

サイレントチェーンの伸びメカニズムと 予測技術の研究

Research on Silent Chain Elongation Mechanism and Prediction

関 雅 夫*
Masao SEKI

田 中 幹 樹**
Motoki TANAKA

要 旨

サイレントチェーン伸びの予測技術を構築することを目的に、エンジン油中のすすに起因するサイレントチェーン伸びのメカニズム解析をおこない、チェーン伸び要因とチェーン伸び率の関係を実験的に求めた。

その結果、エンジン油中にすすが存在しなければ、サイレントチェーン伸びはほとんど生じず、ピンとプレートとのしゅう動面にすすが介在することで起こる、三元アブレーション摩耗によるプレート摩耗によって、チェーン伸びが増加することがわかった。また、チェーン伸び要因とチェーン伸び率の関係から、サイレントチェーン伸び予測式を実験的に導くことで、設計初期段階からサイレントチェーン伸びを推定することが可能となった。

ABSTRACT

The silent chain elongation mechanism due to soot in the engine oil was analyzed and the relationship between chain elongation factors and the chain elongation rate was obtained through experiments in order to construct technology for predicting silent chain elongation.

The results showed that almost no silent chain elongation occurred when there was no soot in the engine oil. However, when soot is present on the pin and plate sliding surfaces, three-body abrasive wear produces plate wear, which increases chain elongation. In addition, experimentally deriving a silent chain elongation predictive formula from the relationship between chain elongation factors and the chain elongation rate enabled estimation of silent chain elongation from the initial design stages.

1. はじめに

エンジンのカム駆動システムにおいて、ベルト駆動システムと比べると耐久性や小型化に有利であることから、チェーン駆動システムが多く採用されている。また、ローラチェーンと比べると静粛性に優れていることから、サイレントチェーンが利用されてきている。チェーン駆動システムを採用する場合、チェーン伸びは、バルブタイミングやチェーン挙動などに影響を与えることから、エンジンの信頼性および商品性を保証するためには、実使用環境におけるチェーン伸びを考慮したうえで設計する必要がある。しかし、チェーン伸びには、さまざまな要因が関連してい

るため、実使用環境におけるチェーン伸びを設計初期段階において予測することは困難である。

チェーン駆動システムについては、シミュレーションによるチェーン張力、騒音、およびフリクション等に関する研究がいくつか報告されている⁽¹⁾⁻⁽³⁾。しかし、チェーン伸びについては伸びのメカニズムが解明されていないため、シミュレーションによる予測が困難であり、チェーン伸びの予測技術に関する報告例は少ない。

サイレントチェーンの伸びは、チェーンがスプロケットにかみ合い、屈曲するときにピンとプレートがしゅう動することで、プレート穴とピンが摩耗して発生する。そのため、チェーン伸びを予測するためには、チェーンが屈曲す

* 四輪 R&D センター

** 大同工業株式会社

るときのエンジン運転状態や給油状態などを考慮する必要がある。

一方、エンジン油中のすすがエンジンしゅう動部の摩擦に影響することが知られている。サイレントチェーンの伸びについても、ピンとプレートのしゅう動面の摩擦が原因であるため、エンジン油中のすすが影響すると考えられる。そのため、サイレントチェーンの伸びを予測するには、エンジン油中のすすによるチェーン伸びメカニズムを明確にする必要がある。

そこで本研究においては、実験結果をもとに、エンジン油中のすすによるチェーン伸びメカニズムの解明をおこなった。また、チェーン伸び要因とチェーン伸び率の解析から、チェーン伸び予測式を実験的に導くことで、サイレントチェーン伸びを予測可能とした。

2. サイレントチェーン伸びメカニズム

2.1. エンジン油中のすすによる伸び

エンジン油中のすす濃度がサイレントチェーン（以下、チェーンという）伸びに与える影響を確認するために、エンジン油に、すすの代わりにカーボンブラックを混入し、カーボンブラック濃度を変化させて、5000 rpm 一定速での実機台上試験をおこなった。試験に用いたエンジンの主要諸元および試験条件を Table 1 に示す。また、チェーンの構成を Fig. 1 に、チェーン伸び測定結果を Fig. 2 に、ピンおよびプレートの摩耗量を Fig. 3 に示す。Fig. 2 より、カーボンブラック濃度が 0 wt% の条件においては、

