

機械システム工学科の CAD 教育 (第一報)

岩田 満*・宇田 和史**・川島 豪**・神田 好作**

CAD education at Department of Mechanical
Systems Engineering (1st Report)

Mitsuru IWATA, Kazufumi UDA, Takeshi KAWASHIMA
and Kousaku KANDA

Abstract

This report presents an actual example on CAD education of 1987-1989 at Department of Mechanical Systems Engineering of KANAGAWA Institute of Technology.

The characteristics of this CAD education are as in the following:

(1) Object: to study the engineer-computer relations between the design activity and CAD systems. Here are 'calculative CAD system', 'CAD system for drawing' and 'informational CAD system'.

(2) Subject: to design a viscous damper to keep the torsional vibration of diesel engine under control.

In the CAD education, the students have some valuable experience of 'modeling of the equivalent torsional vibration system', 'analysis of the forced vibration', 'optimum design of the viscous damper' and 'drawing of the viscous damper'.

According to 3 years' teaching experience, we fully recognized that the necessary improvements of computer environment are of basic importance from the educational point of view.

1. 結 言

本報告は、神奈川工科大学機械システム工学科の CAD 教育の一つとして、1987 年度から 1989 年度までに実施した第 3 学年必修科目である電算機援用設計の実施内容をまとめたものである。

この CAD 教育の特徴は、演習目的を「計算の CAD、情報の CAD、製図の CAD と設計活動との関連を学習する」、演習課題を「ディーゼルエンジンのクランク軸系ねじり振動を抑制するビスカス・ダンパを設計する」として、具体的な設計活動の中でコンピュータやそれぞれの CAD をどのように活用すべきかを学習させることである。6 シリンダのディーゼルエンジンはその構造からクランク軸系ねじり振動が発生するために、そのねじり振動を抑制するダンパの設計は的確に

行わなければならない。このダンパの設計はエンジンメーカーの設計者にとっても難しい設計問題の一つである。学生にこのようなダンパの設計を行わせることは、企業の設計現場以上に難しい演習と思いつつ、設計問題への取り組み方を具体的に体験してもらうため、あえて演習課題としている。

機械システム工学科の新入生へのオリエンテーション資料¹⁾では、学科の教育方針を「従来の機械工学における個々の要素技術やその基礎となる力学現象を分析することを第一歩とし、次にこれらをモデル化し、動力機械とをシステムとして統合していく技術を身に付けることを機械システム工学科の基本にすえている。従来の機械工学、特に力学的現象の基礎原理についての教育と、その原理を用いた現象のモデル化及び解法についての教育を受ける。」と記している。また、履修要項²⁾の中で、電算機援用設計は「機械システム設計で講義した基礎理論に基づき具体的な高速ディーゼル機関を対象とし、その軸系ねじり振動を抑制するビスカ

平成 3 年 9 月 28 日受理

* 機械システム工学科非常勤講師

** 機械システム工学科

ス・ダンパの最適設計計算から自動製図に至る作業をコンピュータまたはパソコンを用いて実習する」と記している。

このように、電算機援用設計は学科の教育方針に沿ったものであるが、「どのような形で学生にCADを学習させるべきか」を教育課題に試行錯誤的な形で行ってきたCAD教育であった。

最後に、本報告のねらいは「CAD教育を推し進めて行くためには進歩の著しいCAD技術と設計活動との関連を日々研鑽しなければならない。」を十分認識し、今後の教育課題を明確にすることでもある。

2. 電算機援用設計の教育方針

表1に電算機援用設計の教育日程を示す。

電算機援用設計は演習科目であり、12日間(合計36時間)の75%を電卓による手計算やコンピュータプログラミングなどの作業に割り当て、以下の項目を演習させる。

- (1) オリエンテーリングの実施
- (2) コンピュータ及びプロッタールーチンの使い方
- (3) 等価ねじり振動系モデルの作成
- (4) 多自由度系の固有振動数や強制振動の解析
- (5) ビスカス・ダンパの最適設計とその自動製図
- (6) レポートの提出

先ず、オリエンテーリングでは学生に「各演習は時

間内で終了すべく努力する」「レポートは必ず提出する」「不明な点は積極的に教員に質問する」などの注意点を与えた。次に、コンピュータやプロッタールーチンの使い方、現状のハードウェアやソフトウェア環境など併せて説明した。そして、等価ねじり振動系モデルの作成は「機械工学における個々の要素技術やその力学現象を分析することを第一歩とし、次にこれらをモデル化し、……」に、多自由度系の固有振動数や強制振動の解析は「……現象のモデル及び解法についての教育を受ける。」に、ビスカス・ダンパの最適設計及び自動製図は「……システムとして統合していく技術を身に付けること……」にそれぞれ機械システム工学科の教育方針との対応を説明した。最後に、一連の演習内容をレポートにまとめて提出することを要求した。

このCAD教育の演習目的である「計算、情報、製図、の3つのCADと設計活動の関連を学習する。」は畑山³⁾が示した“設計に対する間違った考え”，すなわち「設計とは“設計計算だ”という考え」「設計とは図面を描くこと，すなわち“設計＝製図”の考え」「整理するのが面倒。どうせ整理しても後から見ない。などから整理と記録をしないのは設計者として失格だ。」を学生に考えさせることである。

一方、北郷⁴⁾は工学的解析(Engineering Analysis)を次のように述べている。

「工学的解析とは“ある機械構造がどのような働きをするか数量的に明らかにする”であり、設計者は目

Table 1. Schedule

Step	9:10-10:40	10:50-12:20
1st	Orientation	How to use the computer (L)
2nd	How to use KGP (L)	Moment of inertia (L)
3rd	Moment of inertia (C)	Shaft stiffness (L, C)
4th	Holzer table (L)	Holzer table (C)
5th	Holzer table (P)	Holzer table (P)
6th	Elastic curve (L, P)	Elastic curve (P)
7th	Forced vibration (C)	Specific amplitude and stress (C)
8th	Optimum damping coefficient (C)	Optimum viscosity (C)
9th	Design of inertial disk (L)	Design of inertial disk (P)
10th	Drawing of viscous damper (P)	Drawing of viscous damper (P)
11th	Drawing of viscous damper (P)	Drawing of viscous damper (P)
12th	Drawing of viscous damper (P)	Drawing of viscous damper (P)
13th	Drawing of viscous damper (P)	Hand in the term paper

