

# 仮想計算機システムの概要と技術課題

大所一彦

(日立製作所システム開発研究所)

## 1. はじめに

仮想計算機 (バーチャルマシン) という用語は文字通り仮想的な計算機という意味であるが、他の計算機用語と同様に、これまで種々の意味で用いられてきている。例えば、計算機言語処理の世界では、言語のユーザから見える機能の集合を仮想計算機と言ひ、フォームウェアを切りかえることにより種々のアーキテクチャを持つユニバーサルホストプロセッサのことに、それ自身で固有の個性を持たないという意味で仮想計算機と呼び、あるいはまた、最近のマイクロコンピュータ用のソフトウェアのうち、機種に依存しないインタフェースをも仮想計算機と呼んでいる。

ここで扱う仮想計算機システムは上記の例とは異なり、1台の計算機上に同時に複数のオペレーティングシステム (OS) を効率良く動作させることのできるシステムである。

Goldberg は以下に示すホストマシンターゲットマシン、およびバアマシンと拡張マシンという用語を用いて、各種の仮想計算機を実現するシステムを表1に示すように分類している。Goldberg はこのシステムを Monitor と呼んでいる。

### (a) ホストマシンとターゲットマシン

実現しようとする機能の集合をターゲットマシンと呼び、ターゲットマシンを実現するために用いる、基となる計算機をホストマシンと呼ぶ。

### (b) バアマシンと拡張マシン

実在する計算機 (ハードウェア) で実現される機能の集合、すなわちその計算機そのものをバアマシンと呼び、バアマシンにソフトウェアを加えて、バアマシンに機能の追加、拡張を加えたものを拡張マシンと呼ぶ。

表1. 仮想計算機の種類

ターゲットマシン ホストマシン	バアマシン	拡張マシン
バアマシン	Type I VMM*	Type I EMM**
拡張マシン	Type I VMI†	Type II EMM

\* Virtual Machine Monitor

\*\* Extended Machine Monitor

すなわち、ここで扱う仮想計算機は表1の分類でいう Type I VMM によって実現されるものである。Type II VMM の例としては、OS 上で動作し、ユーザプログラムにバアマシンインタフェースを提供するエミュレータ<sup>2)</sup>がある。Type I EMM の代表例は OS である。これはバアマシンをホストマシンとして、バアマシンの機能に OS コマンドの機能を追加した拡張マシンをターゲットとして実現する。マイクロコンピュータのソフトウェアにおける機種非依存インタフェースも、この Type I EMM で実現されると考えられる。Type II EMM の例は高級言語

語である。これはOSの実現する拡張マシンをベースマシンとして、高級言語インタフェースモーターゲットマシンとするものである。なお、表1に示した仮想計算機はターゲットマシンを指すのに対し、ユニバーサルホストマシンにおける仮想計算機はホストマシンを指すため、他のもうと趣を異にする。

## 2. 仮想計算機の歴史

'60年代の前半に仮想計算機の実験システムが出現し<sup>3)</sup>、それ以降今日までの期間は、以下の3つの発展段階に分けられる(図1)。

- 実験システム段階 ; '60年代前半~'70年代前半
- 理論の体系化段階 ; '70年代前半~'70年代後半
- 実用化段階 ; '70年代後半以降

### (1) 実験システム段階

第3世代計算機の出現と共に、小型機から大型機まで同一アーキテクチャを持ついわゆるファミリ-化の考え方が現れた。しかしOSの方は同一のもので全ての機種をカバーするに至らず、同一アーキテクチャの下で動作する複数のOSが出現した。それらのOSの開発あるいは利用のため、1台の計算機上で複数のOSを効率良く動作させる仮想計算機に対する必要性が増加した。この時期に開発された実験システムとしては、CP/40<sup>3)</sup>、CP/67<sup>4)</sup>、ETSSデバッグツール<sup>5)</sup>等がある。

### (2) 理論の体系化段階

'70年代に入ると、それまで実験システムを中心に進められてきた仮想計算機の研究においても、理論の体系化が行なわれるようになり、'73年に行なわれた仮想計算機に関する第1回のワークショップ(ACM SIGARCH-SIGOPSの主催)には、数多くの論文が提出された。特に仮想計算機の高速度および高信頼化に関する研究が注目された。またこの時期に、実用をねらった仮想計算機システムであるVM/370が発表された。

年代	'60 ~ '69	'70 ~ '79	'80 ~
発展段階	実験システム	理論の体系化	実用化
動向	第3世代計算機出現による仮想計算機の必要性の増大	仮想計算機の高速度と高信頼化 応用分野の拡大	
システム例	CP/40 <sup>3)</sup> CP/67 <sup>4)</sup>	VM/370 ETSSデバッグツール <sup>5)</sup> UCLA-VM	VMS <sup>9)</sup>

