

# 長期的気候変動予測のための高精度気候モデルの開発研究

課題責任者

河宮 未知生 海洋研究開発機構 地球環境部門 環境変動予測研究センター

著者

羽島知洋<sup>\*1</sup>, Wing-Le Chan<sup>\*2</sup>, 齋藤冬樹<sup>\*1</sup>, 河谷芳雄<sup>\*1</sup>, 河宮未知生<sup>\*1</sup>

<sup>\*1</sup>海洋研究開発機構 地球環境部門 環境変動予測研究センター

<sup>\*2</sup> 東京大学大気海洋研究所

これまで ES3 で開発・運用してきた地球システムモデル MIROC-ES2L/H を ES4 に移植・最適化するための作業を行ない、同プロセス数を使用した時の 1 年積分に要する時間をおよそ半分程度にすることができた。

MIROC4m を ES4 で長期積分した。移植のためにいくつかの修正を実装したところ、長期のモデルの振る舞いに関して ES3 と相違ない結果が得られることを確認した。

MIROC の基盤ライブラリを改良し、特にデータ圧縮時の格納速度の向上を実現できた。

MIROC モデルを含む気候モデル群を用いて、成層圏赤道準 2 年振動が熱帯対流圏界面域へ与える影響を調べた。

キーワード：地球システムモデル, 古気候モデリング, 気候モデル基盤ライブラリ

## 1. 地球システムモデル MIROC-ES2H の ES4 への移植・最適化

これまで地球シミュレータ第三世代(以下 ES3)で開発・運用されてきた地球システムモデル MIROC-ES2H を、本年度から運用の開始された、地球シミュレータ第四世代(以下 ES4)のベクトルエンジンノードにおいて実行できるよう各種改修作業を行った。本モデルは、大気海洋結合気候モデル MIROC6 をベースとし、さらに陸域生態系・物質循環モデル VISIT、海洋生態系・物質循環モデル OECO2、大気化学輸送モデル CHASER が結合されている。本モデルをコンパイルすると、高解像度大気モデル(含む海洋生態系・物質循環モデル)、低解像度大気モデル(含む大気化学輸送モデル)、海洋モデル(含む海洋生態系・物質循環モデル)の計 3 つの実行バイナリが生成され、これを MPMD 方式で実行する。以下、本モデルでの ES4 移植作業で必要になった作業を簡単にまとめる。

まず、該当モデルの一部 IO では、ネイティブエンディアンに従って記述されるバイナリデータ(陸域生態系・物質循環モデルのリスタートファイル)を使用しているため、このバイトオーダー変換を行うためのツール開発を行った。また、ES4 ではコンパイラも一新されており、新たなコンパイラによって顕在化するようになった各種バグ修正(コンパイルエラーおよびランタイムエラー)を行なった。また、コンパイラ変更によって生じた大きな問題の一つとして、構造体のアライメントの変更があった。陸域生態系・物質循環モデルは C 言語で記述され構造体を使用しているが、この構造体を Fortran プログラムと共有する際に、構造体リストのメモリ上配置(アライメント)が ES3 の頃と変わっており、ランタイムエラーが生じるというものであった(SEQUENCE 文の記述により問題解消)。他にも、これまで数秒で完了していた一部ソースコードファイルのコンパイル時間が ES4 では 10 分程度要してしまうことが判明し、コード生成モジュールの最適化情報

リストを出力しないためのオプション等を導入することによりこれを回避した。

最適化向け作業では、ES3 向けのコンパイラ指示行を nfdirconv によって一斉置換した後に、力学コア等の最適化導入済みコード(physics, dynamics 等)を MIROC から MIROC-ES2H に移植した。その後、ftrace 情報の取得と、フロップカウントに基づく最適ノードバランスを推定し、合計 120 プロセスエレメントを、大気高解像度モデル:大気低解像度モデル:海洋モデル=64:32:24 と割り当て、合計 15VE を使用して動作させるようにした。これらの作業の結果、ES3 では約 8 時間要していた 1 年積分が、ES4 では最終的に約 3 時間 40 分で実施可能になり、高いスループットを得られるようになった。なお MIROC では、1 年積分ごとにジョブをいったん終了させ、終了時に生成したリスタートファイルを初期値として次年のためのジョブをキューにサブミットする。このため、複数年の数値実験を行うためには自動でジョブをサブミットし続けるためのスクリプトが必要であるが、ES4 向けにこれを関係者とともに修正し、使用できるようにした。

