

線型反復列に対する補外法

長崎総合科学大学 長田直樹 (Naoki Osada)

1. はじめに

大規模な連立一次方程式

$$Ax = b \quad (1)$$

は、適当な初期値 x^0 から出発する (SOR法などの) 反復法

$$x^{n+1} = Tx^n + c \quad n = 0, 1, 2, \dots \quad (2)$$

により計算されることが多い。ここで、 T は正方行列で c は定ベクトルである。 T の固有値は、すべて1ではないものとする、唯一の固定点

$$x^* = Tx^* + c$$

が存在 ($x^* = (I - T)^{-1}c$) する。よく知られている (例えば, [10, p. 33]) ように, T の固有値の絶対値がすべて1未満のとき, 反復(2)は x^* に収束する。(2)が発散するとき固定点 x^* は, 反極限 (anti-limit; Shanks[12]の命名) と呼ばれる。

一般に, ベクトル列 (x^n) をベクトル列 (y^n) に移す変換が,

(y^n) は (x^n) より速く固定点 x^* に収束する,

あるいは,

(x^n) は発散するが, (y^n) は固定点 x^* に収束する,

を満たすとき, 変換 $(x^n) \rightarrow (y^n)$ を補外法という。

本報告では, 以下の3条件を満たす補外法を考察する:

- ① (2)によって生成されるベクトル列 (x^n) に適用すると理論的には有限回の反復で真値を与える,
- ② 漸化式により計算でき, 逆行列や行列式の計算は不要,
- ③ ベクトル列の生成方法 (例えば, (2)の T と c) については未知でよい。

取り上げる補外法は, Wynnのベクトル ε 算法 (vector ε -algorithm, VEA), 最小多項式補外 (minimal polynomial extrapolation, MPE) と修正最小多項式補外 (modified minimal polynomial extrapolation, MMPE) である。

本報告の目的は, MPEとMMPEをH算法で実現し, 線型反復列に適用した際の有効性を, 数値例によって確かめることである。

2. ベクトル ε 算法

ベクトル ε 算法 (VEA) は1962年にWynnによって提案された算法である[18]。ベクトル列 (x^n) に対し, ベクトル ε^n_k を

$$\varepsilon_{-1}^n = 0, \quad \varepsilon_0^n = x^n \quad n = 0, 1, \dots$$

$$\varepsilon_{k+1}^n = \varepsilon_{k-1}^{n+1} + [\varepsilon_k^{n+1} - \varepsilon_k^n]^{-1} \quad n, k = 0, 1, \dots \quad (3)$$

により定義する. ここで, $z \in \mathbb{C}^d$ に対し, z の逆ベクトル z^{-1} は $z^{-1} = \bar{z} / \|z\|_2^2$ により定義される.

このとき, 次の定理が得られている.

定理 1 (McLeod[9], Graves-Morris[7])

ベクトル列 (x^n) に対し, 定数 $c_0, c_1, \dots, c_k$ ($c_0, c_k \neq 0$) が存在して,

$$\sum_{j=0}^k c_j x^{n+j} = \left(\sum_{j=0}^k c_j \right) x^* \quad n = 0, 1, 2, \dots \quad (4)$$

ならば,

$$\begin{aligned} \sum_{j=0}^k c_j \neq 0 \quad \text{のとき} \quad \varepsilon_{2k}^n &= x^*, \quad n = 0, 1, 2, \dots, \\ \sum_{j=0}^k c_j &= 0 \quad \text{のとき} \quad \varepsilon_{2k}^n &= 0, \quad n = 0, 1, 2, \dots. \end{aligned}$$

定理 2 (Smith, Ford and Sidi[16])

ベクトル列 (x^n) は, 反復 (2) によって, 生成されるものとし, T の $x^1 - x^0$ に関する最小多項式を

$$P(t) = \sum_{j=0}^k c_j t^j \quad (5)$$

とする ($P(T)(x^1 - x^0) = 0$). このとき, 任意の連続する $k+1$ 項のベクトル $x^n, \dots, x^{n+k}$ に対し,

$$\sum_{j=0}^k c_j x^{n+j} = \left(\sum_{j=0}^k c_j \right) x^* \quad (6)$$

が成立する.

