

スーパーコンピュータ S-810 東大システム における 基本演算と数学関数の性能評価

東京大学 大型計算機センター

唐木 幸比古

(Yukihiko KARAKI)

パイプライン方式高速アレイプロセッサの登場によって、従来型の逐次方式計算機とは全く異なる数値計算性能の断面が見られるようになりつつある。

ここでは、去る11月1日（1983年）より一般利用者に公開された国産初のスーパーコンピュータ

HITAC S-810 モデル20

東大システムにおける 基本演算及び数学関数の速度と精度について性能調査を行った結果を報告する。合せて、線型計算や応用計算の性能についても若干の調査例を紹介する。その他、S-810 高速化技法について簡単に述べる。

調査の限りでは、S-810 モデル20は、現存する全てのコンピュータの中で、現在、世界最高速である。

0. はじめに

計算機の性能が向上すると、計算フィールドは拡大する。

東京大学大型計算機センターにおける計算処理量を調べると、年々増加の一途をたどっており、特にここ数年の伸びは著しい。¹⁾ 東大センター利用者（約5000名）の約9割はFORTRANを主要言語に用いており、²⁾ 科学・技術方面の数値計算が中心である。センター登録ライブラリプログラムの利用率は約4割（件数比）であり、その約7割が数値計算、約3割が図形処理（件数比）である。³⁾ 数値計算の中心は線型計算（行列処理）であり、連立一次方程式や固有値問題がその中核部を占める。統計計算の件数比もそれに次ぐが、演算時間の比率では行列演算やそれらを含む応用計算が圧倒的比重を占める。

これらを背景としてスーパーコンピュータ S-810 は導入された。

ここでは、国産初の公開となったこのスーパーコンピュータ（東大システム）の処理性能について、特に最も基本的な演算に関する性能を中心に実験調査した結果を報告し、並列演算パイプライン方式アレイプロセッサの概要を、利用者プログラムのレベルから明らかにすることを試みる。測定は、11月1日～22日の間に行ったものを中心に、若干補足する。

1. 基本演算の性能

S-810は、⁴⁾倍精度浮動小数点演算(64ビット)の高速化を中心に、単精度演算・整数/論理演算なども高速化される。4倍精度演算は高速化されない。IF文は、ANS 66レベルの算術IF文や論理IF文が高速化される他に、ANS 77レベルの構造化IF文も高速化され、IFの深さるまでベクトル化される。配列の添字は、線型変動のみならず⁵⁾非線型変動も高速化され間接添字が自動ベクトル化される。

ベクトル化の対象となるFORTRAN文は、CRAY-1やIAPと同様、最内側DOループに含まれる配列演算だけである。但し、入出力文の並びに書かれた配列は(つまり入力/出力の実行は)高速処理されない。

ここでは、倍精度浮動小数点演算を含む幾つかのFORTRAN文について、その処理速度を実測した結果を紹介する。

始めに、四則演算及び内積・総和・積和などを含む短項/多項の16個の文(図1参照)について、DOループの長さを様々に変えて処理速度を測定した結果を報告する。

次に、基本演算性能のCRAY-1における公表値⁶⁾との比較を試みる。公表された16演算のうち10個を抜粋して他のアレイプロセッサとの比較を行う。(6. 参照)

表1a~dに、ループ長 $\infty, 20, 50, 100, 300$ の実測値を示す。

ARRAY PROCESSOR TEST THROUGH FORTRAN'S BASIC ELEMENTS.
CODED BY Y.KARAKI

No.
 1. $A(I) = PAI$
 2. $A(I) = B(I)$
 3. $A(I) = B(I) + C(I)$
 4. $A(I) = B(I) * C(I)$
 5. $A(I) = B(I) / C(I)$
 6. $S = S + B(I)$
 7. $S = S + B(I) * C(I)$
 8. $S = S + (B(I) + C(I)) * (D(I) + E(I))$
 9. $A(I) = A(I) + B(I)$
 10. $A(I) = A(I) + B(I) * C(I)$
 11. $A(I) = A(I) + (B(I) + C(I)) * (D(I) + E(I))$
 12. $A(I) = A(I) + B(I) * (C(I) + D(I) * E(I))$
 13. $A(I) = A(I) + B(I) * (C(I) + D(I) * (E(I) + F(I) * G(I)))$
 14. $A(I) = A(I) + B(I) * (C(I) + D(I) * (E(I) + F(I) * (G(I) + H(I) * Z(I))))$
 15. $A(I) = A(I) + B(I) + C(I) + D(I) + E(I)$
 16. $A(I) = A(I) + B(I) + C(I) + D(I) * 1.D0 + E(I) * 1.D0$

図1. 基本演算16ループの一覧

表1a. 基本演算の速さ (ループ長10000)

(倍精度)

ARRAY PROCESSOR TEST THROUGH FORTRAN'S ELEMENTS

Loop length N = 10000

NO.	FLOP	CTIME msec	OVERHEAD msec	MFLOPS	TIME/LOOP nsec	PERIODS
1	100.	0.84	0.0	119.156	8.4	0.6
2	100.	0.82	0.84	121.363	8.2	0.6
3	100.	0.82	1.46	121.363	8.2	0.6
4	100.	0.84	1.66	119.156	8.4	0.6
5	100.	1.66	1.46	60.125	16.6	1.2
6	100.	0.82	0.84	121.363	8.2	0.6
7	200.	0.63	1.66	319.688	6.3	0.4
8	400.	0.82	1.46	485.452	8.2	0.6
9	100.	0.41	2.50	242.726	4.1	0.3
10	200.	0.84	2.29	238.313	8.4	0.6
11	400.	1.68	2.29	238.313	16.8	1.2
12	400.	1.66	2.29	240.499	16.6	1.2
13	600.	1.66	3.97	360.749	16.6	1.2
14	800.	2.72	4.99	294.544	27.2	1.9
15	400.	1.25	2.29	319.688	12.5	0.9
16	600.	1.66	2.29	360.749	16.6	1.2
	4700.	19.15	32.30	3763.245	191.5	13.7

AVERAGE MFLOPS = 235.203 Mflops

表1b. 基本演算の速さ (IL-7°長20)

(倍精度)

Loop length N = 20

NO.	FLOP	CTIME msec	OVERHEAD msec	MFLOPS	TIME/LOOP nsec	PERIODS
1	100.	6.45	13.34	15.493	64.5	4.6
2	100.	8.76	25.41	11.417	87.6	6.3
3	100.	8.74	26.67	11.437	87.4	6.2
4	100.	10.01	26.66	9.990	100.1	7.1
5	100.	15.41	26.67	6.489	154.1	11.0
6	100.	9.78	25.42	10.224	97.8	7.0
7	200.	9.81	26.66	20.384	98.1	7.0
8	400.	11.87	26.67	33.695	118.7	8.5
9	100.	8.74	33.34	11.437	87.4	6.2
10	200.	9.58	33.54	20.871	95.8	6.8
11	400.	12.08	33.54	33.099	120.8	8.6
12	400.	12.28	33.34	32.564	122.8	8.8
13	600.	13.34	38.54	44.990	133.4	9.5
14	800.	17.09	41.87	46.811	170.9	12.2
15	400.	10.83	33.54	36.922	108.3	7.7
16	600.	14.16	33.34	42.372	141.6	10.1
	4700.	178.96	478.55	388.198	1789.6	127.8

