



# Peter J. Denning : The Working Set Model for Program Behavior

CACM, Vol.11, No.5, pp.323-333 (1968)

これは、マルチタスク環境下の仮想記憶方式のモデルを提示した論文である。

研究論文の場合、「名論」は個々の研究者が個人的に受けた影響とその論文がその学問分野に与えた影響の重なるところに成立する、と私<sup>☆1</sup>は考える。私は、沖電気に就職して2年目か3年目に、仮想記憶システムを含むOSの方式設計を命じられ、この論文にたどり着き、そこに示されたモデルとアーキテクチャの実現を目指し、数カ月間この論文と共に過ごした経験を持つ。OSの研究者ではなく、情報科学を体系的に学んだことさえない時の体験であるが、今振り返っても、この論文は、これまでに読んだ論文の中でベストの名論である。

すべての名論がそうであるように、この論文には、本質的かつ革新的なアイデアとその緻密な展開があり、それがその当時の技術レベルを超える発展性を持ち、その後の多くの研究者や開発者に影響を与えている。

当時の仮想記憶システムの最大の課題は、システムの負荷が一定以上になると突然システムの性能が急激に低下するスラッシング現象の解明と克服であった。この課題解決のためのDenningのアイデアは、「システムのメモリ要求は、各プロセスのワーキングセットの総和である」というものである。ワーキングセット $W(t, \tau)$ とは、プロセスが、プロセス時刻 $t - \tau$ から $t$ までの間に使用したページ集合である。本論文は、この定義を基礎とし、マルチタスク環境下のシステムのメモリ負荷調節のモデルを与えた。これにより、「ページ入れ替えは各プロセス毎に行い、システムは、プロセスワーキングセットの集合としてメモリを管理し、負荷を調節する」という仮想記憶方式の基礎が築かれた。システム全体の調整パラメータを探し求め行き詰まっていた従来のアプローチと比較した時、このDenningのアイデアの妥当性とそれに基づくモデルの優位性は明らかである。その後の仮想記憶システムのほとんどは、この論文で提示されたモデルに基づき、最適なシステムの実現を目指しているとさえ見なすことができる。

ワーキングセットモデルを基礎に仮想記憶システムを実現するには、各プロセス毎に $W(t, \tau)$ を把握する必要がある。

ある。これができれば、ページャーは、ページフォルト時に、この集合にないプロセスのページをページアウトし、そのメモリを新たに必要になったページに割り当てればよい。しかし、各プロセス毎に集合 $W(t, \tau)$ を実時間で把握するのは困難である。論文では、モデルの構築に加え、仮想記憶実現のためのシステム構成がスケッチされている。そこでは、各ページ毎に、過去のある時点から現時点までのそのページの参照履歴を表現する、タイマーで管理された参照ビットが装備されている。そのようなハードウェアは当時も今も実現されていないが、この論文が提示したモデルとそれに基づくアーキテクチャは、多くの研究者に示唆を与え、 $W(t, \tau)$ を見積もる種々の研究がなされた。

前述の通り私は、後にOKITAC8300として商品化されたミニコンの仮想記憶システムの方式設計の仕事の中で、その過程を追ったが、実用化可能でかつ本論文に示唆された先進性を実現する方式は見つからなかった。DECのVMS OSが最もそれに近いと思われたが、参照履歴を反映する機構が十分でないと思われた。その後本論文を読み返し、また、「参照ビットを消す命令は、対応するTLBエントリを無効化するが、そんなことをしてよいのか」等のハード部隊からの疑問の検討を経て、ページャーが、プロセスページテーブルの参照ビットを消しながら参照ビットがoffであったページをサーチする、という方式に行き着いた。もちろんこの結果の新規性が高いとは思わない。それでも、この仕事でこの論文に向き合えたことは私にとって幸運であり、その機会を与えてくれた沖電気に感謝している。

このように、本論文は、その発表から15年を経た後も、未熟な技術者に本質的な示唆を与える力を持っていた。そしておそらく、本論文は、現在インターネット環境下でのメモリ管理を考える技術者にとっても、示唆に富んだ名論であり得ると想像する。

(平成17年10月4日受付)

<sup>☆1</sup>本コラムでは、「筆者」の代わりに、やや口語的であるが一人称代名詞の使用をお許し願いたい。