定理 1, 2 より, (2) によって生成される反復列 (x^n) に VEA を適用すると (x^n) が発散する場合でも, ((3) が定義できて, しかも丸め誤差が無ければ) ε_{2k}^n が固定点 x^* の正確な値を与える. さらに, T が d 次正方行列のとき, $k \leq d$ だから, 理論的には $x^0, \dots, x^{2d}$ まで計算すると, VEA により x^* の値が求められる.

3. MPE

ベクトル列 (x^n) は, 反復

$$x^{n+1} = Tx^n + c \quad n = 0, 1, 2, \dots$$

によって, 生成されるものとし, T の $x^1 - x^0$ に関する最小多項式を (5) とすると (6) より,

$$\sum_{j=0}^k c_j \triangle x^{n+j} = 0 \quad (7)$$

が成立する.

T の $x^1 - x^0$ に関する最小多項式 $P(t)$ が未知のとき, $P(t)$ の係数 $c_0, c_1, \dots, c_k$ ($c_k = 1$) が (7) から求められると, (6) より極限あるいは反極限 x^* は

$$x^* = \left(\sum_{j=0}^k c_j x^{n+j} \right) / \sum_{j=0}^k c_j$$

と表せる.

必ずしも (2) では生成されないベクトル列 (x^n) に対し, 最小多項式補外 (MPE) は, 次のように定義される. (7) を拡張して

$$\left\| \sum_{j=0}^{k-1} c_j \Delta x^{n+j} + \Delta x^{n+k} \right\|_2 \quad (8)$$

を最小にする $c_0, c_1, \dots, c_k$ ($c_k = 1$) を求め,

$$s_{n,k} = \left(\sum_{j=0}^k c_j x^{n+j} \right) / \sum_{j=0}^k c_j \quad (9)$$

を補外値にとる. 以上の定式化は, Smith, Ford and Sidi [16] に基づく.

MPE は, Cabay and Jackson [4] が, (9) を変形した

$$s_{n,k} = \left(\sum_{j=0}^{k-1} \left(\sum_{i=j+1}^k c_i \right) \Delta x^{n+j} \right) / \sum_{j=0}^k c_j$$

の形で扱ったのが最初である. なお, MPE の命名は Skelboe [15] による.

ベクトル列 (x^n) が (2) により生成されるときは, k を最小多項式の次数とすると (7) の解が存在する (すなわち, (8) の最小値は 0 になる) ので, (9) は固定点 x^* の正確な値を与える. このとき, 理論的には $x^0, x^1, \dots, x^{k+1}$ から真値が得られる.

(8) の最小二乗解は, 正規方程式

$$\begin{cases} c_0 u_{n,n} + \dots + c_{k-1} u_{n,n+k-1} = -u_{n,n+k} \\ \dots \dots \dots \end{cases} \quad (10)$$

$$c_0 u_{n+k-1,n} + \dots + c_{k-1} u_{n+k-1,n+k-1} = -u_{n+k-1,n+k}$$

を解くことにより得られる. ここで, $u_{i,j} = (\Delta x^i, \Delta x^j)$ である. 正規方程式

(10) の解を Cramer の公式を用いて表し, (9) に代入して整理すると

$$s_{n,k} = \frac{\begin{vmatrix} x^n & \dots & x^{n+k} \\ u_{n,n} & \dots & u_{n,n+k-1} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ u_{n+k-1,n} & \dots & u_{n+k-1,n+k-1} \end{vmatrix}}{\begin{vmatrix} 1 & \dots & 1 \\ u_{n,n} & \dots & u_{n,n+k-1} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ u_{n+k-1,n} & \dots & u_{n+k-1,n+k-1} \end{vmatrix}} \quad (11)$$

が得られる. ただし, 分子の行列式は第 1 行について展開したものとする.

