

JAERI-M  
90-181

船用炉炉心内流動に及ぼす船体横揺の  
影響に関する研究

1990年10月

楠 剛・鈴木 治\*・伊藤 泰義・細田 誠吾\*\*

JAERI-M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。  
入手の間合わせは、日本原子力研究所技術情報部情報資料課（〒319-11茨城県那珂郡東海村）  
あて、お申しこしください。なお、このほかに財団法人原子力弘済会資料センター（〒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。

JAERI-M reports are issued irregularly.  
Inquiries about availability of the reports should be addressed to Information Division, Department  
of Technical Information, Japan Atomic Energy Research Institute, Tokai-mura, Naka-gun,  
Ibaraki-ken 319-11, Japan.

© Japan Atomic Energy Research Institute, 1990

---

編集兼発行 日本原子力研究所  
印 刷 日立高速印刷株式会社

船用炉炉心内流動に及ぼす船体横揺の影響に関する研究

日本原子力研究所原子力船研究開発室

楠 剛・鈴木 治\*・伊藤 泰義・細田 誠吾\*\*

(1990年9月25日受理)

船体運動のうち横揺が炉心内流動に及ぼす影響を理論的に検討した。検討の対象は、当室で開発中の改良船用炉炉心とし、解析は、横揺に関する計算機能を追加した汎用炉心熱水力解析コード「THERMIT-2」により実施し、横揺周期、横揺振幅、炉心発熱量、境界条件等が、出口流速の変動量、流速変動と加速度変動の位相差に与える影響を検討した。計算の結果、炉心発熱がある場合よりもない場合の方が出口流速の変動が大きくなるなど興味深い知見が得られた。

Analytical Study on the Effects of Rolling on the Flow  
in the Core of the Marine Reactor

Tsuyoshi KUSUNOKI, Osamu SUZUKI<sup>\*</sup>  
Yasuyoshi ITOH and Seigo HOSODA<sup>\*\*</sup>

Office of Nuclear Ship Research and Development  
Japan Atomic Energy Research Institute  
Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken

(Received September 25, 1990)

The effect of rolling on the flow in reactor core have been investigated theoretically. The flow was analyzed utilizing the subchannel analysis code THERMIT-2 developed by MIT modified by us to compute the acceleration fields due to rolling. The analysis were done on the advanced marine reactor under development by our office. As a results, the variation of channel velocity has been obtained which will be used to estimate the critical heat flux on the fuel surface. Furthermore, a noteworely phenomenon that the heat generation in the reactor core reduces the velocity variation has been clarified.

Keywords: Subchannel Analysis, Marine Reactor, Rolling, Acceleration

---

\* NKK Corporation Nuclear Plant Dept.

\*\* Century Research Center Corporation

## 目 次

1. 緒 言 .....	1
2. 計算方法 .....	3
3. 計算条件 .....	9
4. 計算結果と考察 .....	20
5. 結 言 .....	57
参考文献 .....	57

## Contents

1. Introduction .....	1
2. Computing Method .....	3
3. Computing Conditions .....	9
4. Results and Discussion .....	20
5. Conclusion .....	57
Reference .....	57

## 表 リ ス ト

- 表 3.1 計算に用いた炉心の主要目及び形状データ  
 表 3.2 横揺時の炉心熱流動計算の計算条件  
 表 3.3 収束パラメータの感度解析  
 表 4.1 横揺時の炉心内熱流動計算の計算条件及び計算結果

## 図 リ ス ト

- 図 1.1 6成分の船体運動  
 図 2.1 座標系  
 図 2.2 出口圧力の補正  
 図 3.1 改良船用炉燃料集合体配置図  
 図 3.2 改良船用炉燃料集合体構造図  
 図 3.3 計算モデル  
 図 3.4 炉心出口流速分布 (ケース2) ベースケース  
 図 3.5 炉心出口流速分布 (ケースA) 収束打切回数感度  
 図 3.6 炉心出口流速分布 (ケースB) 収束判定誤差感度  
 図 3.7 炉心出口流速分布 (ケースC) タイムステップ最大値感度  
 図 4.1 炉心出口流速分布 (ケース1) 炉心上下メッシュ無し  
 図 4.2 炉心出口流速分布 (ケース2) 炉心上下2メッシュ  
 図 4.3 炉心出口流速分布 (ケース3) 炉心上10メッシュ, 下2メッシュ  
 図 4.4 炉心出口流速分布 (ケース4) 周期6秒  
 図 4.5 炉心出口流速分布 (ケース5) 周期9秒  
 図 4.6 炉心出口流速分布 (ケース6) 周期12秒  
 図 4.7 炉心出口流速分布 (ケース7) 熱出力1/2  
 図 4.8 炉心出口流速分布 (ケース8) 熱出力1/4  
 図 4.9 炉心出口流速分布 (ケース9) 熱出力0.0  
 図 4.10 炉心出口流速分布 (ケース10) 最大振幅15度  
 図 4.11 炉心出口流速分布 (ケース11) 最大振幅45度  
 図 4.12 炉心出口流速分布 (ケース12) 周期6秒, 熱出力及び流量1/2  
 図 4.13 炉心出口流速分布 (ケース13) 周期6秒, 熱出力及び流量1/4  
 図 4.14 炉心出口流速分布 (ケース14) 周期6秒, 熱出力及び流量1/8  
 図 4.15 炉心出口流速分布 (ケース15) 周期15秒, 熱出力及び流量1/2  
 図 4.16 炉心出口流速分布 (ケース16) 周期15秒, 熱出力及び流量1/8

- 図 4.17 炉心出口流速分布 (ケース17) 熱出力 0.0, 流量 1 / 2
- 図 4.18 炉心出口流速分布 (ケース18) 熱出力 0.0, 流量 1 / 4
- 図 4.19 炉心出口流速分布 (ケース19) 最大振幅45度, 周期12秒
- 図 4.20 炉心出口流速分布 (ケース20) 最大振幅45度, 周期 6 秒
- 図 4.21 炉心出口流速分布 (ケース21) 最大振幅15度, 周期12秒
- 図 4.22 炉心出口流速分布 (ケース22) 最大振幅15度, 周期 6 秒
- 図 4.23 炉心出口流速分布 (ケース23) 流量 1 / 2
- 図 4.24 炉心入口左端に加わる加速度要素 (周期15秒)
- 図 4.25 炉心入口左端に加わる加速度要素 (周期12秒)
- 図 4.26 炉心入口左端に加わる加速度要素 (周期 9 秒)
- 図 4.27 炉心入口左端に加わる加速度要素 (周期 6 秒)
- 図 4.28 炉心入口左端に加わる全加速度変化 (周期15秒)
- 図 4.29 炉心入口左端に加わる全加速度変化 (周期12秒)
- 図 4.30 炉心入口左端に加わる全加速度変化 (周期 9 秒)
- 図 4.31 炉心入口左端に加わる全加速度変化 (周期 6 秒)
- 図 4.32 横揺れ時の炉心内流れの定性的解釈

## 1. 緒 言

原子力船の炉プラント内の伝熱，流動現象を定量的に評価するときは，船体運動に起因する加速度に基づく体積力が，流体に及ぼす影響も考慮しなければならない場合がある。船体は，波，風，潮流，操舵の影響によって，図 1.1 に示す 6 成分の運動が複合した運動をし，この運動に伴う加速度が，重力加速度と合わせて流体に作用する。これらの加速度に基づく体積力に起因して，原子力船の炉プラントでは，陸上発電プラントでは見られない特異な現象が発生する。例えば，船体運動に起因する加速度は炉プラントの位置によってその大きさや作用方向が異なるので，循環ループにおいて循環力を発生させ<sup>1)</sup>，容器内の流れに偏流を発生させる。また，加速度が変動すると，二相流の気相と液相に作用する体積力が，それぞれ時間的に変動するので，気泡の離脱過程や液体との相対運動に影響を及ぼす。このことは，動揺しているプラントの限界熱流束が静止したプラントよりも低下する原因の一つと考えられる。<sup>2)</sup>

これからの船用炉及び海洋炉（海底資源開発用動力炉等）には，その用途及び経済性の観点から，高度に安全で軽量，小型の原子炉が求められている。<sup>3)</sup>このような船用炉の設計に資するために，船体運動に起因する加速度が炉プラント内の伝熱流動現象に及ぼす影響をより明確にすることを目的として研究を行っている。

当室（原子力船研究開発室）では，上下方向の加速度変動が限界熱流束に及ぼす影響について昭和60年度から3年間にわたり神戸商船大学との共同研究で実験的検討を実施している。

本報告では，船体運動のうち横揺（ローリング）等の船体重心を中心とする回転運動が炉心内流れに及ぼす影響を明らかにするための研究の第1歩として，MITで開発された汎用炉心熱水力解析コード「THERMIT-2」に横揺に係わる計算機能を追加したコードを用いて，横揺周期，横揺振幅，炉心発熱量，境界条等をパラメータとして横揺時の炉心内流れを計算し，各々の炉心内流動に与える影響を明らかにする。また，回転運動が与える各燃料集合体内の冷却材の流量変動について理論的に検討する。



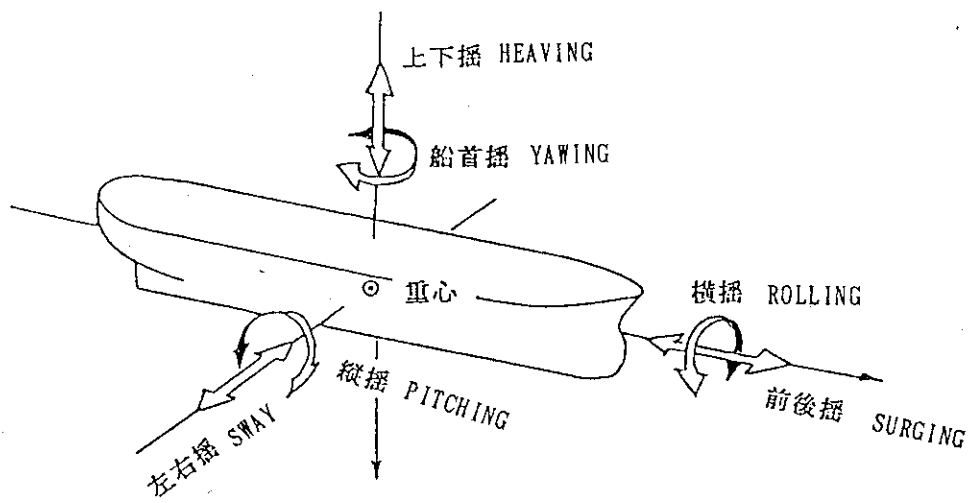


図 1.1 6成分の船体運動

## 2. 計 算 方 法

船体が横揺した場合の炉心内流動を、汎用熱水力学解析コード「THERMIT-2」に計算機能を追加したコードを用いて計算する。THERMIT-2の概要及び追加した計算機能を以下に示す。

### 2.1 THERMIT-2の概要

THERMIT-2の第1版「THERMIT」は、MITのKellyとKazimiにより1979年に開発された二流体モデルによる最初の3次元サブチャンネル解析コードである。このTHERMITはKelly, Kao, Kazimiにより改良され、1981年に第2版「THERMIT-2」<sup>4)</sup>が発表された。

本報告の計算例では、液相单相の二次元計算しか実施していないが、THERMIT-2の二相流計算を含めた概略を以下に示す。THERMIT-2は二流体モデルを用いているので、基礎式は、気液各相に対する質量、運動量、エネルギーの合計6つの保存式である。従って、気液間の熱的非平衡も扱うことができる。また、各コントロールボリュームに液体抵抗を分布させた分布抵抗モデル(Distributed Resistance Model = Porous Body Model)による3次元計算を行うので、横揺に関係する式を簡素化していない。保存式を導入するうえでは、粘性消散エネルギーは無視しうる、各コントロールボリューム内では気相と液相の圧力が等しい、等を仮定している。参考までに6つの保存式を以下に示す。

Conservation of Vapor Mass

$$\frac{\partial}{\partial t} (\alpha \rho_v) + \nabla \cdot (\alpha \rho_v \vec{V}_v) = \Gamma - W_{lv} \quad (2.1)$$

Conservation of Liquid Mass

$$\frac{\partial}{\partial t} [(1-\alpha)\rho_l] + \nabla \cdot [(1-\alpha)\rho_l \vec{V}_l] = -\Gamma - W_{ll} \quad (2.2)$$

Conservation of Vapor Energy

$$\frac{\partial}{\partial t} (\alpha \rho_v e_v) + \nabla \cdot (\alpha \rho_v e_v \vec{V}_v) + P \nabla \cdot (\alpha \vec{V}_v) + P \frac{\partial \alpha}{\partial t} = Q_{wv} + Q_i - Q_{lv} \quad (2.3)$$

Conservation of Liquid Energy

$$\frac{\partial}{\partial t} [(1-\alpha)\rho_l e_l] + \nabla \cdot [(1-\alpha)\rho_l e_l \vec{V}_l] + p \nabla \cdot [(1-\alpha)\vec{V}_l] - P \frac{\partial \alpha}{\partial t} = Q_w - Q_i - Q_u \quad (2.4)$$

Conservation of Vapor Momentum

$$\alpha \rho_v \frac{\partial \vec{V}_v}{\partial t} + \alpha \rho_v \vec{V}_v \cdot \nabla \vec{V}_v + \alpha \nabla p = -\vec{F}_{wv} - \vec{F}_{iv} + \alpha p v g - F_{iv} \quad (2.5)$$

Conservation of Liquid Momentum

$$(1-\alpha)\rho_l \frac{\partial \vec{V}_l}{\partial t} + (1-\alpha)\rho_l \vec{V}_l \cdot \nabla \vec{V}_l + (1-\alpha) \nabla p = -\vec{F}_{wl} - \vec{F}_{il} + (1-\alpha)\rho_l \vec{g} - \vec{F}_{il} \quad (2.6)$$

ここで記号の意味は以下の通りである。

$e$  : 内部エネルギー

$F_i$  : 気液界面での運動量交換率

$F_t$  : 乱流による運動量交換率

$F_w$  : 壁面摩擦力

$g$  : 重力加速度

$P$  : 圧力

$Q_i$  : 気液界面での伝熱量

$Q_t$  : 乱流による伝熱量

$Q_w$  : 壁面からの伝熱量

$V$  : 流速

$W$  : 乱流による質量移動速度

$\alpha$  : ボイド率

$\Gamma$  : 蒸気発生率

$\rho$  : 密度

添字

l : 液体

v : 蒸気

数値解法としてはICE法 (Implicit Continuous-fluid Eulerian Method) を用いている。他のサブチャンネル解析コードでは、横流れが主流に対して小さいなどの仮定のもとに、炉心入口部から下流部のメッシュに順次計算を進め、この計算を何回か繰り返すいわゆるマーチング法を用いることが多いので、比較的厳しい非定常流、横流れが主流に対して比較的大きな流れ、逆流、気液対向二相流等を取り扱うことが難しかった。ICE法によれば、これらの流れも計算することが可能である。なお、境界条件としては、炉心の入口及び出口をそれぞれに圧力もしくは流量のいずれかを与えることができる。質量、運動量、エネルギーの各保存式には乱流に起因するコントロールボリューム間の交換量が含まれているが、この交換量を算出する構成方程式として、二相流中におけるエネルギー交換も表せるように、セル間で等体積の交換がされるモデルを採用している。また、広い空間に蒸気が集まりやすいこと (蒸気拡散) も表せるように、二相流の乱流混合係数をクオリティの関数として与え、スラグ流と環状流の境界で乱流混合係数が最大となるようなモデルを採用している。

## 2.2 THERMIT-2 に追加した計算機能

横揺が炉心内流動に及ぼす影響を THERMIT-2 で計算するためには、静止している炉心内を流れる流体に見かけの加速度を作用させ、流れ場の計算を行う。

座標系を図 2.1 に示す。一般座標系を  $x, z$  座標系とし、炉心に固定した座標系を  $X, Z$  座標系とする。THERMIT-2 の計算では、炉心に固定した  $X, Z$  座標系で見かけの加速度を評価し、この見かけの加速度を使用する。 $X, Z$  方向の見かけの加速度  $A_x, A_z$  は次式で表される。

$$\begin{aligned} A_x &= -(\ddot{x} \cos\theta + \ddot{z} \sin\theta) & + & & A_{gx} \\ A_y &= -(\ddot{x} \sin\theta + \ddot{z} \cos\theta) & + & & A_{gz} \end{aligned} \quad (2.7)$$

(横揺に起因する見かけの加速度)      (重力に起因する見かけの加速度)

ここで、 $A_{gx} = g \sin\theta$ ,  $A_{gz} = g \cos\theta$

一般座標系での加速度  $\ddot{x}, \ddot{z}$  は炉心を固定した座標系での座標 ( $X, Z$ ) と時間の関数であり以下の形となる。

$$\begin{aligned} \ddot{x} &= \ddot{\bar{x}}(X, Z, t) \\ \ddot{z} &= \ddot{\bar{z}}(X, Z, t) \end{aligned} \quad (2.8)$$

この関数形を具体的に表現するために炉心の運動を式で表現する必要がある。ここでは、横揺による炉心の運動は「炉心中心が船体重心を中心とした振子運動をするものとし、船体重心を含む鉛直面に対する振れ角  $\theta$  が次式で表される正弦波で表される」と規定する。

$$\theta = \theta_{\max} \cdot \sin(\omega t) \quad (2.9)$$

炉心に固定した座標系での点 ( $X, Z$ ) は、振れ角が  $\theta$  のとき一般座標系では次式で表される。

$$\begin{aligned}x &= \{X^2 + (L-Z)^2\}^{1/2} \sin(\theta + \theta_0) \\z &= L - \{X^2 + (L-Z)^2\}^{1/2} \cos(\theta + \theta_0)\end{aligned}\quad (2.10)$$

$$\text{ここで, } \theta_0 = \tan^{-1} \frac{X}{L-Z} \quad (2.11)$$

これを書き直すと以下のようなになる。

$$\begin{aligned}x &= \{X^2 + (L-Z)^2\}^{1/2} (\sin\theta \cos\theta_0 + \cos\theta \sin\theta_0) \\&= (L-Z) \sin\theta + X \cos\theta \\z &= L - \{X^2 + (L-Z)^2\}^{1/2} (\cos\theta \cos\theta_0 - \sin\theta \sin\theta_0) \\&= L - (L-Z) \cos\theta + X \sin\theta\end{aligned}\quad (2.12)$$

従って、炉心に固定した座標での任意の点 (X, Z) の一般座標での加速度  $\ddot{x}$ ,  $\ddot{z}$  は以下のようになる。

$$\ddot{x} = (L-Z) \frac{d^2}{dt^2} \sin\theta + X \frac{d^2}{dt^2} \cos\theta \quad (2.13)$$

$$\ddot{z} = -(L-Z) \frac{d^2}{dt^2} \cos\theta + X \frac{d^2}{dt^2} \sin\theta$$

$\sin\theta$ ,  $\cos\theta$  の 2 階微分は次のようになる。

$$\frac{d^2}{dt^2} \sin\theta = \frac{d}{dt} \left( \cos \frac{d\theta}{dt} \right) = -\sin\theta \left( \frac{d\theta}{dt} \right)^2 + \cos \left( \frac{d^2\theta}{dt^2} \right) \quad (2.14)$$

$$\frac{d^2}{dt^2} \cos\theta = \frac{d}{dt} \left( -\sin \frac{d\theta}{dt} \right) = -\cos\theta \left( \frac{d\theta}{dt} \right)^2 - \sin \left( \frac{d^2\theta}{dt^2} \right)$$

ここで、式 (2.9) より

$$\left( \frac{d\theta}{dt} \right)^2 = (\theta_{\max} \cdot \omega \cdot \cos(\omega t))^2 = (\theta_{\max} \cdot \sin(\omega t) \cdot \omega \cdot \cos(\omega t))^2 \quad (2.15)$$

$$= (\theta \cdot \omega \cdot \cot(\omega t))^2$$

$$\frac{d^2\theta}{dt^2} = -\theta_{\max} \cdot \omega^2 \cdot \sin(\omega t) = -\theta \omega^2 \quad (2.16)$$

式 (2.13), (2.14) を式 (2.7) に代入すると次式が得られる。

$$\begin{aligned}A_x &= -(\ddot{x} \cos\theta + \ddot{z} \sin\theta) - g \sin\theta \\&= -\{(L-Z)(-\dot{\theta}^2 \sin\theta \cos\theta + \ddot{\theta} \cos\theta) \\&\quad + X(-\dot{\theta}^2 \cos^2\theta - \ddot{\theta} \sin\theta \cos\theta)\} \\&\quad - \{-(L-Z)(-\dot{\theta}^2 \sin\theta \cos\theta - \ddot{\theta} \sin^2\theta) \\&\quad + X(-\dot{\theta}^2 \sin\theta + \ddot{\theta} \sin\theta \cos\theta)\} - g \sin\theta \\&= X\dot{\theta}^2 - (L-Z) \ddot{\theta} - g \sin\theta\end{aligned}\quad (2.17)$$

$$\begin{aligned}
 A_z = & (\ddot{x} \sin\theta + \ddot{z} \cos\theta) - g \cos\theta \\
 = & \{ (L-Z)(-\dot{\theta}^2 \sin\theta + \ddot{\theta} \sin\theta \cos\theta) \\
 & + X(-\dot{\theta}^2 \sin\theta \cos\theta - \ddot{\theta} \sin^2\theta) \} \\
 & \{ -(L-Z)(-\dot{\theta}^2 \cos^2\theta - \ddot{\theta} \sin\theta \cos\theta) \\
 & + X(-\dot{\theta}^2 \sin\theta \cos\theta + \ddot{\theta} \cos^2\theta) \} - g \cos\theta \\
 = & -X\ddot{\theta} - (L-Z)\dot{\theta}^2 - g \cos\theta \quad (2.18)
 \end{aligned}$$

なお、 $X = 0$ 、 $Z = 0$  の場合には

$$\begin{aligned}
 A_x = & -L\ddot{\theta} - g \sin\theta \\
 A_z = & -L\dot{\theta}^2 - g \cos\theta
 \end{aligned}$$

となり、それぞれ ( $X$ ,  $Z$ ) 座標原点の接線方向加速度 ( $-L\ddot{\theta}$ )、遠心加速度 ( $-L\dot{\theta}^2$ ) に重力加速度の  $X$ ,  $Z$  成分を加えた形となっている。

式 (2.15), (2.16) を (2.17) (2.18) に代入した式から  $A_x$ ,  $A_z$  を時間メッシュ毎に計算し、式 (2.5), (2.6) に示した運動量保存式中の重量加速度ベクトルに置き換えて、船体が横揺した場合の炉心内流動を計算した。

炉心入口の境界条件としては一様流速を与えた。炉心出口では静圧力を境界条件として与えたが、この圧力は炉心出口中央では常に一定とし、その他のノードの炉心出口圧力は、炉心出口中央から鉛直方向に測った高さに基づく水頭圧を炉心出口中央の圧力から減じた圧力に等しいものとして、時々刻々の境界条件とした。この補正方法を図 2.2 に示す。なお、この水頭圧を算出するときの流体密度としては、当該チャンネルの出口流体密度を用いた。

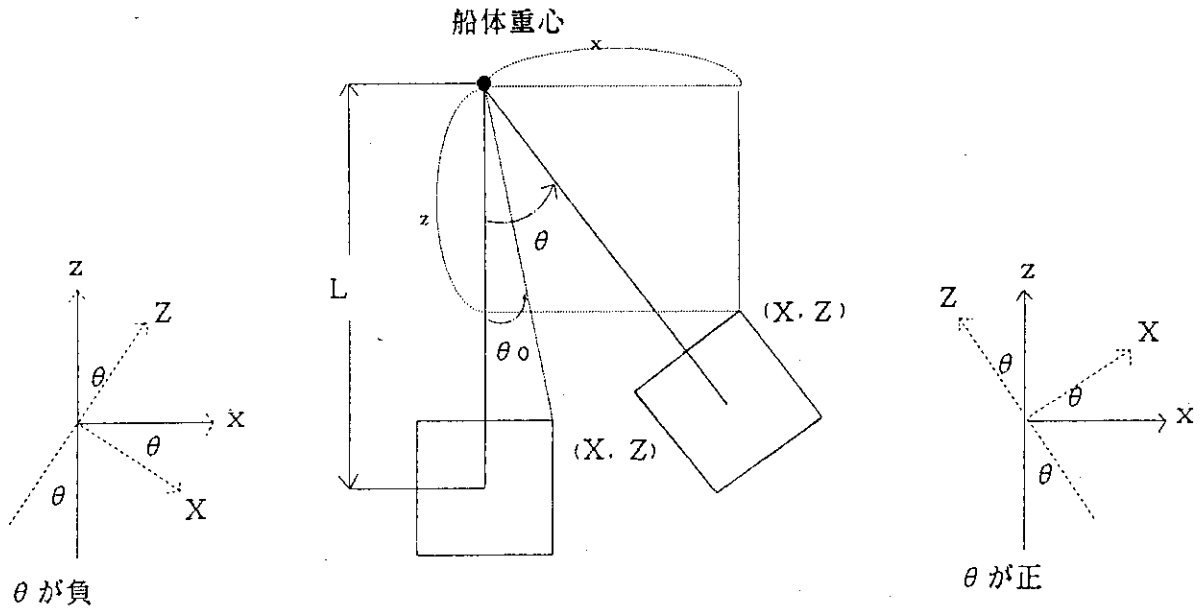
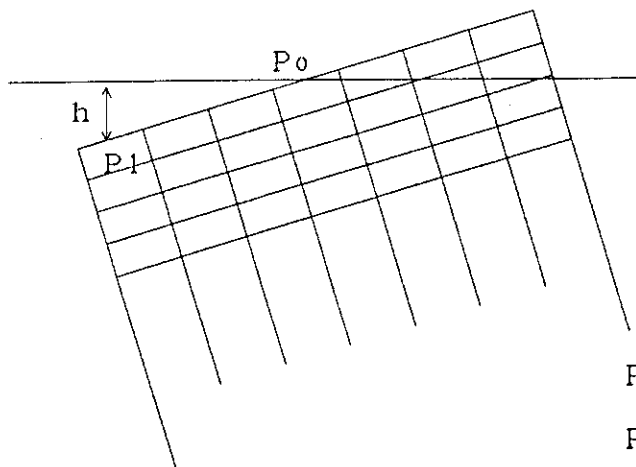


