

PC クラスタを用いたリアルタイム津波予測手法の開発と その活用に関する研究

鈴木進吾¹・越村俊一²・河田恵昭³

地域に來襲する地震津波を發震後に正確かつ精細に予測することは、事中や直後の被害抑止軽減行動を確実に行う上で重要な要素である。本研究では、即時津波解析を、汎用機を多数接続した PC クラスタを用いて行う方法を開発し、これを地域へ分散配置することによって、地域に即したきめ細かな予測を行う実現性を、計算資源と速度の関係で考察した。この手法を東南海・南海地震津波によって被災が想定されている各地域に適用した場合、津波來襲特性によって避難情報としては間に合わない地域があるものの、精細な即時津波解析によって、津波來襲状況の迅速な把握、警戒体制の解除に資する津波収束予測が可能であることが分かった。

1. 序 論

即時的震源解析研究の進展と計算機の演算性能の向上により、津波發生直後の早期津波シミュレーション実行が可能になりつつある。來襲する津波を發震後に正確かつ精細に予測することは、事中や直後の被害抑止軽減行動を確実に行う上で重要な要素である。即時数値解析に基づく津波予測は、様々な波源に柔軟に対応可能であり、特定地域に限った利用においては高解像度地形データを利用することで局所的津波増幅や時間波形等の情報が生成され、緊急時の避難対策の確実性を高められると考えられる。一方、津波の収束後において被災自治体や広域応援に求められることは、被害の概略を早期に把握し、災害対応体制を確立し、要員や資機材の投入など必要な対策を講ずることである。津波の外力や被害の推定情報は、必要な被害調査を効率化し、また、發災直後に生じる情報の空白において事態の把握を補助し、対応の遅れと被害拡大を防止することに資すると考えられる。

津波数値解析を用いた即時予測に関する研究は、首藤ら(1988)が三陸沿岸を対象として、近地津波の即時数値計算から量的に予報する可能性を、予測の精度と速度の関連において示したのを端緒として発展してきた。1999年には気象庁が 10 万通りに及ぶ数値解析の結果を元にしたデータベース駆動型量的予報の運用を開始し、高速で量的な第一波到達時刻および津波高の予報がされるようになった。一方で、計算機の中央演算処理装置(プロセッサ, CPU)の高速化、多重化が進み、阿部ら(2004)は、スーパーコンピュータを利用して並列計算を実施することによって数値解析を高速化する手法を開発している。

津波來襲後の被害状況、津波來襲状況、収束状況を把

握するためには、湾内の局所的な津波増幅やエッジ波などによる長時間の海面振動、陸上の浸水域を予測するに足る空間分解能が必要となる。このような分解能を要件とすると、多数の被災自治体を出すと想定されている南海トラフで發生する巨大地震による広域津波を考えた場合、その地域全てを対象に計算を行うための膨大な計算量を処理する資源の確保が課題となる。スーパーコンピュータの実際の利用には制限があり、津波發生時に確実かつ優先的な使用が保証されているわけではなく、そのリスクに対応した代替となる手法の確保が必要である。

市販のパーソナルコンピュータ(PC)での高精度かつ詳細な津波数値解析が可能になり、コンピュータネットワークが高速化した現在、ネットワークに接続された複数内の PC を用いて大規模計算を分散処理し、高速計算を行うことが実用化されつつある。ネットワークに接続され協調動作する PC 群である PC クラスタは、(1)分散並列処理による数値計算の高速化、(2)汎用機を必要な台数だけ、簡易な手法で結合することによる構築費用の削減、(3)単一でも稼働する PC を利用することによる構築・増設・更新の容易性といった特徴を持つ。これらの特徴から、この PC クラスタを地域単位でそれぞれその地域における必要性に応じて構築すれば、広域にわたる想定被災域の全域において詳細かつ高速なリアルタイム予測が可能になるのではないかと考えられる。

本研究では、津波のリアルタイム予測の目的として、(1)津波到達前に予測を完了し被害抑止のための情報を提供する、(2)津波到達後であっても迅速な応急対応によって被害軽減を行うための情報を提供する、の 2 点を設定する。安価に構築可能な PC クラスタを使用するという条件のもとに、各地域でこれらの目的とその地域の津波來襲特性との関連で PC クラスタによるリアルタイム津波シミュレーションの実現性について考察を行う。

