

C1 COMによるアニメーション

地震応答シミュレーション結果の表示

高瀬啓元，堀越清視，平野隆久（鹿島建設）

1. はじめに

地震を受けた構造物がいかに対応するか，シミュレーションする事は，日本のように大きな地震の多い国において，地震に耐える構造物を設計するために重要である．しかしこのようなシミュレーションには超高層ビルディングのように構造物が大型化，原子力発電所のように複雑化するのにしたがい，大型電子計算機の助けが必要となる．大型電子計算機を長時間駆使して計算した結果はどうしても数字の羅列になり，位置的関係，時間的変遷の判断ができにくい．自動プロッターを用いてわずかに位置的关系を図化できるが，ダイナミックシミュレーションには時間的移り変りを示したダイナミックな表示の工夫が必要となる．

ダイナミック表示の方法には，グラフィックディスプレイ装置を使った直接表示と映画フィルムに1コマ1コマ撮ってアニメーションにする間接表示の2通りの方法が考えられる．

ディスプレイ装置を使った直接表示はリアルタイムに表示でき，ディバック等に便利である．しかし装置があるかどうか問題で，またディスプレイ上に現われる動きは，シミュレーションの計算時間に左右される．地震応答計算のように計算ステップ間隔が短く（ $1/100 \sim 2/100$ 秒），各ステップにかかる計算時間が長いものは，実際の動きと程遠いものになるので，あらかじめ計算結果を磁気テープ等に格納しておき，その結果だけを一連させて表示し，動きを制御しなければ効果がない．

アニメーションによる表示は映写機さえあれば手軽に再現可能で，動きの具合も映写速度が1秒間24コマと決まっているので例えば $2/100$ 秒間隔に1コマの絵を作れば実時間のほぼ半分のスピードで動くとすぐ分る．フィルムを作るために1コマづつプロッターで描き写真に撮ったのでは，1枚に6～8分，1000～2000枚で最低100時間のプロッターの稼働が必要となる．しかもアニメーションの上映時間が40秒余りでは手軽に作れない．しかしグラフィックのできるCOM装置の出現により，数秒で1コマのフィルムが直接でき，それを映せばアニメーションになる．COMのプログラムは簡単であり，装置がなくてもCOMセンターを利用できるので，この種のダイナミックシミュレーションの表示には，COMを使ったアニメーションが最も良い．

2. COMの概要

COMとは次の3つの意味を有する．

(1) Computer Output Microfilming

(2) Computer Output Microfilmer

(3) Computer Output Microfilm

- (1)は電子計算機のアウトプットをマイクロフィルムに描く方法で通常COMはこの意味である。
(2)は描く装置, (3)はできたフィルムの事を云う。

COM装置にはCRT方式, キャラクトロン方式と呼ばれている一種のCRT方式, オプティカル方式, EBR (Electron Beam Recorder) 方式等がある。ここでは最もよく使われているキャラクトロン方式でグラフィックができる装置SD4060の例を使って原理を説明する。

