京都大学防災研究所年報第30号A　昭62. 4
Annuals, Disas. Prev. Res. Inst., Kyoto Univ., No. 30 A, 1987

一論文を起点にした近年の河川蛇行論の動向

パーカー，ゲイリー

1. 序　論

弯曲流に関する Engelund[1] の先駆的な論文,「Flow and bed topography in channel bends」が発表されたのは，十数年前のことである。それまでの研究の多くは，一定河道曲率を有する一様弯曲流を仮定して行われたのに対し，氏は任意に変動する曲率を考慮することによって，弯曲論を蛇行論に拡張することに成功した。これがその後の研究に与えた影響の余りにも大きいことは後章で触れるが，氏の研究は交互砂州の問題を別にすれば，いわば有限振幅蛇行論の元年を1974年に置くに値するほどである。

一方において，文献中に続出する計算の過失は読者を大いに困惑させて来た。これは，優れた論文に時々みられるような少々の難点や不明なところがあるばかりではなく，実験データとの比較にかかわると考えられる肝腎な部分にもおよんでいる。

力作と失敗作との価値判断が共存し得るか否か？　し得るとすれば，その研究をどこに位置付けるべきかを理解するにあたって，この研究と以後の研究との関連を探るのが本報の目的である。

2. 弯曲流および蛇行流

詳述する前に問題を大局的に紹介する。蛇行河川の力学を理解するのが本来の狙いであるにかかわらず，Rozovskii[2] を初め初期の研究においては，問題を当時の手法で取扱える程度に簡略化し，蛇行の本質を多分に含む一様弯曲流を対象にしているものが多い。**Fig. 1** に示すように，流下方向に一定の底面勾配を有する一様幅の長方形断面螺線型開水路の一部を考える。図面上の b は水路幅の半分に相当し，r は局所曲率半径，s は中央線に沿う流下方向の座標，n は流路中心より半径方向にとった横断座標，h は水深である。変数 h_0, r_0 等において添字 $_0$ は中央における諸量であることを示す。発達した一様弯曲流においては，中央曲率 r_0 のみならず，水位 ξ と河床高 η を除く全ての水理量が流下方向 s に依存しないと仮定する。

一様弯曲における支配的現象は二次流であるが，まず固定床の場合を考える。**Fig. 2** に示すように，この種の流れでは外岸に現われる若干の水面上昇 $\Delta\xi$ によって，遠心加速度とおおまかにつり合う水圧の横断勾配が生じる。ただし，これによる過剰水圧は鉛直座標 z に依存しないのに対し，遠心加速度は底面から水面にかけて主流速の二乗に比例して増大し，僅かな局所的不釣り合いから上層が外岸向きに，下層が内岸向きに流れ，断面内二次流のセル $v(z)$ が形成される。

二次流セルの強度に関する研究は従来多くなされている。また，主流は二次流・主流間の相互作用によって変形される。**Fig. 2** に示すように，二次流は相対的に主流の運動量が大きい上層流を外岸へ，運動量の小さい下層流を内岸へ移流することによって分散効果をもたらす。従って **Fig. 1** に示すように，流れの流心線は外岸に偏倚し，鉛直平均主流速 $\bar{u}$ は強制渦型の横断分布を呈するようになる。

