

常吉連絡橋(仮称)におけるTMDの設置と動態観測

木場 和義¹⁾ 小川 路加²⁾

常吉連絡橋の塔架設時独立状態における耐風制振対策として、当社で開発したTMDを設置した。設置にあたり、架設実施計画に基づいて塔架設時の振動特性を推定し、TMDの必要性能を設定した。また、架設後にTMDを加振機とした振動実験を行い、塔の振動特性およびTMDの性能確認を行った。さらに、TMD設置期間中の塔本体の振動とTMDの動作確認のために、現地で約6ヶ月間の動態観測を実施した。ここでは、これらTMD設置に関する性能調整と動態観測の結果について報告する。

まえがき

常吉連絡橋(仮称)¹⁾における、塔架設時の状態を対象とした3次元風洞試験結果によると、橋軸直角方向の風に対して、塔面外方向(橋軸方向)に振動する第1次振動モードの限定振動が発生することが予想された^{2),3)}。この振動は、構造減衰が対数減衰率で約0.01の場合、実橋風速15～50m/sの広い風速範囲で発生し、塔頂における最大振幅は2m(風速=26m/s)になると推定された。この振幅は加速度で3000galに相当し、作業性および架設機材の安全性の面から問題となる。よって、振動を低減するための制振装置としてTMD(Tuned Mass Damper)を設置することとなった。図-1に架設時の塔の一般図を示す。

TMDは、本橋の振動特性および必要な制御性能を検討して設計したもの⁴⁾を用いるが、設置に当たっては構造物の実際の振動特性に同調させるための性能調整が必要となる。そこで、現地でTMDを加振機とした振動実験を行い、塔の振動特性とTMDの性能を確認した。また、TMD設置期間中の振動状態を確認するために、風と塔の振動を観測し、TMDの効果と塔の安全性を確認し、さらに自然風特性の検討を行った。

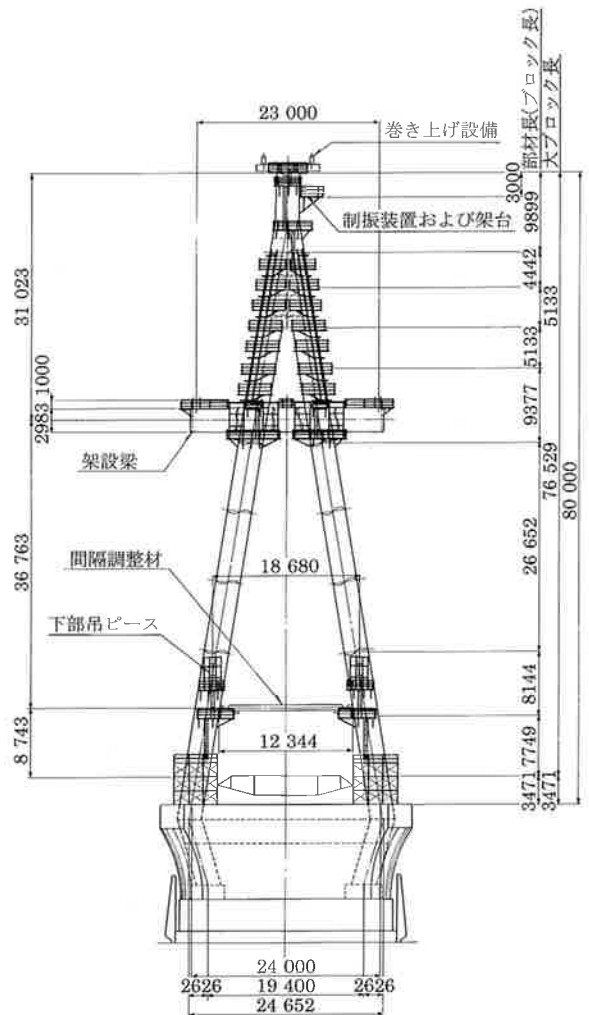


図-1 塔架設時の一般図

1) 技術部技術課係長 2) 技術部技術課

1. 塔の振動特性の推定

風洞試験では、設計初期における構造条件を想定しており、実施される構造条件とは多少異なる場合が多い。特に架設時には、架設用設備が架設段階に応じて設置され、それらの有無で構造物の振動特性が変化する。そこで、実施計画による架設用設備および本体構造の条件を用いて塔独立状態の振動解析を行い、架設設備による振動特性の変化を推定した。