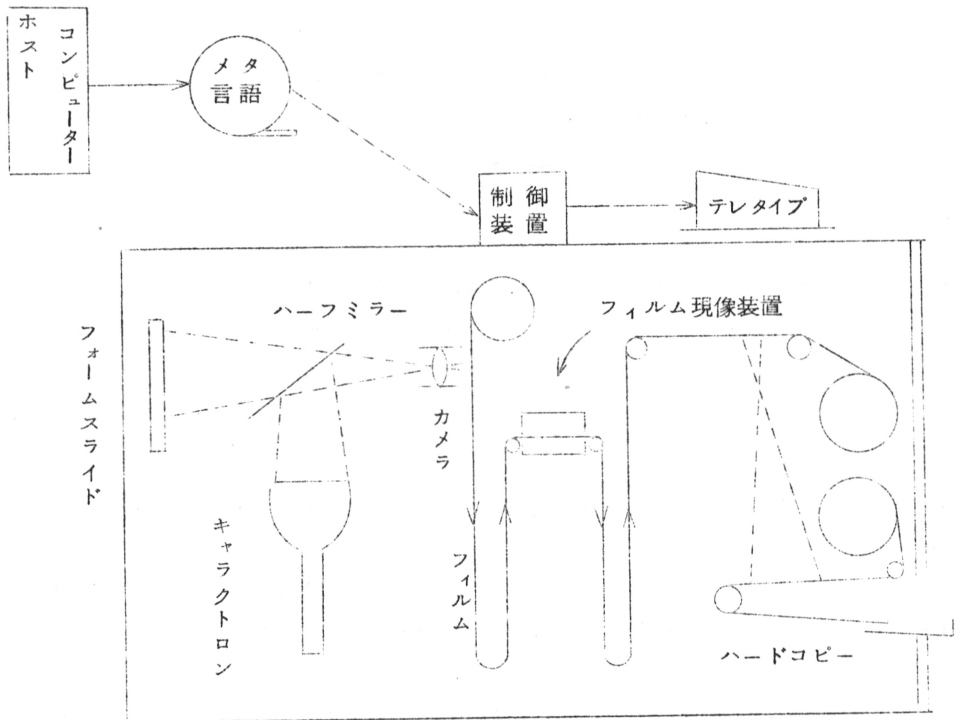


図-1 S-D 4060 コム装置

ホストコンピュータ用にIGS (Integrated Graphic Software) が完備しており, FORTRAN, PL/1 等のプログラム言語で簡単に使え, 結果はメタ言語の形で磁気テープに落ち, テープが少なく能率的である。メタ言語はオフラインで制御装置のミニコンピュータで翻訳実行される。フォームスライドより枠とかタイトルの定形データを一ハーフミラーを通して重ね合わせられる。フィルムは16mm, 35mm, 105mmが使用可能で105mmの場合マイクロフィッシュになる。キャラクトロン管はFig-2のように6インチのCRTで

4.8インチ×3.6インチの領域に4096×3072の座標点(単位ラスタ)を表示に使える。表示方法には二点を結ぶベクトル発生装置と、所要文字を切抜いた文字マトリックスとその中の1文字を選択するための電子光学系を用いている。線の太さは2ラスタ、4ラスタ、8ラスタ、16ラスタの4本あり、明るさを4段階に制御できる。図形を判別できる精度は4ラスタの線を標準として

$$12.2 \text{ cm} \div (4096 \div 4) \div 0.01189 \text{ cm}$$

約0.1mmの相対精度がある。フィルムハードコピーは、フィルムの感度、ハードコピーの詳細度等の誤差が入るので、精度は落るが、図面等の細かいものにも充分実用できる。

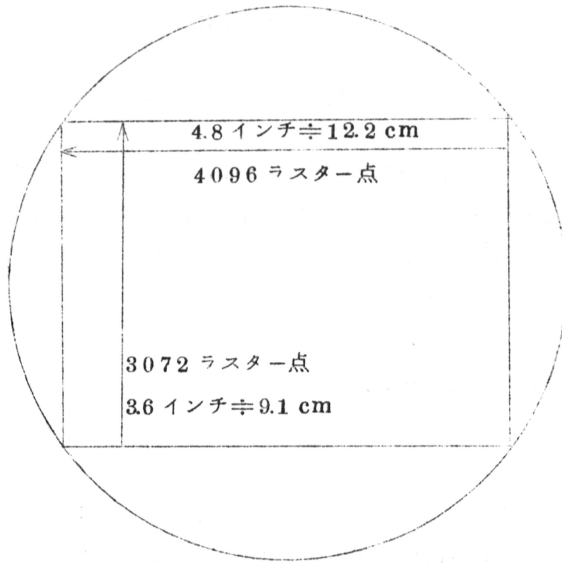


図-2 キャラクトロン管の大きさ

3. 地震応答シミュレーション

(1) シミュレーションの役割

構造物の地震応答シミュレーションの目的は、安全かつ経済的設計をするためである。図-3に示すように構造物を作る要求が起ると、地盤調査を行ない、構造物の目的と地盤、環境に