## 2. 地球システムモデル MIROC-ES2L の ES4 への移植・最適化

前節の報告と同様に、これまで ES3 で開発・運用されてきた地球システムモデル MIROC-ES2L を、ES4 のベクトルエンジンノードにおいて実行できるよう各種改修作業を行った。本モデルは、前節で説明したモデルと異なり、大気海洋結合気候モデル MIROC5.2 をベースとしており、さらに陸域生態系・物質循環モデル VISIT、海洋生態系・物質循環モデル OECO2 が結合されたものである。本モデルをコンパイルすると、大気モデル(含む海洋生態系・物質循環モデル)と海洋モデル(含む海洋生態系・物質循環モデル)の計 2 つの実行バイナリが生成され、これを MPMD 方式で実行する。以下、本モデルでの ES4 への移植で必要に

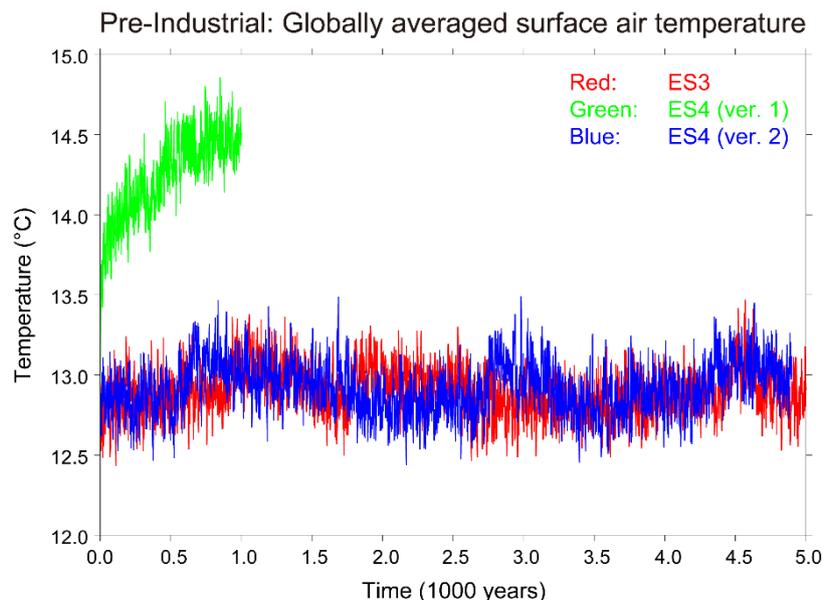


図 1. 気候モデル MIROC4m を用いた長期積分の実験例。ES3 での実験結果（赤）と初期条件およびその他の設定を同一にした、二つの異なるバージョンを用いた ES4 での実験結果（緑と青）。

なった作業を簡単にまとめる。

まず、MIROC-ES2H に導入した変更内容を、MIROC-ES2L に対しても導入した。この時、新しいコンパイラによって顕在化するようになった各種バグ修正を行なった。本モデルは合計 160PE を使用するが、これを大気モデル:海洋モデル=32:128 として割り当てつつ、3 つの論理ホスト (20VE) 上で動かすようにした。また、速度低下を引き起こすソースコードの削除・修正や、出力変数の抑制により、ES3 では 1 年積分あたり約 70 分程度で動作していたものが 30 分強で積分可能となった。

### 3. 古気候・長期積分用気候モデル MIROC4m の ES4 での運用

大気海洋結合気候モデル MIROC4m は MIROC6 および MIROC5.2 の前身である MIROC3.2 を元に開発された気候モデルで、古気候モデリングを中心とした 1000 年を超える長期積分への応用を主に課題として運用されている。これまで ES3 で開発・運用されてきた MIROC4m を、ES4 で運用し結果の再現性と違いを報告する。

いくつかの気候条件下で追試と比較を行ったが、本稿では Pre-Industrial (PI) 実験に限って報告する。

図 1 は PI 実験の結果の一例である。全球平均の地表気温の時系列を示し、ES3 での実行結果 (赤) と二つの ES4 での実行結果 (ver. 1 および ver. 2, 緑と青) を表している。ES4 の二つの実行の違いは、環境の違いにより今回顕在化したいくつかのバグ修正に加え、モデルのコンパイラオプション、実行スクリプトなどである。Ver. 1 では気温において ES3 の実験結果からの急激な乖離が生じ、少なくとも 1.5K の温暖化が表れていることが示されている。特に大西洋でこの温暖化が顕著であった。一方いくつか