1 正会員 修(工) 人と防災未来センター 専任研究員
2 正会員 博(工) 東北大学助教授 大学院工学研究科附属災害制御研究センター
3 フェロー 工博 京都大学教授 防災研究所

2. リアルタイム予測に求められる要件

ここで、リアルタイム津波予測システムを構築する際に求められる要件を(1)精度・解像度に関するもの、(2)ハードウェアに関するもの、(3)速度に関するものに分類して整理する。

(1)の数値計算の精度は、支配方程式の近似度、空間分解能、使用する初期条件や地形条件で決定される。必要とされる精度は結果の利用目的によって変化する。避難勧告の発令を目的とした場合、気象庁のデータベース駆動型数値モデルは迅速性の高いものであり、予報値に対して避難区域が計画・周知されていればこれを利用するのがよい。しかし、全国をカバーする膨大な計算が必要であった量的予報は分解能を犠牲にせざるを得ず(館畑, 1998)、津波来襲後に必要となる地域の対応のための津波継続予測や概括被害推定情報として使用するためには、空間分解能を十分に高く確保し、沿岸地形による屈折・反射、エッジ波等の予測精度をあげなければならない(越村ら, 1997)。また、浸水計算等を用いて被害推定を行うためには海域より複雑な海岸地形を表現可能な解像度が必要となる。本研究では、浸水予測は行わないが、将来の拡張を念頭に置き、一般的に用いられ安定性の高い非線形長波理論を最小空間格子間隔 50 m で離散化したモデルを基本所要とし、以後の検討を行う。

(2)は津波数値解析を実行する計算機等のハードウェアに関する条件であり、その整備、維持管理、更新の際に発生するコストに関連して規定される。当然、費用をかければハードウェアの性能は向上し、容易に詳細かつ高速な計算が可能となるであろうが、この他にさまざまな津波防災対策を実施しなければならないため、このコストは出来るだけ抑えられなければならない。性能と費用の関連で検討される要件である。

(3)は津波数値解析が意思決定前に終了していなければならないということから要請される計算の実行速度であり、対象とする津波の到達時刻等との関連で規定される。地震の発生から対策を開始しなければならない時間までの余裕時間で、初期水位推定、津波伝播・遡上解析、結果の情報伝達等を行わなければならない。今、時刻 T_f において予想される状況を時刻 T_n ($T_n \leq T_f$) において知らなければならないとする。津波伝播・遡上解析以外の前後処理にかかる時間を t_m とし、単位時間に計算が進捗する量(再現時間)で計算速度 v を規定すると、これらが満たすべき条件は、

$$v > T_f / (T_n - t_m) \dots \dots \dots (1)$$

ただし、 $T_n > t_m$ 、 $T_n \leq T_f$ である。例えば、リアルタイム予測によって得られる情報を緊急時の避難に用いる

表-1 本研究の演算環境の諸元

CPU	Intel Xeon プロセッサ 2.4GHz 駆動
クラス構成	20 CPU (2CPU×10Nodes)
OS/コンパイラ	Linux/PGI Fortran 90+ MPI
接続方式	Gigabit Ethernet

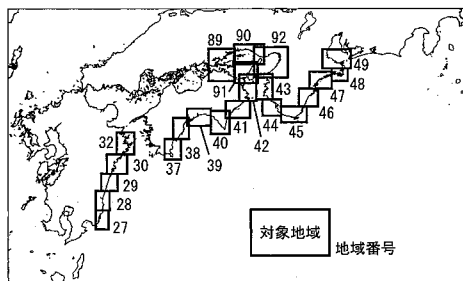


図-1 津波数値解析の対象地域。計算領域設定は中央防災会議東南海・南海地震に関する専門調査会のデータに準拠。

場合、事前に想定した津波到達時刻や氾濫開始時刻など地域が危険となる時刻を T_f として、それから避難にかかる時間を差し引いたものを T_n とする。また、津波来襲後に実施される捜索や救急救命、広域応援等リアルタイム予測情報を利用する際は、津波収束の確実な判断や現場対応要員の再避難にかかる時間の確保のために T_f と T_n の差を出来るだけ長く設定する。

