

スイス連邦鉄道における接続を重視した 新しい運行管理手法 —戦略的施策から実際の運営の場 に至るまでの余裕時分の活用手法—

Felix Laube^{1*}, Marco Lüthi²

スイス連邦鉄道 (SBB) は, Bahn 2000 というコンセプトを考案し, 全土に導入してきた。これは, あらゆる主要駅での巧妙な列車の接続を実現した列車ダイヤである。しかし, その成功のおかげで, 利用者が増大し, 路線は飽和状態となってしまった。また, 列車が遅れたときには, 遅延を持ちこさないように接続を解除するが, これは, 利用者にとって大きな不満となっている。SBB では, 列車運行のパフォーマンスを改善し, 顧客の要望に応えるために, 新しいコンセプトを立ち立て, 運行管理プロセスを再構築することにした。このアプローチは, 日本の鉄道の運行管理手法とリアルタイムの再スケジュールリングを組み合わせることで, 余裕時分をうまく配置し, それを活用しようとするものである。

キーワード: 運行管理, 余裕時分, Bahn 2000, スイス

1. スイスの鉄道

スイスは, 西ヨーロッパの中心に位置している。主だった特徴としては, 次がある。

- ・面積は 41,000 平方キロ (九州とほぼ同じ)。国土の 60% はアルプス, 10% は, ジュラ山脈である。
- ・人口は, 750 万人 (九州の半分よりやや多い程度)。公用語は 4 つ。人口の 65% は, Mittelland と呼ばれるアルプスとジュラ山脈の間に居住する。

公共交通, 特に鉄道は, スイスにおいて, 長年, 重要な役割を果たしてきた。実際, 2003 年には, 公共交通に対する鉄道のシェアは 21% (旅客輸送), 34% (貨物) であった。SBB が運営している路線長は, 3,000 km (標準軌, すべて電化) である [1]。また, 他の 2,000 キロの路線は, 多数の私鉄 (50 以上存在する) によってそれぞれ運営されている。私鉄の路線には, 標準軌と狭軌の両方があるが, いずれもすべて電化されている。鉄道のネットワークは非常に細かいメッシュ状に張り巡らされており, 多くの主要駅がその結節点となっている。鉄道ネットワーク上には, ほ

ぼ全域において, 様々な種類の列車 (貨物列車, 通勤列車, 地域内列車, 国際列車など) が走行している。UIC (Union Internationale des Chemins de Fer : 国際鉄道連合) の統計 [2] では, SBB は, 平均すると, 1 日あたり 1 つのルートに 93.8 本の列車を走らせており, 平均値としては, 世界で最も列車密度が高い鉄道となる (図 1)。また, 列車運行の品質と定時性は, 他のヨーロッパの国と比較して抜きん出ている。例えば, 2006 年には, 旅客列車のうち, 96.2% が 5 分以内の遅延で到着したという記録をうちたてている。

