

映像アーカイブ倉庫設計の最適化

The Optimal Storage Units Design of Large Scale Video Archive System

古藤 浩

KOTOH Hiroshi

元木 伸治

MOTOKI Shinji

長谷川文雄

HASEGAWA Fumio

It is necessary to refine the digital image contents system highly corresponding to the progress of the digitalization technology in recent years. In this paper, the optimization of the shape of the digital device cassette storage unit in the system is theoretically considered.

Whether making in two dimension storage unit to both sides became advantageous when the scale became which extent was analyzed. Moreover, the optimum values of the number of rows in three dimension storage unit were analyzed corresponding to the number of tapes.

Our results might be useful for the design of the archive system storage unit in future.

1. はじめに

近年の急速な画像のデジタル化技術の進展によって、デジタル映像コンテンツの供給システムを高度に洗練させる必要性が出てきた。また、日本でテレビ放送が始まって半世紀が過ぎ、間断なく増加する放送記録をどのように使い勝手よく保管するかということは重要な問題となっている。

例えば、日本放送協会では埼玉県川口市の放送所跡地に映像アーカイブセンターの建設計画を進めている。それは現在 143 万巻余りの放送済み番組やニュース素材などの映像資料の保管、2018 年には 200 万巻を越えると考えられるテープをいかにして効率的に使えるようにするかという問題と対応しながら、2003 年の運用開始が予定されている。

一方、このような問題に対応して、山形アーカイブリサーチセンターが開設され、東北芸術工科大学と産業創造支援センターを結び、ペタバイト級の大容量映像アーカイブの実験システムを組み、研究が行われている。

本研究ではこのシステムにおける映像 (VTR) 倉庫の形状についての最適化を理論的に考察する。

古藤：東北芸術工科大学デザイン工学部助教授；通信・放送機構 山形映像アーカイブ RC 研究フェロー

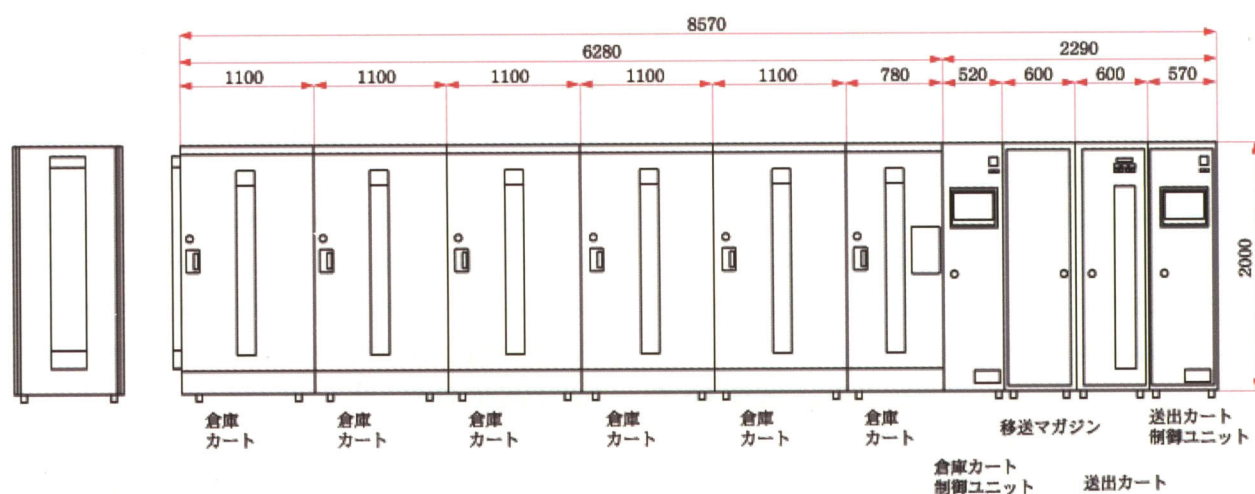
元木：東北芸術工科大学デザイン工学部助手；通信・放送機構 山形映像アーカイブ RC 研究フェロー

