

3 連MFシールド掘進機の姿勢制御

Driving Control of Triple Multiface Shield Machine

高崎 肇* 植林俊光* 玉井達郎** 清水賀之***

Hajime TAKASAKI, Toshimitsu UEBAYASHI, Tatsurou TAMAI and Yoshiyuki SHIMIZU

Osaka Municipal Subway Line No.7 Osaka Business Park Station is to be constructed by a slurry type triple multiface shield machine. In order to make a basic operational manual of the machine, two model tests have been conducted to investigate the moving characteristics of the machine. This paper presents a driving control method and the outline of two model tests.

Key Words : Triple Multiface Shield Machine, Slurry Type, Model Test, Driving Control

1. はじめに

近年の多様化したシールド技術の中、トンネル断面を効率的に建設できるマルチフェイス（MF）シールド工法¹⁾は2連で実績も増えつつあるが、その中でも大深度地下駅の構築に最適と考えられる3連MFシールド工法が、この度、世界で初めて大阪市地下鉄7号線大阪ビジネスパーク（OBP）駅工事に適用されることとなった（写真-1）。3連MFシールドによる駅構築を実用化するための設計上、施工上解明すべき課題は多く、シールド施工に限っても、①3連断面の掘削、②泥水輸送システム、③セグメントの組立て、④姿勢制御等があげられ、当工事においても各種実験も含め検討・検証を実施している。これらの課題のうち、姿勢制御については当工事に使用する3連MFシールドの特徴である3つのカッタ面盤の独立回転、8ブロックで分割制御される56本のシールドジャッキ、コピーカットおよび可動そりの装備という制御手段の多様性に加え、トンネルが107mと短いことから、掘進中の姿勢制御に関しての最適運転手法を学習する試行区間の余裕が少なく、極力精度の高い制御・予測システムを準備しておくことが望まれている。

図-1に、解析・予測、実験、制御方案の3柱から構成される事前検討、検討結果の実工事への反映、さらには実工事データを踏まえた3連MFシールド姿勢制御方案の確立までのフローを示す。今回報告するのは、

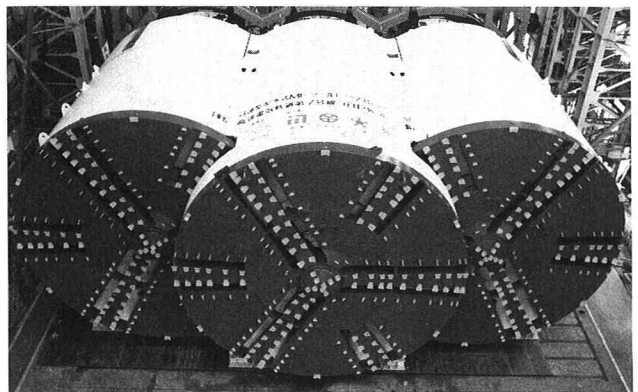


写真-1 OBP駅用3連MFシールド（ $\phi 7.8\text{m} \times 17.3\text{m}$ ）

* 正会員 大阪市交通局建設技術本部建設部森之宮建設事務所

** 正会員 鹿島建設(株)建設総事業本部土木技術本部技術部

*** 正会員 工博 日立造船(株)技術・開発本部技術研究所

このうちこれまでの単円、2連MFシールドでの実験、および実施工データの分析から作成した制御アルゴリズム、およびその検証・拡張のために実施した姿勢制御実験の概要である。実験は、1/25の縮尺で条件の明確な基本特性を把握するための要素実験と、1/25と実機(1/1)とをつなぐ1/10の縮尺で施工環境を実工事に類似させるため、実地盤で泥水工法を適用した実証実験とを行っている。

2. 3連MFシールドの姿勢制御の考え方

機械を姿勢制御する場合、運転中に機械に作用する外力と機械の位置・姿勢変化特性について検討する必要がある。

図-2は単円シールドのヨーイングとピッチング方向の角度変化特性について、模型実験および実機データの解析結果を示したものである⁽²⁾⁽³⁾。シールドジャッキにより発生する旋回モーメント M_{ji} (ここに添字 i は y または p をとり、 y はヨーイング方向、 p はピッチング方向をあらわす。)と、単位掘進距離あたりの機械の角度変化 $d\theta_i/dz$ ($i=y, p$)はほぼ比例関係にある。直線の傾きは機械の曲がりやすさをあらわしている。また Y 軸切片は、シールドジャッキによる旋回モーメントを与えなくても機械が角度変化する傾向を示している。