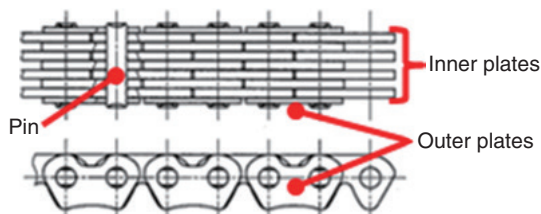


Fig. 1 Composition of silent chain

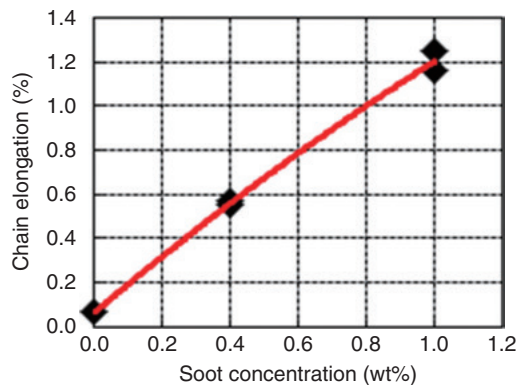


Fig. 2 Influence of soot concentration on chain elongation

Table 1 Engine specifications and test conditions

Cylinder configuration	Inline 4
Bore × Stroke (mm)	87.0 × 99.0
Displacement (cm ³)	2354
Compression ratio	10.5
Chain type	Silent chain
Chain pitch (mm)	6.35
Number of link plates	4/3
Number of links	176
Engine speed (rpm)	5000
Engine oil	ILSAC GF-4, 5W-20
Soot concentration (wt%)	0, 0.4, 1.0

チェーン伸びはほとんど発生していないことがわかる。また、今回確認した濃度範囲においては、濃度の増加にともなって、チェーン伸びが増加している。以上のことから、チェーン伸びはエンジン油中にすすが存在することで発生し、エンジン油中のすす濃度によってチェーン伸び率が左右される。

次に Fig. 3 より、カーボンブラックが増加してもピンの摩耗量はあまり変化せず、摩耗量も少ない。それに対してプレートは、カーボンブラックが増加すると摩耗量が増加していることがわかる。チェーンのピンには、すすの硬度と同等以上となる表面処理が施されているが、プレートはすすよりも硬度が低い。一般に、アブレシブ摩耗は硬度と反比例の関係にあることが知られている。今回の試験結果より、エンジン油中にすすが存在しなければチェーン伸びはほとんど発生しないこと、エンジン油中にすすが存在することですすよりも硬度の低いプレートのみが摩耗していること、および、すす濃度の増加にともないプレートの摩耗量のみ増加していることを考慮すると、チェーン伸びはピンとプレートの間にすすが介在することで発生する、三元アブレシブ摩耗によるプレート摩耗が主要因であると考えられる。

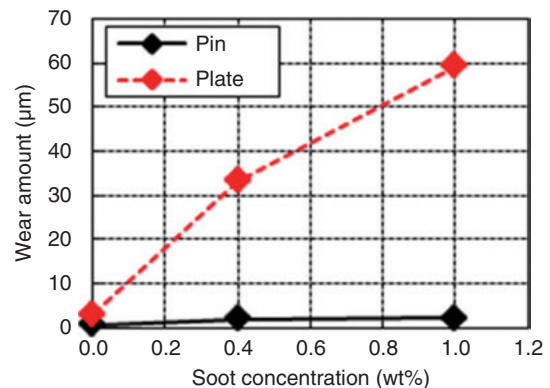


Fig. 3 Wear amount of pin and plate

Table 2 Chain specifications and test conditions

Chain type	Silent chain
Chain pitch (mm)	6.35
Number of link plates	4/3
Number of links	102
Load (N)	1500
Oil supply (l/min)	0.1, 1.0
Soot concentration (wt%)	0, 1.0

