

Linux 数値計算ツール

工学博士 大石 進一 著

コ ロ ナ 社

まえがき

数値計算はコンピュータの最初の応用である。その意味で、数値計算の歴史はコンピュータの歴史と重なる。数値計算のためのソフトウェアはこの間ずっと開発され続けてきた。したがって、現代においてはよいソフトウェアの膨大な蓄積がある。理工系の学生が実際的な数値計算法を体得するためには、このようなプロの作った道具を実際に使ってみるところからスタートするのがよい。幸い、Linux(UNIX)のフリーソフトウェアには、高品質な数値計算用ツールが揃っている。本書は、理工系の学生がこれらの高品質なLinuxの数値計算ツール(具体的にはOctaveとScilab)に習熟できるよう解説を加えることを目標に書かれている。

Linuxの数値計算ツールの優れたものは、非常に簡単にかつ高速、高精度に問題が解けるように設計されており、信じられないほど使い勝手がよい。したがって、本書では実際に問題を解きながら、それらのツールについて学んでいくという方針を取っている。また、数値計算ツールの背後で利用されている

1. 数値計算理論
2. プログラミング理論
3. コンピュータアーキテクチャ技法

をやさしく解説している。こうして

1. 将来、研究者や技術者となって理工学の第一線に立っても、本書で学んだツールがそのまま役に立ち
2. 数値計算ツールが利用している現在のコンピュータのアーキテクチャの基礎を理解することによって、C言語、C++、FORTRANなどで自分でプログラミングするようになった際に、プロの用いていた技法を応用することができるようになる

ことにも配慮している。

初心者が数値計算の本を読んで、C 言語や C++などで数値計算のプログラムを作ったとしても、プロの作った数値計算のプログラムの 100 倍は実行速度が遅く、また、安定性にも欠けたものしかできないといわれている。本書では、最終的には、その 100 倍の差がどこからくるのかを明らかにしている。

以上が前半であるが、ここまでは実際に数値計算ツールを使いながら学習していただくことを考えて、見開き 2 ページで一つの項目が終わるように工夫してみた。パソコンの横に本書を置いて、コマンドを打ち込みながらツールに親しんでいただきたい。図も手書き感覚で大きくしてみた。これは、書画カメラで映して教室で講義することも想定している。

また、後半では、数値計算で求めた結果がどれだけの誤差を含んでいるかを品質保証する問題を扱っている。すなわち、プログラミング以降の章では、プログラミングの例としてつぎのようなプログラムが示されている。まず、数値計算ツールで求めた連立一次方程式の解 (近似となるので、これを数値解と呼ぶ) の近くに真の解が存在することを、数値計算によって検証するとともに、もし真の解が存在すると判定された場合には真の解と数値解の間の誤差のシャープな上限を計算するプログラムの作成法を示している。つぎに、実対称行列の固有値を数値計算ツールで計算した結果にどれだけの誤差が含まれるかを計算するプログラムの作成法が示されている。最後に、非線形方程式の数値解に含まれる誤差を計算するプログラムの作成法が示されている。

これらのプログラムは、数値解を計算することの 2 倍から数倍程度で誤差を計算するので、少なくとも以上のような分野においては数値解に含まれる誤差を計算するのは実用段階に到達したことがおわかり頂けると思う。これは、実は数値計算の分野においては革命的なできごとであって、本書を執筆した著者の意図は実は後半のようなプログラミングが実に簡単にできること、および、それらのプログラムが、数値解を求めるのに対して数倍程度の実行時間で、シャープな誤差評価を与えることを示すことにあった。

さらに、最後の章においては、有理数演算を行える Calc と呼ばれる数値計算

ツールによる精度保証付き数値計算について解説している。

なお、本書で紹介する有力なフリーの数値計算ツールである Scilab2.5 には Windows98 用の実行ファイルがある。本書中で紹介している Inria のホームページから、この Scilab2.5 の実行ファイルもダウンロードできる。ダウンロードした Scilab2.5.EXE のアイコンをダブルクリックすると、Windows98 上で Scilab2.5 のインストールが始まる。インストール途中で質問される間にすべてデフォルトで指示されているものを指定すれば、Scilab2.5 のインストールに成功する。Windows98 上での Scilab2.5 の使用法は Linux 版とほぼ同じであるので、Scilab2.5 の Windows 版を用いれば、本書の内容は Windows98 上でも実行できることとなる。