長谷川：東北芸術工科大学大学院長；通信・放送機構 山形映像アーカイブ RC プロジェクトリーダー

2. 実験システムの概要

大容量映像アーカイブシステム（以下実験システムと書く）は、7,200巻（約15,000時間）のデジタルVTRカセットを蓄積するテープロボット、使用頻度の高い映像を150GB（約30時間）蓄積することが可能であるハードディスクサーバーからなるハイブリッドシステムである。本システムのハードウェアの中心となるテープロボットは倉庫ユニット、結合型送出ユニット、I/Oユニット、搬送ユニットから構成されている。本研究ではこのうち倉庫ユニット内の動作を考察の中心とする。

倉庫ユニット部は7200巻のVTRを格納する部分であり、複数種類の棚にカセットが収納されてる。カセットは、制御コンピュータからの指示によりロボットアーム(カセットマニピュレータ)を使用し、所定の格納位置から取り出される。取り出されたカセットは結合型送出カート部に転送される。結合型送出カートはデジタルVTRが4台内蔵されており、必要に応じて入力もしくは出力が4チャンネルまで可能である。送出カート部は倉庫カートから送られてきた10個のカセットのうち必要なものを順次1つずつ選択し4台のVTRのいずれかに装填する。I/Oユニットは最大20個までのカセットを同時に出入庫及びバーコードリードが可能である。アーカイブ



アーカイブ側面

アーカイブ正面

図1 倉庫構成



図2 倉庫外觀



図3 倉庫内部

ロボットの構成図を図1に、概観図を図2に示す。また、各ユニットの機能詳細については以下になる。

カセットマニピュレータは、アーカイブシステムを構成するシステムの一つで、距離測定機能、カセット有無検出装置、棚座標データ自動補正機能、バーコードリード機能を搭載したマニピュレータを移動させる4軸のロボットから構成される。カセット移送装置、I/Oステーション、倉庫棚のすべての間でカセットを移動させることができる。カセット棚は630巻収納可能な棚を両面に配置し、1ブロック1260巻×5（ブロック）とI/Oステーションとカセット移送装置連結の為に1ブロック920巻で合計7200巻を収納できる。収納の状況は図3の写真に、カセットマニピュレータを図4に示す。

カセット棚にはDVCPROテープ（今後カセットと呼ぶ）が縦置きに保管され、棚座標、バーコードでカセット情報が管理される。また、「パネルコンピュータ」からの指示により、任意のカセットを目的の棚に移動する制御が可能となっている。

I/Oユニットは倉庫カートの1ブロックにありカセットの入出庫に使用する。カセットは1度に20巻の入出庫が出来、専用の扉により行う、扉の開閉は倉庫カートのパネルコンピュータでオンライン中に制御し、操作は1ボタンのみである。入庫時、I/O棚にセットされたカセットを確認のためエリア（I/O棚を1度に20巻）バーコード

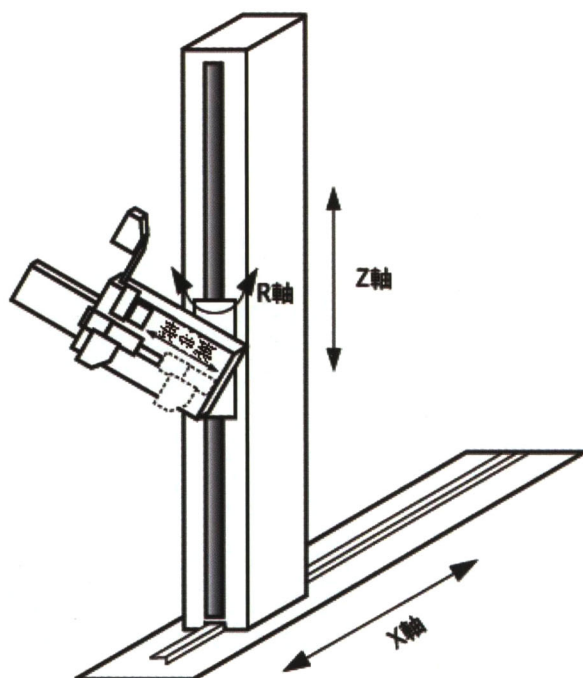


図4 カセットマニピュレータ

リードする。

本研究では倉庫カートにおけるカセット移動所要時間を測定し、定常速度・加速度を推算して使う。一回の移動動作は(1)ロボットが指定カセット有無を実際に確認、(2) ロボットがカセットを掴む、(3) カセットを棚から引き出す、(4) カセット移動、(5) ロボット停止位置の画像認識確認、(6) 微調整、(7) カセットを置く、(8) カセット有無の再確認となる。