2.2. 給油状態違いによるチェーン伸びへの影響

2.1. 節より、チェーン伸びの増加は三元アブレシブ摩耗によるプレート摩耗が主要因であると考えられるが、エンジン油中にすすが存在する場合には、給油量を増やすことで三元アブレシブ摩耗の原因であるすすの供給量を増やすことになるため、給油が摩耗量の増加をもたらすことが考えられる。そこで、チェーンのピンとプレートのしゅう動面への給油状態が、チェーン伸びに与える影響を確認するために、給油量およびエンジン油中のカーボンブラック濃度を変化させた場合の摩耗試験をおこなった。給油条件を安定させるために、試験には単体摩耗試験機をもちいた。試験に使用したチェーン諸元と試験条件を Table 2 に示す。また、ピンおよびプレートの摩耗量を Fig. 4 および Fig. 5 に示す。Fig. 4 より、カーボンブラック濃度が 0 wt% および 1.0 wt% どちらの条件においても、給油量を増やすことでピンの摩耗量が減少していることがわかる。これは、ピンの摩耗はピンとプレートによる凝着摩耗が支配的であるため、給油量を増やすことでピンとプレート間の油膜切れが生じにくくなり摩耗が減少したと考えられる。また、カーボンブラック濃度が 1.0 wt% の条件では、給油量を増やすことでピンの摩耗は低減するが、プレートの摩耗は増加している。これは、給油量の増加によって、ピンとプレート間に存在するカーボンブラックの量が増えることで、三元アブレシブ摩耗によるプレート摩耗が促進されたためであると考えられる。

次に Fig. 5 より、給油量が 0.1 l/min および 1.0 l/min どちらの条件においても、カーボンブラック濃度が増加することでピンおよびプレートの摩耗が増加していることがわかる。プレート摩耗の増加については前述した通りであるが、ピンの摩耗増加については、カーボンブラック濃度の増加にともない、ピンとプレートのしゅう動面付近にカーボンブラックが堆積し、しゅう動面へのオイル供給が阻害され、凝着摩耗が促進したためであると考えられる。

