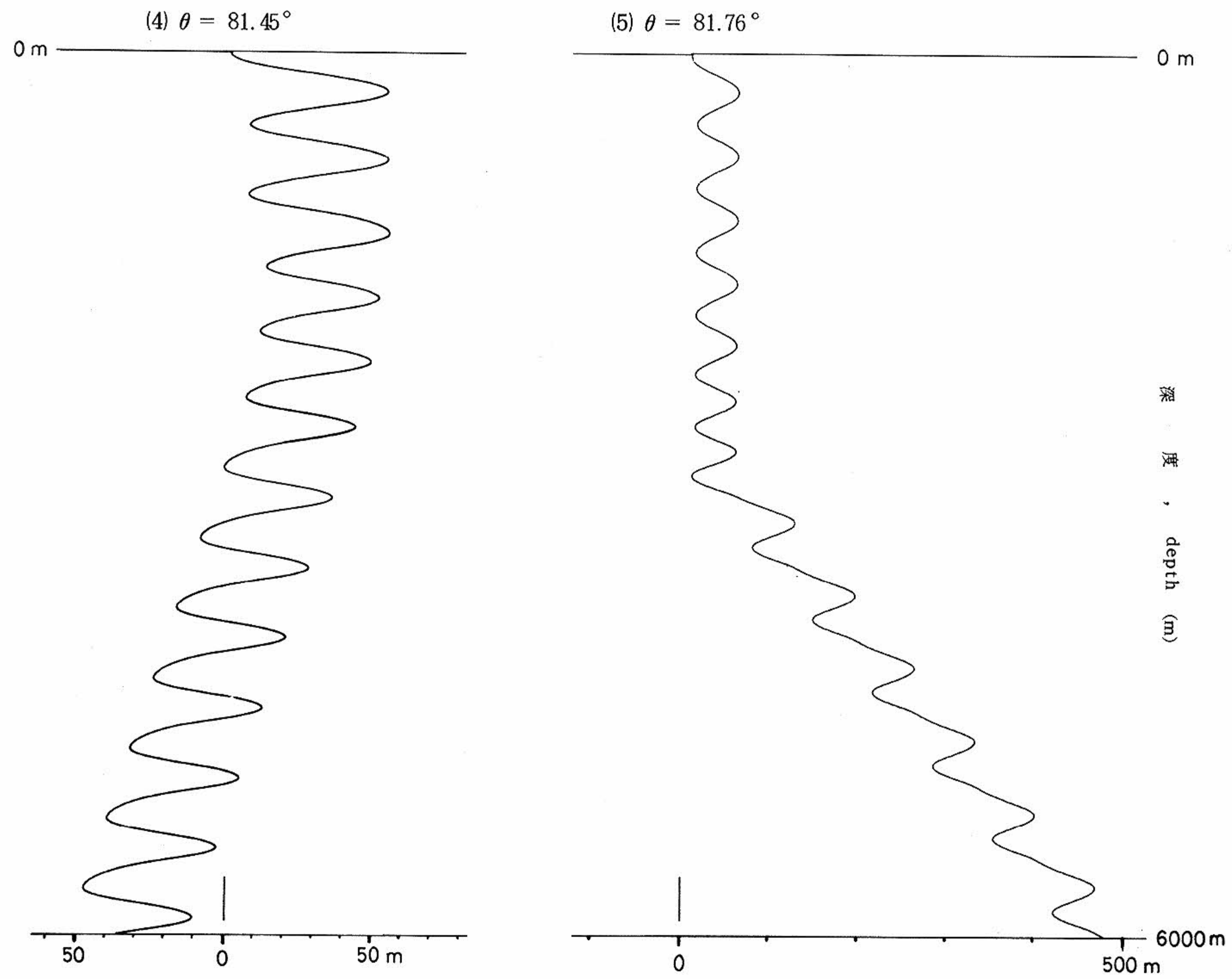


図3 円筒容器の落下運動(その2)
Falling motion of the circular cylinder (Part 2)