表-1は、制振対象の振動モードである塔面外1次モードの振動特性について、架設用設備に着目した構造条件で比較したものである。表-1より架設時の状態は、(参考)の風洞試験実施時の設定条件に比較すると固有周期、等価質量とも架設用設備の影響で大きくなっている。しかし、架設用設備を考慮した①②③の間では大きな差はない。以上から、TMD現場調整時の状態である②の条件に合わせてTMDの性能を調整するものとし、塔の構造条件が変化した場合には、調整の必要性を検討して再調整を行うものとした。

表-1 塔の振動特性

架設用設備の条件	固有周期 (秒)	等価質量 (tf s ² /m)
① 塔大ブロック架設用梁部材 設置 塔頂ケーブル引込み用仮設備 無し	2.041	27.876
② 塔大ブロック架設用梁部材 (外側) 撤去 塔頂ケーブル引込み用仮設備 設置	2.056	27.964
③ 塔大ブロック架設用梁部材 (外・内) 撤去 塔頂ケーブル引込み用仮設備 設置	2.028	27.159
(参考) 風洞試験実施時の設定条件 (架設用梁部材, ケーブル引込み設備) 無し	1.868	23.155

2. TMDの設置と調整

TMDの概要を図-2に示す。この装置は当社で開発したものであり、コンパクトで微小振幅でも作動する特徴を有している。詳細については文献4に記述してあるので、ここでは省略する。

TMDによる付加減衰の大きさは、3次元風洞試験による検討結果より、塔の振動加速度が50 gal 以下になるように構造減衰を対数減衰率で約0.04 付加することを目標とした。

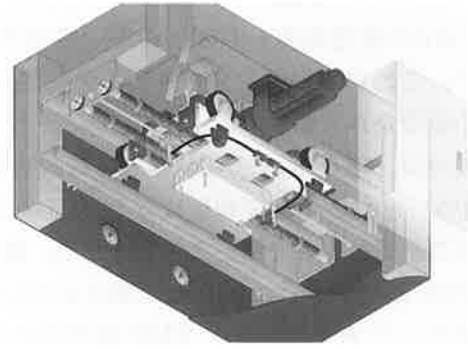


図-2 TMDの概要

(1) TMD の設置

TMD本体と動態観測用の計測機器および信号線・電源線は、地組立時に塔に配置し、架設完了後すぐに作動できるようにした。計測機器の配置を図-3に、地組立時のTMD設置状況を写真-1に示す。

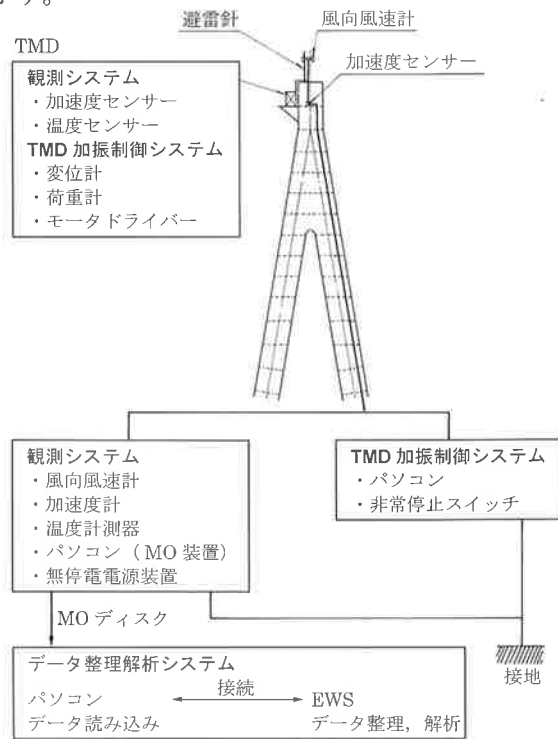


図-3 計測機器の配置と観測システム



写真-1 塔地組立時のTMDの設置状況 (オーニング処理後)