3. 倉庫設計の基本条件

実験システムの動きのうち本研究で考察するのは、倉庫内での動きである。2章でも説明したとおり、倉庫は縦14段、一段につき45本のカセットの入る倉庫が6つ横に並んだ（一つのみ34本）形式をしている。また裏/表があり、倉庫は二列に並んでいる形式をとっている。まとめて単純化して書けば、実験システムの倉庫は14(縦)×260(横)×2(裏/表)で、一部システムに使われるスペースを除き、計7200本のカセットの収納が可能な、いわば二次元二層型の倉庫となっている。また倉庫の大きさは(縦)1.46m、(横)6.1m、(厚みー両面込み)0.94mである。

カセットマニピュレータの動きのうち、前章の説明:一回の移動動作のうち「(4) カセット移動」に注目する。この動きを更に分解すると、表（おもて）面のカセットを取り出す場合は加速・等速移動・減速・カセット取り出し・加速・等速移動・減速・送出カートへのカセット受け渡し、に分けることができる。また、裏面のカセットを

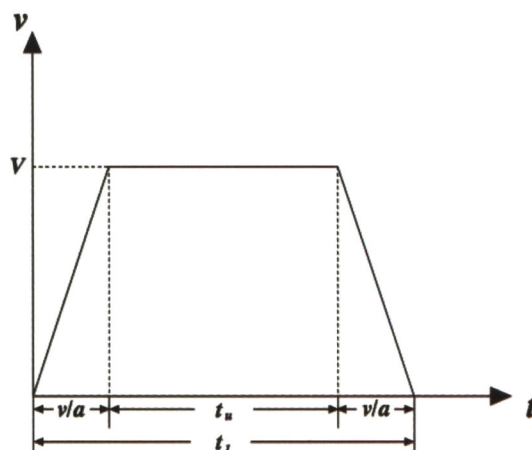


図5 時刻・速度・移動距離の関係

取り出す場合は場合は加速・等速移動・減速・回転・カセット取り出し・回転・加速・等速移動・減速・送出カートへのカセット受け渡し、に分けられる。往路と復路の所要時間は同じと考えられるので、命令があつてからカセットをとりに行くまでの所要時間を考察する。

なお、実験システムでの等速移動速度は約1.87m/s、加速・減速度は約0.12m/s²、カセット取り出し・回転は約2.2秒と概算された。これは機械の設計時におけるスペックではなく、実際の移動データから逆算した実効値である。なお、ここでの加速度は設計スペックよりもかなり小さな値である。本研究で加速度は、「加速時間による時間の遅れ」として処理されるので、ここでのその役割はカセットをつかむ時間や信号を受けて動き出すためのロスタイム等も含んでいる。

また、目的のカセットまでの移動には縦(z)方向・横(x)方向の移動が必要だが、実験システムでは、同時に両方向に関して移動しながら目的地点へ移動する。そのため、所要時間の平均値は、実験システムでは長辺である、横方向の長さが強く影響する。なお、鉛直方向と水平方向で定常速度等の数値が異なると考えられるが、本研究では一括して考察を進める。

以上の実験システムを本研究では基礎とする。また本来カセットのサイズなどに対応して離散的に議論すべきだが、一般的・平易な形で知見を得るため、本研究では単純化し、連続型で数式を展開して議論する。

4. 二次元システム倉庫の最適化

4.1 概要

実験システムは二次元システムである。ここでは二次元システムでの所要時間の一般化、裏面を設置するのが適するようになる倉庫規模の閾値の算定をおこなう。また、縦・横方向の速度が同じことから正方形型が最も効率的なのは明らかだが、長方形にしたとき、効率がどの程度落ちるのかを吟味する。