図 2.1 座標系



$$P_1 = P_0 + \rho g h$$

$P_0$ ; 中心ノードの圧力

$P_1$ ; 補正後の圧力

$\rho$ ; ノード出口の流体密度

図 2.2 出口圧力の補正

### 3. 計 算 条 件

計算の対象は、昭和61年度に試設計を行った改良船用炉炉心<sup>5)</sup>である。この炉心の燃料集合体配置を図3.1に示す。燃料集合体の構造図を図3.2に示す。計算に用いた炉心の主要目及び形状データを表3.1に示す。

計算は中央部の横並び7体の燃料集合体について行った。なお、図3.1に示した燃料集合体の中には、制御棒案内管が24本含まれるもの(図3.1のBとS)と、36本含まれるもの(同図のAとC)、含まれないもの(同図の無印)とがあるが、計算では計算結果を理解し易くするため、7体の集合体全てが、それぞれ24本の制御棒案内管を含むものとした。また、軸に垂直な方向については燃料集合体1体を1ノードとしてモデル化した。軸方向メッシュ幅は50mmである。計算モデルを図3.3に示す。

境界条件としては、出口圧力及び入口流速を与えた。入口流速は全ての入口ノードで解析時間を通じて一定値とした。また、炉心の出力分布は一様とした。感度解析は熱出力、周期、入口流速、最大振幅をパラメータとして行った。計算条件を表3.2に示す。

感度解析に先立ち、流動計算の収束性の検討のために、収束計算打切回数(NITMAX)、収束判定誤差(ESP, EPSI)、及びタイムステップ幅(DTMAX)の3項目をパラメータとした計算を実施した。この計算の条件と計算時間を表3.3に示す。その他の計算条件は表3.2のケース2の値を用いた。図3.4から図3.7に各々の感度解析計算結果の炉心出口流量を示す。この結果より収束条件としては表3.3のベースケースの値を使用することとした。



表 3.1 計算に用いた炉心の主要目及び形状データ

項 目	値
炉心発熱長	1 m
燃料集合体ピッチ	0.173 m
集合体幅	0.172 m
燃料ピッチ	0.0082 m
燃料被覆管外径	0.006 m
燃料集合体内燃料配置	21本 × 21本
燃料集合体内燃料棒数	345 本
燃料集合体内RCC案内シフル管数	24 本
冷却材入口温度	271.1 °C
炉心出口中央圧力	10.8 Mpa
燃料集合体軸方向等価直径	0.00859 m
燃料集合体内横流れ等価直径	0.00859 m
燃料集合体内横流れ等価流路長	0.173 m
燃料集合体横流れ等価流路面積	0.0953 m
燃料集合体横流れ圧損流速係数	1.82
船体重心と炉心中心の距離*	2.67 m

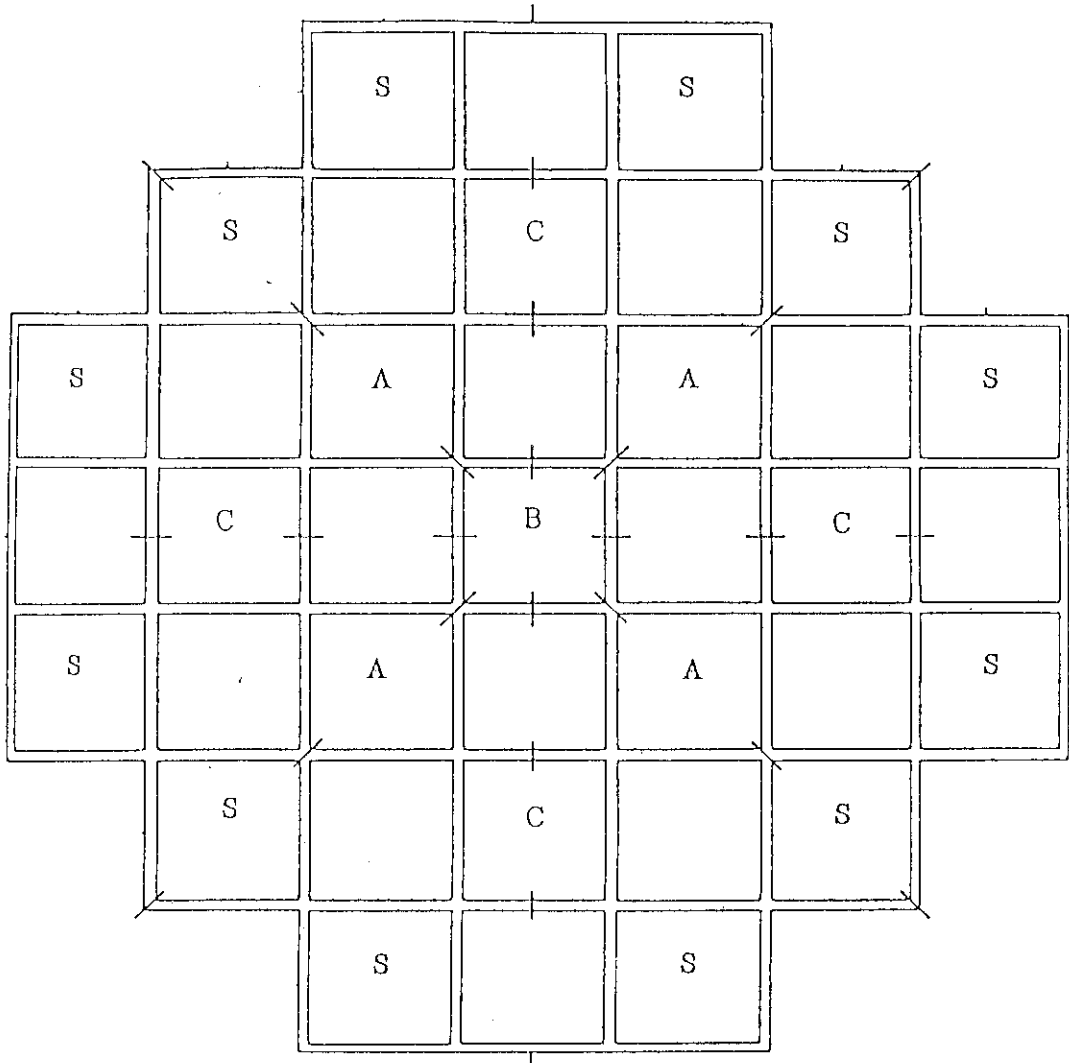
\*：原子力船「むつ」満載時の値を使用

表 3.2 横揺時の炉心熱流動計算の計算条件

ケース番号	熱出力 (MW)	周期 (秒)	入口流速 (m/s)	最大振幅 (度)	軸方向メッシュ
1	18.92	15.0	2.36	30	炉心上下無し
2	18.92	15.0	2.36	30	炉心上下2メッシュ
3	18.92	15.0	2.36	30	炉心上10メッシュ 炉心下2メッシュ
4	18.92	<u>6.0</u>	2.36	30	〃
5	18.92	<u>9.0</u>	2.36	30	〃
6	18.92	<u>12.0</u>	2.36	30	〃
7	<u>9.46</u>	15.0	2.36	30	〃
8	<u>4.73</u>	15.0	2.36	30	〃
9	<u>0.0</u>	15.0	2.36	30	〃
10	18.92	15.0	2.36	<u>15</u>	〃
11	18.92	15.0	2.36	<u>45</u>	〃
12	<u>9.46</u>	<u>6.0</u>	<u>1.18</u>	30	〃
13	<u>4.73</u>	<u>6.0</u>	<u>0.59</u>	30	〃
14	<u>2.365</u>	<u>6.0</u>	<u>0.295</u>	30	〃
15	<u>9.46</u>	15.0	<u>1.18</u>	30	〃
16	<u>2.365</u>	15.0	<u>0.295</u>	30	〃
17	<u>0.0</u>	15.0	<u>1.18</u>	30	〃
18	<u>0.0</u>	15.0	<u>0.59</u>	30	〃
19	18.92	<u>12.0</u>	2.36	<u>45</u>	〃
20	18.92	<u>6.0</u>	2.36	<u>45</u>	〃
21	18.92	<u>12.0</u>	2.36	<u>15</u>	〃
22	18.92	<u>6.0</u>	2.36	<u>15</u>	〃
23	18.92	15.0	<u>1.18</u>	30	〃

表 3.3 収束パラメータの感度解析

	NIMAX	EPSN	EPSI	DTMAX	CPUTIME
ベースケース (ケース2)	15	2.0E-9	1.0E-9	0.01	20 分
ケースA	10	2.0E-9	1.0E-9	0.01	15 分
ケースB	15	2.0E-7	1.0E-7	0.01	4 分
ケースC	15	2.0E-9	1.0E-9	0.05	11 分