1980 年代中ごろに, 東西の軸となる高速新線建設

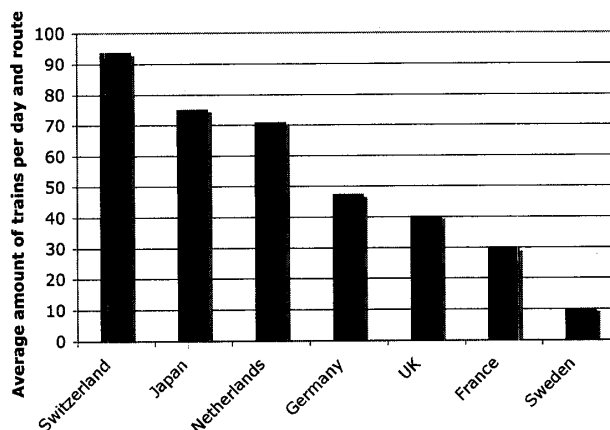


図 1 1 日・1 路線あたりの列車本数の平均値

¹ Swiss Federal Railways SBB

* felix.laube@sbb.ch

² Swiss Federal Institute of Technology

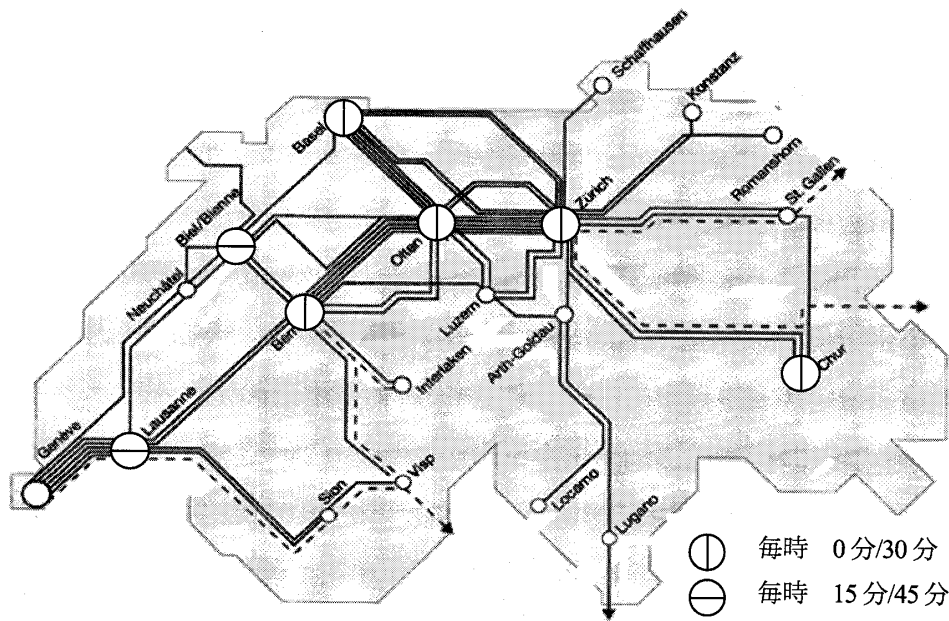


図3 初期段階の Bahn 2000 での列車運行系統

訳注：1本の線が、その路線に1時間に1本の列車が運転されていることを示す。
結節駅では、毎時、0分/30分、または、15分/45分に、列車が発車する。

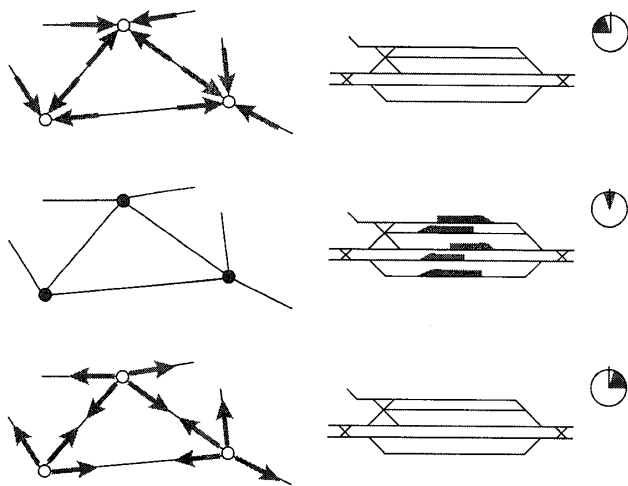


図2 接続を考慮した列車ダイヤ (Bahn 2000) の概念

訳注：主要駅では、毎正時の少し前に各方面から列車が到着し、双方向の乗換が終わったのち、各方面に向けて発車する。線区によって、これが30分ごと、あるいは15分ごとに繰り返される(左側は鉄道の路線と列車の進行状況、右側は駅の配線と列車の在線状況を表す)。