なお、本書の補足の情報を著者のホームページ <http://www.oishi.info.waseda.ac.jp> に置くので参照されたい。

本書が、数値計算ツールが日本でも普及し、さらに数値解の精度保証が日常的になることにいささかでも役に立つことがあれば著者の望外の幸せである。

2000 年 8 月

大石 進一

4 刷にあたって

数値計算ツールは日々改定が進められているが、基本的な部分に大きな変更はない。2005 年 2 月の段階での改定の情報を追加しておく。

1. Scilab

Scilab の最新バージョンとして Scilab 3.0 が出ており (2005 年 2 月 6 日現在), <http://scilabsoft.inria.fr/> からダウンロードできる。Windows XP のバージョンを試したが、大きな特徴として

- (1) 高速化が達成されている (MATLAB7 と同程度の早さ)
- (2) GUI が変更された
- (3) MATLAB とのコードとの変換機能部分が更新された (という記述がある)。Applications タブの中に m2sci というタブがあり、これによって、

MATLAB の m-file が Scilab の sci-file に自動変換できるなどがあげられる。かなり大きな変更であるので、Scilab2.7.2 までのバージョンからこの最新版に入れ替えるとよいと思われる。

2. Octave

Octave の最新バージョンは 2.1.63 で 2004 年 12 月 3 日リリースである。
<http://www.octave.org/download.html> からダウンロードできる。

3. Rlab

Rlab は 2001 年 7 月以来すでに開発が止まっている。Linux の最新ディストリビューション上ではソースからのコンパイルが困難になっているように思われる。

<http://rlab.sourceforge.net/> からダウンロードできる Windows 版のバイナリ (version 2.1.05b) は XP 上で動く。

2005 年 2 月

大石 進一

Linux は、Linus Torvalds の米国およびその他の国における登録商標または商標です。
Windows, Windows98, Windows XP は、Microsoft Corporation の米国およびその他の国における登録商標または商標です。

MATLAB は The MathWorks, Inc. の米国およびその他の国における登録商標または商標です。

その他、記載された会社名、商品名、製品名は一般に各社の登録商標、商標または商品名です。

本文中では、TM, ©, ®マークは省略しています。

目 次

1. 数値計算ツールのインストール

1.1	どんな数値計算ツールがあるか	1
1.1.1	MATLAB	2
1.1.2	Octave と Scilab	4
1.2	Octave と Scilab のインストール	6
1.2.1	Octave のインストール	6
1.2.2	Scilab のインストール	8
1.3	グラフィックス	10
1.3.1	Octave のグラフィックス	10
1.3.2	Scilab のグラフィックス	11

2. 連立一次方程式

2.1	連立一次方程式の解法	12
2.2	行列の演算	16
2.3	逆行列の計算	20
2.4	LU 分解法	22
2.4.1	LU 分解とはなにか	22
2.4.2	ピボット付き LU 分解を求めるコマンド	23
2.4.3	LU 分解による連立一次方程式の解法	24
2.5	行列式	26
2.6	さまざまな行列	26
2.7	連立一次方程式の解法のまとめ	30

3. 行列の固有値問題

3.1	実行列に対する固有値問題	32
-----	--------------	----

3.1.1	MATLAB と Octave の場合	32
3.1.2	Scilab の場合	34
3.2	複素行列に対する固有値問題	34
3.2.1	複素数	34
3.2.2	複素行列の固有値	36
3.3	固有値問題の理論とアルゴリズム	38
3.4	固有値の求め方のまとめ	42

4. 数値積分と最適化問題

4.1	数値積分	44
4.1.1	Octave での定積分の数値計算法	44
4.1.2	Scilab での定積分の数値計算法	48
4.1.3	MATLAB での定積分の数値計算法	50
4.1.4	数値積分のまとめ	50
4.2	最適化問題	52
4.2.1	線形計画法	52
4.2.2	線形拘束条件を持つ 2 次計画問題	55
4.2.3	最適化問題の解法のまとめ	56

5. 非線形方程式と常微分方程式の解法

5.1	非線形方程式の解法	58
5.1.1	Octave の場合	58
5.1.2	Scilab の場合	61
5.1.3	非線形方程式の解法のまとめ	62
5.2	微分方程式	64
5.2.1	Octave の場合	64
5.2.2	Scilab の場合	66

