



HOKKAIDO UNIVERSITY

Title	データ解析環境Rにおける多変量GARCHモデルの取り扱いについて : ccgarchパッケージの利用
Author(s)	中谷, 朋昭
Citation	北海道大学農経論叢, 65, 61-68
Issue Date	2010-03-31
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/42903
Type	departmental bulletin paper
File Information	RAE65_007.pdf



データ解析環境Rにおける多変量GARCHモデルの 取り扱いについて

—ccgarchパッケージの利用—

中 谷 朋 昭

Handling Multivariate GARCH Models in the Statistical Environment R through the ccgarch Package

Tomoaki NAKATANI

Summary

This short note provides descriptions about basic usage of the add-on package ccgarch for the free statistical environment R. The package is intended for handling multivariate GARCH models in R. The target audiences of this note are the R users in Japan.

1. はじめに

本稿の目的は、オープンソースのデータ解析環境 R (R Development Core Team [15]) 用に開発されたアドオンパッケージ ccgarch (Nakatani [10]) の利用法を解説し、日本のユーザー向けのマニュアルを提供することである。ccgarch パッケージは、Engle [3] が開発した動的条件付相関係数型 (DCC-) GARCH モデルをはじめとする多変量 GARCH モデルの推定とシミュレーションなどをおこなう関数群を備えている。

多変量 GARCH モデルは、金融オプションの原資産の価格変動性 (ボラティリティ) を推定するために用いられるなど、金融時系列分析の分野において頻繁に利用されるモデルである。最近では、中谷 [11] などによって農業経済学の領域でもその応用可能性が模索されている。このような応用範囲を拡大するためには、誰もが手軽に利用できるソフトウェアの存在が必須である。データ解析環境 R と本稿で紹介する ccgarch パッケージは、インターネット上で公開されている無料で入手できるソフトウェアである。

本稿では、ccgarch パッケージが取り扱うことのできる多変量 GARCH モデルの中でも、近年特に注目の集まる DCC-GARCH モデルに焦点を当て、株価時系列データのモデリングを例に、関数の利

用法や推定結果の図示の方法などを解説する。さらに、シミュレーション用の関数や、時系列データの基本的な分析をおこなう関数群の紹介をおこなう。

本稿の構成は以下の通りである。2. ではアドオンパッケージのインストール方法を説明する。3. では ccgarch パッケージによる DCC-GARCH モデルの推定方法と結果の処理方法などについて触れる。4. では ccgarch パッケージに付属するその他の関数群について触れ、5. をまとめとする。なお本稿では、多変量 GARCH モデルの構成やパッケージのインストール方法以外の R の利用に関する基本的な情報は取り上げないので、詳細は Teräsvirta [18] や Silvennoinen and Teräsvirta [17] などの GARCH モデルについてのサーベイ論文や、R に関する情報をまとめたホームページ (註 1) を参照されたい。

以下の記述では、パソコン本体に R がインストールされ、利用可能な状態であることを前提とする。利用する R のバージョンは 2.10.0、オペレーティングシステムは Microsoft 社 Windows XP を想定する。また

> (R のコマンド)

は起動中の R (コンソール画面) におけるコマンドの入力待ち状態 (プロンプト) を表す。コマン

ド中の記号<-は、記号左辺の変数に右辺の内容を代入する操作である。また、#以降の記述は、プログラムのコメントである。なお、Rではコマンドの大文字と小文字を区別して取り扱うので、入力の際には注意が必要である。

2. アドオンパッケージのインストールと読み込み

1) アドオンパッケージのインストール

R本体がインストールされれば、アドオンパッケージのインストールはRの画面上からおこなうことができる。その手順を示せば以下の通りである。

- ① Rを起動する
- ② メニューバーから「パッケージ」→「パッケージのインストール」を選択
- ③ 接続先を選択する（通常は日本国内のサイトを選択）
- ④ 接続先を選択すると、パッケージの一覧が表示されるので、インストールしたいものを選択する（このとき、キーボードのCtrlボタンを押しながらマウスを左クリックすれば、複数のパッケージを選択できる）
- ⑤ 選択後、リスト下にあるOKボタンを押す
- ⑥ 指定したパッケージがダウンロードされ、自動的にインストールされる
- ⑦ Rコンソール上にインストール成功の可否が表示される。