計画があった。しかし、この計画は複数の州 (Canton) によって否決されてしまう。その結果として、SBBでは、Bahn 2000 と称するきわめて新しい戦略を採用することとした。これは、国土のすべての領域において、総合的な clock face timetable¹ (Integrat-

ed Clock-face Timetable: ICT) によって全国土を結ぼうとするものである (図2)。

ICTでは、主要駅の間には、必ずある一定の間隔で運行サービスが設定される。列車の接続が最大限とれるように、車両やインフラが調整されている²。この列車ダイヤでは、列車の接続がうまくとられているために、非常に短い待ち時間での乗換が可能になり、目的地までの到達時間が著しく短縮された。

われわれは、このコンセプトは、主要駅がいくつか存在し、かつ、メッシュ状のネットワークがあって、需要構造がスイスと似ている日本の地方線区に対しても十分成立しうると考えている。

ICTは、非常な人気を博すこととなった。2004年12月には、主要路線において、Bahn 2000が実現され、多くのルートで、終日、30分間隔のパターンダイヤで列車が運転されることになった (図3)。その結果として、鉄道に多くの顧客を呼び込むことに成功した。そして、残りの路線においても Bahn 2000が完成したときには、需要はさらに増えると思われている。実際、2004年12月から2007年12月にかけて、SBBの旅客輸送に対する全体のデマンドは、実に

¹ 訳注：日本では、「パターンダイヤ」と呼ぶ。一定の列車運行パターンを繰り返すダイヤのこと。

² 訳注：例えば、2つの駅で、毎時0分と30分発のパターンダイヤを実現しようとする時、その駅間の走行に要する時間は、30分の倍数でなければならない。そうなるように、線路の改良などに重点的に設備投資を行ったことを言っている。

38%も増加した。そして、この傾向はいまなお加速しているのである。

Bahn 2000 の成功の代償として、スイスの鉄道ネットワークは、飽和の限界まで達してしまった。皮肉なことに、その結果、鉄道ネットワークは、より不安定となり、小規模の遅延に対しても接続を解除することが増えてしまった。かくして、高いパフォーマンスを確保し、増え続ける需要に対応するためには、運行計画と運行管理に関して、新しい考え方を導入することが不可避となった。そのとき、もっとも重要なことは、利用者のデマンドを満足させるとともに、顧客指向の輸送により焦点をあてることだと認識している。

2. SBB の新しい運行計画と運行管理の狙いと視野

自家用車を持つてはいるが、コスト、速度、利便性、信頼性の点から鉄道を選ぶ人がある。こういう人たちが主な顧客であり、鉄道会社は、これらの人たちをできる限り取り込むように努めなければならない。

今日、SBB は、かなりよいサービスを提供していると自負している。しかし、ある利用者の個人的な経験から、次のような点が現時点の運行管理上の問題として指摘されている[3]。

『6月のある夕方、Olten 経由で Burgdorf から Basel へ向かった。Olten でのダイヤ上の接続時間は3分であった。Olten の近くまでは、すべて順調だった。しかし、Olten の手前で、列車は速度を徐々に落とし、ついに止まってしまった。これは、接続旅客にとって悪夢であった。このおかげで、3分以上損してしまった。列車の中では何が起きているのかの案内もない。見ていると、長編成の貨物列車がゆっくりと通り過ぎていき、その後、私の列車がやっと動き出した。ここでも、1分くらい損をすることになった。Basel 行きの列車のプラットフォームに走れるように、あらかじめ列車のドア付近に移動した。ホームに着いたとき（これは、予定の発時刻よりも15秒後だった）、列車はすでに動き出していて、結局それに乗ることはできなかった。たった15秒遅かっただけなのに、そのために、30分待つはめになってしまった。悲しいかな、SBB の駅は情報砂漠である。特に、夕方や週末には、結局、他にもっとよい速い行き方があるかどうかもわからず、レストランや店やトイレまでもが閉まっている駅で次の列車を待つという無駄な時