6. プログラミング

6.1	変数	68
6.1.1	Octave の場合	68
6.1.2	Scilab の場合	71

6.2	比較関係	72
6.2.1	Octaveの場合	72
6.2.2	Scilabの場合	73
6.3	制御構造	73
6.3.1	Octaveの場合	73
6.3.2	Scilabの場合	76
6.4	関数	79
6.4.1	Octaveの場合	79
6.4.2	関数のファイルへの保存	83
6.4.3	スクリプトファイル	85
6.4.4	ダイナミックリンク関数	86
6.4.5	Scilabの場合	87
6.5	プログラミングのまとめ	88

7. 線形方程式の数値解はどこまで正しいか

7.1	数値計算の精度保証とは	89
7.2	浮動小数点数	91
7.3	丸めの方向の指定	95
7.3.1	Octaveにおける丸めの方向の指定	95
7.3.2	Scilabにおける丸めの方向の指定	97
7.4	ノルム	99
7.4.1	ベクトルのノルム	99
7.4.2	行列のノルム	101
7.5	精度保証の原理	103
7.6	線形方程式の数値解の精度保証	106
7.6.1	基本定理	107
7.6.2	Octaveによる精度保証方式	107
7.6.3	Scilabによる精度保証方式	109
7.7	固有値の精度保証	111

8. 非線形方程式の数値解はどこまで正しいか

8.1	区間演算の実装	114
-----	---------	-----

8.1.1	区 間 演 算	114
8.1.2	Scilab 上に区間オブジェクトを実装する	116
8.2	ニュートン法とクラフチック法	132
8.2.1	ニュートン法のプログラム	132
8.2.2	クラフチック法のプログラム	132

9. LAPACK を使いこなそう

9.1	LAPACK と BLAS について	135
9.1.1	BLAS の構成	136
9.1.2	LAPACK の構成	138
9.1.3	LAPACK を用いることによる高速な演算の実現	139
9.2	LAPACK のインストール	141
9.2.1	分割コンパイル	141
9.2.2	ライブラリ	143
9.2.3	LAPACK のインストール	143
9.2.4	メ イ ク	144
9.2.5	CLAPACK のコンパイル	146
9.3	LAPACK を使った数値計算	146
9.4	Octave のソースを読む	149
9.4.1	Octave のソースの構成	149
9.4.2	ディレクトリ libcruft	151

10. Calc でオブジェクト指向有理数計算

10.1	Calc の使い方	153
10.1.1	電卓的な使い方	153
10.1.2	関数の書き方	155
10.2	オブジェクト指向プログラミング	159

付	録	165
引用・参考文献		166
索	引	167

1

数値計算ツールのインストール

本章のねらい Linux と Free BSD には簡単にプログラミングでき、高速で高品質でフリーの数値計算ツールがある。本章ではそのようなソフトのなかで、フリーソフトである Octave と Scilab のインストール法を紹介する。この二つのソフトはプログラミングが簡単で、しかも、いろいろな問題を解くことができ、信頼性も高く、高速であるという非常に優れたものである。本書では、組み関数を中心として、理工学に現れるさまざまな問題に対する使い方を学ぶ。

1.1 どんな数値計算ツールがあるか

本節では、商用の非常に優れたソフトとして MATLAB(マットラボと発音)、フリーの優れたソフトとして Octave(オクターブと発音) と Scilab (サイラボと発音) を紹介する。

まず、最初に、どんな数値計算ソフトがあるか、おもなものを図 1.1 にまとめよう。

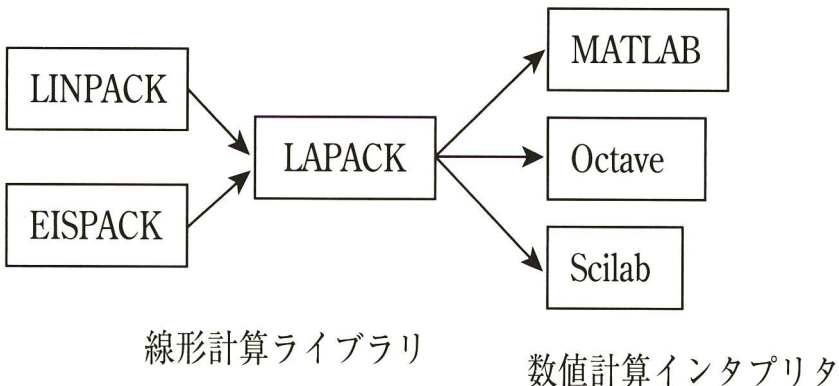


図 1.1 数値計算ツールの間の関係

これらの数値計算ツールのルーツになるプログラムはドイツの著名な数値計算の研究者である Wilkinson が開発した。それをもとに線形計算用の FORTRAN のプログラム集が LINPACK, EISPACK としてまとめられ、それが発展して LAPACK (レイバックと発音) となった。それをもとに、MATLAB, Octave, Scilab などの使いやすい数値計算インタプリタ言語が作られた。

