

NACHI-BUSINESS

Components **news**

Vol. **9** D2
November/2005

機能部品事業

■ 技術講座

知りたいトライボロジー講座②

「摩擦・摩耗」

Things to know about Tribology
"Friction・Wear"

〈キーワード〉 真実接触面積・見かけの接触面積・凝着摩擦・
凝着摩耗・アブレシブ摩耗・フレッチング

部品事業部／技術一部

横山 良彦 Yoshihiko Yokoyama

監修 開発本部／開発二部

渡辺 孝一 Kouichi Watanabe

要 旨

摩擦から連想するものは何でしょう？ 火を起こすためにきりもみする摩擦の発熱や、自転車のブレーキ摩擦など。どれにも共通していえるのは、スムーズな運動ではないということです。火起こしは無理にスムーズさを阻害して摩擦熱を発生させ、火にまで高めてしまうものですし、ブレーキは摩擦があるからこそ、運動を止めることができるものです。

摩擦は、一般に運動に抵抗する現象のことを指します。運動が意図されたものであれば摩擦は邪魔者ですが、摩擦そのものを意図した場合は摩擦は、必要不可欠なものです。

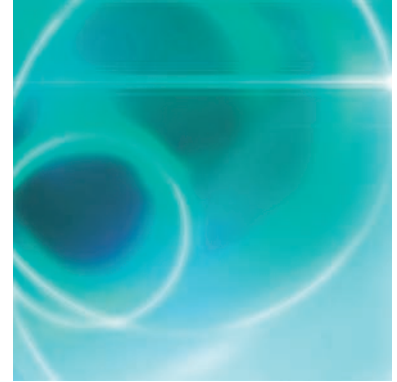
摩擦が繰り返されると一般には摩耗という現象に変わっていきます。摩耗にも意図したものと意図に反するものがあります。

ここでは、これらの現象をなるべく数式を使わずに述べていきます。

Abstract

What comes to mind when you think of friction? Is it the frictional heat from rubbing two sticks together to make a fire? Is it the friction from braking an automobile? What we can say about it is that it is not a smooth motion regardless of the type of friction. Making a fire is to generate frictional heat by hindering smooth motion forcibly and to bring the status to the level of combustion. Braking is possible because friction can stop motion.

Generally, friction means the phenomenon to resist motion. Friction is unwanted when motion is expected while friction is essential when friction per se is intended. When friction is repeated, the phenomenon is usually converted to wear. There are intended wear and unintended wear. Explained here are these phenomena with minimal use of numerical formulas.



1. 「真実接触面積」と「見かけの接触面積」

接触する2つの物体は一体どれだけの面積で接触するのでしょうか。例えば、片方の手のひらに絵の具を塗って、もう片方の手のひらに合わせると、接触した面積が分かります。多分、手のひら全面に絵の具がつくことはないと思います。この理由は手のひらが凸凹しているからで、凸の部分だけが触るからです。

手のひらに限らず、全ての物体の表面には必ず凸凹があります。このような表面をもった2つの物体を接触させたときに、実際に接触している面積が「真実接触面積」と呼ばれるものであり、手のひらの大きさそのもののような投影面積のことを、「見かけの接触面積」と呼びます。

表面に凸凹がある以上、真実接触面積は見かけの接触面積より必ず小さくなります。どれくらいの接触面積になるのでしょうか？ 物体の表面は0.001ミリ程度の凸凹の連続であることが知られています。このような凸凹面同士を接触させると、凸の部分は塑性変形といって、力を取り除いても元の状態には戻らないような変形をしてしまうのです。

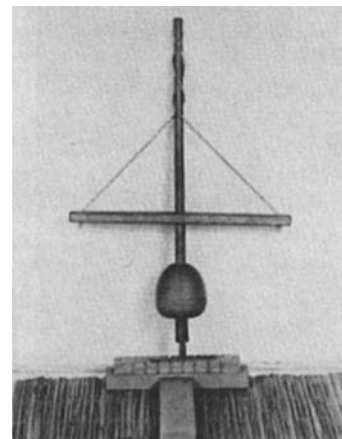


図1 火きり具

このような変形が一旦始まると、外力がそれ以上大きくならなくても変形はすすみます。図2に凸凹の表面を平滑なもので接触させた模式図を示します。微少な凸の表面は塑性変形して接触し、A1、A2…が真実の接触面積になります。このとき外力Wは、接触部分に分散していきますが、塑性変形していませんので、どの接触部分も変形量に関係なく、塑性変形を開始する面圧 P_Y になっているはずで

