

# “都市モノレール”の実用化—千葉都市モノレール—

Realization of Urban Monorail System — Chiba Urban Monorail System —

三原製作所 松尾有正\*<sup>1</sup> 坂本勝彦\*<sup>2</sup>  
 神戸造船所 桑原秀夫\*<sup>3</sup>  
 技術本部 山口正博\*<sup>4</sup>

湘南モノレールに始まった懸垂型モノレール実用線が、新交通システム/中量輸送システムの一つである“都市モノレール”として実用化された。その間に車体変位の制御技術、新型軌道桁・分岐構造、騒音低減技術などの開発を実施し、現在の懸垂型モノレールの仕様がある。懸垂型モノレールの特徴は、(1) 車体変位の制御により狭い都市空間に導入することができる、(2) 約1t/mの超軽量軌道桁(けた)を有する、(3) 全天候性により安定した輸送を提供する、(4) 軌道側方10mにおいて70dB(A)以下の低騒音を有する、などが挙げられる。これらの技術開発の概要を通し、懸垂型モノレールの特徴を解説する。

Suspended monorail systems, similar to the one which started service as the Shonan Monorail Line, have been established as an urban monorail system which is one of the new medium capacity transit systems. In building it, many technical developments took place such as control of vehicle vibrations, weight reduction of the guideway, switching control of guideway switches and noise reduction in vehicle. These developments contribute to the present specification of the Mitsubishi Suspended Monorail System, summarized as follows: (1) Can be applied in restricted urban spaces by controlling the vibrations of vehicles. (2) Light guideway/girders weighing approx. 1 ton/meter. (3) Safe and stable service in transportation due to weather-resistance. (4) Low noise, less than 70 dB(A), 10 m from the guideway.

## 1. ま え が き

懸垂型モノレールの実用線は、1901年、ドイツに生まれた。ブッパタル市にて川の上部スペースを有効に利用して建設され、営業開始から約1世紀経過後の現在でも多くの市民の輸送に供されている。

三菱式懸垂型モノレールは、その後開発されたフランスのサフェージュ社と技術提携を行い、昭和39年2月名古屋市東山公園に500mの展示線を建設した。本格的には、昭和45年神奈川県大船～江の島間に約6.6kmの営業線が建設され、現在も市民の欠かせない乗物として活躍している。これらの経験を生かし、新しい都市モノレールとしての要求にこたえ、昭和63年3月に部分開業したのが千葉都市モノレールである。営業路線15kmの完成を目標に現在も残り区間の建設工事が行われている。千葉都市モノレールの実例とともに都市モノレールの実用化について以下に述べる。

## 2. 都市モノレールへの実用化について

### 2.1 湘南モノレール江の島線の建設

国内初の本格的懸垂型モノレールとして昭和40年10月に地方鉄道法(現鉄道事業法)による免許を取得し、昭和43年6月工事着手、昭和45年3月大船～西鎌倉間4.8km開通、翌46年7月に湘南江の島まで全線6.6kmに延長された。昭和59年には、開業以来14年目に輸送人員1億人を突破し、安全かつ快適な交通輸送機関として定着している。

湘南モノレールの路線は、単線ながら複線効果を有する駅交差配線を採用し、また、最急こう配7.4%、最小曲線半径100m(本線)(駅部では50m)という在来鉄道にない急こう配・小曲線半径を用いることにより、既存の町並に柔軟に適合している。このように懸垂型モノレールの持つ優れた登坂能力や曲線通過性能等の特長を遺憾なく発揮し、また、地上高さ約6mから見下

表1 都市モノレールの仕様  
Specification of urban monorail

	湘南モノレール	都市モノレール
適用法規	地方鉄道法(現鉄道事業法)	軌道法
占有幅	大	小
輸送力	小(単線軌道)	大(複線軌道)
信号	ATS	ATC
分岐	油圧駆動方式	電気駆動方式
軌道	剛構造	柔構造/軽量化
環境	鉄道なみ	低騒音
快適性	換気装置(初期車両)	クーラ搭載
安全性	避難対策	避難対策多重化(複線対応)