(2) TMD の調整

TMDの設定条件を調整時の塔の構造条件より求め、これに合わせて調整を行った。表-2にTMDの設定条件を示す。

図-4は、塔の構造減衰が要求付加減衰 $\delta_d (= 0.035)$ を満足する振動数比 α とTMD減衰率 δ_2 の範囲をプロットで示したものである。着色部は、TMDを表-2の条件に設定した場合において、振動数比に±5%の誤差、TMD減衰率に±15%の誤差を考慮して、制振に必要な要求付加減衰0.035を満足できる範囲を示している。質量比の誤差を考慮した0.210~0.225%の場合には、想定した誤差範囲で要求付加減衰を満足できる。

また表-3に示すように、塔の構造条件の変化に伴うTMD設定値の相対的な変化は、許容誤差範囲に比べて十分に小さいことが確認できた。

表-2 TMDの設定条件

要求付加減衰	質量比 (%)	重錘重量 (kgf)	最適振動数比 (%)	TMD 振動数 (Hz)	TMD 減衰率
0.035	0.220	600	99.78	0.4888	0.500

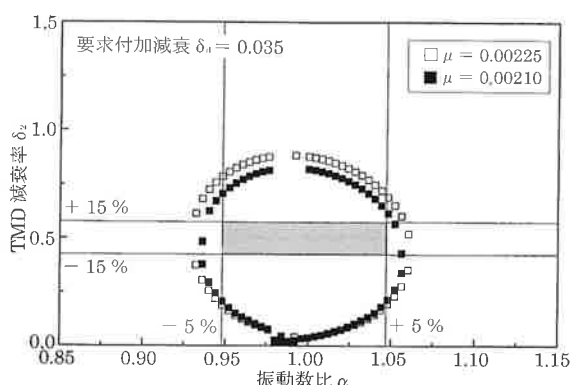


図-4 要求付加減衰を満足するTMD設定条件

表-3 塔の構造条件に対するTMDの設定値

構造条件	質量比 μ (%)	振動数比 α (%)
② 架設梁設置 ケーブル引込み設備無し	0.220	99.78
③ 架設梁(外側)撤去 ケーブル引込み設備設置	0.219	100.49
④ 架設梁(全て)撤去 ケーブル引込み設備設置	0.225	99.13

表-4 TMDの調整

項目	設定値	調整値
重錘重量	600kgf	プレート① 9枚 プレート② 28枚 プレート③ 2枚
振動数	0.4888Hz	バネ巻き数 121
対数減衰率	0.500	調整バルブ 全開

以上のようにして求めたTMD設定値に対して、設置前に行ったTMDの性能試験結果を用いて、重錘重量、振動数、減衰の調整を行った(表-4)。

3. TMDの性能確認(振動実験)

設置したTMDの性能を確認するために、下記に示す項目について実験を実施し、それぞれの確認を行った。

- ① TMDの振動数と減衰
- ② 塔の振動数と減衰
- ③ TMD作動時の付加減衰
- ④ TMDの設定状態

(1) TMDの振動特性

TMDの自由振動を計測し、振動数と減衰を確認した。計測値は、設定値に対してよく合っており、TMDが十分な精度で調整できていることが確認できた(表-5)。

表-5 TMDの振動特性

項目	設定値	計測値
振動数 (Hz)	0.4888	0.4893 (誤差0.1%)
対数減衰率	0.500	0.498 (誤差0.4%)

(2) 塔の振動特性

TMDの加振機能によって塔を強制加振し、TMD停止状態で塔の自由振動を計測して振動数と減衰を確認した(表-6)。

振動数は、振動解析より得られた推定値とよく合っているが、構造減衰が推定値に比べて大きくなっている。計測時には、塔頂のケーブル引き込み設備が設置されており、塔の振動時に設備の一部が塔の振動に合わせて揺れる状態であった。これらの影響によって構造減衰が大きくなったものと思われる。

表-6 塔の振動特性

項目	推定値	計測値(注)
振動数 (Hz)	0.4864	0.4996 (誤差2.7%)
対数減衰率	0.010	0.018

注) 表-1の構造条件②の場合を示す。

(3) TMD作動時の付加減衰

強制加振状態からTMDを解放してTMD作動状態とし、この時の塔の自由振動を計測した。

図-5に、TMD作動時と非作動時における塔の自由振動時の加速度波形を示す。また、構造減衰の計算結果を表-7に示す。TMD作動による付加減衰の大きさとして、対数減衰率で0.058あり設定値を十分満足する付加減衰が得られていることを確認した。