AVERAGE MFLOPS = 24.262 Mflops

表1c. 基本演算の速さ (IL-7°長50)

(倍精度)

Loop length N = 50

NO.	FLOP	CTIME msec	OVERHEAD msec	MFLOPS	TIME/LOOP nsec	PERIODS
1	100.	3.13	5.20	31.969	31.3	2.2
2	100.	3.97	10.62	25.206	39.7	2.8
3	100.	4.17	11.46	24.006	41.7	3.0
4	100.	4.59	11.44	21.773	45.9	3.3
5	100.	6.88	11.67	14.531	68.8	4.9
6	100.	4.38	10.62	22.835	43.8	3.1
7	200.	4.17	11.67	48.012	41.7	3.0
8	400.	5.20	11.67	76.875	52.0	3.7
9	100.	3.75	14.79	26.641	37.5	2.7
10	200.	4.17	14.79	48.012	41.7	3.0
11	400.	5.20	14.80	76.875	52.0	3.7
12	400.	5.22	14.79	76.650	52.2	3.7
13	600.	6.24	17.72	96.141	62.4	4.5
14	800.	7.72	19.79	103.614	77.2	5.5
15	400.	5.83	14.59	68.624	58.3	4.2
16	600.	6.27	14.57	95.673	62.7	4.5
	4700.	80.89	210.19	857.436	808.9	57.8

AVERAGE MFLOPS = 53.590 Mflops

表1d. 基本演算の速さ (ループ長100)

(倍精度)

Loop length N = 100

NO.	FLOP	CTIME msec	OVERHEAD msec	MFLOPS	TIME/LOOP nsec	PERIODS
1	100.	1.88	2.72	53.281	18.8	1.3
2	100.	2.50	5.62	39.961	25.0	1.8
3	100.	2.50	6.67	39.961	25.0	1.8
4	100.	2.29	6.88	43.691	22.9	1.6
5	100.	4.17	6.67	24.006	41.7	3.0
6	100.	2.72	5.62	36.818	27.2	1.9
7	200.	2.70	6.67	74.052	27.0	1.9
8	400.	2.70	6.88	148.104	27.0	1.9
9	100.	2.30	8.74	43.401	23.0	1.6
10	200.	2.49	8.76	80.412	24.9	1.8
11	400.	3.34	8.74	119.700	33.4	2.4
12	400.	3.31	8.76	120.804	33.1	2.4
13	600.	3.77	10.62	159.197	37.7	2.7
14	800.	4.79	12.50	166.971	47.9	3.4
15	400.	3.56	8.74	112.508	35.6	2.5
16	600.	3.74	8.76	160.496	37.4	2.7
	4700.	48.75	123.34	1423.363	487.5	34.8

AVERAGE MFLOPS = 88.960 Mflops

表1e. 基本演算の速さ (ループ長300)

(倍精度)

Loop length N = 300

NO.	FLOP	CTIME msec	OVERHEAD msec	MFLOPS	TIME/LOOP nsec	PERIODS
1	100.	1.02	1.05	97.717	10.2	0.7
2	100.	1.25	2.29	79.842	12.5	0.9
3	100.	1.05	3.33	94.885	10.5	0.8
4	100.	1.45	3.13	68.916	14.5	1.0
5	100.	2.29	3.13	43.647	22.9	1.6
6	100.	1.25	2.50	79.842	12.5	0.9
7	200.	1.46	3.11	136.397	14.7	1.0
8	400.	1.45	3.34	275.665	14.5	1.0
9	100.	1.25	4.17	79.842	12.5	0.9
10	200.	1.25	4.38	159.684	12.5	0.9
11	400.	2.09	4.36	191.155	20.9	1.5
12	400.	2.06	4.18	193.987	20.6	1.5
13	599.	2.50	5.83	239.526	25.0	1.8
14	799.	2.91	7.51	274.222	29.2	2.1
15	400.	2.08	4.38	192.560	20.8	1.5
16	599.	2.29	4.17	261.882	22.9	1.6
	4695.	27.66	60.85	2469.768	276.9	19.8

AVERAGE MFLOPS = 154.361 Mflops

表1_aによれば、S-810の加算・乗算は120 MFLOPSの速

(MFLOPS = Million Floating-point Operations Per Second)

さであり除算はその半分の60 MFLOPSである。マクロ演算では、内積が320 MFLOPS・積和が240 MFLOPS・総和が120 MFLOPSである。(コンパイラオプション⁷⁾はHAP(PP).)

短項演算に比べて多項演算は一般に速い。加算と内積を組合せた演算の480 MFLOPSをはじめ、5項加算の320 MFLOPS、7項の加乗算の360 MFLOPSなど短項の2~4倍速が得られている。

加算のスカラー処理速度が約4 MFLOPSであるから、加算のベクトル処理速度は、2項加算で30倍、5項加算で80倍高速化される。(但し、5項加算のスカラー速度は約10 MFLOPS)

データ転送速度は120⁸⁾ MFLOPSである。

基本演算16ループの平均速度は235 MFLOPSとなり、スカラー平均速度の約40倍である。 $(\text{加速率} = \frac{\text{ベクトル処理速度}}{\text{スカラー処理速度}})$
(平均加速率)

表1_b~_cは、ユーザ・プログラムで通常よく使われるループ長での速さを示す。加算では、ループ長50で約25 MFLOPS、ループ長100で40 MFLOPS、ループ長300で約100 MFLOPSとなっている。ループ長300では極限速度のレベル(120 MFLOPS)に達していることがわかる。ループ長300の平均速度は154 MFLOPSである。

