HOKUGA 北海学園学術情報リポジトリ
学校法人北海学園
北海学園大学
北海商科大学

タイトル	待ち行列モデルを用いた鉄道貨物ヤードの配線に関する一手法
著者	上浦，正樹; Kamiura，Masaki
引用	工学研究 ： 北海学園大学大学院工学研究科紀要(18): 19-24
発行日	2018-09-30

Hokkai-Gakuen Organization of Knowledge Ubiquitous through Gaining Archives.

研究論文

待ち行列モデルを用いた鉄道貨物ヤードの配線に関する一手法

上　浦　正　樹*

A Method of Railway Track Layout Planning Based on Queueing Model

Masaki Kamiura*

要　旨

近年になって海外技術協力などで，鉄道ヤードの設計する機会が増してきているが，日本から提案する場合多くは支援を受ける国の技術基準によるが，未だに国鉄時代に作られた貨物ヤードの配線基準を用いているケースは少なくない．一方で，国際的な視点に立った場合，有効な技術提案を行うためには，これらの根拠を明確にし，効率的な設計を行う基準の見直しが必要である．そこで，本研究では国鉄時代に作られた貨物ヤードの配線の設計基準を検討することした．そのために待ち行列モデルを用いて本線からの到着線と出発線の適正な数量を求め，設計の基準を示した．また，貨物ヤード構内に用いられている仕訳線と引上げ線では，機関車と貨車の車両特性を生かした延長の求め方を提案した．

Key Words *: railway, yard, track layout, queueing model*

1．はじめに

鉄道貨物ヤードで，全国各ヤードから全国各ヤードへ向かって輸送される貨車を最も能率よく，かつ迅速に輸送するために貨物列車の再編成を行なう場所である．貨物ヤードに集まった貨車のうち，遠距離行きの貨車はまとめて急直行列車に編成し，近距離行きの列車の貨車は駅順に並べて地方列車とするケースが多い．したがって貨物ヤードは，貨車の多量に集まる場所，幹線の接続個所，幹線の中間などの貨車の分解組成を必要とする個所に設置される．よって貨車取扱数量の多い駅では独立した貨車ヤードが設置される．しかし，このような分散配置された貨物ヤードで到着貨車を切り離して留置し荷物を取卸す貨車分離方式では，積込み時に行き先方面別に線路を確保する必要がある．

国鉄時代では，貨物ヤードは広大な用地を擁し，貨車を行き先方面別に線路で仕分けをする貨車分離方式が採用されていた．一方，国鉄の民営分割によって，全国の貨物輸送を担うJR貨物が発足したが，貨物輸送の効率化を推進する必要から，線路で仕分けをする貨車分離方式から，コンテナを導入して貨車を分離せずにフォークリフトでコンテナを行き先方面別に仕分けするコンテナヤード方式へ変更になった．その結果，JR貨物が発足してから30年以上経た現在，大規模な貨物ヤードの新設を行うケースは皆無となった．一方，貨車分離方式やコンテナヤード方式において，貨物ヤードの線路の配置を設計する配線の考え方は国鉄時代に作られた貨物ヤードの配線基準によっていて，その見直しが行われていないままであった．

一方，近年になって海外技術協力などで，鉄道ヤードの設計する機会が増してきているが，貨車分離方式が主体で日本から提案する場合，多くはその国の技術基準によりものの，未だに国鉄時代に作られた貨物ヤードの配線基準を採用している場合が多い．しかし，国際的に視点に立ち，有効な技術提案を行うためには，効率的な設計を行う基準の見直しが必要である．そこで，本研究の目

* 北海学園大学大学院工学研究科建設工学専攻（社会環境系）　教授・博士（工学）
Graduate School of Engineering (Civil & Environmental Eng.), Hokkai-Gakuen University