$$W = W_1 + W_2 + W_3 + \dots$$

$$= P_Y \cdot (A_1 + A_2 + A_3 + \dots)$$

$$= P_Y \cdot A$$

と表せます。これを書き直して

$$A = W / P_Y \quad (A \text{は真実接触面積})$$

ここで P_Y の性格を考えると、表面の塑性変形抵抗を示すものだから、これは硬さに相当します。そこで、改めて硬さHという記号に書き換えると

$$S = W / H$$

となります。

2. 摩擦のメカニズム

1) アモントン・クーロンの摩擦法則

摩擦は接触しあう2つの物体が相対運動するときには必ず発生するものですが、わたしたちは摩擦の性質が次のようなものであることを日常経験で知っています。

- ① 荷重が大きいほど摩擦は大きい
 - ② 接触している「見かけの面積」が大きいても小さくても^{※1}摩擦力は変わらない
 - ③ すべり速度が速くても遅くても摩擦力(動摩擦力)は変わらない
 - ④ 硬いものほど摩擦は小さい
 - ⑤ 材料が同じなら^{※2}摩擦係数はほとんど同じ
 - ⑥ 油が介在すると摩擦は小さい
- ①～③はアモントン・クーロンの摩擦法則といって経験則です。

つまり、真実の接触面積は接触する物体の硬さと外力とで表せることになります。この特長は摩擦の経験則を理解するのにとても重要な考え方で、たとえば適切ではないですが、ゴムはベチャッと接触し、金属は接触面積が小さくなる日常経験を納得させる式になっています。

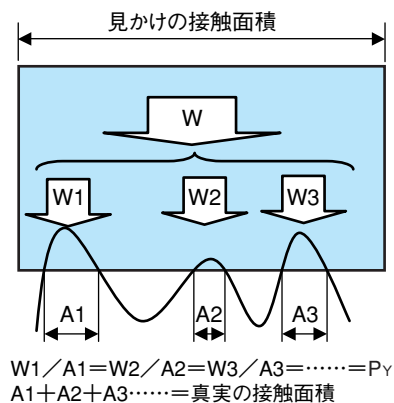


図2 真実接触面積の概念

クーロンは、接触面の凸凹面を相対すべりするときに摩擦が発生すると考えたのです。例えば、図3のようにWの荷重が負荷された θ の角度をもった2つの凸凹面が相対移動する時には、凸凹の山を乗り越えていく力Fが必要になります。

このFは荷重ベクトルを描くことで、

$$F = W \cdot \tan \theta$$

書き直せば $\tan \theta = F / W = \mu$

と表され、Fを摩擦力、 $\tan \theta$ を摩擦係数 μ と考えたわけです。

こうように説明することで、経験則はほぼ説明できたのですが、理論としては充分ではありませんでした。

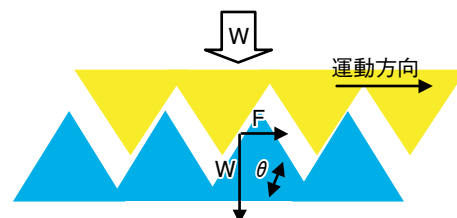


図3 クーロン摩擦の考え方

2) 凸凹部の凝着と剪断力による摩擦係数

そこででてきたのが、そもそも凸凹の先端は小さな面積で力を受けているのだから、塑性変形が当然発生しているだろう。ならば、その部分の「凝着(くっつきこうとする性質)」に逆らう力が摩擦であろうとする考え方です。

この力は引きずる方向の力なので剪断力と呼ばれますが、その力 F は単位面積、例えば 1mm^2 当たりの剪断力を s とし、^{※3}真実接触面積を A とすれば

$$F=A \cdot s$$

と表されることとなります。

一方、真実接触面積 A は材料の硬さ H と荷重 W の比 W/H となることがすでに分かっていますので、

$$F=s \cdot W/H$$

$$\text{書き直して、} F/W=s/H=\mu$$

となり、このようにして摩擦係数 μ が理論化されるようになりました。硬さは材料特有の数値であり、また硬さが分母にきていますので、これでほとんどの経験則が説明できるようになったわけです。