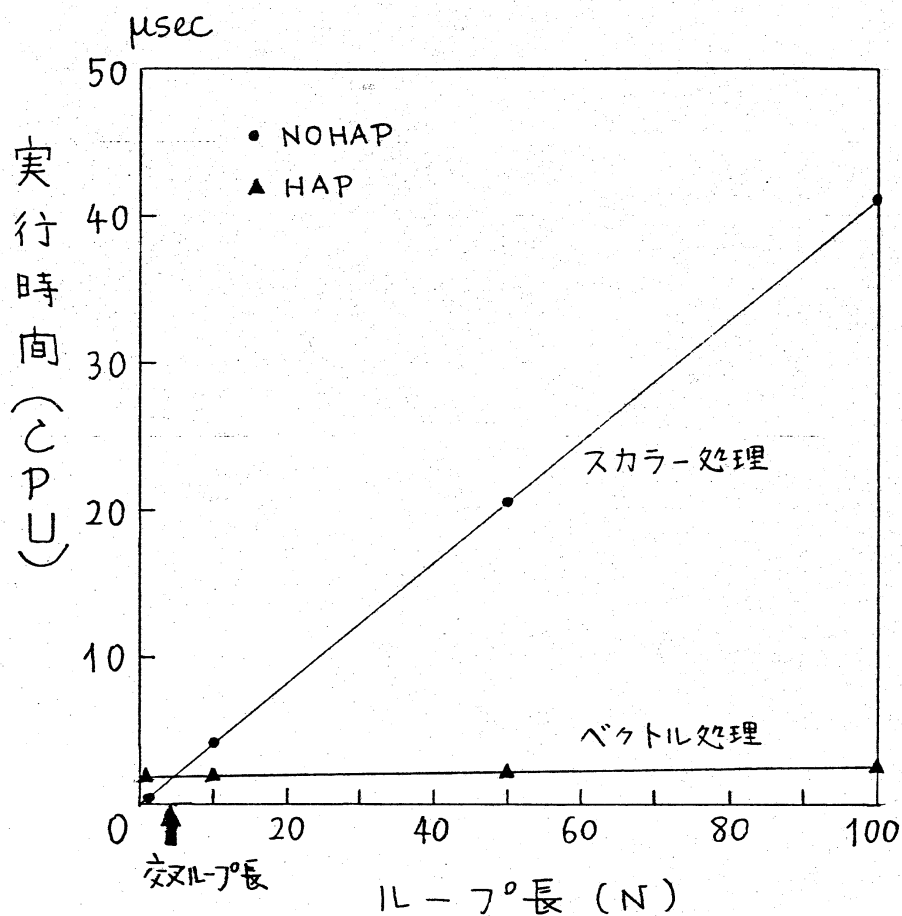


図2. S-810のベクトル/スカラー処理の比較

実行時間は、次の積和ループ°

```

DO 10 I = 1, N
  A(I) = A(I) + B(I) * C(I)

```

を測定したものをプロットしている。

積和ループ°の交差ループ°長は、約4である。

図2は、ベクトル処理とスカラー処理の実行時間とループ°長の関係を示す。(ベクトル処理速度とスカラー処理速度が交差する)ループ°長を 交差ループ°長 と呼ぶ。

交差ループ°長は、短項演算で4~8、多項演算で2~5であった。総和ループ°の交差長(8)を除いて、非常に短い。

2. 数学関数の性能

S-810用FORTRANコンパイラ FORT77/HAP
が提供する数学関数（組込関数）の総てについて、速度と精度を調査した。

表2a～dは、数学関数のベクトル処理速度とスカラー処理速度を比較したものである。

表2a. 数学関数の速さ（倍精度実数）

Speeds of Mathematical Functions on HITAC S-810/20
Real Function in FORTRAN 77 (Double Precision)

Func	Vector	Scalar	Ratio	Range
	nsec	nsec	S/V	
DEXP	166.7	4041.7	24.2	$ x \leq 20$
DLOG	250.0	3791.7	15.2	$0 < x < 20$
DLOG10	270.8	3875.0	14.3	$0 < x < 20$
DSIN	166.7	3520.8	21.1	$ x < 20$
	187.5	3041.7	16.2	$ x < \text{pai}/2$
DCOS	187.5	3437.5	18.3	$ x < 20$
	166.7	2937.5	17.6	$ x < \text{pai}/2$
DTAN	7791.7	7812.5	1.0	$ x < 20$
	7729.2	7791.7	1.0	$ x < \text{pai}/2$
DARSIN	8520.8	8520.8	1.0	$ x < 1$
DARCOS	8541.7	8604.2	1.0	$ x < 1$
DATAN	250.0	5875.0	23.5	$ x < 20$
	229.2	5729.2	25.0	$ x < \sqrt{2}-1$
DATAN2	354.2	7166.7	20.2	$ x < 1$
DSINH	8375.0	8416.7	1.0	$ x < 20$
	3479.2	3520.8	1.0	$ x < 1$
DCOSH	8812.5	8791.7	1.0	$ x < 20$
	8687.5	8604.2	1.0	$ x < 1$
DTANH	187.5	8312.5	44.3	$ x < 20$
	187.5	4645.8	24.8	$ x < 1/2$
DSQRT	208.3	4000.0	19.2	$0 < x < 20$

NOTE

The value of speed is the CPU time per operation of $A(i) = \text{Func}(X(i))$. The speed is the average of 10000 times.

スカラー処理では、倍精度と単精度の速度差が大きかったが、ベクトル処理では速度差は僅かである。その結果、例えばEXP関数では単精度で15倍速、倍精度で24倍速といった加速率の差が見られることになる。CDEXP及びDTANHの44倍速を最高に、ベクトル化された関数の加速率は14~44倍速の間に様々に分布する。(MAX1, MIN1, REALは7~10倍)

表2b. 数学関数の速さ (単精度実数)

Speeds of Mathematical Functions on HITAC S-810/20
Real Function in FORTRAN 77 (Single Precision)

Func	Vector	Scalar	Ratio	Range
	nsec	nsec	S/V	
EXP	145.8	2187.5	15.0	$ x \leq 20$
ALOG	229.2	3333.3	14.5	$0 < x < 20$
ALOG10	229.2	3354.2	14.6	$0 < x < 20$
SIN	125.0	2604.2	20.8	$ x < 20$
	125.0	2270.8	18.2	$ x < \text{pai}/2$
COS	125.0	2458.3	19.7	$ x < 20$
	125.0	2187.5	17.5	$ x < \text{pai}/2$
TAN	6687.5	6625.0	1.0	$ x < 20$
	6666.7	6604.2	1.0	$ x < \text{pai}/2$
ARSIN	6750.0	6812.5	1.0	$ x < 1$
ARCOS	6687.5	6708.3	1.0	$ x < 1$
ATAN	208.3	4666.7	22.4	$ x < 20$
	208.3	4395.8	21.1	$ x < \sqrt{2}-1$
ATAN2	250.0	5708.3	22.8	$ x < 1$
SINH	6458.3	6395.8	1.0	$ x < 20$
	2875.0	2791.7	1.0	$ x < 1$
COSH	6645.8	6729.2	1.0	$ x < 20$
	6645.8	6708.3	1.0	$ x < 1$
TANH	125.0	4875.0	39.0	$ x < 20$
	208.3	6020.8	28.9	$ x < 1/2$
SQRT	208.3	3541.7	17.0	$0 < x < 20$

NOTE

The value of speed is the CPU time per operation of $A(i) = \text{Func}(X(i))$. The speed is the average of 10000 times.

表 2c. 数学関数の速さ (複素数)

Speeds of Mathematical Functions
on HITAC S-810 model 20 (FORT77 / HAP)
Complex Function in FORTRAN 77

Func	Vector	Scalar	Ratio
	nsec	nsec	S/V
CEXP	375.0	13729.2	36.6
CLOG	645.8	13833.3	21.4
CSIN	437.5	15062.5	34.4
CCOS	458.3	14895.8	32.5
CSQRT	500.0	14125.0	28.3
CDEXP	395.8	17583.3	44.4
CDLOG	687.5	15979.2	23.2
CDSIN	458.3	19166.7	41.8
CDCOS	437.5	18916.7	43.2
CDSQRT	562.5	15812.5	28.1

NOTE

The value of speed is the CPU time per operation of $A(i) = \text{Func}(X(i))$. The speed is the average of 10000 times.