一方，幾何的考察から r 地点における流下方向の水面勾配 I は

$$I=I_0\frac{r_0}{r} \qquad (1)$$

となり，内岸に近いほど急である。このことから反対に，流心線が内岸による自由渦型横断分布の傾向も見

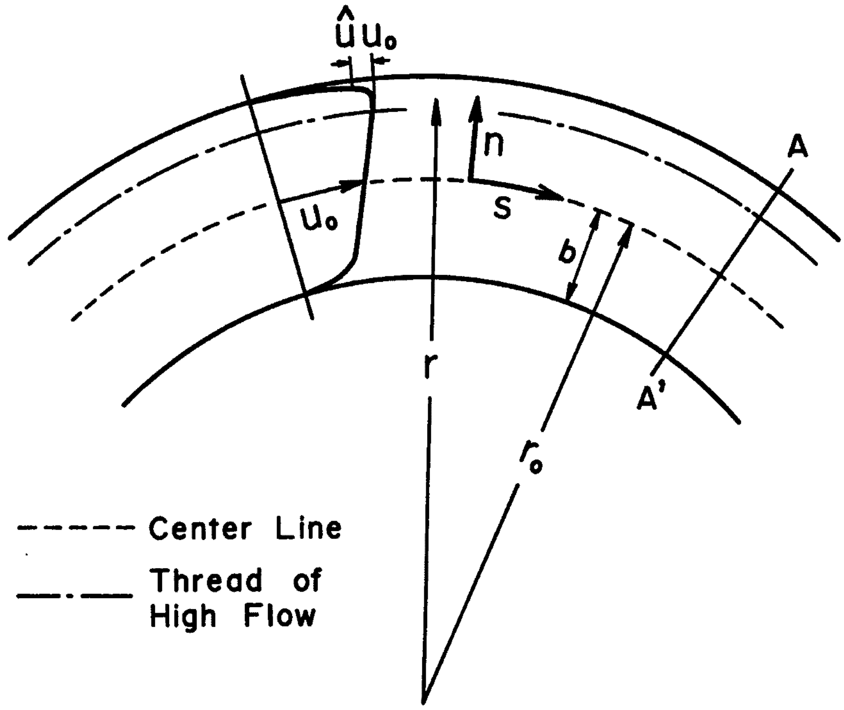

Fig. 1. Bend in plan

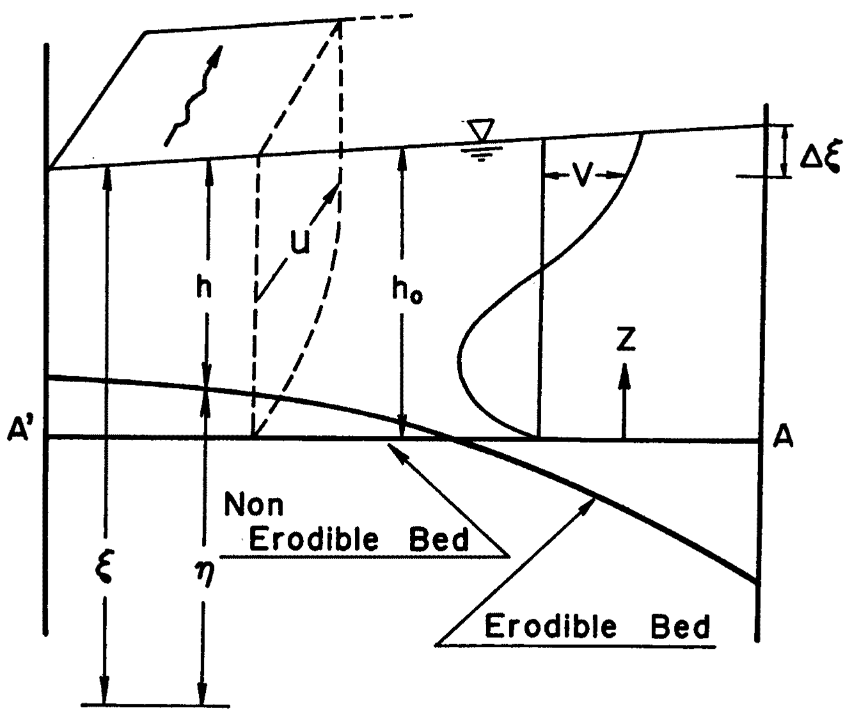

Fig. 2. Bend cross-section

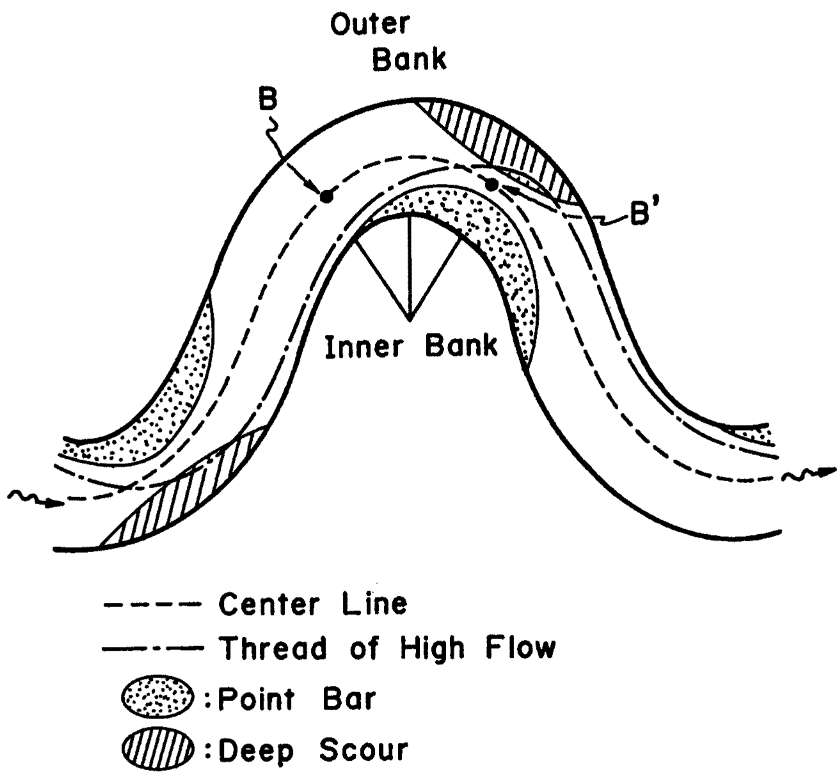

Fig. 3. Meandering channel

出せる。以上のことから，一様弯曲流の興味深い問題点は二次流の他に主流にもあることが判る。

さらに，**Fig.** 2 に示すように移動床を考えた場合には，二次流によって河床の外岸近傍が掘れ，内岸近傍に土砂堆積が起こるために point bar の形成が推察される。このように，いたって簡単な考察から実河川にみられる主な現象を第一近似的に説明することができる。

Fig. 3 に示すように，蛇行河道を有する実河川の場合には，河道曲率が連続関数として交互に変動し，一様弯曲論では説明し得ない諸現象が現れる。例えば，図面内のB点における河道曲率が B′ 点のそれと等しいにもかかわらず，流心線は前者において内岸により，後者において外岸によっている。言い換えれば，曲率変動によって流心線，point bar の形状，二次流強度等には，河道曲率との間に位相遅れが生じる。

また，実河川における興味深い現象として，規則性をもつ弯曲移動および河床材料の弯曲内ふるい分け現象が挙げられるが，このどちらも蛇行流の力学と密接な関係にあることは言うにおよばない。

3. Engelund の業績

1974年の論文における Engelund の業績は，以下のように要約することができる。

1. 重力を考慮した横断方向の一般流砂量式
2. 一様弯曲における河床横断勾配の定式化
3. 流心線の概念の定式化
4. 蛇行流への適用