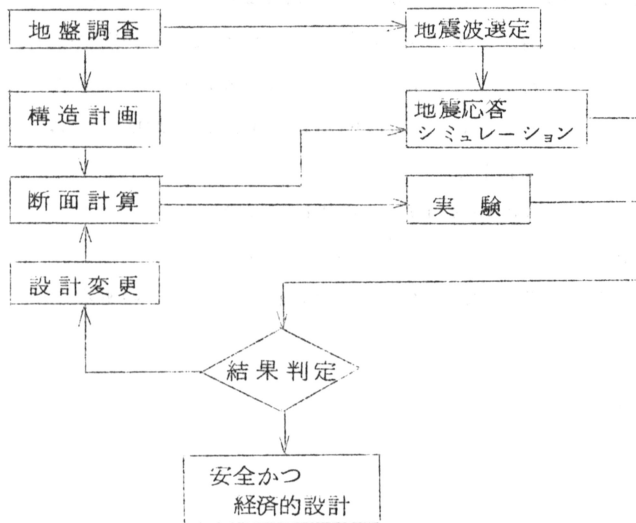


図-3 地震応答シミュレーションの役割

あった構造計画をたてる。構造計画ができあがると、経験的にできるだけ経済的な部材の断面を定め、断面の特性値を計算する。これらの特性値と、代表的な地震波や、地盤調査からその地盤と似た所で採れた過去の地震波を入力としてシミュレーションする。またそれとともに問題のある構造等については、実験でバックアップする。それらの結果を判定し、危険だったり、安全過ぎた場合、設計変更し、シミュレーションをやり直し、安全でかつ経済的であると判断されたなら、その案がすすめられる。

(2) シミュレーション法

(i) モデル化

地震応答シミュレーションではそのモデル化が最も重要で、何を求めるのかははっきり定め、その知りたいところが効果的に現われ、かつできるだけ簡単なモデルを作る。この種のシミュレーションは次元の大きい連立方程式と微分方程式を解く事になるので次元が大きければ大きい程、計算時間は3乗のオーダーに比例して大きくなりかつ精度が悪くなる。

(ii) 解析法

この解析法は構造物により違うので、ここではすべてに共通で、基礎的な概要を述べる。一般に力と変形の関係は力学的に

$$\{F\} = [K] \{o\} \quad (1)$$

と表わされる。ここで $\{F\}$ は力の成分を持ったベクトル、 $[K]$ は剛性行列と呼ばれ、バネに相当するもので、 $\{o\}$ は変位成分のベクトルである。例えば図-4のように骨組(線材)だけで構成されている構造物は各節点でベクトルの成分が次のように考えられる。

力の成分として

$$\{ F \} = \begin{cases} P \\ S \\ M \end{cases} \begin{array}{l} \dots\dots\dots \text{水平方向の力} \\ \dots\dots\dots \text{垂直方向の力} \\ \dots\dots\dots \text{回転力 (モーメント)} \end{array}$$

変位の成分として

$$\{ \delta \} = \begin{cases} u \\ v \\ O \end{cases} \begin{array}{l} \dots\dots\dots \text{水平方向変位} \\ \dots\dots\dots \text{垂直方向変位} \\ \dots\dots\dots \text{回転角} \end{array}$$

が考えられる。

しかし水平方向の地震のみを対象にすれば $\{ S \}$, $\{ M \}$ は通常 0 であるので(1)式は

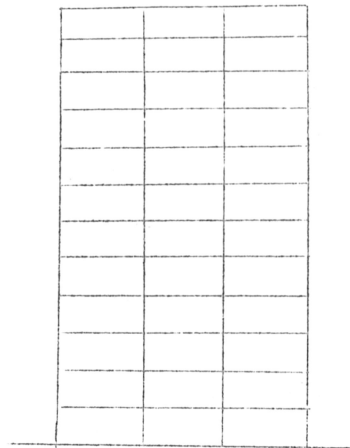


図-4 骨組

$$\begin{pmatrix} P_1 \\ \vdots \\ P_N \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} K_{11} & K_{12} \\ \vdots & \vdots \\ K_{21} & K_{22} \end{bmatrix} \begin{pmatrix} u_1 \\ \vdots \\ u_N \\ v_1 \\ \vdots \\ v_N \\ O_1 \\ \vdots \\ O_N \end{pmatrix} \quad (2)$$

となり更に

$$\{ P \} = ([K_{11}] - [K_{12}][K_{22}]^{-1}[K_{21}]) \cdot \{ u \} = [K] \{ u \} \quad (3)$$

(3)式の $\{ P \}$ を慣性力 $-[M] \cdot \{\ddot{u}\}$ でおきかえると自由振動方程式が得られる。

$$[M] \{\ddot{u}\} = -[K] \{ u \} \quad (4)$$

ここで $[M]$ は質量マトリックスである。

この振動系の振動数, 振動形は $[M]^{-1}[K]$ の固有値 (振動数), 固有ベクトル (振動形) を解く事により求められる。

(4)式に地震動を加え, 減衰項を与えると強制振動方程式となる。

$$[M] \{\ddot{u}\} + [c] \{\dot{u}\} + [K] \{ u \} = -[M] \{\ddot{\alpha}\} \quad (5)$$