パッケージがインストールされると、その内容や関数の使い方を記したヘルプファイルも併せてインストールされる。Rのメニューバーから「ヘルプ」→「Htmlヘルプ」を選択することで、R本体と追加されたアドオンパッケージに関する説明文書をブラウザによって読むことができる。また、<http://cran.r-project.org/package=パッケージ名>によって表示されるウェブページからは、パッケージ内の関数のヘルプを一括したレファレンスマニュアルがPDFファイルでダウンロードできる。このページでは、パッケージに関する追加的な説明文書やソースコードなども入手できる。

アドオンパッケージは頻繁に更新される。インストール済みのパッケージをアップデートするには、上記の手順②の最後で「パッケージの更新」を選び、表示される指示に従えば自動的に更新さ

れる。

2) アドオンパッケージの読み込み

Rのアドオンパッケージは、library関数を用いて必要なときに読み込んで（ロードして）利用する。Rコンソール上で

```
>library (パッケージ名)
```

と入力することにより、「パッケージ名」で指定されたパッケージがロードされ、利用可能になる。一度読み込まれたパッケージは、

```
>detach(package:パッケージ名)
```

によって読み込みを解除しない限り、Rを終了するまで保持される。通常、作業の途中でパッケージの読み込みを解除する必要はない。また、いったん終了した後にRを起動した際には、パッケージを再度ロードしなければならない。

ccgarchパッケージをロードするには

```
>library(ccgarch)
```

とする。パッケージがロードされると、パッケージ内で定義された各種の関数を利用することができる。ccgarchでは表1に示した33個の関数が定義されている（註2）。これらの関数の説明は、Rコンソール上で

```
>?関数名
```

とすれば表示される。

表1 ccgarchパッケージ内で定義された関数の一覧

analytical.grad	dlv.est	p.mat
analytical.Hessian	eccc.estimation	rob.kr
d2lv	eccc.sim	rob.sk
dcc.est	fourth	stationarity
dcc.estimation	grad.dcc2	stcc.sim
dcc.estimation1	jb.test	tr.func
dcc.estimation2	ljung.box.test	uni.vola
dcc.results	loglik.dcc	uni.vola.sim
dcc.sim	loglik.dcc1	vdR
dlc	loglik.dcc2	vec.garch.derivative
dlv	loglik.eccc	vector.garch

3. ccgarchパッケージによるDCC-GARCHモデルの推定

1) パッケージとデータの読み込み

それでは、ccgarchを用いて実際にDCC-GARCHモデルを推定してみよう。まず、R起動後に利用するパッケージ群を以下のコマンドでロードする。

```
>library(ccgarch)      # ccgarchのロード
>library(vars)         # varsのロード
```

```
>library(zoo)           # zooのロード
>setwd("c:/ccgarch_demo")
```

作業ディレクトリを指定
ccgarchのほかに、ここではvars (Pfaff [14]) と zoo (Zeileis and Grothendieck [19]) という二つのパッケージを利用する。varsパッケージは、ベクトル自己回帰 (VAR) モデルを推定する関数である。zooパッケージは、日付情報を持ったデータの取り扱いに秀でている。最終行のコマンドは、今立ち上げているセッションの作業ディレクトリを指定するコマンドである。作業ディレクトリは、読み込ませるデータを置いたり、グラフなどの出力結果を保存したりする際に利用される。作業ディレクトリに指定された場所を基準として、相対パスによって他のディレクトリにアクセスすることができるほか、絶対パスによってもディレクトリの指定ができる。

次に、分析するデータの形式について触れておく。今回例示するのは、テキストデータで保存され、データが半角のコンマで区切られたcsvファイルである。csvファイルはテキストデータなので、Windows XP 付属のメモ帳などのテキストエディタで扱えるほか、主要な表計算ソフトによっても読み込みと書き出しができる。csvファイルの利点は、テキストファイルであるために、表計算ソフトのファイル形式と比較して、大規模なデータセットでもファイルサイズが小さくなることや、機種・OSへの依存度が低く、汎用性のあることがあげられる。

データがカンマで区切られたcsvファイルの他にも、空白やタブで区切られたテキストファイル (ファイルの拡張子はtxt, datなど、任意のものを指定できる) や、アドオンパッケージを使えば、表計算ソフトで作成されたファイル形式でもデータを読み込むことができる。データの読み込みと書き出しに関する詳細は、例えば青木[1]を参照のこと。