氏の解析は直線流を基準にした河道曲率についての非厳密な展開によるものである。基準流の流速分布 $u(z)$ は，過動粘性係数 ν_T を鉛直方向に一定と仮定した Engelund 我流の slip velocity 法により求められ，放物線型のものとなる。一様弯曲における二次流の計算は，slip velocity を用いている点を除けば Rozovskii[2)]

の解析と対応しているので本報において詳述を省くが，氏は，結果として二次流速度を次のように定式化している。

$$\tan\delta=-7\frac{h_0}{r_0} \quad\cdots\cdots(2)$$

ここに，δ は二次流による底面せん断応力ベクトル（あるいは底面近傍流速ベクトル）の流下方向に対する偏倚角であって，記号が負であることは，底面二次流が内岸向きであることを表わす。

移動床の場合には，**Fig. 2** に示す平衡底面横断勾配は，粒子を内岸へ運ぶ二次流による流体力と斜面沿いに下方へ転がり落とそうとする重力の成分とのつり合いによって維持される。この横断勾配は次のように定量化できる。

$$\left.\frac{d\eta}{dn}\right|_{n=0}=-A\frac{h_0}{r_0} \quad\cdots\cdots(3)$$

ここに，A は無次元洗掘係数であるが，A が増大するにつれて外岸の洗掘，内岸の堆積が激しくなる傾向を示す。

従来，A の算定式に関し，多くの研究がなされているが，Engelund の場合には，横断勾配を考慮した横断流砂量式を論拠に，一般論の特例として導入を行っているところが興味深い。しかもその流砂量式は

$$\frac{q_n}{q_s}=\frac{v_0}{u_0}+\tan\delta-\frac{1}{\mu}\frac{\partial\eta}{\partial n} \quad\cdots\cdots(4)$$

と，いたって簡素な形になっている。ここに，q_s, q_n はそれぞれ s, n 方向の単位幅当たりの体積流砂量，v_0 は中央における横断流速の鉛直平均値（一様湾曲の場合には $v_0=0$），μ はほぼ普遍と思われる動摩擦係数である。

