【解答】

[設問1] a-ウ

[設問2] b-エ, c-ア

[設問3] d-ア, e-エ

【解説

仮想記憶方式に関する問題である。仮想記憶方式は午後問題として過去にも出題されている。仮想記憶方式の実現方法の一つがページング方式であり、午前試験では定番の問題で出題頻度が非常に高い。このような問題が出題された場合は選択できるように準備をしておき、確実に得点に繋げられるよう基礎を固めておく必要がある。

設問 1,2 は仮想アドレス空間と物理アドレス空間との対応関係,及びページ置換え(物理ページへの読込み)の内容が問われている。対応例は図1に、物理ページに読み込む処理は設問文に示されているので、手順どおりに検証していけばよい。

設問 3 は FIFO,LRU によるページフォールトの発生回数を確認する内容である。 FIFO,LRU の説明がないため,理解している前提での設問である。

ここで、ページフォールト(ページ不在割込みともいう)について確認しておく。 設問 2 には、「ページング方式では、プログラムの実行過程で、実行に必要なデータが物理アドレス空間に存在していないときには、ページフォールトという制込みが発生する。ページフォールトが発生すると、仮想ページに格納されているデータを物理ページに読み込む処理(以下、ページフォールト割込み処理という)を行う」と記述されているが、少し補足しておく。

主記憶に格納できる物理ページの個数(ページ枠の個数ともいう)は限定されている。このため、必要なページが存在しない場合は、ページフォールトが発生し、必要なページを読み込むため、置換えが発生する。必要なページを読み込むことをページイン、不要なページを追い出すことをページアウトという。

ページアウトするページはアルゴリズムによって異なる。代表的なアルゴリズムには基本情報技術者試験で出題が多い LRU、更に FIFO、LFU がある。

物理ページの個数が 3 で、必要なページの参照順が、W \to X \to W \to X \to W \to Y \to Z \circ 場合における物理アドレス空間の状態を図 A に示す。

ページフォールトは実行に必要なデータが物理アドレス空間に存在しないときに発生するため、①、②、⑥、⑦でページフォールトが発生する。①~⑥まではページアウトは発生しないが、⑦でZが必要になったとき、物理アドレス空間にZが存在しないため、ここでページアウトが発生する。このとき、アルゴリズムによってページアウトされる内容が異なり、(1)~(3)のようになる。

(1) FIFO (First-In First-Out)

先入れ先出し法である。最も早くページインしたページをベージアウトする。 図 A では、W をページアウトし、Z と置き換える。

(2) LRU (Least Recently Used)

最も長い間参照されなかったページをページアウトする。

図Aでは、Xをベージアウトし、Zと置き換える。

(3) LFU (Least Frequently Used)

参照頻度が最も低いページをページアウトする。 図 A では、Y をページアウトし、Z と置き換える。

ページの参照順 (1) 最初に読み込ま 1 (2) (3) (4) (7) (5) (6) W Х W X W Y \mathbf{z} W W W W w W (3) 参照頻度 が得も低い 2 Х X X X Х 3 v. 4 公 ŵ 公

(2) 最も長い間 参照されなか ったページは X

ページアウトが発生 アルゴリズムによってページアウトされるページは異なる

注記1:初期状態では、どのページも読み込まれていないもの(空白)とする。

注記 2: 網掛け部分は参照されたページを示す。

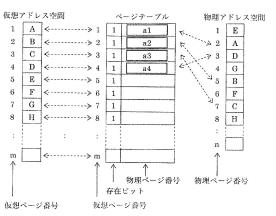
注記 3:☆ はページフォールトの発生を示す。ページフォールトは実行に必要な データが物理アドレス空間に存在しないときに発生する。

注記4: はページアウトを示す。

図A ページ参照順がW o X o W o X o W o Y o Z の場合における物理アドレス空間の状態

[設問1]

・空欄 a1~a4:図 1 で示されているデータの内容と対応関係を図 B に示す。



注記: <--->は、データの対応関係を示す。

図 B 仮想アドレス空間の仮想ページと物理アドレス空間の物理ページとの対応例

仮想アドレス空間とページテーブルは 1 対 1 に対応付けられているので、a1 ~a4 をデータで考えると A~D となる。そのデータが格納されている物理アドレス空間の物理ページ番号を確認すると、「a1=2, a2=5, a3=7, a4=3」となる。したがって、正鮮は(ウ)である。

[設問2]

この解説の日頭にも述べたが、設問 2 には「プログラムの実行過程で、実行に必要なデータが物理アドレス空間に存在していないときには、ページフォールトという制込みが発生する。ページフォールトが発生すると、仮想ページに格納されているデータを物理ページに読み込む処理(ページフォールト割込み処理)を行う」と記述されている。b, c はページフォールト割込み処理の内容であり、手順に沿って吟味していけばよい。

〔ページフォールト割込み処理〕の(1)~(3)に沿って解説をしていく。

(1) 物理ページのうち、仮想ページと対応付けられていない物理ページ (以下, 空きページ) を一つ探す。

J

図 B で物理アドレス空間の物理ページ番号 9 以降にはデータが格納されていないと仮定すると、最初の空きページは物理ページ番号 9 となる。ただし、物理ページ番号の昇順に空きページを探す。

(2) 空きページがなかった場合, 空きページにする b1 ページを一つ選び, その選んだページに格納されているデータを b2 。その後, 対応するページテーブルの要素の存在ビットを 0 にする。これによって空きページを確保する。 ↓