$[c]$ は減衰マトリックスと呼ばれ, 内部摩擦形の場合は γ を内部減衰係数とし,

$$[c] = \gamma [K]$$

となる。この方程式を解き, $\{ u \}$ を求め(2), (3)式より $\{ v \}$, $\{ O \}$ を計算し, 各部材の応力を求め, 部材が安全かどうか判断する。

(iii) 数値解析法

(3)式の計算は一般に大きなマトリックス演算となる。例えば図-4の平面解析 (二次元的な未知数しか考えない) でさえ 12 層, 3 スパンであるから(2)式の N は

$$N = 12 \times (3 + 1) = 48$$

と計算され、全体のマトリックスの大きさは、各節点で3つの変数を取ったのだから $48 \times 3 = 144$ となる。

現実的には、立体解析で、スパンの数が多く、超高層のように層が多く、しかも各節点で未知数の数が増えると、10000元にもほぼる。しかしこれらのマトリックスは、ビルディングのように整然としたものは、かなりの特徴を生かした解法を考え、現実的な計算時間内（大型電子計算機で10時間）に納めている。

(5)式の微分方程式の数値解析は通常微分方程式の解法に従って解く。地震の継続時間は30秒程度で、きざみ Δt は0.01～0.02秒が適当であるので約1000～2000ステップである。すなわち1000～2000回連立方程式を解く事になるので(3)式の $[K]$ はできるだけ小さくする必要がある。図-4をビルディングと考えると、横の部材は床板となり線材と比べてかなり剛性があるので、各層において水平変位量は一定であると仮定できる。

したがって(5)式の振動方程式は図-5のような、くしだんご型のモデルを解いた事になる。

次に自由振動方程式の固有値について述べると、建物のように元数を少なくモデル化できるものは、ヤコビ法等で解いても問題がない。しかし一般的には次数は大きくなり200～300元、大きいものは700元にもなる。200元以内までは、Householder-QR変換を使ってヤコビ法より20倍速く、解いているが、それ以上になるとパワー法を使って、せいぜい10次のモードまでである。この場合も構造物は対称で重根がでるとまた手数がかかる。



図-5 振動モデル

(3) シミュレーション法のチェック

シミュレーション法のチェックは実際にできあがった構造物に地震計を設置しており、強い地震ができた場合、観測値と計算値を比較する事によりチェックできる。

シミュレーション法がチェックされ問題がなくなれば図-6のように標準設計法にシミュレーション法がまとめられ、簡単な静的計算だけで設計されるようになる。したがって最終的なシミュレーションの目的は、標準設計法の確立にある。