蛇行流の場合にもなお成立すると思われる(4)式を発達した一様弯曲流に適用するにあたっては，$q_n=v_0=0$ とし，(2)，(4)式を(3)式に代入して A について解くと，

$$\mathrm{A}=7\mu \quad\cdots\cdots(5)$$

となる。Engelund はさらに μ を 0.51～0.64 としているので A の値はほぼ4となる。後章で述べるように，(5)式そのものは以前から研究されてきたものであり，特に新しいものではないが，導入の過程には新しい展開への道が見出せる。

氏の線形解においては，側岸のごく近い領域を除いた鉛直平均主流速の横断分布 $\bar{u}(n)$ は次式のように表わされる。

$$\bar{u}(n)=u_0\left(1+\hat{u}\frac{n}{b}\right) \quad\cdots\cdots(6)$$

ここで，**Fig. 1** に示すように，u_0 は中央における鉛直平均主流速，$\hat{u}$ は側岸（ただし側岸境界層外）における無次元過剰鉛直平均主流速である。従って $\hat{u}$ の値は，正ならば流心線が外岸により，負ならば内岸による傾向を示し，しかもその偏倚の度合は $\hat{u}$ の絶対値に比例する。氏はこのように流心線の概念を定式化することに成功している。

以上に指摘した点においては，Engelund の弯曲論は，巧みに仕上げられた評価すべき研究であるものの，飛躍的な進歩をなしとげたものとは言いがたい。飛躍に値する要素はむしろ，従来の一様弯曲論から蛇行論への拡張にある。解析方法は不完全でかつ非厳密であるが，河道の曲率変動を考慮した点において大いに先駆をなしている。誘導の一般性は，氏の使用した横断流砂量式(4)式ならびに定常掃流砂保存式

$$\frac{1}{r/r_0}\frac{\partial q_s}{\partial s}+\frac{\partial q_n}{\partial n}+\frac{q_n}{r}=0 \quad\cdots\cdots(7)$$

にも反映しているが，むしろ流下方向の運動量保存式に最も明瞭にとらえられている。この式は，鉛直平均かつ線形化した形として次のように表わせる。

$$\frac{\partial \hat{u}}{\partial \hat{s}}+2C_f\hat{u}=-\frac{\partial}{\partial \hat{s}}\left(\frac{h_0}{r_0}\right)+C_f(A+F^2)\left(\frac{h_0}{r_0}\right) \quad \cdots\cdots(8)$$

ここに，$\hat{s}=s/h_0$, $F=u_0/\sqrt{gh_0}$ は基準流の Froude 数，$C_f=\tau_0/\rho u_0^2$ は抵抗係数，τ_0 は中央における基準流の底面せん断応力である。特例として発達した一様湾曲流においては，r_0=一定，$\partial/\partial\hat{s}=0$ となるので(8)式より

$$\hat{u}=\frac{1}{2}(A+F^2)\frac{h_0}{r_0} \quad \cdots\cdots(9)$$

が得られる。従って流心線は外岸により，しかもその偏倚の度合は無次元曲率 h_0/r_0 と単なる代数関係にある。一方，一般蛇行流の場合には，偏倚に対して $\partial\hat{u}/\partial\hat{s}$ の形で運動量の移流が寄与し，$\partial(h_0/r_0)/\partial\hat{s}$ の形で曲率の流下変動が圧力勾配を通して寄与するため，流心線の位置にも変動が現われる。

Engelund はさらに(8)式より得られた $\hat{u}$ の解を(4), (7)式に代入し，移動床流路における水深の場および底面形状を求め，**Fig. 3** に示される特性の全てを再現することに成功した。このように，1974年を境に河川蛇行論の視野が氏によって大きく広げられた。

1974年の論文に基づく研究はいくつにも枝分れしたが，本報においては数例を挙げるにとどめる。もとの解析は掃流砂のみを対象にしているが，その後浮遊砂も考慮した拡張論が Diegaard[3], Ikeda・Nishimura[4], Seminara・Tubino[5],[6] によってなされている。また，池田ら[7] は早くから流心線の流下変動に着目し，蛇行河川の流路変動を定性的に論じているが，その後長谷川・伊東[8], Ikeda et. al.[9], 福岡・山坂[10], Blondeaux・Seminara[11] によって定量化が進み，長谷川・伊東[8], Beck et. al.[12] によって実河川に応用されるにいたっている。

4. 解析の弱点

発達した一様弯曲流における二次流の計算にあたって，Engelund は流れの横断運動量保存式を下記のように表わしている。

$$-\frac{u^2}{r}=-g\frac{\partial\xi}{\partial r}+\nu_T\frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \quad \cdots\cdots(10)$$