図-3は、2連MFシールドの実機の角度変化特性を示したものである⁽¹⁾。機械はシールドジャッキによる旋回モーメントを与えなくても、先行面盤側にヨーイングしやすい傾向にある。これは、2連MFシールドの場合に機械が幾何学的に非対称であるために、先行面盤側と後行面盤側で掘削反力や摩擦力が不釣り合いとなったためと考えられる。

上記検討結果をもとにすると、3連MFシールドのヨーイング、ピッチング方向の角度変化特性は、式(1)に示す運動モデルで与えられる。

$$\frac{d\theta_i}{dz} = K_{i11}M_{ji} + K_{i12} \quad \dots\dots\dots (1)$$

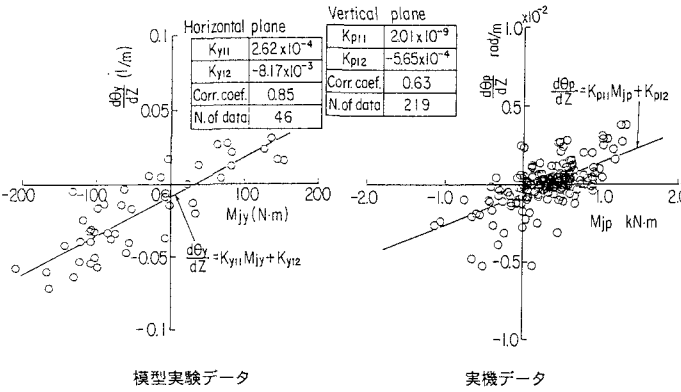


図-2 単円シールドの角度変化特性

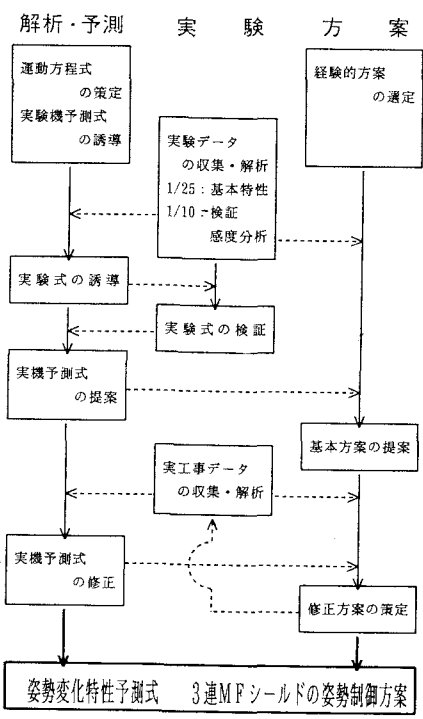
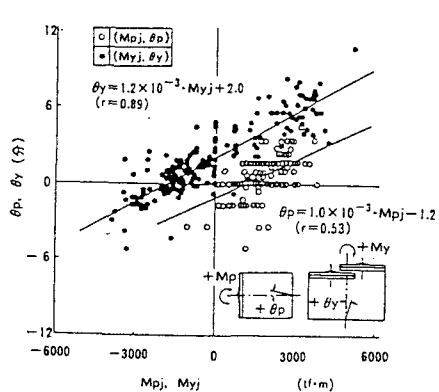


図-1 姿勢制御方案作成のフロー



(a) 正回転
図-3 2連MFシールド実機運転データ
(文献(1)より引用)

ここに K_{i11} , K_{i12} ($i=y, p$) は運動モデルの係数をあらわす. K_{i11} は機械の曲がりやすさをあらわし, 機械の寸法, 形状および地山の特性に影響される⁽⁴⁾. また K_{i12} は, シールドジャッキ以外で機械に作用する旋回モーメントの項をあらわす. なお z は掘進距離をあらわす.

ローリング角変化は, ヨーイング, ピッチング方向の特性と同様に, 掘進しながら面盤などから機械に旋回モーメントを与えた場合に, 機械外周部に発生する土の変形によって生ずる応力による力とモーメントとの釣り合い関係によって発生するものと考えられる⁽⁴⁾. したがってローリング方向の角度変化特性は, 式 (2) で表現できると考えられる.

$$\frac{d\theta_r}{dz} \approx K_{r11} M_r + K_{r12} \dots\dots\dots (2)$$

ここに M_r は, 掘削トルクなどで与える旋回モーメントをあらわす.