材料には降伏点応力 σ_Y といって、これだけの力(応力)がかかると塑性変形を開始することを示す材料固有の数値があります。

鉄鋼材料の場合、 s はほぼ $0.5\sigma_Y$ であり、同様に硬さ H は $2.8\sigma_Y$ 程度です。これを代入すれば

$$F/W=s/H=0.5/2.8=0.178$$

つまり、おおむね、鉄鋼材料の摩擦係数は0.18程度の固有値として見積もることができます。(実際の鉄鋼材料の表面には酸化膜などがあり、0.1~0.2程度で実測されるようです)この考え方は、現在最も支持されているもので、理論的にも整ったものです。

このようにして、摩擦とは微少な接触面積の凝着に抗する剪断力として理解されるようになりました。

3) 凝着摩擦以外の摩擦の発生要素

摩擦力の大きさは凝着だけでは説明が付きません。今日まで分かっているものには、この他「掘り起こしによる摩擦」といって硬いものが軟らかいものに沈んでしまって、そのまま滑るときに軟らかいものの接触部分を掘り起こしながら移動するときの摩擦などがあります。

この摩擦係数はある程度計算できるのですが、通常の機械部品では0.05程度といわれています。この他に、^{※4}弾性ヒステリシス損失による摩擦がありますが、いずれも凝着による摩擦に較べると小さいので、あまり問題にされることはありません。

4) 接触の回避

これまで述べた問題は2つの物体が接触していることから生じています。ならば、接触を止めることはできないかが当然発想としてでてきます。力で2つの物体を押し付け合いながら、どうやって離せるのかですが、それは油をさすことで解決できます。マクロ的には離れてはいないのですが、微視的にみると接触した領域に油を介在させると、接触する2つの物体を遊離させることができます。

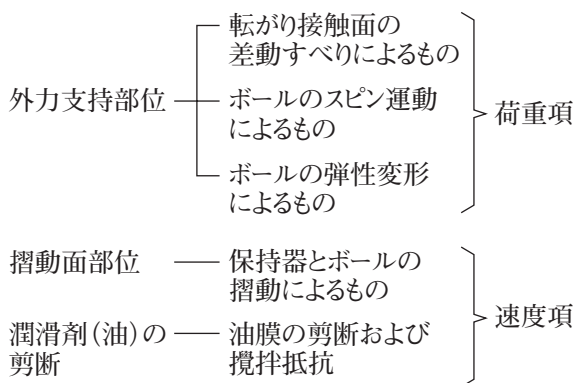
後ほど潤滑の章で述べることとなりますが、油のような液体にはそのような性格があるのです。その結果、摩擦はもう発生しないのかといえば、凝着面の剪断力は油を介して伝わります。ですから摩擦はなくなりません。また、油そのものの剪断抵抗が逆に発生してしまいます。ですが、これらを含めても、油が介在することで摩擦抵抗は極端に小さくなり、極端に抑えることができるのです。

3. 転がり軸受の摩擦係数

解明された摩擦現象を、産業に最も利用している分野が、転がり軸受です。

NACHIでは、昭和14年から転がり軸受の製造を行ない、これらの成果を応用しています。転がり軸受は英語でAnti-Fricion-Bearingと呼ばれ、転がり運動を採用することで、すべりという相対運動を極力小さくしたものです。それでも微視的にみれば、すべり運動は発生しています。

転動体にボールを使用した玉軸受で摩擦発生部位を分類すると、次のようになります。荷重にかかわるものを荷重項、潤滑剤にかかわるものを速度項として分類されることが多いようです。



保持器がボールから受ける力はわずかですので、保持器とボールとの摩擦はあまり問題にされませんが、ボールの接触部分の摩擦は接触部位の設計方法に大きく左右されます。差動すべりは、講座開設の章ですでに示しました。スピン運動というのは、ボールがコマのように廻る回転成分のことです。(ただし、回転成分を持つだけで、コマのようにボールが廻るわけではありません。)