前述の slip velocity 法より得られた基準流の鉛直分布 $u(z)$ を次のように弯曲流に適用している。

$$u(\zeta)=u_0\sqrt{\frac{r_0}{r}}\,\phi(\zeta) \quad \cdots\cdots(11)$$

ここに，$\zeta=z/h_0$, $\phi(\zeta)$ は放物線分布を無次元化したものである。二次流 $v(\zeta)$, 水位 ξ, 渦動粘性係数 ν_T をそれぞれ以下のように仮定している。

$$v=\frac{u_0h_0}{r}f(\zeta);\quad \xi=-\chi\frac{u_0^2r_0}{gr};\quad \nu_T=\nu_{T0}\sqrt{\frac{r_0}{r}} \quad \cdots\cdots(12)$$

ここに χ は $O(1)$ の無次元定数である。(11), (12)式を(10)式に代入し，変数分離によって無次元二次流分布 $f(\zeta)$ を解いているが，氏の論文には結果として次式が記載されている。

$$f''=\frac{u_0h_0}{\nu_{T0}}[\chi-\phi^2(\zeta)] \quad \cdots\cdots(13)$$

上式によると，f'' の r に対する依存性が幸いに消去されているようである。しかし，計算を行って見ると，その結果は

$$f''=\frac{u_0h_0}{\nu_{T0}}\sqrt{\frac{r_0}{r}}[\chi-\phi^2(\zeta)] \quad \cdots\cdots(14)$$

となり，余分の $\sqrt{r_0/r}$ という押しても引いても消滅しない厄介者が現われている。

(13)式は明白な計算違いであるものの，それは決定的なものではない。論文に記載されていないが，(14)式は

$$\frac{b}{r_0} \ll 1 \quad \cdots\cdots(15)$$

を仮定した，b/r_0 についての級数の線形領域 $O(b/r_0)$ で得られる。**Fig. 1** から判るように，$r=r_0+n$, $|n/b|<1$ であるので厄介者は

$$\sqrt{\frac{r_0}{r}}=\left(\frac{1}{1+n/r_0}\right)^{1/2}=1+O\left(\frac{b}{r_0}\right) \quad \cdots\cdots(16)$$

となり，高次へ立ち退きさせられる。従って(13)式のような過ちの原因は展開方法の非厳密性にある。この点は De Vriend[13], Smith・Mclean[14] 等多くの研究者を苦悩させ，逆に多尺度を有するこの難題に適した一貫した展開方法を求める刺激を与えた。

次に横断流砂量式と洗掘係数Aの誘導を考えるが，(4)式の一般性は評価できるものの，吉川ら[15]，長谷川[16]，池田ら[17]の研究から判るように，次の点において訂正を加える必要がある。

1. 流体と粒子間の揚力は垂直方向ではなく，底面と直角上向きに働く。
2. 流体と粒子間の抗力ベクトルは底面近傍の流速ベクトル u_b ではなく，相対速度ベクトル $u_p - v_p$ と平行である。ここに，v は粒子の速度ベクトルである。

以上の考察から，(4), (5)式はそれぞれ次のように改められる。

$$\frac{q_n}{q_s}=\frac{v_0}{u_0}+\tan\delta-\frac{1+\alpha\mu}{\lambda\mu}\sqrt{\frac{\tau_c^*}{\tau_0^*}}\frac{\partial\eta}{\partial n} \quad \cdots\cdots(17)$$

$$A=\frac{7\mu}{\lambda(1+\alpha\mu)}\sqrt{\frac{\tau_0^*}{\tau_c^*}} \quad \cdots\cdots(18)$$

ここに，α は揚力・抗力の比，λ は遮へい係数，

$$\tau_0^*=\frac{\tau_0}{\rho R g D_s} \quad \cdots\cdots(19)$$

は基準流の無次元掃流力，τ_c^* は移動限界における τ_0^* の値である。さらに，D_s は河床材料の代表粒径，ρ は流体の密度，R は砂の水中比重である。

(18)式は氏の論文とほぼ同時期に発表された吉川ら[15]の解析によるものである。吉川らの理論は洗掘係数の誘導のみならず，例えば時間的変動を考慮した点においても Engelund のものと比較するところが多い。