の改修作業を施した Ver. 2 では ES3 の結果と相違ない結果となった。南大洋の一部の領域で再現された海洋の温度に変動が見られたが、全球および領域平均の地表気温に関して、数千年間の平均のける ES3 と ES4 の結果の違いはごく小さいことが明らかとなった。いくつかの細かな課題が残っているが、本結果から、ES4 での MIROC4m の長期積分は ES3 の結果と相違ないと考えられる。

### 4. MIROC 基盤ライブラリの移植と最適化

気候モデルの長期積分や高解像度化の効率的な運用のためにはいくつかの技術的な課題がある。本節ではその内いくつかをまとめて報告する

#### 4.1. 並列化球面調和関数ライブラリ Flageolet の移植

本課題では、並列化球面調和関数ライブラリ Flageolet の開発を行ってきたが、これは大気モデルの領域分割の自由度を向上することによる高解像度化の支援を目的とする。昨年度までは特にベクトル機向けの開発を行ってきたが、ES4 での運用に向けてスカラー機向けの開発を並行して行ってきた。本年度 ES4CPU の開始に合わせて Flageolet の試験運用を行った。その結果 ES4CPU でも、計算速度について実用上問題なく実行できることが確認された。一方 ES4GPU での試験運用は今後の課題である。

#### 4.2. データ圧縮で用いる整数 bit 演算の最適化と高速化

モデルの高解像度化、複雑化、積分時間の拡大などにより出力データの容量が肥大化することが技術的な課題の一つである。その問題の緩和のため、データ圧縮を行うこと

がしばしばある。典型的には 32 (64) ビットの実数を情報の粒度を下げることで任意のビット数で表現される整数に変換しそれを無駄なく 32 ビットの整数に詰め込むことで全体のデータ量を減少させる方法などが考えられる。MIROC にもその機能は実装されており、1 から 31 ビットの一様のビット数の整数で表される配列を 32 ビット整数の配列に隙間なく詰め込む実装となっている。また詰め込みは配列の先頭から要素順に新配列に格納する方法となっており、それに応じたアルゴリズムの設計と最適化が行われている。

本年度はその格納方法自体と詰め込み手法を再検討し、ES4 での計算速度を比較した。図 2 と図 3 が従来手法と今回実装した別の手法の模式図である。従来の格納方法ではいくつかの効率の違う実装が考えられるが、新しい格納方法では長さ L の要素 306E 飛びのない配列を用いたベクトル演算を単純に 4 回行うことで実現できる。

表 1 に代表的な例を選んで示す。1 ビット配列の詰め込みを除き、特に要素数が大きい場合に新しい格納手法が MIROC の従来の手法に比べても著しく実行速度が向上したことが分かった。また、従来の格納方法を継承した場合でも、さらに速度を向上することが可能であることが明らかとなった。

#### 4.3. その他

ES3 と ES4 のシステムの大きな違いの一つは、1 節でも触れたがバイトオーダの違いである。それに依拠して移植にはなんらかの方法でバイナリデータを変換する必要がある。最も簡便な方法はシステムで用意されている、実行時の環境変数による指定であり、この場合はユーザ側でデータの変換をする必要がない。しかしこの方法は負荷が大きく、許容しがたい実行時間の増加が見られた。そこで ES サポートの協力の元、バイトオーダ変換サブルーチンを実装し ES4 で試験を行った。データの大きさに依存するが、環境変数によるバイトオーダ変換は概ね入出力全体で 2.6 倍の時間がかかっていた。一方、新しく実装した手法で 1.1 倍程度にまで著しく軽減させることに成功した。

一方、別の観点からのこの課題の解決を同時に進めた。上記の手法でもバイトオーダの変換のコストは一定量残っているが、バイトオーダを現行機に合わせた実験を行うにはユーザによるデータの変換が必要で、人為的な誤りが起こりやすい危惧がある。そこで、新たに MIROC 内でデータのバイトオーダの自動判別、自動変換を行う仕組みを開発・実装した。仕組みは単純である。MIROC で用いる独自のデータ格納方式は、多くの Fortran コンパイラで採用されている、書式なし逐次入出力のレコード方式である。各データはメタ情報を格納したヘッダレコードが付随していて、その大きさはほぼ一定である。従って外部ファイルにある、レコードの大きさを表すバイナリ表現を特定出来れば、それによってファイル（より厳密にはレコード）のバイトオーダを判別することが可能である。Fortran 2003 で導入された Stream 入出力機能を用いる