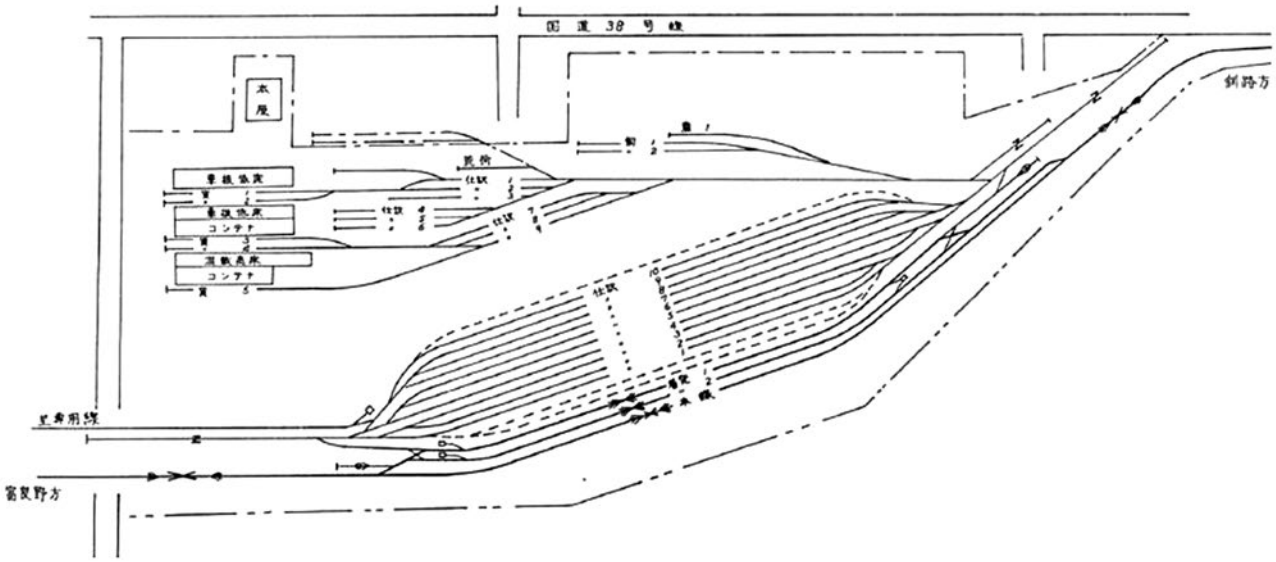

図-1　貨物ヤードの配線例（帯広貨物駅）

的は国鉄時代に作られた貨物ヤードの配線基準を見直し，効率的な設計とするための検討を行うこととした．

2．鉄道貨物ヤードの配線

(1)　従来の配線計画

貨物ヤードに着発するすべての貨車は１つの群線で作業が行なわれる．図-1 に帯広貨物駅の例を示す．この図に示すように貨物列車は本線の上りと下り方向から分岐して駅構内へ入線し着発線で停車する．この際重要なのは，相互間着発貨車の受授に便利であるように引上げ線の配置を決定することである[1]．その引上げ線に入換機関車で引上げ上げられた貨車は分離されそれぞれの仕訳線に分割される．国鉄時代ではこの仕訳線群を擁する配線の形式となっていた．

鉄道貨物ヤードの中には，始発駅や終点駅のように線路が行き止まりになっている構造のものがある．これは頭端式貨物駅と呼ばれ，北海道では函館の五稜郭貨物駅がある．図-2 は頭端式貨物駅の一般的な例である．本線から駅構内に入線した貨物列車は到着線（①）に入線する．機関車は貨車の先頭にある機関車は切り離され機廻線（＜○＞で表示され，②で示す）を通って回送される．次に切り離された貨車に駅構内だけで運用される機関車（入換え用機関車）が最後方の貨車に連結され，引上げ線（③）まで移動する．次に貨車はそれぞれ切り離され，物資別など貨車に積まれている内容に従って仕訳線（④）で仕訳され，貨物ホーム（⑤）に入線する．貨物ホームで荷卸しされた後，空になった貨車に新たな貨物が積み込まれる．貨物ホームでの積み込が終わった貨車は入れ換え機関車でそれぞれ仕訳線（④）に持ち込まれる．