間をすごさなければならなかったのである。』

Laube と Mahadevan は、SBB は、2つのニーズに応えることに注力すべきであるとしている[4]。1つ目は、より顧客指向の考え方で列車を運行することである。特に、接続を確保することと、案内情報をうまく提供することが重要である。2つ目は、既存のインフラをより効率的、効果的に使って、増えていくデマンドに対応し、かつ、コストの増加を抑えることである。

この改善の主な目的は、次の通りである。

- ICT を用いたシステムにおいては、定時運行を前提とした信頼性が重要である。ただし、遅延を途中で取り戻すことができ、また、最初の遅延が特に問題ないのであれば、接続を確保するために列車を少し待たせる方が定時性にこだわることよりもよいこともある。
- SBB のように広範囲にわたり、かつ、緊密に接続されている鉄道ネットワークにおいては、駅で、列車の到着や出発時刻の案内情報が得られないことは、到底受け入れがたい。
- 列車の運行管理プロセスの中には、いくつかの種類の「余裕」が含まれているが、余裕の与え方と使い方についての方針を見直す必要がある。つまり、関係者すべて（指令員、設備管理者、運転士、車掌）は、これまでとは異なった運行計画と運行管理のプロセスに従わなければならない。

3. 新しい運行計画と運行管理の方法

鉄道システムの性能は、運行計画の中に含まれる余裕に左右される。余裕の存在は、一方では、インフラの使用効率を下げ、所要時間を延ばしてしまう。他方、余裕が含まれていれば、システムはより安定し、遅延や予期せぬ事象に対して頑健になる。つまり、余裕を適切に配分することが重要であるということになる。われわれは、運行計画における余裕は、3つのレベルに分類できると考えている。

- 許容範囲という余裕：許容範囲とは、その中に収まっていれば、個々のプロセスの結果がうまくいっているとされる範囲のことをいう。例えば、運転士は、他の列車に影響を与えることなく、決められた線路上の「枠」(slot)の中を進んで行かなければならない。この場合の許容範

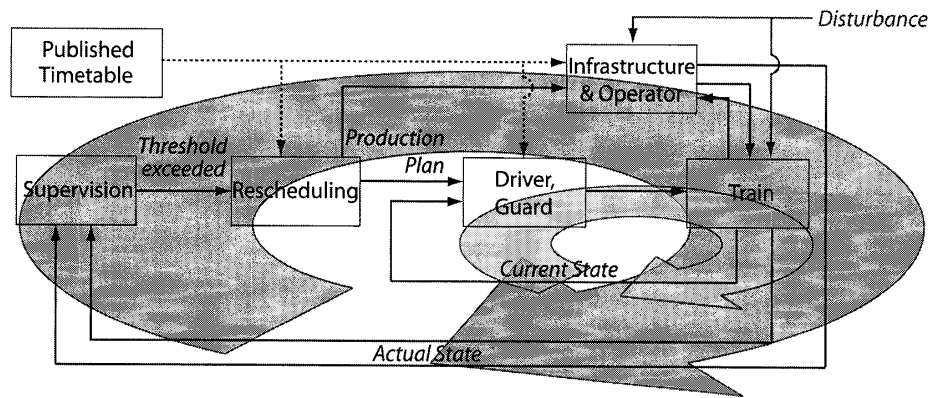


図4 Co-Production コントロールループの概念

圃は固い制約となる。つまり、その列車がその枠の範囲に収まっている限りにおいては、他の列車との競合はないが、それをほみだせば他の列車と競合（他の列車が遅延するなど）することがありうる。