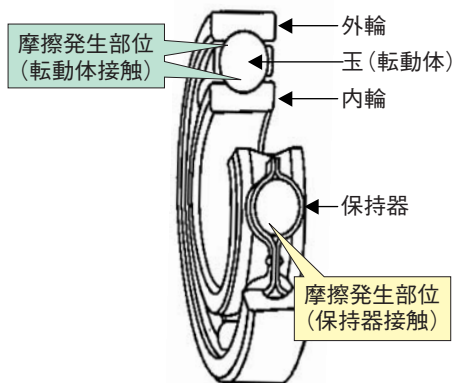


図4 単列深溝玉軸受の構造

今日ではこれらの分類された項目の摩擦値は計算できるようになりましたが、このうち速度項に相当する潤滑剤の抵抗が最もよく議論されるようです。

1) 潤滑剤の摩擦抵抗のメカニズム

自動車を運転していて、道路にたまった浅い水たまりに入った途端に急に減速してしまったという経験をされたことはないでしょうか？ それはタイヤの回転抵抗が急に増加するからなのです。

水たまりに突入した途端にどうして回転抵抗が増えてしまうのでしょうか？ 何が起きているのでしょうか？ タイヤはその柔らかさのために、接地した面では簡単に水膜ができてしまうことは前回でも述べました。この水膜は、膜の内部の力でタイヤを持ち上げるように作用するのですが、この力の分布の中心線は、タイヤの中心線よりもやや移動側にずれた位置にやっ

てきてしまうのです。このずれた量 e と、タイヤ荷重 F を乗じたモーメント eF が、タイヤが駆動される方向とは反対方向に作用してしまうので、回転抵抗が大きくなってしまいます。

e の数値は、荷重 F の大きさにはあまり影響を受けませんが、回転の速さに大きく比例して速ければ速いほど大きくなるのが計算で分かっています。

高速で走れば走るほど抵抗は大きくなりますし、左右のタイヤの回転差があれば、抵抗の差も大きくなるので、雨の日のコーナリングのスリップ事故はこのようなメカニズムにも起因していると考えられます。この原理は、転がり軸受の転動体と軌道輪の間の接触状態についても適用できることが分かっています。

このように、潤滑油が介在することで発生する摩擦を、速度項と呼びます。

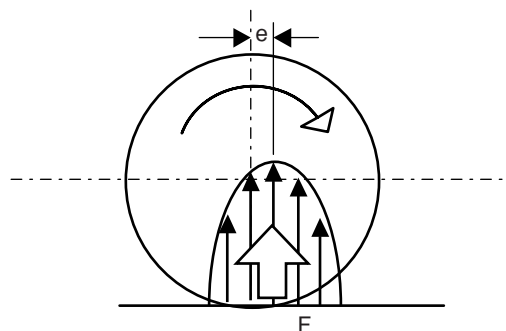


図5 回転体の潤滑下での回転抵抗

2) 転がり軸受の摩擦抵抗

では、差動すべりやスピンすべりによる摩擦などの荷重項は、潤滑油の影響は受けないのでしょうか？影響があるのだと明確に記された論文はまだ見たことはありませんが、NACHIではあると考えています。すべりという計算には、摩擦係数というものを設定して数値化する場面が大体出てくるのですが、この係数が潤滑剤の影響を受けて、回転数の増加につれ小さくなっていくと考えています。これを転がり軸受の回転数と摩擦の線図で表わすと、図6のような傾向になります。少なくとも円すいころ軸受という軸受については、このことは理論的にも実験的にも検証されていて、この考え方をほかの軸受にも適用していくと、摩擦についての事実を説明しやすくなることが分かっています。

このようにして、転がり軸受の摩擦係数は、今日ではほぼ計算できるようになってきました。

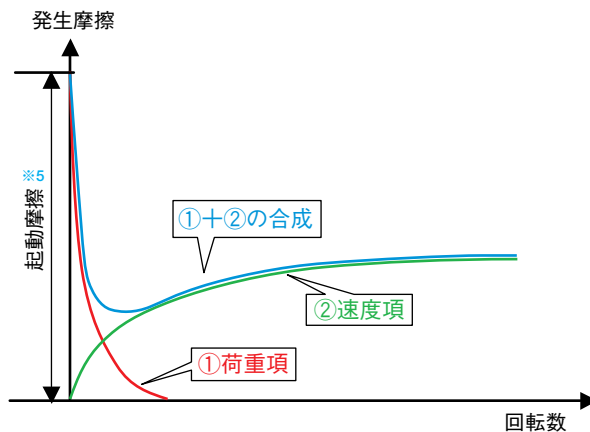


図6 転がり軸受の摩擦と回転数の一般的な関係

4. 摩耗のメカニズム

摩擦がゼロになることはありえないということがここまで読んでいただくと理解できると思います。摩擦がゼロではないということは、摩耗が必ず発生することです。ただ、摩擦の大きさと摩耗の大きさには必ずしも関係はありません。例えば鉛筆で書き物をするときは、鉛筆の芯が摩耗しています。消しゴムを使っているときもそうです。この場合の摩耗は材料の硬さに関係があるものです。