これ以外では LAPACK, LINPACK などのライブラリを利用するものとして Yorick, MATX が、有理数演算のできるソフトとして Calc, Genius が数値計算用ライブラリ (FORTRAN や C 言語のオブジェクトコード) として MINPACK, ODEPACK, GMP などがある。

1.1.1 MATLAB

MATLAB は非常に高品質の商用数値計算言語である。多くのフリーの数値計算言語が MATLAB を意識して作られているので、最初に、MATLAB について紹介する。まず、MATLAB の特徴を図 1.2 にまとめてみよう。

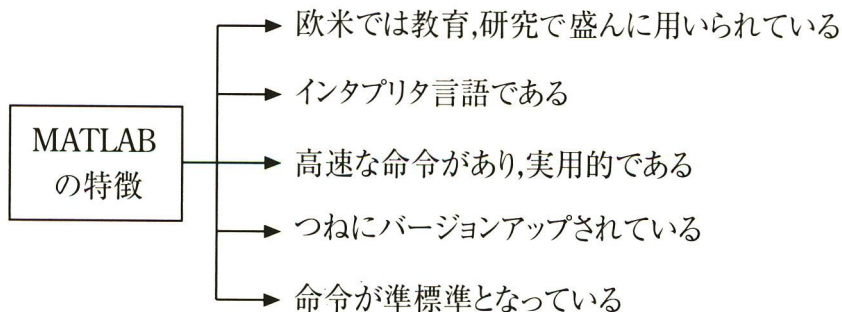


図 1.2 MATLAB の特徴

以下、少し詳しく MATLAB の特徴を見てみよう。

〔1〕 欧米で非常によく用いられる MATLAB 高い品質で容易にプログラミングできる数値計算言語として、欧米では MATLAB が大学教育、専門研究両面でよく用いられている。理工系の学生や研究者が C 言語や FORTRAN

でプログラミングを書くのは時間もかかる上に、信頼性、速度面で実際的でない場面が多いのに対して、MATLAB では簡単にある程度高速なプログラムを書けるからである。日本でも MATLAB のような数値計算ツールの利用が進んでほしいというのが本書の執筆の動機の一つである。

〔2〕 **MATLAB はインタプリタ言語で、プログラミングが簡単である**
インタプリタとはコンパイラに対比される用語で、そのプログラム言語の命令を書き込むと、すぐに、機械語に解釈されて、実行されるような言語のことをいう。これに対して、コンパイラは、プログラムをいったん完全に読み込んで、文法解析などを行って、機械語に翻訳するものである。インタプリタはプログラミングがインタラクティブで容易であるが、実行速度が遅いのに対して、コンパイラはプログラミングはインタラクティブにできないが、実行速度が速いなどの特徴がある。

〔3〕 **MATLAB は高速な組み込み関数を持つ** MATLAB には高速に数値計算を実行する命令が組み込まれている。したがって、MATLAB をうまく用いると、インタプリタであることからプログラミングが容易である上に、高速な組み込み関数を利用して、高速な数値計算も可能であるというよい面ばかりを出せるという特色がある。

〔4〕 **MATLAB には UNIX 版と Windows 版がある**

〔5〕 **MATLAB の命令は標準である** 欧米では MATLAB は使いやすいさと安定性、高速性で定評があり、そのコマンド(命令)はこの種のソフトウェアの標準となっている。

〔6〕 **つねにバージョンアップされている**

ベンチャーを起こし、MATLAB を作った学者 MATLAB は MathWorks 社が開発しているが、この会社を作ったのは高名な数値計算の学者である Moler という人である。彼は数値解析の神様といわれた Wilkinson のお弟子さんである。