以上のことから、地域においてリアルタイム予測システムを導入する際は、計算諸元の設定、導入する計算機の性能、各種対応のために確保する時間の決定が必要となる。そこで、本研究ではひとつの目安として表-1に示すような仕様の PC クラスタを構築して、多様な計算環境において実行可能な数値解析プログラムを開発し、次のことを議論する。即ち、東南海・南海地震による津波を想定し、この PC クラスタを用いて、図-1に示すそれぞれの地域を対象として計算を行った場合の計算速度を求める。この計算速度を、各地域に來襲する津波の到達時刻と比較することによって避難情報としての利用性を、各地域における津波の収束特性と比較することによって応急対応情報としての利用性を検討する。さらに、計算速度、計算諸元、計算環境の3変数を関連づけ定式化することにより、必要計算速度を得るための計算諸元、計算環境の検討方法を開発する。

3. PC クラスタを利用した津波数値解析

PC クラスタは単一で稼働する計算機(ノード)の集まりである。プロセッサを1~2個程度搭載した各ノードを Ethernet 等のネットワークで接続したハードウェアを使用し、大規模な計算を各ノードのプロセッサに振り分けて処理(並列計算)する。その際、プロセッサ間

で、計算に必要なデータを通信ソフトウェア（例えば、PC Cluster Consortium）を介して通信する。計算プログラムには MPI（Argonne National Laboratory）等を用いてその通信処理を記述する。

PC クラスタを利用して津波数値解析を行う場合、計算対象領域を分割してプロセッサに割当て、プロセッサは割り当てられた領域のみを計算する並列化手法を用いる。津波数値解析の性質上、その割り当てた領域の境界や、外洋から沿岸部にかけて順次地形データの解像度を高くしていく Nesting Grid System を採用した場合のネスティング境界では、プロセッサ間で最新の計算値の受け渡しが必要となる。この受け渡しの際にネットワークを用いて通信する。

処理時間の短縮で計られる計算の並列化効果を最大化するためには、(1) 通信に係る時間を出来るだけ少なくする、(2) 各プロセッサの処理能力にあわせて計算量を割り当て、全プロセッサの足並みをそろえる、といった点を考慮して処理を分割しなければならない。

並列計算にかかる時間 t_p は、演算にかかる時間 t_{comp} と通信にかかる時間 t_{comm} を用いて、

$$t_p = t_{comp} + t_{comm} \quad (2)$$

と表され、 t_{comm} は次式のようになる。

$$t_{comm} = t_{startup} + nt_{data} \quad (3)$$

ここで $t_{startup}$ はデータ転送以外の作業にかかる通信起動時間、 n は転送データ量、 t_{data} は単位データ量の転送時間である。これらは計算機に依存するが、 $t_{startup}$ は t_{data} より 1~2 オーダー大きく、また t_{data} は演算時間よりもずっと大きいため、通信回数と転送データ量を減らすことが肝要である (Wilkinson, 1998; Pacheco, 1997)。

また計算の割当に関しては、ネスティングされた計算領域毎にプロセッサを割り当てる方法が開発されている。また、負荷を均等化するために計算負荷の大きい計算領域をメッシュ状に分割しプロセッサに割り当てる方法も開発されている (阿部ら, 2004)。しかし、これらの方法で PC クラスタの持つ 1 ノード単位での構築や異種の計算機による混成といった柔軟性に対応するには限界がある。

本論文では、PC クラスタの持つ柔軟性に対応し、また、通信アルゴリズムを簡略化する観点から、ネスティングされたそれぞれの計算領域をライン状に分割する手法を用いる。例として、図-2 に計算領域を南北（東西でもよい）一方向に分割する概念を示す。南北方向に分割する手法をとった時の数値計算と通信処理の流れは、図-3 に示す。領域を分割する境界（割当境界）での水