図1 仮想計算機の歴史

(3) 実用化段階

70年代後半に至ると、ファームウェア化等の高速化により仮想計算機は実用的な処理速度を持つようになったため応用分野が広まり、ラボラトリーオートメーション、リレーショナルデータベース管理システムの開発、実時間システムの移行等に用いられるようになった。この時期になると、VMS<sup>1)</sup>等各社から商用の仮想計算機システムが発表された。

仮想計算機を実現するVMMは更に発展し、今後のOSの中核となる可能性を帯びている。

3. 仮想計算機の概要

ユーザプログラムからOSを保護するために2つの動作モードを持つバスマシンをホストマシンとする仮想計算機を例にとり、その概要を以下に示す。2つの動作モードとは、特権と非特権あるいはスーパーバイザとユーザ等と呼ばれる。入出力命令のように、バスマシンの物理的資源(中央処理装置, 主記憶装置, 入出力装置等)の状態を直接変化させる、いわゆるセンシティブ命令<sup>10)</sup>の実行は特権モードでのみ可能で、非特権モードで実行すると割込みが発生して実行できない。OSは特権モードで動作し、通常マルチプログラミング機能をサポートする。ユーザプログラムは非特権モードで、同時に複数個が動作しうる(図2-a)。OSが複数のユーザプログラムを制御するという意味で、それらの上に位置するという表現を用いると、仮想計算機を実現するVMMは、それぞれの仮想計算機上で動作するOSの更に上位に位置し、それらを制御する(図2-b)。

仮想計算機システムにおいては、仮想計算機は非特権モードで動作し、その上で動作するOSから発行されるセンシティブ命令で発生する割込みを契機にして、VMMが当該命令のシミュレート(物理的資源と仮想計算機の資源との間のマッピング処理)を行なう。現在はこのセンシティブ命令のシミュレート処理をファームウェアで置きかえて処理速度を向上させているものが多い。センシティブ命令以外の命令については、VMMの介入なしに直接バスマシンの処理速度で実行される。

このようにして、仮想計算機システムにおいては、1台の計算機上で複数のOSを同時に効率良く動作させることができる。なお、OS以外に、セルフロードタイプのユーティリティプログラム、ハードウェアの保存プログラム等の、センシティブ命令を直接発行して従来マルチア

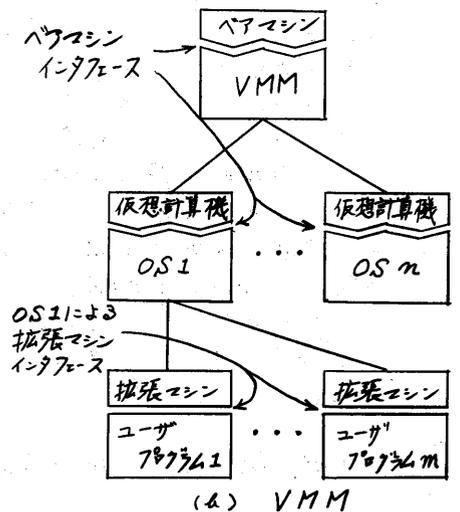
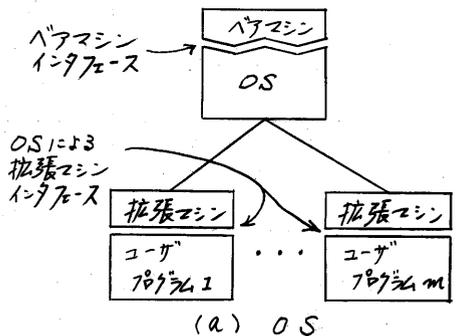


図2 OSとVMM

プログラムができたプログラムについても、仮想計算機システムではOSと同様に複数同時に動作させることもできる。

#### 4. 仮想計算機の利点と問題点

##### (1) 利点

仮想計算機システムの特徴は下記の3点がある。

- (a) 複数のOSが同時に稼働する。
  - (b) VMMがOSの上位に存在し、かつOSに比し小規模である。
  - (c) VM上のOSに対し、物理的な機器構成の制約がない。
- これらの特徴が、計算機の種々の利用者に与える利点を表2に示す。