さて洪水時における湾曲部外岸の洗掘は橋梁災害等の観点から重要な問題であるが，氏の(5)式によると，洗掘係数 A は流れの強度に依存せず，移動床を呈するかぎり洪水時の外岸最大洗掘深は低水時のものと同一である。一方，Odgaard[18] が実験や観測によって得た多くのデータをもって示したように，A は平均主流速が増すとともにほぼ線形的に増大する。その傾向は吉川ら[15]による(18)式および同様の考察より得られた本人や Zimmerman・Kennedy[19] の関係式で定量的に説明できる。もっとも，A が増大する物理的機構は，Engelund の論文より27年前に Van Bendegom[20] によって把握されている。

(5)式で説明し得ない現象は以上のものにとどまらない。実河川の河床材料は一般に混合砂から構成され，湾曲内において粒径別に分級されていることは，例えば Bridge・Jarvis[21], Dietrich・Smith[22] によって示されている。池田ら[17]は現象を次のように説明している。(17)式の右辺における三項目と二項目との比，すなわち粒子を斜面沿いに下方へ転がり落とそうとする重力項と内岸へ運ぶ二次流項との比は，粒径とともに増大するため，粒径毎に移動方向の相違が生じる。Engelund の(4)式においては，この比がほぼ不変であり，この式ではふるい分けを説明することはできないが，(17)式と矛盾している点に対する反省が現象の解明への手掛りとなったことは十分に推察されよう。

(8)式の誘導においては，流下方向の運動方程式は氏の本文中に湧いて出たように現われるが，もとをたど

れば次の浅水流式より得られたものであろう。

$$\frac{1}{r/r_0}\bar{u}\frac{\partial\bar{u}}{\partial s}+\bar{v}\frac{\partial\bar{u}}{\partial n}+\frac{\bar{u}\bar{v}}{r}=-\frac{g}{r/r_0}\frac{\partial\xi}{\partial s}+C_f\frac{\bar{u}^2}{h} \quad\cdots\cdots(20)$$

ここに，$\bar{v}$ は v の鉛直平均である。Engelund は(20)式を(8)式に変形する過程において，曲線座標への変換による尺度因子 r/r_0 を省いている。しかし(1)，(16)式から判るように，

$$\frac{r_0}{r}=1-\frac{n}{r_0}+O\left(\frac{b}{r_0}\right)^2 \quad\cdots\cdots(21)$$

となり，圧力勾配を意味する(20)式の右辺の第一項における尺度因子は次のように，線形領域 $O(b/r_0)$ においてもなお寄与している。

$$-\frac{g}{r/r_0}\frac{\partial\xi}{\partial s}=-gI_0\left(1-\frac{n}{r_0}\right)+O\left(\frac{b}{r_0}\right) \quad\cdots\cdots(22)$$

すなわち，(1)，(21)，(22)式の連立から明らかなように，氏は(8)式において，２章で述べた自由渦の機構を見失っている。このことは De Vriend[13]，Smith・McLean[14]，池内・玉井[23]が指摘しているが，計算の詳細を省いて(8)式を訂正すると次式を得る。

$$\frac{\partial\hat{u}}{\partial\hat{s}}+2C_f\hat{u}=-\frac{\partial}{\partial\hat{s}}\left(\frac{h_0}{r_0}\right)+C_f(A+F^2-1)\frac{h_0}{r_0} \quad\cdots\cdots(23)$$

さてこの訂正をもって，もっとも単純な一例と思われる横断平面固定床 ($A=0$) の一様弯曲流を再検討しよう。この場合は，Engelund の(8)式より $\hat{u}$ は

$$\hat{u}=\frac{1}{2}F^2\frac{h_0}{r_0} \quad\cdots\cdots(24)$$

となり，流心線は常に外岸に偏倚するのに対し，(23)式による $\hat{u}$ は

$$\hat{u}=-\frac{1}{2}(1-F^2)\frac{h_0}{r_0} \quad\cdots\cdots(25)$$

で与えられ，常流の場合は流心線が常に内岸によるという正反対の結論を得る。

以上の，いたって単純な流れを説明し損った氏の理論の弱点を考えるにあたっては，これと実験結果との十分な比較が必要である。しかし，湾曲水路には 180° 以上のものが殆どなく，流れが下流端へ至るまでに平衡状態に達しているかどうか疑問があり，両者の比較は難しい。幸いに，正確に $F=0$, $A=0$ の場合に相当する螺線型円管流の実験は容易に行うことができる。Itō[24]が1951年に示したように，同様の自由渦が寄与しているにもかかわらず，流心線は依然として外岸に偏倚している。すなわち訂正論を疑わざるを得ない苦境に立たされる次第である。