(11)を変形した

$$s_{n,k} = \frac{\begin{vmatrix} x^n & \Delta x^n & \cdots & \Delta x^{n+k-2} \\ u_{n,n} & v_{n,n} & \cdots & v_{n,n+k-2} \end{vmatrix}}{\begin{vmatrix} u_{n+k-1,n} & v_{n+k-1,n} & \cdots & v_{n+k-1,n+k-2} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ v_{n+k-1,n} & \cdots & v_{n+k-1,n+k-2} \end{vmatrix}}$$

は Germain-Bonne[6]が最初に取り上げたので, Germain-Bonne変換と呼ばれている. ここで, $v_{i,j} = (\Delta x^i, \Delta^2 x^j)$ である.

MPEに対して, n を固定して k のみを動かす場合の漸化式は, Germain-Bonne変換に対し, Brezinski[2]が与えた. n を動かす場合の算法は, 最近, Ford and Sidi[5]により得られている. また, 5節で述べるH算法によっても計算できる.

4. MMPE

Sidi, Ford and Smith[14]は, (7)の代わりに連立1次方程式

$$\sum_{j=0}^{k-1} c_j (y_i, \Delta x^{n+j}) = - (y_i, \Delta x^{n+k}) \quad i=1, 2, \dots, k \quad (12)$$

を解くことを提案した. ここで, $y_1, \dots, y_k$ は1次独立なベクトルである. とくに, y_i として第 i 成分のみが1でそれ以外が0であるベクトル(単位ベクトル)を取れば, (7)の d 個の方程式の最初の k 個を解くことになる. (12)から $c_0, c_1, \dots, c_{k-1}$ を求め, (9)により $s_{n,k}$ (MPEと区別するため $t_{n,k}$ と表す)を求める方法は, modified MPE (MMPE)と名付けられた[14]. このとき, $t_{n,k}$ は行列式を用いて

$$t_{n,k} = \frac{\begin{vmatrix} x^n & \cdots & x^{n+k} \\ u_{1,n} & \cdots & u_{1,n+k-1} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ u_{k,n} & \cdots & u_{k,n+k-1} \end{vmatrix}}{\begin{vmatrix} 1 & \cdots & 1 \\ u_{1,n} & \cdots & u_{1,n+k-1} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ u_{k,n} & \cdots & u_{k,n+k-1} \end{vmatrix}} \quad (13)$$

と表される. ここで, $u_{i,j} = (y_i, \Delta x^j)$ である. (13)を最初に提案したのは Brezinski[1]である.

5. H 算法

行列式の比

$$H_k^{(n)} = \frac{\begin{vmatrix} x^n & \cdots & x^{n+k} \\ g_1(n) & \cdots & g_1(n+k) \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ g_k(n) & \cdots & g_k(n+k) \end{vmatrix}}{\begin{vmatrix} 1 & \cdots & 1 \\ g_1(n) & \cdots & g_1(n+k) \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ g_k(n) & \cdots & g_k(n+k) \end{vmatrix}}$$

を考える。ここで、 $(g_i(n))$ はスカラ列で、分子の行列式は第1行について展開したものである。Brezinski[3]は、 $H_k^{(n)}$ が次の漸化式で表されることを示した。

$n=0, 1, 2, \dots$ に対し、

$$H_0^{(n)} = x^n, \quad g_{0,j}^{(n)} = g_j(n) \quad j=1, 2, \dots,$$

$$H_k^{(n)} = H_{k-1}^{(n)} - g_{k-1,k}^{(n)} \frac{H_{k-1}^{(n+1)} - H_{k-1}^{(n)}}{g_{k-1,k}^{(n+1)} - g_{k-1,k}^{(n)}} \quad k=1, 2, \dots,$$

$$g_{k,j}^{(n)} = g_{k-1,j}^{(n)} - g_{k-1,k}^{(n)} \frac{g_{k-1,j}^{(n+1)} - g_{k-1,j}^{(n)}}{g_{k-1,k}^{(n+1)} - g_{k-1,k}^{(n)}} \quad k=1, 2, \dots; j=k+1, \dots$$