以上より、チェーンの伸び低減のためには、ピン表面の摩耗抑制のために給油が必要であるが、エンジン油中にすすが存在している条件下においては、プレートの摩耗が増

加する可能性があるため、過度な給油はチェーン伸びを促進する可能性があることを確認できた。

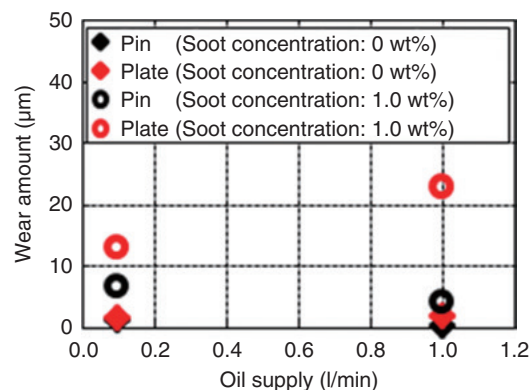


Fig. 4 Relation between wear amount and oil supply

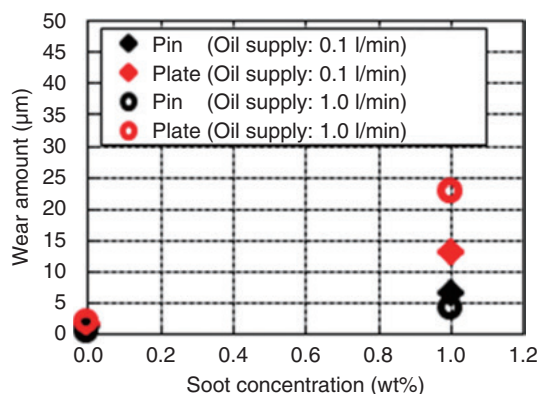


Fig. 5 Relation between wear amount and soot concentration

3. チェーン伸び予測技術

3.1. チェーン伸び予測式

チェーン伸びを増加させる要因がエンジン油中のすす濃度であることが確認できたが、チェーン伸び率を予測するうえでは、ピンとプレートのしゅう動面の面圧や速度などの影響を把握する必要がある。そこで、これらの要因解析のために、実機台上試験においてエンジン運転条件を変化させたときの、チェーン伸びを確認した。試験結果に対して、チェーンの屈曲回数を同一にした条件で整理したものを Fig. 6 に示す。Fig. 6 より、屈曲しゅう動距離については、他の要因が同一になるように試験した結果であるため、傾向が把握できるが、その他の要因については、チェーン伸び要因とチェーン伸び率の関係をそのまま整理しても、各要因が相互に影響しているため、面圧や速度などの要因とチェーン伸び率の傾向が把握できず、各要因の影響を個別に導くことはできない。

そこで、Fig. 6 の横軸に用いた要因以外は同一条件となるように、その他のグラフの回帰曲線を用いて補正をおこ

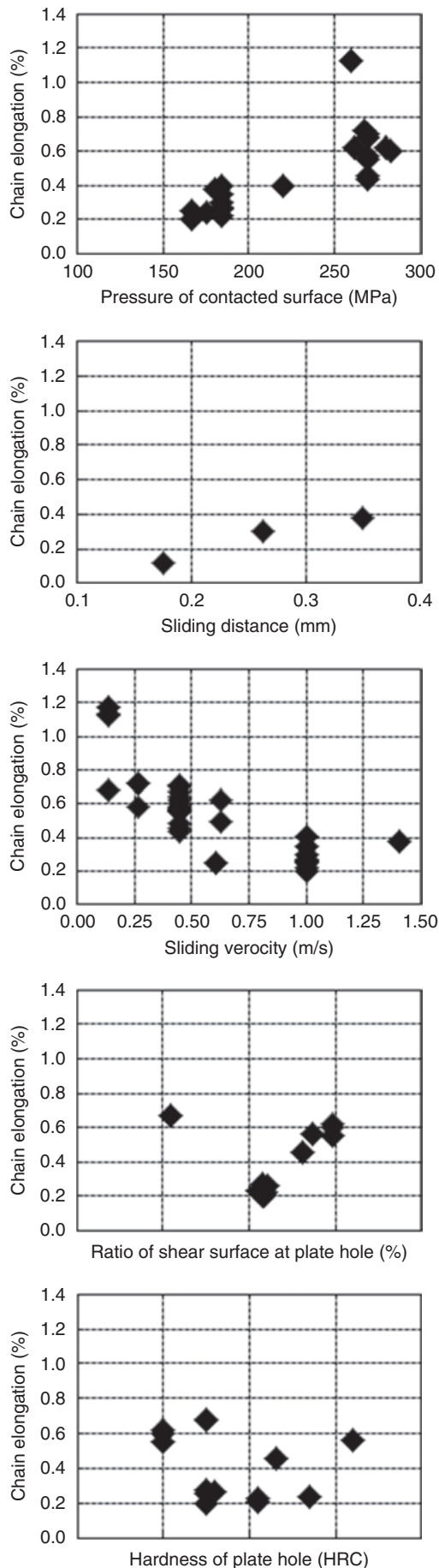


Fig. 6 Test results of relation between chain elongation and chain elongation factor