Symbols: L=Lecture (25%), C=Calculation (27%), P=Programming (48%)

KGP=Graphic Package of KANAGAWA Institute of Technology

的にかなう数量的な解を見いだすとともに、自らの判断のもとで解の正しさを評価し、設計活動を進めて行かなければならない。

工学的解析は次の手順にて実施する。

- ① 定量的な解が求められるように問題を定義する。
- ② 理想化した実体の近似モデルで本質的な解を得る。
- ③ エネルギーの保存法則やニュートンの運動方程式などの自然法則を適用して方程式をたてる。
- ④ 方程式の解は解析的、数値解法、図式解法で求め

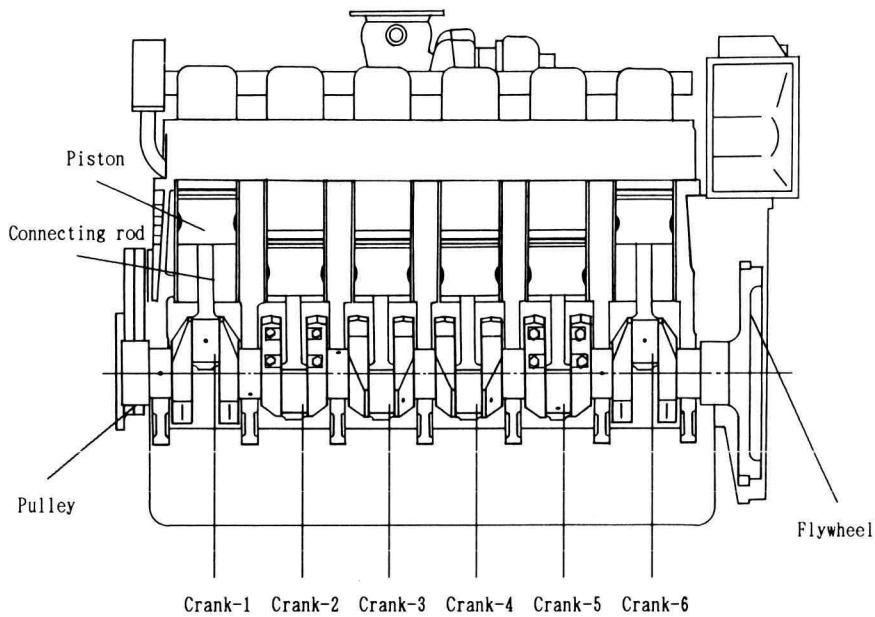


Fig. 1. Sectional view of diesel engine

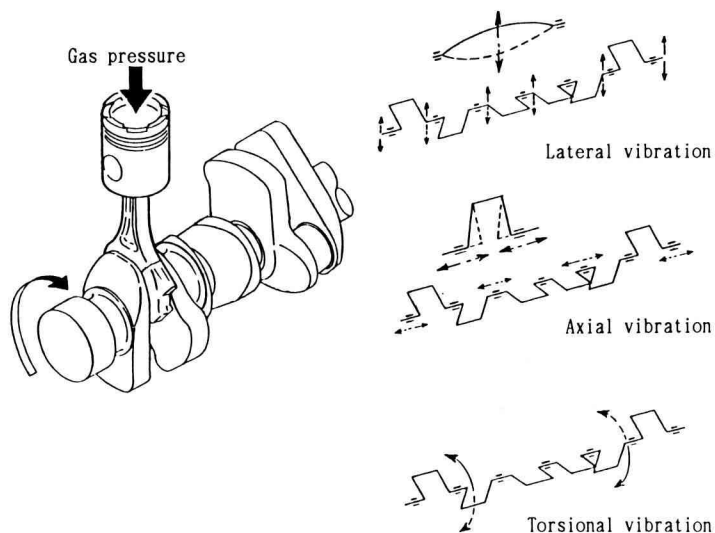


Fig. 2. Vibration systems and construction of crank shaft

る。

⑤ 数学的, 工学的な検算によってミスを排除する。

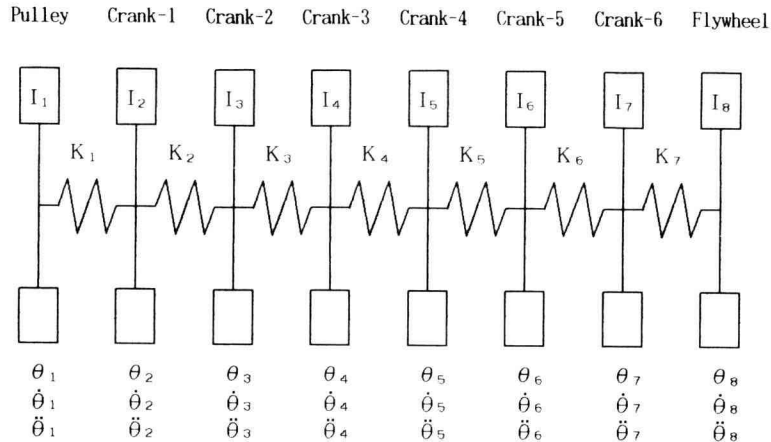
⑥ 解析内容を評価し一般化によって将来の設計に役立たせる。

⑦ 時間的, 費用的, 能力的などの制約条件を総合的に評価するなど最適化を行う。

⑧ 今後の設計活動に有効な資料として整理する。」

以上, 実際の設計現場に近い環境を作り, 「設計とは何か」「工学的解析はどのように行うのか」などを教育方針として電算機援用設計を行うことである。

■ Analytical model



■ Analytical equations

$$\begin{aligned}
 I_1 \ddot{\theta}_1 + K_1 (\theta_1 - \theta_2) &= 0 \\
 I_2 \ddot{\theta}_2 - K_1 (\theta_1 - \theta_2) + K_2 (\theta_2 - \theta_3) &= 0 \\
 I_3 \ddot{\theta}_3 - K_2 (\theta_2 - \theta_3) + K_3 (\theta_3 - \theta_4) &= 0 \\
 I_4 \ddot{\theta}_4 - K_3 (\theta_3 - \theta_4) + K_4 (\theta_4 - \theta_5) &= 0 \\
 I_5 \ddot{\theta}_5 - K_4 (\theta_4 - \theta_5) + K_5 (\theta_5 - \theta_6) &= 0 \\
 I_6 \ddot{\theta}_6 - K_5 (\theta_5 - \theta_6) + K_6 (\theta_6 - \theta_7) &= 0 \\
 I_7 \ddot{\theta}_7 - K_6 (\theta_6 - \theta_7) + K_7 (\theta_7 - \theta_8) &= 0 \\
 I_8 \ddot{\theta}_8 - K_7 (\theta_7 - \theta_8) &= 0
 \end{aligned}$$