1.1.2 Octave と Scilab

MATLAB と同様に使いやすく、安定で、高速な数値計算を行うという目標をもった、オープンソース (フリー) の数値計算用インタプリタ言語として勧められるのが Octave と Scilab である。

〔1〕 **Octave と Scilab の特徴** まず、Octave と Scilab の特徴を図 1.3 にまとめてみよう。



図 1.3 Octave と Scilab の特徴

すなわち、Octave と Scilab は完全にではないが、MATLAB 互換の命令体系を備え、ある程度共通にプログラミングできる。特に、基本的な線形計算用の命令はかなり共通した仕様となっている。また、両者は、MATLAB がそうであるように、数値計算の知恵が凝縮しているともいえる LAPACK などの数値計算ライブラリをもとにして作られている。Octave も Scilab も非常によくできており、両者によって非常に広い範囲の数値計算の要求に答えることができる。

〔2〕 **Octave は誰がどんな目的で作ったか** Octave は John W. Eaton (University of Wisconsin-Madison, Department of Chemical Engineering) 氏が開発した数値計算言語である。

Eaton 氏によれば、Octave は化学の勉強をする学生向けに開発された数値計算言語である。彼は化学の学生に FORTRAN を用いて化学計算をさせると、FORTRAN の学習に非常に時間が取られる上に、役に立つプログラムが書けないことが多いが、Octave を利用させると数時間でその使い方をマスターして化学シミュレーションに活用できるようになると述べている。このように最初

は化学の学生向けに開発された Octave であるが、数学科の微分方程式や線形代数の講義にも利用されるようになり、その応用範囲が広がって現在に至っているとのことである。

本書での以下の説明を読めばわかるように、Octave はマスターするのが本当に容易で、かつ研究のための数値シミュレーションにも耐える言語となっている。

〔3〕 **Scilab は誰がどんな目的で作ったか** Scilab はフランスの INRIA という研究所が開発した数値計算言語で、システム制御と信号処理への応用を含む広い範囲の数値計算用の言語となることを目的として作られている。

したがって、Scilab には制御用のデータ型として多項式や有理関数(多項式の比で表される関数)がある。

Scilab の目標としてはつぎのような事項が挙げられている。

1. 自然で使いやすい文法とデータ型を持つこと。
2. よく現れる数値計算の問題を解くための関数を標準で装備しておく。
3. 標準の関数では解けない問題を解くために、新しい関数を導入できるようにプログラミング環境を整えておく。また、C 言語や FORTRAN の関数から新しい関数を定義できるようにする。

MATLAB と Octave と Scilab はどれくらい似ているか この

三つのソフトは標準の組込み関数が非常によく似ている。線形代数の問題を解くための関数群などはほとんど同じである。では違いはどこか。MATLAB は商用だけあってグラフィックスがとてもよく整備されていて、また、きれいである。Octave は gnuplot を利用している。Scilab のグラフィックスもよく整備されている。大きな違いは、MATLAB と Scilab がオブジェクト指向プログラミングが容易である反面、Octave はまだそこまで整備されていないことである。

索引

あ	
アセンブラ	94
アルキメデス	49
い	
引数のみの関数	80
インストール	6
インタプリタ	3
う	
上向きの丸め	92
え	
エルミート行列	40
演算子多重定義	17
円周率	48, 71
お	
オブジェクト指向	153
オブジェクト指向プログラミング	17
オブジェクトファイル	142
か	
回転変換	39
解の表示桁数	15
簡易ニュートン法	59
関数	79
——のオンライン定義 (Octave)	83
——の書き方	155
——のファイルへの保存	83
——の戻り値	82
——の戻り値が複数ある場合	82
関数 (Octave)	80

き	
ギブズ変換	39
逆行列の計算	20
逆行列を求めるコマンド	20
キャッシュ	139
鏡映変換	39
行列	12
——の演算	16
——の逆行列を求める関数	158
——の共役	18
——の固有値問題	32
——の乗算	18
——の入力	13
——のノルム	101
——のべき乗	18
行列式	26
行列ノルムの計算	103
虚数単位	71
切り捨て	92
く	
偶数丸め方式	92
区間演算	114
区間演算の実装	114
区間演算を組み込んだ BLAS	134
区間オブジェクト	116, 159
区間解析	114
区間型 tlist	116
区間型制約条件	54
クラフチック法のプログラム	132
け	
計算の手間	21
計算複雑度	21