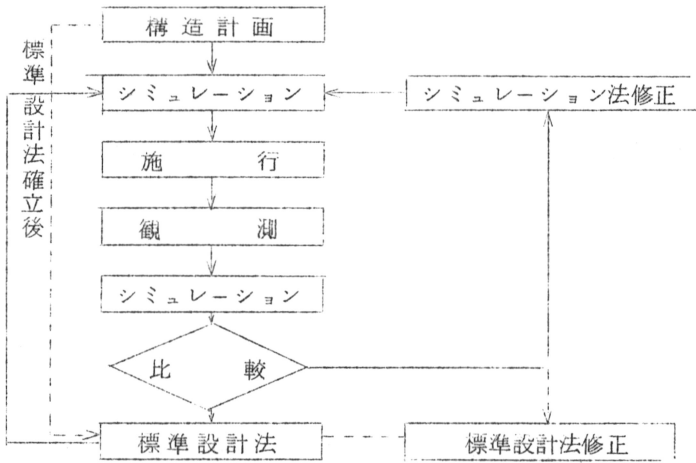


図-6 標準設計法

4. アニメーションテクニック

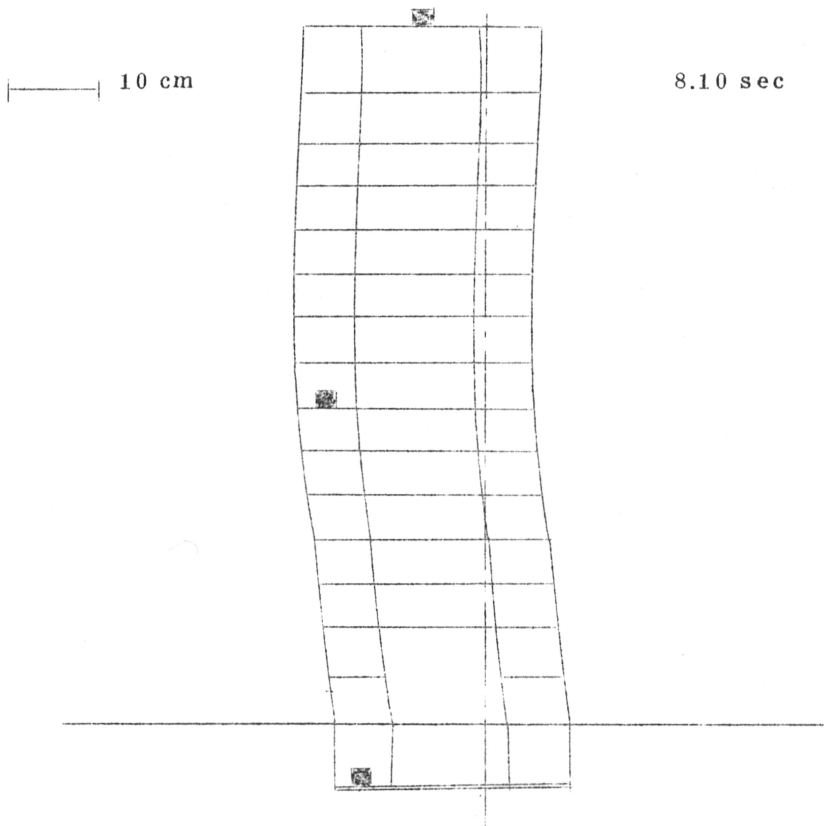


図-7

わずかな経験であるがアニメーションテクニック集の如きものができつつあるので、これから使う方々に少しでも参考になればと、次に掲げてみる。

(1) 画像はシンプルに

はじめは色々なものを表現したいため、1つの画面に3つの絵を同居させた。写してみるともっとも動きの激しい所だけに視線が吸いつけられ、他の部分はほとんど印象に残らなかった。さらに多くの図を入れると画面が繁雑になり、1つ1つの絵が小さくなってしまいますので、遠くからは見えにくくなる。1つの画面に1つの絵だけをのせるともの足りなく感じるが、画面が落ち着き、注目したい点をゆっくり見ることができる。アニメーションとして多勢いの人に見せるものならば、画像は思い切ってシンプルにすると良い。

(2) 線は太く

線の太さをはじめ標準の太さ(4ラスター)にしたが(機械の調整の仕方によって多少違いがあるので一般的な事しか言えないが)、絵が薄くなり、動きが弱々しくなってしまう、又遠くからも見えにくい、太さを2倍の8ラスターにするとコントラストがはっきりし、動きが生々として迫力がでてきた。同じ8ラスターの太さでも4ラスターを2本合わせたものとは違う。これは、光学的に考えられる事で、光の量は2乗に比例するため、8ラスターの線と4ラスターの2本の線とは光の量が異なり濃さが違う。これらを上手に使い分けて画像を作ると強弱のあるものができあがる。

(3) 字は大きく

初め、文字はキャラクtron文字を使ってみたが、標準(31×51ラスター)の1.5倍(これがキャラクtron文字の最大の大きさ)の大きさの文字でも遠くから全く読めず使いものにならなかった。そこで、ベクトル文字で大きさと線の太さをいろいろ変えてテストしてみた結果、文字の大きさは標準の3倍から5倍、線の太さは、標準の2倍が最も良いことがわかった。しかし線の太さを4倍(16ラスター)にすればタイトルのような5倍の大きさの文字でシンプルなもの良いが、Aの字のように鋭角に交わっている文字では明るすぎ、ハレーションを起してしまう。字は思い切って大きく、太さは8ラスターで。