■ Angular displacement, Angular velocity, Angular acceleration

$$\begin{aligned}
 \theta_1 &= \beta_1 \cos(\omega t), \quad \dot{\theta}_1 = -\beta_1 \omega \sin(\omega t), \quad \ddot{\theta}_1 = -\beta_1 \omega^2 \cos(\omega t) \\
 \theta_2 &= \beta_2 \cos(\omega t), \quad \dot{\theta}_2 = -\beta_2 \omega \sin(\omega t), \quad \ddot{\theta}_2 = -\beta_2 \omega^2 \cos(\omega t) \\
 \theta_3 &= \beta_3 \cos(\omega t), \quad \dot{\theta}_3 = -\beta_3 \omega \sin(\omega t), \quad \ddot{\theta}_3 = -\beta_3 \omega^2 \cos(\omega t) \\
 \theta_4 &= \beta_4 \cos(\omega t), \quad \dot{\theta}_4 = -\beta_4 \omega \sin(\omega t), \quad \ddot{\theta}_4 = -\beta_4 \omega^2 \cos(\omega t) \\
 \theta_5 &= \beta_5 \cos(\omega t), \quad \dot{\theta}_5 = -\beta_5 \omega \sin(\omega t), \quad \ddot{\theta}_5 = -\beta_5 \omega^2 \cos(\omega t) \\
 \theta_6 &= \beta_6 \cos(\omega t), \quad \dot{\theta}_6 = -\beta_6 \omega \sin(\omega t), \quad \ddot{\theta}_6 = -\beta_6 \omega^2 \cos(\omega t) \\
 \theta_7 &= \beta_7 \cos(\omega t), \quad \dot{\theta}_7 = -\beta_7 \omega \sin(\omega t), \quad \ddot{\theta}_7 = -\beta_7 \omega^2 \cos(\omega t) \\
 \theta_8 &= \beta_8 \cos(\omega t), \quad \dot{\theta}_8 = -\beta_8 \omega \sin(\omega t), \quad \ddot{\theta}_8 = -\beta_8 \omega^2 \cos(\omega t)
 \end{aligned}$$

■ Characteristic equation

$$(I_1 \beta_1 + I_2 \beta_2 + I_3 \beta_3 + I_4 \beta_4 + I_5 \beta_5 + I_6 \beta_6 + I_7 \beta_7 + I_8 \beta_8) \omega^2 = 0$$

Fig. 3. Analytical model

3. 計算の CAD

図 1 にはディーゼルエンジンの断面図を示す。

図 2 には振動形態をそれぞれ示す。

ここでは、ディーゼルエンジンのクランク軸系ねじり振動を解析するため、図 3 に示す等価ねじり振動系の解析モデルを作成させ、ねじり振動計算に必要な各質量の慣性モーメント、クランク軸の等価軸長とばね定数、最小軸径の極断面係数などをクランク軸の図面から寸法を読みとり、定規、コンパス、電卓などを用いて手計算で求めさせる。

“計算の CAD” は一般に (CAE=Computer Aided Engineering) と呼ばれる分野であり、設計活動の基本設計における「設計した製品が意図した機能を有するか」⁹⁾ を検討するものである。

3.1 クランク軸の慣性モーメントの計算

図 1 に示すプーリ、No. 1~No. 6 クランク、フライホイールまでのクランク軸の慣性モーメントを学生に計算させなければならないが、限られた時間内で CAD 教育を効率よく進めて行くために、求めさせる慣性モーメントをクランク軸の 1 クランクスローに限定し、プーリやフライホイール、往復運動部分などの慣性モーメントの値は事前に学生に提供した。

ここで、学生は計算に必要な寸法をクランク軸の図面から読みとらねばならない。まず、図 4 に示すように方眼紙にウェーブの形状を描き、定規、コンパス、分度器などで必要な要素に分割し、その要素ごとに慣性モーメントを計算して、表 2 に示す慣性モーメント計算表を作成する。

この演習の中で、ウェーブの傾斜部分の円弧分割をどの程度の要素数に分割すればよいかを質問してくる学生が多くみられた。この作業は有限要素法における対象モデルの要素分割と同じである。一般に、有限要素法を使うための要素分割は設計者の判断で行われているが、近年、この要素分割はプリプロセッサと呼ばれるプログラムで自動分割されるケースが増えつつある。しかし、要素分割は計算によって得られる解に大きく影響するため、設計者が対象モデルの特徴を掴んでいることが重要である。このような作業は CAE の分野で多く行われるため、学生に十分学習させて身に付けさせたい技術の一つである。