本稿で取り扱うデータは、東京証券取引所で取引されている大手電機メーカー3社 (日本電気 (NEC), 日立, 東芝) の株価である (1983年1月4日から2006年3月1日までの5913日分)。データファイルの形式は、1行目に変数名、1列目にyyyy/mm/dd形式で記された日付データ、2列

目以降に株価を記したcsvファイルで、作業フォルダccgarch_demoにjp_data.csvという名前で保存した。分析に先立って、このデータファイルをzooパッケージを利用してロードする。そのコマンドは

```
>kabuka <- read.zoo("jp_data.csv",
                    format="%Y/%m/%d", header=TRUE)
```

である。ここで用いたread.zoo関数は、内部でR本体に付属するread.table関数を利用して、csvファイルなどのテキストファイルからデータを読み込む。最初の引数"jp_data.csv"は読み込むファイル名、二番目のformat="%Y/%m/%d"はデータファイルに記録された日付の形式、三番目のheader=TRUEは、データファイルの1行目に変数名が記述してあるかどうかを設定する。read.zoo関数で読み込まれたデータは、日付情報と共に記録されたzooオブジェクトとして取り扱われる。zooオブジェクトとなったデータでは、日付指定によるサブデータの取り出しや、時系列のプロットが容易となる。

2) データの変換と条件付平均式の同定

次に、読み込んだ株価データを連続複利の収益率に変換し、そのサンプル数やモデルの次元などを以下のコマンドによって設定する。

```
>returns <- 100*diff(log(kabuka))
                                # 連続複利収益率
>nobs <- nrow(returns)          # サンプル数 5912
>ndim <- ncol(returns)          # データの次元 3
次に、連続複利収益率にベクトル自己回帰 (VAR)
モデルをあてはめて条件付平均式を同定し、その
残差epsを求める。
>select.lag <- VARselect(returns, type
                        ="const", lag.max=20)
>nlag <- select.lag$selection[1]
                                # AICによるラグ選択
>var.model <- VAR(returns, p=nlag)
                                # nlag=4となる
>eps <- residuals(var.model)
                                # VAR(4)の残差
>d.index <- index(returns)      # 日付処理
>eps <- zoo(eps, d.index[(nlag+1):nobs])
                                # zooオブジェクトに変換
```

上記コマンドの中で、**VARselect**関数は、**VAR(p)**モデルの次数 p を決定する**var**パッケージの関数で、1次から**lag.max**で指定した次数までの**VAR**モデルを求め、それぞれの次数に対応した情報量基準を算出する。赤池の情報量基準(**AIC**)によって選択されたラグ数は**nlag=4**であった。3行目では**VAR(4)**モデルを指定して、4行目で**VAR(4)**モデルの残差を変数**eps**として保存した。5行目は連続複利収益率に付された日付を取り出し、6行目のコマンドで**eps**を**zoo**オブジェクトに変換する際に、**eps**の日付として利用した。なお、**index**関数は**zoo**パッケージ内で定義された関数である。

3) DCC-GARCHモデルの推定

次に**VAR**モデルの残差に対して**DCC-GARCH**モデルをあてはめる。**DCC-GARCH**モデルを推定するコマンドは、**ccgarch**パッケージの**dcc.estimation**関数であるが、この関数を利用するためには、尤度関数最大化のために利用されるパラメータの初期値を設定しなければならない。必要とされるのは以下の4つのベクトル・行列である。最初の3つ(**a**, **A**および**B**)は、条件付分散式のパラメータであり、最後の1つ(**dcc.para**)は条件付相関係数式における2つのパラメータをベクトルにまとめたものである。

```
>a<- c(0.003, 0.005, 0.001)
>A<- diag(c(0.2, 0.3, 0.15))
>B<- diag(c(0.75, 0.6, 0.8))
>dcc.para<- c(0.1, 0.8)
```

上のコマンド例では、変数**A**と**B**は**diag**関数によって対角行列に指定されている。これは、あてはめる**DCC-GARCH**モデルが**Engle [3]**のオリジナル形式であることによる。条件付分散の因果性を導入した拡張型**DCC-GARCH**モデル (**Jeantheau [5]**, **Nakatani and Teräsvirta [12]**, **[13]**)を推定する際には、**A**と**B**は**matrix**関数によって非対角行列として指定する必要がある。