計算ルーチン	138
ケプラー方程式	59
こ	
固有多項式	38
固有値	
——の精度保証	111
——の求め方のまとめ	42
——を求める命令 (MATLAB, Octave の場合)	32
——を求める命令 (Scilab の場合)	34
固有方程式	33, 38
コンパイラ	3
さ	
最近点への丸め	92
最大値ノルム	100, 102
最適化された BLAS	140
最適化問題	52
さまざまな行列	26
し	
シュルの命令	16
2乗ノルム	100
自然対数の底	71
下向きの丸め	92
実行列に対する固有値問題	32
実行可能ファイル	16
実数型	68
実部と虚部	36
自動微分型	127
自動微分型 tlist	126
周期関数の積分	47
シュール分解	40
——の計算の命令	40

シンボルテーブル 69, 83

す

数値計算インタプリタ 1

数値計算の精度保証 89

数値積分 44, 45

数値積分ライブラリ 44

スカラー

——と行列の演算 18

——のべき乗 18

スクリプト 16

スクリプトファイル 85

せ

正規分布するランダム行列

28

制御構造 73

制御構造 (Octave) 74

制御構造 (Scilab) 77

精度保証の原理 103

線形計画法 52

線形計画問題の解法 52, 53

線形計算ライブラリ 1

線形拘束条件を持つ 2 次計画
問題 55線形方程式の数値解の精度保
証 106

そ

相似変換 38, 39

ソースコードからのインスト
ール 7, 8

た

台形公式 47

ダイナミックリンク関数 86

タイプドリスト型 71

タイムスタンプ 84

楕円体法 53

多項式補間 49

単位行列 26

単体法 53

ち

超越方程式 59

て

テイラー展開 45

データ型 68

と

ドライバルーチン 138, 146

な

内点法 53

に

2 次計画問題を解くためのコ
マンド 56

2 乗ノルム 102

2 進倍精度浮動小数点数の標
準 91

ニュートン 45

ニュートン法 59

——のプログラム 132

任意の tlist を成分として持
てる行列型 tlist 123

の

ノルム 100

——の計算 101

は

倍精度浮動少数点数 15

——の仮数部 15

配列演算 19

ハウスホルダー変換 39

パッケージ 8

ひ

比較関係 72

非線形方程式 114

——の解法 58

——の解法のまとめ 62

一つの戻り値と引数のある関
数 82

微分方程式 64

ピボット付き LU 分解を求め
るコマンド 23

ふ

ファンデルポール方程式 65

複数の戻り値と引数のある関
数 82

複素行列

——に対する固有値問題

34

——の固有値 36

複素数 34, 35, 155

——の書き方 36

浮動小数点数 91

浮動小数点数演算 93

プリンキピア 59

プログラミング 67

——のまとめ 88

フローベニウスノルム 102

分割コンパイル 141

文書清書ソフト 11

へ

平方根 93

ベクトルのノルム 99

変数 68

変数名 68

ほ

補助ルーチン 138

ポストスクリプトファイル

11

ポーツパッケージ 7

ボトムアップ形自動微分

127

ま

マシンエプシロン 71

丸め 93

——の方向の指定 95

め		ゆ	ランダム行列 28
メイク 144		ユークリッドノルム 100	り
メソッド 116		ユニタリ行列 40	リンク 142
も		よ	れ
戻り値と引数のない関数 80	要素がすべて1の行列 27	連立一次方程式 12	——の解法 12
や	要素がすべて0の行列 27	——の解法のまとめ 30	——を解く命令 14
ヤコビ法 37	ら		
山本の定理 107	ライブラリ 143		
◇			
A	F	J	
acs 8	f2c 147	John W. Eaton 4	
B	flops 21	K	
bdiag 34	for 文 76, 79	Kahan 91	
BLAS 135	fpu_control.h 98	L	
C	FreeBSD 7	LAPACK 2, 135	——のインストール 141, 143
Calc 2, 153	fsolve 58, 61	——を使った数値計算 146	
Calc スクリプト 159	fsolve_options 61	LASER 5 Linux 6	
case 75	function 80, 85	Latex 11	
chipmunk 8	G	length 81	
CLAPACK 143	Genius 2	LEVEL 1 BLAS 136, 137	
——のコンパイル 146	getf 87, 110	LEVEL 2 BLAS 136, 137	
clear 69	getf コマンド 87	LEVEL 3 BLAS 136, 138	
clear 命令 70	GMP 2	LINPACK 2	
C 言語による丸めの指定 95	gnuplot 5, 65	linpro 52	
D	gplot 10	Linux 6	
Debian Linux 7	gsplot 10	LOADPATH 83	
deb 形式 7	gunplot 11	LR 分解 23	
deff 87	I	LR 法 23, 39	
dgesv_ 147	IEEE 91	lside 64	
down 103	IEEE 754 68, 91	Lutishauser 23	
dsyev_ 148	if 文 74, 76	LU 分解 22, 25	——による連立一次方程式
E	ignore_function_time_ stamp 84	の解法 24	
eig 32	INRIA 5, 8	LU 分解法 22	
EISPACK 2	integrate 48		
eps ファイル 11, 66			