- A ; 制御用制御棒 クラスタバンク A
- B ; " " バンク B
- C ; " " バンク C
- S ; 停止用制御棒 クラスタバンク S

図 3.1 改良舶用炉燃料集合体配置図

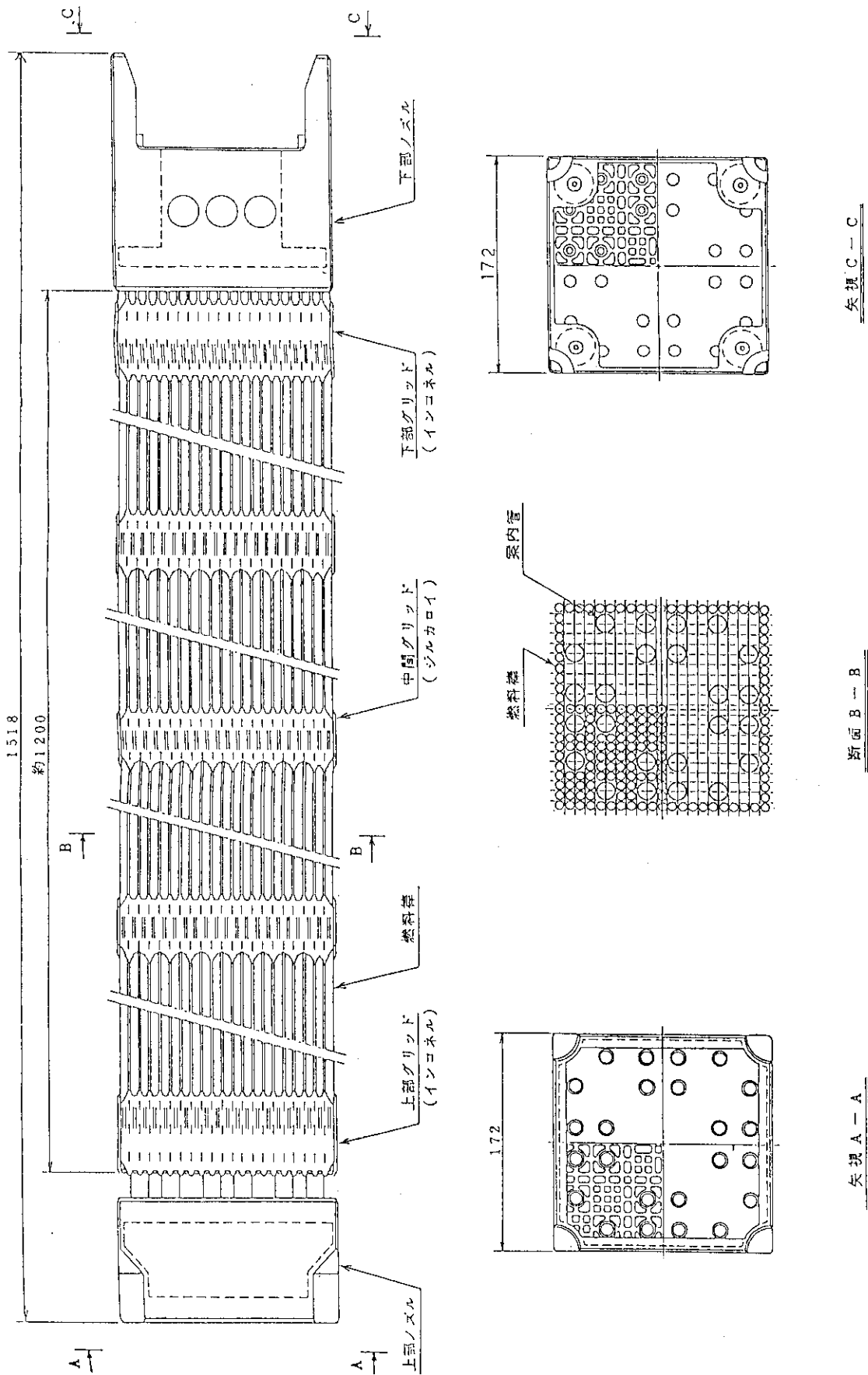


図 3.2 改良船用炉燃料集集体構造図

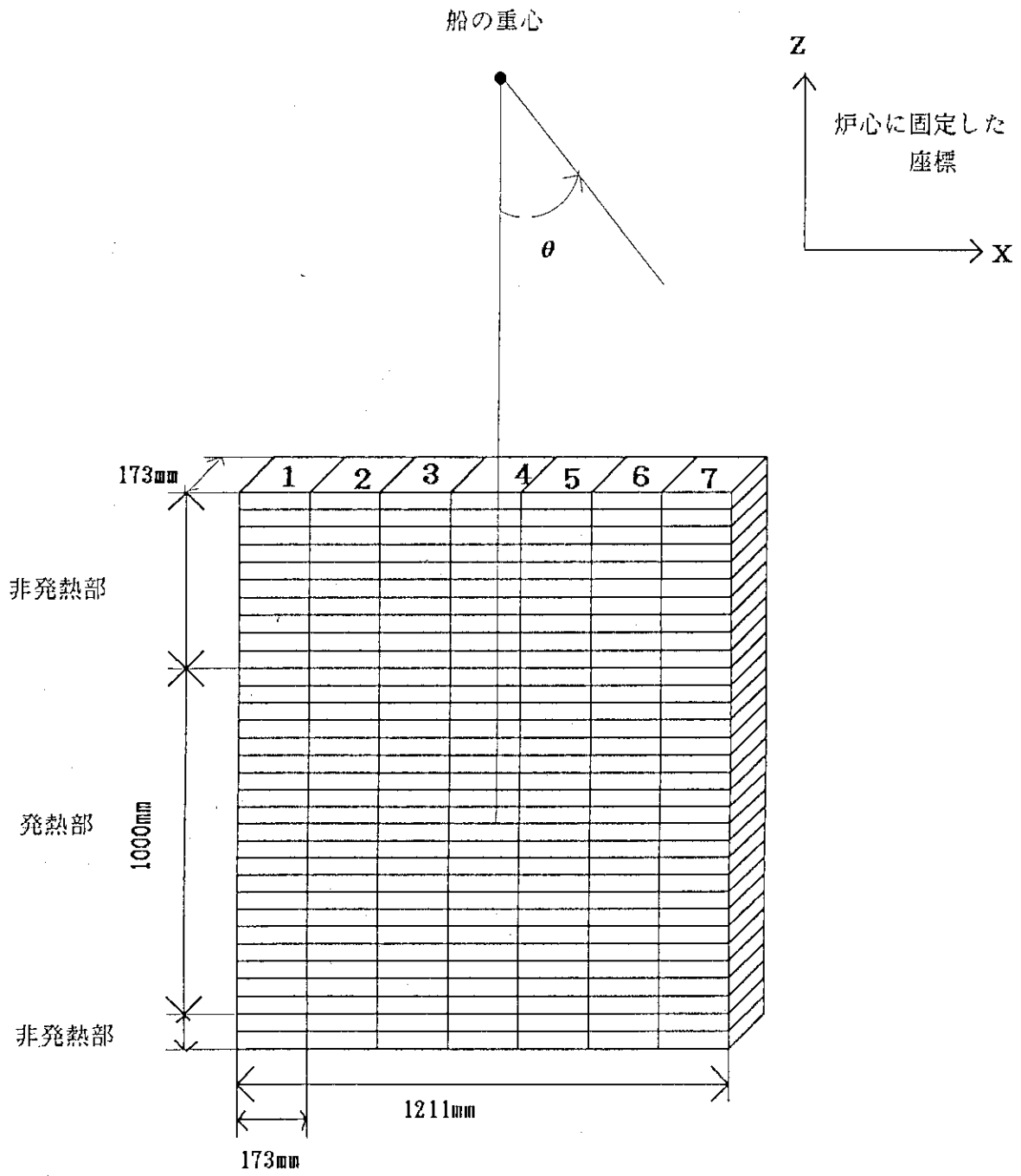


図 3.3 計算モデル

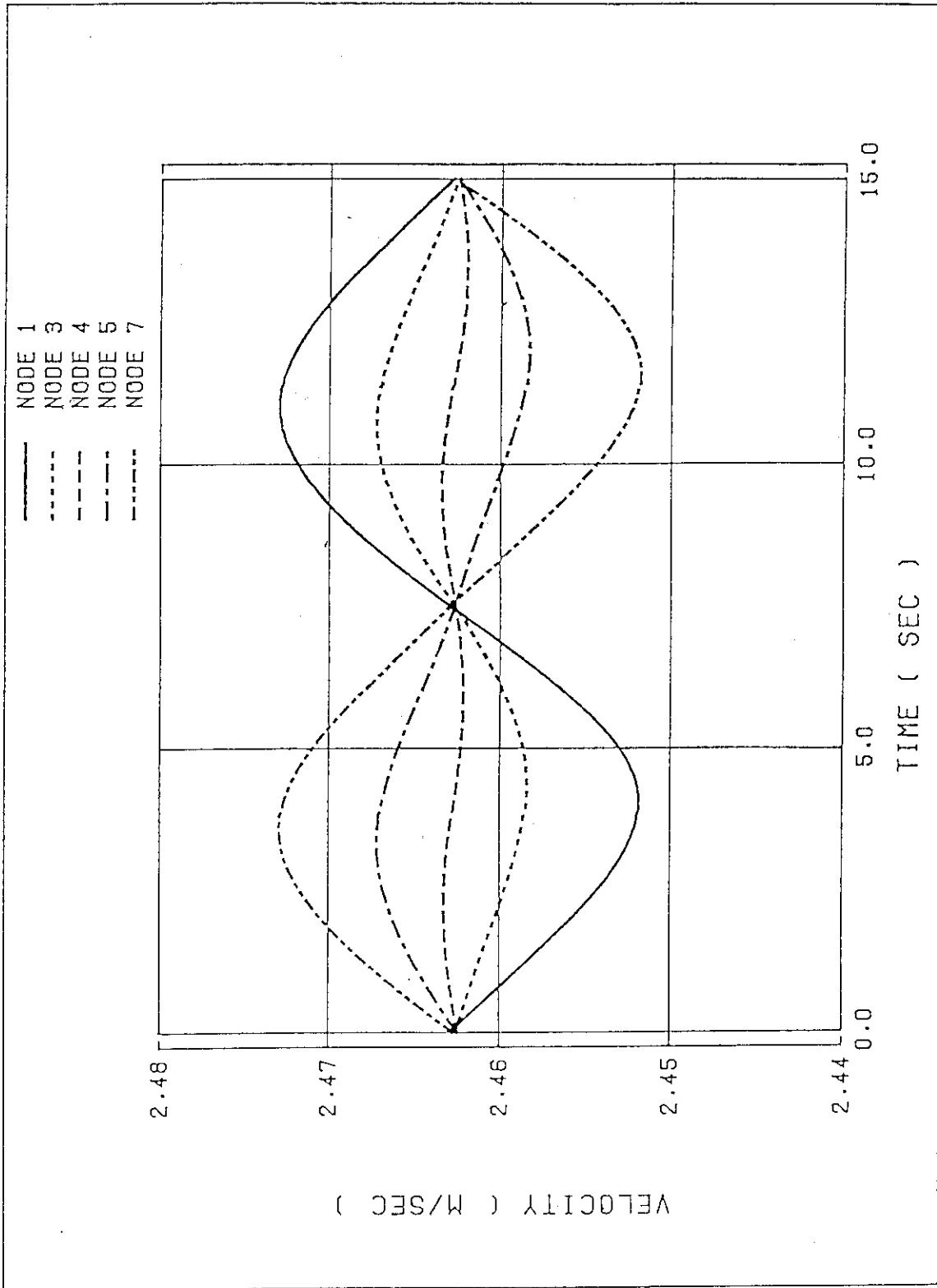


図 3.4 炉心出口流速分布 (ケース 2) ベースケース

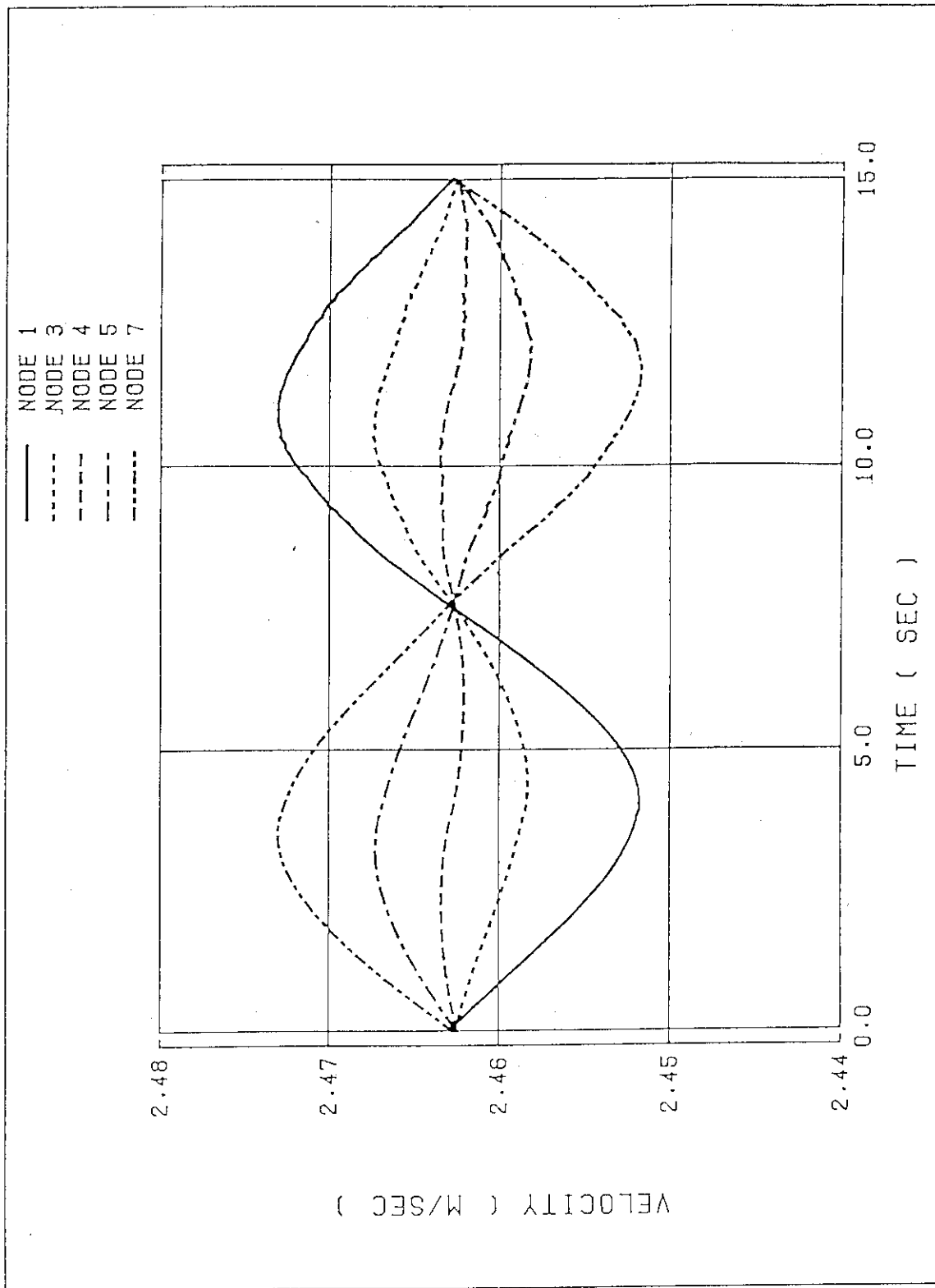


図 3.5 炉心出口流速分布 (ケース A) 収束打回数感度



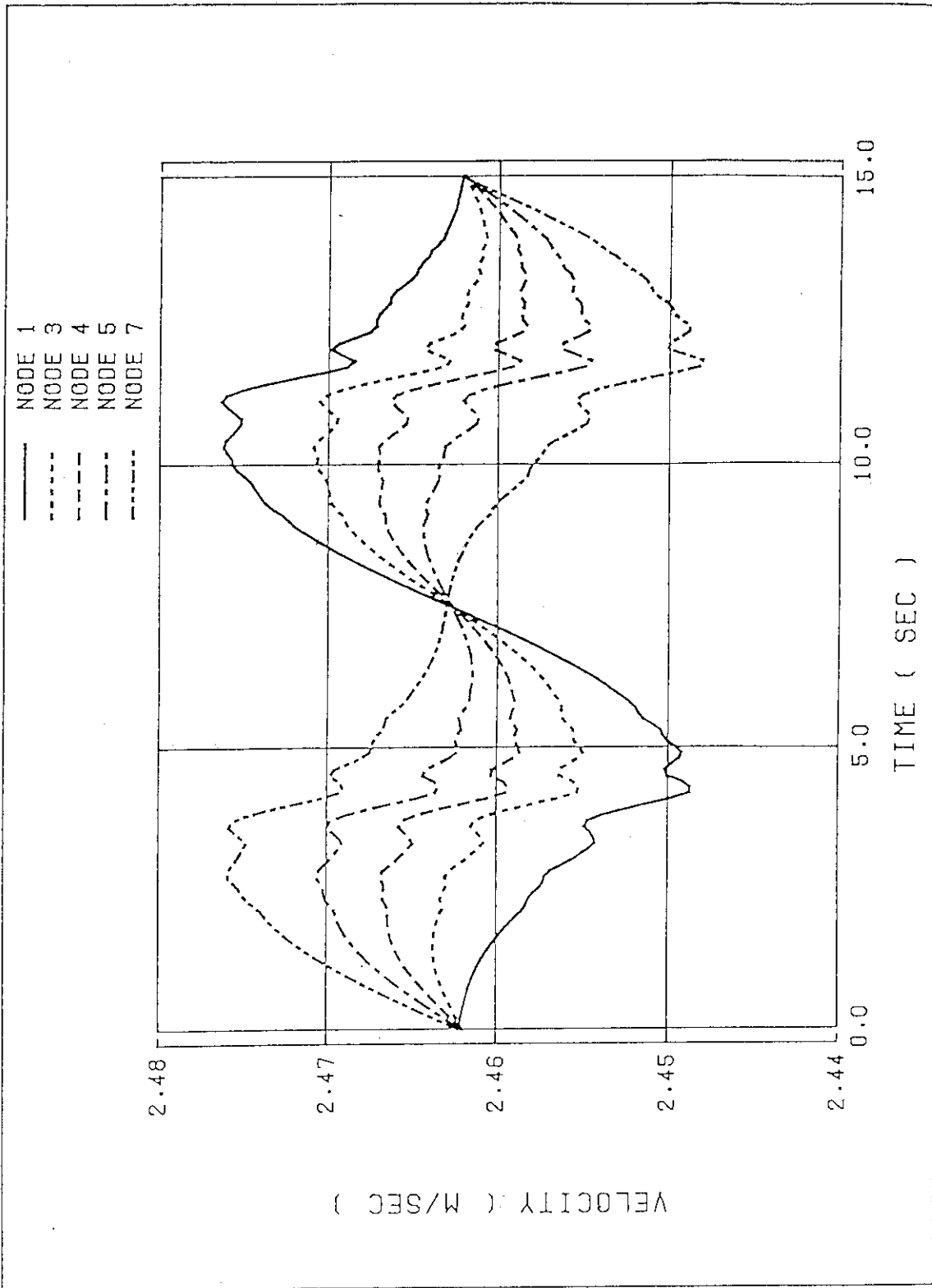


図 3.6 炉心出口流速分布 ( ケース B ) 収束判定誤差感度

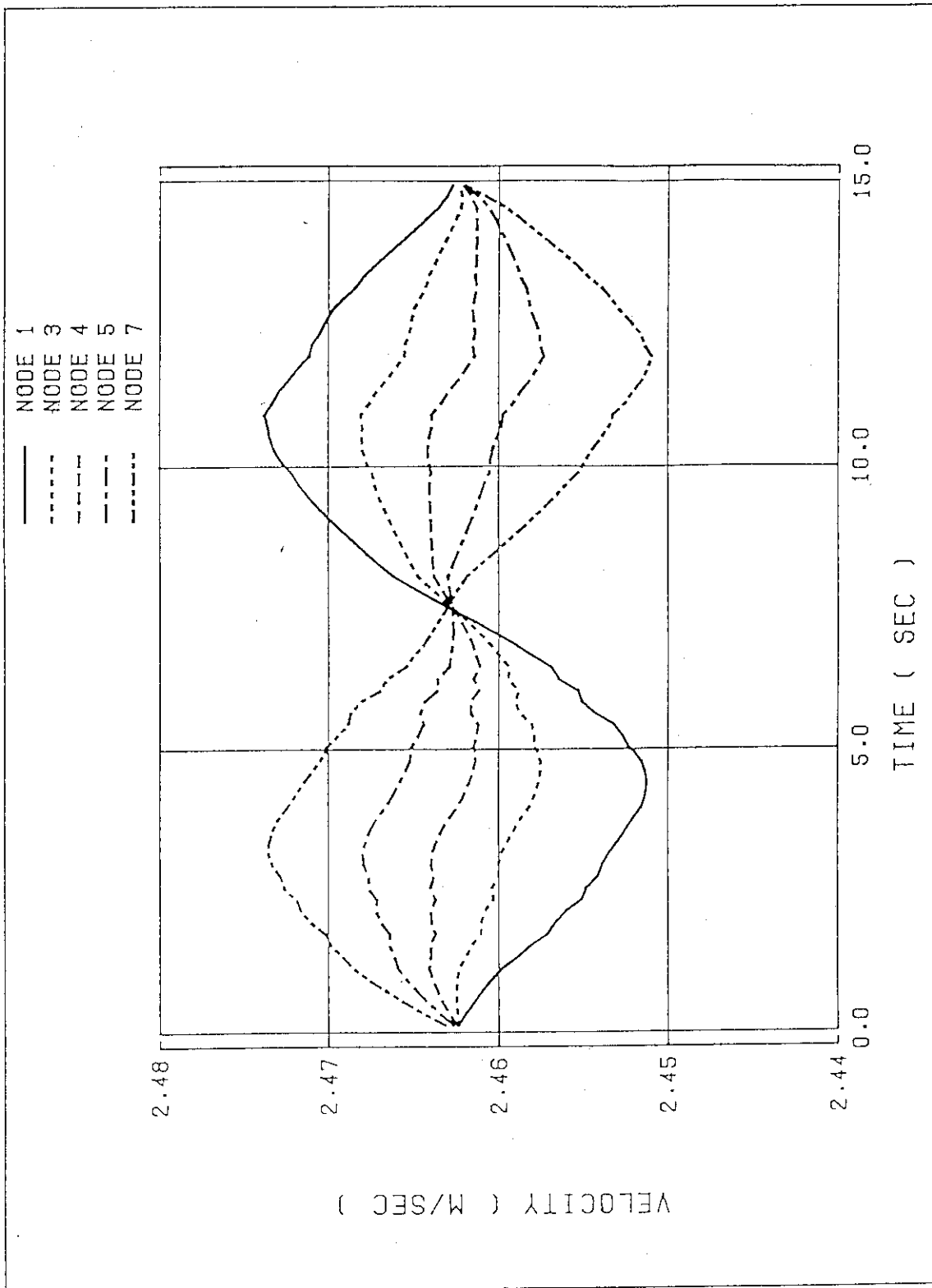


図 3.7 炉心出口流速分布 ( ケース C ) タイムステップ最大値感度

#### 4. 計算結果と考察

THERMIT-2 による横揺時の炉心内流動解析の計算条件と計算結果のうち炉心出口流速の変動についてまとめた表を表 4.1 に示す。計算は、熱出力（定格出力相当 18.92 MW，50% 出力，25% 出力，12.5% 出力及び発熱無し），入口流量（定格流量，50% 流量，25% 流量及び 12.5% 流量），周期（15 秒，12 秒，9 秒及び 6 秒）及び最大振幅（45°，30° 及び 15°）の組合せの中から実施した。

各々の計算結果のうち炉心出口流速分布を図 4.1 から図 4.23 に示す。表 4.1 に計算条件と共に、各ケースの炉心出口の最大流速と最小流速，流速の変化幅及び平均出口流速からの変化割合を示す。表中の下線部はベースケースとしたケース 3 から変化させたパラメータである。

参考のため、図 4.24 から図 4.31 に各周期での炉心入口左端にかかる加速度要素及び全加速度を示す。図中の各加速度表示の内容は以下の通りである。

$$\begin{aligned}
 F X & : X \text{ 方向の全加速度 (式 (2.17) に相当する)} \\
 & = F_{-X I} + F_{-X C Z} + F_{-X C X} \\
 F Z & : Z \text{ 方向の全加速度 (式 (2.18) に相当する)} \\
 & = F_{-Z I} + F_{-Z C Z} + F_{-Z C X} \\
 F_{-X I} & : \text{傾きによる } X \text{ 方向重力加速度} \\
 & = -g \cdot \sin \theta \\
 F_{-Z I} & : \text{傾きによる } Z \text{ 方向重力加速度} \\
 & = -g \cdot \cos \theta \\
 F_{-X C Z} & : \text{重心からの } Z \text{ 方向距離に依存した } X \text{ 方向加速度} \\
 & = -(L-Z) \cdot \ddot{\theta} \quad (\text{式 (2.17) 参照}) \\
 F_{-X C X} & : \text{炉心中心からの } X \text{ 方向距離に依存した } X \text{ 方向加速度} \\
 & = X \cdot \dot{\theta}^2 \quad (\text{式 (2.17) 参照}) \\
 F_{-Z C Z} & : \text{重心からの } Z \text{ 方向距離に依存した } Z \text{ 方向加速度} \\
 & = -(L-Z) \cdot \dot{\theta}^2 \quad (\text{式 (2.18) 参照}) \\
 F_{-Z C X} & : \text{炉心中心からの } X \text{ 方向距離に依存した } Z \text{ 方向加速度} \\
 & = -X \cdot \ddot{\theta} \quad (\text{式 (2.18) 参照})
 \end{aligned}$$

ここで、 $\theta = \theta_{\max} \cdot \sin(\omega t)$

$\theta_{\max}$ : 最大振幅

計算によって得られた結果を以下にまとめる。

- (1) 炉心の出口メッシュ数を变化させた場合の計算がケース 1，2，3（図 4.1 から図 4.3）である。ケース 1 では炉心発熱部の前後に非発熱部を設けなかった。ケース 2 で炉心発熱部の前後に 2 メッシュずつの非発熱部を設けた。ケース 3 では炉心入口に 2 メッシュ，炉

心出口に10メッシュの非発熱部を設けた。炉心出口の非発熱部領域を増やすと炉心出口部での流速の最大変化量は計算上小さくなる。ケース1, 2は出口境界の影響を強く受けていると考えられ、炉心出口の下流に非発熱部を十分に設けたケース3が炉心出口での圧力分布を考慮したモデルとなり、実際の炉心における状態に近いと考える。この計算結果より出口境界での圧力分布の与え方が計算結果に及ぼす影響が大きいことが判った。以降の計算はケース3の条件を基準とする。

- (2) 横揺周期のみを変化させた場合の計算がケース4 (周期6秒, 図4.4), ケース5 (周期9秒, 図4.5), ケース6 (周期12秒, 図4.6), ケース3 (周期15秒, 図4.3)である。最大振幅が同じ場合には、横揺周期が短くなるほど炉心出口での流速の変動は大きくなる。横揺れ周期が6秒の場合には炉心出口流速の変動が8.3%だが、横揺周期が12秒以上では1%以下である。周期が15秒の場合と6秒の場合に炉心入口左端に作用する全加速度は図4.28及び図4.31のF X及びF Zである。横軸は各々の1周期分である。両者の傾きによる重力加速度の変化(F-X I, F-Z I)は周期の同じ時期において同様に变化するが、両者の全加速度(F X, F Z)にはかなりの差異がある。この原因は図4.24及び図4.27に示す横揺に起因する見かけの加速度(式(2.7)の右辺第1項)が大きく異なることにある。横揺に起因する見かけの加速度の変動は炉心の各位置により異なり横流れを発生させる原因となる。周期の違いによる出口流量の変動の差は主としてこの横揺に起因する見かけの加速度によるものと考えられる。
- (3) 横揺周期のみを変化させた計算では、横揺周期が短いときと長いときとで出口流量の変化の様相が異なっている。横揺周期が短いとき(図4.4)には、出口流速の分布はチャンネル1と7である程度の対称性が認められるが、横揺周期が長い場合(図4.3)にはこの対称性が損なわれている。すなわち、横揺周期が短くなり炉心各部で横揺による見かけの加速度が異なることの影響が大きくなるほど、炉心出口流速の分布は対称性をもつことが判る。これに対し、横揺周期が長くなると、密度差に基づく静圧が見かけの加速度による体積力と同程度に流れに影響を及ぼすようになるので、前述の対称性が損なわれた流れになると考えられる。
- (4) 熱出力を変化させた場合の計算がケース3 (定格出力相当, 図4.3), ケース7 (50%出力, 図4.7), ケース8 (25%出力, 図4.8), ケース9 (発熱無し, 図4.9)である。出口流速の最大変化量は、各々0.00346 m/s, 0.02131 m/s, 0.03040 m/s, 0.03943 m/sであり、熱出力の変化が炉心出口流速の変動に与える影響はあまり大きくはない。しかし、熱出力が大きい場合に炉心出口の流速変動が抑制されるという効果は興味深い。この原因を炉心が左側に揺れている場合を例にとって図4.32を参照しながら定性的に説明する。動揺時の炉心の任意の水平面の静圧は、計算上、炉心上部の静圧が一樣な水平面の静圧に水頭圧を加えたものになるが、炉心が左側に揺れている場合には、この水頭圧を炉心の左側と右側で比較すると、左側の水温が低いために、左側の水頭圧の方が大きくなり、任意の水平面で右側より左側の静圧が大きい。従って、左側から右側の流れが誘起される。この静圧差に誘起される右向きの流れが、加速度変動に起因する左向きの流れを減少させる。

- (5) 周期15秒で最大振幅を変化させた場合の計算がケース10 (15°, 図4.10), ケース3 (30°, 図4.3), ケース11 (45°, 図4.11)である。出口流量の最大変化量は, 各々 0.00090m/s, 0.00346m/s, 0.00818m/s であった。周期12秒で最大振幅を変化させた場合の計算がケース21 (15°, 図4.21), ケース6 (30°, 図4.6), ケース19 (45°, 図4.19)である。出口流量の最大変化量は, 各々 0.01154m/s, 0.02469m/s, 0.04050m/s であった。周期6秒で最大振幅を変化させた場合の計算がケース22 (15°, 図4.22), ケース4 (30°, 図4.4), ケース20 (45°, 図4.20)である。出口流量の最大変化量は, 各々 0.10164m/s, 0.20473m/s, 0.31068m/s であった。いずれの周期においても, 最大振幅の増大にともない, 出口流速の変動振幅が増大した。また, いずれの周期の場合でも変化の様相を保持したまま, 変化幅が大きくなっている。振幅を変化させた場合には, 周期を変化させた場合と異なり, 船体運動に起因する見かけの加速度の変化と共に, 傾斜に基づく重力加速度の大きさが変化する影響が見られる。
- (6) 炉心内流体の温度差に誘起される流れの程度は, [熱出力]/[入口流速]に支配されると考えても大きな間違いはない。そこで, このパラメータを一定とした計算を行った。周期15秒で炉心入口流速と熱流束を同じ割合で変化させた場合の計算がケース3 (基準値, 図4.3), ケース15 (基準値の1/2, 図4.15), ケース16 (基準値の1/8, 図4.16)である。出口流束の最大変化量は, 0.00346m/s, 0.00538m/s, 0.02420m/s である。周期6秒で炉心入口流速と熱流束を同じ割合で変化させた場合の計算がケース12 (基準値の1/2, 図4.12), ケース13 (基準値の1/4, 図4.13), ケース14 (基準値の1/8, 図4.14)である。出口流速の最大変化量は, 0.35475m/s, 0.57592m/s, 1.19740m/s である。
- 当然予想されることであるが, 入口流速が小さい場合には流れの慣性力に対する加速度の変化による体積力の影響が強くなり, 出口流速の変動は大きくなる。
- (7) 熱出力をゼロとした場合がケース9 (基準流速, 図4.9), ケース17 (基準流速の1/2, 図4.17), ケース18 (基準流速の1/4, 図4.18)である。発熱を伴う場合のケース3 (基準流速, 図4.3), ケース15 (基準流速の1/2, 図4.15), ケース16 (基準流速の1/4, 図4.16)と比較すると明らかに出口流速分布が対称性を有している。このことから発熱を伴う場合の出口流量分布の非対称性は, 密度変化に伴う流動の影響と考えられる。(3)に示したように, この対称性の変化は横揺周期のみを変化させた場合の計算 (ケース4, ケース5, ケース6, ケース3)においても見られる。両者を合わせ考えると, 横揺周期が長い場合には, 船体横揺に起因する見かけの加速度変化に基づく流れに対し, 密度差に基づく流れが無視し得ないので左右非対称の流となるが, 周期の減少に伴い, 船体横揺に起因する見かけの加速度に基づく流れが支配的となるので左右対称な流れとなることが判る。

表 4.1 横揺時の炉心内熱流動計算の計算条件及び計算結果 (1/2)

ケース番号	熱出力 (MW)	周期 (秒)	入口流速 (m/s)	最大振幅 (度)	軸方向メッシュ	炉心出口流速 (m/s) 最小値 最大値	炉心出口流速の最大振幅 (m/s)	変化割合 (%)
1	18.92	15.0	2.36	30	炉心上下無し	2.42589~2.49802	0.07213	2.9
2	18.92	15.0	2.36	30	炉心上下2メッシュ	2.45179~2.47294	0.02115	0.9
3	18.92	15.0	2.36	30	炉心上10メッシュ 炉心下2メッシュ	2.46080~2.46426	0.00346	0.14
4	18.92	6.0	2.36	30	//	2.35799~2.56272	0.20473	8.3
5	18.92	9.0	2.36	30	//	2.42623~2.49781	0.07158	2.9
6	18.92	12.0	2.36	30	//	2.45005~2.47474	0.02469	1.0
7	9.46	15.0	2.36	30	//	2.39852~2.41983	0.02131	0.9
8	4.73	15.0	2.36	30	//	2.36878~2.39918	0.03040	1.3
9	0.0	15.0	2.36	30	//	2.34001~2.37944	0.03943	1.7
10	18.92	15.0	2.36	15	//	2.46219~2.46309	0.00090	0.04
11	18.92	15.0	2.36	45	//	2.45833~2.46651	0.00818	0.3
12	9.46	6.0	1.18	30	//	1.04790~1.40265	0.35475	29.0
13	4.73	6.0	0.59	30	//	0.30643~0.88235	0.57592	96.9
14	2.365	6.0	0.295	30	//	-0.46888~0.72852	1.19740	922.4

表 4.1 横揺時の炉心内熱流動計算の計算条件及び計算結果 (2/2)

ケース番号	熱出力 (MW)	周期 (秒)	入口流速 (m/s)	最大振幅 (度)	軸方向メッシュ	炉心出口流速(m/s) 最小値 最大値	炉心出口流速の 最大振幅 (m/s)	変化割合 (%)
15	9.46	15.0	1.18	30	炉心上10メッシュ 炉心下2メッシュ	1.22844~1.23382	0.00538	0.4
16	2.365	15.0	0.295	30	〃	0.29467~0.31887	0.02420	7.9
17	0.0	15.0	1.18	30	〃	1.14370~1.21487	0.07117	6.0
18	0.0	15.0	0.59	30	〃	0.52424~0.65117	0.12693	21.6
19	18.92	12.0	2.36	45	〃	2.44198~2.48248	0.04050	1.6
20	18.92	6.0	2.36	45	〃	2.30354~2.61422	0.31068	12.6
21	18.92	12.0	2.36	15	〃	2.45682~2.46836	0.01154	0.5
22	18.92	6.0	2.36	15	〃	2.41107~2.51271	0.10164	4.1
23	18.92	15.0	1.18	30	〃	1.26077~1.32049	0.05972	4.6