以上の準備が揃えば、**DCC-GARCH(1,1)**モデルの推定は、

```
>dcc.results <- dcc.estimation
  (inia=a, iniA=A, iniB=B, ini.dcc=dcc.para,
   dvar=eps, model="diagonal")
```

によって実行される。推定結果は、後に説明する

リスト変数として**dcc.results**という名前の変数に一括して保存される。

DCC-GARCHモデルのパラメータ推定では、第1段階目として条件付分散式のパラメータについての尤度関数最大化がなされ、得られた推定値を所与として、第2段階目で条件付相関係数式のパラメータに関する尤度関数の最大化が行われる。

dcc.estimation関数は、この2段階推定を内部で処理しているため、コンソール画面上では特に何も表示されることはない。また、**dcc.estimation**関数には、第1段階において尤度関数を最大化する際のアルゴリズムを指定する引数**method**と、第2段階における最大化の際のアルゴリズムを指定する引数**gradient**が備えられている。これらの引数には一般的に用いられるアルゴリズムがデフォルトで指定されているので、特に変更する必要はない。

4) 推定結果の処理

推定が滞りなく終了すると、図1に示したメッセージが現れる。なおこのメッセージは、**dcc.estimation**関数の引数で**message=0**と指定すれば、表示されなくなる。**DCC-GARCH**モデルの推定結果は、図1のメッセージにあるように、**out**から**second**まで7つある。これらは前述のように、**dcc.results**という名前の変数に一括して保存されている。リスト変数は、それぞれの名前の前に**dcc.results\$**というコマンドを付加することで取り出すことができ、通常の変数と同様に扱うことができる。リスト変数の中身は、以下の通りである。

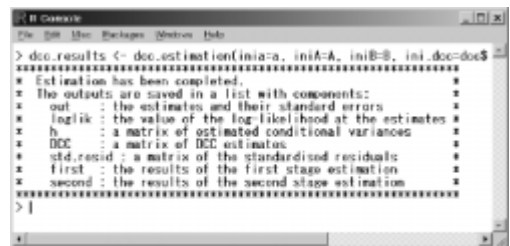


図1 DCC-GARCHモデル推定完了を知らせるメッセージ

out: パラメータ推定値とその標準誤差
loglik: パラメータ推定値で評価した対数尤度関数の値
h: 推定された条件付分散

DCC：推定された動的条件付相関係数

std.resid：変数 (**eps**) を条件付標準誤差 (**h** の平方根) で除した標準化残差

first：第1段階目 (条件付分散式に関する対数尤度関数の最適化) の結果

second：第1段階目 (条件付相関係数に関する対数尤度関数の最適化) の結果

例えば、パラメータ推定値とその標準誤差は、下のコマンドによってコンソール上に出力できる。

```
> dcc.results$out
      a1  a2  a3  A11  A22  A33  B11  B22  B33
estimates 0.073 0.076 0.031 0.076 0.097 0.058 0.911 0.890 0.936
std.err    0.016 0.008 0.008 0.015 0.011 0.011 0.009 0.007 0.008

      dcc alpha  dcc beta
estimates 0.024   0.961
std.err    0.002   0.005
```

これらの結果は、コピー・ペーストで他のソフトで利用したり、Rからテキスト形式でファイルに保存することができる。

また、推定された条件付分散 **dcc.results\$h** や動的相関係数 **dcc.results\$DCC** を図示することも可能である。ただし、**dcc.results\$DCC** は、行ごとに **t** 期の条件付相関係数行列をベクトル化した値として保存されているので、全体として (サンプル数) × (次元の2乗) の行列になっている。そのため、プロットする際には対角成分や重複した列を除外する必要がある。例えば、**ndim** 次元の **DCC-GARCH** モデルにおいて、**dcc.results\$DCC** からユニークな列を抜き出すには、

```
> Id <- diag(ndim) # 単位行列
# 単位行列を設定し、以下のように lower.tri 関数によって正方向行列の対角成分を含まない下三角行列の位置を指定すればよい。
```

```
> DCC <- zoo(dcc.results$DCC
[ , lower.tri(Id)], d.index[(nlag+1):nobs])
```

上のコマンドでは、条件付相関係数行列のユニークな列を取り出すと同時に、日付情報を付加した **zoo** オブジェクトに変換している。さらに、**colnames** 関数によって列名を付加し、

```
> colnames(DCC) <- c("NEC-東芝",
"NEC-日立","東芝-日立")
> plot(DCC, main="動的条件付相関係数の
推定結果", xlab="")
```