式 (1) ないし (2) で与えられる運動モデルをもとにして機械の位置と角度を適切に制御するための運転方法, あるいは自動制御するためのアルゴリズムを作成することができる.

図-4および表-1に, 現在考えているOBP向け3連MFシールドの姿勢制御のフローならびに姿勢制御動作の優先順位を示す. 掘進中の機械の姿勢 (角度) を監視し, その角度が管理限界値を超えた場合に, 表-1に示す優先順位で制御装置を起動させ, 修正モーメントを発生させる.

図-5は, 3連MFシールドの面盤の回転パターンとローリングモーメントの関係を示したものである. 3枚の面盤の回転方向パターンを変えることにより機械に作用するローリングモーメントを大きく変化させることができ, コピーカッタ, 可動ソリなどの補助装置と併せて機械のローリング角を修正させる力となる.

また図-6は, MFシールドの位置・姿勢自動制御システムを作成する場合の概念を示したものである⁽⁴⁾. ヨーイングおよびピッチング方向については, 従来の単円シールドのアルゴリズム⁽³⁾と同様である. ただしMFシールドでは, 面盤に作用する掘削反力によって旋回モーメントが発生するので, その項を補助的な制御手段として使うことが有効である. また単円シールドと異なり, ヨーイング方向とピッチング方向で, 地山から受け

表-1 姿勢制御動作 (案)

	カッタ 回転	ジャッキ 選択	可動ソリ	コピー
ローリング修正	1	—	3	2
ピッチング修正	2	1	4	3
ヨーイング修正	—	1	—	2

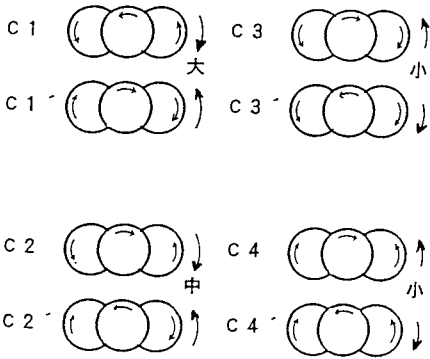
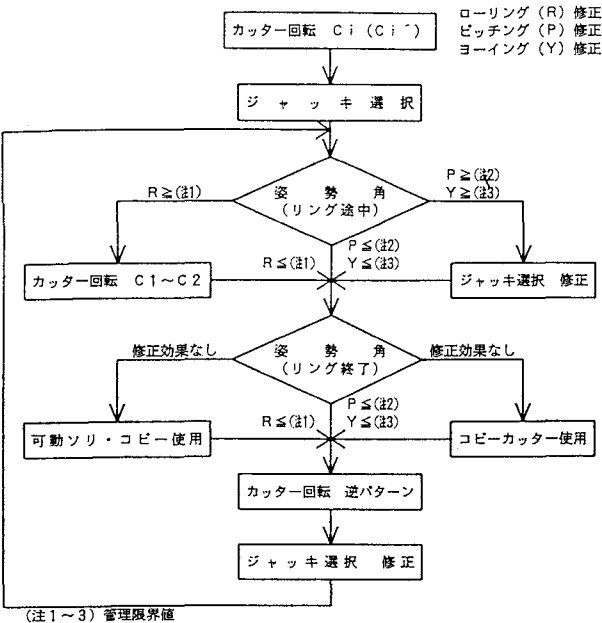


図-5 回転パターンとローリングモーメントとの関係

図-4 実機姿勢制御方案

る抵抗モーメントが異なるため、制御式中のパラメータが異なってくる。ローリング角制御については、式(2)に示す運動モデルをもとにフィードバックゲインを求めることができる。

以上、単円および2連MFシールドについての模型実験ならびに実機データの解析から、3連MFシールドの姿勢変化特性を検討し運転制御方を提案したが、3連MFシールド特有の運動特性について、実機の運転前に解明しておく必要がある。そこで3ないし4章に示す要素実験ならびに実証実験で、その評価、確認を行っている。