- 停車時間と走行時間における余裕：停車時間と走行時間に余裕が含まれていれば、遅延の回復が可能になる。われわれは、停車時間と走行時間に割り振るべき適切な余裕時間を決定するための2段階のアルゴリズムを開発している。このアルゴリズムは、グローバルなレベルでは、*flexible periodic event scheduling model (FPESP)* と称するモデルに基づいて、最適な余裕時間の配分を決定するようにそれぞれの事象の時刻の範囲が決定され、局所的なレベルでは、その時刻の範囲内において、容量制約があるそれぞれのゾーンにおいて、もっとも効率的なリソース割り当てが見出される。残った余裕時間は、*resource time conflict graph model* と称する手法に基づいて、最適に分配される。このモデルとアルゴリズムの詳細については、文献[5][6]をご参照いただきたい。
- 未割当の容量：未割当の容量とは、例えば、列車が走っていない時間枠や列車が入っていない番線などをいう。これらは、計画作成時には、意図的に列車の動きから切り離しておき、実際に列車が走行するときに必要に応じて使用する。

鉄道の運行には、3つのコアプロセスすなわち、定時発車、定時運転、運行計画の短時間での変更がある。効率的で高品質な運行管理を保障するためには、これら3つのコアプロセスを正確にコントロールすることが不可欠である。SBBでは、これを実現するために、

Co-Production と呼ぶ新しいコンセプトを開発した(図4)。このアプローチは、動的なリアルタイムの再スケジューリングと正確な列車運転を組み合わせた、2重のフィードバックコントロールループの重ね合わせとして設計されている[7]。

このCo-Production コンセプトの背景には、列車はすべて、競合のないように再計算された最新の運行計画(ダイヤ、速度、進路情報)を常に持っているべきであるというアイデアがある。このダイヤは、秒単位の正確さで計算され³、すべての関係者によって常時参照可能になっている。このことは、列車がある閾値を超えたとき、あるいは、状況が変化したとき(例えば、列車の性能が変わったとき、インフラが故障したときなど)には、それらを反映した新しいスケジュールを生成するための高速なアルゴリズムが必要となることを意味する。このアルゴリズムは、接続を不用意に解除することはしない。また、常に、利用者指向の決定を行う。このアルゴリズムの背景には、われわれがPULSと呼んでいるインテリジェントな時空分散化の手法がある。PULSは、Roosによって提唱されたものであるが、可能解の数を限定し、容量のボトルネックとなっている箇所に対する新しいダイヤを迅速に生成する[8]。図5に、ルツェルン周辺の駅のエリアに対する時空グラフの例を示す。

この改良再スケジューリングプロセスを効果的に利用するためには、鉄道会社は、現在よりも、もっと正確にダイヤを守って列車を運転するようにしなければ

³ 訳注：日本を含めて、列車の運転時刻は、駅の着・発時刻のみを管理するのが伝統的な考え方である。列車の運行途中の時刻を秒単位の正確さで管理し、また、そのための時刻をリアルタイムで算出するというのは、従来にない考え方である。