とすれば、図2のような時系列データのプロット図を作成することができる。**DCC** は **zoo** オブジェクトとして保存されたため、自動的に年が横軸に指定される。

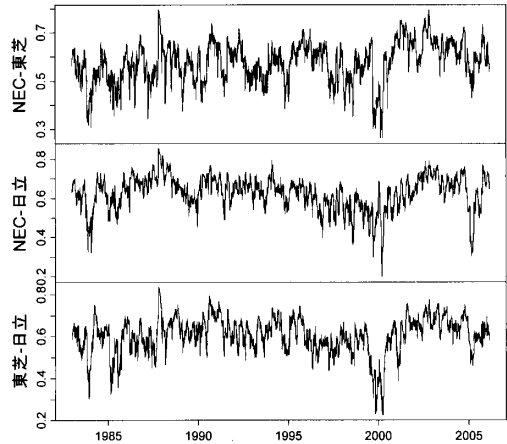


図2 **ccgarch**によって推定された動的条件付相関係数のプロット

4. その他の関数群

ccgarchには、多変量GARCHモデルを推定するだけでなく、攪乱項が多変量GARCH過程に従うデータを生成したり、時系列分析や多変量GARCHモデルの推定で利用されるいくつかの便利な関数も実装されている。以下では、シミュレーション用と基本統計量を求める関数について説明する。

1) シミュレーション用の関数群

時系列分析において新たなモデルや統計的検定手法を開発したとき、それらの理論上のパフォーマンスを測定する場合がしばしば存在する。このような用途のために、**ccgarch** パッケージでは、攪乱項の条件付分散が多変量GARCH過程に従う時系列データを生成する関数を備えている。例えば、攪乱項の条件付分散が **DCC-GARCH(1,1)** 過程に従う時系列データを生成するには、**dcc.sim** 関数によって

```
> dcc.sim(nobs, a, A, B, R, dcc.para,
d.f=Inf, cut=1000, model)
```

とする。生成する時系列データの次元は、引数であるベクトルオブジェクト **a** の長さによって関数内部で決定される。**dcc.estimation** 関数で触れた

ものの以外の引数は、順に以下の通りである。

nobs: 生成する時系列データの個数

R: 標準化残差 **z** の分散共分散行列で、対角要素は 1 に指定しなければならない

d.f: **z** が **t** 分布に従う場合の自由度。デフォルトでは無限大(**Inf**)、すなわち標準正規分布となる

cut: 乱数発生に際して初期値の影響を取り除くために除去されるデータの個数。デフォルトでは **1000** である

dcc.sim 関数のアウトプットは、以下の変数を含むリスト変数になっている。

z: 生成された多変量標準正規分布に従う時系列データ

std.z: **z** から変換された標準化残差

dcc: 動的相関係数

h: 生成された条件付分散

eps: DCC-GARCH(1,1)過程に従う時系列データ

上記の各変数は、dcc.estimation関数の場合と同様に取り出すことができる。

DCC-GARCH過程のほかにも、Bollerslev [2] の CCC-GARCH 過程あるいは Silvennoinen and Teräsvirta [16] の STCC-GARCH 過程に従うデータを生成する eccc.sim 関数および stcc.sim 関数も存在する。基本的な利用法は dcc.sim 関数と同様なので、詳細はパッケージ付属のヘルプファイルを参照されたい。

2) 自己相関と正規性の検定に関する関数

ljung.box.test関数は、Ljung and Box [7] による時系列データの自己相関の有無を検定 (LB検定) する関数である。利用法は、

```
>ljung.box.test(x)
```

であり、ラグ数 5 から 50 まで、5 期刻みで 10 個の検定統計量と **p**-値を一括して計算し、出力する。指定する変数 **x** はベクトルオブジェクトでなければならない。ベクトル以外の変数が指定された場合、“Error: The argument must be a vector.” というエラーメッセージが表示される。なお、R 本体に組み込まれた Box.test 関数で LB 検定をおこなうことができるが、Box.test 関数は検定したいラグ数一つずつ指定しなければならない。そのため、

Box.test関数によって複数のラグ数についての検定結果を一括して求める場合には、forループを利用するプログラミングが必要である。この手間を省くために、ljung.box.test関数を用意した。