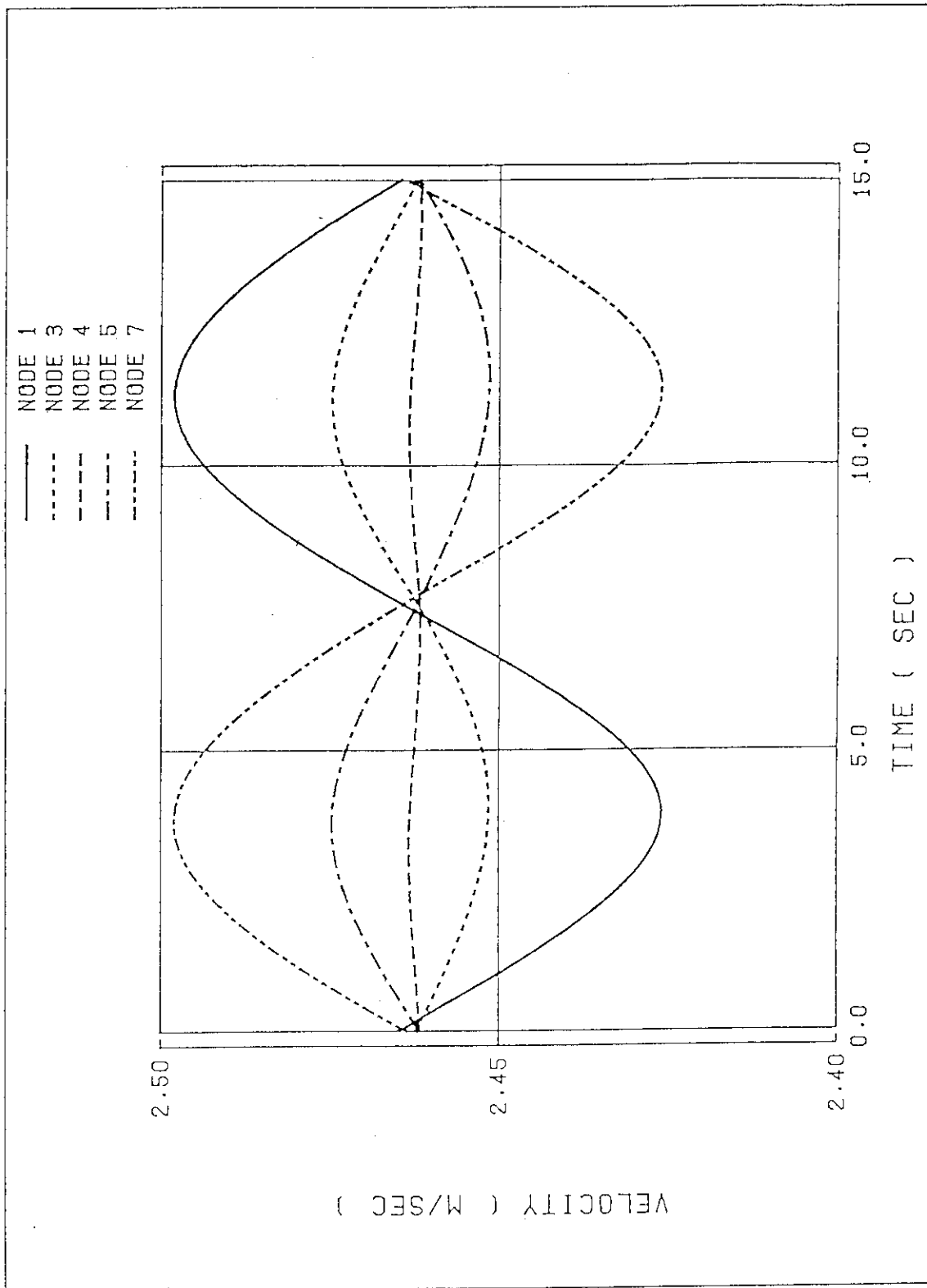


図 4.1 炉心出口流速分布 (ケース 1) 炉心上下メッシュ無し



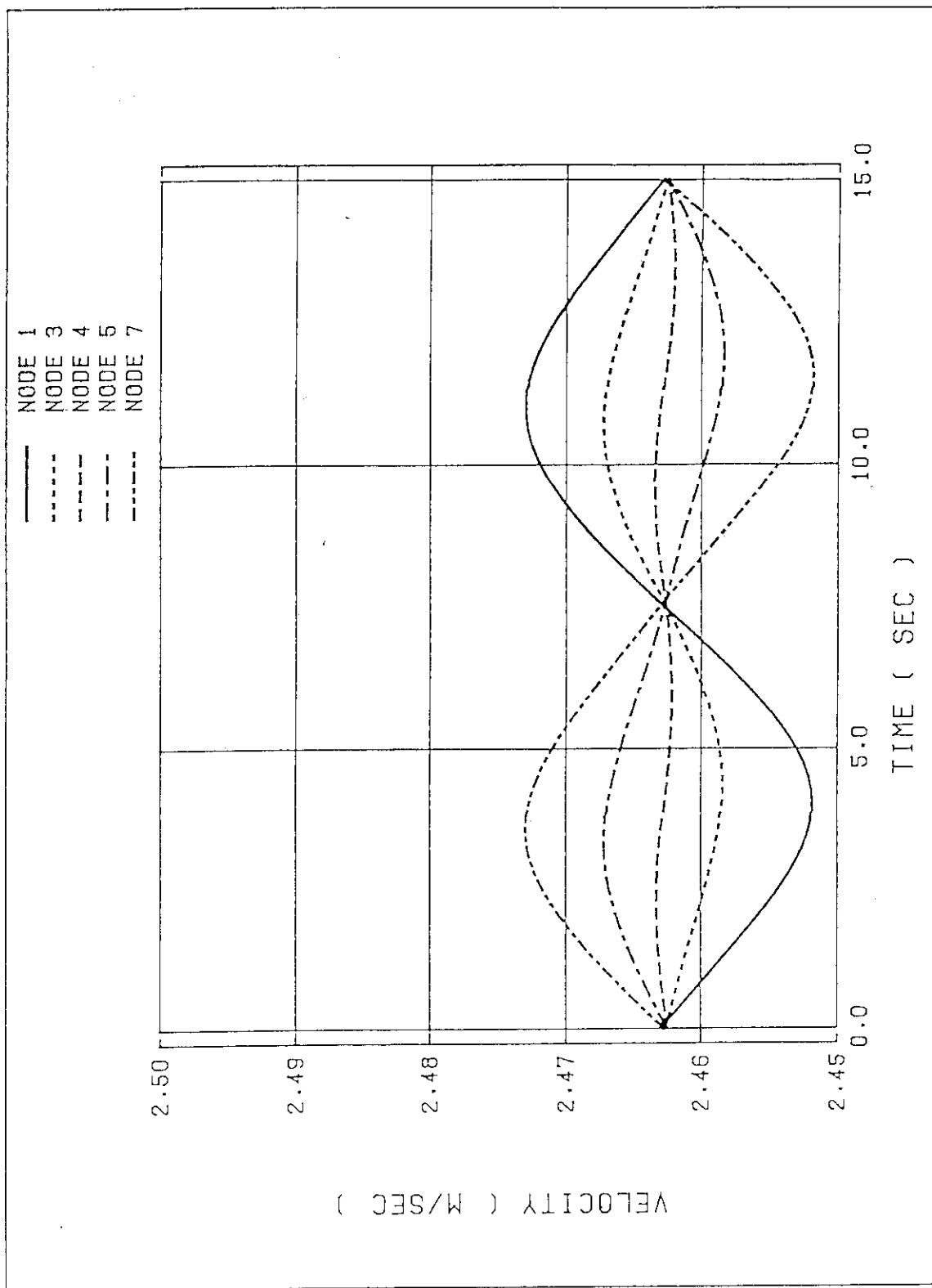


図4.2 炉心出口流速分布 (ケース2) 炉心上下2メッシュ

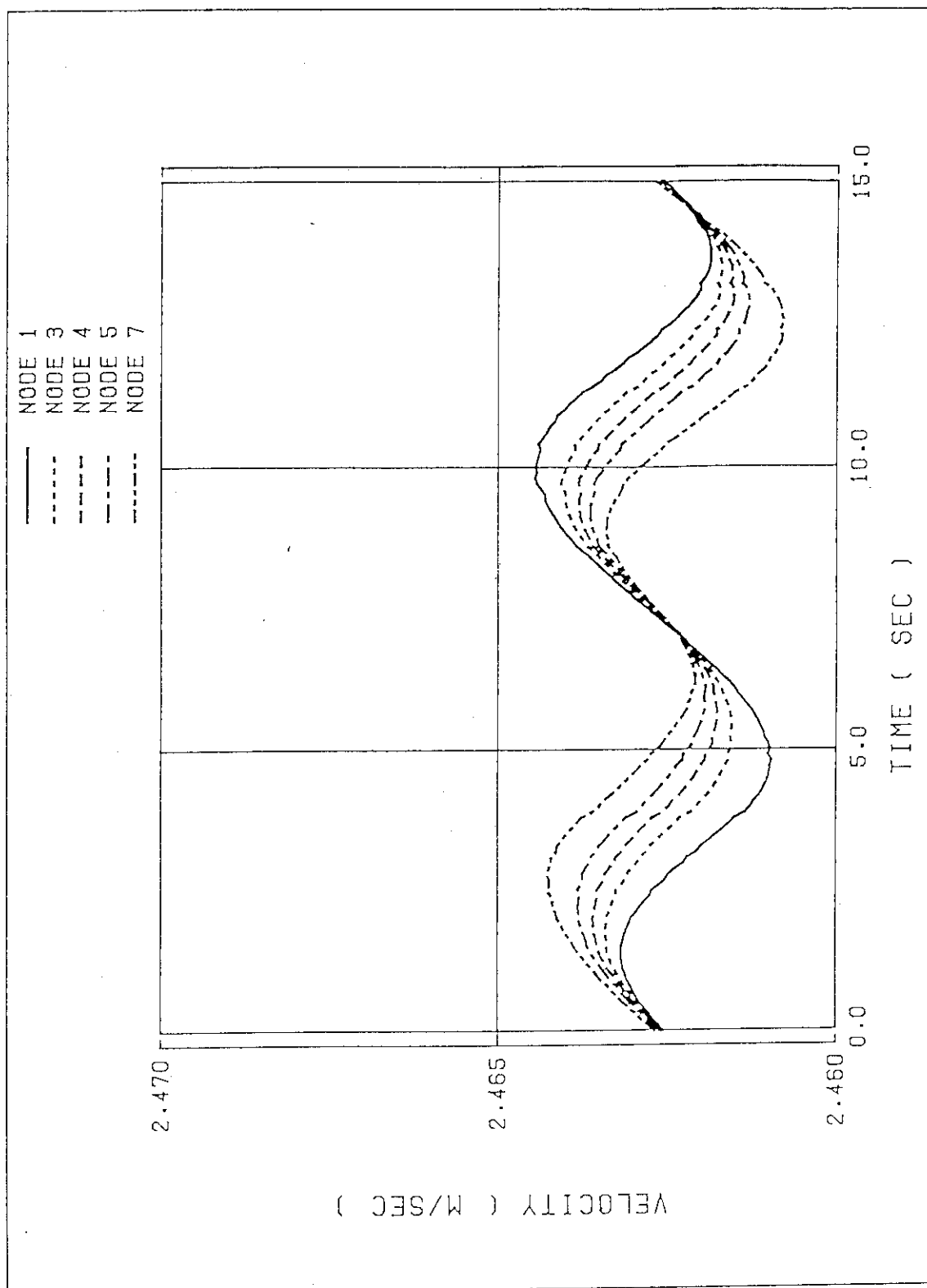


図 4.3 炉心出口流速分布 (ケース 3) 炉心上10メッシュ, 下2メッシュ

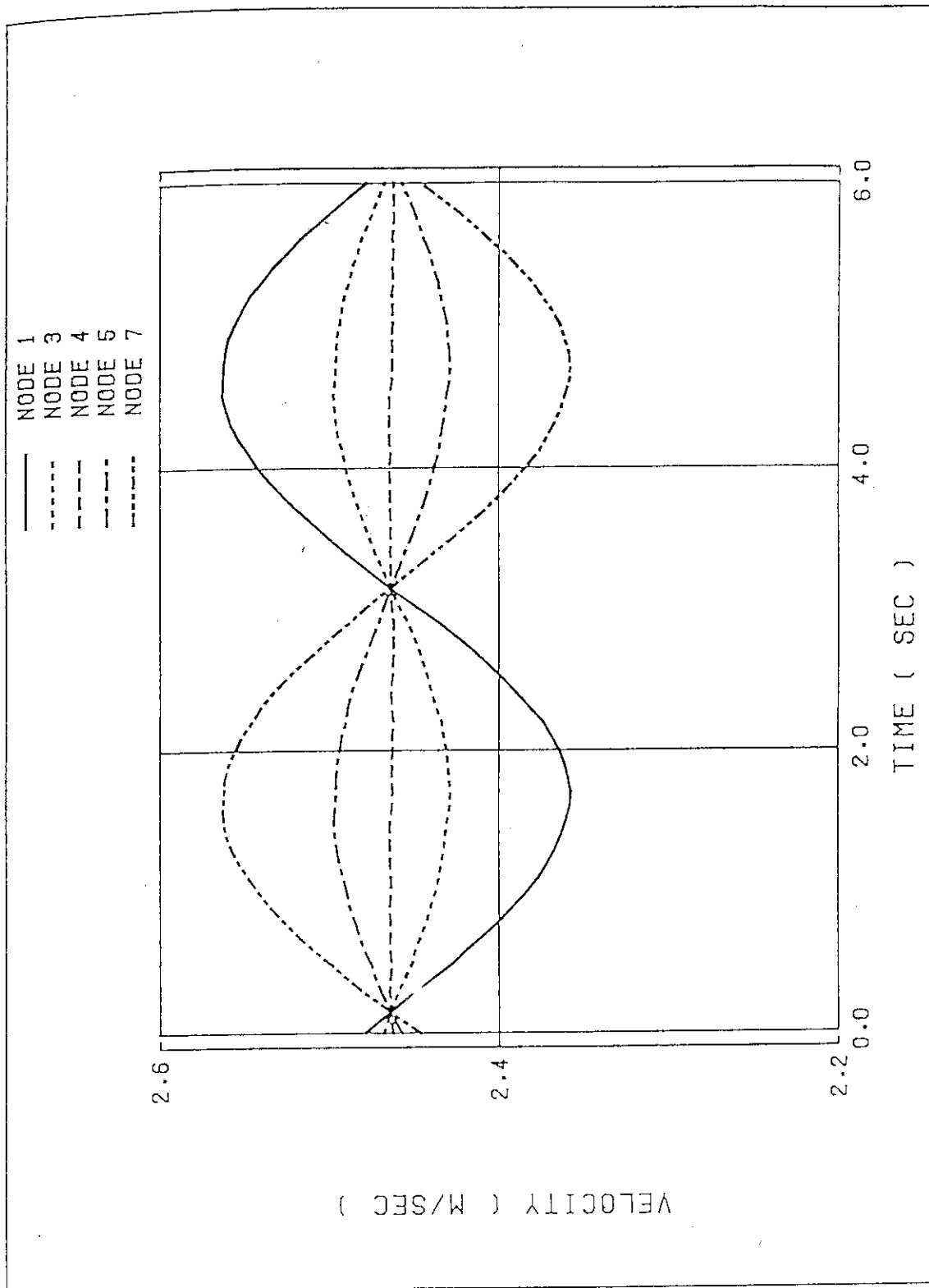


图 4.4 炉心出口流速分布 ( ケース 4 ) 周期 6 秒

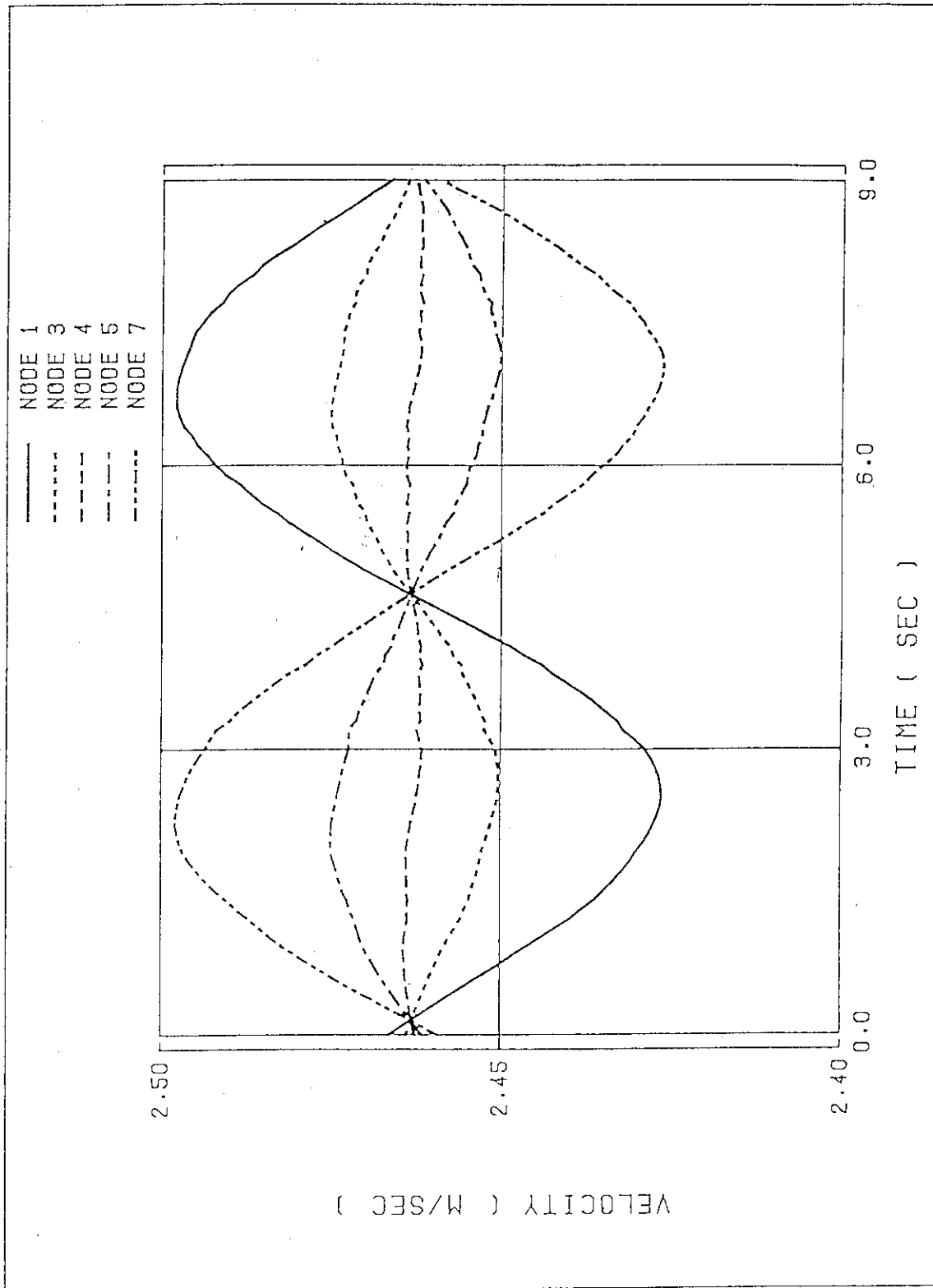


図 4.5 炉心出口流速分布 ( ケース 5 ) 周期 9 秒

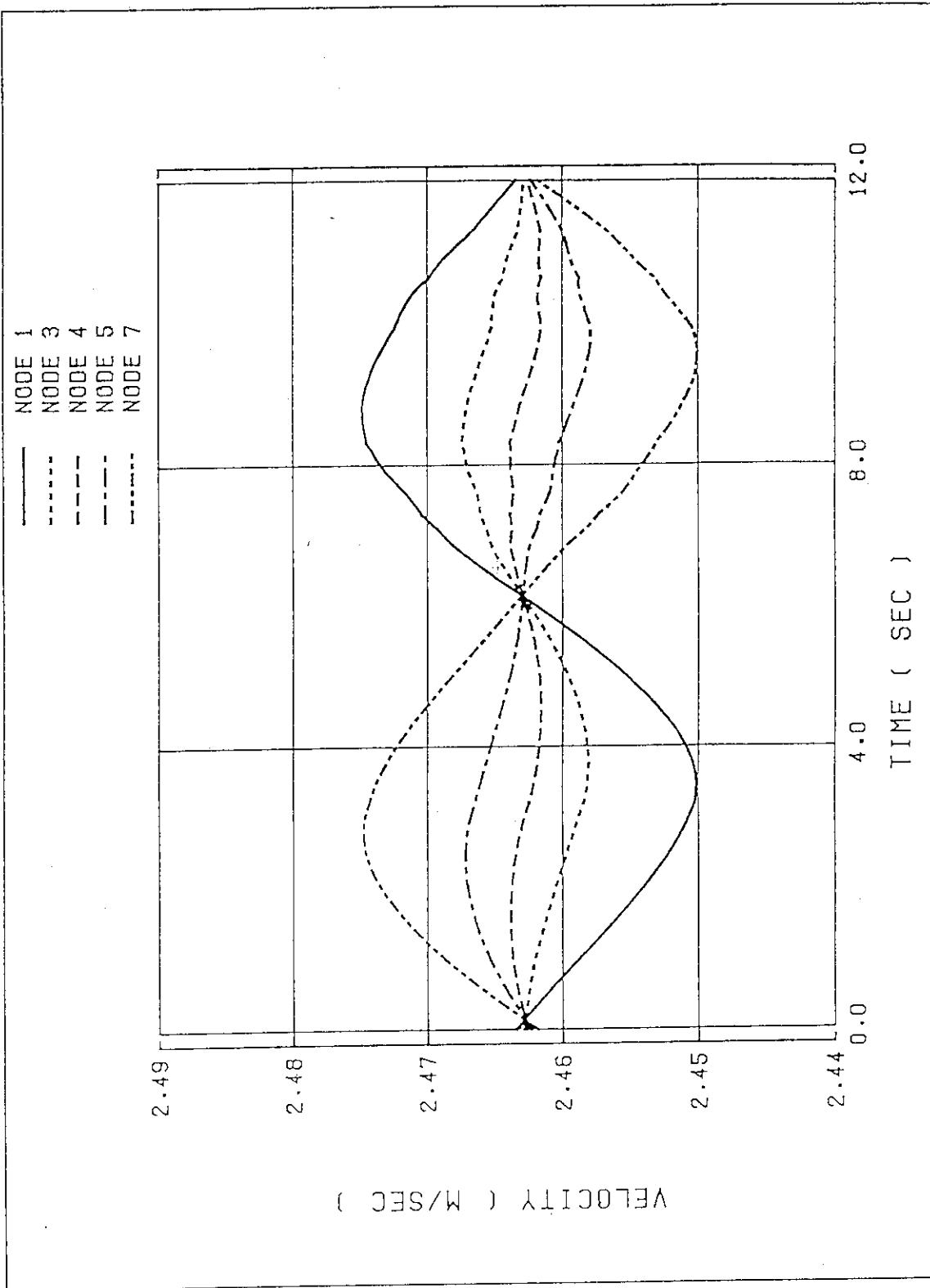


図 4.6 炉心出口流速分布 ( ケース 6 ) 周期 12 秒

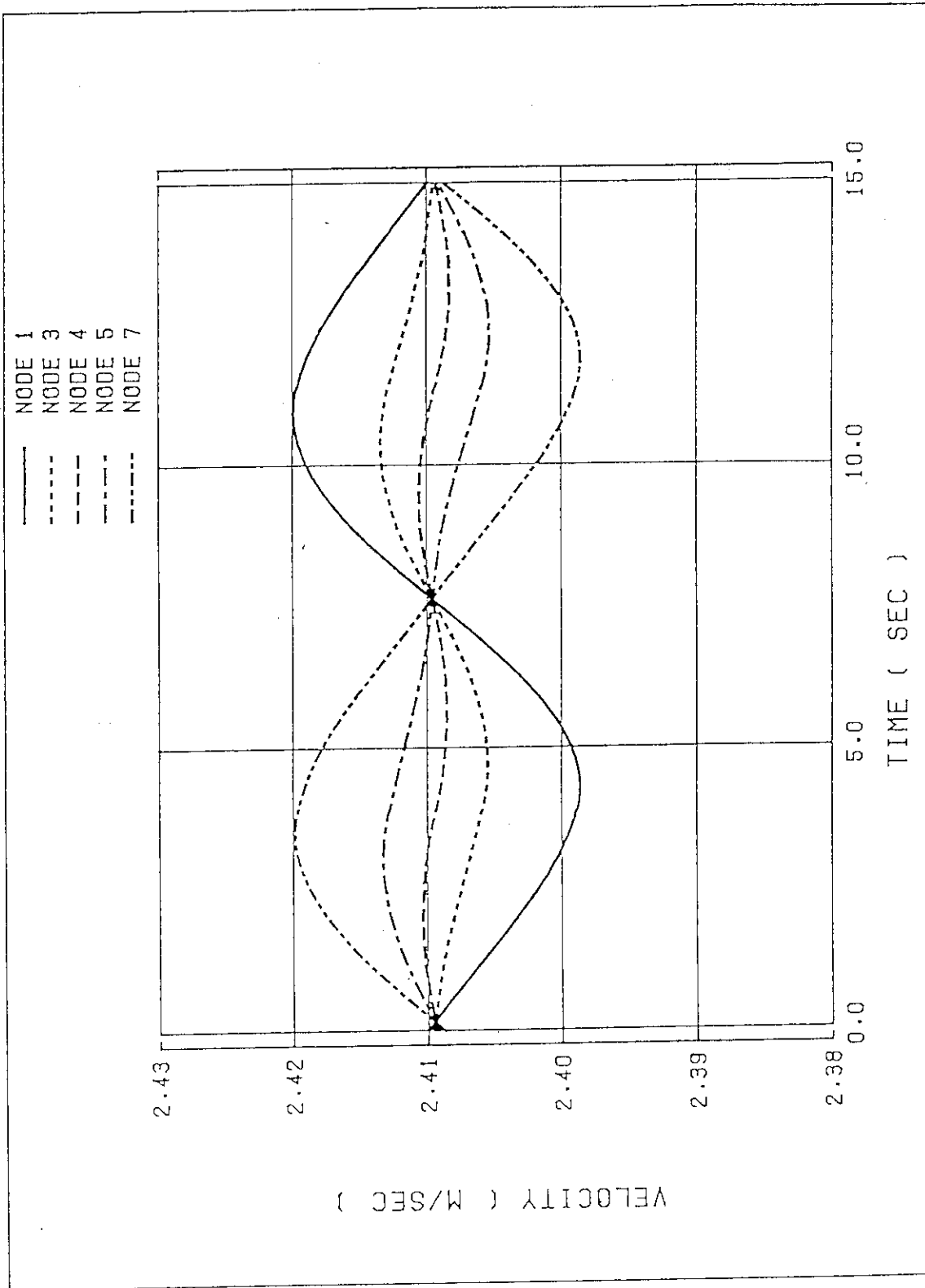


図 4.7 炉心出口流速分布 (ケース 7) 熱出力 1 / 2