4.2 一般化と裏面設定の閾値

議論のため、次のように変数を定義する。

V : 定常速度

a : 加速度 (= 減速度)

r : 回転所要時間

L_x : 倉庫横方向延長

L_z : 倉庫縦方向延長

移動の所要時間は横方向・縦方向いずれかの長いほうの距離によって決定する。その平均距離は次の様に与えることができる。機械の出発点は原点とし、 x - z 座標系で第1象限にカセットをとりに行くと考える。

$L_x \geq L_z$ として、カセットが一様に分布するとしてそこまでの平均距離は、積分式

$$(1) \quad \frac{L_z}{L_x} \frac{2}{L_z} \int_0^{L_z} x^2 dx + \frac{L_x - L_z}{L_x} \frac{L_x + L_z}{2}$$

を解くことによって、

$$(2) \quad \frac{3L_x^2 + L_z^2}{6L_x}$$

と与えられる。式(1)の第一項はカセットが距離 L_z より短い距離の位置にある場合、第二項は L_z 以上の距離がある場合についての平均距離に対応する。

倉庫は定常速度に達するのに十分なくらい広いと仮定すると、裏面が存在しない場合の移動の所要時間のうち、定常速度で移動している時間を t_u とおけば、それは

$$t_u V + \frac{V^2}{a} = \frac{3L_x^2 + L_z^2}{6L_x}$$

と書くことができる。これは図4での面積が移動距離にあたることから導かれる式である。この式を V で割って時間の式にし、更に両辺に加速時間 V/a を加えれば、

$$(3) \quad t_1 = t_u + 2 \frac{V}{a} = \frac{3L_x^2 + L_z^2}{6L_x V} + \frac{V}{a}$$

となり、その両辺は式(2)に対応する距離の移動での所要時間(ここで t_1 と定義)と理解できる。

一方、裏面がある場合の平均所要時間は、式(2)に定数項 r の2分の1を足したものになる(裏面への回転が必要となる確率は2分の1)。

倉庫の収納できるカセット数は面積に比例する。裏面があり(横方向延長= L_x)の場合と、表面だけが横方向延長が $2L_x$ ある倉庫を比べた場合に、どの大きさから裏面の設置が効果的になるかの閾値を求める。裏面がある場合の L_x を基準とする。それは方程式

$$\frac{3(2L_x)^2 + L_z^2}{6(2L_x)V} + \frac{V}{a} \geq \frac{3L_x^2 + L_z^2}{6L_xV} + \frac{V}{a} + \frac{r}{2}$$

から

$$(4) \quad L_x - \frac{L_z^2}{6L_x} \geq rV$$

と得ることができる。なお、この式は $L_x \geq 2L_z$ の場合に成立する式であり、縦方向の比率がより大きい場合は、異なる式となるが、ここでは省略する。式 (4) で右辺は定常速度×回転時間＝[回転時間に進める距離] なので、左辺の第2項を無視すれば、回転時間に進める長さが倉庫にあるかということを意味する。

実験システムの場合、 $L_x=6.1$ (m)、 $L_z=1.46$ (m) から左辺は 6.04、対して右辺 $rV=4.11$ (m) なので、不等式 (4) は成立し、裏面の設置は十分効果的と分かる。

4.3 長方形化と効率性

実験システムは横に長い形状なのだが、それは最も効率がよい正方形の場合に比べてどの程度、効率が悪くなっているのかを考察する。

倉庫の保管可能本数 S はカセット一本の断面積を D として、 $L_x L_z / D$ と書ける。式 (2) を L_x と S, D の式に直せば、

$$(5) \quad \frac{L_x}{2} - \frac{(SD)^2}{6L_x^3}$$

となる。カセットの断面積はおおよそ高さ 0.104m、横 0.0234m から 0.002434m² と得るので、平均移動距離は現在の実験システムが 3.11m であるところが、正方形にすると 1.99m になるとわかり、倉庫室の天井高の制約によって平均距離が約 56% 犠牲になっているとわかる。