次に行先方面別に貨車の連結の順番が定められ，これに従って引上げ線（③）で貨物列車用に編成される[2]．最後に出発線（⑤）に編成された貨車が持ち込まれ，本線用機関車に連結されて貨物列車となる．以上が一連の流れである．

このように貨物駅はそれぞれの役割を持つ線群から構成されている．よって，配線計画では各用

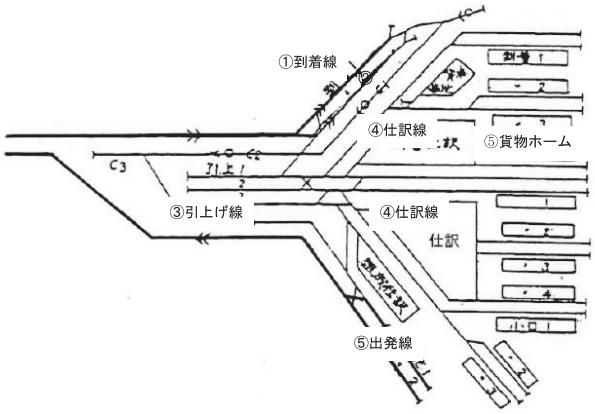

図-2　頭端式貨物駅の配線

途の線数とその延長を決定することが第一段階である．1960 年代までに国鉄では多くの貨物駅が作られた．しかしトラックや船舶による貨物輸送の台頭により，鉄道輸送が減少し貨物駅の新設は非常に少なくなっていった．従ってこの第一段階で必要な設計基準は 1960 年代に完成したままであった．その後半世紀を経て，統計手法も進歩してきたことから，本研究ではこれらの基準を再検討することとした．

3．到着線と出発線における線数の決定法

(1)　到着線

(a)　作業関係

本選を運行する貨物列車は，貨物ヤードに到着する場合到着線に入線する．そこで本線用機関車は外され，入換用機関車に連結される．一方では検査掛が車両の各部について到着検査を行なう．また各貨車の切り離しに備え，貫通制動連結管の切放しを行なう場合がある．これらの作業は一般に列車到着からだいたい 10〜15 分を要するとされている[3]．

(b)　待ち行列モデルの適用

貨物列車が本線から到着し，着発線に入線する場合，すでに他の列車が入線したケースでは当該列車は場外で待機せざるを得ない．この状態が日常的に発生すると 1 日単位で構成される列車と貨車の運行ダイヤを定常に運用することができない．それは，列車の到着時間の不確実性と着発線数に限りがあることが関係している．そこで，貨物ヤードの配線基準では様々な経験則や待ち行列理論などが導入し，これらを組合せて個々に運用されてきた．本稿では，待ち行列モデルにより検討を加える．

一般的に待ち行列モデルではサービス施設における不確実性を確率的に表すことにより，客の行動やシステムの構造が混雑（待ち行列）に与える影響を明らかにし，サービス施設における運用に資する指標と使用されている．この待ち行列モデルの解析ではマルコフ過程を採用することがある．このマルコフ過程とは，過去から現在までの状態が既知であるという条件のもとで，次の未来の状態を確率的に予測する方法である．この場合，過去の情報が現在の情報に関係しないとの仮定（マルコフ性）により最も新しい現在の状態のみで未来予測の確率を求めるものである．一方，設計段階では現在の状態も仮定せざるを得ないので実質な精度を向上する上ではあまり適していない．

次に，モンテカルロ法によって乱数を用いる離散事象をシミュレーションする方法がある．これは列車の到着が変化する状態をランダムな事象と考えて，時系列的にそれらの変化する状態に対し時刻を進めながら待ち行列の状態の変更をシミュレーションする手法である．この方法は災害時に列車が乱れ，通常の列車ダイヤで運行できない場合を想定することに相当する．このような異常時を想定した設備とすることは過大な設備量になる可能性がある．