3. 要素実験

要素実験では、3連MFシールドのローリング角修正手段

となる掘削トルクやコピーカッタ、そり装置などの特性や、これら修正装置によりローリングモーメントを作用させた場合のローリング角変化特性を把握するための実験を主に行った。

図-7に要素実験装置の概略を示す。2連MFシールドについてこれまで模型実験を行ってきたが、本装置はそれらと構造上同様のものとした。実験装置は、OBP向け3連MFシールドの1/25の模型とセグメントに相当する押管部、これらと面盤駆動装置を載せた移動架台、土砂タンクなどで構成されている。移動架台と土砂タンクは2本の油圧シリンダで連結され、模型は土砂タンク側面から土中を約900mm掘進することが可能である。なお掘削された土砂は、排土パイプを通して吸引タンクまで空気輸送される。模型と押管部を4本のシリンダで連結し、さらに10mmのクリアランスを取り、模型が押管部に対し自由に位置、角度変化できるものとした。4本のシリンダは、油圧回路によりそれぞれの圧力を任意に設定でき、推進力を確保するだけでなく、実機のシールドジャッキによる旋回モーメントに相当するモーメントを与えることができる。さらに実機にはないローリングシリンダを取り付け、任意のローリングモーメントとローリング角の関係を詳しく調べることができる。また、種々の形状のそり装置を取り付け、実機の可動そりの効果を検討することも可能である。

掘進速度は1~4cm/min、3つの面盤の回転数は2~10rpmで、それぞれ正逆方向に回転可能で、回転方向のパターンを変えることができる。なお、外力の特性を評価するために、式(3)で与えられる切り込み速度比 β を定義した。本実験の場合、この切り込み速度比は1ないし5の範囲である。作成した地山は、N値が10~20の砂層で、使用した砂は平均粒径が約130 μ mのけい砂である。

$$\beta = \frac{N_r B C}{V} \dots\dots\dots (3)$$

ここに、Vは掘進速度、 N_r は掘削面盤の回転数、Bはビット段数、Cはビット高さをあらわす。

図-8は、角度修正の補助装置としての可動そりの効果を確認するための実験結果として、そり装置に作用す

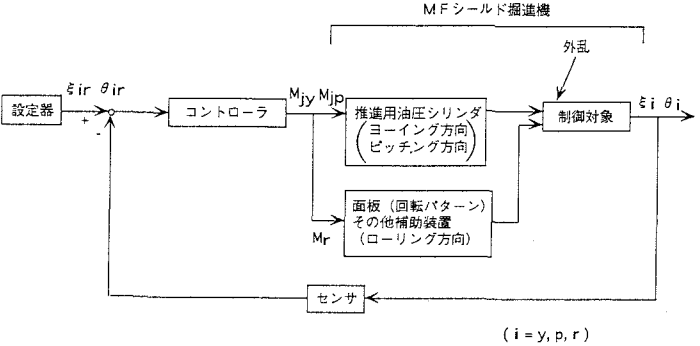


図-6 位置・姿勢自動制御システム

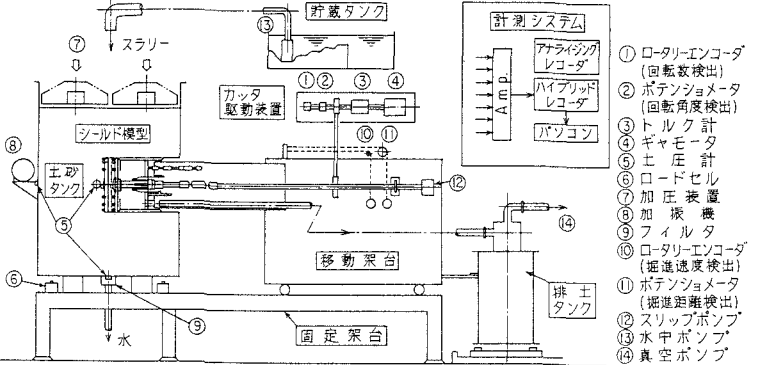


図-7 実験装置の概略

る地山からの反力の時間変化を示したものである。そり装置により模型に上向きの力が発生している。すなわち、そり装置によりローリングモーメントを発生させることが可能である。