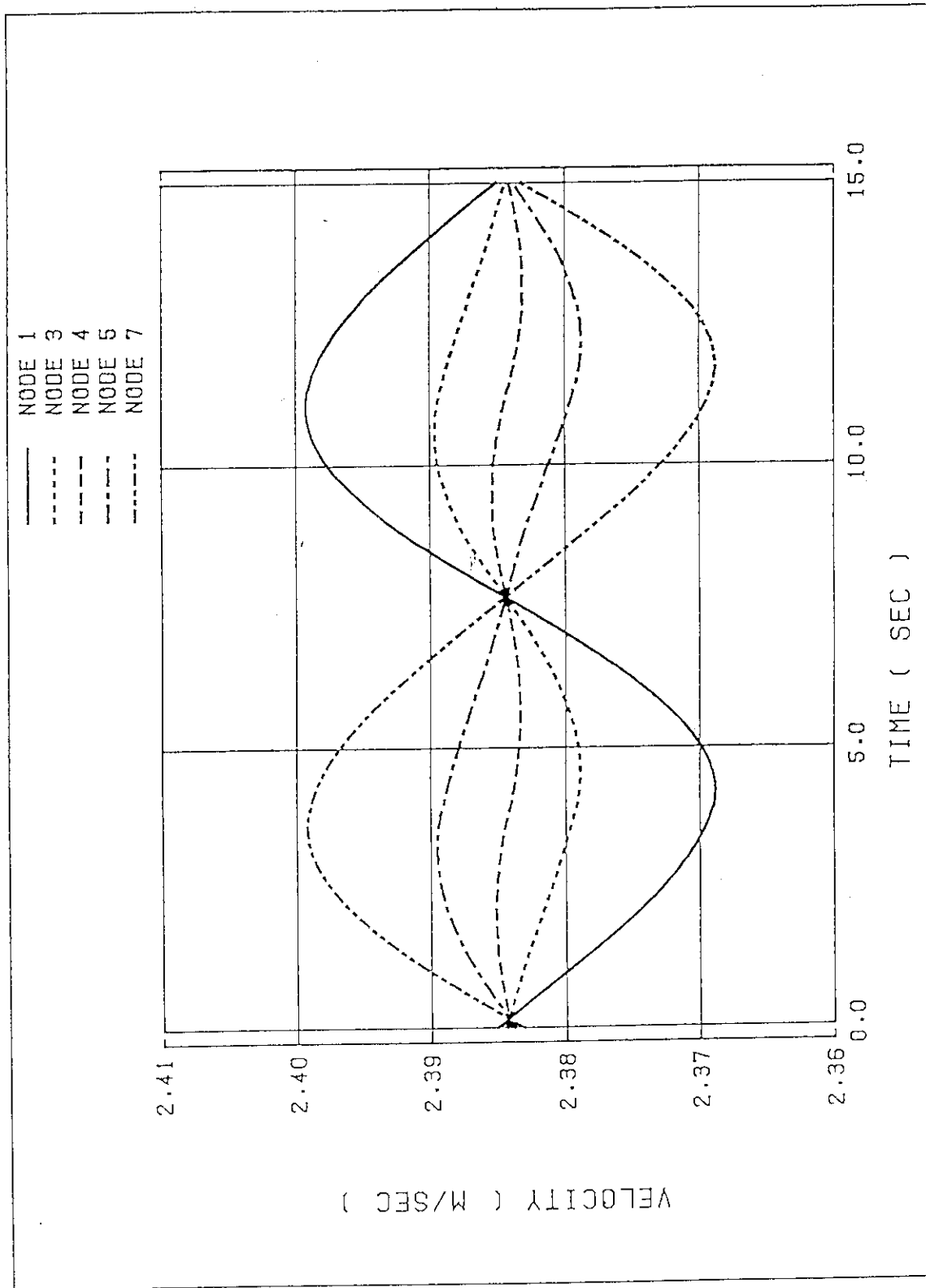


図 4.8 炉心出口流速分布 (ケース 8) 熱出力 1 / 4

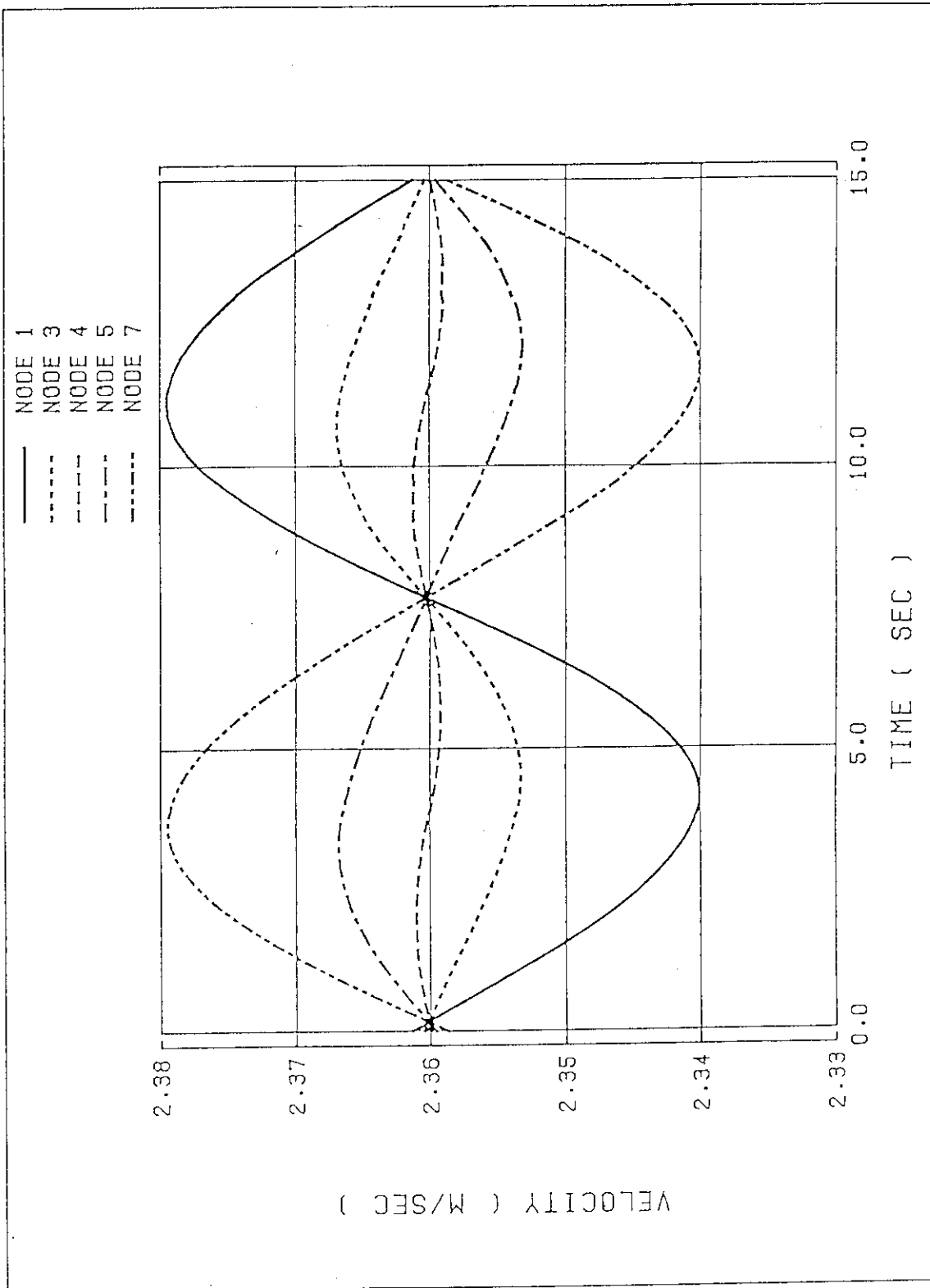


図 4.9 炉心出口流速分布 (ケース 9) 熱出力 0.0



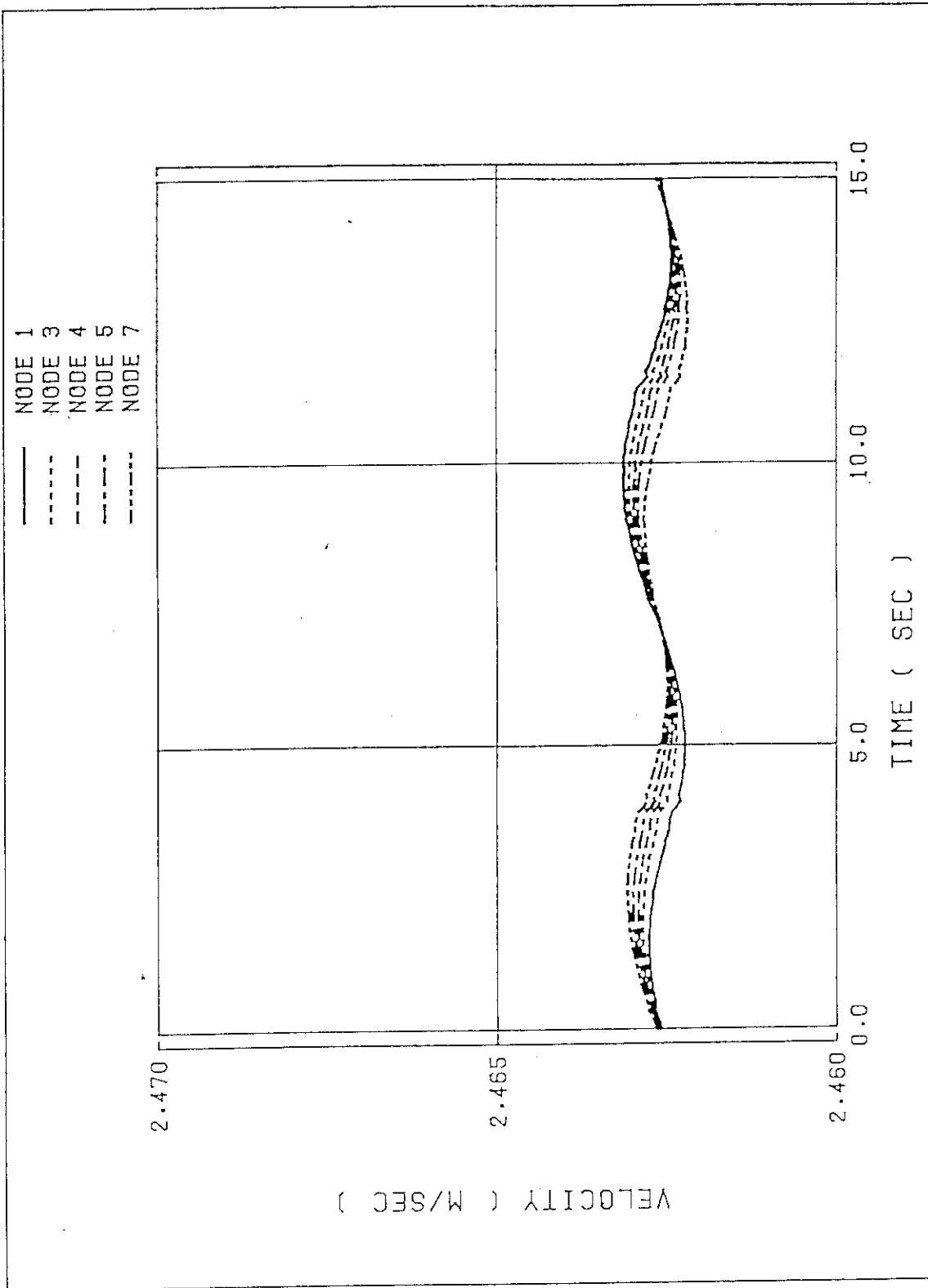


図 4.10 炉心出口流速分布 ( ケース10 ) 最大振幅15度

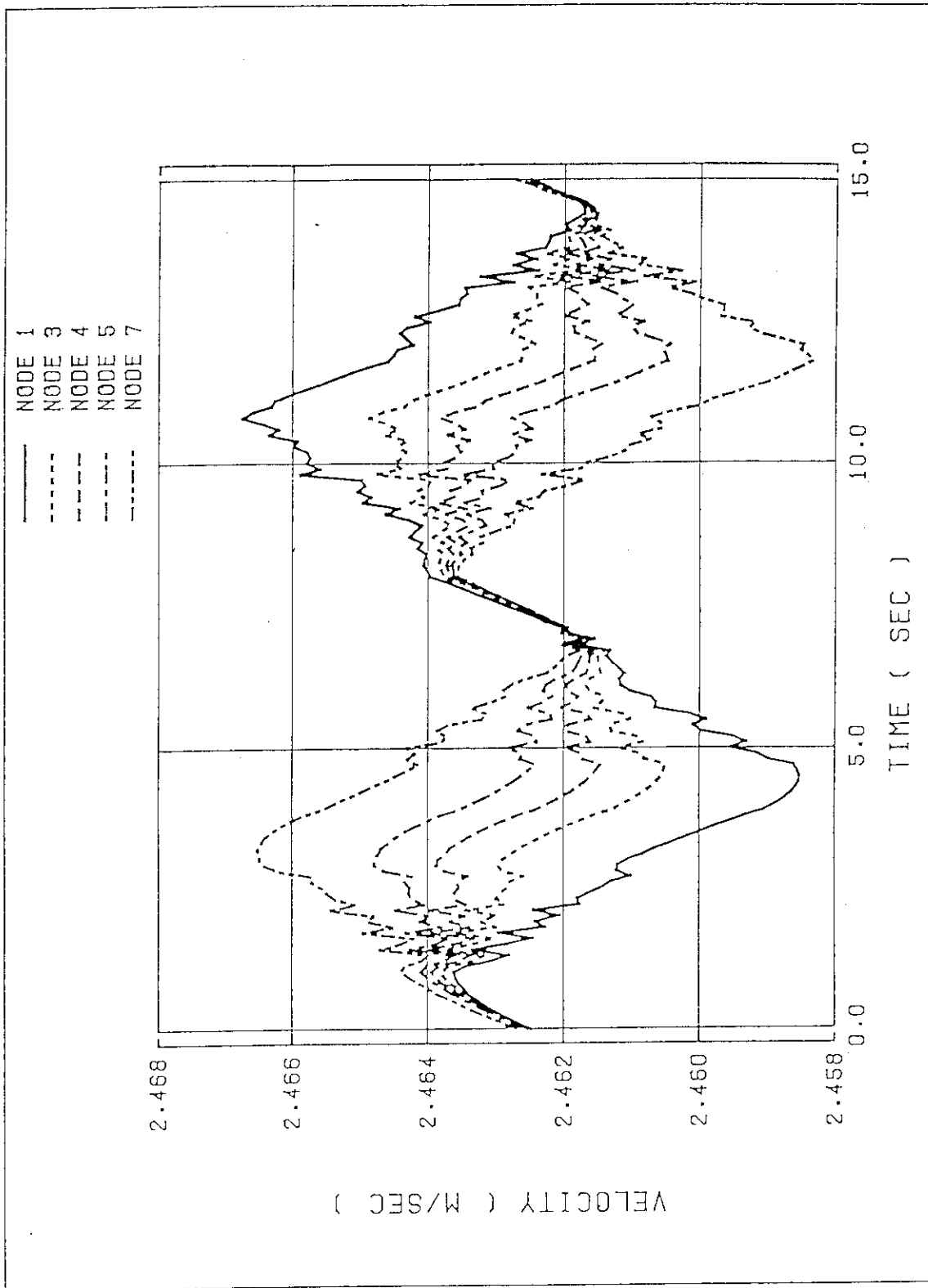


図 4.11 炉心出口流速分布 (ケース11) 最大振幅45度

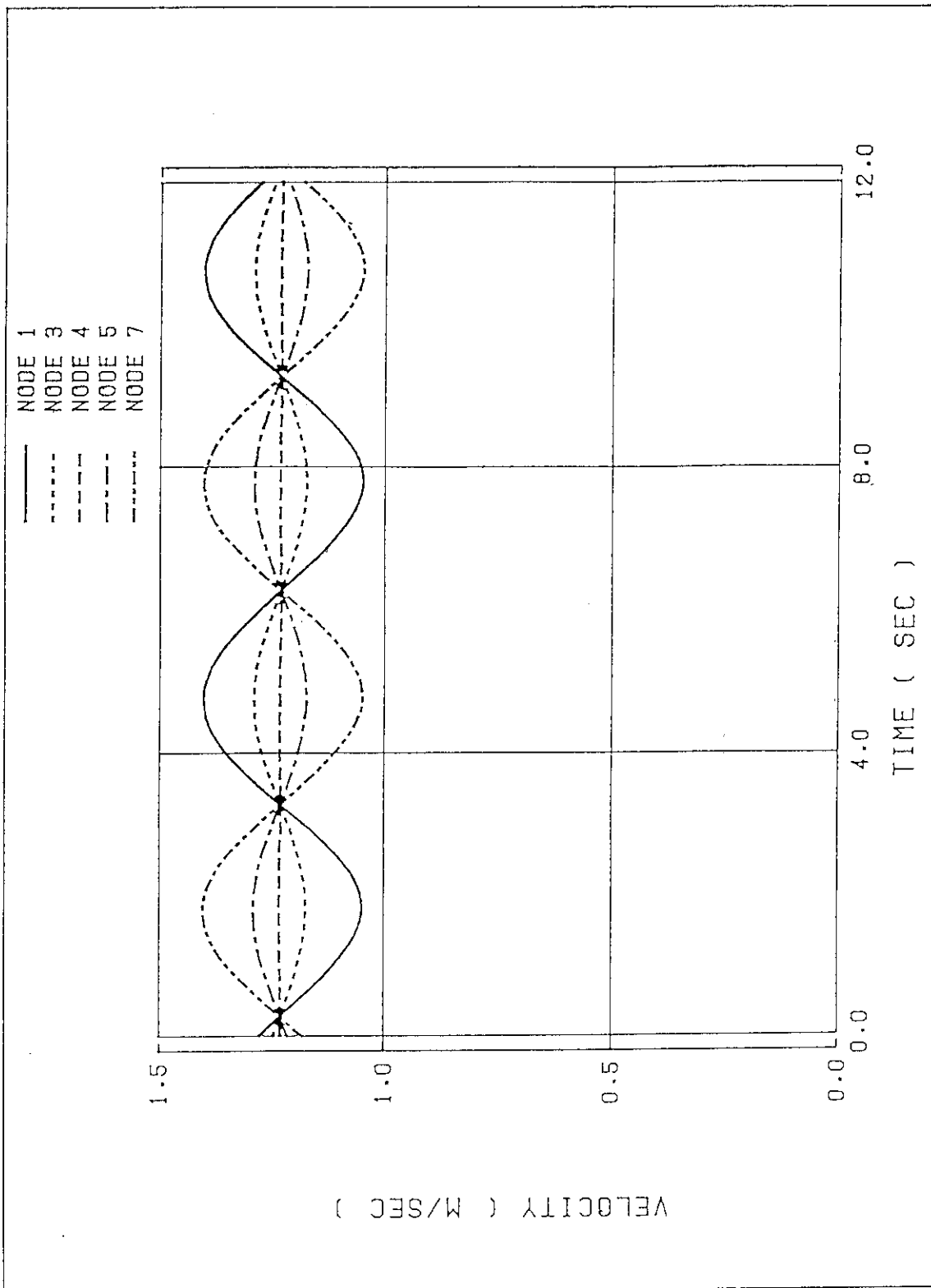


図 4.12 炉心出口流速分布 ( ケース 12 ) 周期 6 秒, 熱出力及び流量 1 / 2

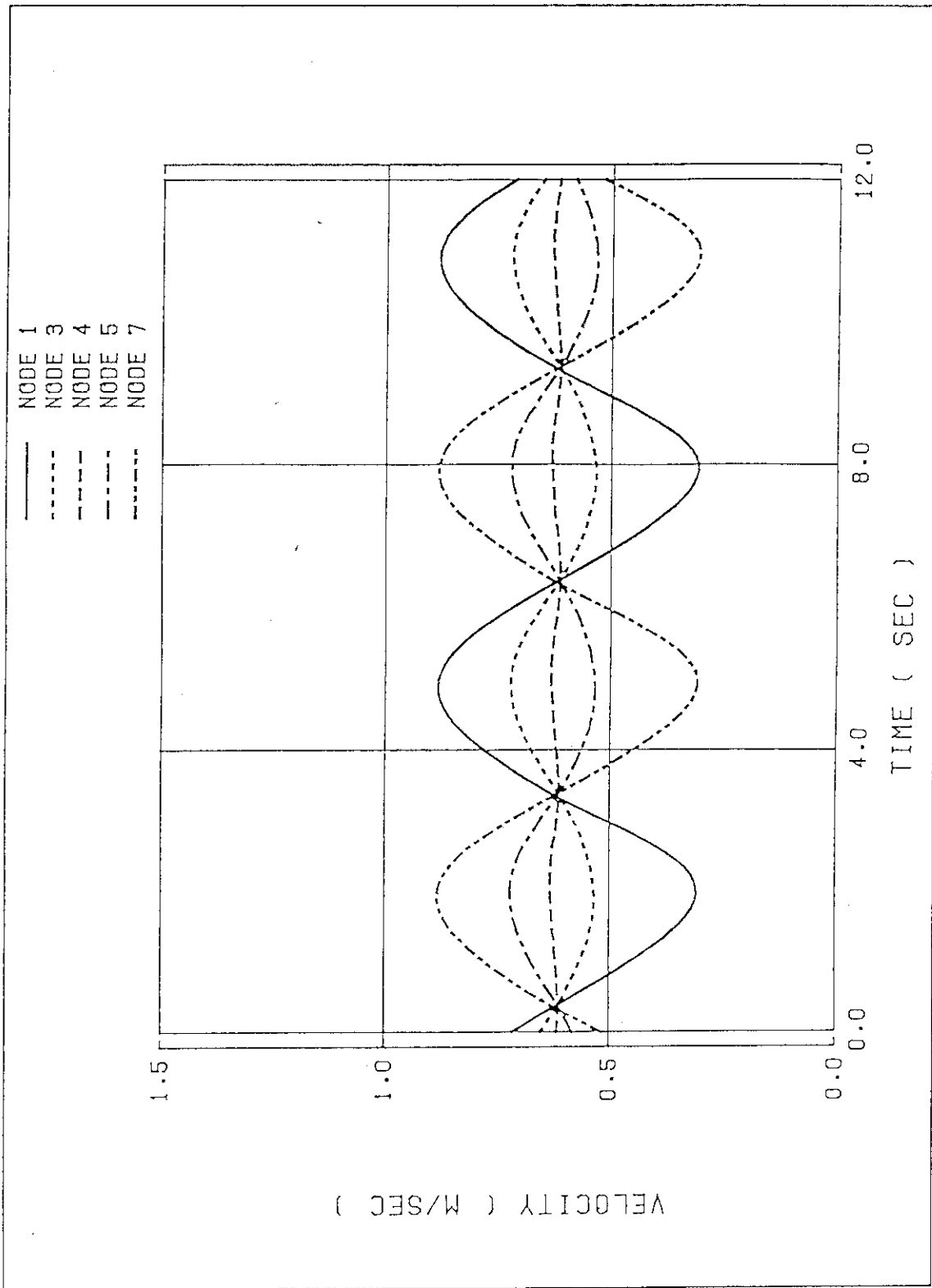


図 4.13 炉心出口流速分布 ( ケース 13 ) 周期 6 秒, 熱出力及び流量 1 / 4

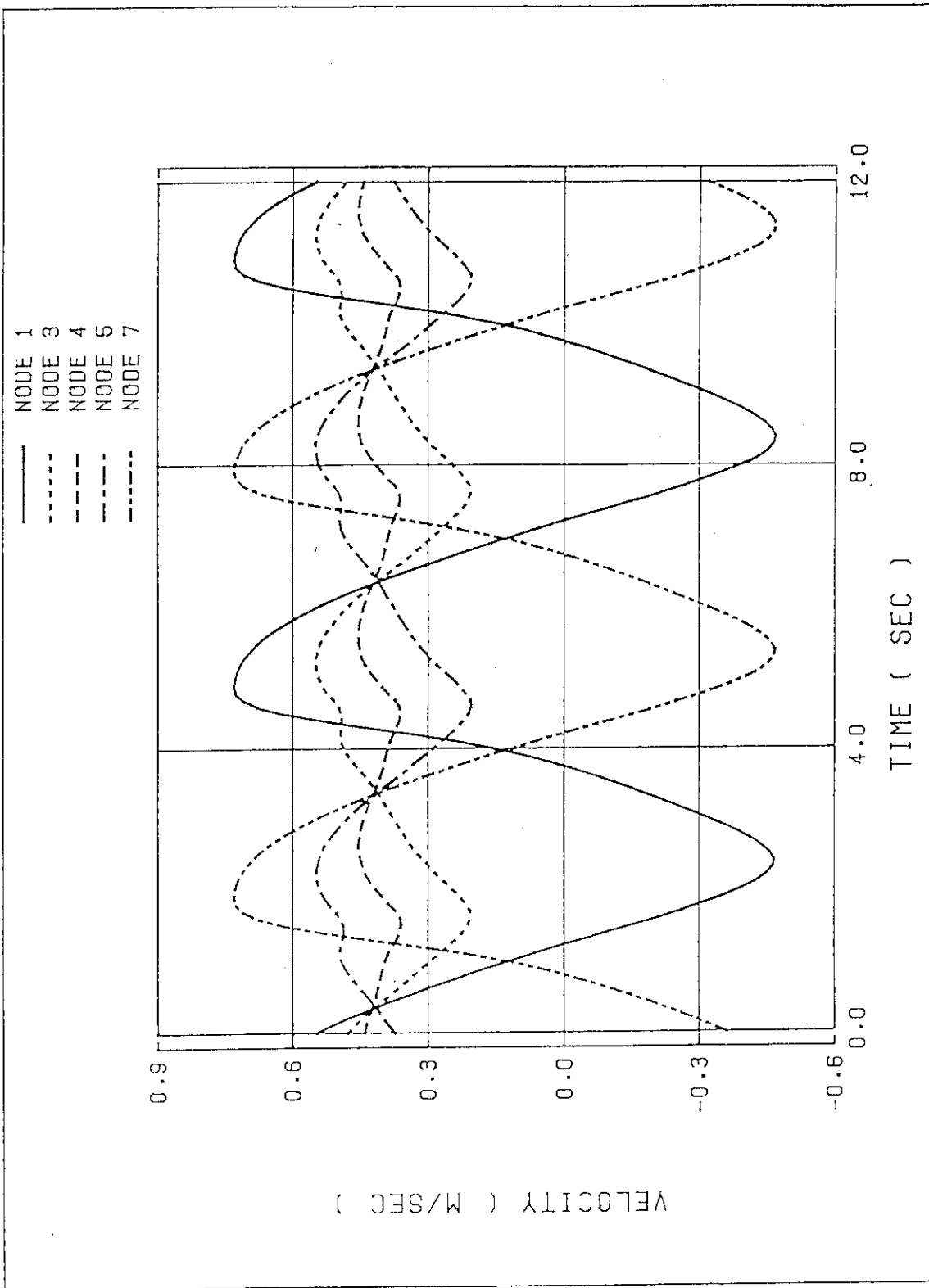