既往の研究[4]において，外房線御宿駅の下り列車の到着時隔の度数分布図を求め，有効時間帯が制限される最少時間間隔を用いた度数分布に対し，確率密度曲線を当てはめた事例がある．この結果は実態によく適合していた．また，列車運行はポアソン過程をなしていることが確認されている．以上により，各列車は本線上に同時に到着することがなく（非同時性），また，走行するときに列車間での相互も影響はなく（独立性）到着する列車の間隔が一定で時間に依存しない（定常性）であると仮定する．これらの仮定が成り立つ条件では到着する列車はポアソン分布を用いることができる[5]．

(c)　到着線数の推定方法

列車がポアソン分布にしたがって到着し，機関車の切り離しなどの分解作業を行う場合において到着線で列車が待ち行列をつくると考える．列車の到着時間間隔を指数分布とする．

単位時間に到着する列車の平均を平均到着率とし λ とする．よって列車が到着してから t 時間以内に次の列車が来る確率は $1-e^{-\lambda t}$ である．これからごく短い時間 Δt の間に列車が入線する確率は $\lambda\Delta t$ である．到着線を占有する平均時間を機関車の切り離しなどの分解作業時間として μ で示す．同様に，列車が到着してから t 時間以内に分解作業が終わる確率は $1-e^{-\mu t}$ である．従ってく短い時間 Δt の間に分解作業が終わる確率は $\lambda\Delta t$ である．

ここで，駅の要員から定まっている作業時間帯に到着する列車本数 n が待ち行列の対象とする．次に，時刻 t において到着列車が到着線に入線で

きない列車数を n とし，この発生確率を $P_n(t)$ とする．

確率時刻 t から $t+\Delta t$ の間に到着列車のない確率 P(A) とする．この条件で時刻 t では列車本数 $n=0$ とし，Δt の間でも到着列車の入線がないとすると $P(A)=P_0(t)\times(1-\lambda\Delta t)$ となる．つぎに時刻 t で列車本数 $n=1$，Δt の間で分解作業が終了する確率 P(B) とすると，$P(B)=P_1(t)\Delta t$ となる．

以上から次の式が導かれる．

$$P_o(t+\Delta t)=P_o(t)(1-\lambda\Delta t)+P_1\mu\Delta t \qquad (1)$$

ここでポアソン分布が時間に依存しないことから $P_0(t+\Delta t)=P_0(t)$ より $P_0(t)\lambda\Delta t=P_1(t)\mu\Delta t$ となる．ここで $\rho=\frac{\lambda}{\mu}$ とすると式(2)が成り立つ．

$$P_1(t)=P_0(t)\times\rho \qquad (2)$$

(2)から類推すると式(3)が成り立つ．

$$P_n(t)=P_0(t)\times\rho^n \qquad (3)$$

以上により全ての確率の和は 1 であることから無限大の和を想定すると

$$\sum_0^\infty P_i(t)=\sum_0^\infty P_0\times\rho^i=1$$

よって $P_0(t)\times\frac{1}{1-\rho}=1$ から式(4)が成り立つ．

$$P_0(t)=1-\rho \qquad (4)$$

よって式(3)と式(4)により式(5)が導かれる．

$$P_n(t)=(1-\rho)\times\rho^n \qquad (5)$$

以上から到着線の数を m とするとその信頼度 S は式(6)となる．

$$S=\sum_{n=0}^{m}P_n(t)=(1-\rho)\sum_{n=0}^{m}\rho^h=1-\rho^{m+1} \qquad (6)$$

ここで信頼度 95%～85%において ρ に対する必要線数を図-3 に示す．

(2)　出発線

(a)　作業関係

出発線は，組成された列車を引上げ線から持ち込み，列車の発車のため本線に出るための待機で使用される．そこで必要な線数は，すえつけ列車の入線する密度と線路をふさいでいる時間とによって決められる．