また、jb.test関数は、Lomnicki [8]、Jarque and Bera [4] の正規性検定 (LJB検定) を実施し、検定統計量とその **p**-値を返す。利用法は、コンソール画面で

```
>jb.test(x)
```

と入力すればよい。引数 **x** は、ベクトルまたは行列のいずれでもよい。

前節で推定した DCC-GARCH モデルの標準化残差に対して LJB 検定を施した利用例と出力結果は次の通りである (出力結果は小数点第 2 位で四捨五入している)。

```
>jb.test(dcc.results$std.resid)
```

	series 1	series 2	series 3
test stat	797.4	474.7	534.8
p-value	0.0	0.0	0.0

3) 歪度統計量と尖度統計量

GARCH モデルを利用した分析では、分析対象となるデータの記述統計量を提示する際に、データの平均と分散とともに、3 次と 4 次のモーメントである歪度と尖度を記すのが通例である。R では歪度と尖度を計算する関数が用意されていないので、ccgarch パッケージでは rob.sk と rob.kr という二つの関数を実装した。

rob.sk 関数は、データの歪度統計量を二通りの方法で算出する。一つは通常の歪度統計量であり、もう一つは、Kim and White [6] が提唱した外れ値の存在に頑健な歪度統計量である。rob.kr 関数においても、通常の尖度統計量と外れ値に頑健なものの二つを計算する。なお、rob.kr 関数で計算される尖度統計量は、データが標準正規分布に従うときにゼロになるように調整されている。

DCC-GARCH モデルの標準化残差に対して尖度統計量を算出するには、

```
>rob.kr(dcc.results$std.resid)
```

	series 1	series 2	series 3
standard	1.71	1.27	1.36
robust	0.07	0.15	0.06

とすればよい。いずれの関数においても、指定す

る変数はベクトルまたは行列のどちらでもよい。

5. おわりに

本稿は、データ解析環境Rにおける多変量GARCHモデルの取り扱いについて、アドオンパッケージccgarchの利用法を中心に解説した。多変量GARCHモデルは、金融時系列分析の分野においてしばしば利用されるモデルであるが、最近では農業経済学の領域でもその応用可能性が模索されている。

本稿では、ccgarchパッケージが取り扱うことのできる多変量GARCHモデルの中でも、頻繁に利用されるDCC-GARCHモデルに焦点を当て、株価時系列データのモデリングを例に、関数の利用法や推定結果の図示の方法などを解説した。さらに、シミュレーション用の関数や、時系列データの基本的な分析をおこなう関数群の紹介をおこなった。

ccgarchパッケージは、多変量GARCHを用いたモデリングおよびシミュレーションなどに際して必要となる機能を一通り備えているが、利便性向上やバグ修正のために継続的にアップデートが施されている。したがって、本稿で記した内容以外の機能が今後も追加される可能性がある。利用に際しては最新バージョンを確認の上、追加された機能と使い方についてはccgarchのホームページ(<http://cran.r-project.org/package=ccgarch>)に掲載される情報や、パッケージ付属のヘルプファイルを参照されたい。

【付記】

本稿は、ccgarchの最近のアップデートを踏まえてNakatani [9] の内容を大幅に書き換えたものである。2009年12月5日に開催された統計数理研究所共同研究集会「データ解析環境Rの整備と利用」において本稿の内容の一部を口頭発表した際には、参加者の方々から有益なコメントを頂戴した。ここに記して謝意を表する。なお本稿は、科学研究費補助金・若手研究 (B) (課題番号：21780201) および北海道大学「公募型プロジェクト研究等支援経費 (若手研究者自立支援)」による研究成果の一部である。

註

(註1) Rに関する情報は、Rプロジェクトのホームページ<<http://www.r-project.org/>>に集約されている。このページから、Rの開発に関する情報ばかりでなく、メーリングリストやマニュアル類に関する情報を得ることができる。ただし、使用される言語は英語である。日本では、RjpWikiホームページ<<http://www.okada.jp.org/RWiki/>>が同様の役割を担っている。ここでは、Rの利用に関する詳細な説明や実践の工夫が項目ごとに整理されている。さらに、Rに関する質問と解決策が掲示されるQ&A掲示板によって、利用者間の活発なコミュニケーションの場が形成されている。このほかにもRに関する情報を記した日本語ホームページは数多く存在する。その多くがRjpWikiホームページからリンクされているので、Rの入手やインストール、基本的な利用方法についてはそれらを参照されたい。