式 (5) を L_x で微分すれば

$$\frac{1}{2} - \frac{(SD)^2}{2L_x^4}$$

となる。ここで第二項分母は L_x の 4 乗で効き、 L_x が大きくなるにつれて急速に 0 に近づく。つまり L_x の変化に対して第一項が主な効果を及ぼす。それは、長方形型にすれば、ほぼその長辺の長さだけ効率が悪化することを示す。

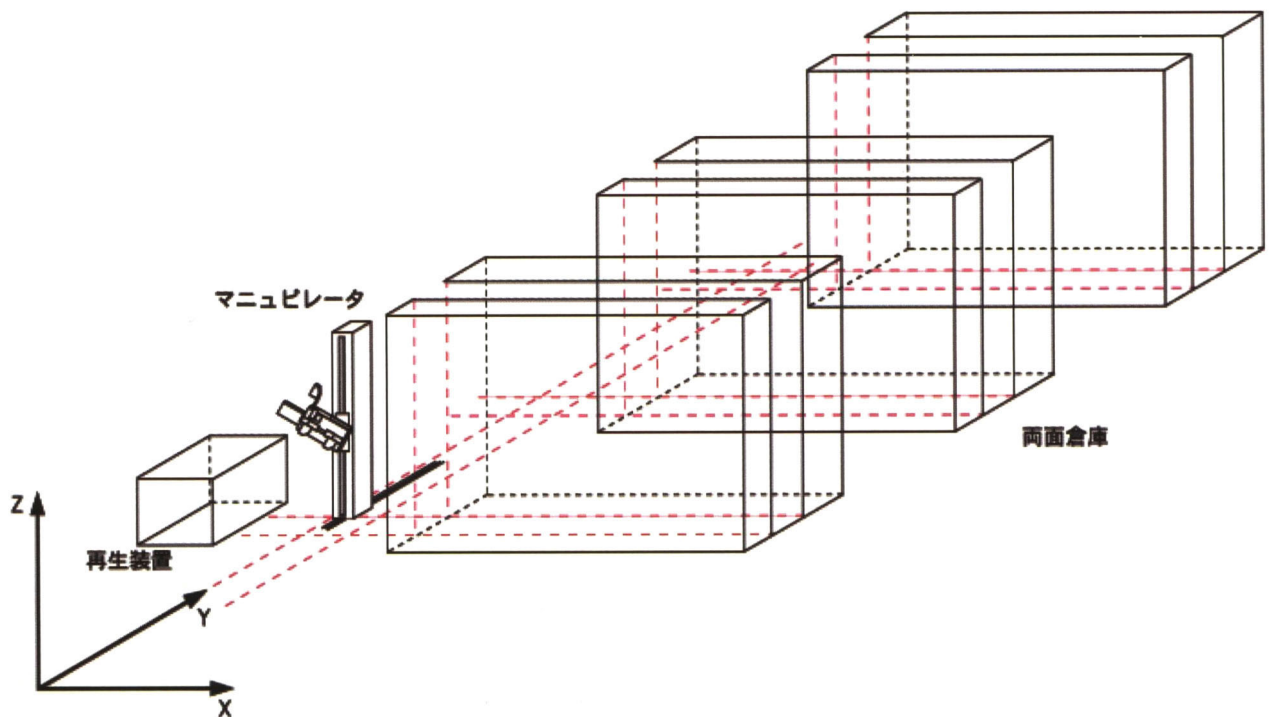


図6 三次元フォーク型倉庫

5. 三次元システム倉庫の考察

数千本のカセットを保管するのならば実験システムのような二次元両面型倉庫で十分効果的だが、保管カセット数が万の単位、NHKの川口のシステムの規模になると3次元型に倉庫を整備する必要があるだろう。ここでは実験システムのスペックを基準として、三次元型倉庫の効率性を議論する。

三次元型のシステムの形状は図6のような形式（これをフォーク型と呼ぶことにする）を考える。この特徴はまずy軸方向（奥行き方向）にのみ動いた上で、x-z軸方向へ動くという二段階の動きをすることにある。三次元全方向に動くのは不可能なので妥当なシステム形状だろう。