3.2 等価軸長とばね定数、最小軸径の極断面係数の計算

クランク軸のばね定数を計算するため、等価軸長の概念を説明する。

一般に、丸軸 (直径 D cm) のねじりに関するばね定

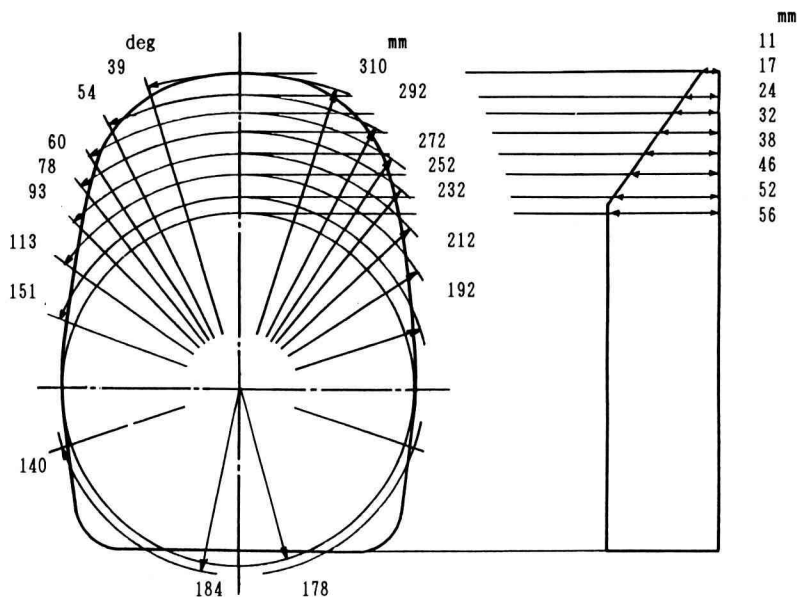


Fig. 4. Graphical analysis

Table 2. Calculation table of moment of inertia

D_1 cm	D_2 cm	D_1^4 cm ⁴	D_2^4 cm ⁴	$D_1^4 - D_2^4$ cm ⁴	b_1 cm	b_2 cm	b cm	α deg	$\frac{\alpha}{360}$	$I\alpha$ cm ⁵
		$\times 10^4$	$\times 10^4$	$\times 10^4$						$\times 10^4$
31.0	29.2	92.352	72.699	19.653	1.1	1.7	1.40	39	0.108	2.971
29.2	27.2	72.699	54.736	17.963	1.7	2.4	2.05	54	0.150	5.524
27.2	25.2	54.736	40.328	14.408	2.4	3.2	2.80	60	0.167	6.737
25.2	23.2	40.328	28.970	11.358	3.2	3.8	3.50	78	0.217	8.626
23.2	21.2	28.970	20.200	8.770	3.8	4.6	4.20	93	0.258	9.503
21.2	19.2	20.200	13.590	6.610	4.6	5.2	4.90	113	0.314	10.170
19.2	17.8	13.590	10.039	3.551	5.2	5.6	5.40	151	0.419	7.944
17.8	—	10.039	—	10.039	5.6	5.6	5.60	360	1.000	56.218
18.4	17.8	11.462	10.039	1.423	5.6	5.6	5.60	140	0.389	3.100
where $g=980 \text{ cm/s}^2$, $\rho=7.85 \times 10^{-3} \text{ kgf/cm}^3$, Material: S43C									$\Sigma I\alpha$	110.793
$C=\pi\rho/(32g)$, $I\alpha=(D_1^4-D_2^4)b\alpha$, $I=C\Sigma I\alpha$									I	0.871

数 K は式 (1) で求められる。

$$K = GI/L \quad (1)$$

ここに,

K : ばね定数 (kgf・cm/rad)

G : せん断弾性係数 (kgf/cm²)

I : 極断面 2 次モーメント (cm⁴)

L : 軸長 cm

この丸軸と等価なばね定数をもつせん断弾性係数 G_e , 極断面 2 次モーメント I_e , 軸長 L_e なる換算軸(直

径 D_e cm) に置換すると, 式 (1) から式 (2) が得られる。

$$GI/L = G_e I_e / L_e \quad (2)$$

そして, 式 (2) より式 (3), 式 (4) が得られる。

$$L_e = (G_e/G) (D_e^4/D^4) L \quad (3)$$

$$K = G_e I_e / L_e \quad (4)$$

ここで, $G_e I_e$ に単位数値 ($=10^{10} \text{ kgf} \cdot \text{cm}^2$) を仮定して軸の材質を同じ ($G_e = G$) とすれば, D_e が求まり L_e は D と L で, K は式 (4) からそれぞれ求められ

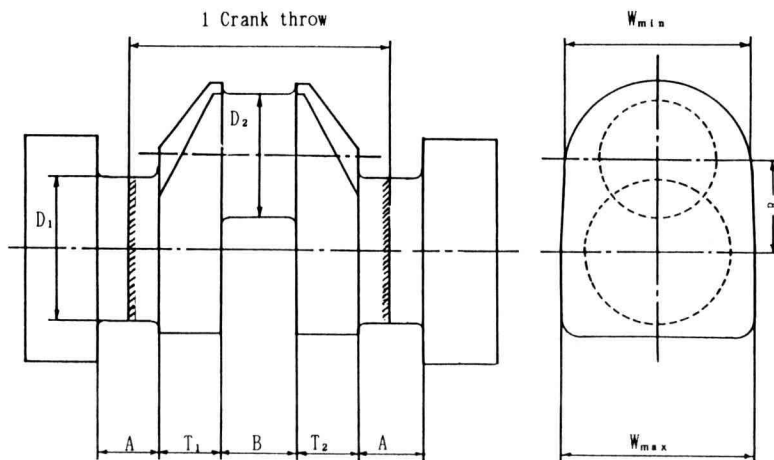


Fig. 5. Equivalent length of crank shaft

る。

クランク軸の図面から1クランクスロー部分の寸法を抜き取り、テキスト⁶⁾に記載されている W. Ker. Wilson の式 (5) から等価軸長を計算させる。設計活動において、設計者は種々の解析式や実験式を利用して必要な計算をしなければならないが、このとき最も注意すべき点として、その解析式や実験式の特徴を十分読みとり、その特徴を生かすべく条件や具体的な数値を使わなければならないことを説明した。

図5に1クランクスローのモデル図面を示す。

$$L_e/D_e^2 = (A + 0.4D_1)/D_1^2 + (B + 0.4D_2)/D_2^2 + \{R - 0.2(D_1 + D_2)\}/(2T_1 W_e^3) + \{R - 0.2(D_1 + D_2)\}/(2T_2 W_e^3) \quad (5)$$

$$1/W_e^3 = (1/W_{\max}^3 + 1/W_{\min}^3)/2 \quad (6)$$

ここに、

L_e : 等価軸長 (cm)

D_e : 換算軸の外径 (cm)

W_e : ウェブの有効幅 (cm)

W_{\max} : ウェブの最大幅 (cm)

W_{\min} : ウェブの最小幅 (cm)

なお、ここではクランクピン穴の偏芯による修正係数などは省略している。

一方、最小軸径の極断面係数の計算は材料力学の復習でもあり、具体的な計算方法を説明しなかった結果、多くの学生が極断面係数の値を速やかに求められなかった。

この点に関して、次の2つの原因が考えられる。

① 演習課題を消化するだけで忙しく、一つ一つの問題にじっくりと取り組めない。

② 材料力学で学んだ断面係数の知識が応用できる知識として身につけていない。

計算結果が正しいかどうか自ら判断せず、周囲の学生の結果を確認している学生の姿からは、設計活動に必要なモデル化の力や自ら決定しなければならない決定能力が養われていないと考えてしまう。

3.3 ねじり振動の固有振動数の計算

電卓を使って簡単に表計算することで求められるねじり振動の固有振動数の計算アルゴリズムも、解を得るための収束計算になるとその収束回数から電卓で対応できる作業ではない。そこで、コンピュータの利用となるが、簡単に電卓で計算できる内容でも、その計