ない、すべてのチェーン伸び要因の傾きが収束するまで反復計算をおこなうことで、各要因がチェーン伸びに与える影響を個別に導いた。計算結果を Fig. 7 に示す。Fig. 7 より、反復計算をおこなった結果、Fig. 6 の結果と比べるとチェーン伸び要因とチェーン伸び率に相関関係があることがわかる。また、Fig. 7 より、ピンとプレートの接触面圧、および、しゅう動距離に対しては、その増加にともなって、チェーン伸びが増加していることがわかる。また、しゅう動速度に対しては、速度が低いほどチェーン伸びが増加する傾向にある。次に、プレートの材料特性については、プレート穴せん断面率（プレート穴加工面のせん断面が占める割合）が高いほどチェーン伸びは減少する。また、プレート穴硬度については、ある硬度までは、硬度が高いほどチェーン伸びが減少する傾向にある。これは、プレートの摩耗は、すすによる三元アプレシブ摩耗が支配的であるため、硬度が高いほうが摩耗しにくいためであると考えられる。しかし、今回の試験では、ある硬度を境界として、硬度が高いほどチェーン伸びが増加する結果となった。これについては、次のような理由であると推測される。チェーンには、長さの調節と疲労強度の向上を目的として、予荷重がかけられている。チェーンのプレート穴は予荷重をかけることで変形するが、プレートの硬度が低いほど変形量は大きくなり、変形量が大きいほどピンとプレート間の面圧は低減する。Fig. 7 の結果からも、面圧が高いほどチェーン伸びが増加する傾向となっており、硬度が高くなるにつれてチェーン伸びが増加する現象は、予荷重をかけたときの変形量が小さいことによる、面圧増加が原因であると考えられる。以上より、チェーンのプレート硬度には、硬度が高いことによるチェーン伸び抑制効果と硬度が低いことによる面圧低下の効果があり、チェーン伸びを抑制するためには、最適な硬度が存在すると考えられる。

Fig. 2 および Fig. 7 の結果をもとに、チェーン駆動システムの諸元、チェーン張力、エンジン回転数頻度、エンジン運転時間、および、エンジン油中すす濃度のデータから、チェーン伸び率を予測可能な式を構築した。予測式の概要を以下に示す。

$$L = \{f(p) + g(v) + h(\alpha) + i(\beta)\} \times j(l) \times k(\rho) \times N$$

ここに、

L :チェーン伸び率 (%)