		plot	10, 11, 65		
		ports パッケージ	7		
		p 乗ノルム	100, 102		
				Q	
		quad	44		
		Quadpack	44		
		quapro	55		
				R	
		rand	14		
		randn	28		
		RPM パッケージ	6		
				S	
		ScaLAPACK	135		
		schur	41		
		Scilab	1, 4		
		—での定積分の数値計算			
		法	48		
		—における関数の定義			
			87		
		—における丸めの方向の			
		指定	97		
		—による精度保証方式			
			109		
		—のインストール	8		
		—のインストールのま			
		とめ	9		
		—の関数の一般形	87		
		—の起動	9		
		—のグラフィックス	11		
		—の終了	9		
		—の特徴	71		
		—のホームページ	8		
		Scilab 上に区間オブジェクト			
		を実装する	116		
		select 文	77		
		Sparc Station	94		
		spec	34		
		splot	10		
		switch 文	75		
				T	
		tic	29		
		timer()	29		
		tlist	116		
		toc	29		
		Turbo Linux	6		
				U	
		up	104		
				V	
		Vine Linux	6		
		Vine Plus	6		
				W	
		while 文	75, 78		
		who	69		
		who -all	70		
		who -builtins	70		
		who -functions	70		
		who -long	70		
		whos	69		
		whos 命令	70		
		who -variables	70		
		who 命令	70		
		Wilkinson	2, 135		
				Y	
		Yorick	2		
		%e	71		
		%eps	71		
		%f	71		
		%i	71		
		%inf	71		
		%non	71		
		%pi	48, 71		
		%t	71		
M					
mat	157				
MATHWORKS	3				
MATLAB	1, 2				
—での定積分の数値計算					
法	50				
MATX	2				
mat 型	123				
max	110				
MINPACK	2, 58				
mkoctfile	96				
Moler	3				
m ファイル	84				
				N	
netlib	143				
netlib ミラーサイト	143				
				O	
Octave	1, 4				
—での定積分の数値計算					
法	44				
—における丸めの方向の					
指定	95				
—による精度保証方式					
	107				
—のインストール	6				
—のインストール法のま					
とめ	7				
—のオンラインマニュアル					
	7				
—の起動	7				
—のグラフィックス	10				
—の終了	7				
—のソースの構成	149				
Octave スクリプト					
	16, 60, 63, 65, 112				
ode	66				
ODEPACK	2, 66				
				P	
perror	61				

— 著者略歴 —

- 1976年 早稲田大学理工学部電子通信学科卒業
1981年 早稲田大学大学院博士後期課程修了（電子通信学専攻）
工学博士（早稲田大学）
1984年 早稲田大学助教授
1989年 早稲田大学教授
現在に至る

Linux 数値計算ツール

Tools for Numerical Computation on Linux

© Shin'ichi Oishi 2000

2000年10月20日 初版第1刷発行

2005年3月10日 初版第4刷発行

検印省略

著者 おお いし しん いち
大 石 進 一
発行者 株式会社 コロナ社
代表者 牛来辰巳
印刷所 壮光舎印刷株式会社

112-0011 東京都文京区千石 4-46-10

発行所 株式会社 コロナ社

CORONA PUBLISHING CO., LTD.

Tokyo Japan

振替 00140-8-14844・電話(03)3941-3131(代)

ホームページ <http://www.coronasha.co.jp>

ISBN 4-339-02378-7

(大井) (製本：グリーン)

Printed in Japan



無断複写・転載を禁ずる

落丁・乱丁本はお取替えいたします