ろすパノラマ風景は乗客の目を十分に楽しませてくれるものである。

### 2.2 都市モノレールの誕生

鉄道とバスとの間の中量輸送を担う新しい交通システムとして“都市モノレール”が注目され、運輸・建設両省によって“都市モノレール構造基準”が制定されるに至った。都市空間の制約の下で、高い輸送力、低公害、安全性などが要求される中、湘南モノレールのシステムをベースに表1のような“都市モノレール”の仕様を設定した。これらの仕様を満足し、“都市モノレール”を実用化するため、次のような技術開発を行った。

●建築限界幅の縮小(狭い道路への適応)、●分岐駆動方式の変更(油圧→電気)(保守軽減)、●柔構造桁の開発(軽量・低廉化)、●低騒音化(環境対策)。

## 3. 実用化のための技術開発

### 3.1 建築限界の縮小

都市モノレールを狭い道路上に設置する場合、側方空間(消火活動等)の確保のため建築限界の縮小が必要となる。懸垂型独自の振り子機能(振り子運動によって遠心力などの横力を緩和する)に制限を与えながら乗心地、曲線通過性能(本線最小曲線半径50m)を維持するという相反した技術的命題の両立が求めら

\*1 新製品開発部プラント計画課長

\*3 鉄構部機械装置設計課長

\*2 新製品開発部交通システム設計課主務

\*4 広島研究所機械研究室

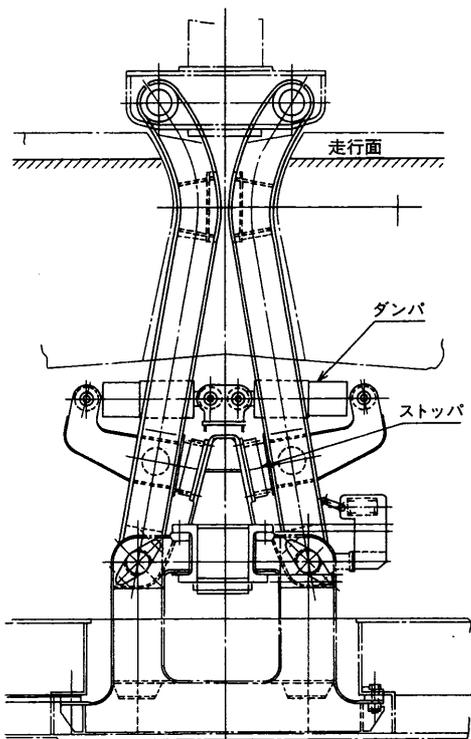


図1 懸垂装置の構造  
Structure of suspending device

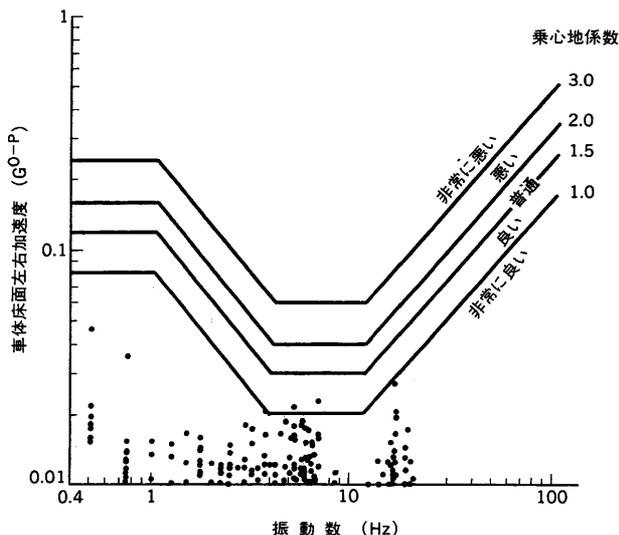


図2 懸垂型モノレール車両の乗心地  
Ride comfort of suspended-type monorail vehicle (Chiba Urban Monorail)

れた。

本開発に当たっては車体と台車間を支持する懸垂装置（図1に示す）の横変位特性、ダンパ性能及びゴムストッパ位置の最適化を図った。検証に当たっては、振動解析プログラムを用い、単台車及び一車両解析モデルの理論解析を行うとともに、実車両を用いて静的、動的な実験を実施し、解析値と実測値との整合の検証を行った。さらに乗心地に関しては軌道桁(けた)の剛性、精度を考慮したシミュレーションを実施し、車両側、桁側の仕様を決定した。図2には千葉都市モノレールにおける左右振動の乗心地測定結果を示す。結果は乗心地係数1.0“非常に良い”の範囲にあり、良好な乗心地であることを実証した。