表 2d. 数学関数の速さ (組込関数)

Kumikomi Kansuu no Jikan Sokutei (S-810) DATE 83-11-22

Func	Vector	Ratio	Scalar
-----	-----	-----	-----
IDINT	20.8 nsec	26.0	541.7 nsec
DFLOAT	20.8 nsec	29.0	604.2 nsec
DINT	20.8 nsec	12.0	250.0 nsec
DNINT	20.8 nsec	23.0	479.2 nsec
DABS	20.8 nsec	12.0	250.0 nsec
DMOD	41.7 nsec	30.0	1250.0 nsec
DSIGN	20.8 nsec	21.0	437.5 nsec
DDIM	20.8 nsec	17.0	354.2 nsec
DMAX1	41.7 nsec	9.5	395.8 nsec
DMIN1	41.7 nsec	8.5	354.2 nsec
DBEKI	270.8 nsec	14.4	3895.8 nsec
REAL	41.7 nsec	7.0	291.7 nsec
AIMAG	20.8 nsec	13.0	270.8 nsec
CMPLX	20.8 nsec	16.0	333.3 nsec
CONJG	20.8 nsec	14.0	291.7 nsec
CABS	208.3 nsec	39.4	8208.3 nsec

FORTRAN 77 に属する組込関数の多くは高速化されているが、TAN、SINH、COSH、ARSIN、ARCCOS (単/倍精度) はベクトル化されていない。

また、77規格外のCBRT、ERF、ERFC、GAMMA、ALGAMA (単/倍精度) もベクトル化されていない。

べき乗 (**) は、単・倍精度実数及び複素数のいずれもベクトル化されている。

4倍精度関数は、4倍精度基本演算と同様、全くベクトル化されない。

DEXPはQEXPの160倍速、DSINはQSINの153倍速、DSQRTはQSQRTの59倍速である。

DMODはQMODの441倍速である。

基本演算の加速率が 約 20 ~ 60 倍速 に分布しているのに対して、数学関数の加速率が 約 10 ~ 40 倍速 に分布しているのは、数学関数の内部演算に分岐命令等の減速要因が含まれているためであろう。

IF文や間接添字を含む演算の性能については、別の機会にゆずることとし、ここでは省略する。

表3a. 数学関数の精度 (倍精度実数)

Error Bounds of Mathematical Functions on HITAC S-810/20 (FORT77/HAP) .
Real Function in FORTRAN 77 (Double Precision)

Func	Rel / Abs	Vector Processing Max.Error (place)	Ratio V/S	Range
DEXP	Rel.Error	2.031E-16 (-1.379E+01)	1.1	$ x \leq 20$
DLOG	Rel.Error	1.966E-16 (2.944E+00)	1.0	$0 < x \leq 20$
DLOG10	Rel.Error	2.296E-16 (1.162E+00)	0.9	$0 < x \leq 20$
DSIN	Rel.Error	2.020E-16 (6.360E-02)	1.0	$ x < \text{pai}/4$
	Abs.Error	2.895E-17 (-2.344E+00)	1.0	$-20 \leq x < -\text{pai}/4$
	Abs.Error	2.621E-17 (1.046E+01)	1.0	$\text{pai}/4 < x \leq 20$
DCOS	Abs.Error	2.998E-17 (-1.644E+01)	1.0	$ x \leq 20$
	Abs.Error	2.264E-17 (-8.407E-01)	1.0	$ x < \text{pai}/2$
DTAN	Rel.Error	3.298E-16 (-6.988E-02)	1.0	$ x < \text{pai}/4$
	Rel.Error	4.287E-16 (-1.877E+01)	1.0	$-20 \leq x < -\text{pai}/4$
	Rel.Error	4.177E-16 (3.075E+00)	1.0	$\text{pai}/4 < x \leq 20$
DARSIN	Rel.Error	2.050E-16 (6.543E-02)	1.0	$ x < 1/2$
	Abs.Error	2.183E-16 (-9.038E-01)	1.0	$-1 < x \leq -1/2$
	Abs.Error	2.175E-16 (8.729E-01)	1.0	$1/2 \leq x < 1$
DARCOS	Abs.Error	3.354E-16 (-6.010E-01)	1.0	$ x < 1$
DATAN	Rel.Error	2.848E-16 (1.702E+00)	1.0	$ x \leq 20$
	Rel.Error	2.210E-16 (6.990E-02)	0.9	$ x < \sqrt{2}-1$
DSINH	Rel.Error	3.289E-16 (-1.740E+01)	1.0	$ x \leq 20$
	Rel.Error	2.003E-16 (7.043E-02)	1.0	$ x < 1$
DCOSH	Rel.Error	3.231E-16 (1.748E+01)	1.0	$ x < 1$
	Rel.Error	2.079E-16 (-6.244E-02)	1.0	$ x \leq 20$
DTANH	Rel.Error	2.627E-16 (1.401E-01)	2.1	$ x \leq 20$
	Rel.Error	3.801E-16 (1.024E-01)	2.3	$ x < 1/2$
DSQRT	Rel.Error	1.768E-16 (1.222E+00)	1.8	$0 < x \leq 20$

NOTE

Rel.Error = $| \text{DFUNC}(x) - \text{QFUNC}(x) | / | \text{DFUNC}(x) |$ Abs.Error = $| \text{DFUNC}(x) - \text{QFUNC}(x) |$

DFUNC := Mathematical Function of Double Precision .

QFUNC := Mathematical Function of Quadruple Precision .

Double Precision := 64 bit data length (REAL*8)

Quadruple Precision := 128 bit data length (REAL*16)

Ratio = Max.Error (Vector) / Max.Error (Scalar) .

Max.Error is the maximum of errors for 1000 points of equi-interval .
Place shows the value of the variable (x) at which the error becomes maximum in test .

表3a~bは、数学関数の精度を示す。スカラー処理の関数に比べて、誤差限界値（最大誤差）はベクトル処理の関数の方がやや悪く、DSQRT、DTANH、SQRT、EXP、TANHなどで約2倍の性能差が出ている。しかしながら、逆にベクトル関数の誤差限界値の方が小さいものも幾つかあり、全体的には、スカラーとベクトルの関数精度は同程度

表3b. 数学関数の精度 (単精度実数)

Error Bounds of Mathematical Functions on HITAC S-810/20 (FORT77 / HAP) .
Real Function in FORTRAN 77 (Single Precision)