Table 3. Holzer Table ($\omega^2 = 1.538 \times 10^6 \text{ rad}^2/\text{s}^2$)

Name of mass	I kgf·cm ²	$I\omega^2$ kgf·cm	β rad	$I\omega^2\beta$ kgf·cm	$\downarrow \Sigma I\omega^2\beta$		$\downarrow (1/K) \Sigma I\omega^2\beta$		τ kgf/cm ² /deg
					kgf·cm	(1/K) rad/kgf·cm	rad	Z_p cm ³	
Pulley	1.252	$\times 10^6$	1.0000	$\times 10^6$	$\times 10^6$	$\times 10^{-8}$	0.0167	322.6	104.2
Crank 1	3.477	5.346	0.9833	5.257	7.182	1.405	0.1009	322.6	388.5
Crank 2	3.477	5.346	0.8824	4.717	11.90	1.405	0.1672	322.6	643.8
Crank 3	3.477	5.346	0.7152	3.823	15.72	1.405	0.2209	322.6	850.5
Crank 4	3.477	5.346	0.4943	2.643	18.36	1.405	0.2580	322.6	993.4
Crank 5	3.477	5.346	0.2363	1.263	19.62	1.405	0.2757	322.6	1061.
Crank 6	3.535	5.435	-0.0394	-0.2141	19.41	0.943	0.1830	322.6	1050.
Flywheel	54.46	83.74	-0.2224	-18.62	0.790				

以下に、Holzer テーブルの変数内容を記す。

I : 慣性モーメント

$I\omega^2$: 各質量が1 rad ねじれたときの振動トルク

β : クランク軸前端が1 rad ねじれたときの各質量の相対振幅

$I\omega^2\beta$: クランク軸前端が1 rad ねじれたときの各質量の振動トルク

$\Sigma I\omega^2\beta$: 各質量間に加わる振動トルクの和

$(1/K)$: 各質量間のばね定数の逆数

$(1/K)\Sigma I\omega^2\beta$: クランク軸前端の1 rad ねじれたときの各質量の相対ねじれ角

Z_p : 各質量間の最小軸径の極断面係数

τ : クランク軸前端が1 deg ねじれたときの各軸に生じる最大付加応力

算手順をプログラムすることは決して易しくない。従って、学生に Holzer テーブルを一度手計算させることによって計算手順を確認させフローチャートに表し、具体的にプログラミングさせた。ここで、“計算の CAD”の重要な要素である数値計算を学習させている。

図3の解析モデルに示した ω^2 に関する特性方程式は以下の逐次近似法で解くことができる。

まず、根の1つである ω^2 の概略値を仮定する。そしてブーリの振幅 β_1 を1と仮定して順次 $\beta_2, \beta_3, \beta_4 \dots$ を求め、 ω が目的とする解であれば式(7)の関係が成立する。

$$\Sigma I \beta \omega^2 = 0 \quad (7)$$

もし、成立しなければ改めて ω^2 の値を仮定して計算し、式(7)を満足する解が得られるまで繰り返し計算を行なう。

今回の数値計算では第 $(i-1)$ 、第 (i) 近似である $\omega_{i-1}^2, \omega_i^2$ を初期条件として

$$\begin{aligned} \omega_{i-1}^2 &= 1.00 \times 10^6 \text{ rad}^2/\text{s}^2 \leftarrow \omega_{i-1} = 1,000 \text{ rad/s} \\ \omega_i^2 &= 2.25 \times 10^6 \text{ rad}^2/\text{s}^2 \leftarrow \omega_i = 1,500 \text{ rad/s} \end{aligned}$$

を仮定し、Holzer テーブルにより $f(\omega_{i-1}^2), f(\omega_i^2)$ を求め、次の近似値 ω_{i+1} を計算させる。そして、

$$\Delta \omega_i^2 = (\omega_i^2 - \omega_{i-1}^2) / \omega_{i-1}^2 \leq \varepsilon = 10^{-3} \quad (8)$$

となるまで逐次計算させる。

表3に Holzer テーブル計算表を、図6に Holzer テーブルのためのフローチャートを示す。また、授業の中で、フローチャートを用いて表計算のアルゴリズムを説明したが、多くの学生が固有振動数を求めるための Holzer テーブルの計算プログラムを作成できなかった。1年の前期、後期で電算機プログラミング(必修科目)を受講しているとはいえ、具体的に TSS 端末機を使って自ら数値解析をとまなうプログラムをわずか2週間で作成することは難しい。

一方、演習に必要な TSS 端末機は当時80台であり、100人以上の学生に TSS 端末機を一人一台割り当てることができないため、一部共同演習という形を取った。従って、CAD教育を行うためのコンピュータのハードウェア環境は十分ではなかった。

3.4 弾性曲線のプロット図の作成

Holzer テーブルで求めたクランク軸系ねじり振動解析結果から弾性曲線のプロット図を作図するため、

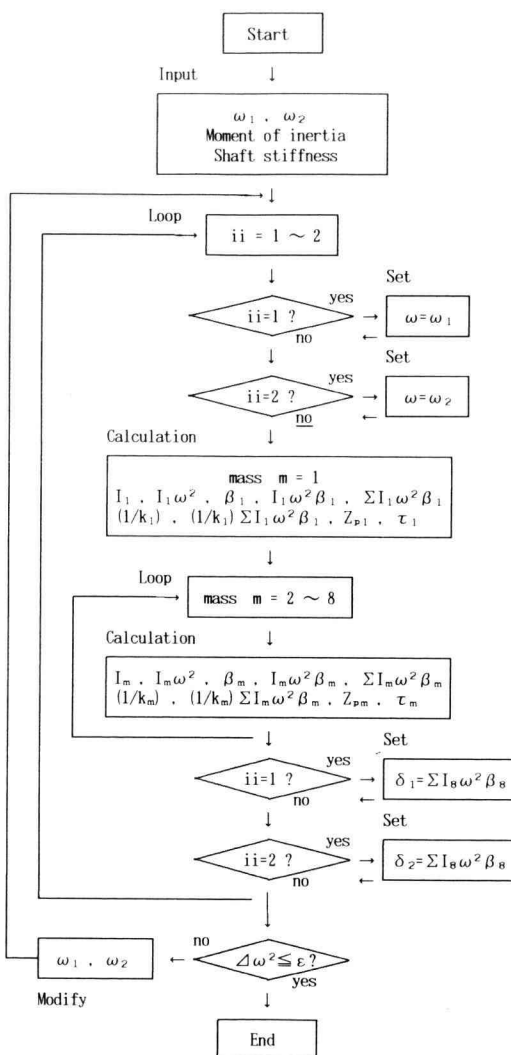


Fig. 6. Flow chart (Holzer table)