変数を以下のように追加して定義する

n : 奥行き方向の倉庫の列数

W_y : 一列の幅

L_y : 奥行き方向の倉庫の幅 ($=nW_y$)

T : 両面倉庫の平面方向総延長 (nL_x)

以上を用い、列数 n の関数 $f(n)$ として平均所要時間の式を定式化すれば

$$(6) \quad f(n) = \frac{3(T/n)^2 + L_z^2}{6(T/n)V} + \frac{V}{a} + \frac{r}{2} + \left(\frac{(n-1)W_y}{2V} + \frac{V}{a} \right)$$

となる。式 (6) で大括弧で囲んだ部分が y (奥行き) 方向への移動の所要時間である。この式を整理すると

$$f(n) = \frac{T}{2nV} + \left(\frac{L_z^2}{6TV} + \frac{W_y}{2V} \right) n + \frac{2V}{a} - \frac{W_y}{2V} + \frac{r}{2}$$

を得るので、微分し、0 とおいてくれば

$$(7) \quad n = \sqrt{\frac{3T^2}{L_z^2 + 3TW_y}}$$

となり、これは最適な倉庫の列数の概算値となる。全方向の定常速度は同じなので式 (7) では V, a は現れない。なお、最適な n^* での平均所要時間は

$$f(n^*) = \frac{\sqrt{L_z^2 + 3TW_y}}{6V} (\sqrt{3} + 1) + \frac{2V}{a} - \frac{W_y}{2V} + \frac{r}{2}$$

と与えることができる。ただし、ここでは n^* は実数なの

で近くの整数を調べる必要がある。実験システムのカセット数を式 (7) に代入して計算すると、2.4 となるので現在の両面1列よりも2列に増やすことに効率が上がることが指摘できる。

ただし、システムの複雑化による不安定化、一度に一本のカセット取りに行くことだけを考えているが、実際には同時に10本まで取りに行くことがあるので、これが絶対に最適とはいえない。

一方、式 (6) は連続型の式であり、列数が1でも y 方向の移動による加速度が加算されており、少ない列数を考察する場合には問題が多い。そこで、倉庫が2列の場合の所要時間を正確に定式化する。実験システムでの横方向長さ L_x を基準とし、2列の場合は横方向長さは $L_x/2$ となる。2列の方が平均所要時間が短くなる閾値は不等式

$$\frac{3L_x^2 + L_z^2}{6L_xV} + \frac{V}{a} + \frac{r}{2} \geq \frac{3(L_x/2)^2 + L_z^2}{6(L_x/2)V} + \frac{V}{a} + \frac{r}{2} + \sqrt{\frac{W_y}{a}}$$

から求められる。ここで最後の項は一列分の W_y の動きでは定常速度まで達することはできないことから計算している。単純に加速して定常速度に達する前に減速して W_y の距離を進むのにかかる所要時間を計算し、平均値なのでそれを2で割った。この式を整理し、

$$\frac{3}{2} L_x^2 - 6V \sqrt{\frac{W_y}{a}} L_x - L_z^2 \geq 0$$

から、

$$L_x \geq 2V \sqrt{\frac{W_y}{a}} + \frac{2}{3} \sqrt{\frac{9V^2 W_y}{a} + \frac{3}{2} L_z^2}$$

と得ることができる。この右辺に実験システムの値を代入して、 L_x を求めれば、延長が21.2m以上、すなわち保管可能カセット数が約25400本以上の場合は2列のシステムとしたらよいという結果を得た。以上によって式 (7) は列数がそれなりに多い場合に使える式と用途を分ける必要がわかるだろう。以上の結果を3種類のシステムの比較として図7に示す。

6. まとめと今後の研究方向

一章で触れた NHK の川口に建設中のアーカイブセン

ターでは143万本を収納予定、2018年を見据えて200万本を収納可能とする。この場合に、実験システムと同じサイズのカセットを使い、高さ L_z も同じとすると、(7)式を用いて42列が望ましいと計算できる。

また、技術の可能性として、例えば高さを3倍の5 mにした場合は、22列が望ましいという結果や、定常速度が x 方向、 z 方向に均等に变化しても、アーカイブ倉庫の最適値は変わらない等を知ることができる。このように本研究の知見を応用することによって、システムのスペックとそれに対応する最適設計について様々な示唆を得ることができる。