により定義する。この算法をH算法(H-algorithm)という。名称のHは、Henriciに由来している。

よく知られているように、Henrici[8]は、非線型連立方程式の補外法として以下の方法を提案した：

d 次のベクトル列 (x^n) に対し、

$$X^n = (x^n, x^{n+1}, \dots, x^{n+d-1}),$$

$$\Delta X^n = X^{n+1} - X^n, \quad \Delta^2 X^n = \Delta X^{n+1} - \Delta X^n$$

とし、 $\Delta^2 X^n$ が正則のとき、

$$h^n = x^n - \Delta X^n (\Delta^2 X^n)^{-1} \Delta X^n$$

とおく。ベクトル列 (x^n) が、反復(2)によって生成されているとき、 ΔX^n と $\Delta^2 X^n$ が正則ならば、

$$h^n = x^*$$

が成立する。Sadok[11]は、H算法において

$$g_j(n) = \Delta x^n_j \quad (\text{ベクトル } \Delta x^n \text{ の第 } j \text{ 成分}) \quad j=1, \dots, d$$

とおくと、

$$h^n = H_d^{(n)}$$

となることを示した。この算法をHHA(Henrici H-algorithm)という。

MMP Eは、H算法において、

$$g_j(n) = (y_j, \Delta x^n) \quad j=1, \dots, d$$

とおくことにより,

$$H_k^{(n)} = t_{n,k}$$

が得られる. 反復行列 T の最小多項式の次数 k は, 通常は未知であるので,

$$|t_{n,k} - t_{n-1,k}| < \varepsilon \quad \text{または,} \quad |t_{n,k} - t_{n,k-1}| < \varepsilon$$

が成立したとき, 反復を停止し $t_{n,k}$ を補外値に採用する. ここで, ε は許容誤差である. HHA は MPE の特別な場合であることも注意しておく.

n を固定した場合の MPE も H 算法により計算できる:

$$\begin{aligned} H_{\theta}^{(j)} &= x^{n+j} & j &= 0, 1, 2, \dots \\ g_i(n+j) &= (\Delta x^{n+i-1}, \Delta x^{n+j}) & i &= 1, 2, \dots; j = 0, 1, 2, \dots \end{aligned}$$

とおくと,

$$H_k^{(\theta)} = s_{n,k}$$

が得られる. H と g の次元を 1 つ大きくして

$$H_{n,\theta}^{(j)} = x^{n+j}, \quad g_{n,i}(n+j) = (\Delta x^{n+i-1}, \Delta x^{n+j})$$

とすれば, $s_{n,k}$ が任意の n に対し計算できる. 次節の MPE は, この方法により計算した. しかしながら, 多くの記憶容量を必要とするので, 実用には適さない.

6. 数値例

6.1 連立 1 次方程式の反復解法

連立 1 次方程式 $Ax = b$ の解が $x^* = (1, 1, \dots, 1)^T$ となるように, b を決める. 初期値 $x^0 = 0$ とし,

(a) Jacobi 法, (b) Gauss-Seidel 法, (c) SOR 法

により, 反復列 (2) を作り,

(i) MPE , (ii) $MMPE$, (iii) VEA

により補外 (加速) を行う. 比較のため, 加速法として

(v) AA (田辺 [17] の適応的加速法)

も取り上げる. AA は MPE , $MMPE$, VEA とは異なり, 加速の際, 係数行列 A を用いる. (a)(b)(c) および (v) については, [10] を見よ. さらに, 精度と計算量の比較のため, Gauss の消去法による結果も含めた.

数値計算は, 表 2 の右 2 列を除いて長崎総合科学大学情報科学センターの ACOS 610 を使用し, FORTRAN77 により倍精度で計算した. 表 2 の右側 2 列は, 計算流体力学研究所の S820/80 を使用した.

例1 ブロック三重対角行列

$$A = \begin{bmatrix} B & -I & & 0 \\ -I & B & -I & \\ & -I & B & \\ 0 & & -I & B \end{bmatrix}, \quad B = \begin{bmatrix} 4 & -1 & & 0 \\ -1 & 4 & -1 & \\ & -1 & 4 & \\ 0 & & -1 & 4 \end{bmatrix}$$

I は m 次単位行列, A は $d=m^2$ 次正方行列である. SOR法における加速係数としては, $\omega = 2/(1 + \sin(\pi/(m+1)))$ を用いる.