図形処理技術の一つであるグラフ処理を学習させた。この処理の特徴は、本来の図形に関係ない関数関係という抽象的な概念をグラフに表すことであり、従って、グラフ処理には何らかの基準(座標軸)が必要である。ここで作成する弾性曲線のプロット図は、横軸にクランク軸の等価軸長をとり縦軸に相対振幅をとってグラフ表示する。さらには、各質量の慣性モーメントをその大きさを考慮して図形表示している。

このようなプロットプログラムをフォートランコーラブルなグラフィックパッケージ (KGP=Graphic

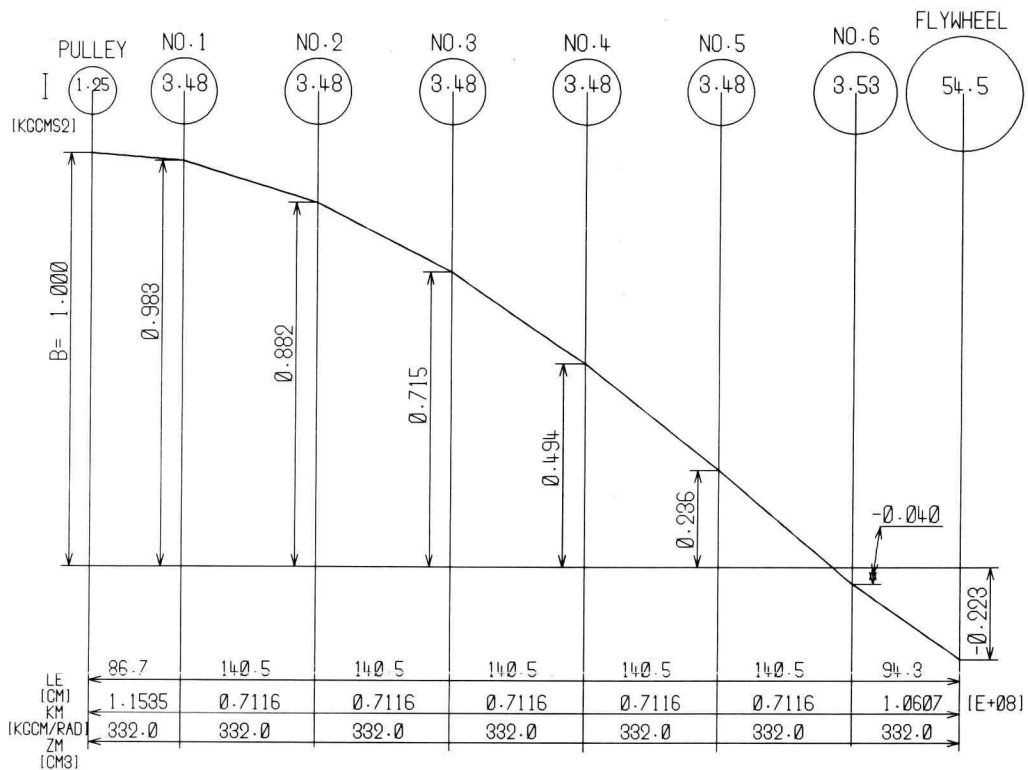


Fig. 7. A plotting example of elastic curve

package of KANAGAWA Institute of Technology の略)を用いて作成させた。なお、プロッタ図の作成に必要なハードウェアは静電プロッタ装置 (DRAS-TEM 8600) 1 台であり、この CAD 教育を行うためのプロッタ環境としては不十分であった。また、静電プロッタの設置場所が工学部 C2 号館 4 階であり、TSS 端末機の設置場所が同 3 階であることから、「静電プロッタの利用状況が管理しにくい」「階段を使って静電プロッタと TSS 端末機の間を往来しなければならない」などコンピュータ機器のレイアウトも問題であった。

図 7 には、学生が作成した弾性曲線のプロッタ図を示す。

4. 情報の CAD

クランク軸系ねじり振動の固有振動数が求まったならば、ピストンやコネクティングロッドから構成される

往復運動部分の慣性力とシリンダ内燃焼ガスの圧力から起振エネルギーを計算して、その共振点における実振幅を計算させる。

一般に、ピストンの慣性モーメントやシリンダ内燃焼ガスの圧力などは、設計仕様として扱われる基礎データであり、それらのデータから新たな基礎データが計算される。エンジンメーカーにおいて、これらのデータはコンピュータの中にデータベースとして登録され、設計者は必要な時に必要なデータが簡単に取り出せるようになっている。

例えば、式 (9) は出力と回転数、指示平均有効圧力の関係を表している。

$$7500B = \pi(d^2/4) \cdot s \cdot (P_{mi} \cdot \eta) \cdot N \cdot (n/60/2) \quad (9)$$

ここに、

B : 定格出力 (PS)

N : シリンダ数

P_{mi} : 指示平均有効圧力 (kgf/cm²)

Table 4. Specification of diesel engine

Type	4 cycle engine
Horse power	600 PS
Engine speed	1,800 rpm
Mechanical efficiency	0.95
Bore×Stroke	16 cm×18 cm
Number of cylinders	6
Engine damping coefficient	158 kgf ^(1/2) cm ⁻¹
Tangential pressure	$Q=0.0451P_{mi}+0.4059$ kgf/cm ²

s : ストローク (cm)

n : 回転速度 (rpm)

d : ボア (cm)

η : 機械効率

この式の特徴は性能={定格出力, 回転速度}, 形状={シリンダ数, ボア, ストローク}, 効率={指示平均有効圧力, 機械効率}に分類できることである。ここに, 性能や形状は一般にデータベースに格納されているから, あるエンジンの性能や形状データをデータベースから取り出して式(9)を用いれば, 指示平均有効圧力が速やかに計算できる。表4にディーゼルエンジンの機関仕様の一例を示す。

近年, このような“情報CAD”を効率よく行うためにAI(Artificial Intelligence) ツールやオブジェクト指向データベースなどが開発されている。