図 4.14 炉心出口流速分布 ( ケース 14 ) 周期 6 秒, 熱出力及び流量 1 / 8

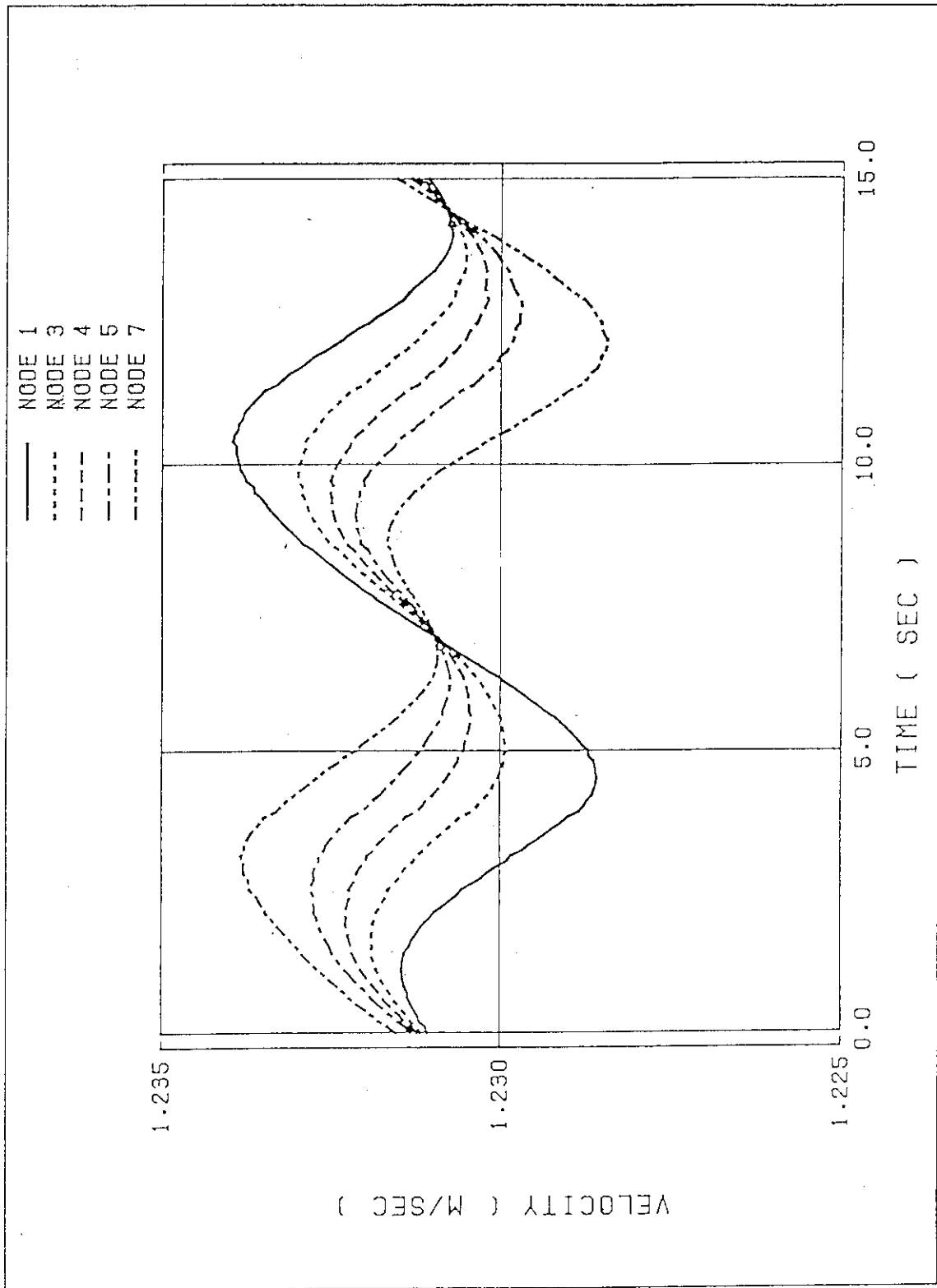


図 4.15 炉心出口流速分布 (ケース15) 周期15秒, 熱出力及び流量 1 / 2

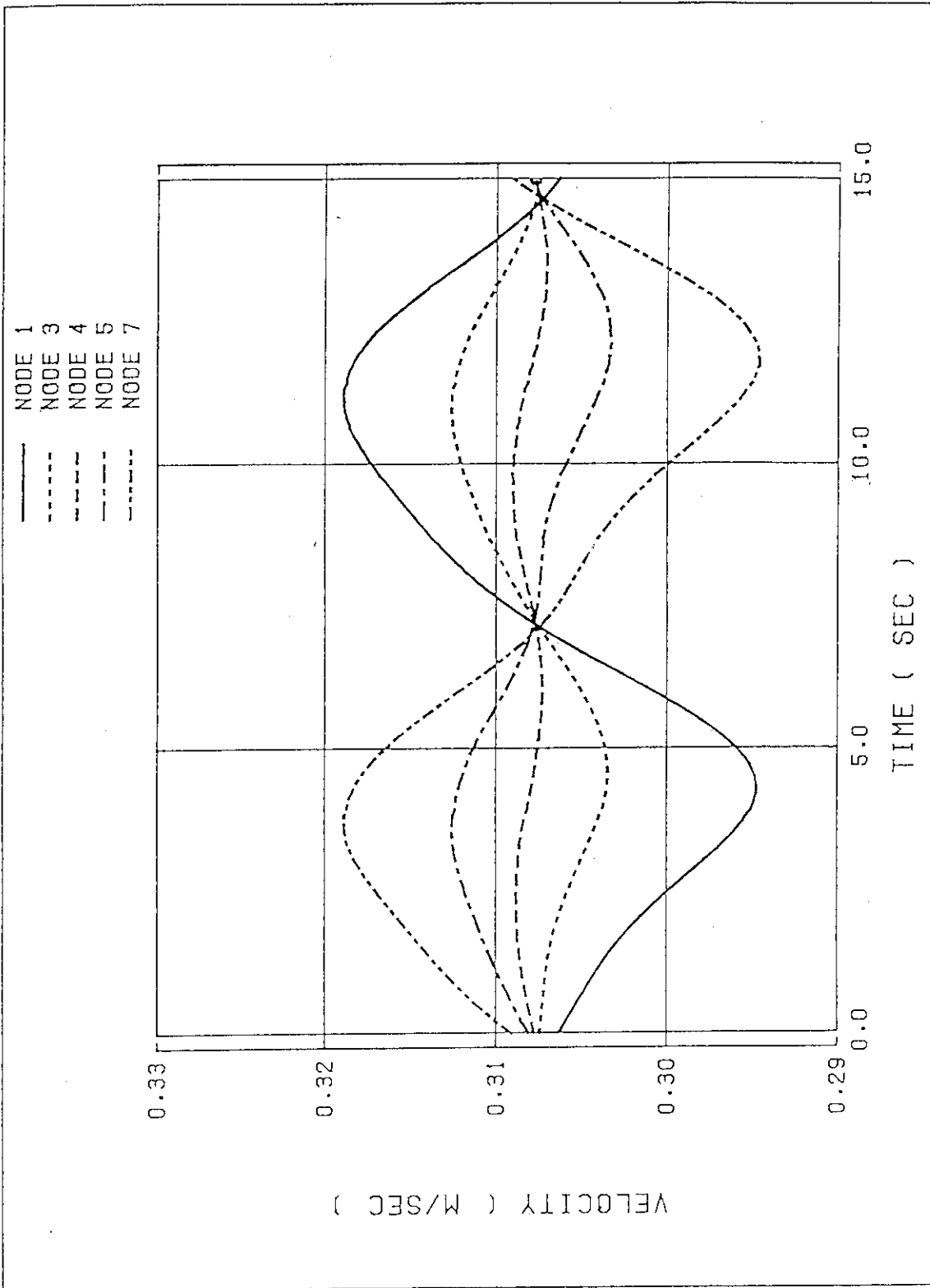


図 4.16 炉心出口流速分布 (ケース16) 周期15秒, 熱出力及び流量 1 / 8

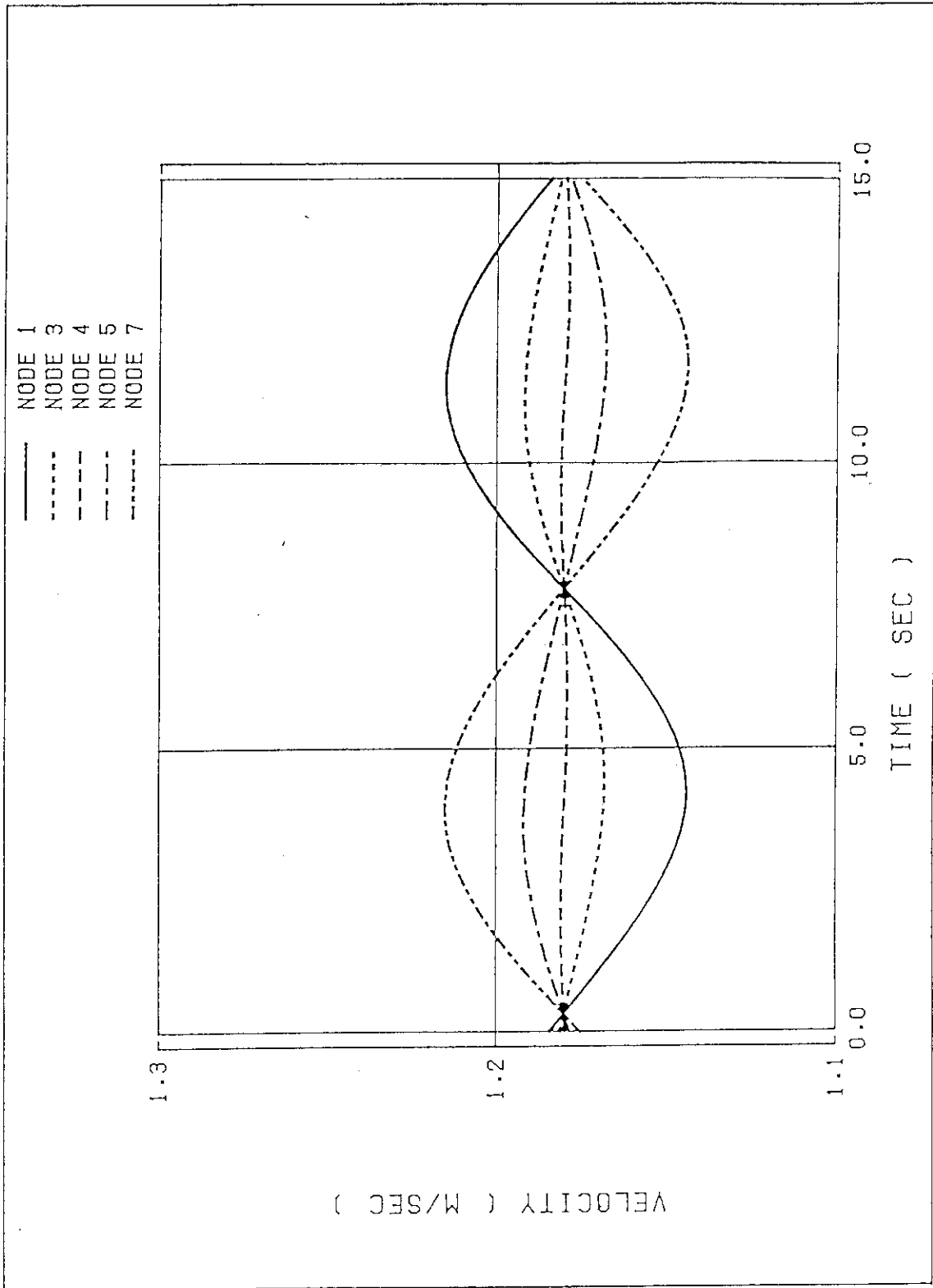


図 4.17 炉心出口流速分布 (ケ - ス17) 熱出力 0.0, 流量 1/2



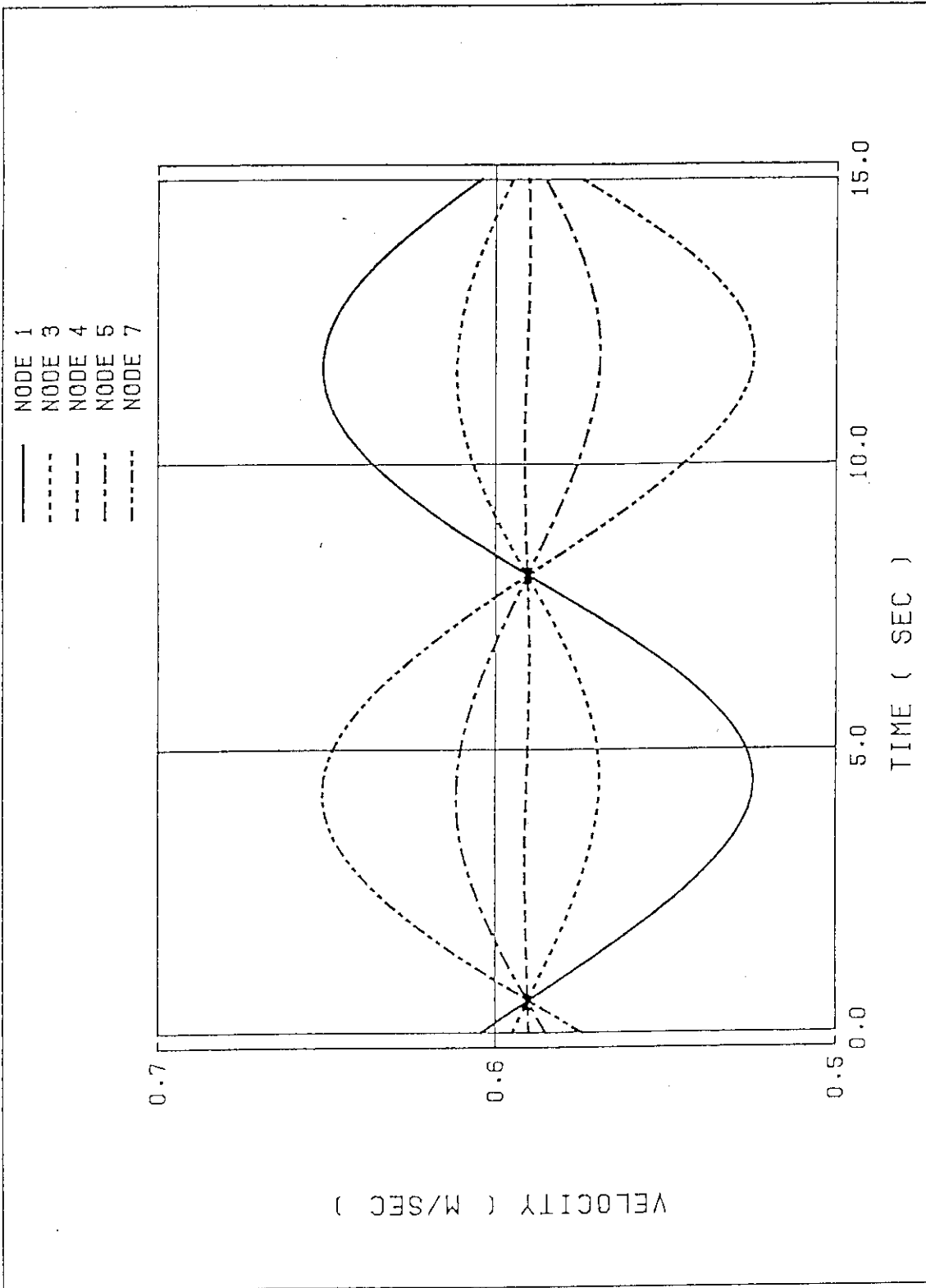


図 4.18 炉心出口流速分布 (ケース18) 熱出力 0.0, 流量 1/4

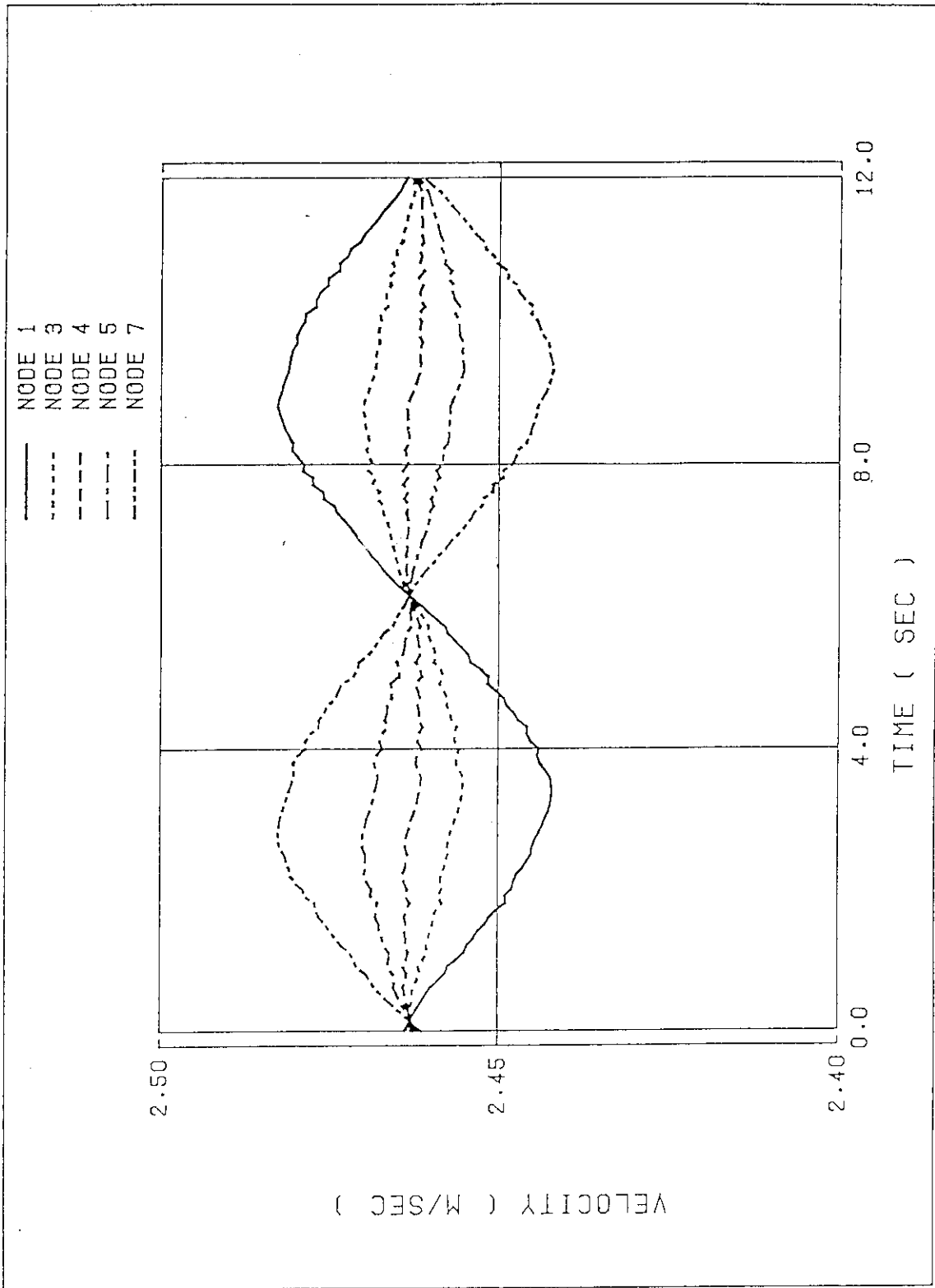


図 4.19 炉心出口流速分布 (ケース19) 最大振幅45度, 周期12秒

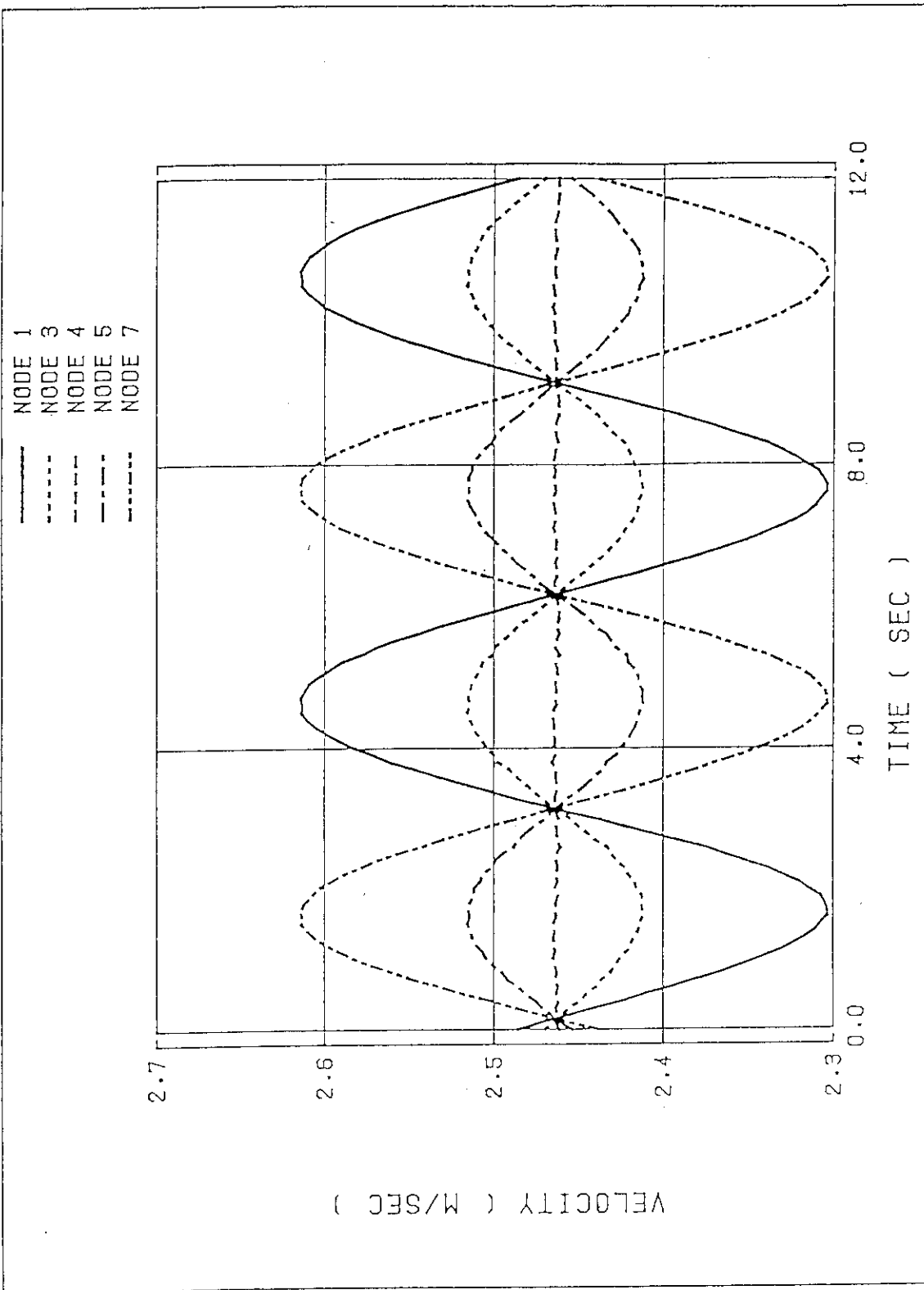


図 4.20 炉心出口流速分布 (ケース20) 最大振幅45度, 周期6秒