(b)　待ち行列モデルの適用

出発線に対し，待合わせ過程を到着線の逆に考えることができる．列車の出発における時間間隔と組成列車のすえつけに要する時間間隔を指数分布であると仮定する．ここで作業時間 a とし，単位時間に出発する列車の平均を平均出発率とし λ とする．これらを用いると列車が出発線に入線してから次の列車が来る確率は $1-e^{-\lambda a}$ である．また出発線を占有する平均時間を μ で示す．ここで $\rho=\frac{\lambda}{\mu}$ とする．次に平均組成作業時分を a とする．

以上から出発線に列車がない確率 P_0 は次のようになる．

$$p_0=\frac{1-\rho}{1+\lambda a} \qquad (7)$$

同様に出発線に 1 本列車がある確率 P_1 を式(8)に示す．

$$p_1=\frac{1-\rho}{1+\lambda c}\left(\frac{1}{z_0}-e^{-\lambda a}\right) \qquad (8)$$

ここで(8)式の z_n を(9)式とする

$$z_n=\rho^n e^{-\lambda} \qquad (9)$$

以上の線の結果から信頼度 S に対する出発線の必要線数と λa の関係を図-4 に示す．

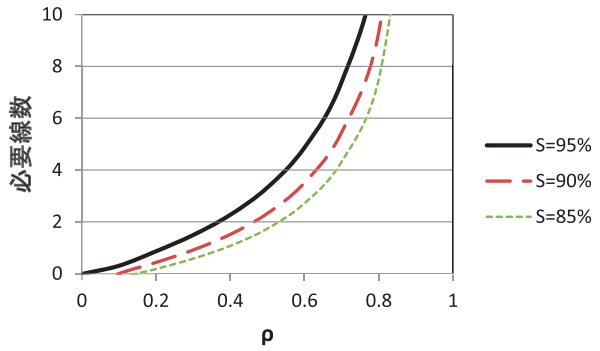

図-3　到着線の必要線数

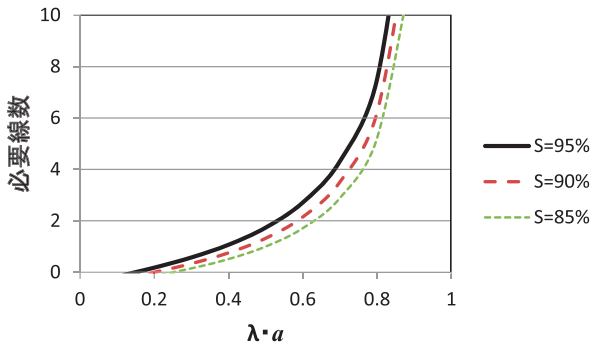

図-4　出発線の必要線数

4．仕訳線と引上げ線の線路延長の決定法

(1)　仕訳線

(a)　仕訳線の作業内容

貨物駅では一般的にホーム別仕訳，組成仕訳，ホームへの入付け，引取り仕訳から構成される仕訳線の線数は引上げ線の作業能率によって定まる．取扱い貨車数が多い場合はけん引機のための引上げ線を設け，けん引機で入換え機の補助作業ができるよう配慮している．また，取扱い車数が多くなった場合，到着仕訳，発送仕訳等に線群を複数に分割し，それぞれに引上げ線を設ける検討が必要となる．通常の場合，１台の入換え機で取り扱える車数は約 400 車/日を目安となっている[6]．

(b)　仕訳線の有効長の決定方法

貨物駅の仕訳線の有効長とは仕訳作業を円滑に行うことのできる範囲における線路延長のことである．その延長（L）を以下によって求める．

仕訳線を使用する貨車の両数 ne 両と 1 両の貨車の長さ Ym において貨車に関係する全体の長さを有効長（Lf）とすると Lf＝ne×Y となる．

入換機関車が仕訳線の有効長に関係するものにブレーキ距離がある．仕訳線への入換時の入換機関車の最大速度は 25 km/h とするとブレーキ距離は 100 m である[7]ので，入換機関車に関係する有効長を Lp とすると Lp＝100 m となる．