今回のCAD教育では, コンピュータ内部にデータベースとして基礎データを登録していない。従って, “情報のCAD”に関してはその概念を解説したにとどまり, 学生たちに具体的に体験させられなかった。この点も今後の課題であろう。

5. 製図のCAD

ここでは, 学生に“解析したクランク軸系ねじり振動を抑制する”ために必要なビスカス・ダンパの最適設計を演習させる⁶⁾。

まず, ビスカス・ダンパの最適設計手順を学生に説明したあと, その手順に沿って計算アルゴリズムをプログラミングさせた。このとき, 学生一人一人に, エンジンの基本仕様(エンジンの種類, 定格出力, 許容応力, ビスカス・ダンパ慣性円板の縦横比)を変えた設計条件を与え, オリジナルなビスカス・ダンパの設

計を要求した。これによって, 全学生が異なったビスカスダンパを設計することになる。

図8と式(10)にダンパ慣性円板の縦横比(1/ n)と各寸法の関係を示す。

$$b/(r_2 - r_1) = 1/n \rightarrow r_2 = r_1 + nb \quad (10)$$

ここに,

b : ダンパ慣性円板の幅 (cm)

r_1 : ダンパ慣性円板の内半径 (cm)

r_2 : ダンパ慣性円板の外半径 (cm)

1/ n : 縦横比

一方, ダンパ慣性円板の慣性モーメント I_d は

$$I_d = \pi \rho b (r_2^4 - r_1^4) / (2g) \quad (11)$$

ここに,

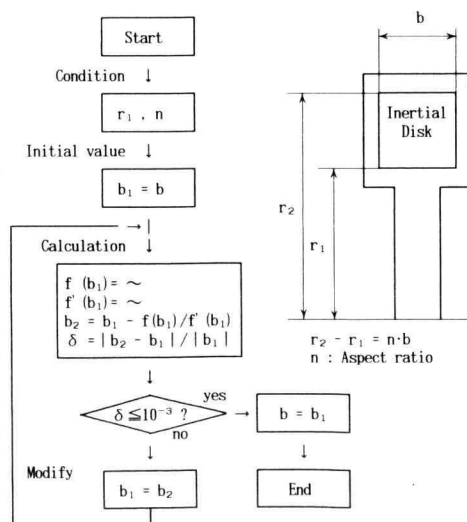


Fig. 8. Flow chart (Design of Inertial disk)

g : 重力加速度 (cm/s^2)

ρ : 密度 (kg/cm^3)

式(10)を式(11)に代入すると

$$I_d = \pi \rho b (n^4 b^4 + 4r_1 n^3 b^3 + 6r_1^2 n^2 b^2 + 4r_1^3 n b) / (2g) \quad (12)$$

また、規準質量を I_e とすれば $I_d = RI_e$ であるから、これを (12) 式に代入すれば

$$f(b) = n^4 b^5 + 4r_1 n^3 b^4 + 6r_1^2 n^2 b^3 + 4r_1^3 n b^2 - 2gRI_e / (\pi\rho) = 0 \quad (13)$$

$$f'(b) = 5n^4b^4 + 16r_1n^3b^3 + 18r_1^2n^2b^2 + 8r_1^3nb \quad (14)$$

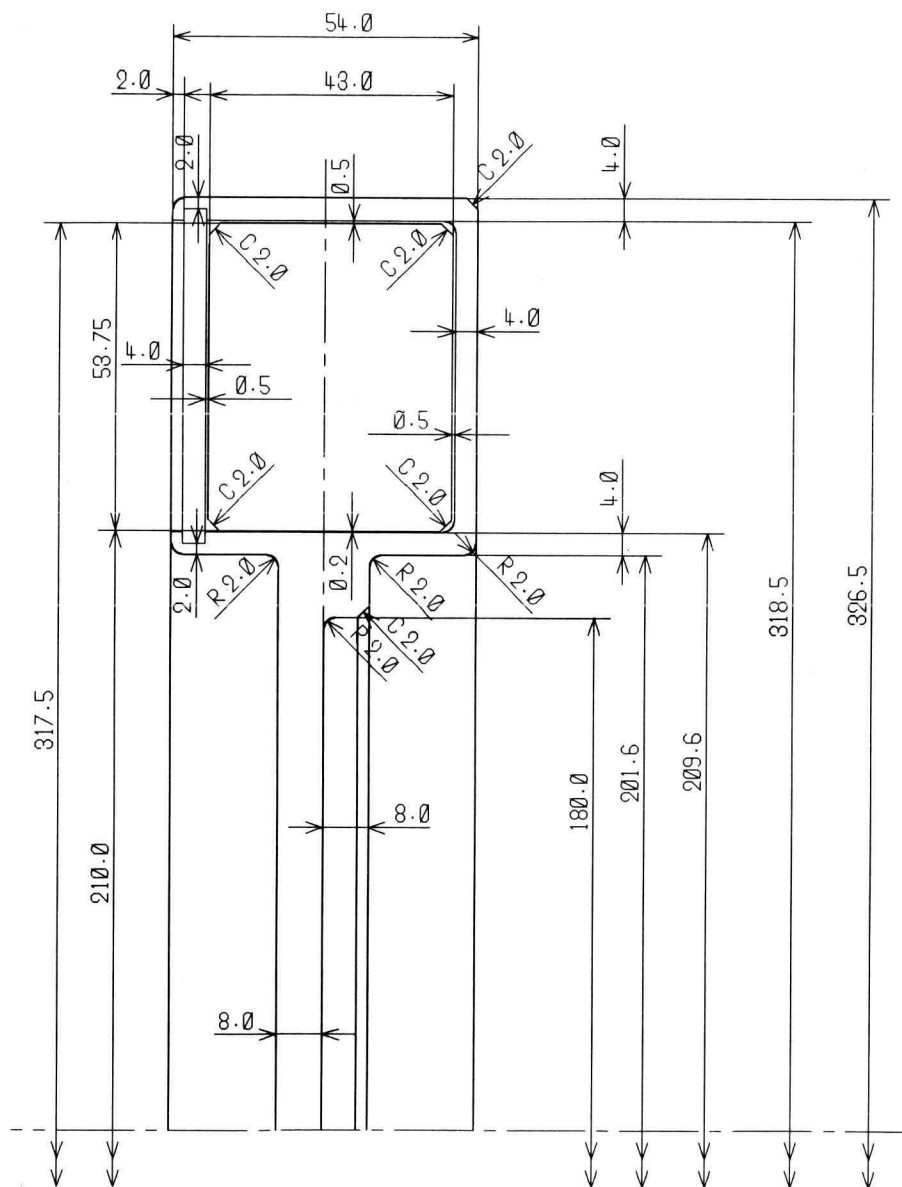


Fig. 9. A drawing example of viscous damper

となり、幅 b に関する 5 次方程式となる。したがって、逐次近似法であるニュートン法を用いて高次方程式 $f(b)=0$ を満足する根 b を求めればよい。

一般に、最適設計で求めた慣性円板の質量比 R を満たすビスカス・ダンパには種々の形状が考えられるが、試行錯誤的に設計解を求めて行くばかりでなく、その設計内容を十分に検討し、設計問題の解を第三者に理解できる形態で求めていくことも重要である。