Func	Rel / Abs	Vector Processing		Scalar Processing		Ratio V/S
		Max.Error	(place)	Max.Error	(place)	
EXP	Rel.Error	9.390E-07	(-5.545E+00)	4.556E-07	(1.111E+01)	2.1
ALOG	Rel.Error	8.972E-07	(2.824E+00)	8.972E-07	(2.824E+00)	1.0
ALOG10	Rel.Error	8.980E-07	(1.065E+01)	1.208E-06	(1.053E+01)	0.7
SIN	Rel.Error	8.116E-07	(-7.143E-02)	7.482E-07	(-6.515E-02)	1.1
	Abs.Error	1.027E-07	(-5.496E+00)	1.389E-07	(-2.304E+00)	0.7
	Abs.Error	1.018E-07	(1.156E+01)	1.493E-07	(1.029E+01)	0.7
COS	Abs.Error	1.020E-07	(-8.868E+00)	1.351E-07	(-1.956E+01)	0.8
	Abs.Error	1.010E-07	(-5.640E-01)	1.140E-07	(7.119E-01)	0.9
TAN	Rel.Error	1.600E-06	(6.519E-02)	1.600E-06	(6.519E-02)	1.0
	Abs.Error	1.904E-06	(-1.263E+01)	1.904E-06	(-1.263E+01)	1.0
	Rel.Error	2.083E-06	(3.075E+00)	2.083E-06	(3.075E+00)	1.0
ARSIN	Rel.Error	5.770E-07	(6.345E-02)	5.770E-07	(6.345E-02)	1.0
	Abs.Error	9.483E-07	(-9.716E-01)	9.483E-07	(-9.716E-01)	1.0
	Abs.Error	9.400E-07	(9.855E-01)	9.400E-07	(9.855E-01)	1.0
ARCCOS	Abs.Error	1.245E-06	(-4.090E-01)	1.245E-06	(-4.090E-01)	1.0
ATAN	Rel.Error	8.546E-07	(1.822E+00)	1.035E-06	(1.982E+00)	0.8
	Rel.Error	9.024E-07	(-6.329E-02)	8.358E-07	(6.411E-02)	1.1
SINH	Rel.Error	8.812E-07	(-1.101E+00)	8.812E-07	(-1.101E+00)	1.0
	Rel.Error	8.058E-07	(8.830E-01)	8.058E-07	(8.830E-01)	1.0
COSH	Rel.Error	9.728E-07	(7.030E-01)	9.728E-07	(7.030E-01)	1.0
	Rel.Error	9.905E-07	(6.306E+00)	9.905E-07	(6.306E+00)	1.0
TANH	Rel.Error	3.817E-07	(1.403E-01)	2.518E-07	(1.002E-01)	1.5
	Rel.Error	8.558E-07	(-6.542E-02)	4.263E-07	(-6.742E-02)	2.0
SQRT	Rel.Error	8.156E-07	(1.242E+00)	4.157E-07	(1.062E+00)	2.0

NOTE

Rel.Error = $| \text{FUNC}(x) - \text{DFUNC}(x) | / | \text{FUNC}(x) |$
 Abs.Error = $| \text{FUNC}(x) - \text{DFUNC}(x) |$
 FUNC := Mathematical Function of single precision .
 DFUNC := Mathematical Function of double precision .

Single Precision := 32 bit data length (REAL*4)
 Double Precision := 64 bit data length (REAL*8)

Ratio = Max.Error (Vector) / Max.Error (Scalar) .

Max.Error is the maximum of errors for 1000 points of equi-interval .

The range of variable (x) is equal to the test on double precision .
 (See the Table 3a.)

であるといえる。面白いのは、高速化された関数の中で、精度の変化したものと不変のものが見られることである。例えばEXP (単・倍)、ALOG10 (単・倍)、SIN、COS、TANH (単・倍)、SQRT (単・倍)などは精度が変化しているのに対して、ALOG (単・倍)、DSIN、DCOSなどは高速化されているにもかかわらず精度不変である。

3. ピーク性能

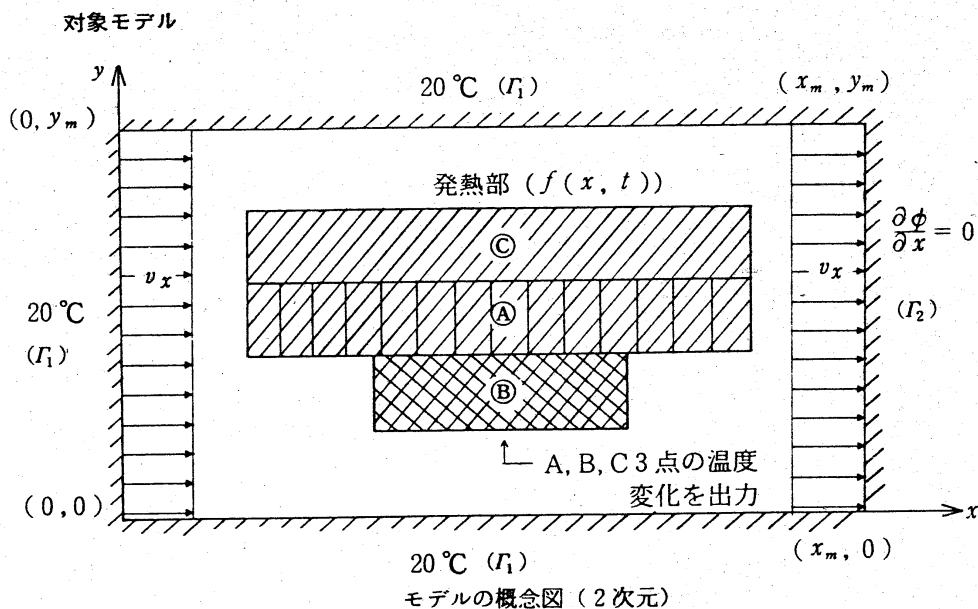
スーパーコンピュータのピーク性能は、通常、瞬間風速を表わすだけの非実用的数値といわれる。ところが、S-810モデル20の公表ピーク性能(630 MFLOPS)は、実用的価値を有する性能値であった。

東大センターに設置されたS-810/20は、2次元移流拡散方程式の直接解法プログラム(差分法)を 687 MFLOPS の速さで実行し、解を求めるのに成功した。⁸⁾ 運用方式を1多重でなく、3多重にすると、⁹⁾ 693 MFLOPS の速さ も観測されている。この速さは、FORTRANプログラムによって倍精度演算で実現されており、現存する全てのコンピュータの中で、実用上役に立つ 世界最高速 の速さとなっている。

630 → 687 MFLOPSへの向上は、マシン・サイクル、ロード・ストア・パスの強化(6 → 8本)及びコーディングの工夫による。この実用的ピーク性能を実現する問題例の概要を東大センターニュース(Vol.15, 1983, No.9・10, pp39-62)から抜粋して転載紹介する。

次に示すのは、S-810モデル20東大システムが687 MFLOPSの速さを実現した偏微分方程式問題と対象モデルの図、支配方程式及び計算結果(伝熱解析図)である。解法の詳細は先の文献を参照されたい。

到達性能 6 8 7 MFLOPS (FORTRAN倍精度)
 対象問題 非定常伝熱解析 (2次元)。熱伝導率は温度に依存する。
 解 法 中心差分で離散化し、陽解法で計算する。



支配方程式

$$\rho \frac{\partial \phi}{\partial t} - \text{div} (k(\phi) \text{grad } \phi) + v \cdot \text{grad } \phi + C (\phi - \phi_0) = f(x, t)$$

初期条件

$$\phi = 20^\circ\text{C} \quad ; \quad t = 0$$

境界条件

$$\phi = 20^\circ\text{C} \quad \text{on } \Gamma_1 \text{ (固定境界条件)}$$

$$\frac{\partial \phi}{\partial x} = 0 \quad \text{on } \Gamma_2 \text{ (自然境界条件)}$$

記号の記味

ϕ ; 温度 (未知数)