表2 仮想計算機の特徴と利点

特 徴	利 点	ユーザ種別		
		メーカ	センタ	ユーザ
複数OSの 同時稼働	計算機使用効率向上	○	○	
	信頼性, 移行性の向上	○	○	○
	計算機時間帯の自由度増加			○
	OSの研究, 教育の手段	○		○
VMMの存在	OSの生産性向上	○		
	OSの高信頼化	○	○	○
物理的機器構成 の制約なし	システム構成設定が容易	○	○	
	センタ運用の自由度増加		○	
	小システムの有用度増加	○		

表2から、仮想計算機は広い範囲のユーザにとって利点があることがわかる。

##### (2) 問題点

仮想計算機の最大の問題点はその性能にある。仮想計算機の実用性はその性能に左右されると言っても過言ではない。仮想計算機の性能低下の原因は以下の項目をあげることができる。

##### (a) VMMオーバーヘッド

- (i) センシティブ命令のシミュレート処理
- (ii) 物理的資源の管理処理
- (iii) VM上のOSへの資源多重管理処理

##### (b) 複数の仮想計算機による物理的資源の共用

上記の性能以外の問題点として、仮想計算機の持つ計時機構で、仮想計算機から見た経過時間を正確に計ることができない。また、仮想計算機は、バスマシンの機能をそのまま保証するが、時間に関しては保証できないなどの長があげられる。

#### 5. 仮想計算機における技術課題

仮想計算機における主な技術課題の分野を以下に示す。

- ・ 高速化
- ・ 高機能化
- ・ 利用技術

これら以外にも、操作性、保卒性、拡張性などの分野も考えられるが、仮想計算機固有の技術ということで、ここでは上記の3分野に絞る。

### (1) 高速化

仮想計算機の性能劣化の原因は、4章で述べたようにVMMの3種類のオーバーヘッドと複数の仮想計算機による物理的資源の共用である。これらの解決策の研究、開発はこれまでに数多く行なわれてきた。しかし更に広い分野への仮想計算機の適用を目指すことを考えると、今後に残されている課題は少なくなる。

#### (a) VMMオーバーヘッドの削減技術

##### (i) センシティブ命令のシミュレート処理の高速化

この処理は、バスマシンの物理的資源と仮想計算機の資源との間のマッピング処理であり、VMMオーバーヘッドの大きな部分を占める。図3に示すように、ファームウェア化によって割込み発生を抑え高速化を図っているシステムが多い。

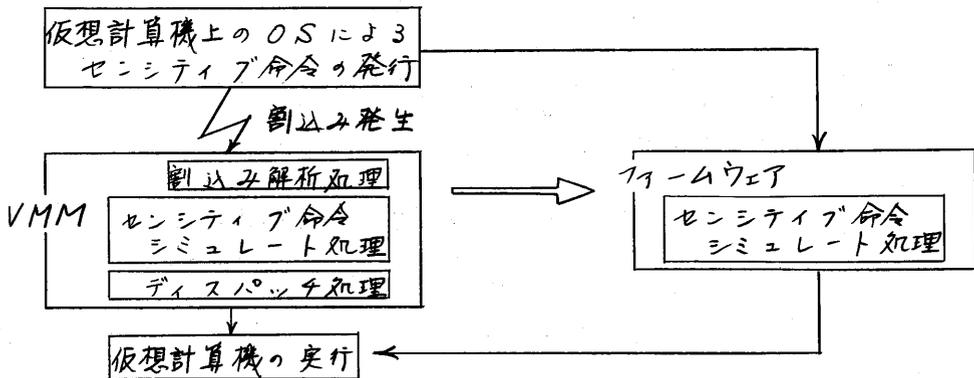


図3 センシティブ命令シミュレート処理のファームウェア化

リカーシブな仮想計算機の実現には問題を残すものの、実用的な意味ではバスマシンの動作モードを1つ増加し、ここでVMMを動作させ、OSは従来の通りの特権モードで動作させる方法も考えられる。

Goldberg は資源のマッピング処理を全てハードウェアで置きかえ、*Hardware Virtualizer* を提案している。

##### (ii) バスマシンの物理的資源の管理処理の高速化

この処理は、一般のOSにおける資源管理処理に近く、その高速化技術には、仮想計算機固有の技術は少ない。

##### (iii) 資源多重管理対策

VMMと仮想計算機上のOSとによる二重のスプーリング処理、ページング処理等に伴う性能劣化に対する実用的な対策として、VMMと仮想計算機上のOSとの独立性を犠牲にして互いに連絡させる方式（いわゆる *Hand Shaking*）と、運用によって多重管理を避ける方式がある。