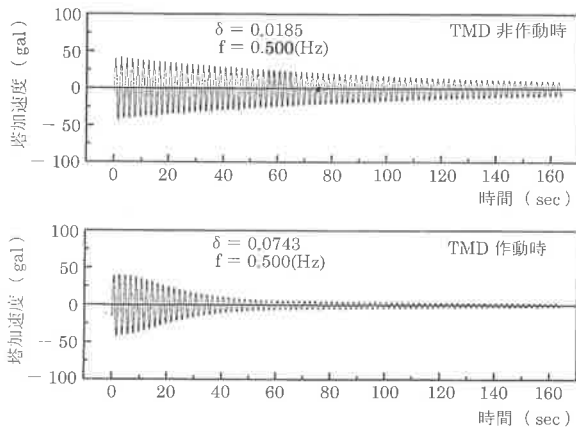


図-5 塔の自由振動の比較

表-7 TMDによる付加減衰

項目	設定値	計測値
TMD非作動時の対数減衰率		0.018
TMD作動時の対数減衰率		0.076
付加減衰	0.035	0.058

注) 計測値は3ケースの平均値である。

(4) TMDの設定状態

図-6に示すように、調整したTMDは塔を制振するのに必要な条件を十分に満足しており、架設機材による構造条件の変化に伴うTMD設定値の相対的な変化にも、調整作業が必要ないことが確認できた。

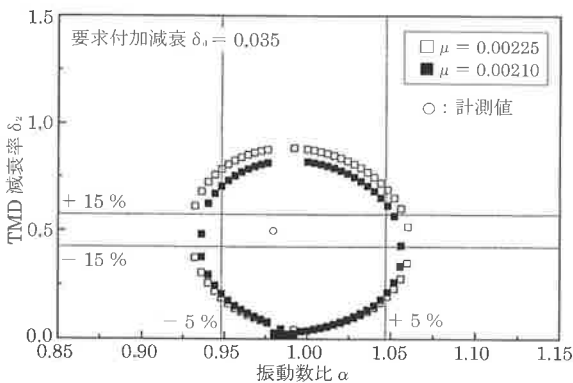


図-6 TMD設定値の確認

4. 動態観測

塔の振動観測によってTMDの効果を確認することおよび現地の自然風の状況を調査することを

目的として、動態観測を実施した。観測期間は、塔が架設され独立状態となつてからTMDが撤去されるまでの約6ヶ月間('98年4月~10月)であった。この間、塔の状況は、架設直後から6月後半に最初のケーブルが設置されるまで独立状態であった。観測で使用した計測機器を写真-2および写真-3に示す。



写真-2 塔頂に設置したプロペラ式風向風速計



写真-3 塔内に設置した加速度センサー

観測項目は、毎正時に10分間観測する定時観測と、強風時(10m/s以上)に連続記録を行う強風時観測とした。また、観測要領は、サンプリング間隔0.05secで風向と風速、2方向の塔の加速度、TMD重錘の加速度と変位の6チャンネルの計測を行い、10分間の記録を1つのデータファイルとして記録した。強風時観測を行う判定は、評価時間30秒で平均風速および塔の振動加速度のRMS(二乗和平均)を算出し、平均風速が10m/s以上の場合または振動加速度のRMSが7gal以上の場合に連続記録を行うものとした。

(1) 自然風の特性

定時観測データの統計的分析を行い、風向と風速の生起頻度の検討を行った。風速範囲別の風向生起頻度分布図を図-7に示す。観測期間中では、橋軸方向に近いNEおよびWSWの風向が卓越しており、塔の面外方向の振動を引き起こす橋軸直角方向の風の生起頻度は少ない。また、耐風性検

討時に想定した分布 (図-8) とは異なる結果となっている。これは、耐風性検討時に想定した風向の生起頻度分布は約3年間の観測結果より算出したものであるのに対して、今回の結果は観測期間が短期であり、全季節のデータが十分に無いことが主要因と考える。

(2) 強風時の振動の記録

強風時観測の記録例として、6月19日に観測さ

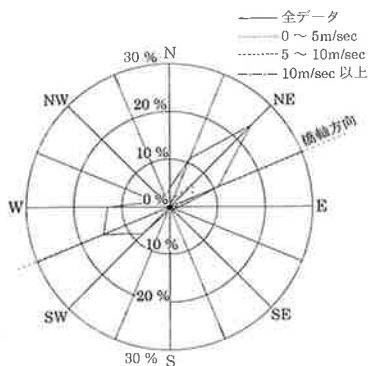


図-7 風向の生起頻度 (観測結果)