例2 三重対角行列

$$A = \begin{bmatrix} 2 & -1 & & 0 \\ -1 & 2 & -1 & \\ & -1 & 2 & \\ 0 & & -1 & 2 \end{bmatrix}$$

SOR法における加速係数としては, $\omega = 2/(1 + \sin(\pi/(d+1)))$ を用いる.

例3 (Wynn[18], Sidi, Ford and Smith[14])

$$A = \begin{bmatrix} 2 & 1 & 3 & 4 \\ 1 & -3 & 1 & 5 \\ 3 & 1 & 6 & -2 \\ 4 & 5 & -2 & -1 \end{bmatrix}$$

Gauss-Seidel法の反復行列

$$T = \frac{1}{18} \begin{bmatrix} 0 & 9 & 27 & 36 \\ 0 & -3 & -3 & 18 \\ 0 & 5 & 14 & 21 \\ 0 & -61 & -151 & -96 \end{bmatrix}$$

の固有値は, $-2.35 \pm 2.05i$, -0.0228 , と0である[14]. 反復(2)は発散するので, SOR法は適用しない.

$d=4$ の場合を表1, $d=16$ の場合を表2に示す. 許容誤差は 10^{-9} , 最大反復回数は200である. 桁あふれ防止のため, 中間結果が30桁を越えたら反復を停止する. 反復回数 n , MPE, MMPE, VEAについては $k(s_{n-k-1,k}, t_{n-k-1,k}, \varepsilon^{n-2k_2k})$, 有効桁数とCPU時間(単位ミリ秒)を示す. ×印は, 発散したか, 目標精度が達成できなかったことを示す. $d=100$ の場合を表2の右2列に示す. 最大反復回数は1000回である. 表3-5は, 表1と同じく最大反復回数は200である.

表 1 連立 1 次方程式 例 1 - 3 ($d=4$)

		例 1 $n(k)$ S.D. CPU time	例 2 $n(k)$ S.D. CPU time	例 3 $n(k)$ S.D. CPU time
J a c o b i	base	30 9.03 17 m.s.	99 9.04 52 m.s.	$\times 86$ -30.09 46 m.s.
	MPE	2(1) exact 5 m.s.	4(3) exact 9 m.s.	5(4) 13.60 18 m.s.
	MMPE	3(1) exact 5 m.s.	4(3) exact 7 m.s.	6(4) 14.22 11 m.s.
	VEA	2(1) exact 5 m.s.	5(2) exact 10 m.s.	8(4) 13.96 19 m.s.
	AA	1 exact 3 m.s.	12 9.61 12 m.s.	$\times 81$ -30.19 77 m.s.
G a u s s - S e i d e l	base	16 9.16 10 m.s.	50 9.02 27 m.s.	$\times 59$ -30.00 32 m.s.
	MPE	4(3) 16.86 11 m.s.	5(4) 15.65 17 m.s.	5(4) 9.25 17 m.s.
	MMPE	5(1) exact 9 m.s.	5(4) 15.18 9 m.s.	5(4) 14.04 10 m.s.
	VEA	5(1) exact 9 m.s.	7(2) 16.56 15 m.s.	7(3) 12.76 15 m.s.
	AA	3 15.65 4 m.s.	9 9.77 9 m.s.	$\times 128$ -30.07 119 m.s.
S O R	base ω	10 9.32 7 m.s. 1.0718	19 9.24 11 m.s. 1.2596	
	MPE	4(3) 15.20 11 m.s.	5(4) 15.30 18 m.s.	
	MMPE	5(4) 15.09 10 m.s.	5(4) 14.95 9 m.s.	
	VEA	6(3) 15.24 13 m.s.	8(4) 14.98 19 m.s.	
	AA	6 11.29 7 m.s.	9 9.19 10 m.s.	
Gaussian elimination		exact 2 m.s.	exact 2 m.s.	exact 3 m.s.