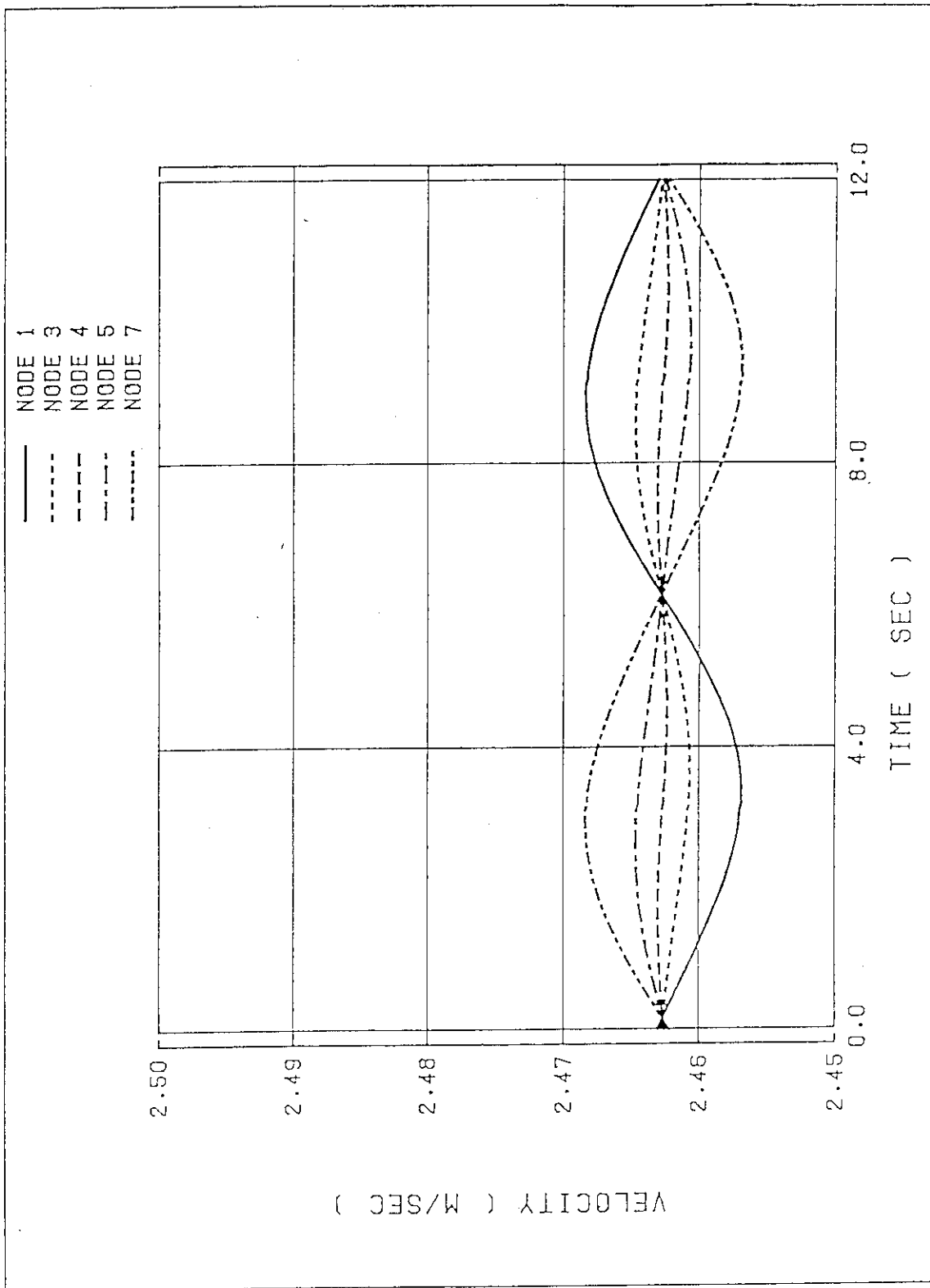


图 4.21 炉心出口流速分布 (ケース21) 最大振幅15度, 周期12秒

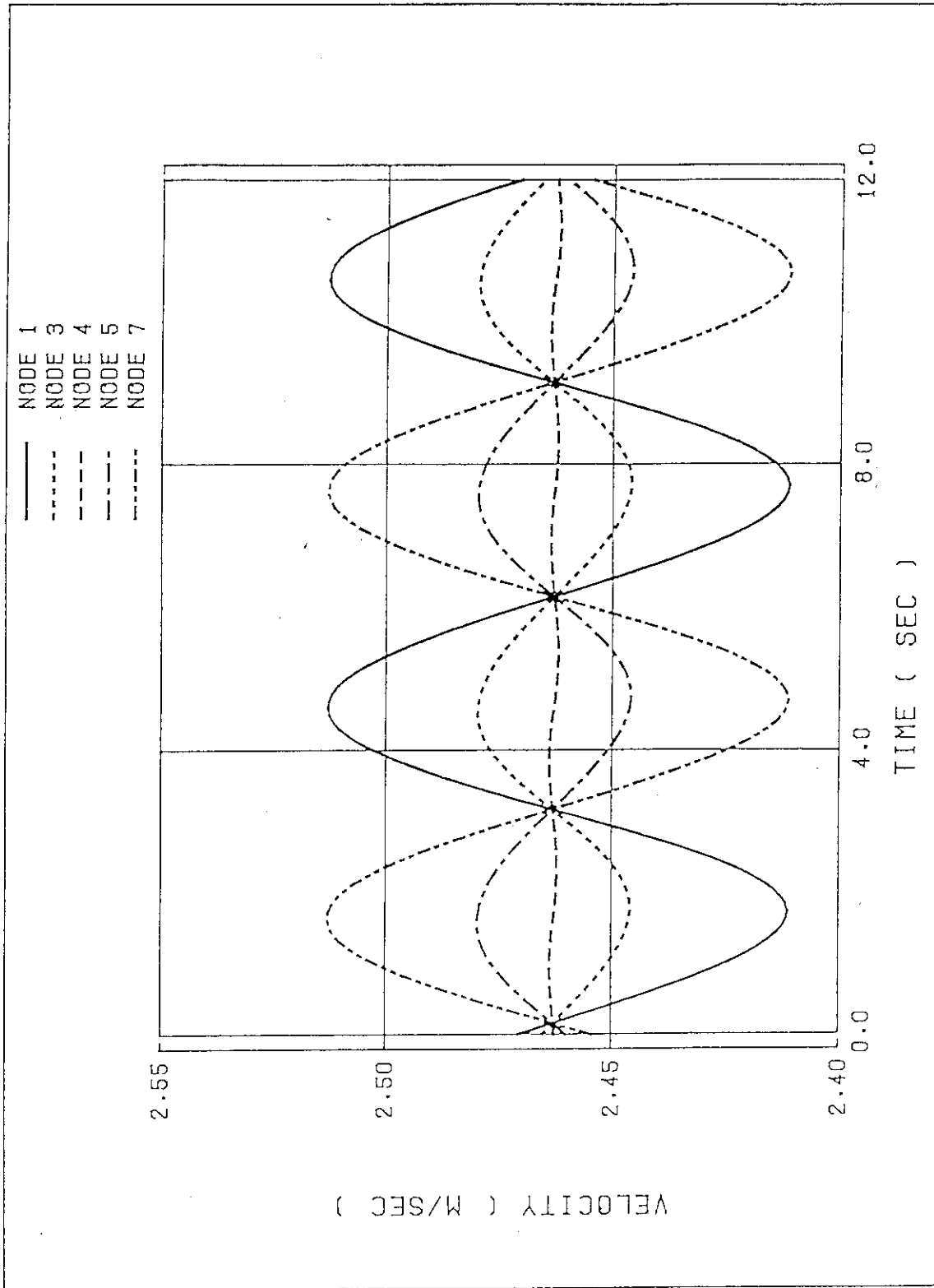


図 4.22 炉心出口流速分布 (ケース22) 最大振幅15度, 周期6秒

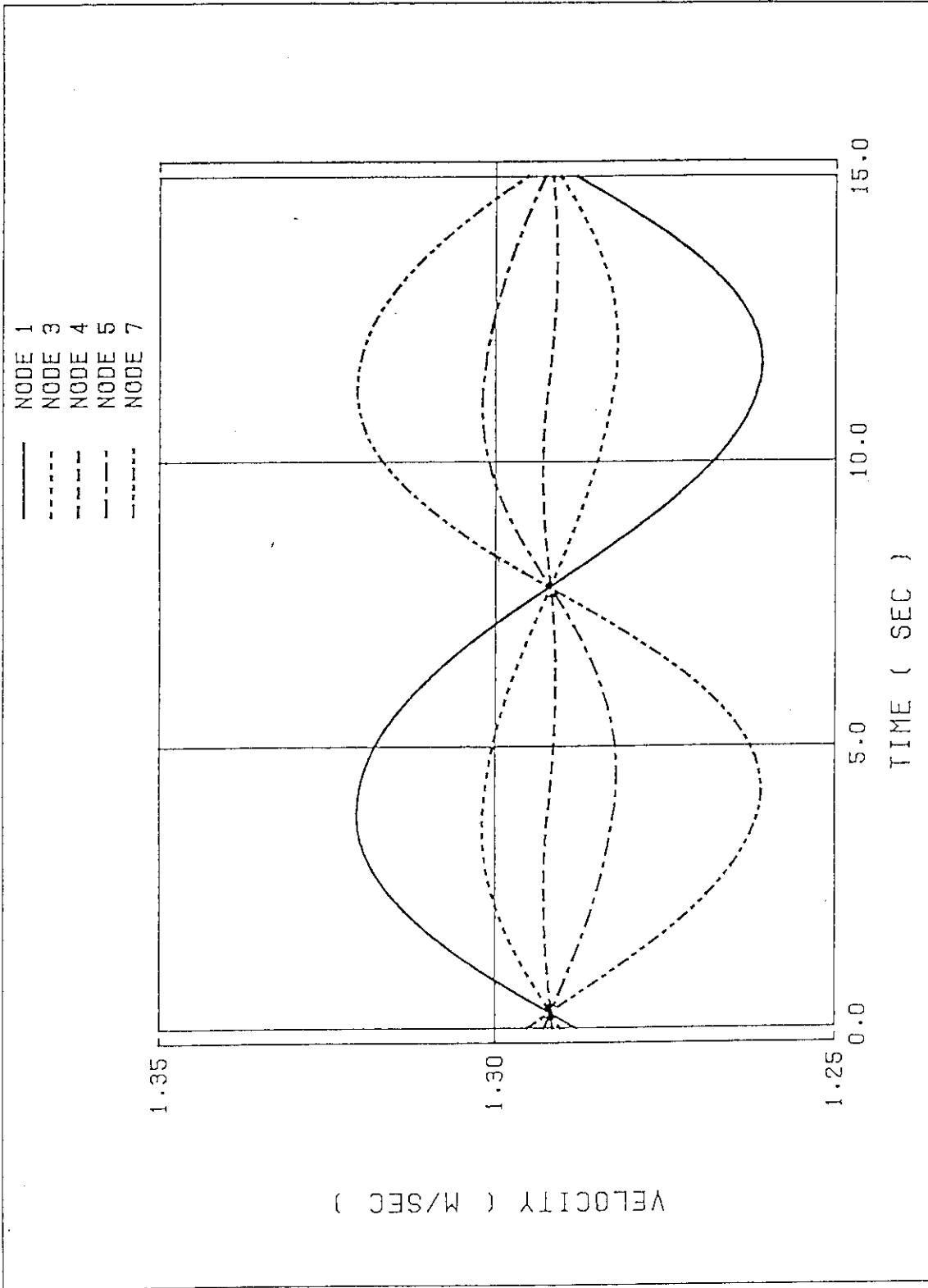


図 4.23 炉心出口流速分布 (ケース23) 流量 1 / 2

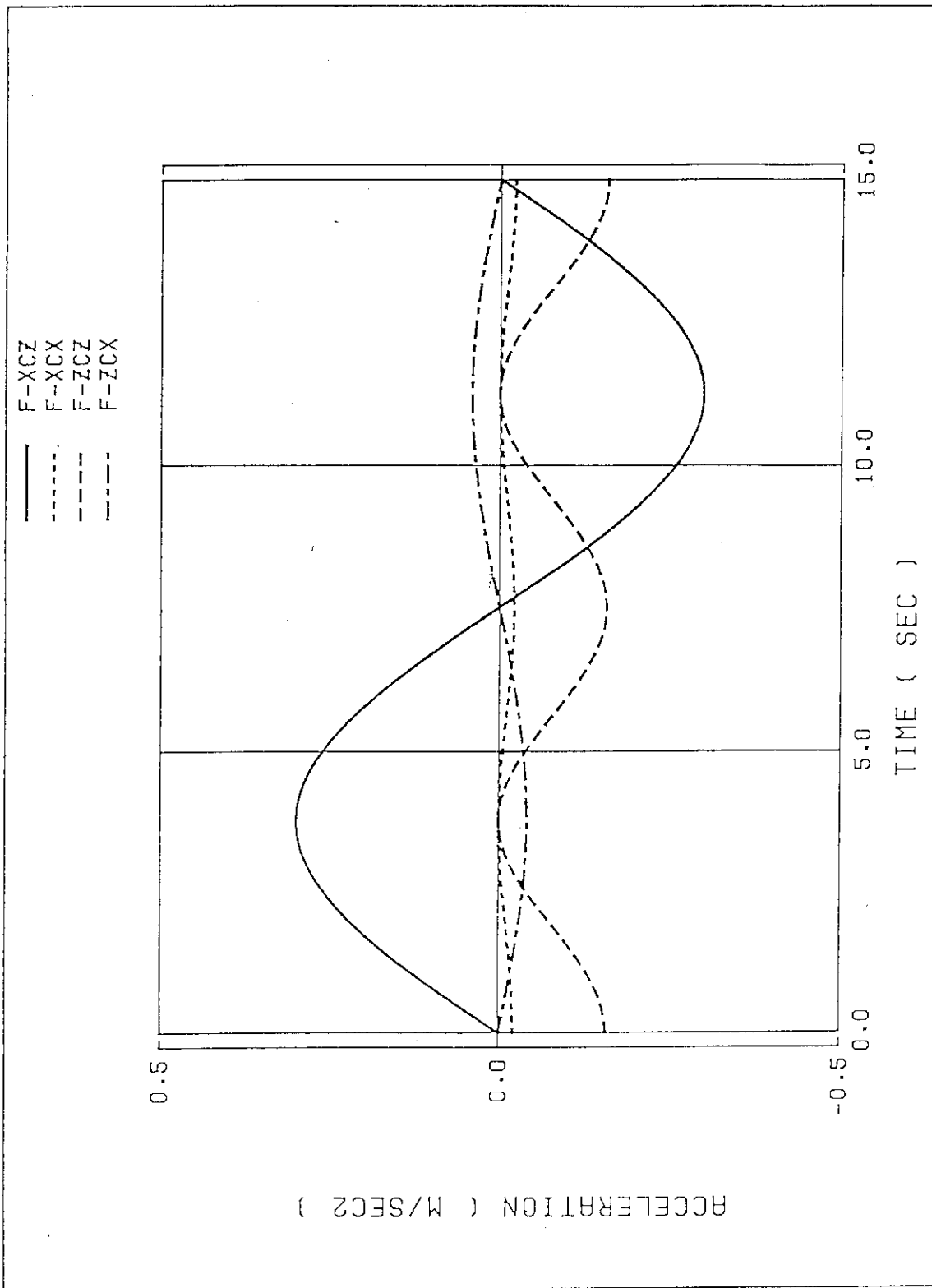


図 4.24 炉心入口左端に加わる加速度要素 (周期15秒)

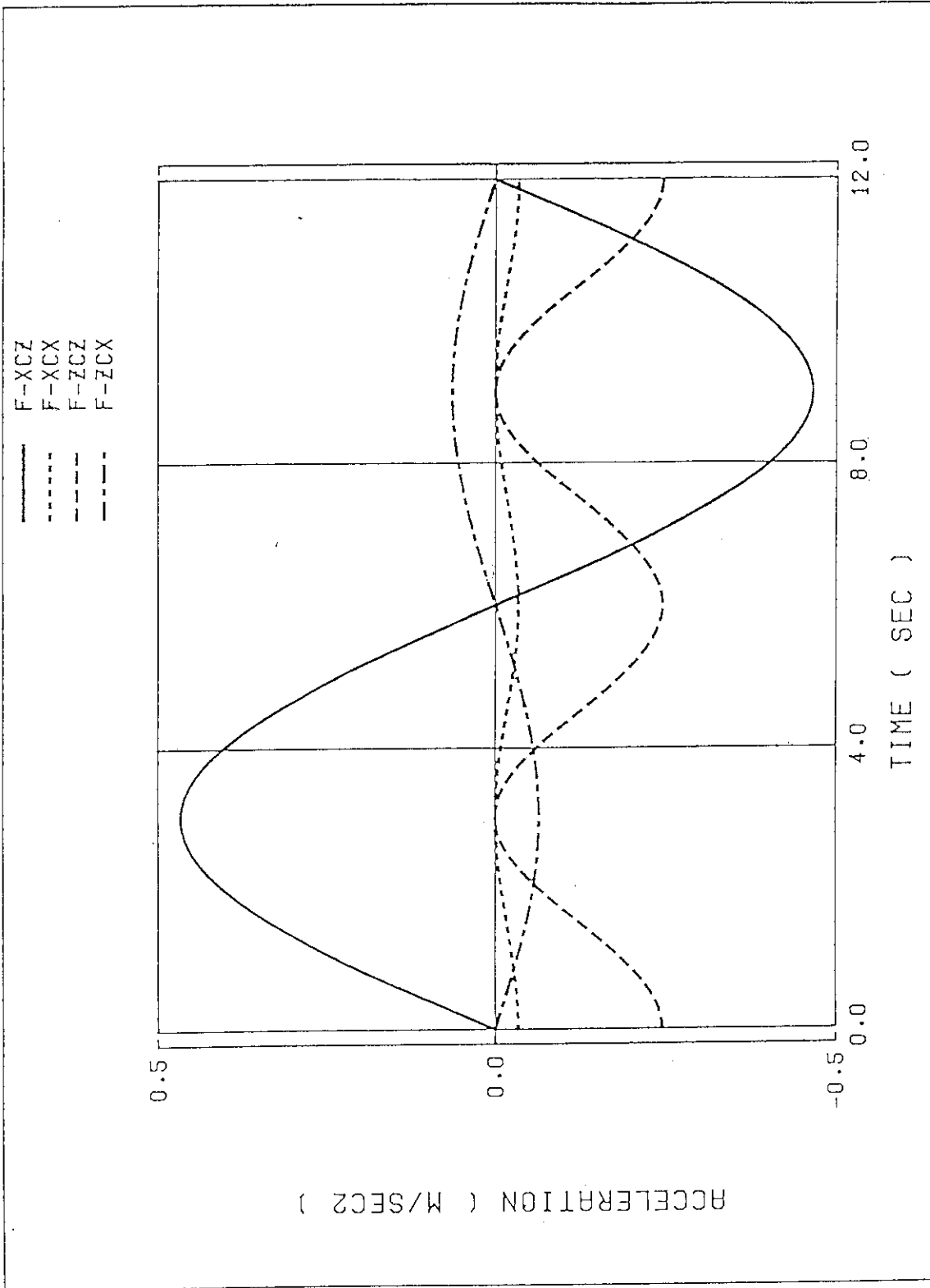


図 4.25 炉心入口左端に加わる加速度要素 (周期12秒)



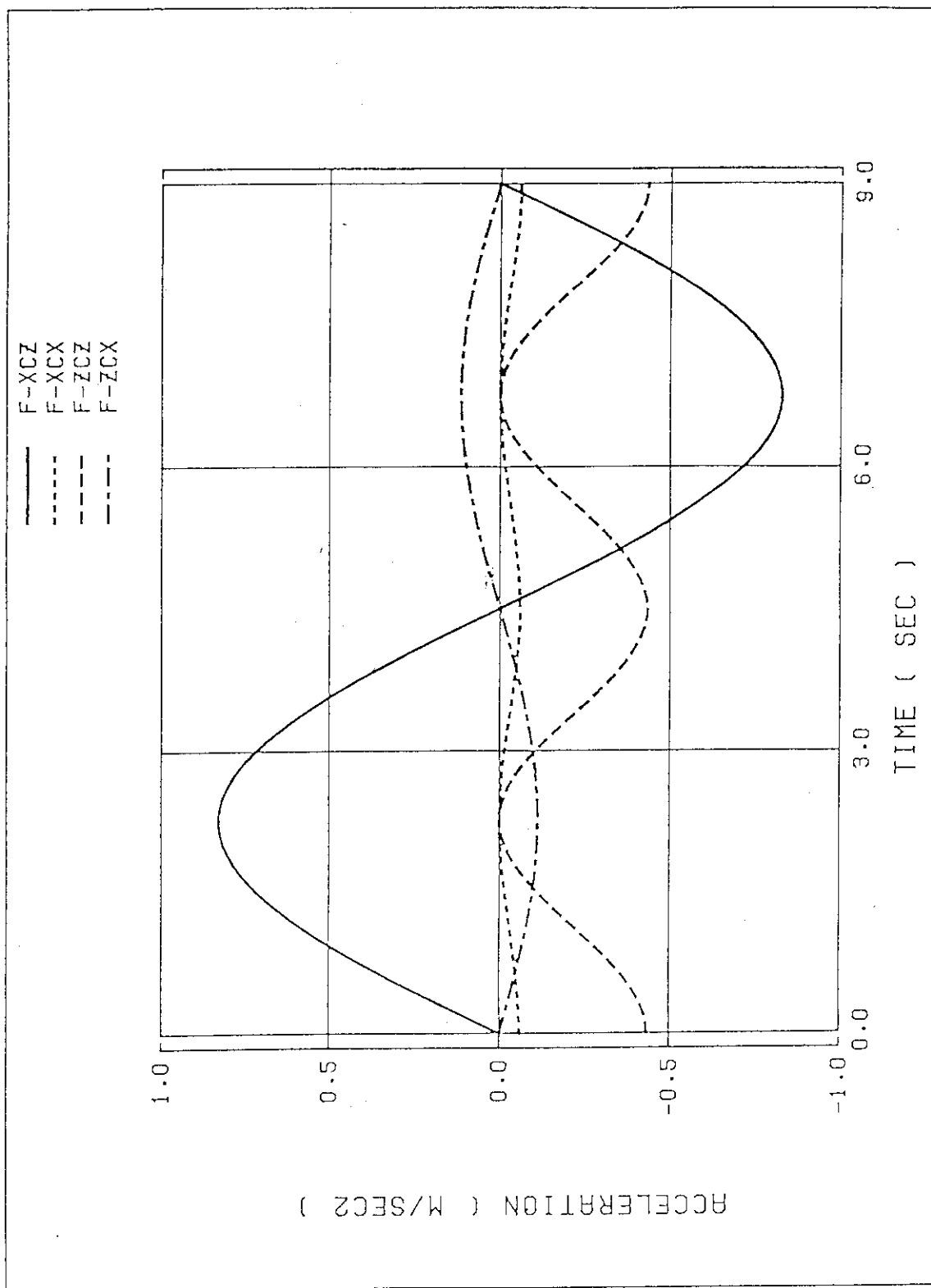


図 4.26 炉心入口左端に加わる加速度要素 (周期 9 秒)

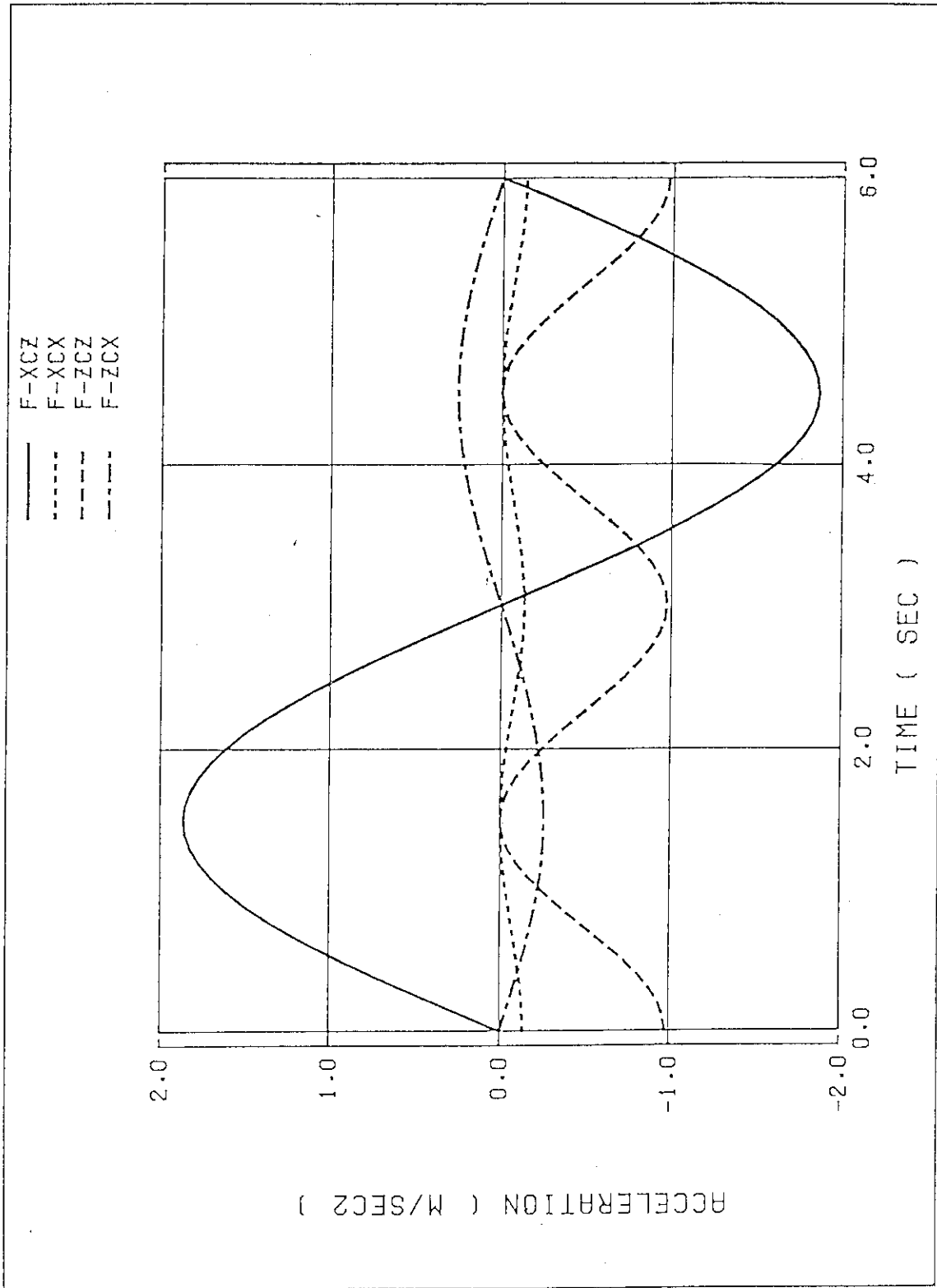


図 4.27 炉心入口左端に加わる加速度要素 (周期 6 秒)