図 B で n=8 と仮定すると、物理アドレス空間にはデータ A~H が格納されており、空きページがない状態になる。この状態で新たなデータ I が必要となったとき、データ I を物理アドレス空間に格納しないとプログラムの実行ができなくなる。そこで、A~H のいずれか一つを物理アドレス空間から追い出し、データ I を格納する。どのページを追い出すかはページング(ページ置換え)アルゴリズムによって異なるが、図 C では H と考えると、物理ページ番号 8 にデータ I が格納されることになる。

プログラムの実行に必要なページは物理アドレス空間に存在する必要があるから、b1は「物理」である。また、その選んだページ (物理ページ番号 8) に格納されているデータ 日は不要となり、読み込むのではなく追い出すので、b2 は「補助記憶装置に書き出す」の表現が適切である。したがって、bの正解は(エ)である。なお、データ 日は物理アドレス空間に存在しなくなったので、ページテーブルの仮想ページ番号 8 の存在ピットは 1 から 0 になる。

(3) 空きページがあった場合、又はなかった場合では(2)の処理後に、その空きページに プログラムの実行に必要な cl ページに格納されているデータを c2 。 その後、対応するページテーブルの要素に物理ページ番号を登録して、その存在ビットを1にする。

(2)の処理後に、その空きページにプリプラムの実行に必要なページ(この例ではデータ I)を物理アドレス空間に読み込まないと実行できない。データ I は仮想アドレス空間にあるので、c1 は「仮想」である。問題文の冒頭に「仮想記憶方式では、補助記憶装置を仮想記憶の実装媒体として用いることによって、プログラムが主記憶の容量を超える大きさであっても、これを仮想記憶上のデータとして格納し、実行することができる」とあり、仮想アドレス空間は補助記憶装置上に実現されるので、物理アドレス空間にデータを格納するためには、(ア)の「補助記憶装置から読み込む」ことになる。(イ)は「補助記憶装置に書き出す」となっており、物理アドレス空間にデータが格納される意味とはならないので誤りである。したがっ

て, cの正解は(ア)である。

なお、データ I は今まで不要であったため、ページテーブルの存在ビットが 0 となっているが、物理アドレス空間に格納されたため 1 に更新され、物理ページ番号にはデータ I が格納されている物理ページ番号 8 が登録される。

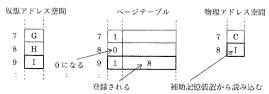


図 C ページフォールト割込み処理の対応例

[設問3]

ページの置換えを FIFO 及び LRU で行った場合のページフォールトの回数について問われている。置換えの内容は、この解説の冒頭で示したとおりである。ここでは物理ページの個数を4とした表形式の図 D 及び図 E を示す。

図 D から、ページフォールトの発生回数 (☆の数) は 10 回である。物理ページの個数が 3 のときに比べてページフォールトの回数は 9 から 10 になり、「1 回増える」ので、空欄 d は (ア) が正解である。

<FIFO 方式>

		仮想ページの参照順												
		(1)	2	(3)	4)	(5)	6	7	8	9	(Q)	11)	(2)	(13)
		4	2	1	5	4	2	3	4	2	1	5	3	5
物理ページ	1	4		→	→	→		3		>	→	5	>	_
	2		2		>	-	>	>	4	>	->	>	3	
	3			1	→	→	>		→	2	→	→	>	-
	4				5	→	>		>	>	1	→		
		☆	农	☆	☆			☆	☆	☆	☆	☆	☆	•
							1	÷	÷	÷	·	.	÷	
							٦,	4	2	1	5	3	4	

注記1:→ は物理アドレス空間の内容に変更がないことを示す。

注記2:☆ はページフォールトの発生を示す。

注記3: ↓ はページアウトの内容を示す。

図 D 物理ページの個数が 4 の FIFO 方式によるページフォールトの発生

図 E から、ページフォールトの発生回数(☆の数)は 8 回である。物理ページの個数が 3 のときに比べてページフォールトの回数は 10 から 8 になり、「2 回滅る」ので、空欄 e は(エ)が正解である。

<LRU 方式>

		仮想ページの参照順												
		1	2	3	4	(5)	6	7	8	9	10	(1)	12	(3)
		4	2	1	5	4	2	3	4	2	1	5	3	5
物理	1	4	->	→	>	4		>	4	→	->	->	3	->
理べ	2		2	→	>	>	2	>	→	2		→	>	->
1	3			1	->		->	3	→	>	>	5	→	5
2	4				5	>	→		>	→	1	>	→	->
		$\stackrel{\leftrightarrow}{\sim}$	$\stackrel{\wedge}{\sim}$	公	☆			☆			☆	☆	☆	
								÷			↓			
								1			5	3	4	

注記 1:→ は物理アドレス空間の内容に変更がないことを示す。

注記2:☆ はページフォールトの発生を示す。

注記3: はページアウトの内容を示す。

注記 4: 物理アドレス空間にあるページが参照された場合は、参照 からの経過時間が分かるよう、改めて表記している。

図 E 物理ページの個数が 4 の LRU 方式によるページフォールトの発生

考え方としては、自身が午前試験問題を解くときの手法でよいと思うが、ページアウトの内容も示しているので確認してほしい。なお、ページフォールトの発生は実行に必要なデータが物理アドレス空間に存在しない場合も含まれることに注意する。

【参考】

本設問は FIFO を用いると物理ページの個数が増えても、ページフォールトの発生回数が増える例が示されているが、この現象を Belady の例外という。この例外は特殊な参照パターンの場合に発生するものであり、実用上はほとんど問題ではないことが知られている。