表の見方 例 1 の方程式を Gauss-Seidel 法で解き, MPE で補外した結果は,

4(3) 16.86 11 m.s.	例 1 の 7 段目
-----------------------	------------

である. $n=4, k=3$ のとき $s_{n-k-1, k} = s_{0,3}$ が, 補外値を与え,

$$16.86 = -\log_{10} \|s_{0,3} - x^*\|_{\infty}, \quad x^* = (1, 1, 1, 1)^T$$

となり, CPU 時間は 11 ミリ秒 (= 0.011 秒) である.

表 2 連立 1 次方程式 例 1 - 2

		d = 16 ACOS610		d = 100 S820/80	
		例 1	例 2	例 1	例 2
		n (k) S.D. CPU time	n (k) S.D. CPU time	n (k) S.D. CPU time	n (k) S.D. CPU time
J a c o b i	base	100 9.07 379 m.s.	× 200 1.39 752 m.s.	512 9.02 105 m.s.	× 1000 0.11 205 m.s.
	MPE	4(3) 16.16 41 m.s.	10(9) 14.44 140 m.s.		
	MMPE	20(2) 9.74 192 m.s.	21(8) 11.23 239 m.s.	35(19) 9.15 29 m.s.	740(87) 9.11 1899 m.s.
	VEA	6(3) 15.63 47 m.s.	17(8) 11.35 213 m.s.	28(14) 10.36 33 m.s.	× 1000 6.95 11808 m.s.
	AA	28 9.30 215 m.s.	× 200 2.98 1531 m.s.	233 9.01 93 m.s.	× 1000 0.32 399 m.s.
G a u s s . S e i d e l	base	51 9.08 195 m.s.	× 200 2.87 753 m.s.	258 9.04 52 m.s.	× 1000 0.32 202 m.s.
	MPE	9(8) 12.02 254 m.s.	18(16) 9.54 2882 m.s.		
	MMPE	9(4) 15.65 93 m.s.	17(16) 13.18 245 m.s.	33(32) 9.60 32 m.s.	872(*) 9.23 2531 m.s.
	VEA	13(4) 14.63 143 m.s.	28(10) 9.33 496 m.s.	39(11) 9.06 59 m.s.	× 1000 5.58 11798 m.s.
	AA	10 9.80 77 m.s.	38 9.06 290 m.s.	31 9.04 12 m.s.	× 1000 5.74 397 m.s.
S O R	base ω	20 9.42 81 m.s. 1.2596	69 9.12 273 m.s. 1.6895	46 9.16 10 m.s. 1.5604	410 9.01 86 m.s. 1.9397
	MPE	10(9) 14.44 176 m.s.	17(16) 9.24 2362 m.s.		
	MMPE	14(13) 14.70 187 m.s.	18(16) 13.93 272 m.s.	41(40) 10.13 47 m.s.	103(*) 9.73 210 m.s.
	VEA	16(8) 9.85 200 m.s.	33(16) 14.03 666 m.s.	39(19) 9.15 59 m.s.	200(*) 12.56 1347 m.s.
	AA	10 9.22 81 m.s.	35 9.08 280 m.s.	22 9.01 9 m.s.	260 9.01 109 m.s.
Gaussian elimination		15.27 122 m.s.	exact 35 m.s.	13.98 3 m.s.	12.97 3 m.s.

(*) k = 100

d = 100 の場合の M P E は、配列が大きくなりすぎるため、計算できなかった。

6.2 線型反復列の加速

線型反復

$$x^{n+1} = Tx^n + c \quad n = 0, 1, 2, \dots$$

の例. すべて, $x^0 = 0$ とする.

例 4 巡回行列

$$T = \begin{bmatrix} 0 & & & & 0 & \lambda & & \\ \lambda & & & & & 0 & & \\ 0 & \lambda & & & & & & \\ & & & & & & & \\ & & & \lambda & 0 & 0 & & \\ 0 & & & & \lambda & 0 & & \end{bmatrix}, \quad c = \begin{bmatrix} 1 \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ 1 \end{bmatrix}$$

表 3 に $\lambda = 0.5$ と 0.9 , $d = 4$ と $d = 16$ の場合の反復回数と有効桁数を示す.