また図-9は強制姿勢変化実験の一例として、ローリングシリンダによりローリングモーメントを与えたときの模型の角度変化を示したものである。ヨーイング、ピッチング方向の角度変化特性（図-2）と同様に、一定のローリングモーメントを与えたときに模型のローリング角は一定の割合で変化していくことがわかる。

4. 実証実験

実証実験では実地盤を使って姿勢制御の考え方で述べた①カッタ回転、②シールドジャッキを主体とした各種パターンにおける姿勢変化特性を把握し、これまでの一連の実験結果を確認し、実機での姿勢変化特性の予測を行うとともに、姿勢制御方案に反映することを目的とした。実験機（写真-2）は、実機と同じ動きが可能な泥水シールドで約1/10のスケールである。その仕様諸元を表-2に示す。実験対象地盤としては、図-10に示す深度5～7m付近のN値が10～20程度の砂層である。

実験は以下の手順で行った。まず実施工の1リング分に相当する距離を掘進する。その後シールドジャッキの短縮と同調させながら、元押ジャッキによりダミーセグメント（機械形状を合わせた推進管）を実験機に押し込む。この操作を繰り返すことで推進していく。実験は、まずシールド姿勢変化の要因となる面盤に作用する不釣り合い力の測定を主体とした力の計測を行った（実験Ⅰ）。次に実機の姿勢変化特性を把握する実験を行った（実験Ⅱ）。すなわち、地盤中で実験機を強制的に姿勢変化させるようなカッタ回転パターンとジャッキパターンを組み合わせで推進し、その後姿勢変化を修正するパターン（逆パターン）を選択し推進することにより、実験機の角度変化を計測した。最後に実験Ⅰ、Ⅱを踏まえて、実工事で直進

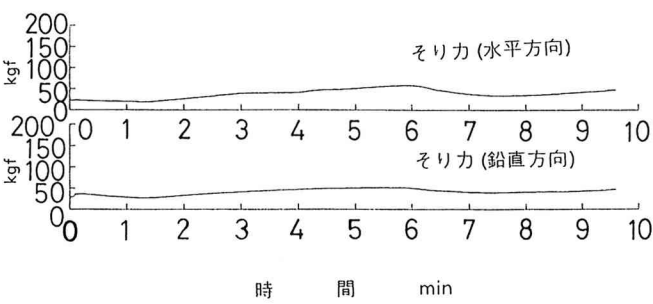


図-8 そり装置に作用する力

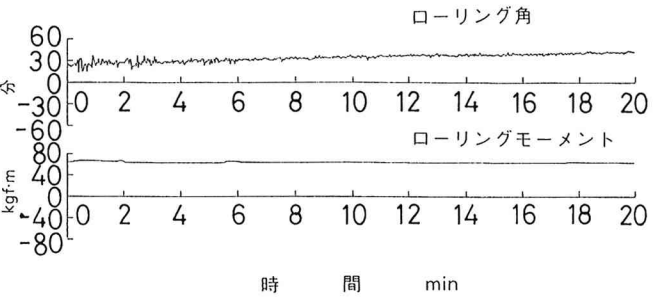


図-9 角度変化特性実験結果（ローリング方向）

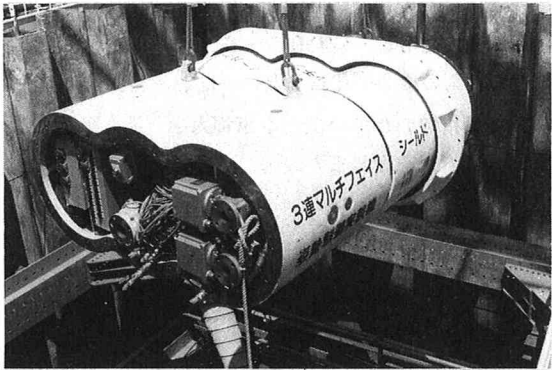


写真-2 実証実験機

表-2 実験機の仕様諸元

		実 機	実 験 機
シールド 本体	外径	7.8m×3面盤	0.82m×3面盤
	幅	17.3 m	1.82 m
	機長	9.7 m	1.24 m
シールドジャッキ		300t ¹ ×1150t ¹ ×350kg/cm ² ×32本 200t ¹ ×1150t ¹ ×350kg/cm ² ×24本	18.1t ¹ ×150t ¹ ×210kg/cm ² ×8本
総 推 進 力		14400 tf	144.8 tf
推力/切羽単位面積		123.1 tf/cm ²	111.7 tf/cm ²
カッタ回転数		0.86 rpm	1.0～3.0 rpm
カッタ回転トルク		496.9 tf・m (α=1.04)	0.43 tf・m (α=0.80)
最大許容偏角 (ロール×ピッチ×ヨー)		0.5°×9.5°×5°	1°×3°×3°