また，入換時に車止め，車両接触限界標との余裕をみて，この間に停止できるように余裕長を 20 m とする．よって余裕長に関係する有効長を Ls とすると Ls＝20 となる．

以上から仕訳線の有効長（L）は＝Lf＋Lp＋Ls より式(10)が導かれる．

$$L = ne \times Y + 100 + 20 \tag{10}$$

ここで L：有効長（m），ne：仕訳線を使用する貨車の両数（両），Y：貨車の長さ（m）とする．

なお，一般的には仕訳縁の有効長は 200 m～300 m 程度である．例えば，有効長 300 m の仕訳線では，貨車の両数は，貨車の長さが 8.2 m では 20 両程度であり，14 m では 13 両程度である．**図-5** は貨車の長さ 8 m と 14 m に対する貨車両数に対する仕訳線の有効長を示したものである．

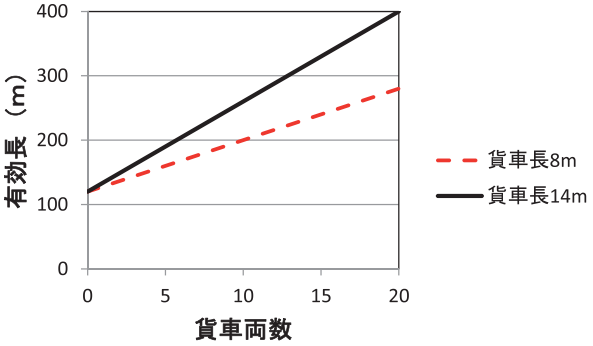

図-5　仕訳線の有効長

(2)　引き上げ線

引上げ線は貨車の仕訳作業を行うために使用する重要な側線である．大規模な貨物駅では別に設け，その有効長は着発線と同じ長さが望ましい．到着した列車は本線用機関車が外され，一連の貨車は入替機関車に連結される．仕訳用の引上げ線は仕訳線の作業では 20～30 車で行う場合が最も効率のよいこともあって，一般には 300 m 程度の有効長のものを設けている．一方，出発線では 1 個列車の全てを引上げる必要から着発線の有効長を引上げ長としている．

5．まとめ

鉄道貨物ヤードには本線から到着して貨物列車を仕訳によって分解し各貨車の貨物を取卸す役目がある．また，その逆に，貨物を貨車に積み込んで行先方面別に貨車を組成し貨物列車として本線へ出発する機能も有する．

鉄道貨物ヤードにはこれらの機能を果すため，到着線，引上げ線，仕訳線，出発線などの線があり，それぞれを結び付けるために分岐器が配置されている．これらの配線計画の基準は国鉄時代に定められていた．

近年，海外技術協力などで，日本からの技術提案として鉄道ヤードの設計する機会が増してきている．しかしヤードの配線の設計基準は国鉄時代から変わらないうえに，その根拠を明確にする資料があまり残っていない現状にある．よって本研究では，これらの根拠を明確にするため，待ち行列モデルに着目して到着線と出発線における線数を求める方法を提案した．また，仕訳線と引上げ線では，機関車と貨車の車両特性を生かした線路

の延長の求め方を提案した.

参考文献

1）池田本，松田忠義　楠見　務：停車場の計画と設計，山海堂，pp.176-184，1985
2）運転設備研究会編：運転設備，日本鉄道運転協会，pp.127-139，1974
3）沖島喜八：新編鉄道車両特論，交友社，pp.241-250，1982
4）横田英男：列車ダイヤ作成の検知よりする待避線の機能の解析とその計画原則：土木学会論文集第 299，pp.186-187，1980
5）東京大学教養部統計学教室編　統計学入門：東京大学出版会，pp.113-116，1986
6）停車場線路配線研究会編：新停車場線路配線ハンドブック，吉井書店，pp.68-81，1995
7）石井幸孝：入門鉄道車両，pp.174-177，交友社，1993