(註2) これ以外に、grad.dcc.full関数が定義されているが、現バージョンでは使用されていないためにリストからは除外した。

参考文献

- [1] 青木繁伸『Rによる統計解析』, オーム社, 2009年.
- [2] Bollerslev, T., "Modelling the Coherence in Short-run Nominal Exchange Rates: A Multivariate Generalized ARCH Model," *Review of Economics and Statistics*, Vol. 20, 1990, pp. 498-505.
- [3] Engle, R. F., "Dynamic Conditional Correlation: A Simple Class of Multivariate Generalized Autoregressive Conditional Heteroskedasticity Models," *Journal of Business and Economic Statistics*, Vol. 20, 2002, pp. 339-350.
- [4] Jarque, C. M. and A. K. Bera, "A Test for Normality of Observations and Regression Residuals," *International Statistical Review*, Vol. 55, 1987, pp. 163-172.
- [5] Jeantheau, T., "Strong Consistency of Estimators for Multivariate ARCH Models," *Econometric Theory*, Vol. 14, 1998, 70-86.
- [6] Kim, T.-H. and H. White, "On More Robust Estimation of Skewness and Kurtosis," *Finance Research Letters*, Vol. 1, 2004, pp. 56-73.
- [7] Ljung, G. M. and G. E. P. Box, "On a Measure of Lack of Fit in Time-Series Models," *Biometrika*, Vol. 65, 1978, pp. 297-303.
- [8] Lomnicki, Z. A., "Tests for Departure from Nor

- ality in the Case of Linear Stochastic Processes,” *Metrika*, Vol. 4, 1961, pp. 37-62.
- [9] Nakatani, T., “ccgarch: An R Package for Modeling Multivariate GARCH Models with Conditional Correlations,” *the 4th World Congress of the International Association for Statistical Computing 2008 (IASC2008) Conference Proceedings*, 2008, pp. 1241-1250.
- [10] Nakatani, T., “ccgarch: Conditional Correlation GARCH Models,” *An R extension package*, 2008 (the first release), <http://cran.r-project.org/package=ccgarch>. (最終アクセス：2009年11月30日)
- [11] 中谷朋昭「食をめぐる事件と食品関連企業の株価変動」, 農林水産省農林水産政策研究所 定例研究会報告資料, 2009年, <http://www.maff.go.jp/primaff/meeting/gaiyo/teirei/2009/index.html>. (最終アクセス：2009年11月30日)
- [12] Nakatani, T. and T. Teräsvirta, “Positivity Constraints on the Conditional Variances in the Family of Conditional Correlation GARCH Models,” *Finance Research Letters*, Vol. 5, 2008, pp. 88-95.
- [13] Nakatani, T. and T. Teräsvirta, “Testing for Volatility Interactions in the Constant Conditional Correlation GARCH Model,” *Econometrics Journal*, Vol. 12, 2009, pp. 147-163.
- [14] Pfaff, B., “VAR, SVAR and SVEC Models: Implementation within R Package vars,” *Journal of Statistical Software*, Vol. 27, 2008, pp. 1-32.
- [15] R Development Core Team, *R : A Language and Environment for Statistical Computing*, R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria, 2009, URL <http://www.R-project.org>. (最終アクセス：2009年11月30日)
- [16] Silvennoinen, A. and T. Teräsvirta, “Multivariate Autoregressive Conditional Heteroskedasticity with Smooth Transitions in Conditional Correlations,” *SSE/EFI Working Paper Series in Economics and Finance No. 577*, 2005, Stockholm School of Economics.
- [17] Silvennoinen, A. and T. Teräsvirta, “Multivariate GARCH Models,” (Anderson, T. G., R. A. Davis, J.-P. Kreiss and T. Mikosch eds., *Handbook of Financial Time Series*, Springer, 2009, pp. 201-229).
- [18] Teräsvirta, T., “An Introduction to Univariate GARCH Models,” (Anderson, T. G. R. A. Davis, J.-P. Kreiss and T. Mikosch eds., *Handbook of Financial Time Series*, Springer, 2009, pp. 17-42).
- [19] Zeileis, A. and G. Grothendieck, “zoo: S3 Infrastructure for Regular and Irregular Time Series,” *Journal of Statistical Software*, Vol. 14, 2005, pp. 1-27.