例 5 Jordan 行列

$$T = \begin{bmatrix} \lambda & 1 & & & 0 \\ & \lambda & 1 & & \\ & & \lambda & & \\ & & & \lambda & 1 \\ 0 & & & & \lambda \end{bmatrix}, \quad c = \begin{bmatrix} 1 \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ 1 \end{bmatrix}$$

表 4 に $(\lambda, d) = (0.5, 4), (0.9, 4), (0.5, 16)$ の場合の結果を示す.

例 6 (Sidi, Ford and Smith[14])

$$T = 0.06 \times \begin{bmatrix} 5 & 2 & 1 & 1 & & & & & 0 \\ 2 & 6 & 3 & 1 & 1 & & & & \\ 1 & 3 & 6 & 3 & 1 & 1 & & & \\ 1 & 1 & 3 & 6 & 3 & 1 & 1 & & \\ & 1 & 1 & 3 & 6 & 3 & 1 & 1 & \\ & & 1 & 1 & 3 & 6 & 3 & 1 & 1 \\ & & & 1 & 1 & 3 & 6 & 3 & 1 \\ & & & & 1 & 1 & 3 & 6 & 2 \\ 0 & & & & & 1 & 1 & 2 & 5 \end{bmatrix}$$

固定点が $x^* = (1, 1, \dots, 1)^T$ となるように, c を決める. T の固有値はすべて 0 と 1 の間の実数で, $\lambda_1 = 0.8965$, $\lambda_2 = 0.7318, \dots, \lambda_{11} = 0.0313$ [14] である. 反復回数と有効桁数は表 5 に示す.

例 7 (Sidi, Ford and Smith[14])

$$T = 0.04 \times \begin{bmatrix} 12 & 11 & & & & & & & 0 \\ 11 & 11 & 10 & & & & & & \\ 10 & 10 & 10 & 9 & & & & & \\ 9 & 9 & 9 & 9 & 8 & & & & \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & & & & \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & & & & \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & & & & \\ 3 & 3 & 3 & 3 & 3 & \cdot & \cdot & \cdot & 2 \\ 2 & 2 & 2 & 2 & 2 & \cdot & \cdot & \cdot & 2 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & \cdot & \cdot & \cdot & 1 \end{bmatrix}$$

固定点が $x^* = (1, 1, \dots, 1)^T$ となるように, c を決める. T の固有値はすべて実数

で, $\lambda_1 = 1.2892$, $\lambda_2 = 0.8080, \dots, \lambda_{12} = 0.0012$ [14]である. 反復回数と有効桁数は表5に示す.

表3 線型反復列 例4

	d = 4 $\lambda = 0.5$ n (k) S. D.		d = 4 $\lambda = 0.9$ n (k) S. D.		d = 16 $\lambda = 0.5$ n (k) S. D.		d = 16 $\lambda = 0.9$ n (k) S. D.	
base	31	9.03	× 200	8.15	31	9.03	× 200	8.15
MPE	2(1)	exact	2(1)	14.09	2(1)	exact	2(1)	14.09
MMPE	3(1)	exact	3(2)	14.09	3(1)	exact	3(2)	14.09
VEA	2(1)	exact	3(1)	13.87	2(1)	exact	3(1)	14.88

表4 線型反復列 例5

	d = 4 $\lambda = 0.5$ n (k) S. D.		d = 4 $\lambda = 0.9$ n (k) S. D.		d = 16 $\lambda = 0.5$ n (k) S. D.	
base	49	9.24	× 200	1.83	106	9.10
MPE	6(4)	10.36	× 200	5.92	79(12)	9.02
MMPE	6(4)	13.97	* 6(4)	8.70	61(16)	9.44
VEA	8(4)	12.48	* 156(4)	6.08	80(16)	9.32

* 許容誤差 = 10^{-6}
(10も要求す.)