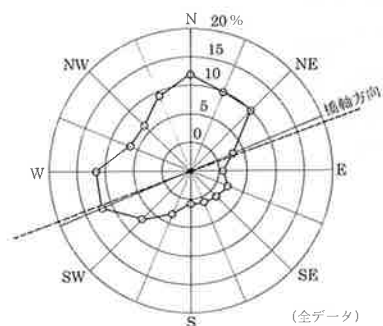


図-8 耐風性検討時の風向生起頻度

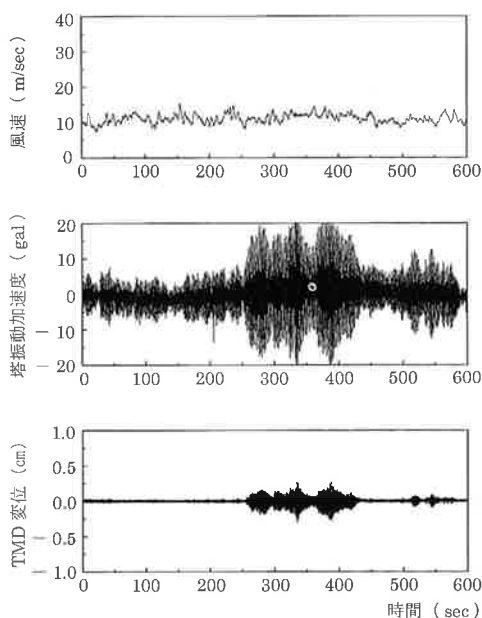


図-9 強風時観測の記録 (6月19日 14:26)

れた強風時の記録を図-9に示す。この記録は塔が独立状態におけるものであるが、風向が橋軸直角方向ではないため、塔の面外方向の振動加速度はそれほど大きくはなっていない。しかし、塔の振動加速度が大きくなるに従って、TMD重錘の振動振幅も大きくなっていることが分かる。塔の振動加速度は、最大で20galと制御目標の50galに比べるとかなり小さいが、TMDは塔の振動加速度で10gal程度から作動を始めており、振動が小さい場合でもTMDが機能していることが確認できた。