ことで Fortran の範囲内で実装することが可能である。この機能をライブラリとして実装し、単純なプログラムを用いた試験を行ったところ、どちらのバイトオーダでも、実行時の特別な設定なしで正しく読めることが確認できた。今後はこれを MIROC に導入し実行支援を図る予定である。

```

0   [ 0 ][ 1 ][ 2 ][ 3 ]
1   [ 4 ][ 5 ][ 6 ][ 7 ]
2   [ 8 ][ 9 ][10][11]
.....
L-1 .... [M-1]

```

図 2. 従来の MIROC で採用されている整数詰め込み手法の模式図。要素数 M の 8 ビット整数配列を要素数 L の 32 ビット整数配列に格納する例。一行が 32 ビット整数配列を表し、[i] がもとの 8 ビット整数の i 番目の値に相当する。

```

0   [ 0 ][L+0][2L+0][3L+0]
1   [ 1 ][L+1][2L+1][3L+1]
2   [ 2 ][L+2][2L+2][3L+2]
.....
L-1 [L-1][2L-1]

```

図 3. 本課題で新規に実装された、整数詰め込み手法の模式図。要素数 M の 8 ビット整数配列を要素数 L の 32 ビット整数配列に格納する例。図 2 との違いは i 番目の元の値が格納される場所であり、縦横転置されている。

表 1. 整数格納手法の違いによる実行速度の違いの例。項目はそれぞれ b がもとのビット数、n が配列の要素数、pack, seq, str, trn がことなる手法でのある回数の変換を行った場合の合計の計測結果(秒)である。前者の三つが MIROC で採用された従来の手法、trn が転置による実装となっている。また pack が MIROC で実際に採用されている最適化された手法、seq, str が単純なベクトル演算による二つの手法である。変換回数は b 毎にことなるため、b が同じ場合のみに比較可能である。

b	n	pack	seq	str	trn
1	100	0.332	1.752	2.276	1.259
1	1000	0.348	13.156	2.462	1.264
1	10000	0.680	127.340	3.500	2.650
1	100000	3.900	1271.500	9.400	8.000
8	100	0.187	10.310	1.283	0.614
8	1000	0.187	101.781	1.293	0.621
8	10000	4.920	1016.750	2.260	1.060
8	100000	51.700	10188.500	10.700	8.000
24	100	0.187	12.173	1.877	0.686
24	1000	1.202	120.557	1.901	0.714
24	10000	17.910	1207.700	3.310	1.430
24	100000	182.700	12071.000	15.200	10.000

## 5. 気候モデルを用いた成層圏赤道準2年振動が熱帯対流圏界面域へ与える影響の調査

MIROC モデルを含む、QBO 気候モデル比較国際プロジェクト (QBOi) に参加した 13 の気候モデルを用いて、熱帯対流圏界面活性剤層 (TTL) の気候学的状態と時空間変動を解析した。これらの全てのモデルで、赤道成層圏準2年振動 (QBO) を再現しており、TTL に対する QBO の影響を調べることが可能である。

QBOi マルチモデルアンサンブル平均で見ると、熱帯対流圏界面付近まで QBO に伴う温度偏差が見られ、QBO 位相によって圏界面温度が変調されることが示された。すなわち、上部対流圏から下部成層圏へと輸送されていく水蒸気は熱帯圏界面温度の影響を強く受けるため、成層圏へ輸送される水蒸気も QBO によって変調される。

QQBO にとまなう 2 次循環は西風で下降流、東風で上昇流となり、それぞれ高温、低温偏差をもたらす。さらにこの偏差は亜熱帯域まで及ぶことが知られている。QBOi モデルで表現される QBO 振幅は一般に下部成層圏で弱く、観測値に比べ上方へシフトし、緯度方向には狭くなっていた。QBO 振幅の小ささや残渣循環の弱さと連動して、QBO に伴う赤道上部対流圏温度偏差は現実的であるものの、再解析データよりも小さく、ほとんどのモデルで亜熱帯下層大気に向かってそれほど広がっていない。この偏差の強さは帯状風や残渣循環の大きさと相関があり、どちらもほとんどのモデルで過小評価されていることが分かった。