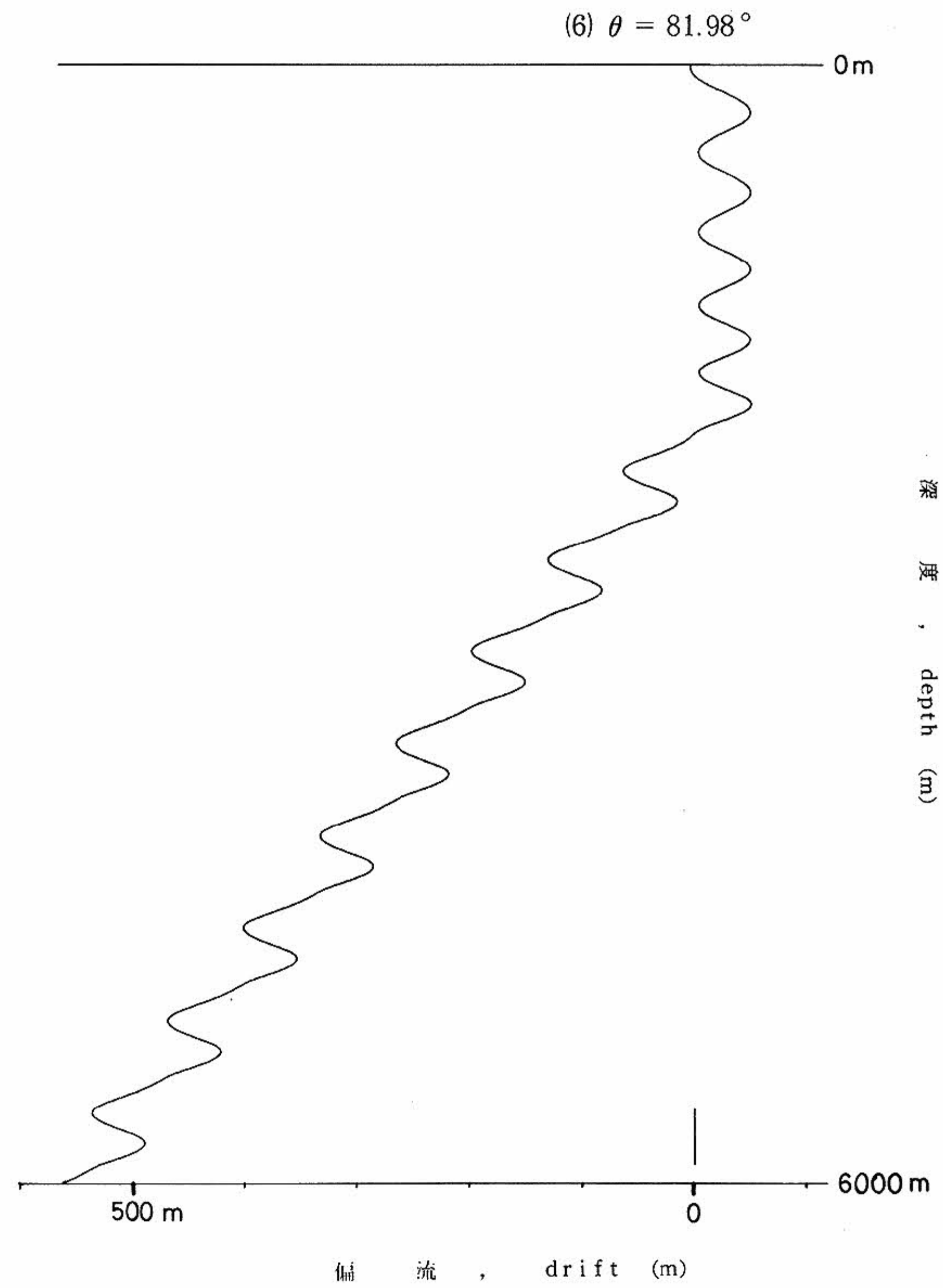


図3 円筒容器の落下運動 (その3)
Falling motion of the circular cylinder (Part 3)