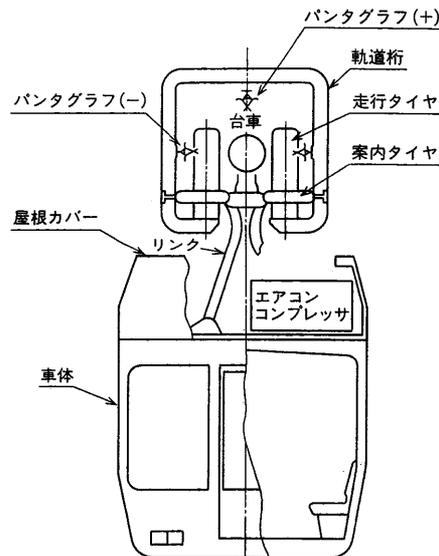
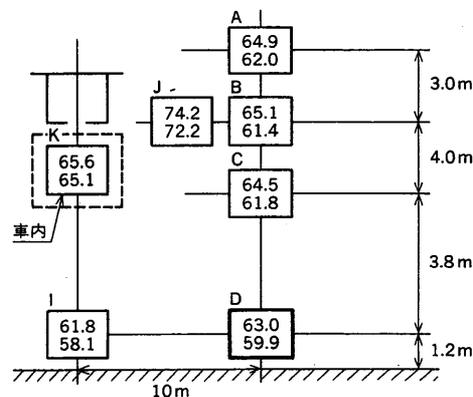


図3 懸垂型モノレール車両の騒音源  
Noise sources of suspended-type monorail system



注 上段：60 km/h 時騒音 (dB(A))  
下段：40 km/h 時騒音 (dB(A))  
図4 懸垂型モノレール車両の車外騒音  
Measured exterior noise level of Chiba Urban Monorail

### 3.2 低騒音化

環境対策として車外騒音を低減するため高砂・長崎・広島各研究所の協力を得て低騒音プロジェクトチームを構成し、その開発に当たった。図3に示すとおり、懸垂型モノレールは、台車周りの主要な騒音源が軌道桁内に収納されているため、従来の鉄道車両に比較し、騒音レベルは低いものとされている。しかしながら、軌道側方にて70 dB(A)以下という目標値を達成するため、さらに、各機器の音源対策、遮音対策を進め、実用線（湘南モノレール）における実機検証を経て、大幅な低騒音化を実現した。

図4は千葉都市モノレールでの騒音実測値を示す。60 km/h 走行時、車内騒音は65.6 dB(A)、車外騒音は10 m側方、地上1.2 mにて63 dB(A)と低騒音特性を実証することができた。

### 3.3 軌道桁の軽量化

都市モノレールの普及のため、昭和57年、建設費の低廉化を目指した新軌道桁の開発に着手した。軌道桁は変動の大きい応力が繰返し作用するため、疲労耐力を向上させながら、いかに軽量化を図るかが最重要課題であった。そして昭和59年、初期の目標とした、

表2 軌道桁の構造的特徴  
Characteristics of new girder

特徴	内容
① 薄肉シェルタイプ構造	・板方式の柔な補剛リングを密に配置し、断面剛性の均一化により応力分散
② 疲労損傷に対する信頼性の向上	・①の応力分散効果により、疲労を支配する応力集中を緩和し、耐力を向上
③ 構造の単純化と桁重量の軽減化	・補剛リングと走行桁のフランジをなくし、部材数、加工度及び溶接量を削減
④ スレンダーな外観	・補剛リングの縮小と均一化により全体ボリューム感を減少

