えるものと期待している。ただし観測壕の変更に伴って、すでに報告した地震に伴う比抵抗変化の検出限界に、なんらかの影響をおよぼすかも知れない[山崎 (1975 b)]。今後、油壺において二方向の比抵抗変化の記録を平常時はもちろんのこと、地震のたびごとに得られるようになれば、いままでこの観測において未解決の問題も次第に明らかになり、地殻変動の観測に、また地震予知の一手法として比抵抗変化計の価値が認識されるであろう。[YAMAZAKI (1977)]。なお油壺における観測は、地震研究所高橋辰利技官のご協力によつて行なわれており、日ごろのご厚意にあつく感謝します。

文 献

- RIKITAKE, T. and Y. YAMAZAKI, 1976. Resistivity Changes as a Precursor of Earthquake, *J. Geoelectr.*, **28**, 497-505.
- RIKITAKE, T. and Y. YAMAZAKI, 1977, Precursory and Coseismic Changes in Ground Resistivity, *J. Phys. Earth*, **25**, Suppl., 161-173.
- YAMAZAKI, Y., 1966. Electrical Conductivity of Strained Rocks (The 2nd paper), Further Experiments on Sedimentary Rocks, *Bull. Earthq. Res. Inst.*, **44**, 1553-1570.
- YAMAZAKI, Y., 1967, Electrical Conductivity of Strained Rocks (The 3rd paper), A Resistivity Variometer, *Bull. Earthq. Res. Inst.*, **45**, 849-860.
- 山崎良雄, 1973, 岩石変形と比抵抗 (比抵抗変化計の開発), *地震* **2**, **26**, 55-66.
- 山崎良雄, 1974a, 岩石変形と比抵抗 (3), (前駆的变化, Rise-time および 岩石歪増倍率), *地震* **2**, **27**, 164-166.
- 山崎良雄, 1974b, 岩石変形と比抵抗 (4), (伊豆半島沖地震 (May, 9, 1974, *M* 6.9) に伴う油壺の比抵抗変化), *地震* **2**, **27**, 364-367.
- 山崎良雄, 1974c, 岩石変形と電気伝導度変化 (第六報), 1974 年 伊豆半島沖地震に伴う油壺の大地比抵抗変化, *震研研究速報*, **14**, 121-133.
- YAMAZAKI, Y., 1974d, Coseismic Resistivity Steps, *Tectonophysics*, **22**, 159-171.
- YAMAZAKI, Y., 1975a, Precursory and Coseismic Resistivity Changes, *Pure and Applied Geophysics*, **113**, 219-227.
- 山崎良雄, 1975b, 地震に伴う大地比抵抗変化の検出限界, とくに油壺における観測の場合, *地震* **2**, **28**, 34-40.
- YAMAZAKI, Y., 1977, Tectonoelectricity, *Geo-*

physical Surveys, **3**, 123-142.

山崎良雄, 1978, 1978 年 伊豆大島近海地震に伴う大地比抵抗変化—油壺の「比抵抗変化計」記録について—, *震研彙報* (印刷中).

地 震 第 2 輯
第 31 巻 (1978) 233-234 頁

Haskell 法における $\sinh x/x$ の計算

東京大学理学部地球物理学教室

斎 藤 正 徳

(昭和 53 年 6 月 21 日受理)

Approximations of $\sinh x/x$ in
Haskell's Matrix Method

Masanori SAITO

Geophysical Institute, University of Tokyo

(Received June 21, 1978)

表面波の分散曲線や、層構造の伝達函数の計算には Haskell の方法が良く用いられている。これは Haskell の方法の表式が単純であり、従つて運動方程式を直接 Runge-Kutta-Gill 法などで積分する方法に比べて計算のスピードも速いと信じられているからである。計算量があまり大きくないときには両者の違いは大して問題にはならないが、現在のように数千のモード解を重ね合わせて理論地震記象を計算するということが行なわれるようになると、両方法の長所・短所を正確に評価しておくことが必要になる。