二重ページングに伴う異常現象に対しては、VMMと仮想計算機上のOSとの独立性をできるだけ保持させた解決策の提案<sup>12)</sup>もある。

(4) 複数の仮想計算機による物理的資源の共用による性能劣化の対策

特定のいくつかの仮想計算機に資源を優先的に割り当て、他の仮想計算機の性能劣下の犠牲の下に、特定の仮想計算機の高速度を計る方式が一般的である。特定の仮想計算機に資源をくくりつけた場合、資源の競合が無くなるという要因以外に、上記(a)に示したVMMのオーバーヘッドが削減され、それらの仮想計算機の高速度が期待できる。

(2) 高機能化

仮想計算機システムが今後とも広く実用に供されていくためには、種々の計算機システム構成(分散システム, マルチプロセッサシステム等)で動作することが要求される。これは、上記(1)(a)(ii)と同じように一般OSにも共通する。

VMM固有の高機能化のための技術課題としては、下記の項目があげられる。

- 複数のアーキテクチャの仮想計算機の混在を許す機能
- 仮想計算機の計時機構の精度の向上

(3) 利用技術

4章に示したように、仮想計算機には広い範囲の計算機ユーザにとっての利点がある。しかし、これまでの研究は高速化技術に偏り、これらの利点を充分に引きだすための利用技術の研究開発が進んでいない。例えば、

- 計算機使用効率向上, 計算センタ運用の自由度増などの利点を利用するための、仮想計算機に基づいた計算センタ運用支援技術
- 一般のOSに比し小規模で、したがって高信頼化が期待できるVMMを基にし、その上に各種の機能を構成するOS構築技術
- 同一アーキテクチャの下で動作する異なるOS用に開発した各種アプリケーションプログラムと、特定のOSへのコンバージョンとセブに組み合せて用いる、仮想計算機を用いたソフトウェアエンジニアリング支援機能

などが考えられる。

ハードウェアの技術の進歩によって、中央処理装置および主記憶装置の廉価化高性能化が進み、マイクロコンピュータを用いたシステムでは、中央処理装置が入出力装置を時間帯を分けて共用しているものも出てきている今日、1台の計算機で複数台の計算機の代用をする仮想計算機の果たす役割は小さくなってきているという意見がある。仮想計算機の利点と、計算機台数の節約, 計算機使用効率の向上だけに限れば、上記の意見は正しい。しかし、仮想計算機システムには、OSなどの他のソフトウェアシステムには無い数多くの利点がある。このため今後とも、高速化, 高機能化, 利用分野拡大のための研究開発が強く望まれている。

6. おわりに

1台の計算機システムの上で、複数のOSを同時に効率良く稼働させるという意味での仮想計算機について、その歴史, 特長, 技術課題等について概観した。

今後の技術課題として、仮想計算機の高速度化技術とともに、その利用技術の研究開発の必要性を示した。

### 参考文献

1. Goldberg, R.P., Architectural Principles for Virtual Computer Systems, Ph.D. Thesis, Div. of Engineering and Applied Physics, Harvard Univ. (1972)
2. VOS2/VOS3 DOS/EDOS/EDOS-MISO エミレ-ション操作書, 日立エニエール 8080-3-401
3. Comeau, L.W. et al., A Time-Sharing System using an Associate Memory, Proc. of IEEE Vol. 54, No. 12, pp 1774~1779 (1966)
4. Meyer, R.A. et al., A Virtual Machine Time Sharing System, IBM Systems Journal Vol. 9, No. 3, pp 199~217 (1970)
5. Fuchi, K. et al., A Program Simulator by Partial Implementation, Proc. of 2nd Symposium on Operating Systems Principles, pp 97~104 (1969)
6. Cole, H., System/7 in a Hierarchical Laboratory Automation System, IBM Systems Journal, Vol. 13, No. 4, pp 307~324 (1974)
7. Astrahan, M.M. et al., System-R: Relational Approach to Database Management, ACM Trans. on Database Systems, Vol. 1, No. 2, pp 99~137 (1976)
8. Umeno, H. et al., Development of a High Performance Virtual Machine System and Performance Measurement for it, JIP, Vol. 4, No. 2, pp 68~78 (1981)
9. 井村他, 仮想計算機システム VMS, 日立評論, Vol. 61, No. 12, pp 25~30 (1979)
10. Poehk, G.J. et al., Formal Requirement for Virtualizable Third Generation Architectures, CACM, Vol. 17, No. 7, pp 412~421 (1974)
11. Goldberg, R.P. et al., The Double Paging Anomaly, Proc. of the NCC (1974)
12. Ohmachi, K. et al., Analysis of PAWP/VMS: Paging Algorithm to Prevent Double Paging Anomaly in Virtual Machine Systems, JIP, Vol. 4, No. 2, pp 55~60 (1981)