表3 軌道桁構造比較  
Comparison table of girders

	従来の軌道桁	新軌道桁																
外観																		
断面																		
補剛リング配置間隔	<table border="1"> <thead> <tr> <th>曲率半径 (m)</th> <th>リブピッチ LP (m)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>50 ≤ R ≤ 100</td> <td>1.2</td> </tr> <tr> <td>100 &lt; R ≤ 200</td> <td>1.6</td> </tr> <tr> <td>200 &lt; R ≤ 300</td> <td>2.0</td> </tr> <tr> <td>300 &lt; R</td> <td>2.5</td> </tr> </tbody> </table>	曲率半径 (m)	リブピッチ LP (m)	50 ≤ R ≤ 100	1.2	100 < R ≤ 200	1.6	200 < R ≤ 300	2.0	300 < R	2.5	<table border="1"> <thead> <tr> <th>曲率半径 (m)</th> <th>リブピッチ LP (m)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>R ≤ 200</td> <td>1.2</td> </tr> <tr> <td>R &gt; 200</td> <td>1.5</td> </tr> </tbody> </table>	曲率半径 (m)	リブピッチ LP (m)	R ≤ 200	1.2	R > 200	1.5
曲率半径 (m)	リブピッチ LP (m)																	
50 ≤ R ≤ 100	1.2																	
100 < R ≤ 200	1.6																	
200 < R ≤ 300	2.0																	
300 < R	2.5																	
曲率半径 (m)	リブピッチ LP (m)																	
R ≤ 200	1.2																	
R > 200	1.5																	

- (1) 疲労損傷に対する信頼性の向上,
- (2) 構造の単純化と軽量化,
- (3) 溶接量の低減,

を達成し、千葉都市モノレールに採用された。

懸垂型モノレールの軌道桁は下面にスリットを有する箱断面薄肉はり構造で、モノレール車両輪荷重を支柱へ伝達させるはり機能と断面内において輪荷重を支持するための断面保持機能が要求される。この断面保持機能は軌道桁長手方向に所定のピッチで設けられた補剛リングが担っているが、従来の軌道桁では剛な補剛リングが単独で支持しており1箇所に大きな応力が作用していた。これに対し、新軌道桁では柔な補剛リングを密に配置するとともに側面に連続水平スチフナを設け、軌道桁長手方向への荷重分散効果を出すことにより応力集中を緩和し、疲労耐力の向上及び軽量化を図った。また部材の単純化、製作の簡易化も図っている。

表2, 3にその構造的特徴をまとめて示す。

3.4 分岐の電気駆動化

分岐装置はフランスのサフェージュ社との技術提携により昭和42年湘南モノレールに開発1号機を納入したが、油圧駆動方式のため作動油の漏れ、転換時の可動レールと固定桁との衝突による騒音等、その対策に苦慮してきた。そこで安全確保と信頼性を

表4 分岐主要目  
Specification of new switch

項目	内容
形式	・片開き
可動レール公称長さ	・タイプ1 - 14.524 m ・タイプ3 - 13.675 m
レール転換時分	・約 15 s
駆動装置	・電気転てつ器 (新幹線電気転てつ器形式)
操作方法	・遠方操作(信号と連動) - 常時 ・現場押ボタン操作 - 保守点検時 ・現場手動操作 - 停電及び故障時
電動機	・転換用 DC 200 V, 5.4 kW サイリスタレオナード制御 ・引上げ圧着用 AC 200 V, 3.3 kW 3φ4P

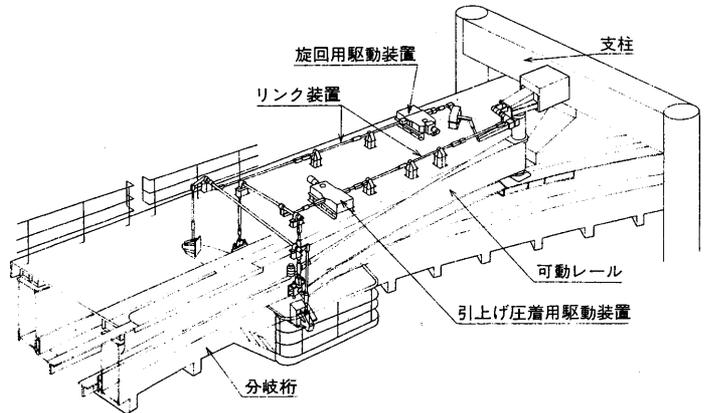


図5 分岐概要図 電気駆動式分岐のバース  
Structure of new switch

向上させるために抜本的な改善策を鋭意模索してきたが、昭和52年駆動機構の全面的変更に着手し、次のテーマで開発を進めた。

- (1) 駆動装置として安全が実証されている鉄道用電気転てつ器方式の採用。
- (2) 騒音防止のため、直流電動機による旋回加減速制御方式の採用。
- (3) リンク機構の活用による駆動機構の集約簡略化。