図-10に塔の振動加速度の軌跡を、また図-11に塔の振動加速度のスペクトルを示す。風向は斜め

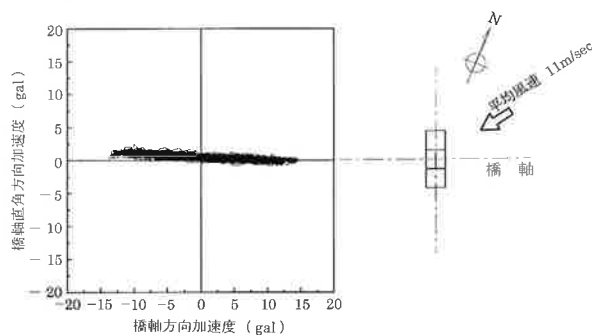


図-10 塔の振動加速度の軌跡

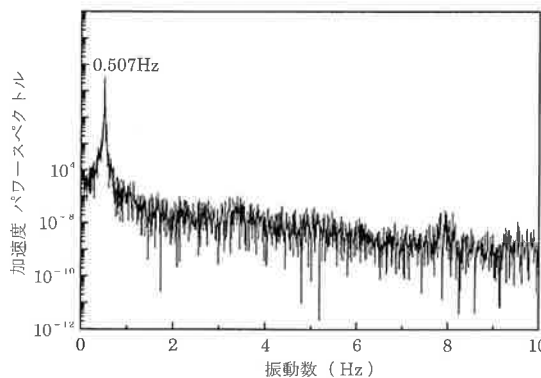


図-11 塔の振動加速度のパワースペクトル

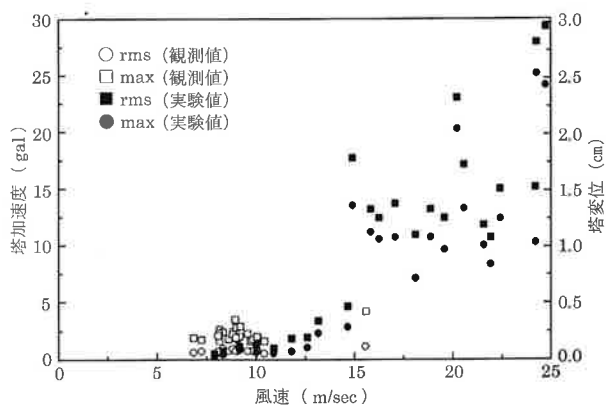


図-12 風速と塔の応答の関係

方向からであるが、振動方向は橋軸方向成分がほとんどであり、塔面外方向の1次モードの振動が卓越している。

平均風速と塔の面外方向振動振幅の関係を図-12に示す。観測で得られたデータは低風速域のものしかないが、振動加速度のRMSは風洞試験結果と一致している。

(3) 台風 9807 号の記録

9月22日に台風7号が架設地域付近を通過した。この台風の経路を図-13に示す。また、この時の風速と風向の観測記録の時間変化を図-14に示す。台風の中心が最接近した14時頃に風速が低くなり、同時に風向がほぼ180度変化している。また、通過後の方が風速が大きく、その風速変動も大きくなっている。この時の塔は全段のケーブル設置が終わっていたため、振動加速度は10gal程度以下で特に大きな振動の発生はなかった。



図-13 台風9807号の経路

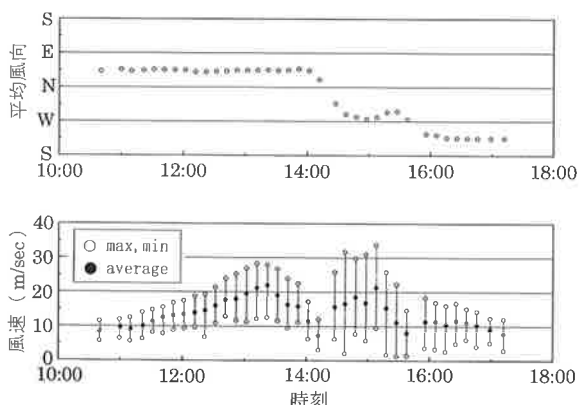


図-14 台風通過時の風向と風速の変化

あとがき

TMDの設置にあたり、架設時の状態を考慮した振動解析結果を基にTMDの設定値を求めた。また、塔架設後に現地で振動実験を行い、塔の振動特性とTMD作動状態の確認を行った。TMD作動による付加減衰は対数減衰率で約0.06あり、所要値を十分に満足するものであった。

TMDを設置した約6ヶ月間の期間にわたる動態観測を行い、風、塔の振動およびTMD動作の観測を行った。塔独立状態で強風による塔の振動を観測したが、塔の最大加速度は約20gal(約2cm)であり、制御目標の50galに比べるとかなり小さいものであった。しかし、振動加速度で10gal程度からTMDは作動しており、小振幅域でもTMDが機能していることが確認できた。

観測結果としては、風洞試験の結果から推定したような大きな振動は発生しなかった。これは、TMD設置によって構造減衰が大きくなったこと、塔の面外振動を引き起こす橋軸直角方向の強風がほとんど発生しなかったことが主な原因と考えられる。しかし、強風の発生を事前に予測することは難しく、TMDの設置によって塔の振動を抑制することができ、架設時の安定性の確保に貢献することができたと考える。

最後に、塔の振動実験および動態観測の実施にあたりご指導、ご協力をいただいた大阪市建設局橋梁課ならびに土木建設事務所、駒井・川田・日橋・栗本JV現場事務所の方々に感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 篠田隆広・高瀬和男：常吉連絡橋(仮称)の設計, 駒井技報, Vol.17, 1998.
- 2) 木場和義・細見雅生：常吉連絡橋(仮称)の耐風安定性の検討, 駒井技報, Vol.17, 1998.
- 3) 芦原栄治・細見雅生・新田吉伸：常吉連絡橋(仮称)の3次元弾性模型を用いた風洞試験, 土木学会第51回年次学術講演会講演概要集, I -A237, 1996.9.
- 4) 木場和義・小川路加・新田吉伸・幽谷栄二郎・細見雅生：TMDの開発－基本性能について, 駒井技報, Vol.17, 1998.