一方、実験システムのマニピュレーターは一度に10本までのカセットを輸送することができる。必要に応じて複数本のカセットが要求されることは一般的なことであろう。しかし、3次元書庫についてはその行き先の分布の分析が非常に難しく、定式化が困難である。シミュレーション等によって対応する今後の課題としたい。

但し、2次元型の場合で n 本の列数に対し要求カセット数が十分多いときの考察はある程度可能である。カセットが二次元片面倉庫に要求されたとき、マニピュレータは一番奥のカセットから順に取りながら戻ってくるとする。 s 本のカセットを x 軸方向でとってくる場合の最遠点位置の期待値 p^* は以下のように与えられる：

s 本全てが位置 p より近い位置にある確率：

$$(p/L)^s,$$

そして位置 p になる確率が50%となる位置 p^* が最遠点位置の期待値である。

$$(p^*/L)^s=0.5$$

$$p^*=L/2^{(1/s)}$$

この式に従えば、 p^* は、 $s=1 \rightarrow 0.5Lx$ 、 $s=2 \rightarrow 0.707Lx$ 、 $s=3 \rightarrow 0.794Lx$ 、 $\dots$ $s=10 \rightarrow 0.933Lx$ 、という具合に与えられ、この形の倉庫での平均所要時間は計算できる。しかし両面型、三次元型の場合、それぞれの面に対し目的カセットがどのように分布するか、特に本数の配分の解析が困難なので、シミュレーション等の方法で今後対応したい。一般論として、複数本を取りに行く場合は複数の列を移動する必要のため1本の場合より、移動距離が平均的に長くなるので、本研究の結果よりもよりカセット数の多い局面で3次元型の必要性が起きるだろう。

一方、本研究では触れていない様々な研究課題がある。例えば書庫の中で、再生装置に近い場所にRAMに相当するような記憶場所、または一時収蔵庫をおき、使用頻度の高いカセットをそこにおくようなシステムを組むことによってどの程度効率が上がるのか、フォーク型の3次元倉庫ではなく、グリッド型の道路（レール）網を装備したいわば網の目状の倉庫にすれば効率はどの程度上がるのか、などである。これらについては今後の課題としたい。

参考文献・資料

- 1) 丹野義和他 (2001)：大規模自動装填ロボットによるペタバイト級映像アーカイブシステム。電子情報通信学会論文誌、B Vol.J84-B No.4 pp.809-817。

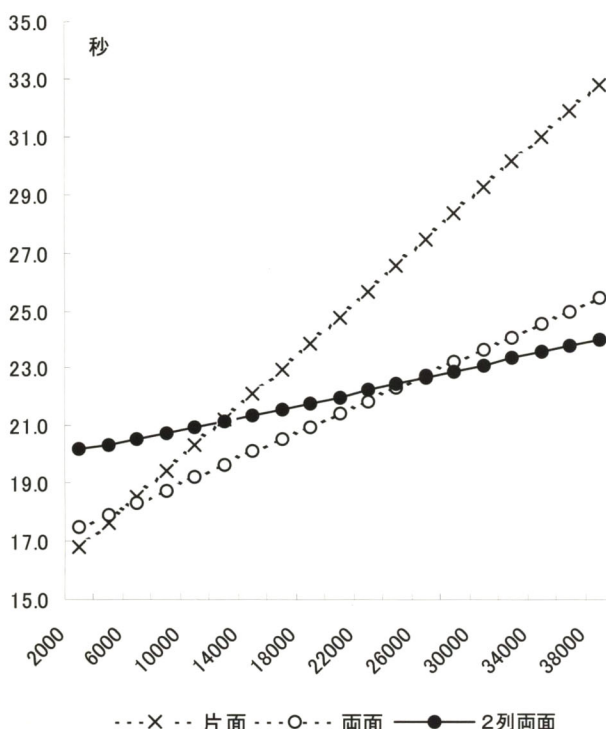


図7 カセット本数と平均所要時間の関係