(4) 動きのスケール

アニメーションの心臓部とも言える動きのスケールについて述べる。動きは絵の形、動く範囲、速さが微妙に関係しあっているので、場合によって異なる。何を強調して見せたいか、アニメーションの目的をはっきり定め、どの位の大きさのスクリーンに写して見せるか、使い方も考えた上で動きのスケールを決めなければならない。私達の場合、絵は高層ビルディングで細長いので、動く範囲を広く取ったり、動きを速くすると不安定感が出てきた。目的を、振動学を知らない他の分野の人々にも、解析結果を理解していただくようと考えていたので、トーカーを入れた映画にした。今回の場合、ゆれのスケールは、建物がスクリーンに2mの高さで写った時に、実際のゆれを示すようにし、速さは、半分にしてゆっくり見れるようにした。この場合、ゆれのスケールを大きく取り過ぎると、不安感を与えてしまい、又小さすぎても注

目したい所がよくわからなくなってしまう。

猶、普通の映写機の投影の速さは、1秒間にトーキー24コマ、サイレント16コマの2種類であるが、16コマの方は写した際に、チカチカとして目ざわりになるので、サイレントの場合でも、24コマにした方がよい。

(5) 静止3秒、移動3秒

アニメーションの際には、動いている部分の他に、画面を安定させるためにも、静止部分が必要である。絵と絵の変り目等、いきなり変えると目が付いていけないので、そこに静止部分を入れなければならぬ。この静止部分も長くするとだらけ、短くすると物足りない。人間が物を見て判断できるのは、約3秒といわれるため、静止部分を3秒(72コマ)とればよい。

又、画面内の絵を右から左、上から下へと移動(動きと別の意味)させるのも3秒間位がよい。

(6) ポジとネガ

フィルムにはポジティブとネガティブがある。バックが明るく像が暗く写るのがポジでその逆がネガである。この二つ共、現像の仕方が違うだけでCOMとしては、かわりないが、写す画面が、空白の部分が多い場合はネガが良く(ポジにすると空白部分が明るすぎて画面が見づらい)、絵の多い場合はポジがよい。COMのフィルムをそのまま見る場合はネガの方が落ち着いて良いが、青地に白抜きのようなカラーにする場合、ポジのフィルムを作り、カラーに反転させると良い。

本 PDF ファイルは 1972 年発行の「第 13 回プログラミング・シンポジウム報告集」をスキャンし、項目ごとに整理して、情報処理学会電子図書館「情報学広場」に掲載するものです。

この出版物は情報処理学会への著作権譲渡がなされていませんが、情報処理学会公式 Web サイトの https://www.ipsj.or.jp/topics/Past_reports.html に下記「過去のプログラミング・シンポジウム報告集の利用許諾について」を掲載して、権利者の検索をおこないました。そのうえで同意をいただいたもの、お申し出のなかったものを掲載しています。

過去のプログラミング・シンポジウム報告集の利用許諾について

情報処理学会発行の出版物著作権は平成 12 年から情報処理学会著作権規程に従い、学会に帰属することになっています。

プログラミング・シンポジウムの報告集は、情報処理学会と設立の事情が異なるため、この改訂がシンポジウム内部で徹底しておらず、情報処理学会の他の出版物が情報学広場 (=情報処理学会電子図書館) で公開されているにも拘らず、古い報告集には公開されていないものが少からずありました。

プログラミング・シンポジウムは昭和 59 年に情報処理学会の一部門になりましたが、それ以前の報告集も含め、この度学会の他の出版物と同様の扱いにしたいと考えます。過去のすべての報告集の論文について、著作権者（論文を執筆された故人の相続人）を探し出して利用許諾に関する同意を頂くことは困難ですので、一定期間の権利者検索の努力をしたうえで、著作権者が見つからない場合も論文を情報学広場に掲載させていただきたいと思います。その後、著作権者が発見され、情報学広場への掲載の継続に同意が得られなかった場合には、当該論文については、掲載を停止致します。

この措置にご意見のある方は、プログラミング・シンポジウムの辻尚史運営委員長 (tsuji@math.s.chiba-u.ac.jp) までお申し出ください。

加えて、著作権者について情報をお持ちの方は事務局まで情報をお寄せくださいますようお願い申し上げます。

期間：2020 年 12 月 18 日～2021 年 3 月 19 日

掲載日：2020 年 12 月 18 日

プログラミング・シンポジウム委員会

情報処理学会著作権規程

<https://www.ipsj.or.jp/copyright/ronbun/copyright.html>