ϕ_0 ; 冷却媒体温度 (20°C)

t ; 時刻

$k(\phi)$; 熱伝導係数 (温度 ϕ に依存)

$f(x, t)$; 発熱量

C ; 熱伝達係数 (定数)

(場所と時刻に依存) $v = (v_x, v_y)^T$; 流速 (v_x は定数, v_y は 0.0)

離散化された2次元モデルは、 $511 \times (201-2)$ の格子長上で逐次的に物理量が計算されるわけだが、ベクトル処理を有効に働かせるために、配列を一次元化して 10^5 のループ長で計算処理するコーディングになっている。

$\phi(x, y)$ [illegible]

S-810モデル20は、ベクトル演算器を12個もち、
1マシンサイクル当り最大12個並列で演算パイプラインが
動く。従って、理論ピーク性能は

$$\frac{12}{\text{マシンサイクル(秒)} \times 10^6} = \frac{12 \times 10^3}{\text{マシンサイクル(ナノ秒)}} \text{ MFLOPS}$$

$$= 800 \text{ MFLOPS}$$

(マシンサイクル = 15ナノ秒)

となる。東大システムは、マシンサイクルが向上し、実際の
理論ピーク性能は 857 MFLOPS である。しかし
、この性能はまず実現不可能であり、我々は次のプログラム

```

DO 3 I=1,N
  S1=S1+(A(I)+B(I))*2
  S2=S2+(A(I)-B(I))*2
  S3=S3+(C(I)+D(I))*2
  S4=S4+(C(I)-D(I))*2
3 CONTINUE

```

で、 $N = 4 \times 10^5$ の場合に

751 MFLOPS

の実測最高速の速さを観測した(1983年11月1日午前5時)。

これは、倍精度(64ビット)演算で現存する世界最高速で
ある。従来の記録は CDC Cyber 205 の 400 MFLOPS
弱(及び Cray X-MP の約 400 MFLOPS)である。ちなみに
に、CRAY-1の実測最高速は 141 MFLOPS が知られる。

4. 線型計算の性能

S-810における、連立一次方程式と固有値問題の求解プログラム性能を若干紹介する。(表4参照)

300元の対称実行列の連立一次方程式では、およそ

$$\text{NOIAP} \xrightarrow[\text{vector}]{4\text{倍}} \text{IAP} \xrightarrow[\text{hardware}]{4\text{倍}} \text{S-810} \xrightarrow[\text{coding}]{4\text{倍}} \text{S-810}$$

となる。HDLPPM (MATRIX/HAPライブラリ⁹⁾の性能は約300 MFLOPSである。

200元の固有値問題(全固有値・固有ベクトル)では、2分法の部分がベクトル化の障害であったが、HDES1M (MATRIX/HAPライブラリ)では並列2分法によって障害を乗り越えている。多項演算に強いS-810には、QR法がよく適合する。

表4. 線型計算に対するS-810/20の性能例.

Table 4. Comparison of Through-put on Linear Algebraic Problems.

	Subroutine Name	HITAC M-280H		HITAC S-810 model 20	NOTE (Method)
		NOIAP	IAP		
		sec	sec	sec	
Linear	¥DLF1M	4.180	1.248	0.327	Gauss elim.
Equ-	¥DLK1M	4.170	1.257	0.330	Block Gauss
ation	¥DLF2M	2.105	0.565	0.188	Mod.Cholesky
(300)	DLNSN3	15.093	10.727	7.503	Gauss Jordan
(x)	HDLPPM	-----	-----	0.062	S-810 method
(300)					(M.Chol.type)
		sec	sec	sec	
Eigen	¥DEF2M	11.655	5.423	3.483	Hous/Bis/Inv
Value	¥DEF1M	8.347	5.152	1.042	Doub.QR/Inv
Problem	DEIGN1	113.903	108.588	97.518	Jacobi
(200)	¥DEF6M	14.012	7.505	2.250	Hous/QL
(x)	HDES1M	-----	-----	0.832	S-810 method
(200)					(Hous.type)
Observation Date		82.11.13		83.11.7	
Computer Center		Univ.Tokyo		Univ.Tokyo	

NOTE

The resolved matrix is the dense matrix of double precision, for example, the Frank's matrix of $A(i,j)=N+1-\text{Max}(i,j)$.

5. 行列演算における S-810 高速化技法

行列の和及び積について、S-810 高速化技法の例を紹介する。高速化の主な技法を次に掲げる。

a) 演算器の並列利用

b) ループ長の拡大

c) リストベクトル (間接添字) の活用

表5a. S-810 高速化技法 (行列の和)

Table 5. Speed-up Technique for S-810 model 20.

	DO loop		Speed
1	DO 1 J=1,N DO 1 I=1,N C(I,J)=A(I,J)+B(I,J) CONTINUE	HAP HAP (PP)	18.00 MFLOPS 21.60 MFLOPS
2	DO 2 J=1,N,2 DO 2 I=1,N C(I,J)=A(I,J)+B(I,J) C(I,J+1)=A(I,J+1)+B(I,J+1)	HAP HAP (PP)	28.80 MFLOPS 33.23 MFLOPS
3	DO 3 J=1,N,3 DO 3 I=1,N C(I,J)=A(I,J)+B(I,J) C(I,J+1)=A(I,J+1)+B(I,J+1) C(I,J+2)=A(I,J+2)+B(I,J+2)	HAP HAP (PP)	39.27 MFLOPS 36.00 MFLOPS
4	DO 4 J=1,N,4 DO 4 I=1,N C(I,J)=A(I,J)+B(I,J) C(I,J+1)=A(I,J+1)+B(I,J+1) C(I,J+2)=A(I,J+2)+B(I,J+2) C(I,J+3)=A(I,J+3)+B(I,J+3)	HAP HAP (PP)	39.27 MFLOPS 39.27 MFLOPS
5	DO 5 K=1,N*N CC(K)=AA(K)+BB(K) CONTINUE	HAP HAP (PP)	54.00 MFLOPS 144.00 MFLOPS
6	*VOPTION VEC DO 6 K=1,N*N I=II(K); J=JJ(K) C(I,J)=A(I,J)+B(I,J) CONTINUE	HAP HAP (PP)	21.60 MFLOPS 25.41 MFLOPS
7	N2=N*N/2 DO 7 K=1,N2 CC(K)=AA(K)+BB(K) CC(K+N2)=AA(K+N2)+BB(K+N2) CONTINUE	HAP HAP (PP)	108.00 MFLOPS 144.00 MFLOPS

NOTE N is equal to 30 in the above DO loops (N = 30).
The test was done on HITAC S-810 model 20, at Computer Centre, University of Tokyo, in Nov.15, 1983.

表5a

に、行列

の和にお

ける技法

適用例を

示す。

ル-7°1.....

原型

ル-7°2~4...

技法a

ル-7°5.....

技法b

ル-7°6.....

技法c

(及びb)

ル-7°7.....

技法bとa

備考

PPは技法a

の自動化。

(ベクトル・モード)
(ライン・モード)

表5b. S-810 高速化技法 (行列の積)

Table Speed-up Technique for S-810 model 20 .