これに関する解答は，Engelund が考慮しなかった別の現象にある。2章で述べたように，二次流の分散効果によって主流が再配分され，運動量に富んだ上層流（円管なら中央流）が外岸へ，運動量の小さい下層流（円管なら壁面流）が内岸へ運ばれることによって流心線が外岸へ押しやられる。このことは，開水路弯曲流の場合についてみても De Vriend[25]，Falcon・Kennedy[26]，石川・金[27]によって指摘されている。流れの鉛直構造によるこの再配分は，(20)式のような浅水流式から論じられないことはいうまでもない。

未発表の解析であるが，著者は分散効果をとらえることによって(23)式をさらに下記のように訂正している。

$$\frac{\partial\hat{u}}{\partial\hat{s}}+2C_f\hat{u}=-\frac{\partial}{\partial\hat{s}}\left(\frac{h_0}{r_0}\right)+C_f(A+F^2-1+A_s)\frac{h_0}{r_0} \quad\cdots\cdots(26)$$

ここに，$A_s(>0)$ は二次流による主流の再配分係数であるが，開水路内の乱流場においては１を上まわり，A とほぼ同一のオーダーである。従って(26)式を平面固定床一様弯曲流に適用した場合においても，流心線は外岸に偏倚することが明らかであり，矛盾がなくなる。

5. むすび

Engelund の論文について指摘すべきことは，まだ他にも延々と挙げられる。例えば蛇行河道の前兆と思われる交互砂州に関する研究は，Engelund・Skovgaard[28] の洗練された解析があるが，前者を後者とつなぐ統一論は，Hasegawa・Yamaoka[29] の試みから始まり，線形領域において Blondeaux・Seminara[11] によって完成されている。氏は二次流の算出にあたって，(10)式における移流項を無視したが，この移流のために二次流強度と曲率との間に位相差が生じることは DeVriend・Struiksma[30]，Kitanidis・Kennedy[31]，Ikeda・Nishimura[4] によって明らかにされている。Smith・McLean[14]，池内・玉井[23] は氏の理論で説明し得ない，非線形性による極めて興味深い諸現象を論じている。

しかしこれ以上例を挙げなくても，著者として伝えたいことは判って頂けたであろう。Engelund は十数年前の解析をもって飛躍的な先駆をなした。用心に用心を重ね，一間の透きもないような理論を構成したのではない。むしろ，氏の仕掛けたわなは目が粗いが，現象の本質をしっかりと，しかも論理上美しくとらえている。目が粗いだけにその本質が手に取るようによく見える。一方，目の間から流れ出る多くの要素は次第に気になってくる。少しずつ目を塞いでいるうちに，いつの間にか目的を越え，いやおうなしに思いもよらぬところへ誘われて行く。理性と直感の相互作用によって生まれた理論が持つ豊かな模様とその不完全さにこそこんな魅力が生まれてくるものであろう。

本論文は日本学術振興会の招待により，京都大学防災研究所に滞在中にまとめたものである。指導して下さった芦田和男教授ならびに，討論と日本語の訂正においてお世話になった江頭進治助教授に心から謝意を表わします。

参考文献

1) Engelund, F.: Flow and bed topography in channel bends, Proc. ASCE, HY 11, November, 1974, pp. 1631-1648.
2) Rozovskii, I. L.: Flow of water in bends of open channels, Israel Program for Scientific Translations, Jerusalem, Israel, 1961.
3) Diegaard, R.: Longitudinal and transverse sorting of grain sizes in alluvial rivers, Series Paper 26, Inst. of Hydrodynamics and Hydraul. Engineering, Tech. Univ. Denmark, 1980.
4) Ikeda, S. and T. Nishimura: Flow and bed profile in meandering sand-silt rivers, J. Hydraul. Eng., ASCE, No. 7, 1985, pp. 562-579.
5) Seminara, G. and M. Tubino: Effect of transport in suspension on flow in weakly meandering channels, Proc. Euromech 192, Munich, 11-15 June, 1985, A. A. Balkema, Rotterdam, 1986, pp. 247-254.
6) Seminara, G. and M. Tubino: Further results on the effect of transport in suspension on flow in weakly meandering channels, Coloq. on Dynamics of Alluvial Rivers, Genova, Italy, June 25-26, 1986.
7) 池田駿介・日野幹雄・吉川秀夫：河川の自由蛇行に関する理論的研究，土木学会論文報告集，第255号，1976.
8) 長谷川和義・伊藤　仁：蛇行流路の経年変動に関する電算機シミュレーション，土木学会北海道支部論文報告集，第34号，1978.
9) Ikeda, S., G. Parker and K. Sawai: Bend theory of river meanders, Part 1, Linear development, J. Fluid Mech., 112, 1981, pp. 363-377.
10) 福岡捷二・山坂昌成：側岸の浸食・堆積による蛇行発達の理論，土木学会論文報告集，第327号，