表5 線型反復列 例6 - 7

	例 6 n (k) S. D.		例 7 n (k) S. D.	
base	192	9.01	× 200	-22.48
MPE	7(6)	10.00	* 17(12)	6.30
MMPE	7(6)	14.14	13(12)	12.11
VEA	12(6)	12.50	21(7)	9.89

* 許容誤差 = 10^{-6}

7. 結論

MPE, MMPE, VEAは線型反復列に対し, 反復回数を減少させるという意味で, 補外効果があるといえる. とくに, 例3や例7のように, もとのベクトル列が発散する場合にも補外列は固定点に収束するので, 従来の反復法では解けなかった問題への, 反復法の適用が可能となる. 計算時間 (CPU time) の短縮が伴わない場合もあるが, MPEについては算法とプログラムを改良することにより, 大幅な時間短縮が可能と思われる. 大規模な連立1次方程式への適用の実用化は今後の課題である.

謝辞 スーパーコンピュータによる計算を実行し, プログラムの改良についても有益な助言をいただいた, 計算流体力学研究所の藤野清次主任研究員に深く感謝します. 適応的加速法についての多く文献を提供していただいた, 統計数理研究

所の田辺国士教授と、例4および例5を教示いただいた名古屋大学の杉浦洋さんにも感謝いたします。

参考文献

- [1] C.Brezinski, Generalisations de la transformation de Shanks, de la table de Padé et de l' ε -algorithme, *Calcolo* 12(1975), 317-360.
- [2] C.Brezinski, Recursive interpolation, extrapolation and projection, *J.Comp.Appl.Math.* 9(1983), 369-376.
- [3] C.Brezinski, About Henrici's method for non linear equations, *Symposium on Numerical Analysis and Computational Complex Analysis*, Zurich, August 15-17, 1983, unpublished.
- [4] S.Cabay and L.W.Jackson, A polynomial extrapolation methods for finding limits and antilimits of vector sequences, *SIAM J.Numer. Anal.* 13(1976), 734-752.
- [5] W.F.Ford and A.Sidi, Recursive algorithms for vector extrapolation methods, *Appl.Numer.Math.* 4(1988), 477-489.
- [6] B.Germain-Bonne, Estimation de la limite de suites et formalisation de procédés d'accélération de convergence, *Thèse, Université de Lille I*, 1978.
- [7] P.R.Graves-Morris, Vector valued rational interpolants I, *Numer. Math.* 42(1983), 331-348.
- [8] P.Henrici, *Elements of Numerical Analysis*, John Wiley & Sons, N.Y. 1964 (一松信他訳, 数値解析の基礎, 培風館, 1973)
- [9] J.B.Mcleod, A note on the ε -algorithm, *Computing* 7(1971), 17-24.
- [10] 森正武, 数値解析, 共立出版, 1973
- [11] H.Sadok, About Henrici's transformation for accelerating vector sequences, *J.Comp.Appl.Math.* 29(1990), 101-110.
- [12] D.Shanks, Non-linear transformations of divergent and slowly convergent sequences, *J.Math. and Phys.* 34(1955), 1-42.
- [13] A.Sidi and J.Bridger, Convergence and stability analyses for some vector extrapolation methods in the presence of defective iteration matrices, *J.Comp.Appl.Math.* 22(1988), 35-61.
- [14] A.Sidi, W.F.Ford and D.A.Smith, Acceleration of convergence of vector sequences, *SIAM J.Numer.Anal.* 23(1986), 178-196.
- [15] S.Skelboe, Computation of the periodic stedy-state response of

nonlinear networks by extrapolation methods, IEEE Trans.Circuits and Systems, csa-27(1980), 161-175.

- [16] D.A.Smith, W.F.Ford and A.Sidi, Extrapolation methods for vector sequences, SIAM Rev.29(1987), 199-233.
- [17] K.Tanabe, An adaptive acelerastion of general linear iterative processes for solving a system of linear equations, Proc. 5th. Hawaii International Conference on System Sciences, Honolulu, 1972.
(数理解析研究所講究録129(1971), 100-118)
- [18] P.Wynn, Acceleration techniques for iterated vector and matrix problems, Math.Comp.16(1962), 301-322.