	DO loop	Speed
1	DO 1 J=1,N DO 1 I=1,N C(I,J)=0.D0 DO 1 K=1,N C(I,J)=C(I,J)+A(I,K)*B(K,J) CONTINUE	HAP 21.65 MFLOPS HAP (PP) 21.02 MFLOPS
222	DO 2 J=1,N DO 222 K=1,N C(K,J)=0.D0 DO 2 I=1,N DO 2 K=1,N C(K,J)=C(K,J)+A(K,I)*B(I,J) CONTINUE	HAP 32.08 MFLOPS HAP (PP) 39.33 MFLOPS
333	DO 3 J=1,N,2 DO 333 K=1,N C(K,J)=0.D0 C(K,J+1)=0.D0 DO 3 I=1,N DO 3 K=1,N C(K,J)=C(K,J)+A(K,I)*B(I,J) C(K,J+1)=C(K,J+1)+A(K,I)*B(I,J+1) CONTINUE	HAP 37.62 MFLOPS HAP (PP) 30.64 MFLOPS
444	DO 4 J=1,N,2 DO 444 K=1,N C(K,J)=0.D0 C(K,J+1)=0.D0 DO 4 I=1,N,2 DO 4 K=1,N C(K,J)=C(K,J)+A(K,I)*B(I,J)+A(K,I+1)*B(I+1,J) C(K,J+1)=C(K,J+1)+A(K,I)*B(I,J+1)+A(K,I+1)*B(I+1,J+1) CONTINUE	HAP 101.65 MFLOPS HAP (PP) 93.24 MFLOPS
666	DO 666 J=1,N,2 DO 666 I=1,N,2 S1=0.D0 ; S2=0.D0 ; S3=0.D0 ; S4=0.D0 DO 6 K=1,N S1=S1+A(I ,K)*B(K ,J) S2=S2+A(I+1,K)*B(K ,J) S3=S3+A(I ,K)*B(K ,J+1) S4=S4+A(I+1,K)*B(K ,J+1) C(I,J)=S1 ; C(I+1,J)=S2 C(I,J+1)=S3 ; C(I+1,J+1)=S4	HAP 61.42 MFLOPS HAP (PP) 44.46 MFLOPS

NOTE N is equal to 30 in the above DO loops (N=30) .
 The test was done on HITAC S-810 model 20, at Computer
 Centre, University of Tokyo, in Nov.15, 1983 .

表5b は

行列の積への適用例である。

ループ1.....
 原型
 (内積型)

ループ2.....
 ストア型
 (積和型)

ループ3~4...
 ストア型と
 技法a

ループ6.....
 内積型と
 技法a

備考
 PPは技法a
 の自動化。

(行列の積

の一次元化
 (技法b)

は省略した。

この例は、原型のループ長が30なので、技法bが最も効果的である。行列の和ではループ5 (PPモード)、行列の積ではループ4 (NOPPモード) が最高速であり、原型コードの約8倍及び約5倍、スカラーの約36倍及び約22倍である。

6. スーパーコンピュータの性能比較

表6 a~bに、各種の高速機における基本演算の性能比較
(スカラー処理速度及びベクトル処理速度)^{6,10)}を示す。

ベクトル処理では、S-810が10.nsecを切って世界最高速にある。S-810は、浮動小数点加算でCRAY-1の5倍速、チェイニング効果(No.10)でCRAY-1の5.7倍速、SIN関数でCRAY-1の2倍速である。除算もCRAY-1の4.4倍速である。基本演算のベクトル処理速度で、S-810/20は
CRAY-1の4~5倍高速である。

スカラー処理では、S-810はM-382に一歩及ばない。しかし、CRAY-1の約2倍速、Cyber 205の約1.4倍速である(浮動小数点加算)。

リバモアループの性能比較を表7 a~bに示す。S-810の性能値は、昨年10月公表時より若干向上している。リバモア平均速度でS-810が100MFLOPSを大幅^{*}に超えている。
(^{*}最近最大で、150MFLOPSを超えた。)

CRAY-1及びCyber 205の最高性能の約4倍で、世界最高速クラスにある。この平均速度は、基本演算16ループのループ長300における平均速度にほぼ対応する。

表7bは、リバモアループのコーディング変更による性能向上の度合を示す。国産機の「自動ベクトル化」=「バカチョン性」の優位が窺える。

表6a. 基本演算性能の比較 (ベクトル処理)

Table Comparison of through-put between Very High-Speed computers.
Vector Processing for Basic Operations.

No.	DO loop	Through-put (CPU time)				
		CRAY-1	HITAC M-280H IAP	NEC ACOS1000 IAP	CDC Cyber205 2 pipes	HITAC S-810 model 20
		nsec	nsec	nsec	nsec	nsec
1	A(i)=1.	31.3	32.8	131.0	11.1	8.5
2	A(i)=B(i)	31.3	30.7	131.0	11.9	9.1
3	A(i)=B(i)+10.	32.5	29.8	132.0	12.0	9.2
4	A(i)=B(i)+C(i)	46.2	41.6	130.0	11.7	9.2
5	A(i)=B(i)*10.	32.5	31.0	133.0	11.9	9.4
6	A(i)=B(i)*C(i)	46.2	43.9	130.0	11.6	9.2
7	A(i)=B(i)/10.	46.2	32.2	1022.0	11.9	9.4
8	A(i)=B(i)/C(i)	90.0	425.7	1021.0	33.4	20.6
9	A(i)=SIN(B(i))	392.5	2270.1	4443.0	1047.5	196.3
10	A(i)=B(i)*C(i)+D(i)	62.5	96.5	273.0	23.1	11.0
Observation Year		1977	1982	1982	1982	1983
Date		Ref.6	Sept.10	July	Oct.	Oct.31
Place		Cray Inc.	U.Tokyo	U.Tohoku	CDC	U.Tokyo
Data Length (bits)		64	32	36	64	64

NOTE

The through-put value is the CPU time per operation for each DO loop of loop length 1000 .

表6b. 基本演算性能の比較 (スカラー処理)

Table Comparison of through-put between Very High-speed Computers .
Scalar Processing for Basic Operations .

No.	DO loop	Through-put (CPU time)				
		FACOM M-382	NEC ACOS1000	HITAC S-810/20	CRAY-1	CDC CYBER205
		nsec	nsec	nsec	nsec	nsec
1	A(i)=1.	135.8	249.0	169.3	281.2	240.4
2	A(i)=B(i)	197.0	317.0	196.8	387.5	341.3
3	A(i)=B(i)+10.	212.0	318.0	252.7	462.5	320.3
4	A(i)=B(i)+C(i)	209.6	361.0	253.2	512.5	361.0
5	A(i)=B(i)*10.	213.4	354.0	308.6	475.0	320.1
6	A(i)=B(i)*C(i)	212.7	384.0	309.1	525.0	360.6
7	A(i)=B(i)/10.	471.4	1022.0	308.8	650.0	320.2
8	A(i)=B(i)/C(i)	467.0	1036.0	709.4	750.0	1180.2
9	A(i)=SIN(B(i))	1976.7	2644.0	3020.5	2476.2	3982.8
10	A(i)=B(i)*C(i)+D(i)	270.2	477.0	364.8	650.0	380.2
Data Length (bits)		32	36	64	64	64
Observation Year		1982	1982	1983	1977	1982
Date		Sept.6	July	Oct.31	Ref.6	Oct.
Place		U.Kyoto	U.Tohoku	U.Tokyo	Cray Inc.	CDC

NOTE

The through-put value is the CPU time per loop (loop length 1000) .