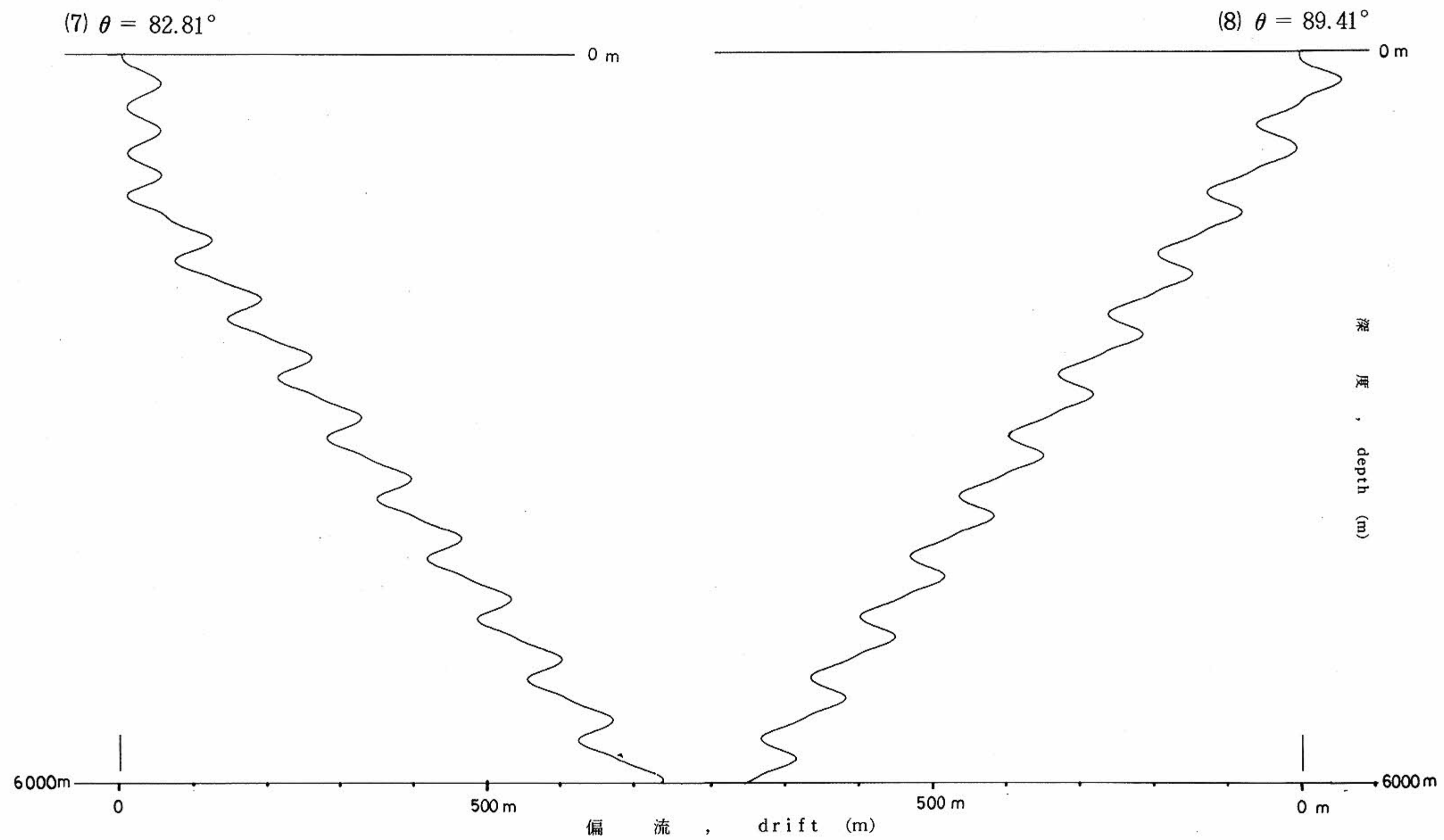


図3 円筒容器の落下運動 (その4)
 Falling motion of the circular cylinder (Part 4)