摩耗の主要原因はタイプにより異なることが多く、次のように原因別に分けて論じられることが多いようです。

- ①凝着摩耗 (adhesive wear)
- ②アブレシブ摩耗 (abrasive wear)
- ※6 ③腐食摩耗 (corrosive wear)
- ※7 ④疲れ摩耗 (fatigue wear)

フレッチングとかピッチングとか呼ばれる摩耗は、摩耗のタイプによる分類で、原因別に分けた上記の摩耗形態が絡みあって発生していることが多いようです。

ここでは代表的な、①凝着摩耗と②アブレシブ摩耗、そして、代表的な摩耗タイプとして、フレッチングをとり上げてみます。

1) 凝着摩耗

真実接触面では、接触している凸凹の先端が塑性変形していることをいいました。そのような塑性した微小の凸凹は接触を繰り返すうちに、剥がれて母体からとり除かれてしまいます。これが凝着摩耗といわれてる現象です。

凝着摩耗が生じると、取れた摩耗粉はどうなるのでしょうか？ またもとの母体にくっついたりあるいは相手方にくっついたりします。さらには、取れたり剥がれたりを繰り返すこともあります。ここで、私たちが常識にしている空気存在は、この現象の良し悪しに大きい影響をもたらします。

つまり、剥がれた摩耗粉は金属原子面がむき出しになっているので、何かにくっつきたいという性格を持っているのです。普段私たちが経験する摩耗では、剥がれた摩耗粉は空気中の酸素と結合して安定した粉に変わります。このときは摩耗面にはとくに大きな害は発生しません。これが良い摩耗です。

ところが、宇宙のような酸素の無い環境だったらどうでしょう？ 取れた摩耗粉は母体などにくっつくしかありません。くっついても微小だからすぐ剥がれますし、いつまでたってもつきたての餅のような性質をもちつづけます。摩耗粉同志が集まって大きな塊になることもあります。このような摩耗が悪い摩耗です。

つきたての餅のような性格の摩耗粉に「キナコ」のように振舞っていたのが酸素なのです。この現象は、この学説を唱えた笹田直の名をとって「笹田キナコ」と呼ばれています。

ですが、酸素があればいつも良い摩耗が生じるわけではありません。摩耗の進行が早いと、酸素とくっつく前に次の摩耗が生じることもあり、悪い摩耗に移行していくこともあります。高速回転する軸受などの潤滑状態が悪いと、すぐに焼き付いてしまうのはこのことが大きな原因の一つです。

このように、凝着摩耗では摩耗の結果に環境条件が大きく左右すると考えられています。

2) アブレシブ摩耗

剥がれた摩耗粉が酸素と結びつくと、全てが良い摩耗になるわけではありません。一般に金属原子は酸素と結びつくと硬く変化します。酸素と結合した摩耗粉は、通常はそのまわりにある潤滑油で接触面から取り除かれてしまうのですが、それが接触面に残留したまま硬い異物となって母体を傷つけてしまうのが、アブレシブ摩耗と呼ばれるものです。

硬いものが柔らかいものを傷つけるときも、この摩耗形態です。ですから、砂などが鉄鋼表面を削ってしまうのもこの摩耗です。(砂にはSiO₂という鉄よりも硬い酸化物が含まれています。)

この摩耗は摩耗率といって、摩耗する速さや強さを示す尺度が大きいため、物の加工などでは積極的に利用しますが、生じては困るところでは大変な害になるので、研究の対象になることが多いようです。

3) フレッチング

フレッチングとは、金属同志が小さな振動下で、接触を繰り返し受けるときに発生する摩耗形態のことで、微動摩耗とも呼ばれているものです。接触面がマクロ的に移動せず、常に特定の同じ箇所だけが振動接触するときに発生します。生じているメカニズムは凝着摩耗とアブレシブ摩耗の複合がほとんどです。したがって、原理が分かっているので、フレッチングは適切な手法で防止することができます。