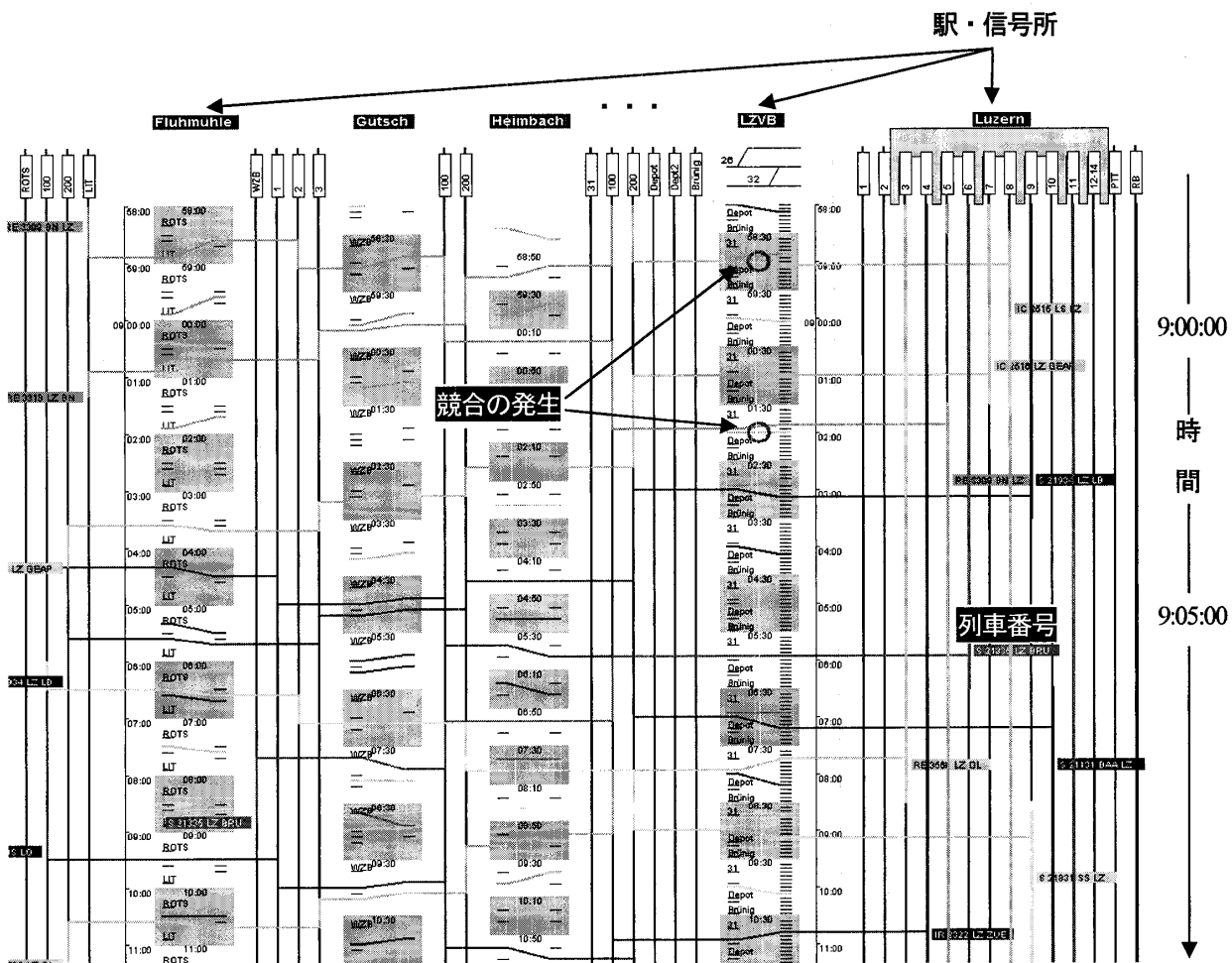


図5 ルツェルン地区に対する PULS ダイアグラム

訳注：鉄道では、通常、列車の線を斜めにしたダイヤ図を使う。ここで示されているダイアグラムは、駅近辺での列車の進路の競合を把握し、競合が発生している場合には、どちらかの列車の時刻をずらしてその列車を走らせるための「空き」(slotあるいは、「時間的な穴」)がどこにあるかを見つけやすいように工夫されている。このダイアグラムは、実際に駅の信号扱い所で表示され、マウスによる操作で、列車を割り当てるslotの変更が行われているものである。ここでは、PULSという列車の時刻を離散化する手法の説明として用いられている。なお、図中の日本語およびそれに関連の表示は、訳注である。

ならない。このことは、動的に変わっていく列車ダイヤに非常に正確に追従できるように運転士を助けるツールが必要になることを意味する。ひとつのアプローチは、インテリジェントな運転士マシンインタフェースを使うことである。これは、ダイヤ乱れの都度、新しく生成される列車の軌跡に従って運転することを支援するシステムである。列車が運転士によって運転されることには変わりはない。運転士は、まず安全を保証し、次に時刻どおりの運転を行う。

列車の運転のプロセスだけでなく、列車が駅から出発するときにも正確に時刻を守るようにしなければならない。列車の出発時刻の不正確さと統計的なブレを少なくするためにも、そのプロセスの改善と技術的な支援が必要である。列車の出発までに要する時間を短