SH 型の波の問題を例にとると、Haskell 法における layer matrix は慣用の記号を用いて

$$\begin{aligned} E_{11} &= E_{22} = 1 + 2 \sinh^2 (\nu h/2) \\ E_{12} &= (1/\mu) \sinh \nu h/\nu \\ E_{21} &= \mu \nu^2 \sinh \nu h/\nu \\ \nu^2 &= k^2 [1 - (c/\beta)^2] \end{aligned} \quad (1)$$

で与えられる [TAKEUCHI and SAITO, 1972]. $c > \beta$ のときには ν は純虚数になるが、そのときでも行列の要素はすべて実数である。行列の要素がこのように単純であるから、Haskell 法は Runge-Kutta-Gill 法に比べて非常に速いことが期待される。とこ

ろが実際に計測を行なつてみると (HITAC 8800 の 2 倍精度, 最適化のレベルが 2 の場合, 以下も同様), 1 ステップ当りの平均の所要時間は Runge-Kutta-Gill 法の 0.17 ms に対して, Haskell 法で 0.14 ms になり, 両方法の差は予想していたほど大きくはない。

Haskell 法が意外に時間がかかるのは, 平方根 (y^2 から y を求めるため), 三角関数 ($y^2 < 0$ のとき) 又は双曲線関数 ($y^2 > 0$ のとき) の計算があるからである。これらの関数の計算自体に時間がかかるというよりは, これらのサブルーチンへのリンクに時間がかかるらしい。この時間を節約するためにはサブルーチンを呼ぶのを止めて, 三角関数などをプログラム中で自前で計算してしまえばよい。そのためにはこれらの関数の近似式が必要になる。

(1) から分る通り, x を実数又は純虚数としたときの $\sinh x/x$ さえ計算できればよい。この関数は $y=x^2$ とすると

$$\frac{\sinh x}{x} = \sum_{k=0}^n a_k y^k \quad y=x^2 \quad (2)$$

と近似できる。 $y < 0$ も許せば x が純虚数の場合も自動的にカバーできることになる。(2) の係数 a_k としてはテーラー展開の係数を用いることもできるが, 項数を減らすためには最良近似多項式あるいはそれに近いものを選ぶのがよい。ここでは (2) の左辺を y の関数と考えてチェビシェフの内挿式をつくり, それから a_k を求めることにした。結果的にはこれが最良近似多項式とは実質的に同じになることが分つた。

(1) の y は深さ方向の波数を表わす。積分のステップ間隔は深さ方向の波長に比べて十分小さくとなければ意味がないから, $|yh| \ll 1$ と考えてよい。ここでは十分の余裕をみて, $-1 \leq y \leq 1$ における近似式を求めた。単精度, 倍精度の計算に便利な近似式の係数を Table 1 に示す。

この近似式を用いて Haskell の方法で積分したときの計算速度は 1 ステップ当り 0.09 ms となつて予想通り大幅な速度向上がみられた。この近似式を用いた場合, y^2 さえ計算すればよいので平方根の計算が不要となる。このことも速度向上に大きく寄与しているものと思われる。

Table 1. Coefficients a_k in equation (2) for $n=3$ and $n=7$. The errors of these approximations for $\sinh x/x$ are almost uniformly bounded in $-1 \leq y \leq 1$.

k	$n=3$	$n=7$
	a_k	a_k
0	0.99999 965	0.99999 99999 99999 978
1	0.16666 666	0.16666 66666 66666 667
2	0.00833 609	0.00833 33333 33334 036
3	0.00019 844	0.00019 84126 98412 700
4		0.00000 27557 31918 884
5		0.00000 00250 52108 375
6		0.00000 00001 60596 061
7		0.00000 00000 00764 733
maximum error	3.5×10^{-7}	2.2×10^{-17}

Rayleigh 波型の問題の場合には layer matrix がはるかに複雑になるので, ここで得た結果から Haskell 法の方が有利であるとは必ずしも云えない。これは更に実験を重ねてみる必要がある。

文 献

TAKEUCHI, H. and M. SAITO, 1972, Seismic Surface Waves, in Methods in Computational Physics, Academic Press.