1982.
11) Blondeaux, P. and G. Seminara: A unified bar-bend theory of river meanders, J. Fluid Mech., 157, 1985, pp. 449-470.
12) Beck, S., D. Melfi and K. Yalamanchili: Lateral migration of the Genessee River, New York, Proc. ASCE Rivers '83 Conf. on River Meandering, New Orleans, U. S. A., October 24-26, 1983, pp. 510-517.
13) De Vriend, H. J.: A mathematical model of steady flow in curved alluvial channels, Communications on Hydraulics 76-1, Dept. of Civil Eng., Delft Univ. of Techn., Netherlands, 1981.
14) Smith, J. D. and S. R. McLean: A model for flow in meandering streams, Water Resources Research, 20, 9, 1984, pp. 1301-1315.
15) 吉川秀夫・池田駿介・北川　明：弯曲水路の河床変化について，土木学会論文報告集，第251号，1976.
16) 長谷川和義：非平衡性を考慮した側岸浸食量式に関する研究，土木学会論文報告集，第316号，1981.
17) 池田駿介・山坂昌成・千代田将明：混合砂礫床一様弯曲流路の平衡流路の平衡横断形状と Sorting について，土木学会論文報告集，第375号，1986.
18) Odgaard, A. J.: Transverse bed slope in alluvial channel bends, Proc. ASCE, HY 12, 1981, pp. 1677-1694.
19) Zimmerman, C. and J. F. Kennedy: Transverse bed slopes in curved alluvial channels, Proc. ASCE, HY 1, 1978, pp. 33-48.
20) Van Bendegom, L.: Some considerations on river morphology and river improvement, De Ingenieur, 59, 4, 1947, pp. 131-11 (蘭文).
21) Bridge, J. S. and J. Jarvis: The dynamics of a river bend: a study in flow and sedimentary processes, Sedimentology, 29, 1982, pp. 499-541.
22) Dietrich, W. E. and J. D. Smith: Bedload transport in a river meander, Water Resources Research, 20, 10, 1984, pp. 1355-1380.
23) 池内幸司・玉井信行：蛇行水路における水深平均流れ場の遷移特性，土木学会論文報告集，第334号，1983.
24) Ito, H.: Theory on laminar flow through curved pipes of elliptic and rectangular cross-section, Rep. Inst. High Speed Mech., Tohoku Univ., 1, 1951, pp. 1-16.
25) De Vriend, H. J.: Velocity redistribution in curved rectangular channels, J. Fluid Mechanics, 107, 1981, pp. 423-439.
26) Falcon, M. A. and J. F. Kennedy: Flow in alluvial river curves, J. Fluid Mechanics, 133, 1983.
27) 石川忠晴・金　舜範：弯曲部の2次流に関する基礎的研究，土木学会論文報告集，第375号/II-6，1986.
28) Engelund, F. and O. Skovgaard: On the origin of meandering and braiding in alluvial streams, J. Fluid Mechanics, 57, 1973, 289-302.
29) Hasegawa, K. and I. Yamaoka: The effect of plane and bed forms of channels upon the meander development, Proc. JSCE, No. 296, 1980.
30) De Vriend, H. J. and N. Struiksma: Flow and bed formation in river bends, Proc. ASCE Rivers, '83 Conf. on River Meandering, New Orleans, U.S.A., October 24-26, 1983, pp. 810-827.
31) Kitanidis, P. K. and J. F. Kennedy: Secondary current and river meander formation, J. Fluid Mechanics, 144, 1984, pp. 217-230.

ON THE INFLUENCE OF A SINGLE PAPER ON RECENT TRENDS IN RIVER MEANDER RESEARCH

By *Gary* PARKER

Synopsis

Frank Engelund's theory of meander flow, published in 1974, marked a major advance, from uniform bend flow to flow in truly meandering channels. The paper also contains several errors and omissions, some of which are by no means trivial. Both the achievements and the shortcomings of the work have acted to stimulate subsequent research, which is analyzed in this light. It is concluded that a paper of sufficient elegance, that touches at the heart of the problem at hand, may include many errors and still represent an achievement capable of stimulating the next generation of creative research. The resolution of the errors flows in part from the structural elegance of the theory.