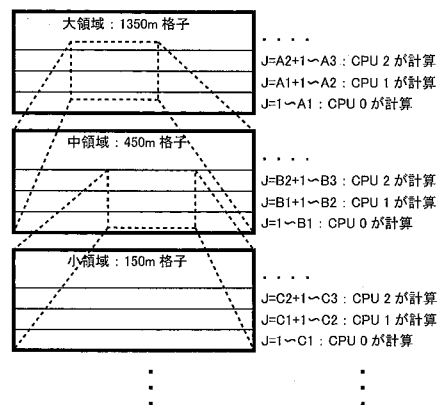


図-2 各領域の帯分割の模式図

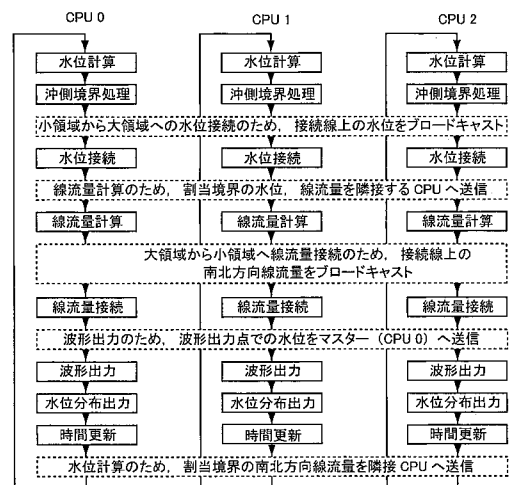


図-3 CPU 間の通信処理

位および線流量の計算には、時間ステップごとに隣接するプロセッサから最新の計算結果を取得する必要がある。また、ネスティングされた各領域の接続境界（ネスティング境界）での水位・線流量の接続は、図-2 のように領域の位置関係によって通信経路選択が煩雑になるため、各プロセッサのネスティング境界上の計算結果を全プロセッサにブロードキャストする集合通信を用いる。この手法によって多様な PC クラスタに対応し、プロセッサの性能、割当領域の計算点の数を考慮して容易に割当を決定あるいは変更することが可能となる。

本手法を用いた場合の計算速度を定式化する。並列計算の計算時間は式 (2) で表される。 t_{comp} は計算量、即ち計算空間格子数 G に比例する。 t_{comm} を割当境界での通信と、ネスティング境界での通信に分けて考える。1 時間格子における割当境界の対一通信には、計算領域数 N に比例する $t_{startup}$ と、割当境界のグリッド数に比例する nt_{data} がかかる。また、ネスティング境界の集

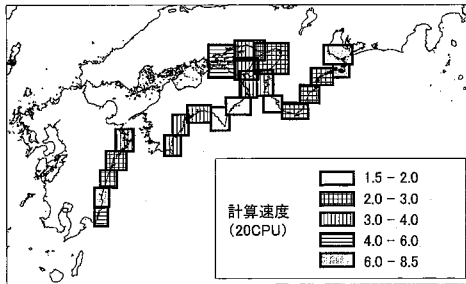


図-4 20 CPUを用いた場合の計算速度

合通信には、ネスティング回数 $(N-1)$ とプロセッサ数 P の積で表される回数に比例する t_{startup} 、接続線のグリッド数に比例する nt_{data} がかかる。従って、時間格子間隔を dt 、南北方向格子数を J 、東西方向格子数を I とすると、南北方向に領域を割り当てた場合、計算速度 v は式 (4) のように定式化され、係数 $a \sim e$ は計算諸元、プロセッサ数によらず計算機やプログラムの処理性能に依存する値となる。式 (4) の右辺、分子は第1項から計算時間項、ネスティング境界間の通信起動時間項、同データ転送時間項、割当境界間の通信起動時間項、同データ転送時間項となる。

$$v = dt / \left(\frac{a}{P} \sum_{r=1}^N G_r + b(N-1)P + c \sum_{r=2}^N J_r + d \cdot N + e \sum_{r=1}^N I_r \right) \dots \dots \dots (4)$$

4. 想定被災地域での活用手法

次に、南海トラフで発生する地震津波を想定し、図-1に示した九州から東海地方までの22領域を対象地域として、それぞれの対象地域において、災害対応に活用する観点からPCクラスタを用いたリアルタイム津波予測を考える。

はじめに表-1の演算環境で20CPUを計算資源として計算を行った場合の計算速度 v を図-4に示す。計算は1,350 m から50 m までの4領域を非線形長波理論を用いて行い、 dt は対象地域毎にC.F.L. 条件を満たすように0.25, 0.5, 1.0 s のいずれかを用いた。初期条件は中央防災会議想定の大東南海・南海地震を用いた。なお、ここで示す計算速度はあくまで本研究の並列手法を用いた場合の結果であって、分割法や通信法を変えることによって変化することを付記する。太平洋に面する水深が比較的深い地域は dt を大きく取れないことから計算速度は遅くなり、逆に紀伊水道～瀬戸内海沿岸など、水深が浅い領域では計算速度は速くなる。

表-2 $t_m=5$ 分、避難時間10分とした場合の必要速度と20 CPU 使用時の計算速度。*は計算不能、20 CPU 使用した場合、太字の番号の地域は全域で予測可能、斜体は全域で予測不可能、その他は地域の一部で予測可能。