開発に当たっては実機モデルにより作動テスト、騒音テスト、載荷変形テスト、昼夜連続及び雨天作動テスト等を実施し、性能を検証した。開発された新方式の分岐は千葉都市モノレールで実用されており、所期の性能を発揮している。

本分岐の主要目及び概要図を表4及び図5に示す。

4. 全天候性の検証

以上の実用化のための技術開発のほか、懸垂型モノレールの全天候性を検証するため、次のような実験及び解析を実施した。

4.1 耐雪

近年各都市ではそのドーナツ化現象に伴い郊外と都心を結ぶ新しい公共交通機関が要求されており、特に積雪地域では路面の雪水対策を重要なテーマとして調査検討がなされてきた。

懸垂型モノレールは走行路面が軌道桁によって覆われているため、積雪には有利な方式であり有望な機種と考えられている。しかしながら積雪地域では、吹雪、凍結など極めて厳しい環境にさらされることになる。過去昭和37~39年に札幌市郊外及び新潟県下で冬期の耐候試験を実施し、軌道桁内への着雪現象は“なし”と報告されているが、新たに懸垂型モノレールの総合的な耐雪、

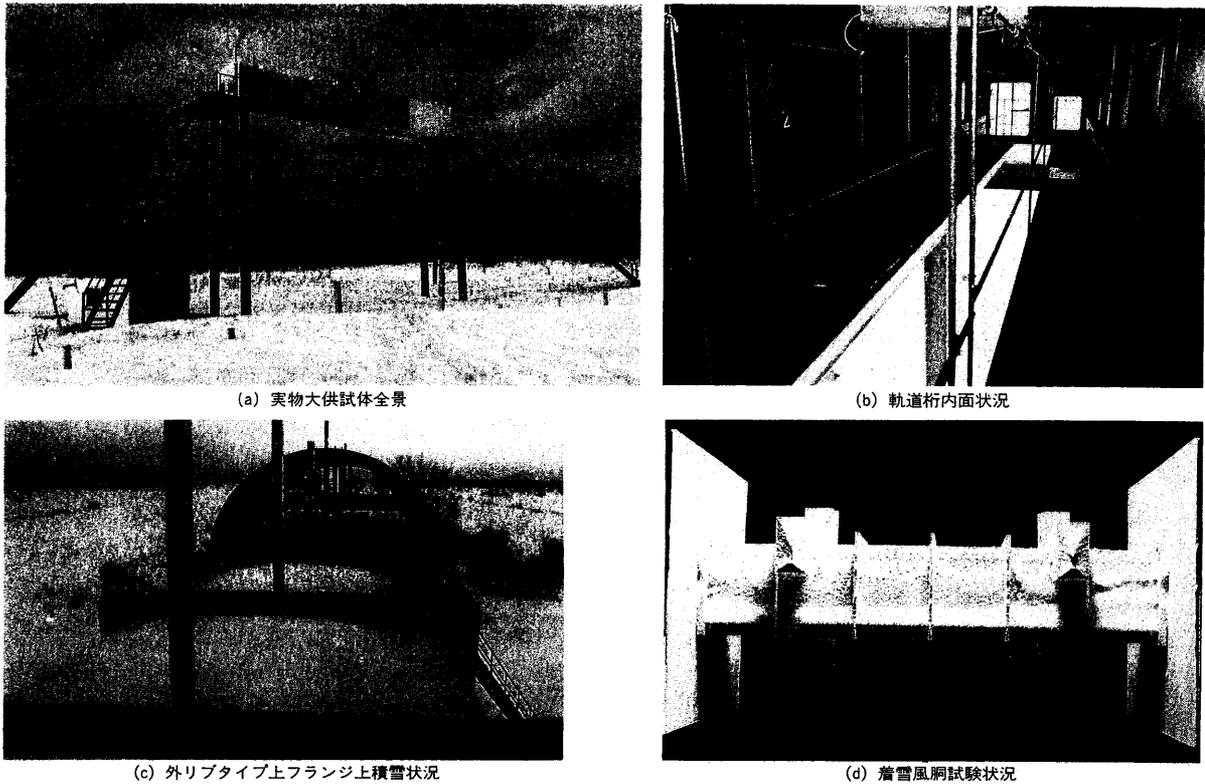


図6 実物軌道桁による屋外実証試験  
Girder model for snow-resistance test

耐寒性能を検証するため、実物軌道桁を用いて積雪寒冷地域で象徴的に最も厳しい北海道石狩町で冬期耐寒試験を実施した。

試験は、

- 実物軌道桁による実証試験（昭和59年12月～昭和60年3月）、
  - 1/40モデルによる着雪風洞試験（北海道工業大学）、
- について実施し、以下のとおり懸垂型モノレールが積雪地域でも有効な全天候型の交通システムであることが実証された（図6）。