施工ができる掘削パターンとの提案とその確認を行っている。

図-11に力の計測（実験Ⅰ）による結果の一例として、掘削トルクと切り込み速度比の関係を示す。要素実験あるいは従来の2連MFシールド実験結果で見られたように、切り込み

速度比が小さくなるにつれて、掘削トルクは大きな値を示す。このように切り込み速度比すなわち面盤の回転数を変化させることにより掘削トルクの大きさを変えることが可能であることが確認できている。

5. おわりに

今回の一連の研究の成果は来年1995年1月からの実工事に適用し、3連MFシールドの姿勢制御方案として別の機会に報告したい。なお、当研究に関してご指導いただいている京都大学 足立紀尚教授らに謝意を表します。

6. 参考文献

- 1) 松本ほか、「多円形断面シールドトンネル（MFS）工法の研究および開発」，土木学会論文集，397/Ⅳ-9，（1988），17
- 2) 清水・鈴木，「単円形シールド掘進機の運動特性に関する研究（模型実験および制御系の設計）」，機械学会論文集C 1編，58-550，（1992），155
- 3) 清水ほか，「単円形シールド掘進機の運動特性に関する研究（第2報 実機データの解析および制御システムの実証）」，機械学会論文集C 1編，58-554，（1992），121
- 4) 清水ほか，「多連マルチフェイスシールド掘進機の位置・姿勢制御に関する研究」，土木学会第49回年次学術講演会概要集，第3部，（1994），1278
- 5) 葛野ほか，「3連型泥水式MFシールド工法で建設する大阪市地下鉄第7号線大阪ビジネスパーク駅」，トンネルと地下 11月号，（1994），掲載予定

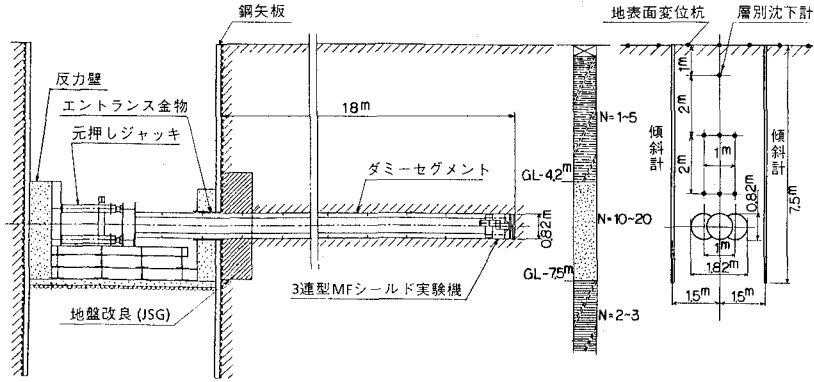


図-10 実証実験地盤の縦断面図

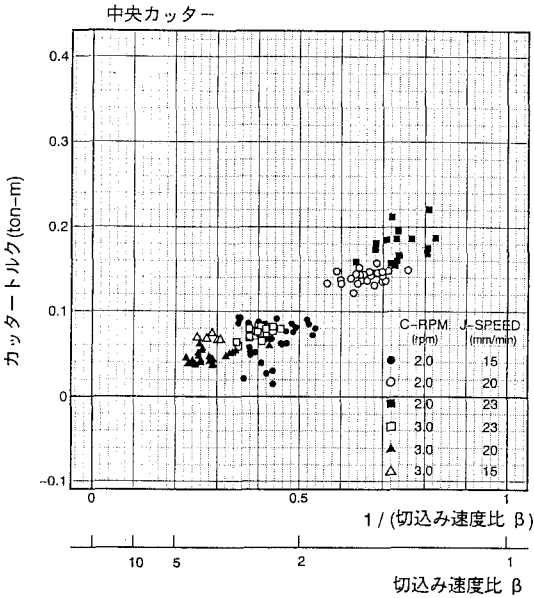


図-11 掘削トルクと切り込み速度比の関係