$f(p)$:接触面圧 p の 1 次関数

$g(v)$:しゅう動速度 v の 3 次関数

$h(\alpha)$:プレート穴せん断面率 α の 1 次関数

$i(\beta)$:プレート穴硬度 β の 2 次関数

$j(l)$:しゅう動距離 l の 2 次関数

$k(\rho)$:エンジン油中すす濃度 ρ の 2 次関数

N :チェーン屈曲回数

である。

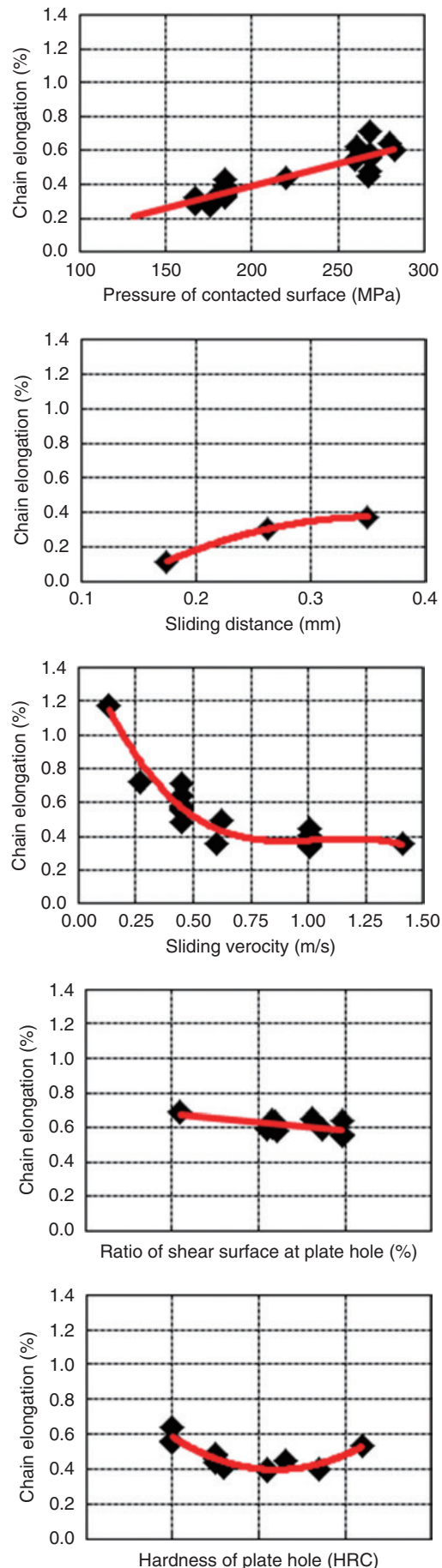


Fig. 7 Relation between chain elongation and chain elongation factor

3.2. チェーン伸び予測式の検証

チェーン伸び予測式の検証をするために、実機台上試験におけるチェーン伸びと計算結果の比較検証をおこなった。試験条件としては、さまざまな運転条件での検証をするために、予測式を導いた試験とは別に、低回転から高回転まで回転数違いによる一定速試験、試験中の回転数を変動させた回転数変動試験、一定速試験および回転数変動試験において、負荷条件を変化させた試験をおこなった。検証結果を Fig. 8 に示す。Fig. 8 より、試験結果と計算結果には良い相関が見られ、本予測式をもちいることで実機におけるチェーン伸びを推定できることを確認した。

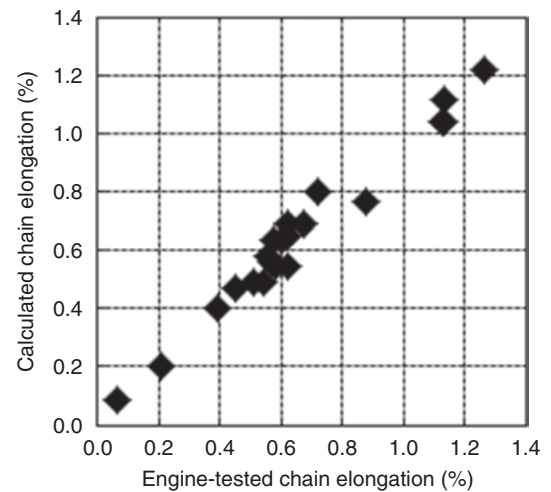


Fig. 8 Comparison of engine-tested values and calculated values

4. まとめ

チェーン伸びの予測技術を構築することを目的に、エンジン油中のすすによるチェーン伸びのメカニズム解析をおこない、チェーン伸び要因とチェーン伸び率の関係を実験的に求めた結果、以下の知見を得た。

- (1) エンジン油中のすすによるチェーン伸びは、ピンとプレートのしゅう動面にすすが介在することで起こる、三元アプレシブ摩耗によるプレート摩耗が支配的である。
- (2) ピン表面の摩耗は凝着摩耗が支配的であるために、ピンとプレートのしゅう動面には給油が必要である。しかし、エンジン油中にすすが存在している条件下においては、給油量増加にともなってプレート摩耗が増加するため、過度な給油はチェーン伸びを促進する可能性がある。
- (3) 実験結果をもとに導いたチェーン伸び予測式をもちいることで、設計初期段階において、チェーン伸び推定が可能となった。

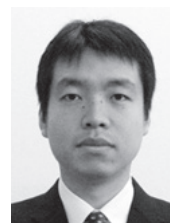
参考文献

- (1) 高岸広, 菅原一志: タイミングチェーン荷重予測手法の確立, Honda R&D Technical Review, Vol.14, No.1, p.223-230
- (2) 坂口元康, 阿黒雅樹, 山田真嗣, 松持祐司, 関雅夫, 若林智弘, 小岩洋二郎: マルチボディダイナミクスをもちいたチェーン騒音低減の検討, 自動車技術会学術講演会前刷集, No.116-10, p.17-20(2010)
- (3) 坂口元康, 山田真嗣, 関雅夫, 小岩洋二郎, 若林智弘, 山内孝宏: マルチボディダイナミクスをもちいたタイミングチェーンフリクション予測, 自動車技術会学術講演会前刷集, No.154-11, p.1-6(2011)

■ 著 者 ■



関 雅 夫



田 中 幹 樹