5.1 ビスカス・ダンパの自動製図

形状設計したビスカス・ダンパの諸寸法にもとづいてプロッタプログラムを作成し、ダンパの自動製図を行わせる。

図 9 に、学生が作成したダンパの図面を示す。ただし、直径を示す ϕ は省略させた。

先に示した弾性曲線のプロッタ図も含めて、プロッタプログラムを効率よくプログラミングするために KGP を 1988 年 3 月に開発してこの CAD 教育に備えた。KGP には「基本作図ルーチン」、「製図処理ルーチン」や「幾何計算ルーチン」の機能を持たせている。

KGP は次の 3 つの機能(合計 37 個のサブルーチン)から構成される。

- ① 基本作図機能 = {作図開始, 作図終了, 拡大縮小, 一次変換, ペン移動, 英数字, 整数値, 実数値, 直線, 円と円弧, 座標軸}
- ② 製図記号機能 = {用紙サイズ, 寸法線, 仕上げ記号, 矢印, 風船記号}
- ③ 幾何計算機能 = { X や Y 軸に対称な点, 直線に関して対称な点, 2 点間の内分や外分点, 2 直線の交点, 2 線分の交点, 直線と円の交点, 2 円の交点, ……}

プロッタプログラムの指導にあたり、「これこれのサブルーチンを使用して製図しなさい」と強制せず、学生の自主性に任せた結果、線一本一本を KGP で製図処理する学生や、ダンパ図面の特徴を調べて、共通性の高い機能を新たにサブルーチンとして開発して効率よく製図処理している学生がいた。これらの差は学生のコンピュータに対する慣れによるものであろう。

少ない演習時間の中で、「製図の CAD」として自動製図を演習させるために予め KGP を開発し CAD 教育の効率化を図ってきたが、まだまだ不十分である。今後は対話型製図処理システムを開発し、パソコンの環境でマウスを使った製図処理を実施すれば、この CAD 教育の演習はより一層効率が向上するであろう。

6. レポートの提出

最後に、電算機援用設計のまとめとして基礎数値計算書、Holzer テーブルの計算フローチャートとプログラムリスト、弾性曲線のプロッタ図、強制振動の計算、ダンパ形状の最適設計書、ダンパの自動製図図面をレポートにまとめさせた。

このレポートは報告書としての体裁を要求せず、第三者がこのレポートを読んだときに十分理解できる内容が最小限整理されていれば良いとした。

指導教員の一人として、また企業で設計に携わる技術者の一人として、「企業の設計現場において、“設計書をまとめる”ことは技術の伝承であり、特許の出願や製造物責任(PL=Product Liability)などとともに大切な設計活動である」ことを、このレポートの提出で教えたかった。

7. 結 言

具体的な CAD 教育のテーマとして「ディーゼルエンジンのクランク軸系ねじり振動を抑制するためのビスカス・ダンパの設計」を、12 日間(合計 36 時間)の演習時間の中で学生に演習させてきた結果、以下に示す「将来の課題」が整理できた。

① 企業の設計活動の中で多く行われる図式解法に関して、対象モデルの特徴を良く掴んで適切なモデル分割ができるように指導しなければならない。このような作業は CAE 分野で多く使われるため、学生たちに十分学習させて身に付けさせなければならない。

② 極断面係数を求める場面で、「既に材料力学で学習した断面係数の計算であるから」との理由で説明しなかったのは指導側の不手際だった。応用できる知識として身につけるべくその応用方法を学習させなければならない。

③ プロッタプログラムの演習にあたり、フォートラン言語とグラフィックパッケージ(KGP)を用いて静電プロッタ装置(DRASTEM 8600)1 台で自動製図させたが、今後はパソコンとマウスを用いてディスプレイ上で製図できるシステムを準備すべきであろう。

④ 今回、「情報の CAD」は具体的に演習させられなかったが、企業の設計現場ではこの分野の進歩が著しく、学生たちに AI ツールやオブジェクト指向データベースなどを使った知識データベースを学習させる必要がある。ここでも、コンピュータ環境が大きく

影響してくる。

⑤ 企業の設計現場では「設計書をまとめる」ことが技術の伝承であり、学生に最も大切な設計活動であることを教えたかった。この点に関して、指導が不十分であったことを反省しなければならない。

電算機援用設計における CAD 教育は、その内容と時間配分について教員側は十分検討しなければならない。なぜならば、クランク軸系ねじり振動の理解に始まり、プログラミング演習、計算アルゴリズムの検討、最適設計計算、ビスカス・ダンパの自動製図などの演習をこなすだけで精一杯であり、CAD の概念を十分に学習するには至っていないと思われる。

それゆえ、今後学生に電算機援用設計を演習させるためには、機動力のあるパソコンを活用して演習させるべきであり、教員側はこれらコンピュータ環境の充実に努力しなければならない。そして、このことは安

易に高級なコンピュータを大量に導入して解決できることではない。

最後に、本報告書作成に際し協力して頂きました関係者や CAD 教育に助力して頂きました電子計算センターの方々に厚くお礼を申し上げます。

参 考 文 献

- 1) オリエンテーション資料, 神奈川工科大学, 1991.
- 2) 履修要項, 神奈川工科大学, 1991.
- 3) 畑山, 設計論と CAD 専門委員会セミナー資料, 精密工学会, 1990.
- 4) 北郷, 設計工学基礎, 丸善, 1978.
- 5) 津嶋, 実戦 CAE 入門, マグロウヒル, 1986.
- 6) 神田, 機械システム設計及び電算機援用設計 (CAD), 1987.