- (1) 猛吹雪の時も含め軌道桁内への雪の吹込みは皆無に近く凍結もなく車両走行に全く支障はない。
  - (2) 軌道桁形状は、桁外面への“着雪”及び“つらら”の発生状況等から、補剛リングを桁内面に設ける内リング型式が有効である。
  - (3) 標準の軌道桁高さ（10m）で地吹雪の影響は全く受けない。

#### 4.2 耐風

懸垂型モノレールに横力が作用した場合の車両の安定性について検証するため、北海道大学に委託し、“懸垂型モノレール車両の横風安定性に関する解析”の研究を実施した。

実際の風の時間変動を観測・記録し、このデータを周波数分析して変動風のパワースペクトルを求めた。これを入力とし、図7に示す車両振動解析モデルにて応答解析を行った。

委託研究の結果、振動解析手法の実用性を確認するとともに、その解析法を用いて横風による車体変位量を計算した結果、一般的な運転休止風速である25m/sにて車体水平変化量は約11cmであり、その量が安全上問題にならないことを確認した。

#### 5. むすび

以上のような様々な技術開発を経て、今日の懸垂型モノレールがあるが、今後更に、

- スピードアップによるサービスレベルの向上、

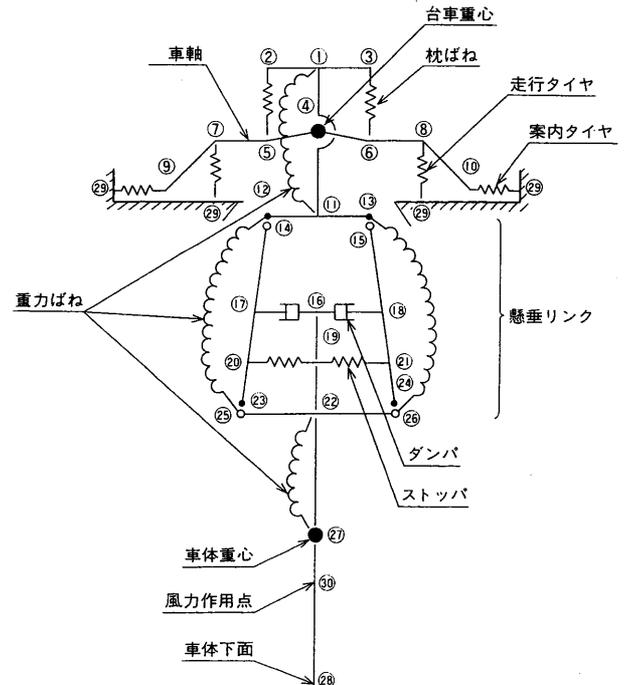


図7 車両振動解析モデル 風応答解析のため車両構造を、ばね・質点・ダンパモデルにしたもの。  
Analysis model of vehicle vibration

- 機器のメンテナンスフリー化や自動化システムの導入による省力化、
  - 車両の軽量化やモータ制御方式の改善、給電システムの効率アップなどによる省エネルギー化、
- などの改善を図り、安全・快適かつ低廉な交通システムを提供していきたい。