次に対流圏界面気圧と熱帯降水量に対する QBO の影響について解析を行った。対流圏界面気圧の変化は再解析に比べて小さく、降水量偏差も弱い。ほとんどのモデルは、赤道域や亜熱帯の成層圏下部の温度応答を観測値より弱く再現し、対流圏界面気圧や熱帯降水量の変調も同様に、一般に過小評価されることが分かった。これらの欠点は、水平・鉛直解像度、積雲や非地形性重力波のパラメタリゼーションなどに問題があると思われ、今後さらなる実験・解析が必要となる。

# Development Research of a High-quality Climate Model for Long-term Climate Change Projection Study

Project Representative

Michio Kawamiya

Research Center for Environmental Modeling and Application,  
Research Institute for Global Change, Japan Agency for Marine-  
Earth Science and Technology

Authors

Tomohiro Hajima\*<sup>1</sup>, Wing-Le Chan\*<sup>2</sup>, Fuyuki Saito\*<sup>1</sup>, Yoshio Kawatani\*<sup>1</sup>, Michio Kawamiya\*<sup>1</sup>

\*<sup>1</sup> Research Center for Environmental Modeling and Application, Research Institute for Global Change, Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology

\*<sup>2</sup> Atmosphere and Ocean Research Institute, The University of Tokyo

We have ported and optimized Earth system models “MIROC-ES2L/H”, which have been developed and operated on ES3, to ES4, and were able to reduce the time required for a one-year simulation by about half.

A climate model MIROC-4m is introduced on ES4 to run a long-term simulation. The results show that a comparable results can be performed with technical adjustment of program codes and scripts.

Several technical issues in climate models are examined and performed on ES4. Integer data-array packing, in particular is significantly improved in terms of computation times.

**Keywords** : Earth system models, Paleo-climate modeling, Infrastructure library for climate models.

## 1. Porting Earth system models “MIROC-ES2H/L” to ES4

Various modifications were made to an Earth system model “MIROC-ES2H”, which has been developed and operated in ES3, so that it can be executed in the vector engine node of ES4. This model is based on the coupled atmosphere-ocean climate model MIROC6, being coupled with the terrestrial biogeochemical model VISIT, the ocean biogeochemical model OECO2, and the atmospheric chemistry/transport model CHASER. The following is a summary of the required works for the porting of this model to ES4.

First, since the model use a data with binary format that follows the native endian of the machine, we developed a tool to convert the endian in the data. In addition, various bugs (compiling and run-time errors) became evident with the new compiler, thus these problems were fixed. One of the major problems caused by the compiler change was a change in the alignment of structured variables shared between C and Fortran programs. In addition, compiling options were tuned to reduce the time of compiling for some source code files. In the optimization process, the compiler directives were automatically replaced by a NEC tool, and then the optimized code modifications (physics, dynamics, etc.) were ported from MIROC to MIROC-ES2H. Then, after obtaining trace information, we determined the optimal node balance, using 120 process elements in total on VE nodes. As a result of these efforts, the one-year simulation of the model on ES4 is reduced to approximately 3 hours and 40 minutes. Scripts to run the model with multiple years were also prepared with collaboration with MIROC developers. These modifications for MIROC-ES2H were also applied to MIROC-ES2L, which is based on the

coupled atmosphere-ocean climate model MIROC5.2 with terrestrial and ocean biogeochemical models. This model uses a total of 160 PEs, and eventually runs about 30 minutes on ES4.

## 2. Testing of the MIROC4m AOGCM on ES4

With the introduction of Earth Simulator 4 (ES4), recompilation and testing of the source codes for the MIROC4m atmosphere-ocean global coupled model have been necessary. Recompilation involved testing different configurations in the shell script file for batch requests and different settings in the Fortran compilation. Several climate scenarios have been used for comparison with previous results previously produced on Earth Simulator 3 (ES3), but the Pre-Industrial was used as a control run. Figure 1 shows a comparison of the Pre-Industrial experiment from ES3 and two contrasting examples from ES4. One example (green) shows an abrupt departure from ES3 results, leading to a global warming of at least 1.5°C, with over-warming most pronounced in the Arctic Ocean. A second example (blue) is much more consistent with ES3 results (red). Although a natural variability in the ocean temperatures is seen in parts of the Southern Ocean, regional and global differences in surface air temperature are very small when these two experimental results are averaged over several thousand years.