領域	T_f (分)			必要 速度	20 CPU 使用時の 速度
27 日南	22.8	—	28.8	2.1	2.9
28 宮崎	24.0	—	27.5	2.2	2.7
29 日向	15.8	—	24.0	2.7	19.8
30 延岡	6.8	—	16.3	12.5	2.1
32 佐伯	7.2	—	32.0	1.9	3.5
37 足摺	3.2	—	22.5	3.0	3.7
38 須崎	4.8	—	21.4	3.3	3.7
39 高知	3.8	—	18.3	5.6	3.9
40 室戸	2.7	—	16.5	11.0	1.9
41 阿南	3.4	—	7.0	*	1.8
42 徳島	19.1	—	52.5	1.4	4.7
43 和歌山	15.2	—	52.8	1.4	76.0
44 田辺	4.0	—	17.0	8.5	1.9
45 潮岬	2.1	—	9.2	*	2.1
46 熊野	3.7	—	6.4	*	2.1
47 尾鷲	5.9	—	20.8	3.6	2.2
48 志摩	8.6	—	30.9	1.9	2.4
49 四日市	9.2	—	46.7	1.5	7.5
89 岡山	73.9	—	—	—	1.3
90 明石	65.5	—	—	—	1.3
91 香川	34.6	—	96.1	1.2	1.8
92 大阪	47.0	—	95.9	1.2	1.5

次にリアルタイム予測に津波数値解析を用いる場合の計算速度条件式 (1) から、各地域において、(1) 避難情報に用いる場合、(2) 応急対応情報に用いる場合の2点でPCクラスタの可能性をしてみる。式 (1) を用いる場合、対応のための情報が得られなければならない時刻 T_n 、計算以外の断層モデルの決定等の処理にかかる時刻 t_m を決定しなければならない。断層モデルの決定に関しては、地震計やGPS等による観測に基づく解析とコンピュータによる自動処理によって即時的に構築することが可能になりつつある。また、津波避難ビル等の設置により避難時間を短縮する対策がなされている。

(1) 避難情報に用いる場合

避難情報として用いる場合に要求されるのは情報提供の速度である。ここでは仮に断層モデルにイベント感知後5分程度で得られる精度のものをを用いることとし、避難所要時間を10分とする。津波の到達時刻を T_f として、汀線において20 cm の水位変化が観測される時刻とすると、式 (1) から各地域に必要な計算速度が得られ、これを20 CPU で計算した場合の速度と比較して表-2に示す。波源に近く深い海域を含む地域は到達までの予測は不可能であったが、それ以外の地域においては地域内の一部または全ての地点で予測が可能であった。

(2) 応急対応情報として用いる場合

応急対応情報として用いる場合は予測の正確性が重視される。ここでは仮に断層モデルにイベント感知後20分程度で得られる精度のものをを用いた時の、20 CPU を使用した場合、各地域で1時間先、2時間先を予測でき

表-3 $t_m=20$ 分, 20 CPU を利用した 1 時間先が予測できるようになるまでの時間 T_1 , 2 時間先が予測できるようになるまでの時間 T_2

領 域	T_1 (分)	T_2 (分)	領 域	T_1 (分)	T_2 (分)
27 日南	44.4	62.7	43 和歌山	53.5	78.7
28 宮崎	30.7	38.7	44 田辺	113.2	183.1
29 日向	87.1	137.4	45 潮岬	94.3	149.9
30 延岡	95.4	151.9	46 熊野	93.0	147.7
32 佐伯	51.4	75.0	47 尾鷲	88.1	139.2
37 足摺	49.8	72.2	48 志摩	76.6	119.0
38 須崎	49.6	71.9	49 四日市	32.3	41.5
39 高知	47.5	68.1	89 岡山	36.4	48.7
40 室戸	111.6	180.3	90 明石	53.4	78.5
41 阿南	122.3	199.1	91 香川	52.4	76.7
42 徳島	54.2	79.8	92 大阪	62.4	94.3

表-4 回帰分析による式(4)の係数

a ($\mu\text{s}/\text{grid}$)	b (μs)	c ($\mu\text{s}/\text{grid}$)	d (μs)	e ($\mu\text{s}/\text{grid}$)
0.474	478	21.5	874	1.93