くすることと利用者に正確な出発時刻を知らせる新しい旅客情報システム⁴の開発の両方に取り組むことになるだろう。

現在、ルツェルンの近辺で、ここで紹介した新しいCo-Production手法とプロセスの研究のためのパイロット実験を行っている。そこでは、実際の日々の列車運行において、段階的に実験範囲を広げていくことになっている。最終的には、Co-Productionのすべての要素を統合し、より多くの列車を同時に対象としたテストを行うことにしている。最初のテストは2007年と2008年の最初に行われ、ここでは、関係者

⁴ 訳注：ご存じのように、伝統的に、発車ベルや発車メロディーなどはない。

すべてからの意見の収集と技術的な設備を設定することを行った。そして、十分な見通しが得られた。すなわち、運転士は、運転支援ツールを歓迎し、出発時刻のずれが、わずか15秒にとどまるという成果が得られたのである。

4. 結論

鉄道会社の魅力と競争力を改善するためには、運行計画の作成と運行管理に対する新しい手法とプロセスが必要である。インフラが飽和して、需要の伸びに対応できず、その結果、システムは不安定になって、列車の接続がとれなくなり、利用者を失望させることになった。

現時点の運行管理方法は、事象駆動型であるといえる。しかし、今後は、もはや直列の事象駆動型のシステムではなく、時間駆動型でなければならないと考えている。余裕の管理方法を再構築することにより、しっかりした予測に基づいて運行管理を行うという大きな前進が可能となる。その結果、利用者には、より高信頼度の結果が提供され、接続が守られないという特に不満度の高い事象の発生は最小限になるはずである。そして、もし、そういう事象が発生したときには、個々の利用者に代替案が個別に提供される。これは、顧客の満足度を高め、鉄道の地位を高めることになるだろう。加えて、余裕の管理方法を改善することにより、より合目的的にリソースを割り当てることが可能になる。つまり、既存のインフラをより効率的、効果的に使うことができる。さらに、付加的な余剰として、エネルギー消費が減少することも期待できる。また、労働者のモチベーションがあがり、作業の質が向上することも期待できる。これらすべては、近未来のある時点まで、コストを削減し、増加する需要を取り扱う

ことの役にたつだろう。

最後に、新しい手法やプロセスの変革は、何かツールを買ってくるだけで実現できるわけではないということを理解することが重要である。マネジメントのすべての階層において、たえまなくプロセスを変革していこうという熱意を持つことが不可欠である。

(訳：富井規雄 千葉工業大学)

参考文献

- [1] Swiss Federal Railways (2006) : Annual Report, SBB AG Bern.
- [2] UIC Union Internationale des Chemins de Fer (2006) : International Railway Statistics.
- [3] Kenworthy, J. (2007) : Making Connections, SBB AG Bern, Internal Report.
- [4] Laube, F. and Mahadevan, V. (2008) : Bringing customer focus into every nut and bolt of the railway : Swiss Federal Railways path into the future, *WCRR World Conference of Railway Research Seoul*.
- [5] Caimi, G., Fuchsberger, M., Laumanns, M. and Schüpbach, K. (2007) : Periodic Railway Timetabling with Event Flexibility, *Proceedings of ATMOS*.
- [6] Caimi, G., Chudak, F., Fuchsberger, M. and Laumanns, M. (2007) : Design of a new railway scheduling model for dense services, *Proceedings of 2nd IAROR Seminar, Hannover*.
- [7] Lüthi, M., Weidmann, U., Laube, F. and Medeossi, G. (2007) : Rescheduling and Train Control : A New Framework for Railroad Traffic Control in Heavily Used Networks, *86th TRB Transportation Research Board, Washington*.
- [8] Roos, S. (2006) : Bewertung von Knotenmanagement-Methoden für Eisenbahnen, *Master Thesis*, (in German), ETH Zurich.