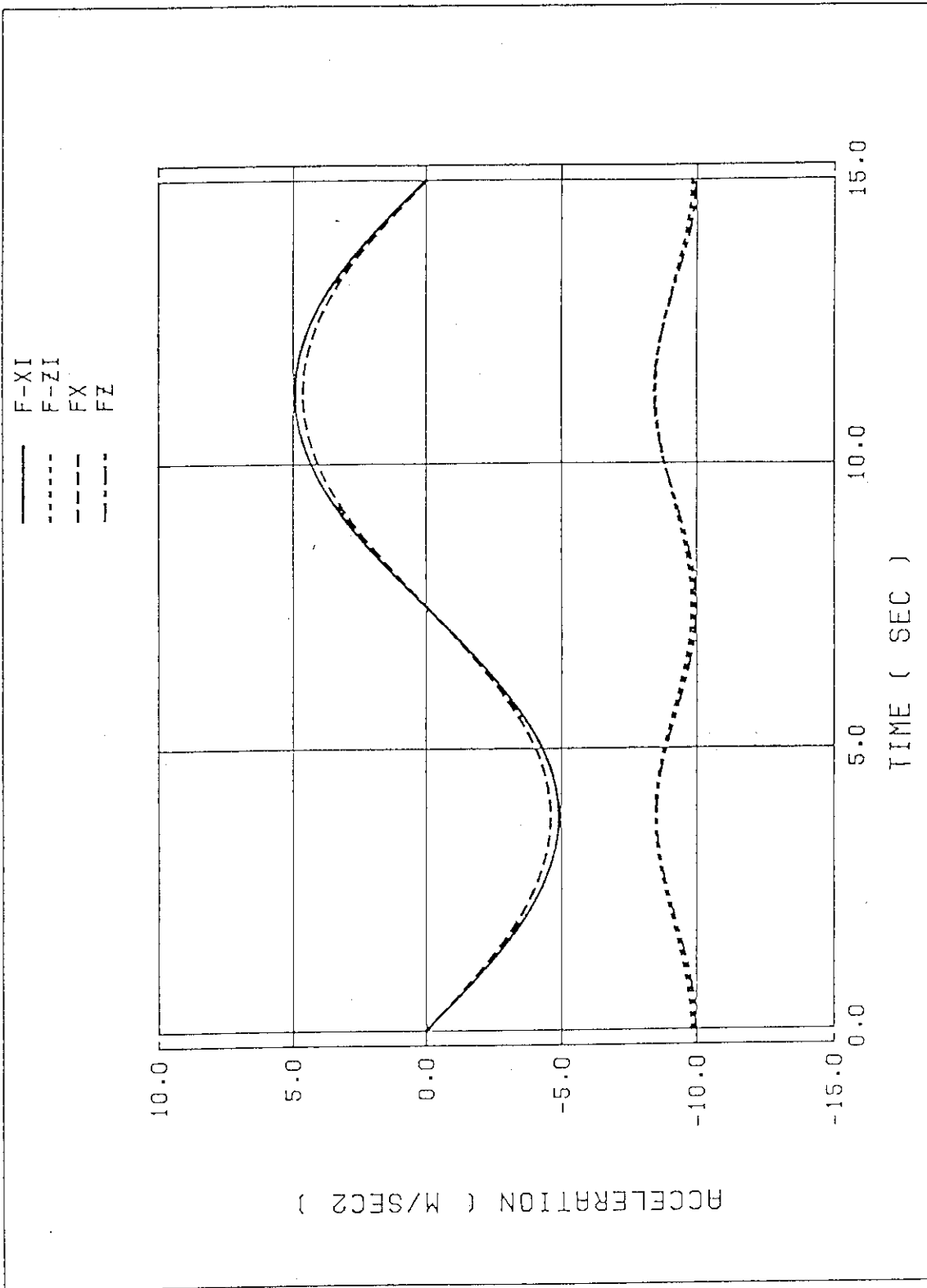


図 4.28 炉心入口左端に加わる全加速度変化 (周期15秒)

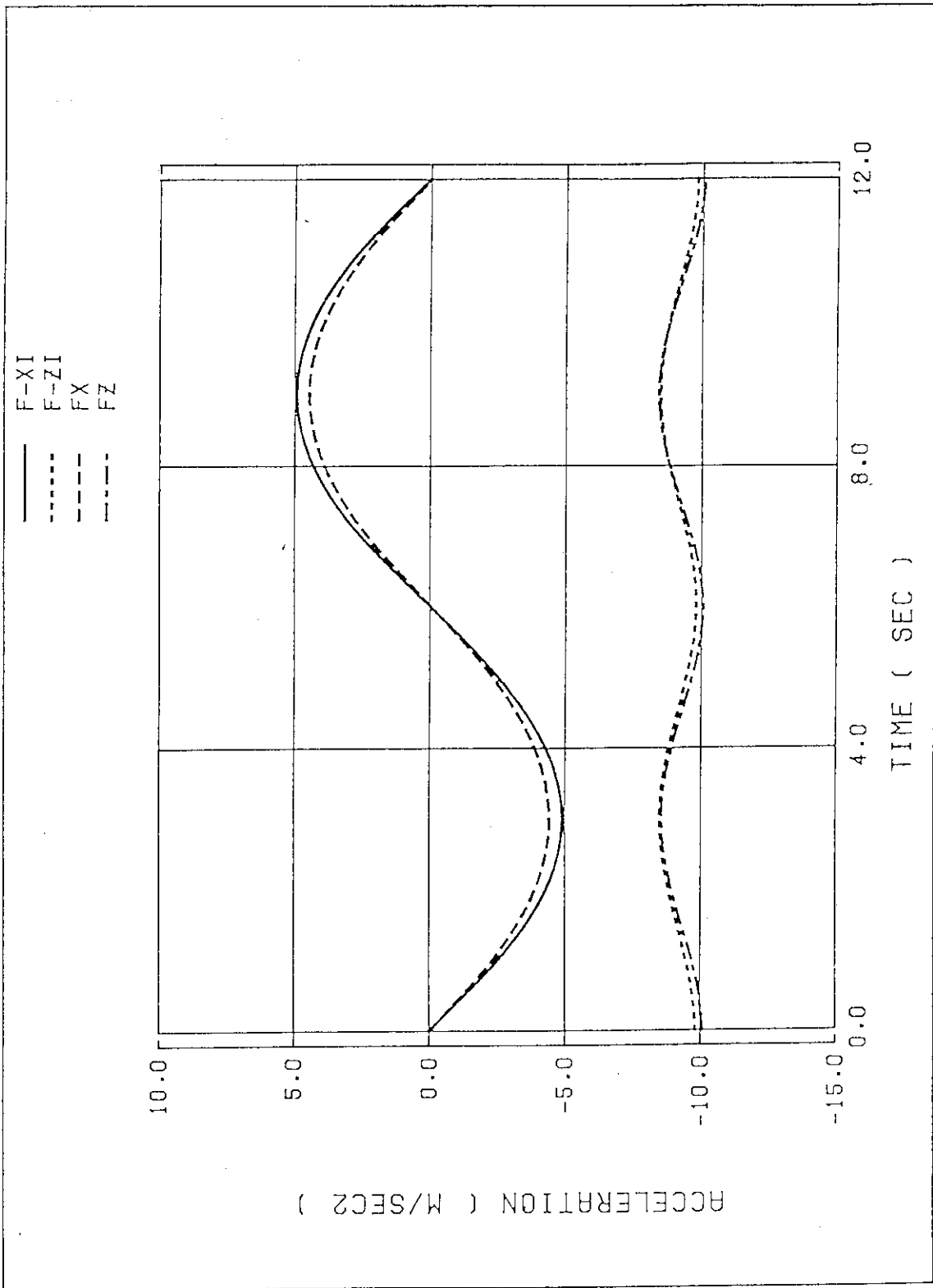


図 4.29 炉心入口左端に加わる全加速度変化 (周期12秒)

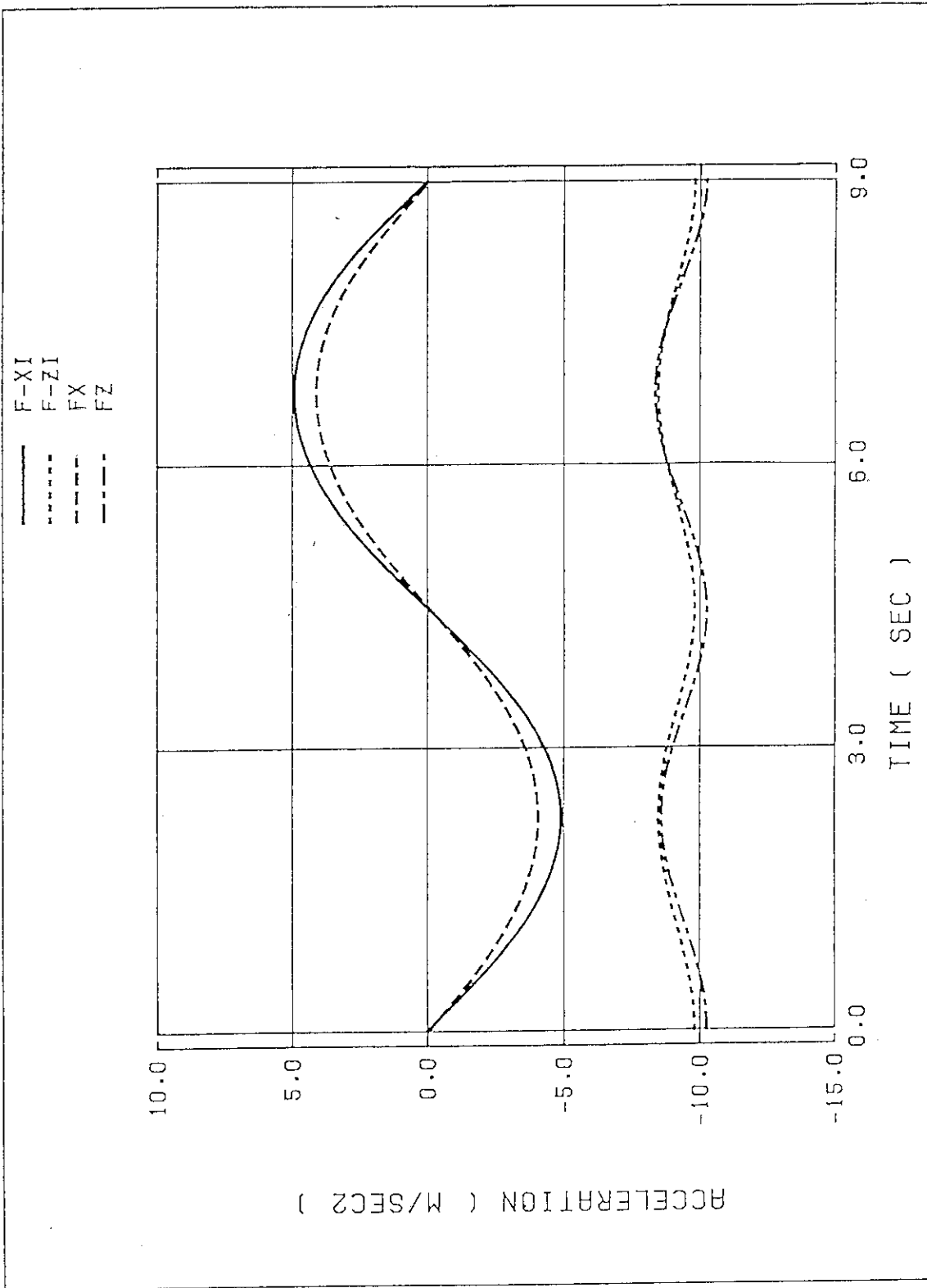


図 4.30 炉心入口左端に加わる全加速度変化 (周期 9 秒)

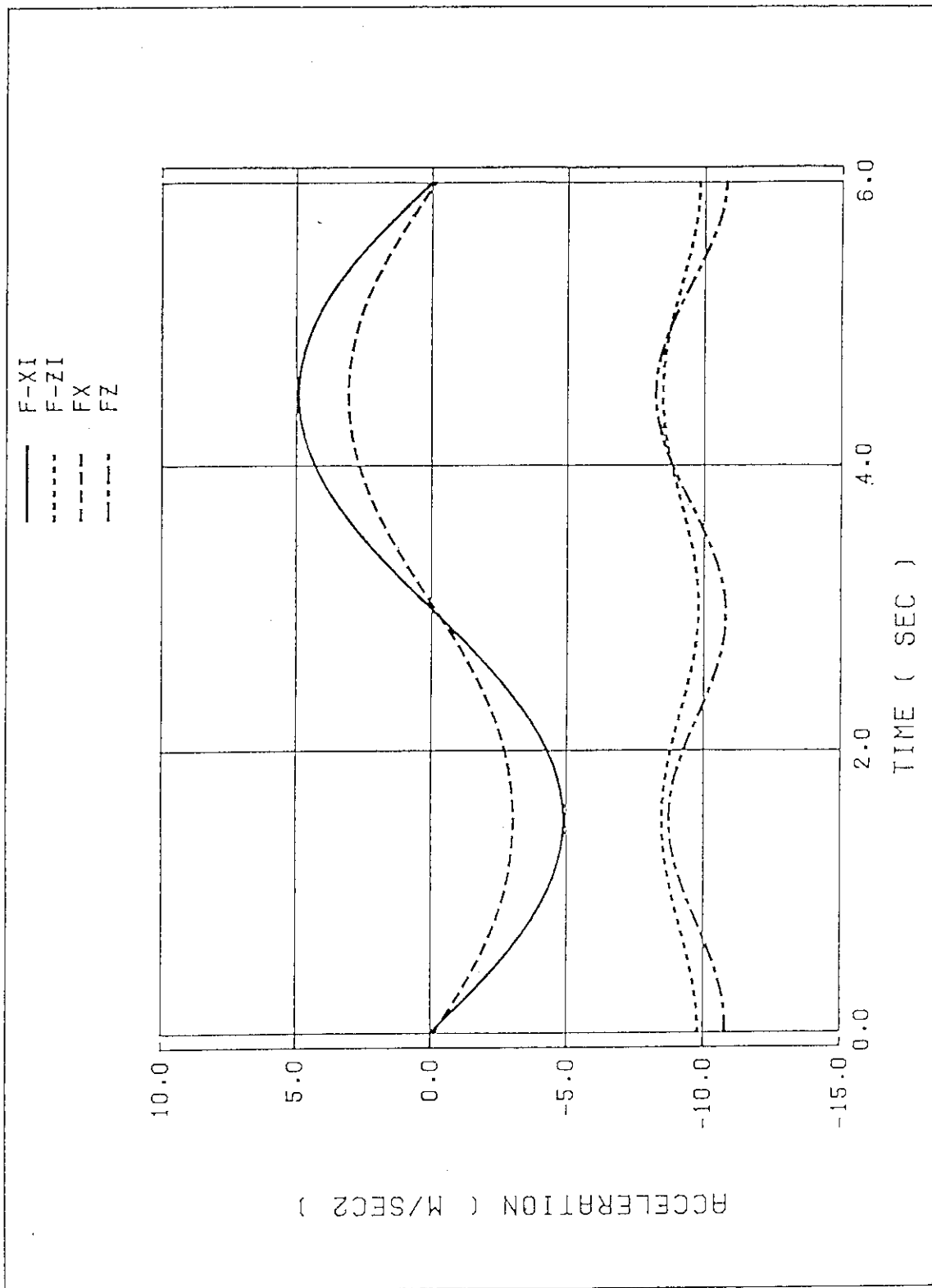


図 4.31 炉心入口左端に加わる全加速度変化 (周期 6 秒)

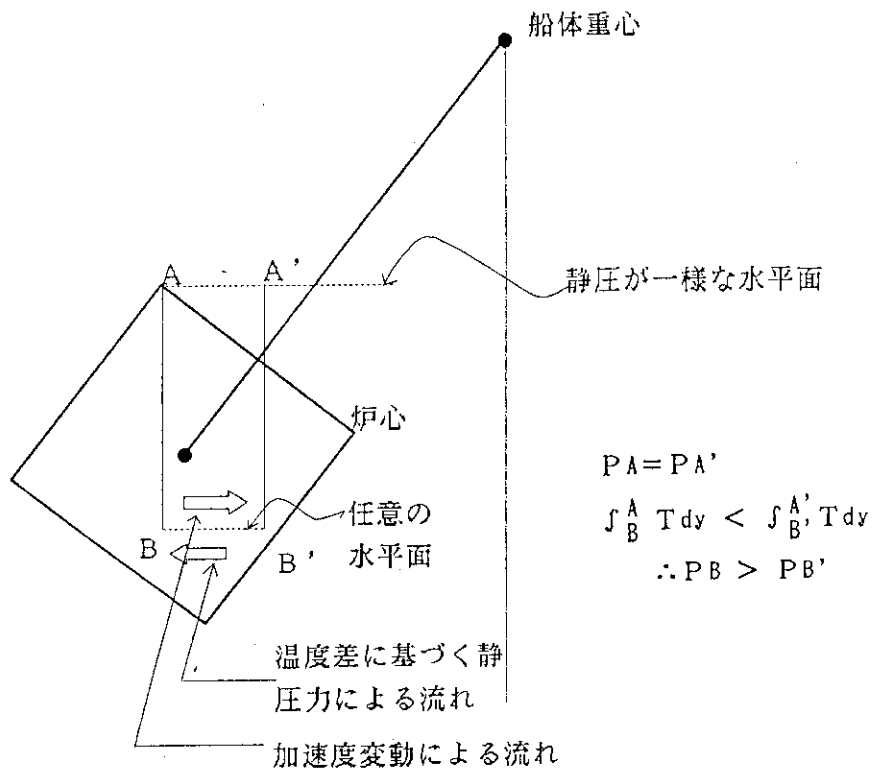


図 4.32 横揺れ時の炉心内流れの定性的解釈

## 5. 結 言

船体運動のうち横揺が炉心内流れに及ぼす影響を理論的に検討した。検討の対象は、原子力船研究開発室で開発中の改良船用炉とし、解析は、計算機能を追加した「THERMIT-2」コードにより実施した。その結果、以下の示すことが明らかになった。

- (1) 炉心が右に揺れたときには炉心の左半分より右半分のチャンネルの出口流速が大きく、左に揺れたときには左半分のチャンネルの出口流速が大きい。出口流速の変動幅は外側のチャンネルほど大きい。
- (2) 炉心出口部の圧力分布の与え方が計算結果に与える影響が大きく、炉心出口を直ちに計算上の境界とした場合には炉心出口流速変動を過大に評価する。
- (3) 炉心での発熱がない場合及び船体横揺に起因する見かけの加速度変化が支配的な場合には炉心出口部の流速分布は対称性を有している。
- (4) 炉心内の発熱に起因する冷却材の温度分布の影響によって、静圧差による流れが誘起され、この流れは、加速度変動による流れの変動を減少させる。
- (5) 炉心内の発熱に起因する冷却材の温度分布の影響によって、静圧差による流れが誘起され、これが炉心出口部の流速分布の対称性を歪ませる。
- (6) 振幅及び周期が炉心出口の流速分布の変動に与える影響は大きい。最大振幅が $30^\circ$ の場合、振幅周期が6秒になると炉心出口流速分布の変動は約13%とかなり大きくなる。

今後は、炉心入口流量分布、出力分布を考慮した計算を行い理論的検討を進める。また、将来的には原子力第1船「むつ」の実験データとの比較を予定している。

## 参 考 文 献

- 1) 村田, 小林, 「船用炉の横揺れ時自然循環特性(第3報)」, 日本原子力学会 1989秋の大会予稿集(第I分冊), 論文番号E53, p. 255
- 2) 楠, 横村, 大辻, 井川, 黒沢, 「加速度変動時の限界熱流束に関する実験(その1): 加速度変動がサブクール沸騰域の気泡の挙動に及ぼす影響第2報: 静止時及び動揺時の気泡挙動」, JAERI-M 88-244 (1988年12月)
- 3) 横村, 「海洋における原子動力利用」, 日本機械学会第25回動力エネルギー技術シンポジウム, (1987年11月)
- 4) Kelly, J. E., Kao, S. P. & Kazimi, M. S., "THERMIT-2: A Two Phase Model for Light Water Reactor Subchannel Transient Analysis", PB82-180225 or MIT-EL-81-01 (April 1981)
- 5) 安保, 横村, 「改良船用炉プラントの概念設計(II), 炉心設計: 最適炉心の検討」, JAERI-M 89-019 (1989年2月)



## 5. 結 言

船体運動のうち横揺が炉心内流れに及ぼす影響を理論的に検討した。検討の対象は、原子力船研究開発室で開発中の改良船用炉とし、解析は、計算機能を追加した「THERMIT-2」コードにより実施した。その結果、以下の示すことが明らかになった。

- (1) 炉心が右に揺れたときには炉心の左半分より右半分のチャンネルの出口流速が大きく、左に揺れたときには左半分のチャンネルの出口流速が大きい。出口流速の変動幅は外側のチャンネルほど大きい。
- (2) 炉心出口部の圧力分布の与え方が計算結果に与える影響が大きく、炉心出口を直ちに計算上の境界とした場合には炉心出口流速変動を過大に評価する。
- (3) 炉心での発熱がない場合及び船体横揺に起因する見かけの加速度変化が支配的な場合には炉心出口部の流速分布は対称性を有している。
- (4) 炉心内の発熱に起因する冷却材の温度分布の影響によって、静圧差による流れが誘起され、この流れは、加速度変動による流れの変動を減少させる。
- (5) 炉心内の発熱に起因する冷却材の温度分布の影響によって、静圧差による流れが誘起され、これが炉心出口部の流速分布の対称性を歪ませる。
- (6) 振幅及び周期が炉心出口の流速分布の変動に与える影響は大きい。最大振幅が $30^\circ$ の場合、振幅周期が6秒になると炉心出口流速分布の変動は約13%とかなり大きくなる。

今後は、炉心入口流量分布、出力分布を考慮した計算を行い理論的検討を進める。また、将来的には原子力第1船「むつ」の実験データとの比較を予定している。

## 参 考 文 献

- 1) 村田, 小林, 「船用炉の横揺れ時自然循環特性(第3報)」, 日本原子力学会 1989秋の大会予稿集(第I分冊), 論文番号E53, p. 255
- 2) 楠, 横村, 大辻, 井川, 黒沢, 「加速度変動時の限界熱流束に関する実験(その1): 加速度変動がサブクール沸騰域の気泡の挙動に及ぼす影響第2報: 静止時及び動揺時の気泡挙動」, JAERI-M 88-244 (1988年12月)
- 3) 横村, 「海洋における原子動力利用」, 日本機械学会第25回動力エネルギー技術シンポジウム, (1987年11月)
- 4) Kelly, J. E., Kao, S. P. & Kazimi, M. S., "THERMIT-2: A Two Phase Model for Light Water Reactor Subchannel Transient Analysis", PB82-180225 or MIT-EL-81-01 (April 1981)
- 5) 安保, 横村, 「改良船用炉プラントの概念設計(II), 炉心設計: 最適炉心の検討」, JAERI-M 89-019 (1989年2月)