$R^2=0.992$

ている状態になるまでの時間を表-3に示す。越村ら(2003)は東南海・南海地震津波の数値解析から津波の来襲が予想される314の漁港と港湾での津波波形を推定し、紀伊半島南部以外は6時間後においても津波注意報の発令基準を超える水位が続き、警戒体制が解けないことを示している。表-3は、20 CPU を利用して数値解析を行えば、全ての領域で遅くとも約3時間後にはその2時間先(イベント感知後5時間)の予測が完了できることを示しており、高精度の数値解析結果から、警戒態勢の解除を検討できる可能性を示している。

(3) 計算速度推定式

最後に、式(4)の係数 $a \sim e$ を求め、PC クラスタを用いたリアルタイム予測システムに必要な計算資源(プロセッサ数 P)、計算諸元(領域数 N 、領域の大きさ G)を計算速度推定式から求める方法を検討する。対象地域(変数 G, I, J)のみを変えて22ケース、プロセッサ数 P のみを変えて10ケース、計算領域数 N のみを変えて4ケースの36ケースで津波数値解析を行って計測した計算速度と、各変数の値から非線形回帰分析によって係数 $a \sim e$ を表-4のように求めた。これらの係数を使用した計算速度推定式を用いれば、(1)節において津波到達前に予測が出来なかった領域47は、50 m 格子領域の計算を行わなければ v は7.0となると推定され、津波到達が17.5分後以降の地点においては予測が可能となることが分かる。また、津波到達前に地域全体の予測が可能だった領域92では、プロセッサ数を8 CPU まで減らしてコストを削減しても、津波到達前に予測が可能であると推定できる。

5. 結 論

本研究により得られた主要な結論をまとめて示す。

津波数値解析の高速化手法として計算領域を帯状にプロセッサに割り当てる手法を開発し、地域の要求性能に応じて安価に導入可能なPCクラスタを用いた即時予測システムについて検討した。この手法を用いて、東南海・南海地震を想定した22のそれぞれの地域について、気象庁の量的予報より解像度をあげ、局所的津波増幅、長時間振動予測精度の向上が期待できる50 m 格子、全領域非線形の条件での即時予測の可能性を明らかにした。

安価に構築可能なシステムを予測地域毎に分散配置した場合には、現状では地域により避難情報の発令には間に合わないところがあるものの、これまで直接観測以外に手段がなかった各地の詳細な津波来襲状況の把握や津波収束の予測といった情報を生成できることが分かった。間に合うところでは気象庁の予測精度を凌ぐ情報となる。

今後、津波の高さや流速などから各種被害や漂流物の挙動を推定する手法が開発されれば、それらと組み合わせ、それぞれの地域において災害対応業務をより迅速かつ的確なものに高度化するための支援情報システムとなることが期待される。

謝辞：本研究の実施にあたり大都市大震災軽減化特別プロジェクト(代表：河田恵昭)の受けた。ここに記して謝意を表する。

参 考 文 献

- 阿部郁男・今村文彦(2004)：並列計算によるリアルタイム津波(浸水)計算の高速化, 海岸工学論文集, 第51巻, pp. 251-255.
- 越村俊一・今村文彦・高橋智幸・首藤伸夫(1996)：境界波としての津波の挙動特性とその数値解析, 海岸工学論文集, 第43巻, pp. 276-280.
- 越村俊一・鈴木進吾・大利桂子・村田行泰・寺田幸博・河田恵昭・加藤照之・今村文彦(2004)：東南海・南海地震津波対策に向けての広域連携情報ネットワークの提案, 地域安全学会論文集, No. 6, pp. 139-148.
- 首藤伸夫・後藤智明・今村文彦(1988)：津波予警報に対する数値シミュレーションの利用, 土木学会地震工学論文集, 第393号/II-9, pp. 181-189.
- 館畑秀衛(1998)：津波数値計算技術の津波予報への応用, 月刊海洋号外, No. 15, pp. 23-30.
- Argonne National Laboratory, Mathematics and Computer Science Division: The Message Passing Interface (MPI) standard (online), <http://www-unix.mcs.anl.gov/mmpi/>, Cited 2006-05-19.
- Pacheco, P. (1997) : Parallel Programming with MPI, Morgan Kaufmann Pub., 418p.
- PC Cluster Consortium : SCore cluster system software (online), <http://www.pccluster.org/>, Cited 2006-05-19.
- Wilkinson, B. and M. Allen (1998) : Parallel Programming: Techniques and Applications Using Networked Workstations and Parallel Computers, Prentice Hall, 431p.