フレッチングが生じると、金属のこすり面には、剥がれた凝着摩耗粉が酸化し、茶色の粉となってでてきます。酸化した粉は、今度はアブレシブ摩耗を引き起こします。このような繰り返しが生じるわけです。

これを防止するには、接触面に油をゆきわたらせることです。しかし、接触面が、油が入るほど移動してくれないので、わずかなすきまに浸潤してくれるような油が必要になります。

潤滑剤にグリースを使う場合は、軟らかいグリースを使うことで浸潤性が良くなり、解決することが多いようです。接合部品を多く持つ自動車ではフレッチングを防止するため、このようなグリースが多く使用されています。

5. おわりに

個体と個体の接触面に油膜が介在したときに、摩擦係数がどのように変化していくのかを評価したものに、1990年代初頭にできたストライベック(Stribeck)線図というのがあります。(図7) 接触する2物体に発生する摩擦の度合いを概念的に表したものとして、あまりにも有名な線図なのですが、潤滑の項で説明することとして、ここでは割愛しました。

摩擦・摩耗を小さくするには、2物体を遊離させればいいのですが、油の粘っこさ(これを粘度といいます)や接触面に油が移動する速さにより、遊離する量は変わって行くのです。但し0.001ミリといった目には見えない単位です。これらの粘度も速さも、大きいほど遊離する量は大きくなっていきます。逆に外力が大きいほど、遊離する量は減少していきます。この遊離量は大変に小さい量ですので、接触面の粗さによりせっかく離れた量を活かすとか活かさないということがあるので、物体の面粗さがとても重要な因子になってくるのです。

一般に、工業製品がピカピカの面になっていてどろどろした粘っこい油が使われていることが多いのは、

2つの接触面が非常に大きい力を支持しても、形成された油膜が切れないようにするためなのです。

このように、摩擦・摩耗は潤滑とは密接な関係にあります。次回は、潤滑について述べますので、もう一度この欄に振り返って頂くと理解が深まると思います。

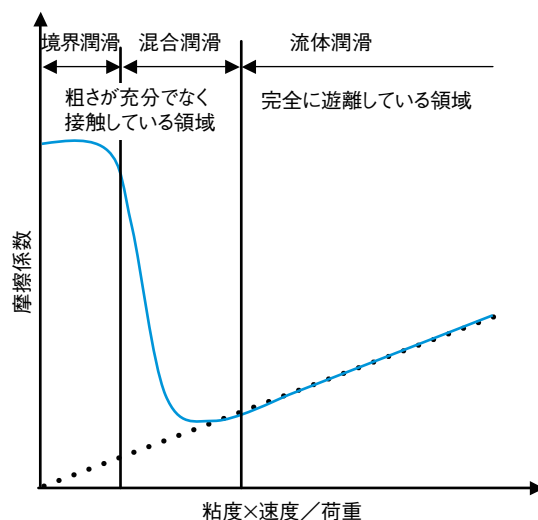


図7 ストライベック線図

用語解説

- ※1 摩擦力
外力と直角方向に物体を移動させるときに発生する運動方向とは、逆向きの抵抗力のこと。
- ※2 摩擦係数
摩擦力をそのときの外力で除したもの。摩擦力と外力は直角方向で評価する。
- ※3 剪断力
物体の運動方向に接触面がずれようとする力。
- ※4 弾性ヒステリシス損失
固体の接触における弾性変形が大きく、その変形と回復がくり返される場合に、エネルギー損失が発生する。
- ※5 起動摩擦
物体が動き始める瞬間の摩擦力であり、静摩擦とも呼ばれる。この反対語に動摩擦があり、動摩擦力は一般に静摩擦力の約1/2になる。
- ※6 腐食摩耗
雰囲気あるいは潤滑剤による腐食作用と摩擦による機械的作用とが併発的にあるいはくり返式的におこる場合の摩耗。
- ※7 疲れ摩耗
摩擦時の応力のくり返しによっておこる表面の疲れ損傷。

関連記事

- 1) 渡辺孝一：知りたいトライボロジー講座①「トライボロジー入門」
NACHI-BUSINESS news Vol.7 D1、May/2005