## 3. Development of infrastructure library for climate models

Data-compression is an important technique for high-resolution and/or long-term integration simulations. Typically, a data

array is reduced to a sequence of fixed n-bits integer array, which involves packing of small integers to intrinsic integer arrays.

In this project, four different methods to store and pack/unpack the sequence are examined to compare the efficiency in computing speeds. The storage method of the three is sequential, where a sequence is packed in order.

This storage is adopted in MIROC. The three differ how to pack the input sequences. On the other hand, we introduced a new storage method, where a sequence is transposed. By using this method, vectorization is expected to be improved.

Table 1 summarizes the results of computing speeds by the four storage/packing methods. Pack, seq, str correspond to sequential storage, while trn to transposed storage. For larger bits and larger elements, the transposed storage is significantly faster than the other three methods

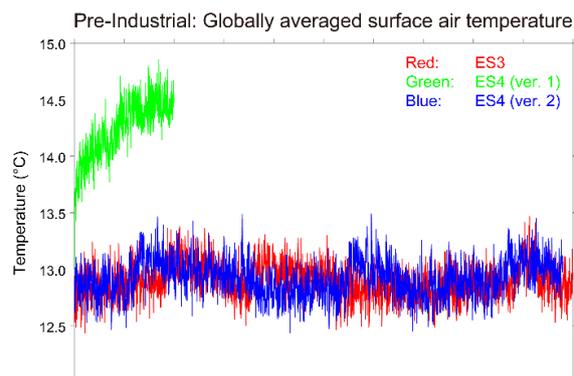
#### 4. The impact of the QBO on the region of the tropical tropopause in QBOi models: present-day simulations

We analyzed the climatological state and variability of the tropical tropopause layer (TTL) in thirteen climate models which participated QBOi project, including MIROC models. All these models internally generate realistic QBOs, therefore it is possible to study the QBO influence on the TTL.

Temperature biases of both signs near the tropical tropopause are identified in the QBOi multimodel ensemble, leading to water vapour biases in the lower stratosphere.

Westerly (W) and easterly (E) QBO phases are associated, by thermal wind balance, with warm and cold anomalies in the equatorial lower stratosphere, respectively, and induced circulations produce compensating anomalies in the subtropics. The model QBOs models are generally weaker in the lower stratosphere, and their maximum amplitude is shifted upwards, and latitudinally narrower compared to observations. Consistent with small QBO amplitudes and weaker residual circulations, the QBO induced temperature anomalies at the equator are realistic but smaller in the models than in the reanalysis, and they do not extend as far toward the subtropical lower stratosphere in most models. The strength of the W-E thermal anomalies is correlated with the magnitude of the zonal wind and residual circulation differences, both underestimated by most models.

Further analyses have been dedicated to the modelled QBO impact on the tropopause pressure and tropical precipitation. Tropopause pressure changes in QBOi models are generally smaller than those obtained for the reanalysis, and precipitation anomalies are weaker. To summarize, the model biases that affect the simulation of the QBO appear to alter its influence on other climate phenomena. Most models simulate a temperature response in the lower equatorial and subtropical stratosphere weaker than that observed, and similarly modulations of the tropopause pressure and tropical precipitation are generally underestimated or not realistic. It is difficult to ascribe these



**Figure 1.** Example of MIROC-4m long-term simulation<sup>5,0</sup> operated by ES3 and ES4.

shortcomings to a single aspect of the model formulations, such as the horizontal and vertical resolution, their cumulus or non-orographic gravity wave parameterizations. Further model experiments and analyses would be needed to solve these problems.

**Table 1.** Summary of computing speeds by four different integer packing methods. The column b, n correspond to bit sizes and array sizes to be tested, respectively. The column pack, seq, str correspond to sequential storage with three different packing algorithm, and trn to transposed packing algorithm. Comparison among the results with different bit sizes are meaningless

b	n	pack	seq	str	trn
1	100	0.332	1.752	2.276	1.259
1	1000	0.348	13.156	2.462	1.264
1	10000	0.680	127.340	3.500	2.650
1	100000	3.900	1271.500	9.400	8.000
8	100	0.187	10.310	1.283	0.614
8	1000	0.187	101.781	1.293	0.621
8	10000	4.920	1016.750	2.260	1.060
8	100000	51.700	10188.500	10.700	8.000
24	100	0.187	12.173	1.877	0.686
24	1000	1.202	120.557	1.901	0.714
24	10000	17.910	1207.700	3.310	1.430
24	100000	182.700	12071.000	15.200	10.000