表7a リバモアル-7°性能の比較

Table Lawrence Livermore Loops on Very High-speed Computers .
(Revised for machine-oriented)

NO.	DO LOOP	CDC Cyber205 2pipes	Cray CRAY-1	HITAC S-810 model20	HITAC M-280H MP	NEC ACOS-1000 model40
		AP MFLOPS	AP MFLOPS	AP MFLOPS	IAP MFLOPS	IAP MFLOPS
1	Hydro excerpt	79.1	70.3	248.1	25.4	12.7
2	MLR, Inner pro.	88.0	48.1	326.5	32.0	14.1
3	Inner product	88.0	66.8	309.7	32.0	14.1
4	Banded lin. eq.	12.2	39.6	105.1	17.9	13.4
5	Tri-diag. el.(b)	5.6	7.8	34.9	8.1	7.4
6	Tri-diag. el.(a)	6.5	6.5	35.6	8.4	11.3
7	Eq. of state ex.	51.0	82.5	259.6	22.0	13.5
8	P.D.E. integrat.	15.7	41.9	111.5	10.6	9.2
9	Integer predict.	47.3	80.1	226.0	14.1	11.6
10	Difference pred.	23.5	20.5	62.0	3.8	2.4
11	First sum.	7.6	5.8	36.1	6.5	5.7
12	First diff.	86.2	23.1	101.1	15.5	8.1
13	2-D p. pusher	2.0	3.6	7.6	1.6	1.9
14	1-D p. pusher	4.3	7.2	12.1	2.5	3.1
Average		36.9	36.0	134.0	14.3	9.2
Data Length (bit)		64	64	64	32	36
Observation Date		82.10.	81.	83.11.19	82.5.24	82.8.26
Computer Center		CDC Min.	Cray Inc.	Hitachi	U.Tokyo	U.Tohoku

Average = Total sum of each MFLOPS / Number of LOOPS (14)

NOTE

The MFLOPS values were obtained by averaging tests of 10000 times ,
except for CRAY-1 test of 1000 times .

AP=Array Processor . IAP=Integrated Array Processor .

MP=Multi-Processor .

表7b リバモアル-7°の性能向上度の比較

Table Comparison of Mean Speed between Array Processors .

Machine Name		Through-put			Ratio
		original	fastest	natural	ori/fast
		MFLOPS	MFLOPS	MFLOPS	%
Cray	CRAY-1	26.23	35.99	24.60	72.9
CDC	Cyber 205	26.36	36.93	-----	71.4
HITAC	S-810 / 20	109.29	133.99	109.66	81.6
HITAC	M-280H IAP	11.57	14.32	13.64	80.8
NEC	ACOS-1000 IAP	7.31	9.18	7.78	79.6

NOTE

The through-put value is the average of MFLOPS's for the Lawrence Livermore Laboratory's 14 kernels .

7. 結 び

国産初のスーパーコンピュータ S-810 モデル 20 の性能調査例を通じて、このプレイプロセッサの特徴をながめてみた。

基本演算・数学関数及び応用演算において、優秀な性能が達成されている。基本演算ではループ長 300 が S-810 本性能発揮の目安となるが、現状のユーザ・プログラムはその長さを下回る例が多く、高速化に対しては「一定の工夫」が必要となる。数学関数では、TAN、SINH、COSH 等の ANS 77 規格内の関数は総てベクトル化されるのが望ましい。スカラー処理の高速化も切望される。

調査の外では、チューニング支援ソフト VE と TIEZER とコンパイラ実行能力の間にまだ差がある。これは無くして欲しい。しかしながら、11月公開後の東大センターの S-810 利用状況を見る限り、スーパーコンピュータの利用効率は非常に高い。推定ベクトル化率は 88% である（下表参照）。

S-810 ジョブ処理状況（東大）

	処理件数(大型ジョブ)	S-810利用率 %	VPU利用率 %	推定ベクトル化率 %
11 月	4,242 (286)	59.4	40.4	87.1
12 月	3,901 (334)	85.3	43.1	88.3

$$\text{備考} \quad \text{VPU利用率} = \frac{\text{S-810全VPU時間}}{\text{S-810全CPU時間}} \times 100$$

$$\text{推定ベクトル化率} = \frac{\text{VPU利用率} \times \text{加速率} \times 100}{(1 - \text{VPU利用率}) + \text{VPU利用率} \times \text{加速率}}$$

（加速率 = 10 と仮定 …… ループ長 50 レベル）

これは、コンパイラの自動ベクトル化能力の高さと、ユーザ教育の効果が相乗されたと見ることができる。その上に、センターの運用方式等によるベクトル化推進効果が加わった結果の高率と思われる。S-810利用度は向上の一途をたどっている。

スーパーコンピュータへの関心と要望は全国に広がりつつあるといえよう。

8. 終りに

S-810の〔製作及び〕性能調査に関して、一方ならぬ御協力を戴いた日立製作所神奈川工場・ソフト工場・同技術センター・中央研究所・ファコムハイテック社並びに日立電子サービスの関係者多数に対して厚く御礼申し上げます。特に、森田・小高・河辺・青山・石井（神奈川工場）、青山・後・高貫（ソフト工場）、堀越・梅谷・安村（中央研究所）並びに坂本・村井・原田（FHL）の各氏に対し、深く感謝の意を表します。また、統計についてセンター業務掛の諸氏、特に、香田氏の御協力を戴きました。その他、センター内外の多数の方々の御指導・御協力を得ましたことを申し添えます。

参考文献

- 1) 東京大学大型計算機センター「年報」第1～13号(昭和46～58年)。
- 2) 木村友則; 東京大学大型計算機センターニュース, Vol.15 (1983) No.7, p.25.
- 3) 唐木幸比古, 東京大学大型計算機センターニュース, Vol.15 (1983) No.9・10, p.27.
- 4) HITAC S-810 処理装置, 6010-2-001 (昭和58年9月、日立製作所)。
- 5) HITAC S-810 アレイプロセッサ 機能説明書, 6010-2-002 (昭和57年8月、日立製作所)。
- 6) R. M. Russell, Comm. ACM, 21 (1978) 63.
- 7) HITAC プログラムプロダクト, VOS2・VOS3 最適化FORTRAN77、HAP FORTRAN77 使用の手引, 8080-3-258-50 (昭和58年10月、日立製作所)。
- 8) 唐木幸比古, 東京大学大型計算機センターニュース, Vol.15 (1983) No.9・10, p.39.
- 9) 行列計算用副プログラムライブラリMATRIX/HAP, 8090-7-035 (昭和58年10月、日立製作所)。
- 10) 唐木幸比古, SUPERCOMPUTER WORKSHOP REPORT1, (JUNE, 1983, 分子科学研究所), p.24.